

削孔時のロッド応力波を用いた 地山の圧縮強度推定に関する基礎的研究

Basic Study on Estimation of Compressive Strength of the Ground Using Rod Stress Waves During Drilling

塚本 耕治*

要 旨

山岳トンネルにおいて、施工時の安全性向上や安定したトンネルの品質を確保するためには、地山状態に応じて適切な支保パターンを選定することが重要である。発破時の装薬孔やロックボルト孔の削孔データから地山の圧縮強度を把握できれば、支保パターンや補助工法の選定に活用できる。そこで、圧縮強度が既知である試験体を用いて油圧式削岩機による削孔実験を行い、削孔中にロッドを伝播する応力波と試験体の圧縮強度との関係について検討した。その結果、応力波のうち削岩機側に戻る反射波の正負の応力振幅から求まる係数は圧縮強度と高い相関があり、地山の圧縮強度の推定に有効な指標であることを確認した。

キーワード：削孔調査、ロッド応力、応力振幅比、圧縮強度

1. まえがき

山岳トンネルの工事では、施工中に行う切羽の観察調査や変位計測に基づいて事前調査から求めた地山等級を見直し、適切な支保パターンを選定する。観察調査では、切羽の地山状況を把握するため、写真撮影やスケッチ図の作成などの目視調査のほか、地山をハンマー打撃し、その反発や破碎の状況から地山の圧縮強度を推定する場合がある。さらに、地山の圧縮強度を詳細に調査するため採取した岩石片を用いた点載荷試験や岩盤に対してシュミットハンマー試験を実施する場合がある。しかし、これらの方法は、切羽近くでの試験となるため脆弱な地山での適用が安全面から制約される場合があるほか、点載荷試験では採取する岩石片の形状や大きさ、潜在する亀裂の有無などにより、またシュミットハンマー試験では試験位置の浮石の有無などにより計測データが大きくばらつく場合がある。このような地山条件でも、原位置において地山の圧縮強度をリアルタイムに把握できれば、支保パターンを選定するうえで有用である。

トンネル現場では、施工機械である油圧式削岩機に計測装置を取り付け、削孔時における削岩機の各種油圧や削孔速度などの削孔データを取得し、単位体積あたりの打撃エネルギー（以下、掘削体積比エネルギー）などの指標を用いて原位置岩盤を評価する方法がよく用いられている^{1)~3)}。また、掘削体積比エネルギーは、地山の

圧縮強度のべき乗に比例する可能性がある³⁾と報告されている。しかし、掘削体積比エネルギーの計算に用いられる 1 打撃あたりのエネルギーは作動油圧や掘削ずり（掘削した岩石片）の排出状態によって変化しやすいうえ、地山条件によっても変化する。そのため、掘削体積比エネルギーの値から原位置での地山の圧縮強度を精度よく推定することは困難な状況にある。一方、削岩機による打撃力はビットを介して直接地山に作用することから、ロッドを伝播する応力波（弾性応力波、または弾性波）には、削孔位置の地山状態が反映されている。

これまでに室内実験でロッド応力を計測した事例はいくつか報告されているが、実際の削岩機を用いて地山を削孔しながらロッド応力を計測した事例は少ない⁴⁾。さらに、地山の圧縮強度に関連づけてロッド応力を評価した事例は見られない。そこで、本稿では圧縮強度が既知である試験体を用いた削孔実験を行い、ロッドを伝播する応力波と試験体の圧縮強度との関係から地山の圧縮強度を推定する方法について検討した。

2. 油圧式削岩機の概要

2.1 油圧式削岩機の削孔原理

油圧式削岩機は、図-1に示すように油圧ドリフタ、シャンクロッド、スリーブ、ロッド、ビットから構成される⁵⁾。油圧ドリフタ内のピストンは、油圧によりシリ

* 技術研究所土木研究グループ

ンダ内を前後に移動し、シャンクロッドを打撃する。打撃によりシャンクロッドに発生した応力波である打撃力のほか、回転モータからの回転力と削岩機の推力はスリーブ、ロッドを介してビットまで伝わる。ビットは、打撃力、回転力、推力を地山に作用させて、地山を破碎し、掘削する。このうち、打撃力が地山の破碎に寄与し、それ以外は補助的な役割を果たす。なお、ピストンはシャンクロッドを毎分2,800~4,500回打撃する。破碎した掘削ずりは、水などによるフラッシングにより破碎位置から取り除かれ、孔外に排出される。

2.2 削岩機の打撃によりロッドを伝播する応力波

削岩機の打撃による応力波の発生とロッドの伝播、地山の破碎機構³⁾の模式図を図-2に示す。図の(b)~(d)にはビット先端が地山に貫入する際のビット荷重(ビットから地山への荷重)と貫入深さの関係(以下、F-δ関係)を併記している。実際のF-δ関係は、載荷時、除荷時ともに直線ではなく曲線となるが、ここでは単純に直線で示した。油圧ドリフタ内のピストンがシャンクロッドを打撃して衝撃力を与えると、打撃した部位に局所的な圧縮応力が発生する(図-2(a))。局所的な圧縮応力は波としてスリーブを介してロッドを伝播する。ロッドを伝播する応力波の伝播速度は5080m/sであり⁴⁾、ロッドが棒状であることから1次元波動として扱うことができる(図-2(b))。応力波はビットまで伝播して先端部の地山との境界で入射波となり、ビットに埋め込まれたチップから地山内に透過するほか、ビットと地山の音響インピーダンスの違いから境界で引張応力の反射波が発生し削岩機側に戻っていく。F-δ関係では、ビット荷重が増えるにつれて貫入深さも大きくなる載荷過程に入る(図-2(c))。応力波の入射が終了すると、ビットは地山の剛性によって撥ね返され、反射波は引張応力から圧縮応力に変化する。F-δ関係では、ビット荷重の減少につれて貫入量が減少する除荷過程に入り、最終貫入量となる。なお、図のハッチングの部分が生じた地山の破碎に消費されたエネルギーに相当する(図-2(d))。ここで、地山に押し付けられた状態にあるビットの応力波の挙動を図-3に示す。ビット側を弾性体1、地山側を弾性体2として2つの弾性体が平面で接した状態に置き換えて考えると、境界面(弾性体1と弾性体2の境界)に入射波が到達して反射波と透過波に分かれる挙動として捉えることができる。この入射波と反射波の関係は、式(1)の反射係数⁶⁾で表すことができる。

$$\alpha = \frac{\sigma_R}{\sigma_I} = \frac{I_2 - I_1}{I_2 + I_1} = \frac{\rho_2 c_2 - \rho_1 c_1}{\rho_2 c_2 + \rho_1 c_1} \quad (1)$$

ここに、α：反射係数 (-1 ≤ α ≤ 1)

σ_I、σ_R：入射波の応力振幅、反射波の応力振幅
 I₁、ρ₁、c₁：弾性体1の音響インピーダンス、

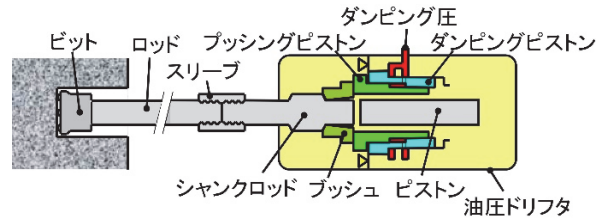


図-1 油圧式削岩機の構成

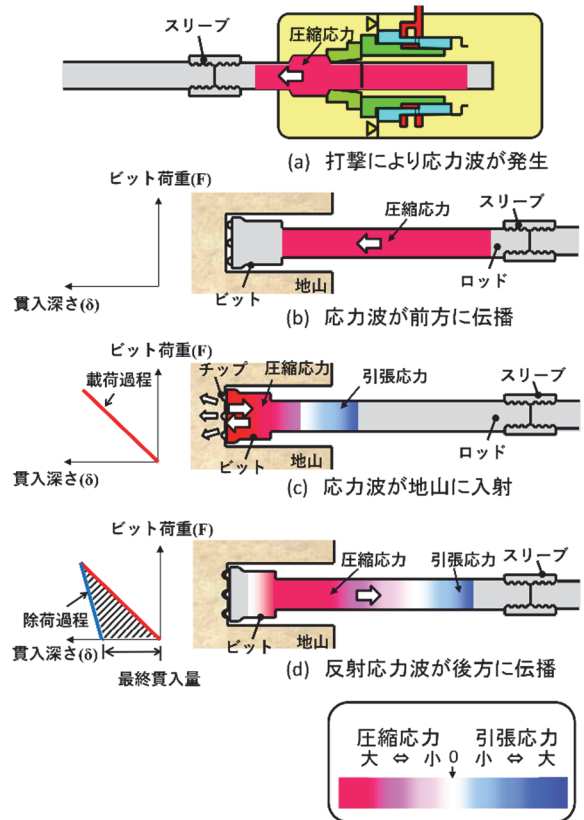
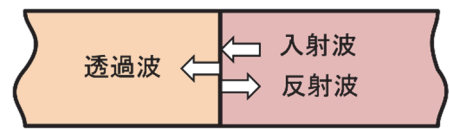


図-2 削孔時の打撃によるロッド応力波の伝播



地山：弾性体2(ρ₂, c₂) ビット：弾性体1(ρ₁, c₁)

図-3 境界面における応力波

密度、弾性波速度

I₂、ρ₂、c₂：弾性体2の音響インピーダンス、密度、弾性波速度

反射波は弾性体1と弾性体2の音響インピーダンスの大小関係によって符号が変わり、弾性体1から弾性体2への入射波が圧縮応力である場合には、相手の弾性体の音響インピーダンスが大きいと同符号の圧縮応力、小さいと異符号の引張応力となる。さらに、特別な場合として、弾性体1の境界が自由端の場合はI₂=0であり、α=

-1となる。一方、固定端の場合は $I_2 = \infty$ であり、 $\alpha = 1$ となる。実際の削孔場面を想定すると、ビットを地山に押し当てない状態で打撃する空打ちの場合には、 $\alpha = -1$ となるが、通常の地山を削孔する場合においてビットと地山の境界は固定端に成り得ないため、 $\alpha = 1$ とならない。以上から、ビットおよびロッド（弾性体 1）を伝播する反射波の振幅を把握し、反射係数を求めることができれば、式（1）を用いて地山（弾性体 2）の音響インピーダンスや圧縮強度を推定できると仮定し、検討を行った。

3. 模擬地山試験体を用いた削孔実験

3.1 実験概要

本実験では、まずセメント系固化材の種類を変えることにより圧縮強度の異なる地山を模擬した試験体を製作した。次に、これらの試験体を油圧式削岩機の打撃圧、回転圧、フィード圧、ダンピング圧の作動圧を変更し、削孔する際のロッド応力および削孔速度を計測した。

3.2 試験体の製作

試験体の製作には、4個の稲田花崗岩ブロック（100 cm×100 cm×100 cm）を使用した。岩石ブロックの削孔する面を上にし、φ127 mmのビットを装着した油圧クローラドリルを用いて一面の6か所から垂直方向に深さ60 cmの削孔を行った。続いて図-4のように岩石ブロックごと1種類の無収縮モルタルを厚さが50 cmになるように充填し、最上部に厚さ10 cmのキャップ用モルタルを充填して製作した。試験体の一軸圧縮強度を表-1に示す。一軸圧縮強度は、試験体ごとに充填したモルタルを用いて5本のテストピースを製作しておき、削孔実験の実施時間に合わせて一軸圧縮試験を行い、その平均値から求めた。なお、試験体 E は、試験体 D の岩石ブロックの花崗岩部分を新たに削孔する場合とした。

3.3 実験方法

削孔実験では、充填したモルタルの固化後、図-5のように充填を行った面が鉛直方向になるよう花崗岩ブロックを回転した後、モルタル充填した試験体の孔をφ64 mmのビットを用いて水平方向に60 cm程度の深さまで削孔した。削孔には、最も掘削性能が優れた油圧ドリフタ HD 250 を搭載したドリルジャンボ（古河ロックドリル製）を用いて行った。実験状況を写真-1に示す。削孔実験では、圧縮強度の異なる試験体を安定して削孔するため、打撃圧 16 MPa、フィード圧 6 MPa、ダンピング圧 9 MPa に設定した。

3.4 計測装置と計測方法

削孔実験の計測には、削岩機の油圧や削孔長などの削孔データを自動計測する削孔検層装置とロッド応力を計測する汎用の記録装置を用いた。計測ブロック図を図-6に示す。油圧式削岩機の油圧回路に設置した油圧センサを用いて打撃圧、回転圧、フィード圧、ダンピング

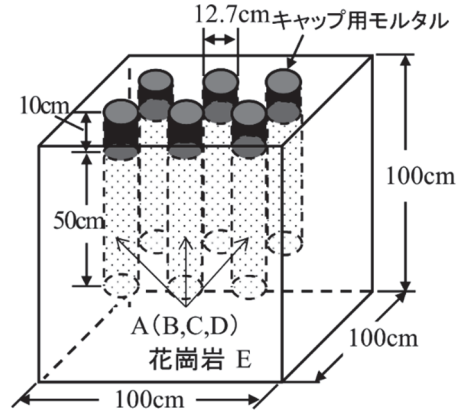


図-4 試験体の製作

表-1 試験体の一軸圧縮強度

試験体種別	岩石ブロック	養生期間 (hr)	一軸圧縮強度 f (MPa)	使用材料
A	1	336	0.3	無収縮モルタル(type1)
B	2	336	6.6	無収縮モルタル(type2)
C	3	336	49.8	無収縮モルタル(type3)
D	4	336	72.0	無収縮モルタル(type4)
E	4	-	187.4	稲田花崗岩

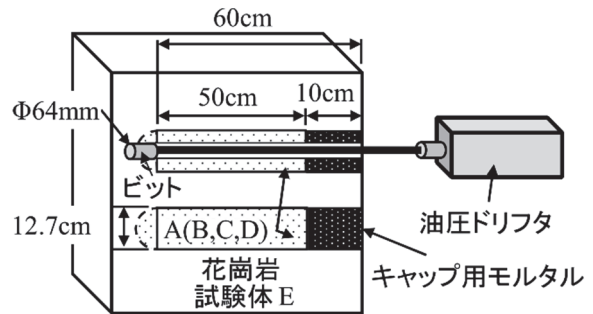


図-5 試験体の削孔方法



写真-1 試験体の削孔状況

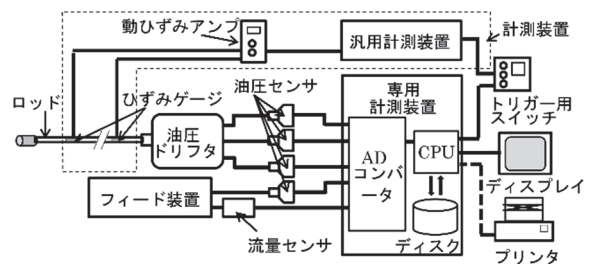


図-6 計測装置のブロック図

圧を計測する。また、ロッド応力の計測結果を削孔深さについて整理するため、削孔検層装置から出力される削孔長のデータを利用した。

岩石ブロック 1～岩石ブロック 4 を用いたロッドの応力を計測する実験では、長さ 370cm の六角中空ロッド（対辺 35 mm、内径 9.5 mm）を用いて福井ら⁴⁾と同様な方法で行った。ロッド応力の計測位置を図-7に、ロッド応力の計測に用いた計測機器のおもな仕様を表-2に示す。計測はロッドとシャンクロッドの接合部から 50 cm の位置に設置したひずみゲージ 1（測点 1）と、削孔時にセントライザと計測ケーブルが干渉しないようにひずみゲージ 1 からビット側に 170cm 離れた位置に設置したひずみゲージ 2（測点 2）の 2 か所で行った。なお、ロッドの曲げ応力の影響を打ち消すため、1 か所あたり 2 枚のひずみゲージ（東京測器製 FLA-2-11）を六角断面の対辺に貼った。削孔中はロッドが回転するため、事前に計測ケーブルを回転と逆方向に 30 回転ほどロッドに巻いておき、ロッドの回転で巻き戻されてさらに 30 回転ほどロッドに巻かれるまでの約 25 秒間（ロッド回転数：145 rpm）を計測した。記録装置（HIOKI 製 MR8847）では、2 測点のロッド応力のデータと削孔検層の専用計測装置の計測データを同期させてサンプリング周波数 1 MHz（サンプリング時間間隔 10^{-6} 秒）で記録した。

3.5 ロッド応力と反射係数

試験体 B の削孔時におけるロッド応力の計測波形例を図-8に示す。計測したひずみからヤング率を 205.8 GPa として応力に換算し⁴⁾、引張応力を正として表示した。測点 1 および測点 2 について、打撃による応力波が確認できる 0~5ms の範囲（破線枠）の拡大図を図-9に示す。このうち、削岩機の打撃による応力波がロッドを伝播して測点 1 に到達した時間を基準にすると（図-9 (a)）、ロッドの弾性波速度が 5080m/s であることから、170cm 前方の位置にある測点 2 には、0.335ms 遅れて到達する（図-9 (b)）。測点 1 から反射が想定されるビット先端までの距離が 325cm、シャンクロッド端部までの距離が 49cm であることを考慮して、応力波が到達する走時線を図中に併記した。実線の走時線が油圧ドリフタ側からビット側に伝播する応力波の走時を示し、破線がビット側から油圧ドリフタ側に伝播する応力波の走時を示している。ピストンがシャンクロッドを打撃した際に発生した応力波がビットに入射する第 1 入射波（赤色）とビット先端から削岩機側に戻る第 1 反射波（青色）を確認できる。また、ビット先端とシャンクロッド端部の間を繰り返し反射しながら振幅が減衰していることがわかる。

次に、圧縮強度の違いによる第 1 入射波と第 1 反射波の応力波形の変化を確認するため、圧縮強度が大きく変化する 3 種類の試験体 B、D、E を対象に比較した。各試験体を削孔した際のビットに入射する第 1 入射波形を

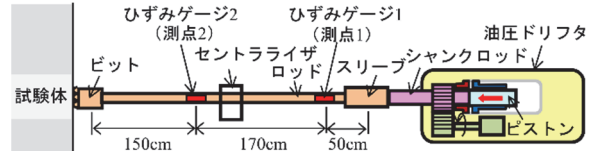
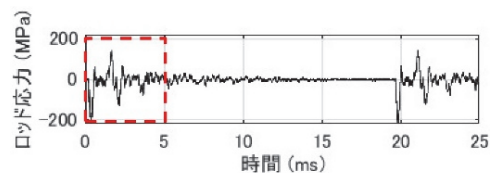


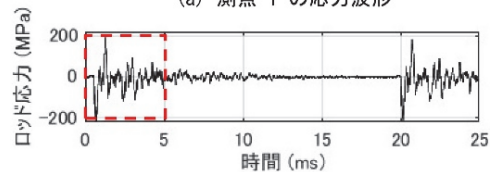
図-7 ロッド応力の計測位置

表-2 ロッド応力計測機器のおもな仕様

計測機器名	個数	おもな仕様	
ひずみゲージ	2×2測点	型式	FLA-2-11（東京測器）
		ゲージ長	2 mm
動ひずみアンプ	2	型式	DC96A（東京測器）
		応答周波数	DC~200 kHz
		最大出力	±10 V
記録装置	1	型式	MR8847-03（HIOKI）
		AD分解能	12 bit
		最大サンプリグ周波数	1 MHz

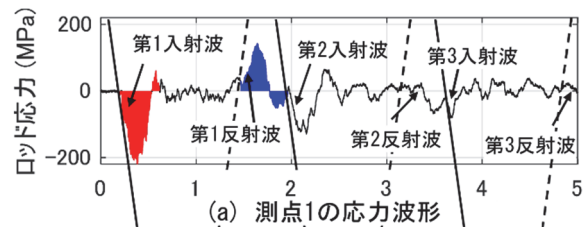


(a) 測点 1 の応力波形

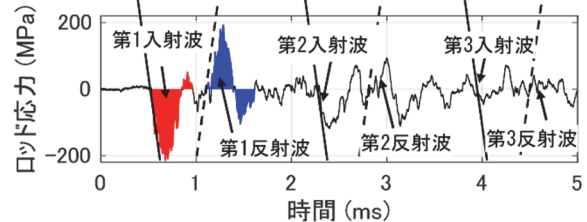


(b) 測点 2 の応力波形

図-8 削孔中のロッド応力波形例（試験体B）



(a) 測点 1 の応力波形



(b) 測点 2 の応力波形

図-9 ロッド応力波形の拡大図（試験体B）

比較した結果を図-10に示す。ビットに入射する応力波は、地山の破碎に寄与する圧縮応力が大きく、引張応力は小さい。また、試験体 B、D、E における入射波の圧縮応力の最大振幅は、それぞれ 184.9 MPa、222.8 MPa、210.0MPa と大きな差が見られないことからピストンの打撃力が概ね一定であったと推察できる。一方、ビットの応力波が試験体を破碎した後のビットから削岩機側に

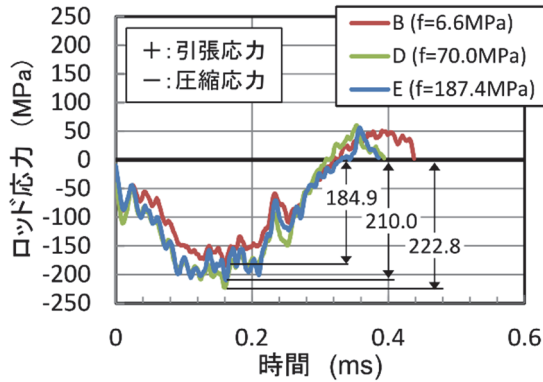


図-10 第1入射波形の比較 (測点1)

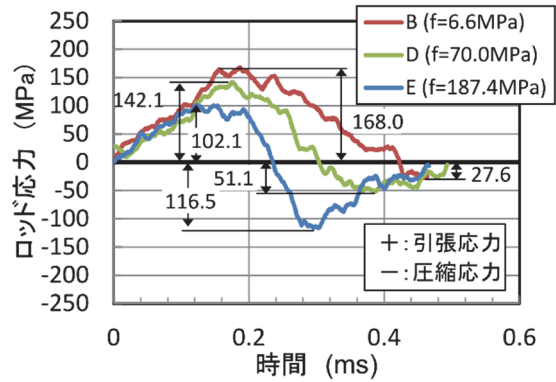


図-11 第1反射波形の比較 (測点1)

向かう第1反射波を比較した結果を図-11に示す。第1反射波では、圧縮強度が大きい試験体ほど引張応力の最大振幅が168.0 MPa、142.1 MPa、102.1 MPaと小さくなり、逆に圧縮応力の最大振幅が27.6 MPa、51.1 MPa、116.5 MPaと大きくなる。このことから、試験体の圧縮強度や剛性が大きくなるほどビットと試験体の音響インピーダンスの差が小さくなり引張応力が小さくなったこと、および応力波の入射が終了してビットに生じる反射波が圧縮応力になると、試験体の剛性が大きいほど試験体からの反発力が大きくなり反射波の圧縮応力が大きくなったと推察される。

入射波の主要な応力は圧縮応力であり、ロッドから音響インピーダンスの小さい試験体に入射することから反射波は引張応力となる。測点1のロッド応力波形から抽出したビット側に向かう応力波、および削岩機側に向かう応力波をビットと試験体の境界における入射波と反射波として反射係数を推定した。例えば、図-10の第1入射波形と図-11の第1反射波形の応力振幅を用いて試験体B、D、Eの反射係数を式(1)から求めると、-0.91、-0.64、-0.49となる。また、試験体を削孔する際に計測した複数の応力波形に適用し、求めた反射係数の平均値と応力波形数を表-3に示す。試験体Bの反射係数は-1.208で定義式の範囲外であったが、試験体A、C、D、Eの反射係数は-0.663、-0.621、-0.639、-0.299であった。圧縮強度が高い試験体ほど反射係数が大きくなると期待されたが、試験体が破砕されることもあり、試験体の圧縮強度と反射係数の相関は低いことがわかった。

4. 反射波の正負の応力振幅比と圧縮強度の関係

ロッド応力の結果では、試験体の圧縮強度が大きいほど反射波の引張応力は小さくなり、反射波の圧縮応力は大きくなった。そこで、図-12に示すように第1反射波の引張応力の最大振幅と圧縮応力の最大振幅を用いて反射波の正負の応力振幅比に基づく係数(以下、反射波の応力振幅比係数)を式(2)から求め、試験体の圧縮強度との関係を検討した。

表-3 各試験体における反射係数の平均値と応力波形数

試験体種別	一軸圧縮強度 f (MPa)	応力波形数	反射係数 α の平均値
A	0.3	207	-0.663
B	6.6	376	-1.208
C	49.8	944	-0.621
D	72.0	1266	-0.639
E	187.4	1823	-0.299

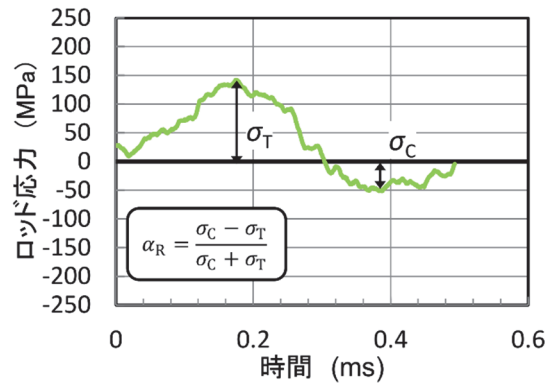


図-12 反射波の応力振幅比係数の算定法

$$\alpha_R = \frac{\sigma_C - \sigma_T}{\sigma_C + \sigma_T} \quad (2)$$

ここに、 α_R : 反射波の応力振幅比係数
 σ_C : 第1反射波の最大圧縮応力振幅
 σ_T : 第1反射波の最大引張応力振幅

反射波の応力振幅比係数においても、ビット先端が自由端の場合は $\sigma_C = 0$ と考えることができ、 $\alpha_R = -1$ となる。一方、固定端である場合は $\sigma_T = 0$ と考えることができ、 $\alpha_R = 1$ となる。よって、試験体の圧縮強度が大きくなると、係数の値が大きくなる。

各試験体を削孔した際に、ロッドの応力波から求めた反射波の応力振幅比係数の削孔深度分布を図-13に示す。図中には打撃ごとに求めた反射波の応力振幅比係数を○で示し、削孔深度方向の傾向を見るため、50個あたりの区間平均を赤線で示した。また、試験体の削孔区間における係数の平均値を併記した。なお、試験体の削

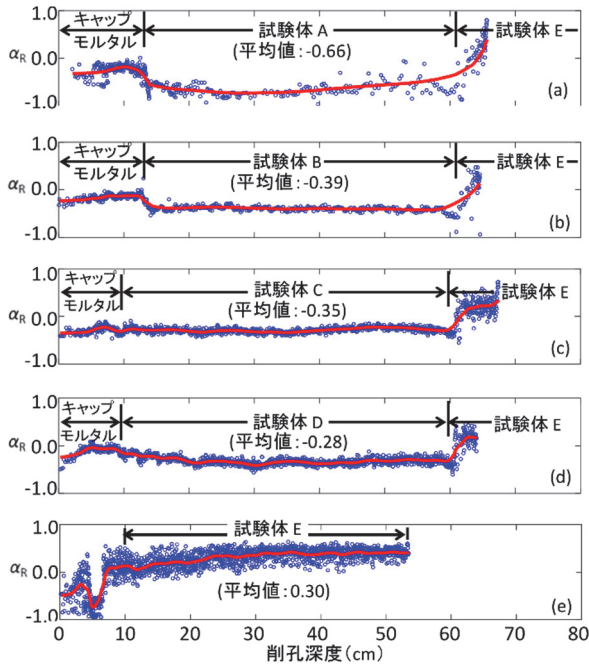


図-13 各試験体における反射波の応力振幅比係数 (α_R) の削孔深度分布

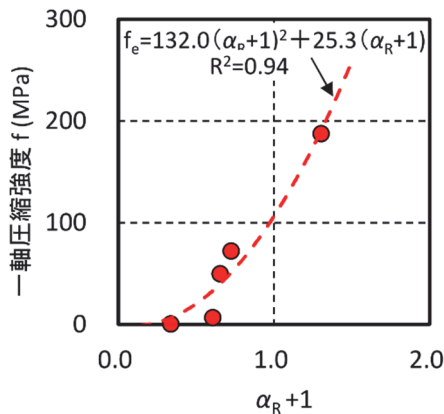


図-14 第1反射波の応力振幅比係数 (α_R) と一軸圧縮強度 (f) の関係

孔開始時のキャップ用モルタル部分は、作動油圧が低圧から急激に上昇する区間であるため、反射波の応力振幅比係数の評価から除外した。図より、試験体 A～試験体 E の反射波の応力振幅比係数の平均値は、 -0.66 、 -0.39 、 -0.35 、 -0.28 、 0.30 であり、圧縮強度が大きくなるほど反射波の応力振幅比係数が大きくなった。また、試験体 A～試験体 D から試験体 E の花崗岩に変化する位置（削孔深度が 60cm 付近）で反射波の応力振幅比係数が急激に大きくなった。

反射波の応力振幅比係数 (α_R) と試験体の一軸圧縮強度 (f) の関係を図-14 に示す。図は削岩機を空打ちした場合に $\alpha_R = -1$ 、 $f = 0$ となることから、この条件の結果が原点となるように横軸を $\alpha_R + 1$ として整理した。データ数は少ないが、両者の間には比較的高い相関が見られ

る。試験体からの反発力が反映される反射波の圧縮応力を考慮した指標（応力振幅比係数）を用いたことで、圧縮強度との相関が高くなったと推察される。関係式を 2 次の多項式近似により求めると、式 (3) となる。

$$f_e = 132.0 (\alpha_R + 1)^2 + 25.3 (\alpha_R + 1) \quad (3)$$

ここに、 f_e : 推定一軸圧縮強度 (MPa)

α_R : 反射波の応力振幅比係数

以上から、削孔時の反射波形の振幅から求めた反射波の応力振幅比係数を用いて地山の圧縮強度を推定できる。

5. まとめ

圧縮強度が既知である試験体を用いて削孔実験を行い、削岩機のロッドを伝播する応力波と圧縮強度との関係について検討した。その結果、提案した反射波の応力振幅比係数は、試験体の一軸圧縮強度との相関が高く、地山の圧縮強度を推定する際の有効な指標であることを確認した。ひずみゲージを貼付したロッドを事前に準備することで、トンネル切羽の地山が脆弱な場合であっても、本稿で示した方法によって地山の圧縮強度を把握することが可能である。

6. あとがき

今後、岩種の異なる岩石試験体や実際の岩盤を対象にした実験を行い、地山の圧縮強度の推定式の精度向上を図り、その適用性について検証したい。

【参考文献】

- 1) 塚本耕治、今泉和俊、「削孔検層システムによるトンネル切羽前方の地山予測」、奥村組技術研究年報、No.38、2012
- 2) 松井 保ほか、「トンネル技術者のための地盤調査と地山評価」、鹿島出版会、pp.189-200、2017.1
- 3) 山下雅之、石山宏二、福井勝則、大久保誠介、「さく岩機のさく孔効率と岩盤特性についての検討」、第41回岩盤力学に関するシンポジウム講演集、pp.1-6、2012.1
- 4) 福井勝則、阿部裕之、小泉匡弘、友定英貴、大久保誠介、「長尺さく孔におけるロッド応力の減衰」、Journal of MMIJ、Vol.123、pp.152-157、2007.5
- 5) 小泉匡弘、福井勝則、羽柴公博、「さく岩機の技術的変遷」、トンネルと地下、vol.47、No.1、pp.39-43、2016.1
- 6) 石川信隆、大野友則、別府万寿博、藤掛一典、「基礎からの衝撃工学」、森北出版、pp.127-161、2008.3

山岳トンネル用耐酸性セメント系支保材料の開発

ーロックボルト定着材および吹付けコンクリートー

Developing Acid-Resistant Cementitious Support Materials for Mountain Tunnels

- Rock Bolt Fixing Materials and Sprayed Concrete -

廣中哲也* 倉田桂政** 岩崎 光***

要 旨

強酸性湧水が発生する山岳トンネルでは、ロックボルト定着材や吹付けコンクリートのセメント系支保材料の酸劣化による機能の低下が問題となっている。本報では、耐酸性に優れたロックボルト定着材および吹付けコンクリートの開発を目的に、セメントの一部をシリカフェームと高炉スラグ微粉末で置換した混合セメントを用いたロックボルト定着材および吹付けコンクリートの基本物性試験と試験施工を実施した。その結果、山岳トンネル用セメント系支保材料の実用可能な初期強度発現性、優れた耐酸性および従来と同等以上の施工性を確認した。これにより、強酸性湧水による腐食環境下におけるセメント系支保材料の機能確保が期待できる。

キーワード：山岳トンネル、耐酸性、支保材料、ロックボルト定着材、吹付けコンクリート

1. まえがき

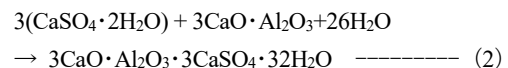
強酸性湧水が発生する山岳トンネルでは、ロックボルト定着材や吹付けコンクリートのセメント系支保材料の劣化による機能の低下が問題となっている。しかし、耐酸性を有する山岳トンネル用セメント系支保材料は開発されておらず、酸劣化への対策が課題となっている。コンクリートの耐酸性を向上するには、セメント量をできるだけ少なくして、セメントと水との水和反応で生成される水酸化カルシウム量を少なくすることが有効である²⁾³⁾。そこで、「セメント使用量を減ずるために混和材を混合すること」、「混和材のポゾラン反応性や潜在水硬性によって水酸化カルシウムを消費させ、かつ強度の確保も可能にすること」に着目して、セメントの半分をシリカフェームと高炉スラグ微粉末で置換した混合セメント（以後、耐酸性セメント）を用いたロックボルト定着材および吹付けコンクリートを開発した。

本報では、耐酸性セメントを用いたロックボルト定着材および吹付けコンクリート（以後、耐酸性ロックボルト定着材、耐酸性吹付けコンクリート）の基本物性試験と試験施工の結果から、実用可能な初期強度発現性、優れた耐酸性および従来と同等以上の施工性について報告する。

2. 酸による劣化と既存技術の活用

2.1 酸による劣化概要

酸による代表的な劣化例として、コンクリートの硫酸劣化を以下に示す。硫酸とコンクリートの間に起こる主な化学反応は、式(1)に示すセメントの水和反応で生成するコンクリート中のアルカリ硬化主成分である水酸化カルシウム(Ca(OH)₂)と硫酸との反応によって、二水石膏(CaSO₄・2H₂O)が生成される。その後、二水石膏は式(2)に示すように、セメント中のアルミニウム酸三カルシウム(3CaO・Al₂O₃)と反応し、エトリンガイト(3CaO・Al₂O₃・3CaSO₄・32H₂O)を生成する。これにより、二水石膏生成に伴う脆弱化、エトリンガイト生成に伴う膨張による結合力の消失、剥落等が発生する。



したがって、必要な強度を確保可能な範囲で、酸と反応する水酸化カルシウム等のセメント水和物の生成量を減らすために、セメント量を減らすことがコンクリートの耐酸性向上対策の一つとなる。

* 技術研究所土木研究グループ ** 西日本支社土木技術部 *** 土木本部技術部

2.2 既存技術の活用

既存技術の調査結果から、耐酸性に優れたセメント系材料に、米倉らが発明した耐酸性セメントを活用することとした⁴⁾。この耐酸性セメントは、質量比でポルトランドセメントまたは高炉セメント45~50%と、ポゾラン反応性を有し材齢7日程度までの初期強度を発現するシリカフェーム25~30%と、潜在水硬性を有し材齢3日以降の中長期強度を発現する高炉スラグ微粉末20~25%からなり、その合計が100%となることを特徴としている。このセメントの構成は、普通ポルトランドセメントまたは高炉セメントの使用量を半分以下に減らして、酸と反応して劣化する水酸化カルシウム生成量を減らすことで耐酸性を向上させることを目的としている。また、シリカフェームのポゾラン反応性と高炉スラグ微粉末の潜在水硬性は、水酸化カルシウムを消費して強度発現することから、耐酸性をさらに向上させることができる。なお、ポゾラン反応性とは、シリカ質とアルミナ(Al₂O₃)を主な組成とするポゾラン(シリカフェーム、フライアッシュ等)が水酸化カルシウムや、水と反応して化合物を生成する硬化現象、潜在水硬性とは、水酸化カルシウムの持つアルカリの刺激作用によって高炉スラグ微粉末が水と反応して化合物を生成する硬化現象である。

本開発では、耐酸性ロックボルト定着材および耐酸性吹付けコンクリートに用いる耐酸性セメントの混合率を、米倉らが発明した範囲内のポルトランドセメント50%、シリカフェーム25%および高炉スラグ微粉末25%の一定とした。

3. 耐酸性ロックボルト定着材

3.1 基本物性試験

a. 試験概要

ロックボルト定着材は、支保部材である鋼棒等のロックボルトを地山に固定する際、十分な定着力を確保するために、トンネル壁面から地山内部に穿孔された孔内のロックボルトと地山との間を充填する材料である。耐酸性ロックボルト定着材の配合を選定するため、フレッシュ性状および耐酸性等の硬化性状を評価する基本物性試験を実施した⁵⁾。

表-1に、各試験ケースの使用材料および配合を示す。ここでは、耐酸性セメントに用いるポルトランドセメントの種類、水結合材比および砂結合材比をパラメータとした。結合材は、ポルトランドセメント、シリカフェームおよび高炉スラグ微粉末の混合物とした。表-2に、基本物性試験時の測定項目および目標値を示す。練混ぜは、容量50Lパン型強制練ミキサーで行い、フロー試験、圧縮強度試験および5%濃度硫酸水溶液による質量変化試験を実施した。なお、ロックボルト定着材の耐酸性に関する品質規格値は定められていないため、フロー値お

よび材齢1日圧縮強度については、「NEXCOトンネル施工管理要領」のロックボルト定着材の規定値⁶⁾、耐酸性の質量変化率については、「下水道コンクリート構造物の腐食抑制技術及び防食技術マニュアル(以後、下水道防食マニュアル)」の規格値⁷⁾を目標値とした。

b. 試験結果

図-1に、耐酸性ロックボルト定着材のセメント種類・水結合材比と材齢1日圧縮強度を示す。材齢1日圧縮強度の目標値10N/mm²以上を満足する水結合材比は、耐酸性セメントに早強ポルトランドセメントを使用した配合で40~45%、普通ポルトランドセメントを使用した配合で40%であった。また、砂結合材比が一定の場合、水結合材比が大きいくほどセメント量が少なくなり、耐酸性が向上した。これらの結果から、普通ポルトランドセメント使用配合より水結合材比の大きい範囲で材齢1日圧縮強度を満足している早強ポルトランドセメント使用配合を耐酸性ロックボルト定着材の標準配合とした。

図-2に、5%濃度硫酸水溶液中の浸漬による耐酸性

表-1 各試験ケースの使用材料および配合

No	水結合材比 W/B (%)	空気量 (%)	砂結合材比 S/B	単位量(kg/m ³)					Ad Bx (%)
				W	結合材 B			S	
					C	SF	BFS		
1	40.0	5.0	1.50	286	357	179	179	1072	0.9
2,6	40.0	5.0	1.75	267	333	167	167	1167	1.0
3	40.0	5.0	2.00	250	312	156	156	1249	1.1
4,7	42.5	5.0	1.75	278	328	164	164	1146	0.9
5,8	45.0	5.0	1.75	290	322	161	161	1127	0.8

比較用(従来品) 一般の市販品:ロックボルト用プレミックスモルタル

【使用材料】
 水(W) : 水道水
 セメント(C) : No.1~5_早強ポルトランドセメント、密度3.14g/cm³、比表面積4700cm²/g
 No.6~8_普通ポルトランドセメント、密度3.16g/cm³、比表面積3270cm²/g
 シリカフェーム(SF) : ノルウェー産、密度2.23g/cm³、比表面積22.5m²/g
 高炉スラグ微粉末(BFS) : 密度2.91g/cm³、比表面積4340cm²/g
 細骨材(S) : 土佐産細砂、純粋密度2.62g/cm³、粗粒率2.15、吸水率1.48%
 混和剤(Ad) : 粉体高性減水剤、アリアルスルホン酸系化合物

表-2 基本物性試験時の測定項目および目標値

項目	目標値	試験方法
フロー値	150±20mm	JIS R 5201「セメントの物理強度試験」 ・温度条件20±2°C
圧縮強度	材齢1日 10 N/mm ²	JIS A 1108「コンクリートの圧縮強度試験」 ・温度条件20±2°C、封かん養生
耐酸性	質量変化率 ±10%	下水道マニュアル(5%濃度硫酸水溶液に28日間浸漬した場合) ・温度条件20±2°C、材齢1日脱型、材齢28日まで水中養生、その後28日間の硫酸水溶液浸漬

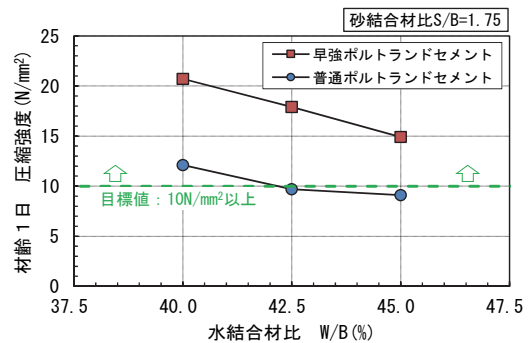


図-1 セメント種類・水結合材比と材齢1日圧縮強度

ロックボルト定着材の質量変化率を示す。耐酸性ロックボルト定着材の質量は、従来品が30%以上減少するのに対して、ほとんど変化しておらず、質量変化率の目標値±10%以内を満足した。また、従来品は、硫酸劣化によりセメント硬化体が剥落して質量減少しているのに対して、耐酸性ロックボルト定着材は、硫酸浸漬により質量増加していることから、酸による腐食環境下における支保機能低下を防止できると考えられる。

3.2 実トンネル試験施工

a. 試験概要

耐酸性ロックボルト定着材の施工性および定着性能等の品質を評価するために、山岳トンネル工事での試験施工を実施した。表-3に、試験施工条件および測定項目を示す。耐酸性ロックボルト定着材には、基本物性試験結果を基に決めた表-1の配合 No.4 を使用した。測定項目は、定着材のフロー値、材齢 1 日圧縮強度およびロックボルトの引抜き耐力とし、各目標値は、「NEXCO トンネル施工管理要領」の規定値とした。

図-3に、ロックボルトの試験施工位置図を示す。施工手順は、まず削孔機により上半断面1スパン分のアーチ部に直径45mmで長さ3mの挿入孔を削孔する。次に、図-4に示す連続混合式圧送装置を用いて、定着材を混練、圧送し、その孔に充填した後、ロックボルトを挿入した。また、施工本数は天端部1本、アーチ肩部2本、側壁部2本とし、施工位置は本設のロックボルトの位置からリング方向に50cm程度離して増打ち施工した。

b. 試験結果

写真-1に、耐酸性ロックボルト定着材の充填状況、写真-2に、ロックボルトの挿入状況を示す。トンネル側壁部～アーチ肩部～天端部までの5か所でロックボルトを施工した。天端部の上向き施工においても定着材の垂れ落ちやロックボルトの抜出し等の不具合はなく、通常と同様の施工ができることを確認した。

表-4に、耐酸性ロックボルト定着材の試験施工結果を示す。定着材のフロー値は、圧送前後で152mmと同じ値を示し、目標値150±20mmを満足した。また、圧送による定着材の流動性の変動が小さいことから、安定

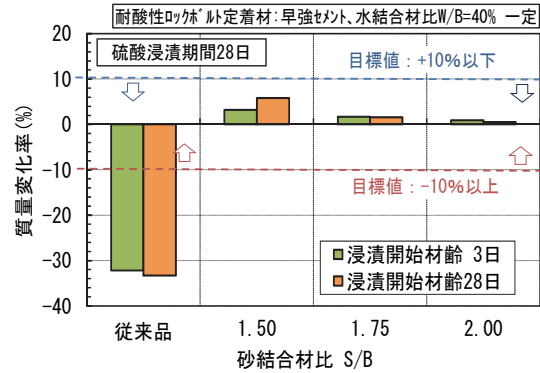


図-2 5%濃度硫酸水溶液による質量変化率

表-3 試験施工条件および測定項目

区分	項目	仕様・目標値・試験方法ほか
試験条件	定着材の配合	表-1のNo.4 配合
	地山の性状	地山等級CⅡ(風化していない、比較的新鮮な硬岩)
	施工方法	定着材の充填後、ロックボルトの挿入
	施工方向と本数	天端部1本、アーチ肩部2本、側壁部2本
	施工位置	通常のロックボルト位置からリング方向に50cm程度離れた位置(図-3参照)
	削孔径と定着長	直径45mm、長さL=3m
測定項目	ロックボルト	ねじり棒鋼:直径24mm、長さL=3m ねじ部降伏荷重180kN
	フロー値	150±20mm, JIS R 5201「セメントの物理試験方法」 ・温度条件: トンネル坑内14℃
	材齢1日圧縮強度	10N/mm ² , JIS A 1108「コンクリートの圧縮強度試験」 ・温度条件: トンネル坑内14℃, 封かん養生
	ロックボルト引抜き耐力	施工後3日150kN, JGS 3731-2005「NEXCO試験法条件」 ロックボルトの引抜き試験方法 ・温度条件: トンネル坑内13~15℃

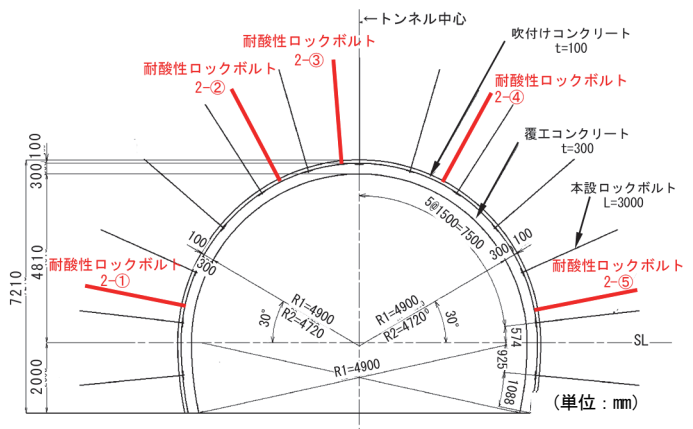


図-3 ロックボルトの試験施工位置図



写真-1 定着材の充填 写真-2 ロックボルトの挿入

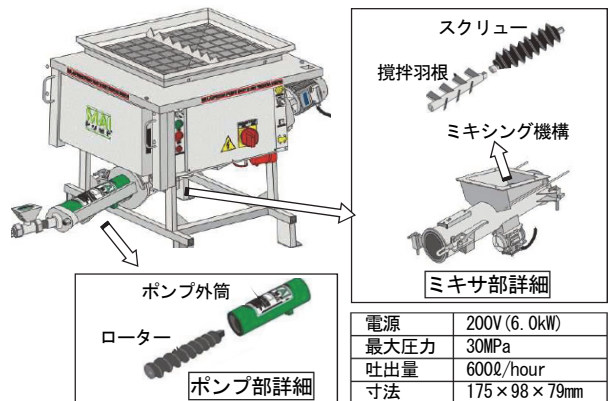


図-4 ロックボルト定着材の連続混合式圧送装置

した施工性および定着性能を確保できると考えられる。また、圧縮強度は、材齢1日で18N/mm²、材齢28日で57.4N/mm²となり、地山の早期支保を目的とした材齢1日の目標値10N/mm²以上を満足できた。

図-5に、ロックボルトの引抜き試験結果を示す。トンネル天端部、アーチ肩部および側壁部の5か所すべての施工位置において、ロックボルトの荷重-変位曲線は、ほぼ線形な関係を示し、引抜き耐力の目標値150kNを満足しており、所定の定着効果が得られた。

4. 耐酸性吹付けコンクリート

4.1 基本物性試験

a. 試験概要

吹付けコンクリートは、掘削直後の地山を早期に支保する目的で使用されるので、吹付け後の硬化を促進させる必要がある。そのため、吹付け噴射される直前のコンクリート（以後、ベースコンクリート）に、急結剤を混合し、吹き付ける。まず、耐酸性吹付けコンクリートの配合および急結剤量を決定するために、フレッシュ性状および強度発現性を評価する基本物性試験を実施した。

表-5に、基本物性試験および試験施工の使用材料と配合区分を示す。耐酸性セメントを用いた耐酸性配合と比較用の普通ポルトランドセメントを用いた従来配合の各配合区分に対して、水結合材比、混和剤・急結剤の種類および単位結合材量に対する急結剤の添加率（以後、急結剤添加率）をパラメータとして試験を実施した。混和剤については、耐酸性配合で標準形と保持形を、急結剤については、従来配合で従来形、耐酸性配合で人体に対する刺激成分の発生量が少ない低刺激形を使用した。

表-6に、基本物性試験時の測定項目および試験方法を示す。ベースコンクリートを生コン工場で製造し、現場まで運搬、荷卸しを行って、吹付け時に急結剤を混合する。そのため、ベースコンクリートのスランプ保持性能および急結剤添加後の強度発現性に着目して、耐酸性セメントを用いたベースコンクリートのスランプの経時変化試験およびコンクリート配合から粗骨材を除いたモルタルに急結剤を添加した試料の貫入抵抗による凝結試験を実施した。空気量については、「ベースコンクリートを圧縮空気ですりつぶすこと」、「吹付け噴射することで、コンクリート中の空気が抜けること」から、圧送性や強度発現性に影響しないため、測定項目としていない。なお、空気量は、「NEXCO トンネル施工管理要領」でも管理項目となっていない。ベースコンクリートは、容量10L 拡散混合式ミキサを用いて90秒間練り混ぜて製造した。また、急結剤添加のモルタルは、容量2L モルタルミキサを用いて、先にモルタルを60秒間練り混ぜた後、急結剤を投入して10秒間練り混ぜて製造した。

表-4 耐酸性ロックボルト定着材の試験施工結果

項目	測定値	目標値	
フロー値 (mm)	圧送前	152 (152×152)	150±20 mm
	圧送後	152 (154×150)	
圧縮強度 (N/mm ²)	材齢 1日	18.0	10 N/mm ²
	材齢 28日	57.4	18 N/mm ²

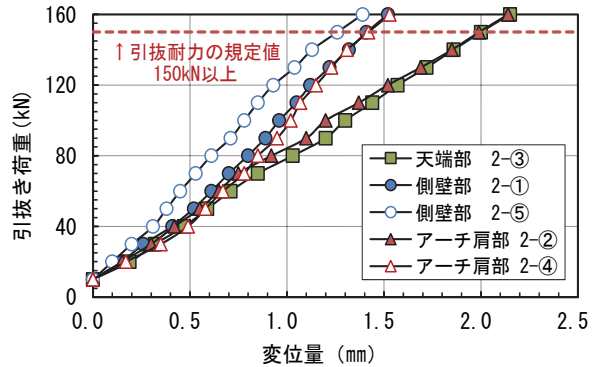


図-5 ロックボルトの引抜き試験結果

表-5 基本物性試験および試験施工の使用材料と配合区分

試験区分	配合区分	水結合材比 W/B (%)	空気量 (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量(kg/m ³)					Ad B× (%) (種類)	粉じん低減剤 B× (%) (種類)	急結剤 B× (%) (種類)	
					W	結合材 C	B SF	BFS	S				G
基本物性試験	耐酸1	60	3.0	60	216	180	90	90	985	674	1.2 (Ad1, Ad2)	-	7.9 (CA2)
	耐酸2	50	3.0	60	200	160	100	100	988	676	1.7 (Ad1, Ad2)	-	7.9 (CA2)
	従来1	60	3.0	60	216	360	-	-	1002	686	-	-	7 (CA1)
	従来2	50	3.0	60	200	400	-	-	1007	689	-	-	7 (CA1)
試験施工	耐酸	60	3.0	60	216	180	90	90	985	674	1.9 (Ad2)	-	9 (CA2)
	耐酸低減	60	3.0	60	216	180	90	90	985	674	1.9 (Ad2)	1.0	9 (CA2)
	従来低減	60	3.0	60	216	360	-	-	1002	686	-	1.0	7 (CA1)

【使用材料】
 水(W) : 水道水
 セメント(C) : 普通ポルトランドセメント、密度 3.15g/cm³、比表面積 3220cm²/g
 シリカフェーム(SF) : ノルウェー産、密度 2.23g/cm³、比表面積 22.5m²/g
 高炉スラグ微粉末(BFS) : 密度 2.89g/cm³、比表面積 4310cm²/g
 結合材(B) : C+SF+BFS
 細骨材(S) : 姫川産川砂、密度 2.61g/cm³、粗粒率 2.72、吸水率 1.99%
 粗骨材(G) : 糸魚川産砕石、最大骨材寸法 13mm、密度 2.68g/cm³、吸水率 1.09%
 混和剤 標準形(Ad1) : 高性能減水剤、ポリエチレングリコール系化合物、密度 1.05g/cm³
 混和剤 保持形(Ad2) : 高性能減水剤、スランプ保持成分調整品、密度 1.05g/cm³
 粉じん低減剤 : 水溶性高分子系、白灰色粉末、密度 2.40g/cm³
 急結剤 従来形(CA1) : カルシウムアルミネート系化合物、粉体、密度 2.73g/cm³
 急結剤 低刺激形(CA2) : カルシウムアルミネート系化合物、粉体、密度 2.68g/cm³

表-6 基本物性試験時の測定項目および試験方法

項目	目標値・試験方法
スランプ値	JIS A 1101「コンクリートのスランプ試験方法」 ・目標値：荷卸し時 16±2.0 cm、経時後 10cm 以上 ・温度条件：20±2°C ・測定時間：練混ぜ直後、20分後、40分後
貫入抵抗値 (凝結時間)	JSCE-D 102「吹付けコンクリート(モルタル)用急結剤品質規格(案)」：附属書3「急結剤を添加したモルタルの貫入抵抗による凝結時間測定方法」 ・温度条件：20±2°C

b. 試験結果

図-6に、高性能減水剤の種類によるベースコンクリートのスランプの経時変化を示す。耐酸性セメントを用いた場合、標準形高性能減水剤ではスランプの低下が速くなっており、ベースコンクリートの運搬・圧送時間の確保が困難と考えられる。一方、保持形高性能減水剤を用いた結果では、練混ぜからの経過時間40分でスランプの低下を抑えられることが確認でき、ベースコンクリートの運搬・圧送時間を確保することが可能となる。

図-7に、表-5の粗骨材を除いたモルタルでの従来配合と耐酸性配合の凝結試験結果を示す。水結合材比が小さく、急結剤添加率が高いほど、貫入抵抗値の発現は速くなっている。また、従来配合の急結剤標準添加率7%の貫入抵抗値以上を示す耐酸性配合の急結剤添加率は、水結合材比50%で7%、水結合材比60%で9%となった。これにより、地山の早期支保を目的として、従来配合と同等以上の早期に強度発現が得られる耐酸性配合は、水結合材比50~60%で急結剤添加率を9%とすればよいことが分かった。

4.2 模擬トンネル試験施工

a. 試験概要

耐酸性吹付けコンクリートの強度特性、耐酸性および施工性を評価するために、実機を用いた模擬トンネルでの試験施工を実施した。表-5に示すように、基本物性試験の結果をもとに、耐酸性吹付けコンクリート配合（以後、耐酸性配合）は水結合材比60%、急結剤添加率9%とし、比較用に粉じん低減剤を使用した従来吹付けコンクリート配合（以後、従来低減配合）と粉じん低減剤を使用した耐酸性吹付けコンクリート配合（以後、耐酸性低減配合）の3種類の配合を用いた。なお、耐酸性配合と耐酸性低減配合の混和剤の種類は、保持形高性能減水剤とし、添加率を基本物性試験時より増やして1.9%とした。

表-7に、使用設備と吹付け条件、図-8に、吹付け設備を示す。1配合あたり1.5m³のベースコンクリートを生コン工場で製造し、アジテータ車により模擬トンネル実験場まで15分で運搬して、図-9に示す断面積20.5m²、延長20mの模擬トンネルの壁面に、山岳トンネル工事で使用されている吹付け設備を用いて吹き付けた。

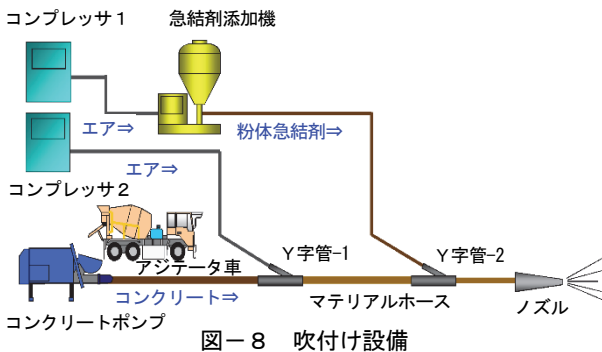
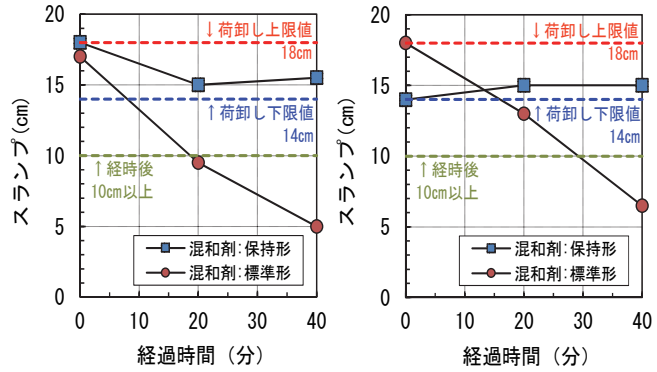
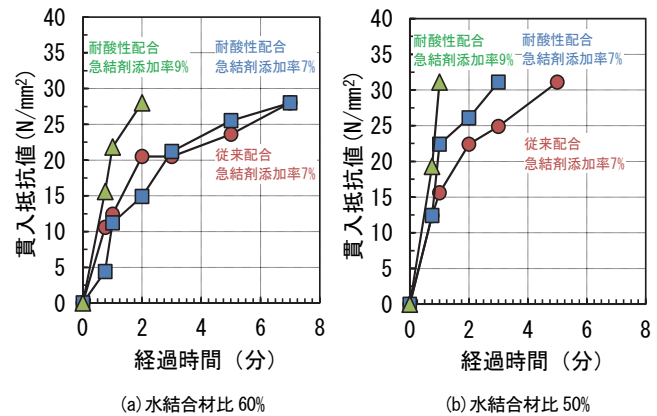


図-8 吹付け設備



(a) 耐酸性配合1:水結合材比60% (b) 耐酸性配合2:水結合材比50%

図-6 ベースコンクリートのスランプの経時変化



(a) 水結合材比60% (b) 水結合材比50%

図-7 従来配合と耐酸性配合の凝結試験結果

表-7 使用設備と吹付け条件

種類	仕様	吹付け条件
生コン工場ミキサ	強制2軸型、最大容量2.5m ³	1.5m ³ /バッチ
模擬トンネル	断面積20.5m ² 内空幅5.3m、高さ4.4m 延長20m	-
吹付け機	ブーム長3.0m 最大吹付け高さ7.9m 最大吹付け幅10.19m	空気量5.0m ³ /min
急結剤添加装置	粉末圧送能力8kg/min	空気量3.8m ³ /min
コンクリートポンプ	定置式エンジンタイプ 油圧2ピストン式 理論吐出量14~26m ³ /h	圧送量10m ³ /h
コンプレッサ	100PS級エンジン式2台	-

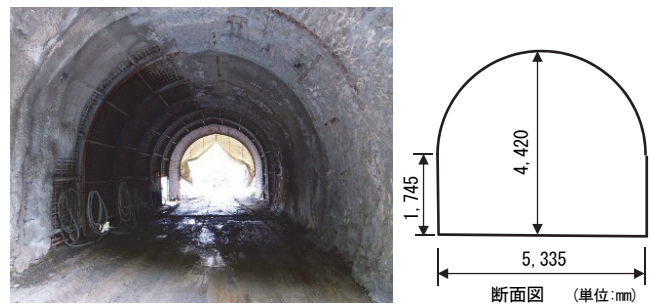


図-9 模擬トンネル（断面積20.5m² 延長20m）

表-8に、模擬トンネル施工時の測定項目および目標値を示す。地山支保のための強度特性に着目して、土木学会コンクリート標準示方書規準編⁸⁾(以後、土木学会規準)の引抜き方法による吹付けコンクリートの初期強度試験(以後、プリアウト試験)、コア採取による圧縮強度試験および酸性岩盤からの酸性湧水に対する耐酸性に着目して、「下水道防食技術マニュアル」の5%濃度硫酸水溶液による質量変化試験を実施した。また、実機を用いた施工性に着目して、土木学会規準の吹付けコンクリートのはね返り試験および吹付けコンクリートの粉じん濃度測定を実施した。なお、強度特性の目標値は、「NEXCO トンネル施工管理要領」の規定値、耐酸性の目標値は、「下水道防食マニュアル」の規格値とした。

b. 試験結果

図-10に、実機を用いた吹付けコンクリートのプリアウト試験による引抜き強度、図-11に、吹付けコンクリートのコア試験体による圧縮強度を示す。図-10より、吹付けコンクリートの材齢1日の引抜き強度は、従来低減配合、耐酸性配合、耐酸性低減配合の順で大きくなり、耐酸性の2配合は、目標値 5N/mm² に対して 1.7~1.9 倍の値を示し、地山の早期支保を目的とした初期強度の発現性を確保できた。また、耐酸性2配合の材齢3時間の引抜き強度は、従来低減配合に対して 0.7 倍と小さい値を示している。これは、耐酸性セメントを用いた配合の場合、急結反応に使用される普通ポルトランドセメント量が、従来低減配合の半分程度と少ないことに起因しているが、材齢1日の引抜き強度が目標値を大きく上回っていることから実用上問題ないと判断できる。

図-11より、耐酸性2配合の材齢7日のコア圧縮強度は、従来低減配合 26.0N/mm² に対して 0.75 倍程度と小さく、耐酸性2配合の材齢28日のコア圧縮強度は、従来低減配合 37.8N/mm² に対して 1.2 倍と大きくなっており、材齢28日の目標値 18N/mm² を十分に満足した。これにより、耐酸性セメント中のシリカフェュームのポゾラン反応性と高炉スラグ微粉末の潜在水硬性の反応速度は、セメントの水和反応に比べて遅く、長期強度発現性は大きくなること分かった。

図-12に、吹付けコンクリートのコア試験体の5%濃度硫酸水溶液による質量変化率を示す。耐酸性2配合の硫酸浸漬期間28日の質量変化率は、-1.96~-1.62%で目標値±10%を満足し、従来低減配合に対して 0.21~0.25 倍と小さくなった。これにより、耐酸性セメントを使用することで、質量変化率が大幅に向上することが確認できた。

写真-3に、模擬トンネルにおける耐酸性吹付けコンクリートの吹付け状況を示す。学識経験者、山岳トンネル施工経験者および建設・材料メーカー技術者を合わせて10名による吹付け性状の目視・指触評価を行った。その結果、ノズル吐出後の白いスジ発生による混合不良、

表-8 模擬トンネル施工時の測定項目および目標値

測定項目		目標値	試験方法
スランブ値		16±2.0cm	JIS A 1101「コンクリートのスランブ試験方法」 ・温度条件：模擬トンネル坑内10℃ ・測定時期：練混ぜ直後
硬化特性	引抜き強度	材齢1日 5 N/mm ²	JSCE-F 561「吹付けコンクリート(モルタル)の圧縮強度供試体の作り方」 JSCE-G 561「引抜き方法による吹付けコンクリートの初期強度試験方法」 ・材齢3時間まで20℃現場気中養生 ・材齢1日まで20℃気中養生
	コア圧縮強度	材齢28日 18 N/mm ²	JSCE-F 561「吹付けコンクリート(モルタル)の圧縮強度供試体の作り方」 JIS A 1107「コンクリートからのコアの採取方法及び圧縮試験方法」 ・材齢3日まで20℃気中養生 ・材齢3日でコア採取後、材齢28日まで20℃水中養生
耐酸性	質量変化率	±10%	下水道マニュアル(5%濃度硫酸水溶液に28日間浸漬した場合) ・材齢5日まで20℃気中養生 ・材齢5日でコア採取後、材齢28日まで20℃水中養生、その後28日間の硫酸水溶液浸漬
施工性	はね返り率	-	JSCE-F 563「吹付けコンクリート(モルタル)のはね返り率試験方法(案)」
	粉じん濃度	-	JSCE-F 564「吹付けコンクリート(モルタル)の粉じん濃度方法」

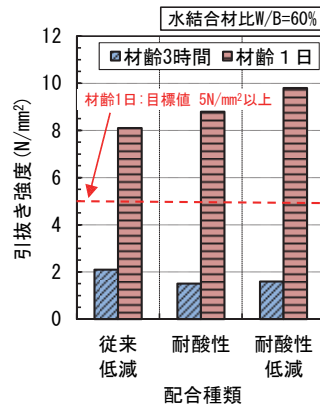


図-10 引抜き強度

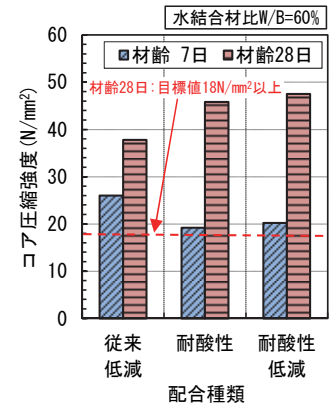


図-11 コア圧縮強度

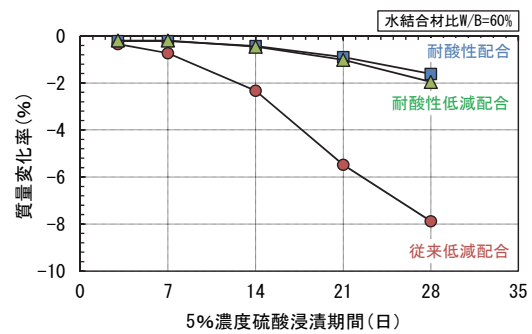


図-12 5%濃度硫酸水溶液による質量変化



写真-3 模擬トンネル吹付け状況

ノズル先端からのたれ、吹付け面の急結不良および吹付け面のまくられ、はね返り、たれ等の付着不良は発生せず、従来の吹付け設備と方法により、従来と同等の吹付け施工が可能であることを確認した。

図-13 に、吹き付けたコンクリート量と急結剤量の合計に対するはね返った材料の質量率（以後、はね返り率）、図-14 に、吹付け位置から 5m 地点のデジタル粉じん計による粉じん濃度を示す。図-13 より、耐酸性 2 配合のはね返り率は、従来低減配合に対して、0.75～0.81 倍と小さな値を示しており、耐酸性セメントを使用することで、トンネル施工における吹付け材料のロスを低減できる。図-14 より、吹付け中の粉じん濃度は、従来低減配合、耐酸性配合、耐酸性低減配合の順に小さくなっており、耐酸性セメントを使用することで、トンネル施工における坑内環境を改善できる。これらは、耐酸性セメントに使用しているシリカフュームが、セメントの比表面積に比べて 50～60 倍の粒径の超微粒子であるため、フレッシュ時のコンクリートの粘性を高めたことに起因すると考えられる。

5. まとめ

耐酸性に優れたロックボルト定着材および吹付けコンクリートの開発を目的に、耐酸性セメントを用いた基本物性試験および試験施工を実施し、以下の結果を得た。

- i. 地山の早期支保を目的とした材齢 1 日圧縮強度で 10N/mm² 以上の初期強度発現性、5%硫酸水溶液の質量変化率で従来品の 1/10 程度の優れた耐酸性を有する耐酸性ロックボルト定着材が得られた
- ii. 耐酸性ロックボルト定着材の山岳トンネル工事試験施工により、定着材のたれ落ちやロックボルトの抜け出しのない、従来と同様の施工性およびロックボルト引抜き耐力を満足する定着性能を確認した
- iii. 地山の早期支保を目的とした材齢 1 日引抜き強度で 5N/mm² 以上の初期強度発現性、5%硫酸水溶液の質量変化率で従来配合の 1/4 程度の優れた耐酸性を有する耐酸性吹付けコンクリートが得られた
- iv. 耐酸性吹付けコンクリートの模擬トンネル試験施工により、混合、急結および付着不良のない従来と同等の施工性を確認し、粉体急結剤を使用した場合ははね返り率の減少による材料ロスの低減および粉じん濃度の減少による坑内環境の改善が可能である

6. あとがき

強酸性湧水による腐食環境下における山岳トンネルのセメント系支保材料として使用するために、初期強度発

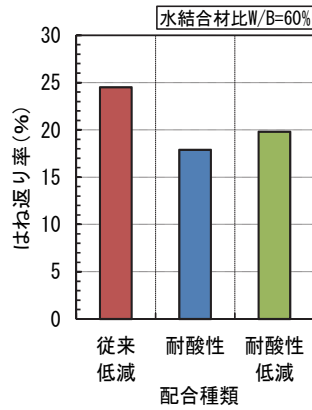


図-13 はね返り率

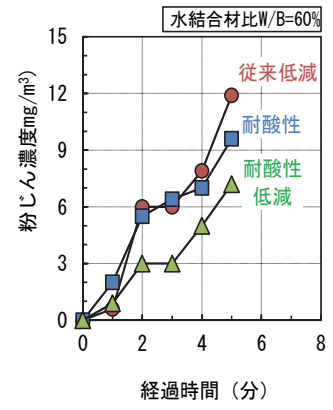


図-14 粉じん濃度

現性を保持し、優れた耐酸性と施工性を有するロックボルト定着材および吹付けコンクリートを開発した。これにより、酸性湧水に対して、これまで対策されていなかった地山側のセメント系支保材料の耐酸性を向上させたことで、支保機能の確保が期待できる。今後は、酸性湧水の腐食を受けるトンネルの超寿命化の一助となるように、本材料の普及展開に努め、施工実績を増やしたい。なお、耐酸性ロックボルト定着材については、米倉亜州夫 広島大学名誉教授、(株)ケー・エフ・シーと、耐酸性吹付けコンクリートについては、米倉亜州夫 広島大学名誉教授、デンカ(株)と共同開発した。

【参考文献】

- 1) 伊藤光宏、上野博務、谷川 学、「酸性水の湧出するトンネルの長期耐久性に配慮した設計・施工」、トンネルと地下、Vol.51、No.12、pp.19-30、2020.12
- 2) 米倉亜州夫、「下水道用耐硫酸性コンクリートの開発」、電力土木、No.329、pp.3-8、2007.5
- 3) 若杉 哲、米倉亜州夫、伊藤秀敏、沼田晋一、「高炉フュームによる耐硫酸性モルタルの開発研究」、Cement Science and Concrete Technology、No.57、pp.91-96、2003
- 4) 米倉亜州夫、伊藤秀敏、山本修照、「耐酸性セメント組成物及びそれを配合した耐酸性モルタル又はコンクリート」、特許第 5924612 号、2016.4.28
- 5) 米倉亜州夫、廣中哲也、倉田桂政、松尾 勉、田中祐介、「耐酸性セメントを用いたロックボルト定着材の基本物性および試験施工」、土木学会第 74 回年次学術講演会、VI-924、2019.9
- 6) 東日本・中日本・西日本高速道路、「トンネル施工管理要領」、高速道路総合技術研究所、2020.7
- 7) 日本下水道事業団、「下水道コンクリート構造物の腐食抑制技術及び防食技術マニュアル」、下水道事業支援センター、2017.12
- 8) 土木学会、「2018年制定コンクリート標準示方書〔標準編〕土木学会規準および関連規準」、2018.10

マスコンクリートのパイプクーリングにおける 流量制御システムの開発

Development of Flow Control System for Pipe Cooling for Mass Concrete

齋藤隆弘* 川口昇平* 外木場康将**

要 旨

マスコンクリートのひび割れ制御方法の一つであるパイプクーリングについて、クーリング水の流量をコンクリート温度に応じて制御するシステムを開発した。本システムでは、ひび割れ抑制を目的として事前に行った解析により算出したコンクリート温度変化に追従するようにクーリング流量を自動で制御し、さらにクーリング水の温度上昇によるコンクリートの冷却効果の損失を解消するために、クーリング水の流方向を逆転できるようにした。

また、本システムの実施工への適用性を確認するため、実規模のコンクリート供試体について、コンクリート打設後 1 週間にわたり本システムを適用したパイプクーリングを実施した。その結果、システムが想定通りに稼働することを確認するとともに、ひび割れ抑制に効果的なコンクリート温度に制御することができた。

キーワード：マスコンクリート、パイプクーリング、流量制御、流方向制御

1. まえがき

マスコンクリートの施工では、所要の性能および機能を有するコンクリート構造物を構築するため、セメントの水和熱による温度ひび割れについて検討を行ったうえで、適切な対策が講じられる。温度ひび割れを抑制あるいは制御する方法としては、ひび割れ誘発目地、パイプクーリング、膨張コンクリートの使用、ひび割れ制御鉄筋の使用等があり、その効果と経済性を総合的に判断して対策が決められる。この中で、パイプクーリングは、水門、橋脚等数多くの施工実績^{例(1)}を有し、有効な手法の一つといえる。

パイプクーリングを適用する際には、クーリングパイプの位置、クーリング水の温度および流量をパラメーターとして変化させたFEMによる温度応力解析が行われ、パイプクーリング計画が作られる。また、温度応力解析では、ひび割れの発生が抑制できるコンクリートの温度履歴も求められる。

一般的なパイプクーリングは、定量のクーリング水を一定期間コンクリート中に配置された鋼管内に流すのみであり、ひび割れ抑制に最適なクーリング流量などのコントロールを行っているわけではない。一方、パイプクーリングにおいて、コンクリートの冷却効率はクーリング流量の影響を受ける²⁾ことから、クーリング流量を適宜変更することにより、コンクリート温度をひび割れ

抑制に適した温度履歴に追従させることが可能であると考えられる。また、コンクリートに埋設されるクーリングパイプの1系統あたりの延長が長いと、パイプ内でクーリング水が温められ、下流側での冷却効果が損なわれる。

このため、開発したパイプクーリング制御システムにおいては、パイプクーリングを適用した場合の温度応力解析を行い、有害なひび割れが発生しない発熱履歴を算出する。その結果に基づいたコンクリート温度制御位置の温度履歴から、クーリング実施中のコンクリート温度の管理目標値を設定する。管理目標値の設定フローを図-1に示す。クーリング実施時には、制御位置でのコンクリート温度と管理目標値の差分に基づきクーリング流量を制御することによって、コンクリート温度を効果的に制御した。さらに、パイプクーリング内の流方向を一定条件のもと逆転させることにより、クーリング水の温度差に起因する冷却効果の損失の解消を図った。パイプクーリングの実施フローを図-2に示す。

ここでは、奥村組技術研究所敷地内での実大規模の供試体を用いた施工実験により、開発したシステムの稼働状況および効果を確認したので結果を報告する。

2. パイプクーリング制御システムの概要

コンクリートのクーリング制御システムを図-3に示

*技術研究所土木研究グループ **東日本支社土木技術部

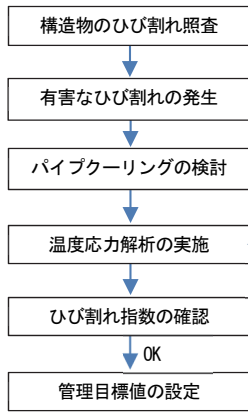


図-1 管理目標値の設定フロー

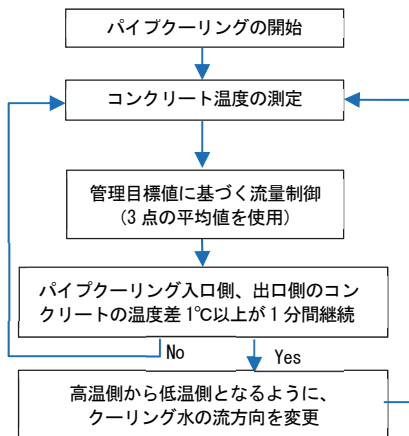


図-2 パイプクーリングの実施フロー

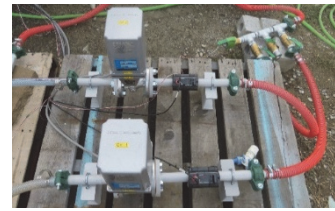


写真-1 流量コントロールバルブセット



写真-2 方向制御用バルブセット

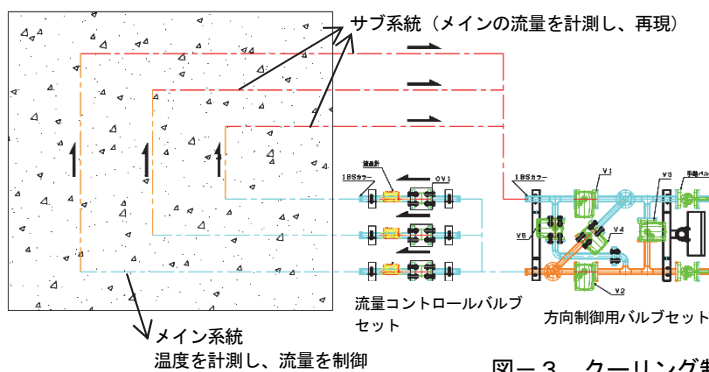
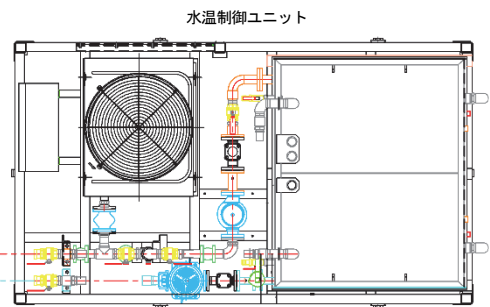


図-3 クーリング制御システム



水温制御ユニット

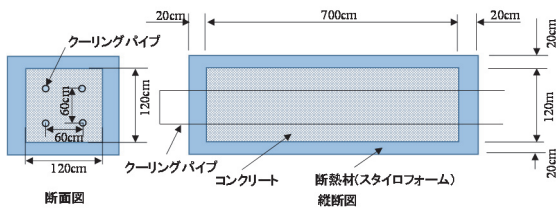


図-4 供試体と断熱材の寸法

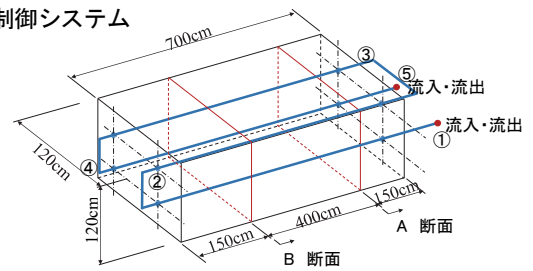


図-5 クーリングパイプの配置

す。クーリング水の温度を10~20°Cに保つための水温制御ユニット、クーリング水の流方向を変える方向制御用バルブ、流量コントロールバルブ、制御用のPLC（シーケンサ）、コンクリート温度を測定する熱電対、から構成されている。クーリング制御システムの特長は下記の通りである。

水温制御ユニットを使用して冷却水の温度を管理するとともに、予定する流量が確保できるように、付属ポンプのインバーターにより水圧調整を行う。

メインシステムにおいてコンクリート温度のモニタリングを行い、あらかじめ実施したFEMによる温度応力解析の結果に基づき設定したコンクリート温度の管理目標値に漸近させるように、PID制御によりクーリング流量を制御する。流量の変更は、コントロールバルブを制御することにより行い、制御にはPLCを使用する（流量コントロールバルブセットは写真-1を参照）。

クーリングパイプ下流側のクーリング水の温度上昇による冷却効果の損失を防ぐため、コンクリート中のクーリングパイプの流入口と流出口近傍のコンクリート温度が所定の温度差以上になるとクーリング水の流方向を変える（方向制御用バルブセットは写真-2を参照）。

複数系統でクーリングを行う場合、制御系をシンプルにするため、サブシステムについては、メインシステムの流量を計測し、それを再現するように制御する。

3. 実規模施工実験

3.1 実験概要

a. 供試体および実験設備

パイプクーリングに使用した供試体と断熱材の寸法を図-4に、クーリングパイプの配置を図-5に、実験状況を写真-3に示す。試験体の大きさは120cm×120cm×

700cmである。試験体の周囲には、試験体表面の断熱のために厚さ20cmのスタイロフォームを配置した。クーリングパイプは、**図-5**に示すように断面内に4本配置し、パイプの間隔を60cm、パイプから供試体端部までの距離を30cmとした。クーリングパイプの仕様を**表-1**に示す。クーリングパイプの系統は、供試体内を通過するメイン系統に加え、サブ系統においてメイン系統の流量を再現できるかを確認するため、供試体外にダミーの配管を1系統配置した。

b. 計測値の配置

図-5に示すA断面、B断面にコンクリート温度測定用の熱電対を設置し、A断面には制御用の熱電対も設置した。A断面における計測器の配置を**図-6**に示す。図中の●はクーリングパイプの位置を示し、その他の○は熱電対の位置を示している。また、制御に使用した熱電対の位置は、クーリングパイプの入口側(制御-2)、中間(制御-3)、出口側(制御-1)のパイプ外縁から10cmの離隔とし、位置を○で示す。クーリング流量の制御については、上記の3点の平均値を使用している。熱電対および流量のデータは制御用に0.1秒ごとにサンプリングし、3分ごとにロガーに記録した。

流方向の制御に関しては、制御用の熱電対のうち、入口側(制御-2)、出口側(制御-1)の温度を採用し、その差が1℃以上となる状態が1分間継続したとき、流方向を逆転させる制御としている。

クーリング水のルートを下に示す(**図-5**参照)。すなわち、①から流入⇒供試体外⇒②から流入⇒供試体外⇒③から流入⇒供試体外⇒④から流入⇒⑤に流出⇒水温制御ユニットに流入、となる。クーリング水の流方向が逆転した場合は前述の流れの逆となる。クーリング水の温度を測る水温計は、供試体外側のクーリングパイプに、入口側と出口側、合計2箇所設置した。

c. コンクリート配合およびクーリング条件

コンクリートの配合は、単位セメント量349kg/m³、呼び強度33、スランブ15cm、最大骨材寸法20mmとした。クーリング期間は、コンクリートの発熱が収束する材齢7日までとした。クーリングの最大流量は30L/min、最低流量は0L/min(停止状態)とする。ただし、一定水圧をインバーターで作用させているので、コントロールバルブを全閉にするとシステムに過剰な負荷がかかる。それを避けるため、コンクリート外に別途設けたバイパス配管にクーリング水を流すことにより、クーリング流量を0L/minとしている。

d. 事前解析結果に基づく温度の管理目標値の設定

実験の管理目標値を設定するため、供試体をモデル化し、パイプクーリングを適用した温度解析により、打設から1週間の温度履歴を求めた。本解析では、パイプクーリングの流量・水温は一定であり、管理目標値との差分によって流量を制御する実際の状況とは異なる。ここ

で、実施工の場合はひび割れの検討を行うために温度応力解析を行うのに対して、本実験ではひび割れが生じる要因である外部拘束体が存在しないため、温度解析のみを実施した。解析条件は、実験時の平均的な流量を想定し、最大流量の50%の流量として15L/minを採用し、コンクリートの初期温度を20℃、クーリング水温を15℃、供試体外縁を断熱状態として、メッシュ間隔を5cmとした。クーリング実施時のパイプからの離隔ごとのコンク

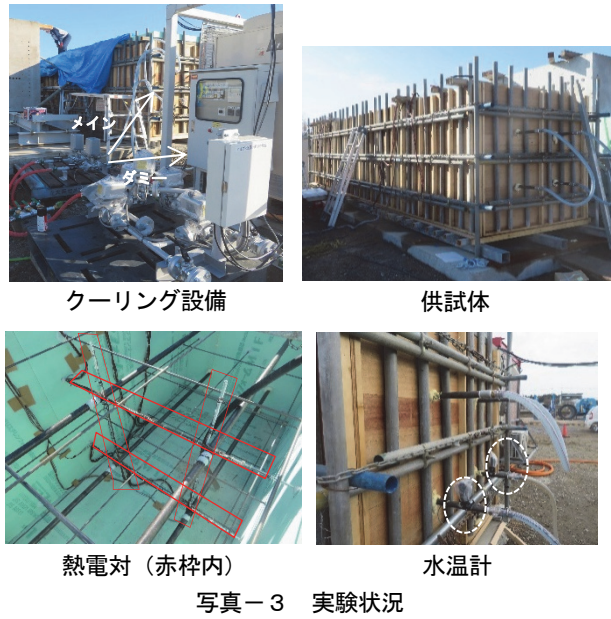


写真-3 実験状況

表-1 クーリングパイプの仕様

規格	配管用炭素鋼鋼管 JIS G3452
外径	34.0mm
内径	27.6mm
延長	28.0m

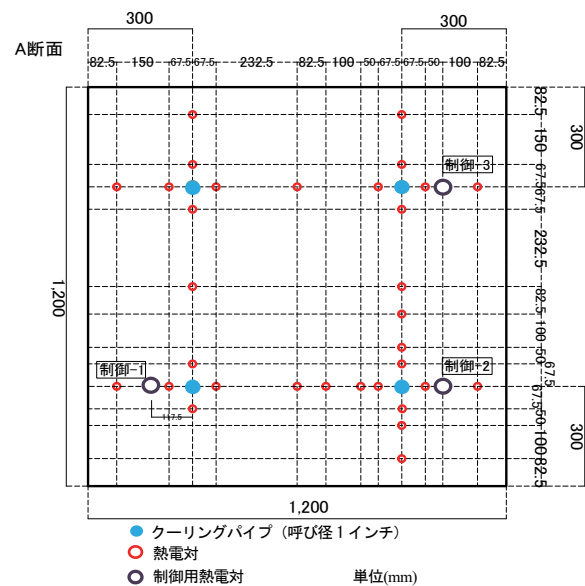


図-6 計測器の配置 (A断面)

リート温度、温度の管理目標値、および比較のためにクーリングを行わない場合のパイプから10cmの位置における温度履歴を図-7に示す。温度のサンプリング位置は、図-6における右上のクーリングパイプより水平右方向である。クーリングを行わない場合、コンクリート温度の最高値は66.0℃となるのに対し、クーリングの実施により、最高値は55℃以下に抑えられている。

制御に用いる熱電対の位置は、パイプから近すぎるとクーリングパイプの温度の影響を過度に受け、遠すぎるとクーリング流量の変化に対する反応が遅延する。このため中間的な温度履歴の傾向を示す、パイプから10cmの位置を制御用の熱電対の位置とした。また、温度の管理目標値は、パイプから10cmの位置の解析結果を基準として設定し、概ね1日を1期間として温度を変更した。ここで、1期間における管理目標値は、その期間の解析結果の概ね平均値とした。ただし、発熱量が大きい、打設開始から24時間までは、パイプクーリングの冷却効果を最大とすることがひび割れ制御上好ましいことから、最大流量を確保するため、温度解析の結果より低い管理目標値(30℃)とした。

e. 流量制御方法

制御方法としてPID制御を用いている。PID制御は、使用したPLC(株キーエンス社製 KV-8000)に組み込まれた制御プログラムにより稼働させている。PID制御の理論式は式(1)の通りであり、目標値との偏差による比例制御を行う1項目に、目標値にフィットするために2項目の偏差の積分項を、フィットする時間を早めるために3項目の微分項を加えたものである。

$$q(t) = K_p(\Delta\Phi + \frac{1}{T_i} \int_0^t \Delta\Phi dt + T_d \frac{d\Delta\Phi}{dt}) \quad (1)$$

ここに、

- $q(t)$: 制御流量(L/min)
- K_p : 比例定数
- T_i : 積分時定数(ms)
- T_d : 微分時定数(ms)
- $\Delta\Phi$: 目標温度とコンクリート温度の差(℃)

式(1)におけるコンクリート温度は、前述したようにクーリングパイプの入口、出口、およびその中間位置近傍の3点のコンクリート温度の平均値を使った。各定数については、打設前の流水試験において次の手順で設定し、実験に適用した。

- ①比例定数 (K_p) : 3分程度で流量が収束する値(データをロガーに記録する間隔と同程度)を選定
 - ②積分時定数 (T_i) : 上記比例定数を用いた場合に、収束ズレがなくなる程度の値
 - ③微分時定数 (T_d) : 積分時定数の1/4
- PIDの時間刻み、各設定値の入力値を表-2に示す。

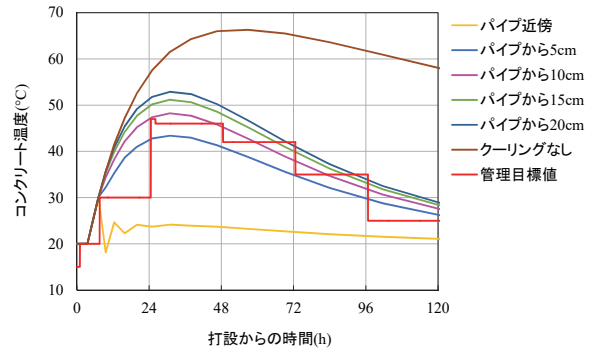


図-7 事前解析結果と管理目標値

表-2 PID制御の設定値

PIDの時間刻み	100 ms
K_p (比例定数)	0.025
T_i (積分定数)	2,000 ms
T_d (微分定数)	500 ms

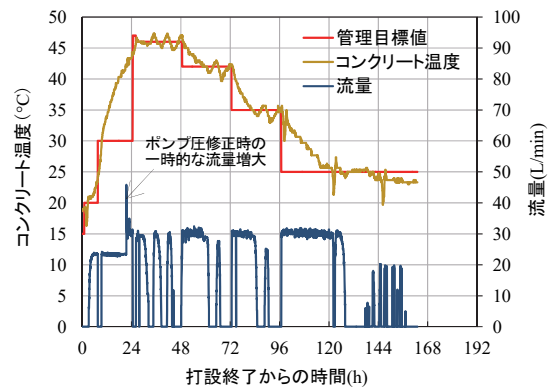


図-8 コンクリート温度と流量

3.2 実験結果

a. コンクリート温度に基づく流量・流方向制御

制御に使用した管理目標値と制御に用いた3点のコンクリート温度の平均値の温度変化、クーリング水の流量を図-8に示す。コンクリート温度の実測値と管理目標値の差分を指標としてクーリング水の流量を制御しているが、求められた流量が最大流量30L/minを越える場合は上限の30L/minに制御している。また、図からわかるように、打設開始から22時間までは、ポンプの圧力が不足したため最大流量に至っていない。しかしながら、ポンプ圧を正常に設定してからは、管理目標値とコンクリート温度の差分を指標として正常に流量制御が行われ、管理目標値前後にコンクリート温度が漸近するように制御できていることがわかる。

クーリングパイプ出入口部におけるクーリング水の温度(図-5の①と⑤で測定)を図-9に、図-6の制御-1と制御-2のコンクリート温度を図-10に示す。それぞれ、流方向の正送、逆送、バイパス運転の切り替え状況を併記している。図-9から、コンクリート内のクーリ

ングパイプ延長28m間で、クーリング水の入口側と出口側で2°Cから3°C程度の水温差が生じていることがわかる。ただし、図-9において、一時的に水温の急増、急減する箇所が複数存在するが、これは水温計が供試体外部にあるため、クーリング流量が停止もしくは極めて少ないときに、外気による冷却、コンクリートによる吸熱の影響を過剰にうけたためである。

また、図-10から、出口と入口のコンクリートの温度差が設定した1°C以上となったときに、正送と逆送の変更が行われており、この変更が正常に行われた結果、出口側と入口側の温度差は、最大でも2°Cの範囲に収まっている。このことから、パイプ内の流下のためにクーリング水の温度変化が生じた場合でも、流方向の制御により、コンクリートの冷却効果の損失を解消することが可能であることが確認できた。

図-11に打設終了後20時間から40時間におけるコンクリート内のメインシステムのクーリング流量とサブシステムの流量を示す。瞬間的に流量の変動がある場合を除き、両者がほぼ一致していることから、コンクリート温度による制御をしているパイプ内のクーリング流量がサブシステムに反映できることを確認した。

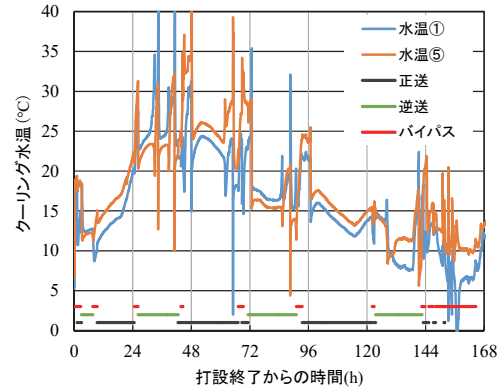
b. コンクリート内の温度分布

A 断面の、クーリングパイプが設置されている下から300mmの位置における水平方向の打設後12、24、55、78、105、120 時間の温度分布を図-12に示す。300mmと900mmの位置の温度はクーリングパイプ外縁部の温度であり、その他はコンクリートの温度を示す。この図から、クーリングパイプ外縁部の温度が最も低く、クーリングパイプから離れるにしたがってコンクリート温度が高くなっていることがわかる。また、水和反応による温度ピークにさしかかっている打設後24時間では、クーリングパイプ近傍（位置900mm）とコンクリート壁面近傍（位置1117 mm）の温度差は約26°Cになっている。一方、試験体中央部（位置600mm）では、時間の経過とともにコンクリート温度は上昇し、打設後55時間で最高温度を示し、その後徐々に低下している。

次に、A断面において、クーリングパイプが設置されている、図-6に示す右から300 mmの位置における鉛直方向の温度分布を図-13 に示す。図-12と同様に、高さ300mm と900mmの位置はクーリングパイプ外縁部の温度を示す。水平方向の温度分布と同様に、クーリングパイプから離れるにしたがってコンクリート温度は徐々に高くなっており、事前解析と同様の傾向を示す。

c. パイプクーリング制御システムによる制御結果

図-14に、事前実施した温度解析と実規模施工実験のコンクリート温度履歴の比較を示す。解析結果はパイプから10cm位置の結果であり、実験値は制御用3点の平均値である。材齢24時間以降の解析値と実測値の差の平均値の絶対値は、1.3°C、その標準偏差は1.0°Cであり、



※ 水温①と水温⑤は、図-5の①と⑤で測定

図-9 クーリング水温と流方向

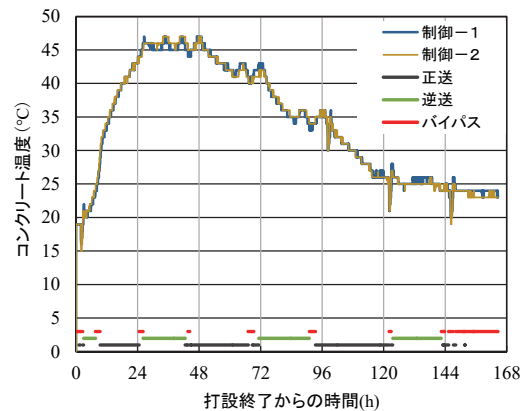


図-10 制御箇所のコンクリート温度と流方向

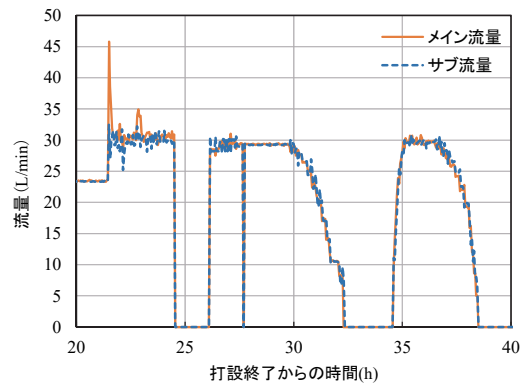


図-11 メイン流量とサブ流量の比較

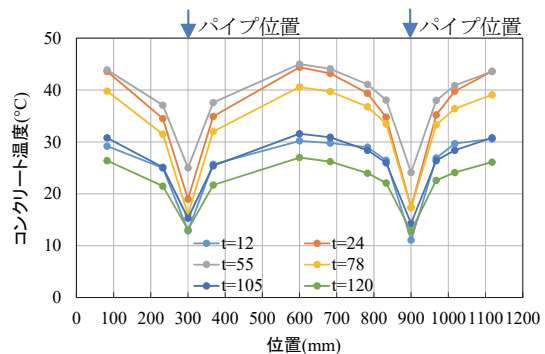


図-12 水平方向のコンクリート温度分布

解析と実験の温度履歴はほぼ一致しているといえる。このことから、コンクリート温度をフィードバックしたパイプクーリングの流量制御によって想定通りにコンクリートの温度制御が可能であることを示した。

4. まとめ

実大規模の供試体を用いた実験により、以下の事項を確認し、開発したパイプクーリング制御システムを現場で適用できる見通しが得られた。

- i. 事前解析によりコンクリート温度の管理目標値を設定し、コンクリート温度の実測値をフィードバックしてパイプクーリングの流量制御を適切に行うことで、想定通りのコンクリートの温度制御が実現できる
- ii. 流方向逆転機構を使用することにより、パイプ内の流下によってクーリング水の温度上昇が起きても、コンクリートの冷却効果の損失を解消できる
- iii. 制御対象とするメイン系統のパイプのクーリング流量をサブ系統に反映することで、システムを簡素化できる

5. あとがき

本実験の後、道路橋の下部工を築造する工事のフーチングコンクリートに、開発したシステムを適用してパイプクーリングを実施した(写真-4、写真-5)。本システムを用いたパイプクーリングにより、計画通りにコンクリート温度を制御でき、温度が十分に低下した埋め戻し前の材齢10日の時点でフーチングコンクリートに温度ひび割れ発生は確認されていない。本適用の詳細は、別途報告する予定である。

今後は、実規模施工実験および上記の現場適用で得られた知見をもとに、システムの完成度をさらに高めていきたい。

謝辞

本開発は、株式会社アクティオとの共同開発のもと実施した。また、本開発を進めるにあたり、東邦和博士、栗本雅裕博士には、開発メンバーとして多大なるご助力、ご助言をいただいた。ここに記して感謝の意を表したい。

【参考文献】

- 1) 山田浩平、齋藤隆弘、中村方紀、東 邦和、小原明彦、「水門床版コンクリート(躯体厚3m)の水平パイプクーリングの効果」、土木学会年次学術講演会、Vol.70、V-009、2015.8
- 2) 田辺忠顕、山川秀次、渡辺 朗、「パイプクーリングにおける管壁面の熱伝導率の決定ならびに冷却効

果の解析」、土木学会論文報告集、第343号、pp.171-179、1984.3

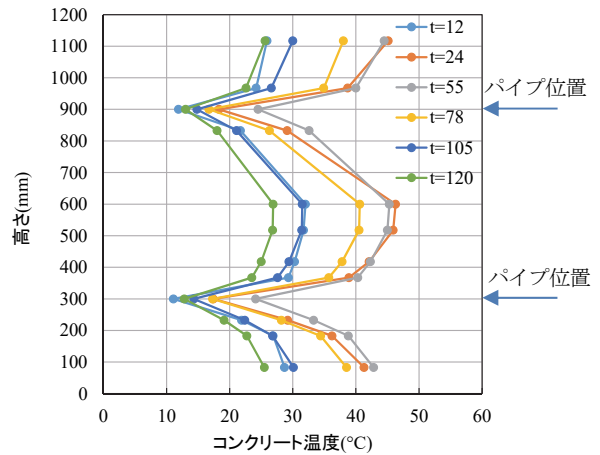


図-13 鉛直方向のコンクリート温度分布

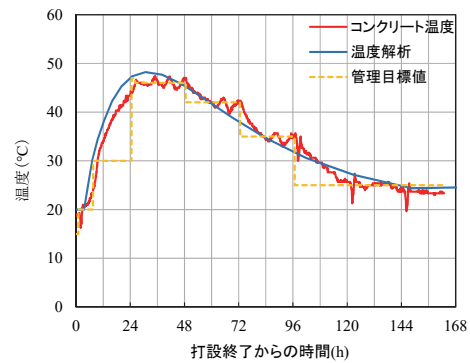


図-14 温度解析と実規模施工実験のコンクリート温度履歴の比較



写真-4 設備配置状況



写真-5 クーリングパイプ配置(躯体内)

高温域における煙突内部補修装置の開発

－要素実験と実煙突での実証実験－

Development of Smokestack Internal Repair System for High Temperature Range - Component Experiment and Demonstration Experiment with an Actual Smokestack -

城井光雄* 久保田麻里子**

要旨

鉄筋コンクリート造煙突の耐火レンガ層は、熱風および排出ガスに直接接触するため、目地の亀裂やレンガの脱落などの損傷を受けやすい。一般的に用いられる改修方法では、施設の稼働を長期間停止する必要がある。そのため、応急対策として、施設の稼働を停止することなく、耐火レンガの劣化部を吹付け補修する装置の開発を目指し、要素実験および実煙突での実証実験を行った。また、高温域における吹付け材の力学的性能確認も行った。その結果、無線による遠隔操作での吹付け補修を実施する装置を開発することができた。

キーワード：高温域、煙突改修、耐火レンガ、乾式吹付け

1. まえがき

製鉄所施設の鉄筋コンクリート造煙突では、燃料の燃焼にともなう熱風および排出ガスの影響からコンクリートを保護するために、内側に空気層を挟む形で耐火レンガ層が設けられている。この耐火レンガ層は、熱風および排出ガスに直接接触するため、目地の亀裂やレンガの脱落などの損傷を受けやすく、放置すれば、躯体コンクリートが直接熱風等に晒されて、強度低下やひび割れ、鉄筋腐食が進行することになる。また、対象となる煙突は高さ 50m 以上のものが多く、地震や台風による大きな被害の発生が懸念される。

煙突の機能を維持するためには、定期的に耐火レンガ層の劣化状況を診断し、改修を行う必要がある。一般的に用いられる改修方法としては、耐火レンガの張替えや耐火材の吹付けが挙げられるが、どちらも施設の稼働を停止する必要があり、長期間稼働を停止できない施設では、改修を実施することができないのが現状である。

そこで、抜本的な改修を行うまでの応急対策として、施設の稼働を停止することなく、煙突内部の調査を行い、同時に耐火レンガの劣化部を吹付け補修する装置の開発を目指した。

すなわち、本研究では、耐火レンガ損傷部の脱落を防止するとともに、脱落部のコンクリートを排出ガスから保護して、改修時期を延ばすことを目的として「無線による遠隔操作での吹付け補修を実施する装置」の開発を目指した。

本報では、開発において実施した要素実験の結果、お

よび実煙突での実証実験結果について報告する。

2. 装置の開発方針

本装置は、吹付け機械、吹付け材料、動力、無線通信装置等を搭載した耐熱容器を、クレーンで煙突頂部から吊り込み、煙突内部を昇降させながら吹付けを行う。吹付け時は、装置に搭載したネットワークカメラの画像をモニターで見ながら、遠隔操作を行う。また、高温域（200℃）に適用可能とするため、容器を断熱材で被覆し、冷却材を内蔵している。さらにメンテナンスを考慮し、3分割できる構造としている。装置の概略構成を図-1に示す。

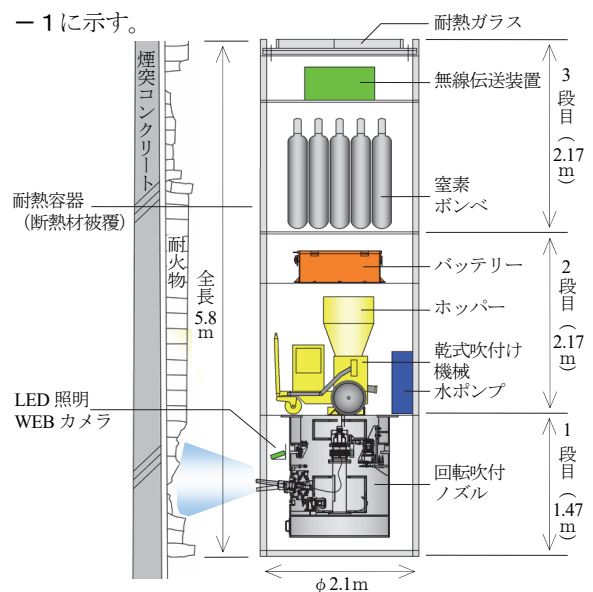


図-1 装置の概略構成

*西日本支社機電部 **西日本支社土木原価部

3. 装置構成資器材の要素実験

3.1 要素実験の概要

本装置に搭載する資器材の仕様を決定するため、高温域（200℃）における装置適用上の問題点を検討し、要素実験を実施した。

本装置の吹付け方式は、煙突の吹付け補修で実績の多い乾式吹付けとし、吹付け機械は汎用機の中から選定した。

3.2 電源システムの構成と動作確認

本装置は、高温域での使用を想定しているため、引火性のある軽油等を燃料とした発動発電機の搭載はできない。そのため、発動発電機に代わり、バッテリーロコで採用されている技術を応用した電源システムの構築を行った。電源システムの概略構成を図-2に示す。

本電源システムは、交流 200V の吹付け機械のモーターを動作させるため、直流電源のバッテリーを使用した。バッテリーによる直流電源 96V（2V×48 個）をアップバーター（DC/DC コンバーター）により 315V に昇圧させて、200V 以上の一定電圧を供給し、DC/AC インバーターで交流 200V に変換する装置をパッケージング化して搭載した。

要素実験では、上記システムにより、吹付け機械の動作確認を行った。一定時間吹付け機械を稼働させ、ローター回転数を測定することにより、発動発電機と同様に正常に稼働することを確認した。

3.3 窒素ガス供給ユニットの構成と動作確認

本装置による吹付け時は、吹付け機械へ圧縮空気を供給する必要があるが、前項の発動発電機と同様に軽油を燃料とするコンプレッサーを搭載することはできない。そこで、コンプレッサーに代わり、不活性ガスである窒素ガスを使用し、窒素ガス供給のパッケージング化と所定流量の確保を行った。窒素ボンベによる吹付け時の概略構成を図-3に示す。窒素ボンベを連結した集合装置に、高压充填（14.7MPa）された窒素ガスを減圧する圧力調整器を接続し、吹付け機械に窒素ガスの供給を行う。集合装置を写真-1に、圧力調整器を写真-2に示す。

要素実験では、上記の構成での吹付け動作確認とともに、吹付け作業に必要な窒素ガスの流量、および供給可能時間の測定を行った。

実験の結果、以下の知見が得られた。

- i. 必要な窒素ガスの流量に適した圧力調整器を選定すれば、窒素ボンベによる吹付けが可能
- ii. バルブ解放時には、一次側圧力（容器内）の低下によって二次側圧力（調整圧力）が降下するため、圧力降下を考慮して調整圧力を設定する必要がある
- iii. 材料吐出量を 0.5m³/h とした場合、窒素ボンベ 1 本当たり 1 分間の吹付けが可能

- iv. 断熱膨張による窒素ガスの温度低下により、集合装置の銅連結管等が凍結する可能性がある

3.4 ノズル回転装置の機構と動作確認

本装置では、吹付け仕上がり精度に対応するため、人手による吹付けを行う際のノズルの動きを再現し、円運動をさせながら吹付けを行う機構とした。また、ノズル回転部に、球面接触をする滑り軸受けである球面ブッシュを設けてノズルを回転させ、装置上部からの材料・水等を供給する配管部にスィベルジョイントを設けてドラムを周方向に旋回させる構造とした。

ノズル回転装置を図-4に示す。

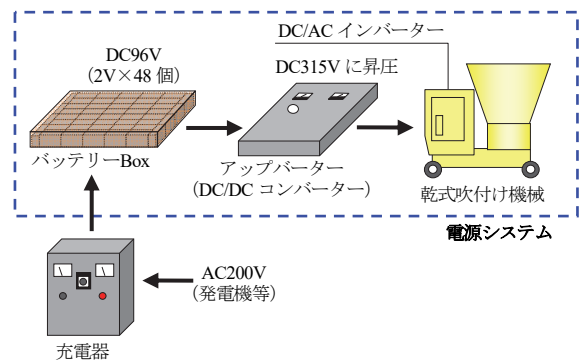


図-2 電源システムの概略構成

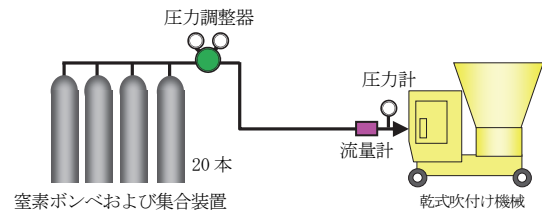


図-3 窒素ボンベによる吹付け時の概略構成



写真-1 集合装置



写真-2 圧力調整器

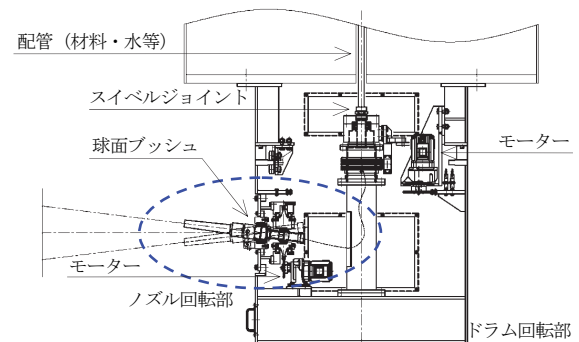


図-4 ノズル回転装置

3.5 高温環境下における断熱構造の確認

本装置では、吹付け機械を制御するために電子機器を使用している。電子機器が正常に動作する温度を 60℃とし、煙突内部吹付け時間内 (90 分) はそれ以下に保つことを目標とした。また、本装置は、耐熱容器外周に断熱材を設置し、装置内部にドライアイスを入筒状に配置する断熱構造とした。本装置の内部温度を均一に保つための断熱構造は、熱流体シミュレーションソフトウェア STREAM による装置内部の温度変化の解析により決定された。

要素実験では、200℃を保持した加熱炉の中に耐熱容器を設置し、断熱構造により装置内部温度を 60℃以下に保持できることを確認した。断熱構造実験の概略を図-5に示す。

実験の結果、以下の知見が得られた。

- i. ドライアイス (75kg) を耐熱容器内部に円筒状に配置することで十分な冷却効果が得られる
- ii. ドライアイスの昇華ガスは空気より重く耐熱容器下部に滞留するため、DC ファンにより容器内部温度を均一にする必要がある
- iii. 装置内部温度が低下しすぎるため、水槽、ホッパー、ノズル駆動部の周囲には断熱材を配置し、冷気の伝達を抑制する必要がある

4. 高温域における吹付け材の力学的性能確認

4.1 性能確認試験概要

本装置の吹付け補修では、耐火性骨材と水硬性セメントまたは化学結合材を混合した耐火物であるキャストブルを使用する。吹付け時の施工温度域は 200℃程度であるが、市場に流通するキャストブルの調査では、仕様として使用可能な材料は確認できなかった。しかし、本装置による吹付け補修は、断熱性能を持たせることを目的としていないため、ここでは主に力学的性能について検証することとした。そこで、200℃環境下で常温硬化型のキャストブルにより吹付けを行って供試体を作成し、常温硬化時との力学的性能を比較した。

4.2 性能確認試験項目

吹付け材料メーカーで実施されている管理項目を参考にして力学的性能の確認試験項目を選定した。JIS 規定に準じた試験については (財) 岡山セラミックス技術振興財団に委託した。試験項目および試験方法を表-1に示す。

4.3 200℃環境下での吹付けによる供試体作成方法

200℃環境下で吹付けを行うために製作した加熱炉を図-6に示す。加熱炉はロックウールによる断熱構造とし、バーナー差込口を4か所設け、バーナーの本数と火力調整で炉内温度を 200℃に管理した。吹付けノズルは挿入口から、内部に設置した供試体型枠 (30cm ×

30cm) に向けて吹付ける構造とした。吹付け状況を写真-3に示す。

吹付け時の添加水量は、材料メーカー推奨の標準添加量を基に、本装置で使用する乾式吹付け機の機械設定で試し吹きを実施し、添加水量の決定を行った。乾式吹付け機の機械設定を表-2に、添加水量を表-3に示す。

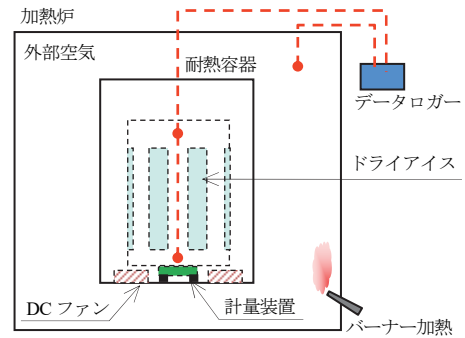


図-5 断熱構造実験の概略

表-1 試験項目および試験方法

試験項目	試験方法	名称
曲げ強さ	JIS R 2213	耐火れんがの曲げ強さの試験方法
圧縮強さ	JIS R 2206-2	耐火れんがの圧縮強さの試験方法
かさ比重	JIS R 2205	耐火れんがの見掛気孔率・吸水率・比重の測定方法

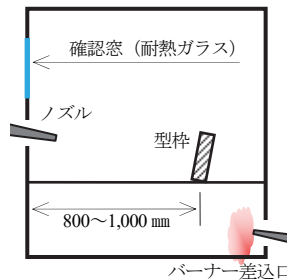


図-6 加熱炉の概略



写真-3 吹付け状況

表-2 乾式吹付け機械の機械設定

項目	単位	設定
材料供給リボルバー回転数	rpm	6.0
材料ライン圧力	MPa	0.05
水圧	MPa	0.7
窒素圧力	MPa	0.6

表-3 添加水量

単位	施工使用量 ^{※1} kg/m ³	添加水量			
		標準値		設定値	
		% ^{※2}	L/min	% ^{※2}	L/min
材料 A	1,850	12~13	1.8~2.0	12	1.8
材料 B	1,800~1,900	15	1.8~2.0	13	2.0
材料 C	1,830	15	2.3	15	2.3
材料 D	2,000	10~12	1.7~2.0	10	1.7
材料 E	2,000	12~13	1.9~2.1	10	1.6

※1 カタログに記載の 1m³ 当たりキャストブル材使用量

※2 重量比

4.4 試験結果

性能確認試験結果を表-4に示す。なお、表中の吹付け材料メーカーによる代表値は、常温で硬化させたものの値である。

200℃環境下で吹付けた試験体の曲げ強さ、および圧縮強さの値は、材料 A、B、E では代表値よりも大きな値が得られている。また、一般的な吹付け材料であり、高温時の代表値のない材料 D も他材料と同様な値が得られている。

上記の結果より、常温硬化型のキャストブル材であっても、200℃環境施工時において常温硬化時と同等の機械的性能を有しているものを選択できることが確認できた。

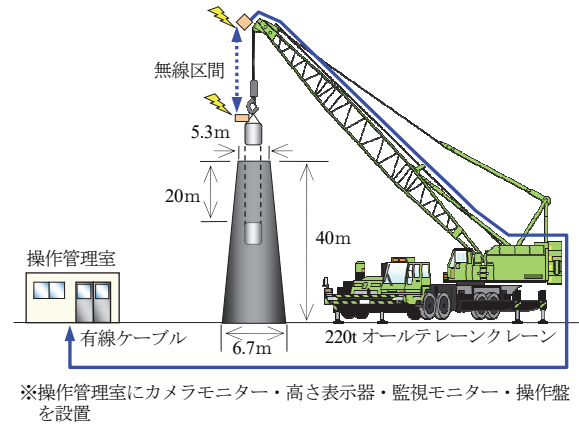


図-7 実証実験の概要

5. 実煙突での実証実験

5.1 実証実験概要

運転を休止し解体予定の煙突において、本装置を用いた吹付けの実証実験を行った。運転休止のため、常温環境下での実証実験であるが、以下の項目について確認を行った。なお、吹付け材料には、4章で性能確認試験を行った材料 E を使用した。

- i. 吹付け作業のサイクル
- ii. 装置組立・解体時の作業性
- iii. 無線遠隔操作における操作性
- iv. ノズル回転装置による吹付けの仕上がり状態

実証実験では、吹付け機械、吹付け材料、動力、無線伝送装置等を搭載した耐熱容器を 220t オールテレーンクレーンで煙突頂部から吊り込み、煙突部を昇降させながら遠隔制御により吹付けを行った。また、本装置組立時は 25t ラフタークレーンを使用した。実証実験の概要を図-7に、吹付け装置の全景および実際の吊り込み状況を写真-4、写真-5に示す。また、施工箇所位置および資機材配置状況を図-8に示す。

本装置の仕様は、3章に記載した各要素実験結果を基に選定した。本装置の仕様を表-5に示す。

表-4 性能確認試験結果 (200℃環境下)

試験項目		かさ比重	曲げ強さ N/mm ²	圧縮強さ N/mm ²
材料 A	代表値	2.02	3.90	20.10
	測定値	2.04	6.90	28.40
材料 B	代表値	1.85~2.0	7.85	-
	測定値	1.89	8.10	56.40
材料 C	代表値	1.83	1.30	4.20
	測定値	1.93	0.60	5.90
材料 D	代表値	-	-	-
	測定値	2.06	9.80	57.70
材料 E	代表値	-	7.00	45.00
	測定値	2.04	12.00	48.80

※材料 D は、断面修復材のため、耐火材の試験方法に準拠した試験を実施しておらず、代表値は不明



写真-4 吹付け装置の全景および吊り込み状況

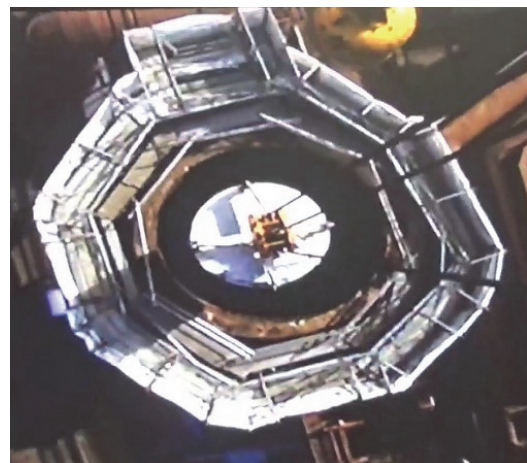


写真-5 吹付け装置吊り込み状況 (クレーンカメラ)

5.2 実証実験結果

a. 吹付け作業サイクル

吹付け作業サイクルを表-6に、組立・解体実績を表-7に示す。吹付けサイクルは、1日目（風速0~5m）は1.38時間、2日目（風速5~10m）は1.41時間であった。2日目は、風によるブームの揺れを抑えるために、吹付け装置の投入を一旦停止したことで、前日より作業時間が6分長くなった。しかし、その他の作業内容では1分程度の違いであった。また、窒素ポンベの入替えを1本ごとからユニット（20本/ユニット）ごとに変更することで、計画時よりも0.95時間短縮することができた。

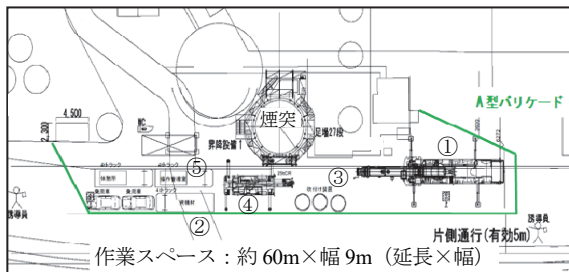
b. 装置組立・解体時の作業性

装置の組立・解体は、施工ヤードの広さや煙突の高さによるクレーン仕様の選定により変化するが、本実証実験では30.6時間を要した。

c. 無線遠隔操作における操作性

実証実験においては、懸念されていた煙突内部環境での吹付け装置の操作信号や映像信号の不具合もなく、操作・撮影および録画が滞りなくできた。

また、吹付け作業におけるモニターの視認性も良好であり、6台のカメラで全周囲を確認することができ、煙突内高さを指定しての吹付け作業も可能であった。吹付け装置に搭載したLED照明およびWEBカメラの設置状況を写真-6に示す。さらに、無線操作（操作盤）および監視状況を写真-7に示す。



- ①: 220t オールテレーンクレーン
- ②: 材料、工具
- ③: 吹付け装置（仕様は表-5参照）
- ④: 25t ラフタークレーン
- ⑤: ハウスカー（吹付け操作室）

図-8 施工箇所位置・資機材配置状況

表-5 装置の仕様

吹付 機械	使用ベースマシン	アリバ吹付け機 (型式: Aliva237V)
	吐出能力	0.5m³/h (max 1.1m³/h)
	所要窒素圧力	0.6MPa
圧縮ガス供給量 (吐出量)		7m³×20本 (2m³/min)
添加水水槽 (吐出量)		タンク 90L (ポンプ 1.6L/min)
材料ホッパー容量		0.262m³ (14袋)
耐熱 容器	外径、寸法	φ2.1m, H:2.2m×2基, H:1.4m×1基
	自重	内部機器を含む総重量 8.91tf
	耐熱構造	ドライアイス、マイクロサーム ファイブランケット

表-6 吹付け作業サイクル

	作業内容	計画 (分)	実績 (分)	
			1回目風速 0~5m	2回目風速 5~10m
①	窒素ポンベ集合 装置入替え	30	10	9
②	耐火材料投入	20	21	20
③	吹付装置投入	30	20	26
④	吹付時間	30	27	26
⑤	吹付装置取出し	30	5	4
	吹付サイクル 合計	140 (2.33時間)	83 (1.38時間)	85 (1.41時間)

表-7 組立解体実績

作業内容	実績(分)
機器搬入	90
吹付け装置組立	330
220t クレーン組立、機器設置	470
試験吹き、アリバ調整	170
煙突内部吹付け前状況撮影	10
煙突内部吹付け後状況撮影	25
220t クレーン解体、搬出	160
吹付け装置解体	160
資機材搬出	420
合計	1,835 (30.6時間)

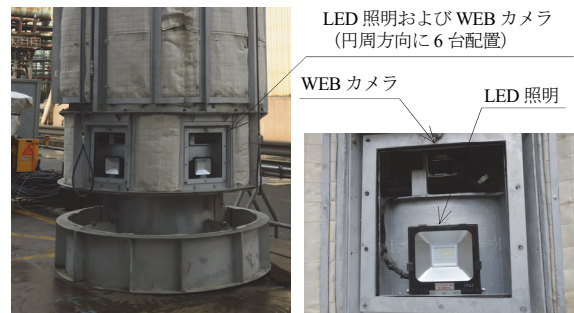


写真-6 LED照明およびWEBカメラの設置状況



写真-7 無線操作（操作盤）および監視状況

吹付け材料のリバウンドは、煙突上部と下部の開放による空気の流動効果もあったので、煙突内部に滞留することはなかった。また、モニターによる吹付け作業は、カメラへの吹付け材料のリバウンドの付着もなく、映像の視認性は良好であった。事前に模擬煙突で実施した無線遠隔操作による吹付け状況を写真-8に示す。

d. ノズル回転装置による吹付けの仕上がり状態

1日目および2日目の吹付実験結果を表-8に、2日目の吹付け面の仕上がり状態を写真-9に示す。吹付け時にはクレーンブームの揺れによって、吹付け装置に最大50cm(両振幅)の揺れが生じたため、一定の吹付け距離を保てない状況があったが、遠隔操作には問題なく、吹付けの仕上がりにはさほど影響しなかった。

また、1日目と2日目の吹付け面積の違いは、原因としてノズル回転の制御方法の違いが挙げられる。すなわち、ノズル回転を自動制御で行った1日目は、ノズルを5度および10度の角度で水平に振幅させることが可能だが、目標の吹付けエリア内に吹付けする際に、微妙な角度調整ができず、吹付け範囲が目標よりも大きくなったと考えられる。



写真-8 無線遠隔操作による吹付け状況 (模擬煙突)

表-8 吹付実験結果

日時	規定高さ*	吹付け作業時間	風速	装置の揺れ	ノズル回転	吹付け面積
1日目	20m	14:10~14:38	0~5m	20~30cm	自動	3.76m ²
2日目	1.5m	10:44~11:11	5~10m	50cm	手動	2.26m ²

規定高さ*: 吹付け装置ノズルセンターのGLからの高さ



写真-9 吹付け面の仕上がり状態

また、目標厚さ50mmに対して、モニター目視での吹付けでは厚さが50mmより薄く、むらが生じる結果となった。したがって、自動制御は煙突内部全周や軽度なひび割れを広範囲に補修する場合にのみ適応可能と考えられる。

一方、ノズルの回転を手動制御で行った2日目は、ノズルを任意の角度に設定できるので、目標の吹付けエリア内で吹付けができ、吹付け厚さも目標厚さ50mm以上を確保することができた。したがって、手動制御はレンガの脱落部等特定した場所を補修するのに適応可能と考えられる。

目標厚さ50mmに対しての仕上がり状態については、均一な厚さにするための不陸の修正は難しかったが、ノズル回転を手動制御することにより、目標厚さ50mm以上の厚さを確保することができた。

6. まとめ

これらの実験を行った結果、「無線による遠隔操作での吹付け補修を実施する装置」を開発することができた。均一な吹付け厚さの確保においては、吹付け装置の自動制御による吹付けの仕上がり状態の向上に課題は残されているが、手動制御による吹付けではモニター映像による吹付け作業の習熟により、改善されると考えられる。

7. あとがき

既設煙突は、老朽化のため今後も増大が見込まれる社会資本と同様に維持・更新の時期を迎えている。しかし、煙突を補修するには、操業を一旦停止する必要があり、生産性に大きな影響を及ぼす課題が残されていた。

本装置を適用することで、煙突を使用したまま補修することができ、操業を停止することなく、延命に寄与することが可能となる。

今回、煙突補修装置の全体構成は開発することができたが、外気風速によりクレーン本体が影響を受けることなどもわかったため、荷ぶれ制御や、モニター技術の改善による吹付け出来形の向上などの課題に対しても、今後継続して取り組んでいきたい。

なお、本開発は、日本製鉄株式会社との共同開発の成果である。

【参考文献】

1) 城井光雄、丸山宣男、小林淳二、「高温域における煙突補修装置の開発」、建設施工と建設機械シンポジウム論文集・梗概集、pp.143~148、2020

アンカー孔の自動削孔装置の開発

ー既設コンクリート構造物の補強工事に伴う削孔作業の自動化ー

Developing an Automated Drilling Hole Device for Anchors

- Automated Drilling in Reinforcement Work for Existing Concrete Structures-

三澤孝史* 川澄悠馬** 西山宏一*** 有川 健**** 山口 治*** 石井敏之**

要 旨

既設コンクリート構造物の補強工事では、あと施工せん断補強工法や増厚工法等が用いられる。その際、あと施工せん断補強鉄筋や、既設と新設のコンクリートの一体性を高めるアンカー筋の挿入孔は、通常、削岩機や電動ハンマードリル（比較的小径で削孔深さが浅い場合）等を用いて人力で削孔される。工事によっては、施工する孔数が数千以上となるため、機械化・自動化による省力化、効率化が期待されている。また、作業中の粉塵の飛散により悪化する作業環境の改善も課題であった。そこで、補強工事に伴う削孔作業を対象に、あと施工せん断補強鉄筋及びあと施工アンカー筋の挿入孔を削孔する 2 種類（大径用、小径用）の自動削孔装置を開発した。

本装置について、RC 壁試験体を用いた性能確認実験を行い、所定の性能を確認した。本報では、本装置の概要及び性能確認実験結果について述べる。

キーワード：補強工事、あと施工せん断補強、削孔、自動化、削岩機、電動ハンマードリル

1. まえがき

既設コンクリート構造物の補強工事において、あと施工せん断補強工法¹⁾及びあと施工アンカーを用いた壁等の増厚工法では、それぞれ、せん断補強鉄筋、増し打ちコンクリートを打設した際に一体性を高めるためのアンカー筋の挿入孔を既設コンクリート構造物に削孔する必要がある。挿入孔は通常、削岩機や電動ハンマードリル等を用いて人力で行われるが、削孔数が数千以上にも及ぶ場合もあり、多大な労力を要することから、作業の省力化、効率化が求められている。また、作業中の粉塵の飛散により悪化する作業環境の改善も課題であった。

今回、あと施工せん断補強工法と、あと施工アンカーを用いた壁等の増厚工法における削孔作業の自動化に取り組み、それぞれの工法に合わせて壁状部材を対象とした 2 種類の自動削孔装置を開発した。一つは、あと施工せん断補強工法における削孔作業を対象とし、比較的削孔径が大きく、深い削孔に対応する大径用自動削孔装置²⁾である。もう一つは、比較的削孔径が小さく、浅い削孔に対応する小径用自動削孔装置³⁾である。これらの 2 種類の自動削孔装置について、RC 壁を用いた性能確認実験を行い、所定の性能を有することを確認した。本報では、本装置の概要、性能確認実験結果について述べる。

2. 自動削孔装置

2.1 大径用自動削孔装置

a. 大径用自動削孔装置の概要

大径用自動削孔装置を写真-1 に、主な仕様を表-1 に示す。本装置は、あと施工せん断補強工法のせん断補強鉄筋の挿入孔（最大削孔径 $\phi 40\text{mm}$ 程度）を対象とし、空圧削岩機（以下、削岩機）を用いて自動削孔する装置である。削岩機を削孔方向に最大 1200mm フィード（前進）でき、上下方向の昇降ストローク 1750mm 及び左右方向のスライドストローク 500mm のエリア内の移動が可能である。各移動量は、装備したレーザー距離計により計測管理する。本装置本体の移動は、ペンダント操作でレール上を走行させることにより行う。

本装置は、可動範囲内を予め設定した削孔計画（削孔数、削孔位置、削孔深さ）に従って自動で削孔し、削孔位置、削孔深さ、削孔数、削孔時間等の施工結果データを自動的に記録する。削孔計画は、予めパソコンで作成し、本装置の制御装置に無線 LAN (Wi-Fi) で伝送することができる。また、施工結果データを制御装置からパソコンへ伝送することも可能である。

真空圧によりコンクリート表面に吸着するバキューム

*技術研究所 **技術研究所土木研究グループ ***東日本支社リニューアル技術部 ****東日本支東京土木第1部

パッドを本装置上部に2基装備しており、必要に応じてバキュームパッドを使用することで削孔時の反力を確保することもできる。なお、バキュームパッドの吸着力については、事前にコンクリート表面の状態をパラメータとして、コンクリート試験体を用いた要素実験³⁾により把握した。

削孔中に生じる粉塵は、削岩機の先端部に装備した集塵カバーをコンクリート表面にエアシリンダにより押し付け、集塵機で吸引することにより飛散を防止する。

b. 大径用自動削孔装置の自動削孔時の動作フロー

図-1に、自動削孔時の動作フロー図を示す。本装置本体を削孔エリアに移動させ、自動削孔の事前準備として削孔エリア内の原点位置まで削岩機をスライド・昇降させた後、以下の手順により自動削孔するように制御している。

- ①削岩機を稼働させずに、壁にビットが当たるまでフィードさせることにより、壁までの離隔を自動計測する。
- ②削岩機をフィードさせるとともに、集塵カバーを壁面に押し付け、削孔を開始する。
- ③計画の削孔長まで削孔する。
- ④削岩機を引き戻し、次の削孔位置までスライド・昇降移動する。
- ⑤計画した全ての孔について②～④を繰り返す。



削岩機先端部

写真-1 大径用自動削孔装置

そのエリアの削孔が終了したら、本装置本体を次の削孔エリアに移動させ、同じ手順で自動削孔させる。なお、バキュームパッドを使用する場合は、自動削孔前にバキュームパッドを真空ポンプにより壁表面に吸着させ、反力を確保する。

自動削孔中に削孔速度が設定値以下となった場合、鉄筋等の障害物に接触したものと自動判定し、その孔の削孔を中止し、次の削孔位置に削岩機を移動するように制御している。これにより、事前に把握していない鉄筋に接触しても、鉄筋の損傷を抑制するように図っている。なお、施工結果データには、計画通り削孔できた場合と鉄筋等に接触して計画通りに削孔できなかった場合の判別ができる記録が残るようにしている。

2.2 小径用自動削孔装置

a. 小径用自動削孔装置の概要

写真-2に、小径用自動削孔装置を示す。本装置は、あと施工アンカーを用いた壁等の増厚工法における比較

表-1 大径用自動削孔装置の仕様

項目	仕様
外形寸法	横 1742×縦 2215×高さ 2593mm
質量	980kg
昇降範囲	1750mm
スライド範囲(左右方向)	500mm
フィード長	1200mm
昇降速度	2.88m/min (高速モード時)
スライド速度	1.5m/min (高速モード時)
本体の走行速度	6.79m/min

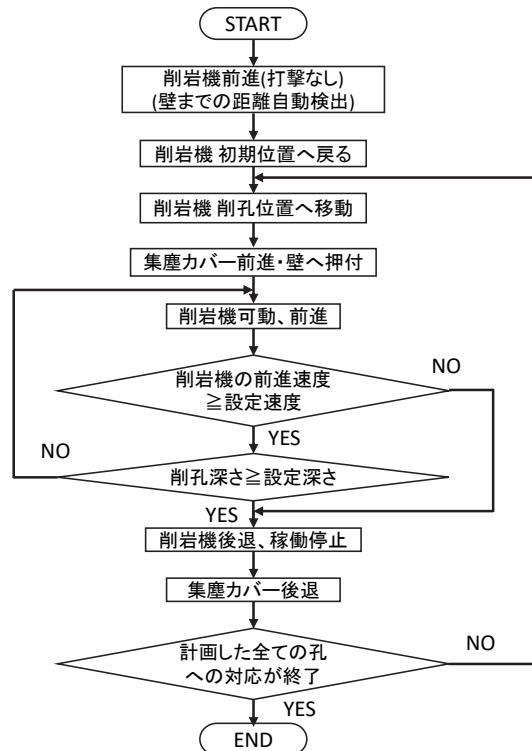


図-1 大径用自動削孔装置の自動削孔時の動作フロー

的削孔径が小さく、浅いあと施工アンカー挿入孔（最大削孔径φ25mm程度）を対象とし、電動ハンマードリル（以下、ハンマードリル）により削孔する。削孔ビットには、図-2に示す、削孔中の粉塵飛散を防止できる中空のホロドリルビット（ヒルティ社製）を用いる。削孔により発生する粉塵が、ホロドリルビット先端の吸引穴から中空部を通り、集塵機に吸引されることにより、粉塵の飛散を防止できる。

表-2に小径用自動削孔装置の仕様を示す。本装置はハンマードリルを昇降方向に最大1500mm移動させる昇降機と、削孔方向に最大300mmフィードさせる機構としてスライドテーブルを備えている。昇降機は電動モータにより駆動し、スライドテーブルはコンプレッサによる空気圧で駆動する。スライドテーブルと昇降機は取り付けた変位センサにより移動量を管理する。

本装置本体の移動は、装置下部に設置したキャスタにより人力で行う。なお、削孔位置の左右の微調整は、偏心機構（最大偏心量±50mm）を手動で操作することにより、ハンマードリルを搭載したスライドテーブルを左右に動かすことで対応できる。その他、本装置を水平に調整するためのアジャスタを装備している。

本装置は、大径用自動削孔装置と同様に、予め入力した削孔計画（削孔数、削孔高さ、削孔深さ）に沿って、ハンマードリルを自動で削孔位置まで昇降させ、設定した削孔深さまで、設定した削孔数を自動で連続削孔する。削孔計画及び削孔結果は、大径用自動削孔装置と同様に、パソコンと本装置の制御装置間を無線LAN（Wi-Fi）で伝送することができる。

b. 小径用自動削孔装置の自動削孔時の動作フロー

本装置は、以下の手順で自動削孔するように制御している。粉塵カバーを用いないことと、スライド（左右）方向への移動がないことを除けば、基本的に図-1に示した大径用自動削孔装置の動作フローと同様である。

- ①ハンマードリルを稼働させずにスライドテーブルをフィードさせ、削孔ビットを壁に当て、壁までの距離を自動測定する。

- ②ハンマードリルを設定した削孔位置まで上昇させる。
- ③ハンマードリルを稼働させ削孔を始める。削孔中に、削孔速度が設定値を下回ると鉄筋等に接触したと判断し、削孔を中断し、次の削孔位置に移動して自動削孔する。
- ④計画した削孔深さまで削孔を終えるとスライドテーブルが元の位置に戻る。
- ⑤削孔計画の全ての孔について②～④を繰り返す。

3. 性能確認実験

3.1 実験概要

開発した自動削孔装置の性能を確認するためにRC壁試験体を用いた性能確認実験を行った。

a. 実験方法

スラブ上に設置した鋼製架台の上に3基のRC壁試験体（寸法：幅2000mm×高さ2200mm×厚さ800mm）を設置し、レールとして敷設した山形鋼上に載せた大径用自動削孔装置で削孔した。小径用自動削孔装置は、直接、スラブ上に載せて実験を行った。RC壁試験体の設置状況を写真-3に示す。RC壁試験体の実験時のコンクリート圧縮強度は27.6N/mm²であった。

自動削孔装置は、鉄筋等に接触時には、自動的に削孔を停止し、次の削孔位置を削孔するように制御している。この機能を確認するために、RC壁試験体の前面と背面で配筋ピッチを変え、削孔可能深さが深い大径用自動削孔装置を対象として、前面の鉄筋だけではなく、削孔時に背面側の鉄筋に接触した場合も模擬できるようにした。

b. 実験ケース

大径用自動削孔装置の実験は、φ40mmのビットを用いて削孔した。実験パラメータは、削孔深さ、バキュームパッド使用の有無、単孔及び連続削孔とした。また、鉄筋接触時に計画した通りに挙動するかを確認するために鉄筋に接触させるケースも行った。実際のあと施工せん断補強を想定して、削孔深さ400～1000mmを中心に

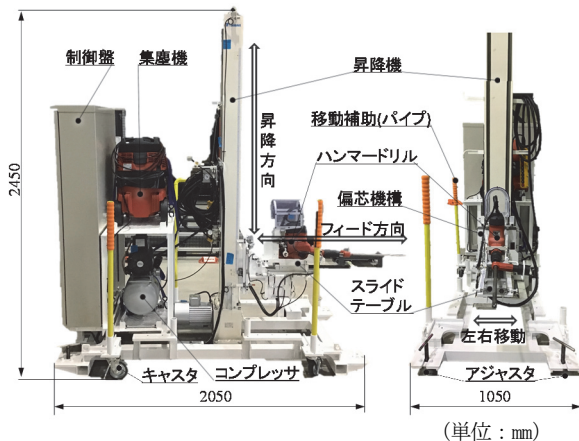


写真-2 小径用自動削孔装置

表-2 小径用自動削孔装置の仕様

項目	仕様
外形寸法	横 1050×縦 2050×高さ 2450mm
質量	650kg
昇降範囲	1500mm
フィード長 (深さ方向)	300mm
左右偏心調整量	±50mm
昇降速度	4.5m/min (高速モード時)

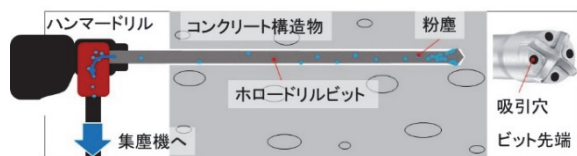


図-2 ホロドリルビットによる集塵の概念図

実験した。なお、削孔深さを 800mm 以上とした場合は、奥行き（削孔方向）が 2000mm となるように RC 壁試験体の配置を変えて実験を行った。最終的には、調整時の予備削孔も含め、100 孔以上の削孔を行った。

小径用自動削孔装置の実験では、ビット径φ20mm、φ25mmの2種類を用い、削孔深さを250mm、削孔間隔を100mmとして単孔及び連続削孔を行った。また、大径用自動削孔装置と同様に、鉄筋に接触させるケースも行った。最終的には60孔以上の削孔を行った。

3.2 大径用自動削孔装置の実験結果

実験状況を写真-4に示す。削孔中は、粉塵カバーと集塵装置により粉塵の飛散を防止できた。

a. 削孔深さ

図-3に、設定削孔深さ400~1000mmにおける、設定削孔深さに対する、削孔後にスケールにより計測した測定値との差を示す。図-4に、設定削孔深さに対する測定値の差の全データの頻度分布を示す。図-3、4より、全データは3~12mmの範囲にある。また、2点を除き、全て設定深さに対し深く（正側）削孔している。

表-3に、設定削孔深さ400~1000mmにおける、設定削孔深さに対する測定値との差の平均値、標準偏差、信頼度95%の精度($\bar{x} \pm 2\sigma$)を示す。全体の削孔深さの精度は、-1.43~10.29mmである。あと施工せん断補強の削孔長の規格値²⁾は、設定削孔長 $\pm 1/2 \times$ 既存主鉄筋（埋込み側）の直径であり、既存主鉄筋径にもよるが実施工において問題のない範囲と考える。また、バキュームパッド使用の有無による削孔深さの精度に顕著な差異はない。

b. 削孔位置

削岩機は、計画した削孔位置へ自動で移動する。この



写真-3 RC壁試験体設置状況

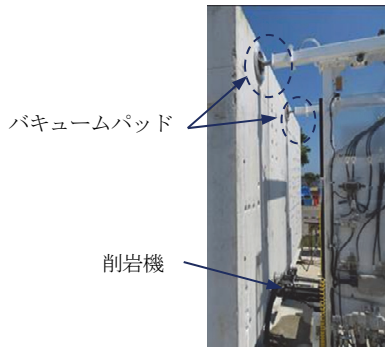
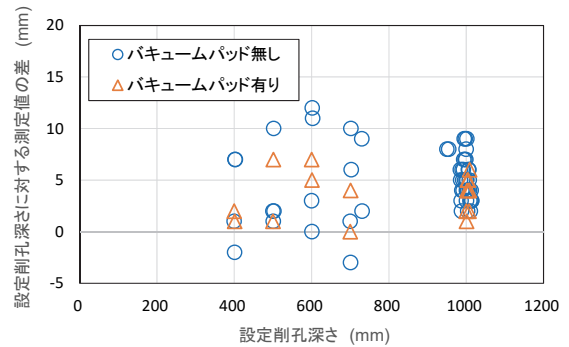


写真-4 大径用自動削孔装置の実験状況（バキュームパッド使用時）

位置精度を確認するために、昇降方向及びスライド方向の孔中心の間隔をノギスで測定した。バキュームパッドの使用有り・無しの場合における、連続削孔した場合の設定値に対する測定値の差を表-4に示す。昇降量の信頼度95%の精度($\bar{x} \pm 2\sigma$)は、-5.88~4.00mmであった。スライド量の精度は、設定スライド量200mmでは-9.40~4.04mm、設定スライド量300mmでは-8.39~4.63mmと昇降量に比べ少し大きいが、昇降量、スライド量とも、あと施工せん断補強の位置精度の規格値²⁾ ± 10 mm以内である。スライド量については、制御用のレーザー変位計の受光面に、直接、太陽光が射していたケースがあり、レーザー変位計の計測値に影響を与えた可能性がある。これについては、野外の施工では、直接



注) データが重なるため見やすいように、グラフの描画上、設定削孔深さの値を少しずらしている

図-3 設定削孔深さに対する測定値の差

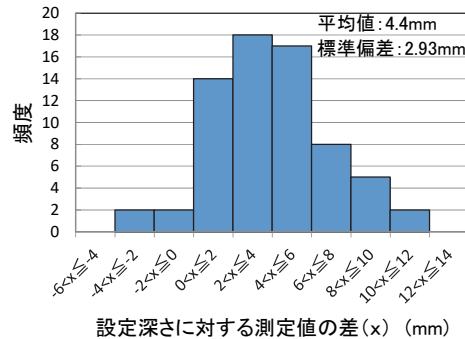


図-4 設定削孔深さに対する測定値の差の頻度分布

表-3 設定削孔深さに対する測定値の差の一覧

	バキュームパッド使用有り	バキュームパッド使用無し	全体
データ数 n (個)	18	50	68
平均値 \bar{x} (mm)	3.61	4.72	4.43
標準偏差 σ (mm)	2.15	3.13	2.93
$\bar{x} \pm 2\sigma$ (mm)	-0.69~7.91	-1.54~10.98	-1.43~10.29

表-4 昇降量及びスライド量の設定値と測定値の差の一覧

	設定スライド量		
	150mm	200mm	300mm
データ数 n (個)	40	26	4
平均値 \bar{x} (mm)	-0.94	-6.72	-6.51
標準偏差 σ (mm)	2.47	1.34	0.94
$\bar{x} \pm 2\sigma$ (mm)	-5.88~4.00	-9.40~4.04	-8.39~4.63

レーザー受光面に太陽光が射さないようにカバーを設置することで対応可能である。

c. 削孔速度及び削孔時間

図-5に、設定削孔深さ 400~1000mm における削孔速度を示す。削孔深さが 700mm までは、全てのデータが 5mm/s 以上の削孔速度を示した。削孔深さが 1000mm では、若干、削孔速度が低下した。これは、削孔深さが深くなることにより孔壁とビットとの摩擦抵抗が増加したためと考えられる。また、バキュームパッド使用の有無による平均削孔速度については、バキュームパッド使用無しの場合は 4.7mm/s、使用有りの場合は 5.0mm/s と、顕著な差異はみられなかった。

写真-5に、8孔を連続削孔したケースの削孔後の状況を示す。横方向の孔間隔は 200mm、上下方向は 150mm とした。設定削孔深さは 1000mm とし、このパターンの連続削孔を 2 回行った。

各孔への移動も含めた計 8 孔の全削孔時間は、平均で約 33 分であった。削孔深さ 1000mm を削孔するのに要した平均時間は約 3.9 分/孔であった。各孔への移動時間の合計は平均で約 1 分であり、削孔位置へ効率的に移動していることがわかる。

d. 鉄筋接触時の挙動

本装置は、自動削孔時には設定した削孔速度以下になると鉄筋等に接触したと自動判定し、その削孔を中止して次の孔を削孔するように制御ソフトを設定している。これを実際に確認するために、鉄筋に接触させる実験を複数回行った。一例として、手前側の鉄筋と奥側の鉄筋に接触させるように設定した削孔パターンを図-6に示す。鉄筋中心位置は、壁表面から 70mm と 730mm である。設定削孔深さを 750mm とし削孔した。

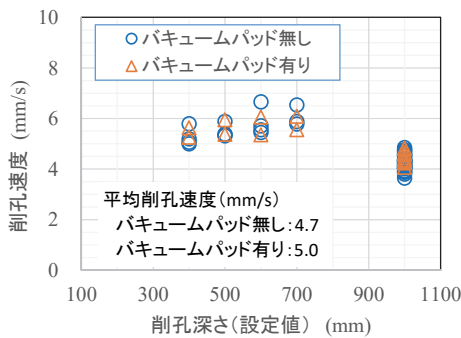


図-5 削孔速度と設定削孔深さの関係

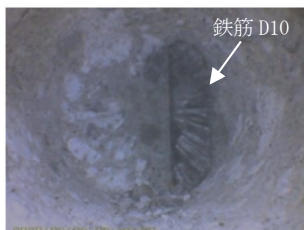
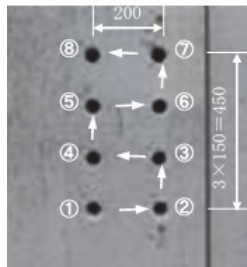


写真-6 孔内状況 (鉄筋接触位置を削孔)



※①→⑧の順番で削孔 単位: mm

写真-5 連続削孔後の状況

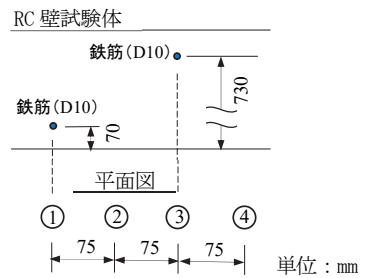


図-6 鉄筋接触時の削孔パターン



写真-7 小径用自動削孔装置の実験状況

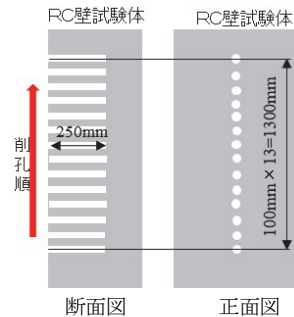


図-7 小径用自動削孔装置による連続削孔パターン

壁の奥側の鉄筋に接触する位置を削孔した孔内を CCD カメラで撮影した。写真-6に、図-6中の③位置を削孔した時の孔内状況を示す。鉄筋表面には少し傷が見られ、ビットが接触したことがわかる。手前側及び奥側の鉄筋に接触した場合、極力、鉄筋の損傷を抑えて削孔を自動で中止し、次の鉄筋に接触しない孔位置に移動し、設定深さまで削孔することを確認した。

今回の実験条件では、バキュームパッド使用の有無により、削孔深さや削孔速度に大きな差異はみられなかった。したがって、コンクリート強度等の施工条件が今回と同程度であれば、バキュームパッドを使用しなくても実施工において削孔可能であると考えられる。

3.3 小径用自動削孔装置の実験結果

写真-7に実験状況を示す。削孔中は、ホロドリルビット及び集塵機により粉塵の飛散を防止できた。

a. 削孔深さ

実験結果の一例として、図-7に示すように、14孔を連続削孔した結果について述べる。削孔深さについて、設定削孔深さに対する、ノギスによる測定値との差を図-8に示す。全てのデータは、-2.4~8.8mm の範囲にあり、設定削孔深さに対し±10mm 以下の差で施工できている。表-5に示すように、ビット径φ20mm では平均値 4.47mm、標準偏差 3.37、ビット径φ25mm では平均値 1.08mm、標準偏差 1.97mm であった。

b. 削孔位置

設定昇降量に対する、ノギスで測定した孔中心の鉛直方向の間隔の測定値との差を表-6に示す。設定昇降量 100mm に対する測定値の差は、ビット径φ20mm では平均値 0.16mm、標準偏差 1.75、φ25mm では平均値

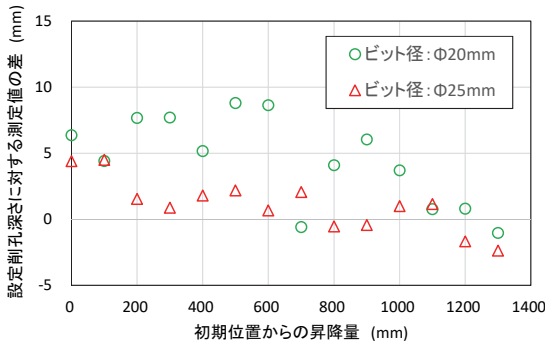


図-8 設定削孔深さに対する測定値の差

表-5 設定削孔深さに対する測定値の差の一覧

設定削孔深さ:250mm	ビット径 20mm	ビット径 25mm
データ数 n(個)	14	14
平均値 \bar{x} (mm)	4.47	1.08
標準偏差 σ (mm)	3.37	1.97
$\bar{x} \pm 2\sigma$ (mm)	-2.27~11.21	-2.86~5.02

表-6 設定昇降量と測定値の差の一覧

設定昇降量:100mm	ビット径 20mm	ビット径 25mm
データ数 n(個)	13	13
平均値 \bar{x} (mm)	0.16	0.37
標準偏差 σ (mm)	1.75	0.90
$\bar{x} \pm 2\sigma$ (mm)	-3.34~3.66	-1.43~2.17

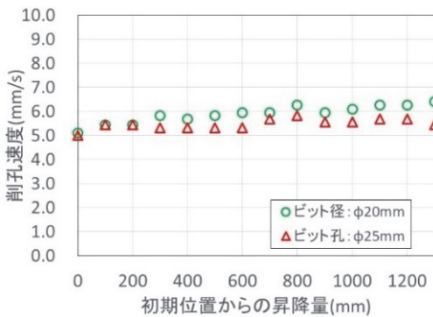


図-9 小径用自動削孔装置の削孔速度

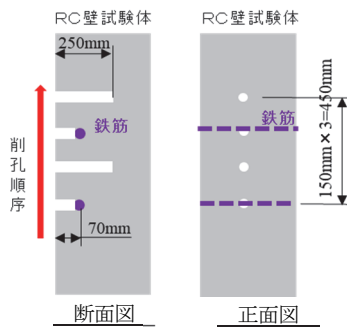


図-10 小径用自動削孔装置・鉄筋接触時の削孔パターン

0.37mm、標準偏差 0.90 と、精度良く削孔位置に移動していることがわかる。

c. 削孔速度及び削孔時間

削孔速度を図-9に示す。平均削孔速度はビット径φ20mmでは5.9mm/s、φ25mmでは5.5mm/sであり、いずれの昇降量においてもビット径によらず概ね同じ値である。

14孔の削孔及び移動時間の合計は、ビット径φ20mmでは約11分、φ25mmでは約12分であった。そのうち移動時間の合計はφ20mm、φ25mmとも約1.3分であり、短時間で移動している。また、設定削孔深さ250mmにおける1孔当たりの削孔時間はφ20mmでは43秒、φ25mmでは46秒であり、大きな差異はなかった。

d. 鉄筋接触時の挙動

大径用自動削孔装置と同様に、自動削孔中に鉄筋に接触した時に、計画通りに挙動するかを確認した。図-10に削孔パターンを示す。コンクリート表面から70mmの位置に配筋した鉄筋に接触する位置と接触しない位置の削孔を交互に実施した。その結果、大径用自動削孔装置と同様に、自動削孔中に鉄筋に接触した際は、計画通りに削孔が自動で中止し、次の孔を削孔することを確認した。このように、事前に把握していない鉄筋に接触しても、鉄筋の損傷を極力小さくすることができる。

4. まとめ

大径用及び小径用自動削孔装置について、RC壁試験体を用いた性能確認実験により、削孔位置、削孔深さは人力施工と同等の精度が確保できることを確認した。また、削孔中の粉塵の飛散が防止され、作業環境が改善されることを確認した。自動化による作業の労力軽減、作業の効率化については、計画した削孔位置に短時間で効率的に移動することを確認したが、今後、開発した2種類の自動削孔装置の現場適用を図り、実現場における歩掛を確認する予定である。実施工を通じ、適宜、自動削孔装置のブラッシュアップを図っていきたいと考える。

なお、大径用及び小径用自動削孔装置は、奥村機械製作(株)の協力を受け、開発したものである。ここに改めて深謝する。

【参考文献】

- 山口 治、松本恵美、三澤孝史、廣中哲也、「六角ナット定着型せん断補強鉄筋を用いた後施工せん断補強工法の開発」、土木学会第71回年次学術講演会概要集、pp.1017-1018、2016.9
- (一財)土木研究センター、「建設技術審査証明報告書 第1506号 後施工六角ナット定着型せん断補強鉄「ベストグラウトバー」」、2018.7
- 有川 健、三澤孝史、西山宏一、石井敏之、「既設コンクリート構造物のあと施工せん断補強に伴う削孔作業に適用する自動削孔装置の開発」、令和2年度建設施工と建設機械シンポジウム、2020.12
- 川澄悠馬、三澤孝史、西山宏一、有川 健、山口治、石井敏之、栗本雅裕、「小径のアンカー孔を対象とする自動削孔装置の開発」、土木学会・土木建設技術発表会2020、2021.2

研掃システムの適用拡大

－システムの改良と現場適用の結果－

Expanded Application of Dry Grinding System for Concrete Surfaces

- System Modifications and Results of On-site Applications -

西山宏一* 栗津利一* 石井敏之** 川澄悠馬**

要 旨

構造物の補修・補強工事における研掃作業は、ウォータージェットやサンドブラスト、ディスクサンダ等を用いて表面の脆弱層を除去するため、粉塵や水しぶきが飛散する環境での無理な姿勢による繰り返し作業となることが多く、作業効率の低下、処理面のばらつきや作業環境の悪化が問題となっている。これらの問題を解決するため、これまで研掃作業の自動化による作業の効率化や作業環境の改善に取り組み、5 台の研掃装置を開発している。しかし、開発した研掃装置を施工条件が様々なあらゆる現場へ適用することは難しく、構造物に応じた改良を必要とする。その結果、適用を重ねるたびに、研掃装置はブラッシュアップされ、適用範囲を拡大してきた。今回、首都高速道路湾岸線多摩川トンネルのコンクリート片剥落防止対策工に伴う素地調整工に「天井用車載型乾式研掃装置」の適用の機会を得たが、既存の装置の施工可能高さが不足するという課題に対応するために改良を加えた。その結果、さらに汎用性が高く、施工効率の良い装置となった。

キーワード：補修工事、剥落防止、研掃、自動化、効率化、粉塵の飛散防止

1. まえがき

我が国の建設分野においては、高度経済成長期に整備されたコンクリート構造物の急速な老朽化が進行する中、少子高齢化による労働者不足、低い労働生産性、施工現場の安全確保などの直面している課題に対して、省人化や自動化による生産性の向上、危険作業の減少を目的にロボット技術の導入が求められている。

当社が関わる補修・補強工事には、前処理として既設コンクリート表面の脆弱層、劣化塗膜の除去及び目荒し等の研掃作業がある。この研掃作業は、写真－1 に示すように、ディスクサンダや高水圧のウォータージェット（以下、WJ）等を用いて人力により行われている。こ



写真－1 人力による壁面の研掃作業

の人力による研掃処理は、高所作業車等の上で、作業員が天井を見上げたり、壁や柱へ乗り出すような無理な姿勢で行われ、粉塵等が飛散した劣悪な環境での作業となっている。そのため、作業員の技量差に起因する処理面仕上がりのバラツキによる品質の低下、発生したミスト・粉塵による作業環境の悪化、高所での無理な姿勢で重い動力工具を用いた作業による安全性の低下と作業効率の低下等の問題が指摘されている。そこで、これらの問題を解決するため、平成 21 年から研掃作業の機械化・自動化に取り組み、令和 2 年までの 11 年間で 5 種類の研掃装置を開発し、作業の効率化や作業環境の改善、処理面の品質向上、作業安全性の確保を図ってきた。さらに、開発した装置の現場適用を積み重ねながらブラッシュアップして、適用範囲を拡大してきた。

今回、首都高速道路湾岸線多摩川トンネルのコンクリート片剥落防止対策工に伴う素地調整工に「天井用車載型乾式研掃装置（以下、天井用乾式研掃装置）」を適用する機会を得たが、既存の装置の施工可能高さが不足していたため、さらに汎用性の高い装置を目指し改良を加えた。本報では、これまで開発した研掃装置と改良事例を紹介し、今回の現場適用に向けた改良の概要と適用結果について報告する。

* 東日本支社リニューアル技術部 ** 技術研究所土木研究グループ

2. これまで開発した研掃装置（システム）

2.1 研掃装置（システム）の概要

開発した研掃装置は、従来、無理な姿勢で重たい動力工具により作業員が行っていた研掃作業を自動運転で行うことができ、同時に発生したミスト・粉塵を遮断・吸引して飛散を抑止することができる。これによって、処理面仕上がりの品質の均一化、発生したミスト・粉塵の飛散抑止による作業環境の改善、高所での人力作業がなくなることによる安全性の確保及び作業効率の向上が図れる。研掃装置には、WJ による壁・柱用と天井用、床用の3種類の湿式研掃装置と回転研削による天井用乾式研掃装置、曲面の天井面に対応できるバキュームブラストによる乾式研掃システムの計5種類があり、施工場所の広さ、作業時間の長さ、水使用の可否、対象構造物の形状等の施工条件に応じて、装置を選択できる。以下、5種類の研掃装置を簡単に紹介する。

2.2 WJによる壁・柱用湿式研掃装置¹⁾

WJによる壁・柱用湿式研掃装置を図-1に示す。この装置は、昇降・左右・前後へスライド可能な鋼製ガイドに組み込まれたWJ装置を、エアシリンダで壁・柱

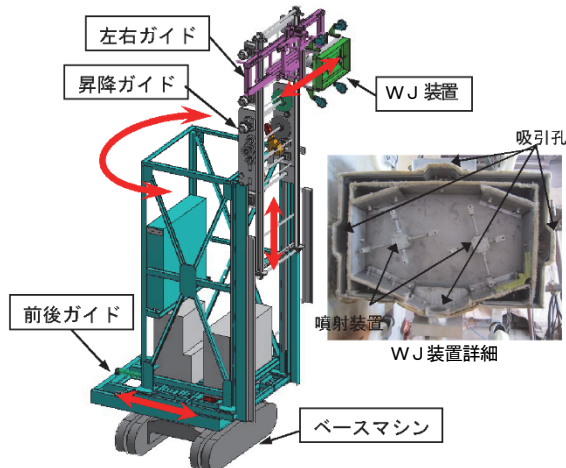


図-1 WJによる壁・柱用湿式研掃装置

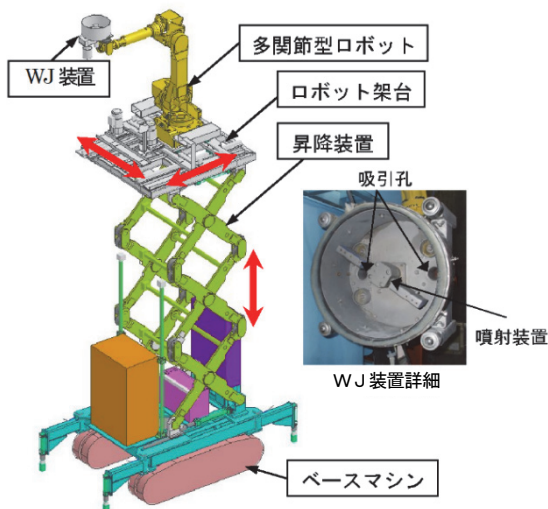


図-2 WJによる天井用湿式研掃装置

の研掃面に一定の圧力で押し付けながら一定速度で移動させることで研掃を自動化した。移動は旋回が可能な電動式のクローラ型ベースマシンで行う。

2.3 WJによる天井用湿式研掃装置

WJによる天井用湿式研掃装置を図-2に示す。この装置は、WJ装置を装備した多関節型ロボットに施工範囲の始点と終点を手動操作で教示すると研掃を自動的に実行する。多関節型ロボットはロボット架台上を前後、左右に移動できるので、施工範囲が広がっている。そのロボット架台は昇降装置で上下に移動し、電動式クローラ型ベースマシンで任意の方向へ移動することができる。

2.4 WJによる床用湿式研掃装置

WJによる床用湿式研掃装置を写真-2に示す。移動速度をインバータ制御できる台車に、床面までの高さが調整できるWJ装置を搭載している。その台車上の制御盤で移動速度と進行方向を設定することにより自動的に研掃を開始する。

2.5 回転研削による天井用乾式研掃装置²⁾

回転研削による天井用乾式研掃装置を図-3に示す。研掃装置は、道路トンネルを対象に開発したので、研掃装置本体は4トン車に、集塵機、発電機等は2トン車に搭載している。研掃装置本体を車両で所定の位置に移動し、アウトリガで支持する。その後、天井面接触センサーで停止するまで多段式リフタを上昇させ、ケレン機の研掃ヘッドを高速回転させながら天井面に一定圧力で押し付け、一定速度で自動運転させることにより研掃を行う。

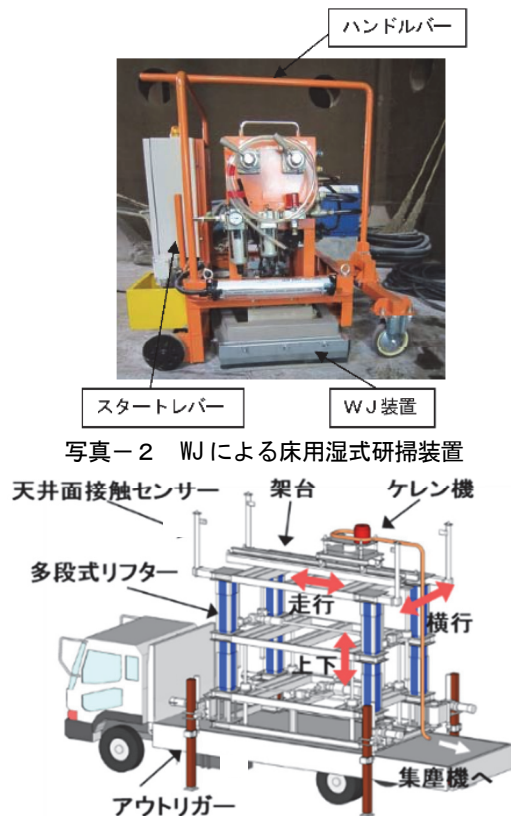


図-3 回転研削による天井用乾式研掃装置

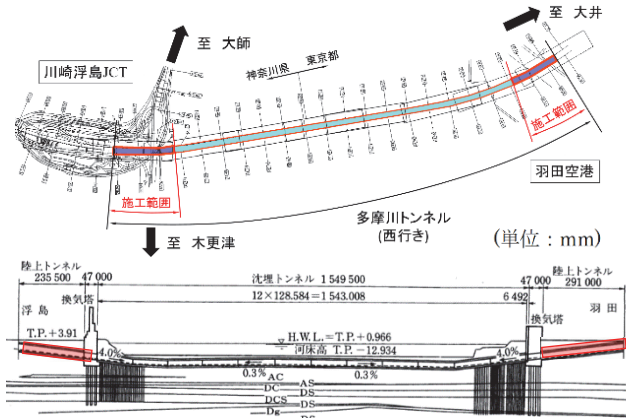


図-5 多摩川トンネルの概要と施工位置

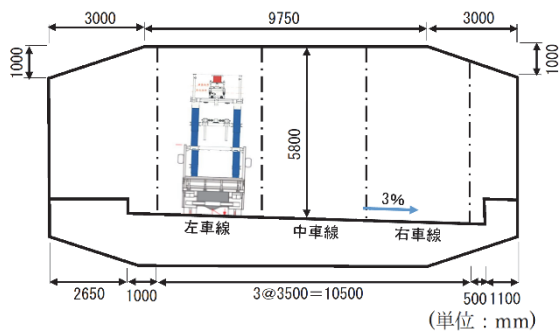


図-6 多摩川トンネル断面



写真-6 適用トンネル内の状況

3.3 今回の天井用乾式研掃装置の改良

従来の研掃装置は2.5節に示したように、研掃を行うケレン機、ケレン機を天井面まで上昇させる多段式リフタ、研掃面を水平にするアウトリガが一体化され、4トン車に積載して運搬するため、公道の走行高さ制限3.8mの制約から最大施工高さが5.6mであった。しかし、今回適用する多摩川トンネルは天井面の高さが約6mであったため、施工可能高さの拡張が必要となった。また、リフタによりケレン機と研掃面は、道路の縦断勾配には対応できるが、横断勾配には十分に対応できなかった。そこで、施工性の向上、適用範囲の拡大を図る改良も加えて行った。以下に改良のポイントを示す(写真-7)。

- i. 一体化していた研掃装置から多段式リフタとアウトリガを取り除き、ケレン機を別の架台に取り付けた

- ii. 架台は、荷台昇降車の最大積載荷重1.2トン以下になるように、主な構成部材にアルミ材を使用し、軽量化・小型化した
- iii. ケレン機・架台・鉛直ジャッキから構成される新たな装置本体を、作業床が5mまで昇降できる荷台昇降車へ積載した(写真-8)。その結果、7.0mの天井高まで対応可能となった。また、荷台昇降車が作業床を上昇したまま移動できるため、盛替え時間も短縮できた
- iv. 架台の下部には、縦横断の道路の勾配に対応するため、最大ストロークが300mmの鉛直ジャッキを4本取り付けケレン機を天井面へ密着させ、粉塵飛散防止と研掃面の品質向上を図った
- v. 昇降機構を装置から切り離したことで接触センサによる制御ができないため、操作用のペンダントスイッチに加えて、四隅の天井までの距離、ジャッキのストローク長を確認できるようタッチパネルモニタを装備した

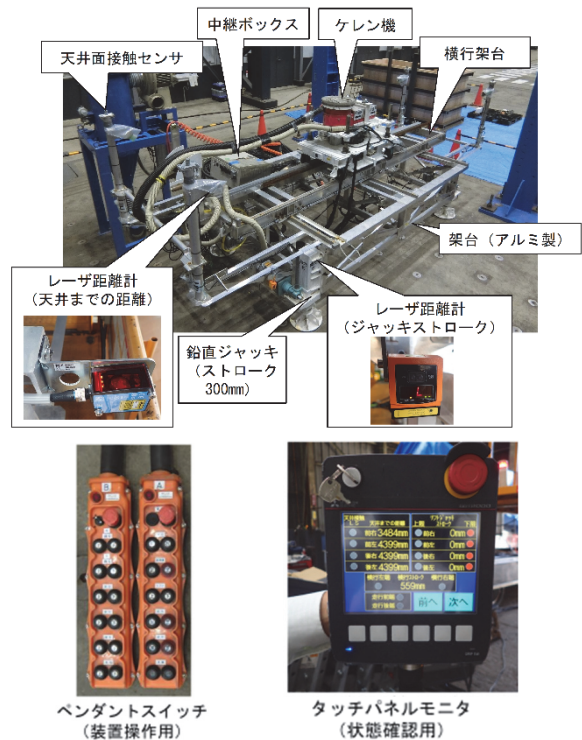


写真-7 改良後の研掃装置



写真-8 研掃装置と施工状況

3.4 適用結果

a. 適用状況

改良した研掃装置による施工フローを以下に、施工状況を写真-9に示す。

- ① 車線規制後、施工場所へ改良した研掃装置が入場
- ② 研掃位置に装置本体を積載した荷台昇降車及び3トン車を設置後、ローラージャッキの設置、装置本体・3トン車上の各機器の配線・配管接続
- ③ 荷台昇降車の上昇及び装置本体の鉛直ジャッキを伸ばし、ケレン機を天井面に押し付け、走行・横行させ、天井面の排ガスの汚れ等を主に除去
- ④ 鉛直ジャッキを縮め、天井面とケレン機との間に隙間(約10cm)を作り、荷台昇降車・3トン車を走行させ、次の研掃位置へ移動・設置
- ⑤ ③、④を繰り返し実施
- ⑥ 鉛直ジャッキを縮め、荷台昇降車の下降、各種配線・配管の片付け実施
- ⑦ 荷台昇降車及び後続台車が規制車線より退出

研掃作業時は、ケレン機が走行方向移動と横断方向移動を繰り返し、約4.0m²の面積を1セットとして研掃を行った(写真-10)。

施工条件として、道路規制は片側三車線のうち一車線供用下の二車線規制で、作業時間は車線規制を二車線に拡幅後の23時30分から翌3時30分までの約4時間である。

研掃条件は、現場での施工試験をもとに、研掃面の品質に影響するケレン機の押し付け力を600N、移動速度を約5.8m/minとした(写真-11)。



写真-9 施工状況

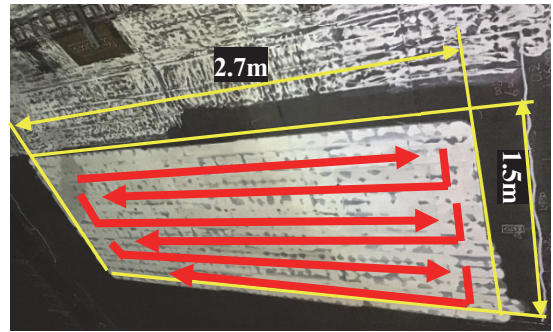


写真-10 研掃経路

b. 施工効率

実際の平均作業時間は、作業準備(①②)で平均48分、研掃作業(③~⑤)で平均123分、片付け(⑥⑦)で平均17分と



写真-11 研掃状況

なり、実質の作業時間は約3時間であった。研掃装置による施工ができない部分は人力施工で行っているため、4時間のうち約1時間は人力施工を行っていたことによるものである。図-7に、人力施工と改良した研掃装置(機械施工)による施工効率を示す。

人力施工の施工効率は平均11.1m²/hであった。なお、この人力施工の施工効率は、作業時間6時間として、人力施工面積に対する従事した作業員数から、作業員1人に対する時間当たりの施工面積を算出し、作業員3人からなる1班当たりへ換算したものである。また、準備・撤去・休憩時間を含んでいるので、長時間連続した施工による施工効率の低下を考慮している。

改良した研掃装置の施工効率は、準備・撤去・休憩時間を含めて、平均11.8m²/hとなった。適用初期は操作になれていなかったことから、操作に慣れた9月28日以降で施工効率を評価すると、平均15.2m²/hであった。なお、改良した研掃装置の作業人数は、装置本体の操作1名、作業補助1名、車両運転2名の計4名である。

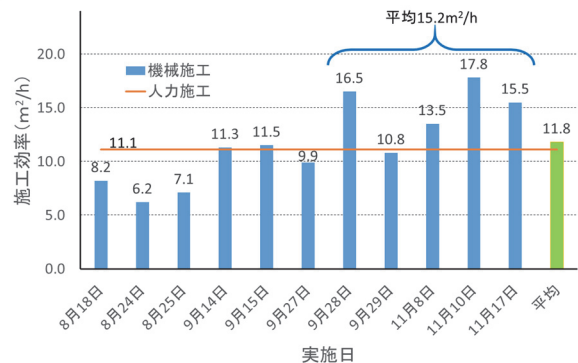


図-7 改良した研掃装置による施工効率

今回の施工では、改良した研掃装置の施工効率は、人力施工とほぼ同等となった。その要因として、作業時間が3時間と短かったため、準備、片付け等の占める割合が大きかったこと、下地の状態が良好で人力施工の負荷が小さかったことが考えられる。

また、改良前はリフトを下降させ、アウトリガを収納し、4トン車で移動していたため、移動に17分程度要し、施工効率は平均6.5m²/hであったが、改良後は図-8に示すように、荷台昇降車のローラージャッキにより、荷台昇降車を降下させずに次の施工場所へケレン機を移動させることが可能となったため、移動が4分程度になり施工効率が大幅に向上した。

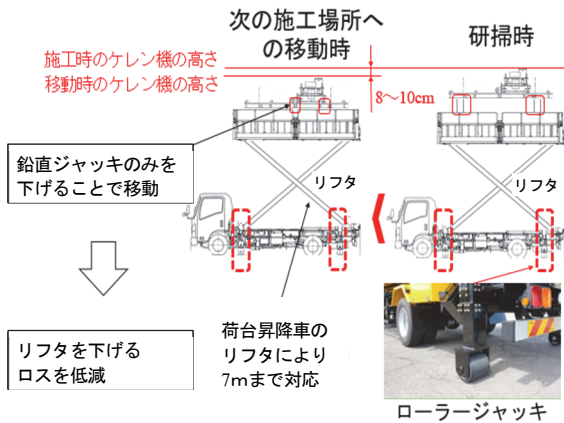


図-8 改良した研掃装置による施工効率

c. 仕上がり面の品質

人力施工と改良した研掃装置による汚れ除去後の仕上がり面を写真-12に示す。人力施工では、仕上がり面に黒い汚れが除去できていない部分が多くみられる。改良した研掃装置による仕上がり面は、人力の研掃よりも均一かつ確実に研掃できており、仕上がり面の品質向上に寄与できることが確認できた。



写真-12 改良した研掃装置と人力による研掃面



写真-13 仕上がりに斑がある箇所

ただし、写真-13に示すように、仕上がりに斑のある箇所があった。コンクリート面が凹んでいるため、直径25cmのディスクでは研掃できなかったことが要因で、今後の課題と考える。

d. 粉塵等の吸引状況

交換しやすいようにブラシ枠の形状を矩形から円形に変更したため、粉じんの漏れが懸念されたが、漏れは視認できず、確実に粉塵が吸引されることを確認した。

e. 作業の安全性

地上で、ペンダントスイッチとタッチパネルの操作によりすべての作業が可能となったため、高所での作業はなくなり、安全性、作業環境が向上した。

4. まとめ

首都高速道路の道路トンネルに、改良した研掃装置を適用し、道路トンネル天井面の素地調整作業を実施した。

装置本体を小型化・軽量化し、昇降機構を独立した荷台昇降車に変更することで、天井面の高さが約7mの道路トンネルまで適用可能となっただけでなく、大幅な盛替え時間の短縮を可能とした。また、4本の鉛直ジャッキを採用することで縦断勾配だけでなく、横断勾配へも適応させたことにより、研掃面の品質も向上することが確認できた。これらの改良により、積載する台車や車両の変更が容易となり、水路など小断面の構造物などにも適用範囲を拡大できると考える。

一方、改良した研掃装置による施工効率は、人力施工とほぼ同程度であったが、仕上がり面の品質向上や作業環境の改善等が図られ、改良した研掃装置の適用の効果はあった。

5種類の研掃装置を開発し改良を重ねたように、今後も研掃装置を現場に適用させ、汎用性を高めながら、普及展開を図っていききたい。

【参考文献】

- 1) 石井敏之、「ウォータージェットを用いたコンクリート表面処理機の開発と現場適用」、平成26年度新技術・新工法に関する講習会、pp.35-38、2015.2
- 2) 石井敏之、「天井用車載型乾式研掃装置の開発と現場適用」、平成27年度新技術・新工法に関する講習会（一般社団法人日本建設業連合会）、pp.12-16、2016.2
- 3) 田中寛大、西山宏一、石井敏之、「曲面天井用研掃システムの開発」、令和2年度土木学会全国大会第75回年次学術講演会、VI-1130、2020.9
- 4) 丸山八大、津村匡洋、石井敏之、「天井用車載型乾式研掃装置の自動化運転による地下鉄補修工事への適用について」、令和元年度建設施工と建設機械シンポジウム、pp.167-172、2019.12

ディープラーニングを用いた 下水管渠点検情報検出システムの開発

Development of Detection System Based on Deep Learning for Inspection Information of Sewer Pipes

岩下将也* 山口 治**

要 旨

下水道管渠の老朽化に伴い、その維持管理に求められる点検業務の範囲が拡大している。点検業務の効率化を図るため、展開広角カメラを利用した画像点検によって現地調査を省力化している。しかし、その結果、事務所内での画像の目視調査量が増大しており、目視調査をいかに迅速に行うかが課題となっている。そこで、展開広角カメラで撮影された管渠内部画像から、AI を用いて管構造と損傷を事前に検出する下水管渠点検情報検出システムを開発した。検出性能を評価した結果、管内の取付管や接合部について 90%以上の性能で検出ができるようになった。また、AI による検出速度は、管渠延長約 30m に対し 15 秒程度であり、迅速な管構造と損傷検出が可能となった。

キーワード：下水道管渠、詳細調査、展開広角カメラ、管構造、損傷、ディープラーニング

1. まえがき

現在、全国で整備されている下水道管渠は、約 48 万 km³あり、その多くは人が入れない内径 800mm 未満の小口径の管渠である。これらの管渠の点検業務では、専用のカメラを備えた自走する撮影機によって撮られた画像の目視が必要となるが、時間と費用がかかるため、十分に点検が進んでいない。そのため、不具合が発生した後に対処する事後保全の維持管理を余儀なくされている。

さらに今後は、標準耐用年数である 50 年を経過する下水道管渠が増加することから、管渠破損等に起因する道路陥没等の発生リスクが高まっており、今まで以上に効率的かつ低コストとなる管渠の点検方法が求められている。

そこで、代表的な管渠の点検手法の一つである展開広角カメラ調査を対象に、業務効率化を目的として下水管渠の点検情報の事前検出システムを構築した。本稿では、そのシステムの概要と性能について紹介する。

は多いものの、管の汚れなどがあるため、損傷の確実な判定は困難であり、軽度の損傷は視認対象とされないことが多い。

「詳細調査」では、管を事前に洗浄し、異常箇所とその程度を判定する。日進量はスクリーニング調査と比べて少なくなるものの、具体的な補修計画や長期的な維持修繕計画を検討する上では、詳細調査によってより確実な損傷の判定をしていく必要がある。

詳細調査では、「直視・側視カメラ調査」と「展開広角カメラ調査」の2つの方法が実用化されている。従来から行われている直視・側視カメラ調査は、首振り式のレンズを搭載したカメラ機器を地上の調査員が操作して管内を撮影し、現地でモニタリングしながら損傷を記録する。この方法は、損傷箇所ではカメラ機器を一時停止させる必要があるため、現地での作業時間が増加する点が課題となっていた。また、損傷の判定が現地の調査員の技術力に依存する点、現地に着任させる調査員の調整が必要な点など、マネジメントの観点からの課題もあった。

2. 下水管渠点検情報検出システムの概要

2.1 既往の点検業務の種類と課題

下水管渠内部を点検する業務は、表-1に示す2種類がある。「スクリーニング調査」は、未洗浄の管から迅速に異常箇所を把握する。1日当たりの調査量(日進量)

表-1 下水管渠内部の調査種類

	スクリーニング調査	詳細調査
目的	域内の管渠内部を効率的に調査 損傷がある管渠を抽出 詳細調査対象箇所を選定	管渠内部の損傷種類と程度を判定 改築・更新の判定
調査方法	管口カメラ、広角カメラ 等 	直視・側視カメラ、広角カメラ等 

*技術研究所環境研究グループ **東日本支社リニューアル技術部

対して、展開広角カメラ調査は、現地撮影の合理化が図られた手法となっている。展開広角カメラ調査の一般的なワークフローを図-1に示す。調査対象の路線内に、広角レンズを備えたカメラを入れ、管渠内部を等速で進みながら内部を撮影する。同時に、画像処理技術を用いて広角レンズのゆがみを処理した側視状の画像（以下、展開画像）を生成する。現場では、これらの撮影結果や展開画像をモニタリングしながら、簡易的な損傷のチェックを行う。その後、詳細な点検のため、展開画像を事務所へ持ち帰り、画像による目視調査を進めていく。

事務所内での目視調査では、展開画像から、まず管渠の取付管と接合部を確認し、それらを管構造として記録する。その後、管内にある損傷の種類とその程度を判定する。管構造と損傷の確認・記録は、パソコン上で稼働する専用の管理ソフトでシームレスに実施され、記録物は報告書としてまとめられる。

展開広角カメラを用いた調査では、現地での損傷の確認が最低限で済み、撮影機を停止させる必要もないことから、効率的な現地調査が可能となり、現地調査員の技能に依存するばらつきも少なくなる。1日当たりの調査可能量（日進量）は、直視・側視カメラ調査が300mであるのに対し、展開広角カメラ調査は450mと言われており、1.5倍の効率化が見込める手法である。

ただし、展開広角カメラ調査は、調査すべき画像を容易に取得できる性質上、事務所内での画像目視の業務が溜まりやすくなる。また、長時間の画像目視による集中力の低下なども問題となっている。詳細調査のさらなる合理化に向けて、展開画像の目視業務の効率化が新たな課題となっている。

2.2 下水管渠点検情報検出システムの機能概要

下水管渠点検情報検出システム（以下、本システム）は、図-1の破線ルート（青色表示部分）で示すように、展開画像の目視調査の際に管構造と損傷を自動的に検出し、管構造、損傷の確認の際に、その検出結果を参照できる仕組みとなっている。

図-2に管構造の検出を例とした管理ソフトとの連携関係を、図-3に管理ソフトの画面に表示された事前検出結果を示す。これまで、調査員は画像点検時に管理ソフト上の画像表示機能と記録機能を用いて目視と記録を行ってきた。本システムは、管理ソフトのJPG画像出力機能を用い、展開画像のJPGデータをAIによって処理し、管構造、損傷のデータを事前検出する。検出結果を管理ソフトの記録情報として渡すことで、調査開始の段階でソフト画面にシステムが検出した記録情報が表示される。調査員は画面に表示された事前検出の結果を見ながら、調査を開始できるため、検出記録に損傷の判定結果等の追加情報を加え、検出結果を修正するなどして調査を進めることができ、従来の管理ソフトの操作性を踏襲した効率的な業務ができる仕組みとなっている。

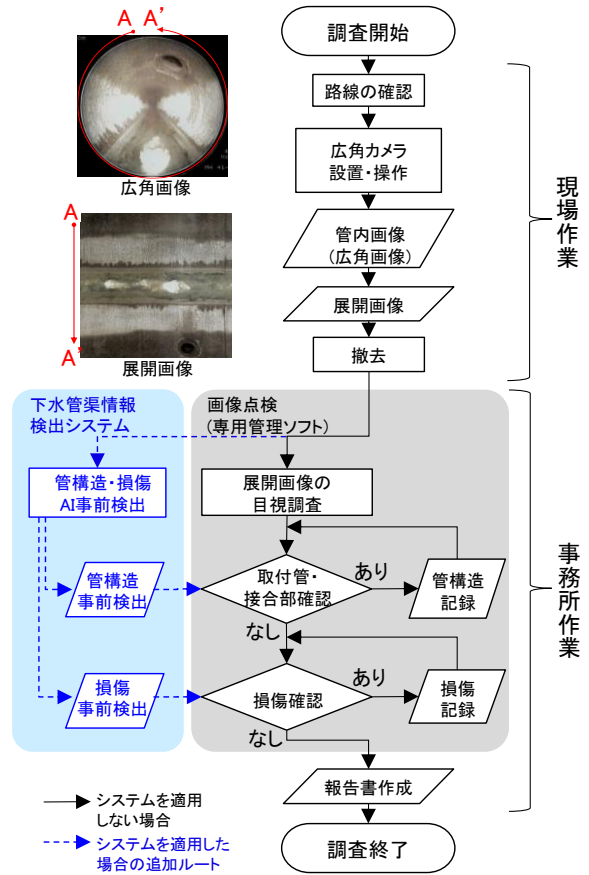


図-1 展開広角カメラ調査のワークフローとシステムの適用範囲

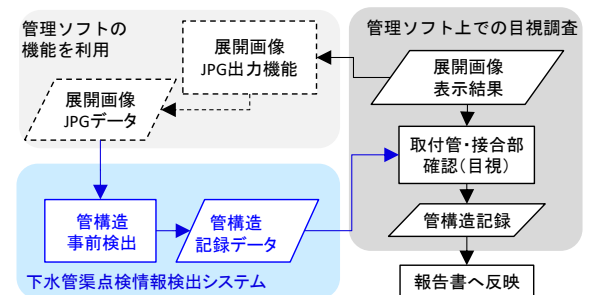


図-2 管理ソフトとの連携データフロー

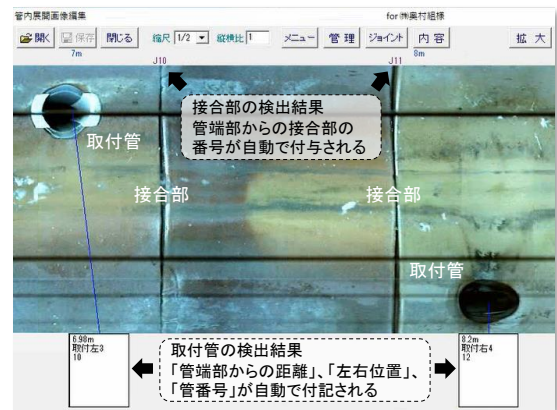


図-3 管理ソフト画面に表示された事前検出結果



図-4 展開画像上の検出対象

2.3 検出対象

本システムの検出対象の管構造、損傷の拡大写真を図-4に示す。コンクリート管と陶管の2つに対応しており、管構造は、「取付管」、「接合部」、損傷は、「破損・クラック」、「浸入水」、「モルタル・木根の侵入」を検出できる。管渠の損傷には、この他にも「腐食」、「たるみ」、「継手ズレ」、「取付管の突出し」、「油脂の付着」があるが²⁾、これらの損傷については、機能を拡張して今後、開発していく予定である。

3. システム構築とその性能

3.1 予測モデル構築の流れ

部位と損傷の検出には、機械学習手法の1つであるディープラーニングを用いている。画像と検出対象の情報（以下、ラベル）を元に、ラベルの画像上の特徴を自動的に学習し、予測モデルを構築する。

図-5に、予測モデルの学習と性能評価の流れを示す。最初に、検出したい部位・損傷を含む展開画像を用意し、専門の調査員の意見を聞きながら、部位・損傷の有無、その位置情報などを画像上にラベルとして付加する。この作業をアノテーションと呼ぶ。画像とラベルのセットを教師データとして、学習データ、検証データ、評価データの3つに、6:2:2の割合でランダムに分割する。

続いて、学習データとラベルから予測モデルを構築する。構築された予測モデルに検証データの画像を入れ、予測結果と検証データのラベルを比較して、学習データ以外の画像でも性能を発揮すること（汎化性能）を確認する。この時、十分な性能が出ておらず、学習に調整の余地があると判断された場合、条件（ハイパーパラメータ）をいくつか変え、再度学習を行い、検証データでの予測性能を高める。

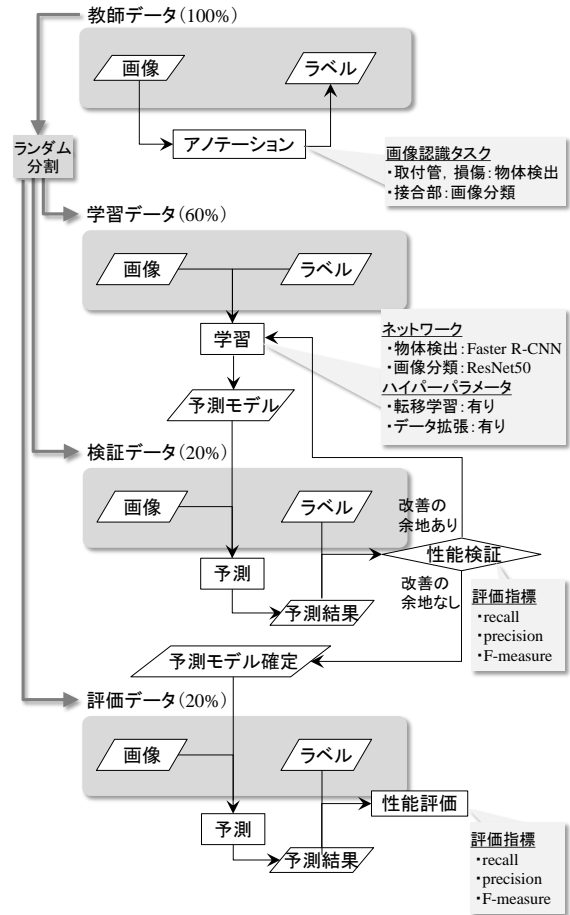


図-5 予測モデルの学習と性能評価の流れ

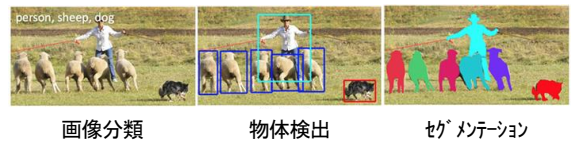


図-6 画像認識タスクの種類³⁾

再学習の試行を経て、これ以上の性能向上が見込めないと判断した場合、予測モデルを完成させ、最後に評価データを用いてモデルの予測性能を確定する。

以上が大まかな流れであるが、以下では具体的な検出方法、使用した教師データ、性能の評価指標などについて詳説する。

a. 検出方法

画像認識技術は、図-6に示す3種のタスクに大別され、認識方法に応じてアノテーション作業が異なる。「画像分類」では、画像の中に事象（図例の、犬、人、羊）があるかどうかを判断する。「物体検出」では、画像の中の事象を矩形で囲い、事象の種類と同時に位置を判断する。「セグメンテーション」では、画像の中の事象を画素ごとに判断し、事象の形状までを得る。画像分類 < 物体検出 < セグメンテーション、の順でアノテーション作業負担、検出時間が増えるため、対象に応じて必要十分な画像認識タスクを選ぶことが肝要である。

本システムでは、取付管と損傷3種の検出を物体検出にて行う。接合部は、検出対象がいずれも画像縦方向に長い線状あり、一定数があることから、展開画像を縦方向に長い画像に細分化し、それらの細分化画像を画像分類タスクとして検出し、検出の迅速化を図っている。

b. 教師データ

システム構築に使用した教師データのラベル数を表-2に示す(接合部は、細分化された画像の数を示している)。教師データの元となる画像は、下水道管渠の管理者である自治体からの承諾を受け、展開広角カメラ調査で実際に収集されたものであり、調査員の意見を踏まえながらアノテーションによってラベルを付加した。

c. ネットワーク構成とハイパーパラメータ

ディープラーニングによる画像認識では、画像情報(RGB情報の平面分布)をネットワーク状に伝播させ、ラベルの持つ特徴を抽出・分類する。このネットワーク構造によって予測性能が異なり、認識タスク別に様々なネットワークが用意されている。本システムでは物体検出に Faster R-CNN⁴⁾、画像分類には ResNet50⁵⁾ を用いている。いずれも応用例が豊富にあるネットワークである。

さらに、検証段階での性能向上として、別の事象の学習をネットワークの一部で部分的に済ませる転移学習の有・無、学習データを画像変換してデータ量を増やすデータ拡張の有・無をパラメータとして、その有効性を検証した。転移学習、データ拡張はいずれも性能を向上させる結果となったことから、最終的な予測モデルにおいてもこれらの手法を採用している。

d. 評価方法

検出した結果とラベルの対応に応じて、表-3に示す混同行列を用いて評価する。展開画像内に部位・損傷のラベルと予測結果が存在する場合を TP、展開画像内に部位・損傷のラベルのみ存在し、予測結果が存在しない場合を FN、展開画像内に部位・損傷のラベルが存在せず、予測結果のみが存在する場合を FP、展開画像内に部位・損傷のラベルと予測結果が存在しない場合を TN として、各展開画像をこれらのいずれかに分類する。

分類された集計結果を元に、(1)式、(2)式、(3)式を用いて recall、precision、F 値を求める。

$$\text{recall} = \frac{TP}{TP + FN} \quad (1)$$

$$\text{precision} = \frac{TP}{TP + FP} \quad (2)$$

$$\text{F 値} = \frac{2 \cdot \text{recall} \cdot \text{precision}}{\text{recall} + \text{precision}} \quad (3)$$

recall は再現率とも呼ばれ、予測結果にどれだけ取り漏らしが無いのか、その割合を示す。本システムの目的が

表-2 教師データのラベル数

	管構造		損傷		
	取付管	接合部	破損・クラック	侵入水	その他
コンクリート管					
学習データ	3,234	5,340	556	859	575
検証データ	989	1,781	221	307	220
評価データ	955	1,781	275	386	276
陶管					
学習データ	3,586	19,759	4,241	1,112	905
検証データ	1,297	6,584	1,404	382	330
評価データ	1,246	6,586	1,224	343	302

表-3 混同行列の考え方

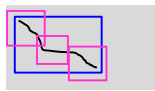

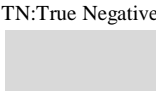
アノテーションラベル \ 予測結果	事象有り	事象無し
	事象有り	TP: True Positive 
事象無し	FP: False Positive 	TN: True Negative 

表-4 予測モデルの性能

	管構造		損傷		
	取付管	接合部	破損・クラック	侵入水	その他
コンクリート管					
recall	98.9%	91.4%	43.1%	81.3%	69.0%
precision	91.1%	76.0%	33.8%	40.8%	35.7%
F値	94.8%	83.0%	37.9%	54.3%	47.1%
陶管					
recall	99.0%	97.7%	72.0%	89.7%	78.3%
precision	95.0%	97.4%	56.4%	51.8%	34.2%
F値	97.0%	97.5%	63.3%	65.7%	47.6%

点検前の情報検出であることから、recall が高いことは特に重要である。precision は適合率とも呼ばれ、予測結果にどれだけ正しいものが含まれているか、その割合を示す。F 値は recall と precision の調和平均を取った総合評価指標であり、予測モデルの純粋な性能として参照する。いずれの指標も0~100%の範囲を取り、大きいほど性能が高くなる。

3.2 検出性能

表-4に、評価データを用いて算出した性能を示す。管構造は、全ての項目において recall が 90%を越えており、取り漏らしが少ない結果となった。precision、F 値も概ね90%以上であり、高い性能で検出できている結果となった。事前検出の段階でほとんどの管構造の記録が済んでいるため、大幅な省力化が期待できる。

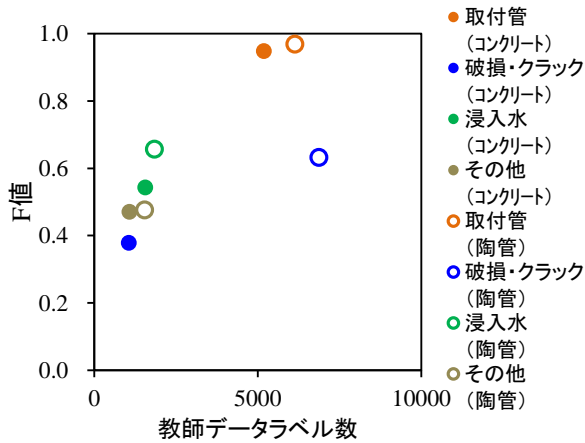


図-7 教師データラベル数とF値の関係

一方、損傷については、管構造と比較すると性能が低い結果となっている。recall は概ね 70%程度の性能が得られているものの、precision は 30~55%程度となっており、事前検出結果の半分以上は見直しが必要なものとなっている。中でも、コンクリート管の破損・クラックは、recall で 43%、precision で 33.8%と最も低い結果となっており、事前検出後も注意が必要な性能である。

3.3 性能の考察

図-7に、物体検出タスクにおける教師データのラベル数とF値の関係を示す。全体の傾向としてデータ数が多いほどF値が上がる傾向が見て取れる。ただし、陶管における破損・クラック（青色白抜き○）の結果を見てわかるように、損傷については教師データ数が多くとも、管構造と同等の性能にはならない可能性が高い。理由として損傷が管構造と比べて画像が複雑であることが考えられる。

図-8に、コンクリート管と陶管の部位・損傷ごとの正しく検出できた事例（TP）を示す。取付管、接合部は、特徴が明確で見た目にも判断しやすい画像であるが、損傷は、検出結果が幾重にも重なっているケースが多く、部位に比べ、特徴の境界が不明瞭であることがわかる。

図-9には、損傷の未検出（FN）、誤検出（FP）の事例を示す。破損・クラックは、全体に広がるように微細なクラックが走っている事例を検出できていない（1-a-i、1-a-ii）。また、表面が荒れた状態や線状の汚れを破損・クラックと誤検出している事例（1-b-i、1-b-ii）等が見られる。浸入水は、表面の汚れに似た微小の水の浸入を未検出（2-a-i）、浸入水に似た表面の汚れを誤検出している事例（2-b-i、2-b-ii）や、取付管からの流水跡を誤検出している事例（2-b-iv）等があった。その他侵入物では、クラックを木根の侵入として誤検出した事例（3-b-ii）等が見られた。

損傷は目視調査する調査員によって判断が分かれる事例も数多くあり、このような画像の複雑さが、学習の難しさの根本的な原因となっていると考えられる。

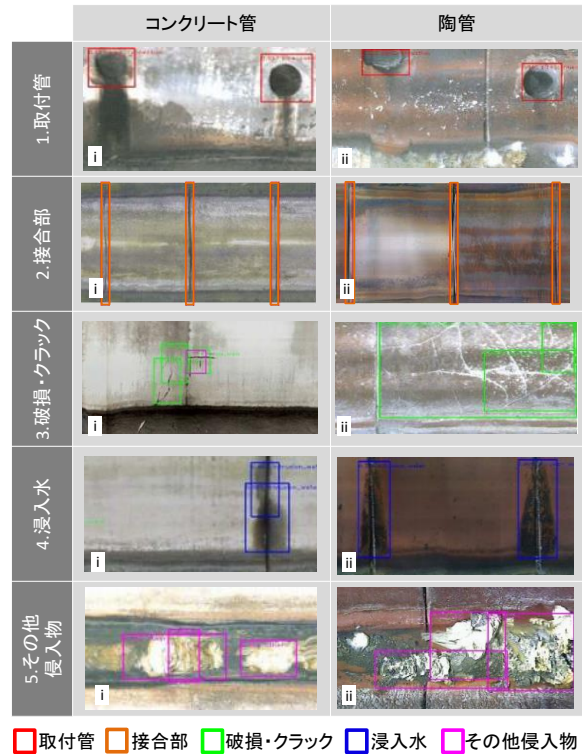


図-8 正しく検出できた事例

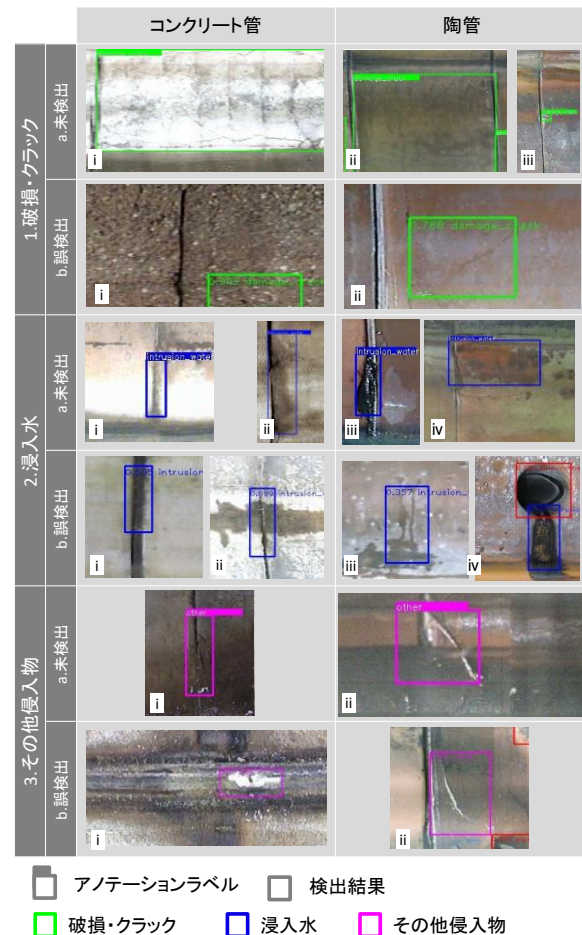


図-9 損傷の未検出・誤検出事例



図-10 検出時のシステム画面

3.4 検出速度

構築した AI をもとに、マンホール間の 1 スパン（約 30m）の管構造情報と損傷情報の検出を行ったところ、所要時間 15 秒であった。短時間で管構造と損傷を検出できるため、調査技術者はこれまでのように、全延長を網羅的に確認する必要がなく、作業量の軽減が見込める。

図-10 に、検出時のシステム画面を示す。検出の際は既往ソフトで静止画を出力し、その後、本システムでの操作は、管の登録だけでよく、後は図-2 のデータフローに即して検出・記録が行われるため、操作時間はほとんど発生しない。

4. まとめ

下水管渠の詳細調査の効率化を目的として、展開広角カメラに適用可能な点検情報の事前検出システムを開発した。本システムは以下の特長を備えたものとなっている。

- i. 管構造として、「取付管」、「接合部」の検出、損傷として「破損・クラック」、「浸入水」、「モルタル・木根の侵入」を検出できる
- ii. 点検業務をする上での既往の管理ソフトと連携した操作性の高いシステムとなっている

また、本システムの性能検証をした結果、以下の結果が得られた。

- i. 管構造の検出性能は非常に高く、画像上の取付管、接合部の recall 90%以上で検出できる
- ii. 損傷の検出性能は、管構造と比べると低下し、recall は 70%程度にとどまる
- iii. 検出速度は管渠 30m で 15 秒となっており、画像点検業務の事前情報検出システムとして業務効率化に寄与できる

5. あとがき

今後は、本システムを実際の業務に展開し、業務効率化の程度や新たな課題について確認していく予定である。また、損傷については、性能向上に向け、管渠の調査済み画像を収集していくとともに、この他の損傷（取付管の接合不良や管渠のたるみ、腐食など）についても機能化を進めていく。長期的には点検業務自体の代替ができるよう損傷の程度（ランク）判定も可能なシステムに拡張を予定している。

下水道管渠の事後保全型維持管理から、予防保全型維持管理への転換に向け、本ソフトを活用した点検の効率化を進め、下水インフラ管理の基盤強化および機能維持に貢献していきたい。

【参考文献】

- 1) 国土交通省、「維持管理情報等を起点としたマネジメントサイクル確立に向けたガイドライン（管路施設編）」、2020
- 2) 国土技術政策総合研究所、「スクリーニング調査を核とした管渠マネジメントシステム技術導入ガイドライン（案）」、2015
- 3) Li Liu, Wanli Ouyang, et al, “Deep Learning for Generic Object Detection: A Survey”, International Journal of Computer Vision, 2020,
- 4) S. Ren. et al, “Faster R-CNN: Towards Real-Time Object Detection with Region Proposal Networks”, arXiv, 2015
- 5) K.He. et al, “Deep Residual Learning for Image Recognition”, arXiv, 2016.

高炉スラグ微粉末を用いた 環境配慮型コンクリートの開発

Environmentally Considerate Concrete Incorporating Ground Granulated Blast-furnace Slag

河野政典* 赤星博仁** 伊藤 淳**

要 旨

普及展開が図りやすい一般流通する高炉スラグ微粉末を用いた環境配慮型コンクリートの開発を目指し、高炉スラグ微粉末の使用率等が品質に及ぼす影響を把握する室内実験、およびフレッシュコンクリート性状の時間変化や構造体強度の特性を確認する実機実験を行った。その結果からコンクリートの調合、製造、および施工に必要なデータを整理し、高炉スラグ微粉末の使用率が10~70%の範囲におけるコンクリートの調合設計・施工マニュアルを整備した。そして、使用率70%で、品質基準強度が30N/mm²のコンクリートを実建物の基礎・地中梁に272m³適用した。本適用では、普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートに対して、61%のCO₂削減効果となった。

キーワード：高炉スラグ微粉末、環境配慮型コンクリート、現場適用

1. まえがき

近年、環境負荷低減の観点から、コンクリート業界では、セメントの一部を銑鉄の製造工程で生成される高炉スラグ微粉末（以下、BF）に置き換えてCO₂の発生量を抑えるコンクリートが着目されている。

BFをセメント工場で混合した高炉セメントは、JIS R 5211（高炉セメント）において、結合材の質量に占めるBFの割合（以下、BF使用率）によりA~C種が規定されており、それぞれコンクリート性状が異なることが知られている。このうち、高炉セメントB種として一般流通している、BF使用率が40~45%のものについては、多くの生コン工場において調合が標準化され、JIS A 5308（レディーミクストコンクリート）への適合性が評価機関で認証された、いわゆるJISマーク品のコンクリートとして取り扱われている。しかしながら、中性化の進行が速いとされることから、建築では地下構造物への使用に留まっているのが実情である。

高炉セメントA種やC種、およびBF使用率が40~45%以外のB種については、流通が極めて少ない。そのため、コンクリートに求められる品質に応じた使用率でBFを使用するには、BFを生コン工場で混入する方法が現実的となる。しかし、この方法でコンクリートを製造、出荷した実績のある工場は少なく、したがって、JISマーク品のコンクリートとして出荷可能な工場はさ

らに少ない。また、実現場への適用を見据えた実用的なデータも少ないため、設計者が採用し難い現状にある。時代の趨勢から、CO₂の排出量が少ない実用的な環境配慮型コンクリートの開発が待たれている。

そこで、現実的で普及展開が進めやすい製造方法として、一般流通するBFを用い、それを生コン工場で混入する方法をターゲットとし、開発に着手した。開発目標としたコンクリートの仕様を表-1に示す。BF使用率は10~70%とし、JIS R 5211を参考に使用率に応じて3クラスに分けた。設計基準強度は、普通コンクリートの強度範囲である18~36N/mm²とした。現場への適用に向けては、使用する部材条件に応じたコンクリートの調合設計、施工方法のマニュアル整備が必要である。そこで、BF使用率やBF種類の違いがコンクリートの諸性状におよぼす影響を把握するための室内実験、および現場適用を想定したフレッシュコンクリート性状の時間変化や、構造躯体に打ち込まれたコンクリートの強度特性を確認するための実機実験を行い、マニュアル整備のデータを収集した。また、このコンクリートの普及展開を進

表-1 開発目標としたコンクリートの仕様

BFの使用率とクラス分け	A種クラス：10%以上、30%以下 B種クラス：30%超、60%以下 C種クラス：60%超、70%以下
使用するBF	高炉スラグ微粉末4000（JIS A 6206 適合品、せっこう添加あり）
設計基準強度	18~36N/mm ²
計画供用期間の級	短期、標準、長期

*技術研究所企画・管理グループ **技術研究所建築研究グループ

めるうえでは、実現場への適用性を実証し、実績を示すことも重要となるため、実建物への適用を試みた。

2. 室内実験

2.1 室内実験の概要

室内実験では、BF 使用率や BF 種類、化学混和剤種類などの違いがコンクリートの諸性状におよぼす影響を確認するため、表-2 に示す要因と水準で、表-3 のフレッシュコンクリート、強度および耐久性試験を行った。

2.2 使用材料および調査

コンクリートの水結合材比（以下、W/B）は、表-1 に示す設計基準強度の範囲を網羅するよう、BF 使用率 45%までは W/B 45~65%、BF 使用率 60~70%は W/B 35~55%とした。BF 種類は一般流通する 3 メーカーで、いずれも JIS A 6206（コンクリート用高炉スラグ微粉末）の高炉スラグ微粉末 4000 に適合するもので、比表面積は 4290~4390cm²/g であった。目標スランブは、W/B が 55、65%では 18cm として化学混和剤には AE 減水剤を使用し、W/B が 35、45%では 21cm とし、BF 使用率に応じて高性能 AE 減水剤を使用した。なお、化学混和剤は 3 メーカーとした。

骨材は JIS A 6204（コンクリート用化学混和剤）のコンクリート試験に用いる品質に適合するもので、細骨材には砂（山砂または陸砂）、粗骨材には硬質砂岩砕石を、セメントには普通ポルトランドセメントを使用した。

コンクリートの調査は表-2 の要因と水準の組合せで、全 40 調査とし、単位水量は各調査で標準的な単位量を採用した。なお、目標空気量はいずれも 4.5%とした。

2.3 フレッシュコンクリート試験結果

フレッシュコンクリートの状態は、いずれも目標のスランブ、空気量を満足し、良好であった。

図-1 に、BF 使用率とブリーディング量の関係を示す。ブリーディング量は、BF 使用率の増加に伴い減少した。また、BF メーカーによるブリーディング量の違いは小さく、いずれの条件でも 0.3cm³/cm²以下であることから、BF の使用によるブリーディングへの特段の配慮は不要と判断できる。

図-2 に、BF 使用率と凝結時間の関係を示す。20℃における凝結の始発時間は、W/B35%を除き、BF 使用

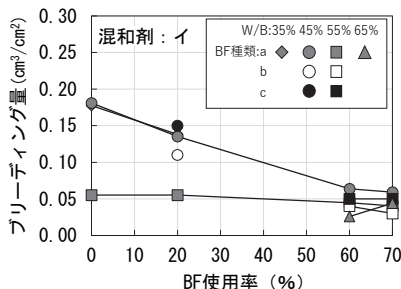


図-1 BF 使用率とブリーディング量

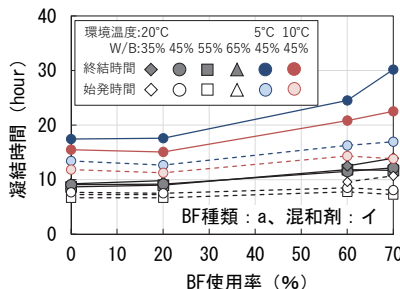


図-2 BF 使用率と凝結時間

表-2 室内実験の要因と水準

要因	水準	
BF 使用率	0%、A 種クラス：10%、20%、30% B 種クラス：45%、60%、C 種クラス：70% [記号：BF00~BF70]	
水結合材比(W/B)	45%、55%、65% (BF 使用率 0~45%) 35%、45%、55% (BF 使用率 60~70%)	
BF	種類	a、b、c (3 メーカー)
	三酸化硫黄(SO ₃)量	約 2%、4% (無水せっこうの添加量により調整)
化学混和剤種類	イ、ロ、ハ (3 メーカー)	
環境温度	20℃、10℃、5℃	

注) 実験では、___の水準を基本とした。

表-3 試験項目

試験項目	方法	
フレッシュ	スランブ	JIS A 1101
	空気量	JIS A 1128
	ブリーディング	JCI-S-015 φ150×300mm 容器
	凝結時間	JIS A 1147 環境温度 20、10、5℃
強度	断熱温度上昇	φ400×400mm 鋼製型枠、BF70、W/B45%
	圧縮強度	JIS A 1108 標準養生供試体
耐久性	静弾性係数	JIS A 1149 材齢 28、91 日
	長さ変化	JIS A 1129 (乾燥収縮試験) W/B45、55%
	中性化抵抗性	JIS A 1153 (促進中性化試験)
	耐凍害性	JIS A 1148 (凍結融解試験) W/B45%

率や W/B による違いは小さいが、終結時間は、BF 使用率 60%（以下、BF60）および BF70 では、BF00 や BF20 よりも約 3 時間遅延した。また、環境温度による影響はさらに大きく、BF00 や BF20 でも 20℃より遅延するものの、BF60 および BF70 では BF20 に比べ、10℃では始発で約 3 時間、終結で 6~7 時間、5℃では始発で約 4 時間、終結で 7~13 時間の遅延となった。なお、環境温度にかかわらず SO₃ 量 2%と 4%の違いは見られなかった。

図-3 に、各 BF を用いたコンクリートの断熱温度上昇の試験結果を示す。各 BF メーカーによる断熱温度上昇量は同程度だった。また、図中に併記した日本コンクリート工学会「マスコンクリートのひび割れ制御指針 2016」の予測式（JCI 式）との関係では、低熱ポルトランドセメント（L）の予測値と 3.5 日以降の温度上昇量が近い傾向を示すものの、初期の温度勾配は L より大きく、そのため材齢 1~3.5 日程度の期間では温度上昇量が大きい。中庸熱ポルトランドセメント（M）の予測値を用いることで、安全側の評価となる。

2.4 強度試験結果

図-4 に、BF 使用率と材齢 7 日、28 日の圧縮強度の関係を示す。圧縮強度は、材齢 7 日において BF 使用率

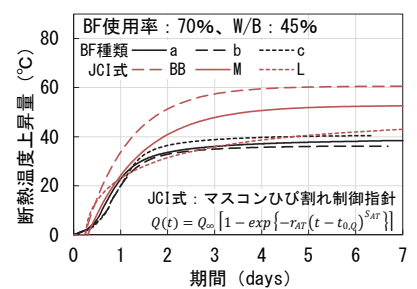


図-3 断熱温度上昇量

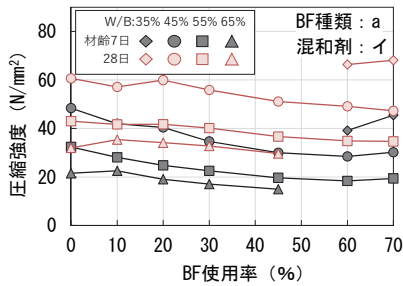


図-4 BF 使用率と圧縮強度

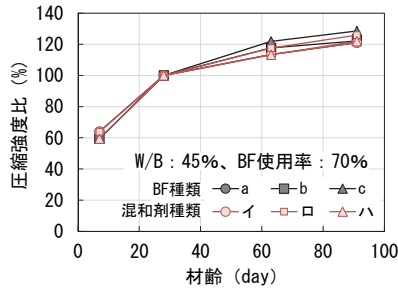


図-5 材齢28日を基準とした圧縮強度比

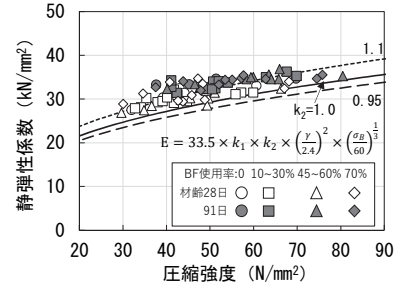


図-6 圧縮強度と静弾性係数

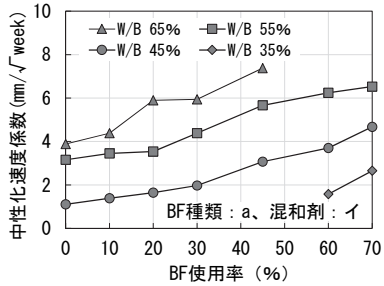


図-7 BF 使用率と中性化速度係数

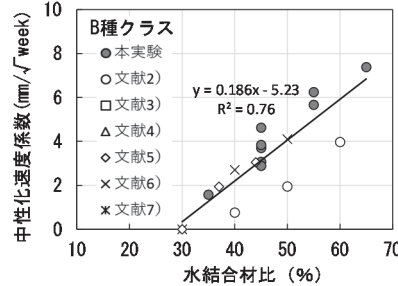
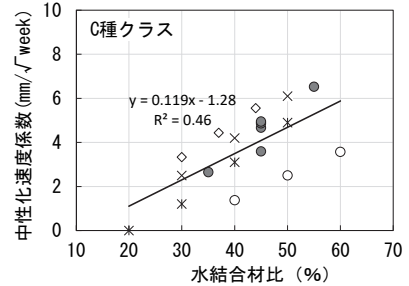


図-8 水結合材比(W/B)と中性化速度係数



が増加するほど低下したが、BF70の圧縮強度はBF60よりも大きかった。材齢28日では、BF使用率0～30%まで同程度の圧縮強度を有しているが、30～70%では使用率の増加に伴い緩やかに低下した。

BF および混和剤メーカーの違いによる強度発現傾向については、材齢28日の圧縮強度を基準とした圧縮強度比との関係から検討した。BF使用量の多い調査としてW/B45%、BF70における圧縮強度比を図-5に示す。各メーカーの違いによる強度の差は小さく、いずれも同様な強度発現性を示した。なお、SO₃量の違いによる強度については、SO₃量4%では材齢7日の初期強度は大きい、長期材齢での強度増進が低下した。

図-6に、圧縮強度と静弾性係数の関係を、日本建築学会「建築工事標準仕様書・同解説 鉄筋コンクリート工事 JASS5」(以下、JASS5)に示されている推定式と併せて示す。静弾性係数は、圧縮強度の増加に伴い推定式に沿い、大きくなる傾向を示した。推定式の混和材の種類による係数k₂は、BFを用いる場合、0.95と示されているが、本実験ではBF00に対して0.97～1.02となり、混和材を使用しない場合と同程度の静弾性係数であった。

2.5 耐久性試験結果

a. 中性化抵抗性と耐久設計強度

図-7に、BF使用率と促進中性化試験の結果から得られた中性化速度係数の関係を示す。いずれのW/BでもBF使用率の増加に伴い、中性化速度係数は大きくなることから、W/BおよびBF使用率から中性化深さを評価できると考えられる。

中性化試験の結果から、A～C種クラスに応じた耐久設計基準強度の検討を行った。検討にあたっては、妥当性を確認する目的で、BF使用率10～75%の既往の研究結果^{2)~7)}を含めた。図-8に、B種、C種クラスのW/B

と中性化速度係数の関係を示す。既往研究とは使用材料の品質が必ずしも一致せず、また、BF使用率の範囲に幅があるものの、得られたデータは既往のデータの範囲内にあることが確認できる。A種の結果も同様であった。

図-8に示す近似式より、日本建築学会「鉄筋コンクリート造建築物の耐久設計施工指針・同解説」(以下、耐久指針)に倣い、屋外のCO₂濃度を0.05%、屋内を0.10%とし、鉄筋腐食確率20%となるW/Bを求め、同会「コンクリートの調査設計指針・同解説」に示されている呼び強度に対する水セメント比の調査データと、求めたW/Bを照らし合わせ、W/Bが確保される呼び強度から耐久設計基準強度を導いた。その結果を表-4に示す。A種およびB種クラスは、JASS5に示される耐久設計基準強度と同値となった。すなわち、普通ポルトランドセメントのコンクリートと同じ耐久設計基準強度を満足する調査であれば、同等の耐久性を有するコンクリートとして使用できることが確認された。なお、C種は3または6N/mm²を上乗せした値となった。

b. 乾燥収縮

図-9に、長さ変化試験の結果としてW/B55%の乾燥材齢と乾燥収縮率の関係を示す。長期材齢においても乾燥収縮が進行すると考えられたため、JISの測定期間よりも長い41週まで測定を行った。同一のW/Bでは、乾燥材齢4～13週においてBF60、BF70の乾燥収縮率がBF00、BF20よりも50～100×10⁻⁶程度小さくなるものの、26週以降でいずれも同程度の乾燥収縮率に収束し、この関係はW/B45%も同様であった。

c. 耐凍害性

図-10に、凍結融解試験におけるW/B45%のサイクル数と相対動弾性係数の関係を示す。BF20、BF60では、大きな変動はなくBF00と同様の傾向であったが、BF70

表-4 計画供用期間の級と
耐久設計基準強度 (N/mm²)

計画供用 期間の級	A 種 クラス	B 種 クラス	C 種 クラス
短期	18	18	24
標準	24	24	27
長期	30	30	33

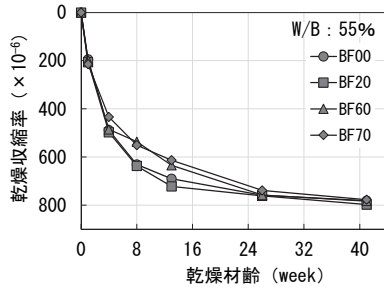


図-9 乾燥材齢と乾燥収縮率

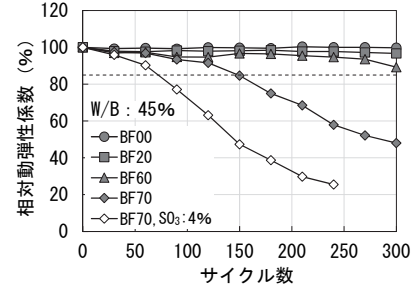


図-10 サイクル数と相対動弾性係数

では、耐久指針で維持管理限界状態の相対動弾性係数である 85%を大きく下回った。BF 使用率が高い場合、本結果と同様の報告とそれとは異なる報告⁸⁾の両者があるので、凍結融解作用を受ける場所に使用する場合には、より詳細な検討が必要である。また、SO₃ 量 4%では、2%よりもさらに相対動弾性係数の低下は顕著であった。

2.6 室内実験のまとめ

室内実験で得られた BF 使用率と各種コンクリートの性状は表-5のとおりとなる。A 種クラスでは BF00 と同等程度の品質を有する。

3. 実機実験

3.1 実機実験の概要

フレッシュコンクリート性状の時間変化および構造体強度を確認するため、3 工場 (記号: X、Y、Z) で実機実験を実施した。実験の組合せは表-6に示すように、3 工場それぞれにおいて室内実験で用いた 3 メーカーの BF および混和剤の組合せとした。コンクリートの調査は、BF 使用率を A 種クラスで 15% (BF15) および 30% (BF30)、B 種クラスで 60% (BF60)、C 種クラスで 70% (BF70) とした。

3.2 呼び強度と水結合材比 (W/B) の設定

W/B の設定では、まず各工場を試練りを実施し、得られた圧縮強度と工場が運用する JIS の強度算定式との関係を確認した。次に、BF15 および BF30 は普通ポルトランドセメントの算定式を、BF 60 は高炉セメント B 種の算定式を、BF 70 は高炉セメント B 種の算定式から 3 または 6N/mm² をマイナス側に平行移動した式を用いて、呼び強度 21、33 および 42 相当の W/B を設定した。

3.3 使用材料および調査

コンクリートに使用した普通ポルトランドセメント、練混ぜ水、および骨材は、各工場で通常使用しているものとした。BF は JIS A 6206 に適合するせっこう添加タイプを用いた。化学混和剤は、原則として呼び強度 21 では AE 減水剤を、呼び強度 33 および 42 では高性能 AE 減水剤とし、BF60、BF70 ではフレッシュ性状の保持性を確保するため BF 高含有タイプを用いた。スランブは、いずれの BF 使用率においても、呼び強度 21 および 33 では 18±2.5cm、呼び強度 42 では 21±2.0cm を管理範囲

表-5 室内実験のまとめ

項目	クラス・BF 使用率 (%)					
	A 種		B 種		C 種	
	10	20	30	45	60	70
ブリーディング	—	同等	—	—	減少	
凝結時間	—	同等	—	—	遅延	
凝結時間 (低温)	—	同等	—	—	著しく遅延	
温度上昇量	—	—	—	—	—	減少
圧縮強度	7 日	BF 使用率の増加に伴い低下				
	28 日	同等		BF の増加に伴い低下		
	91 日	同等		BF の増加に伴い低下		
静弾性係数	同等					
乾燥収縮	—	同等	—	—	同等	
中性化抵抗性	BF 使用率の増加に伴い低下					
耐凍害性	—	同等	—	—	微低	低下

注) 表内は、BF00 と比較した場合のコンクリートの性状を示す。

表-6 実機実験の組合せ

項目	工場: X	工場: Y	工場: Z	
BF メーカー	c	b	a	
混和剤メーカー	イ	ロ	ハ	
季節区分	標準期: S	BF15、BF30 BF60、BF70	BF15	BF15
	夏期: H	BF15	BF30、60	BF70
	冬期: W	BF15	BF70	BF30、BF60
呼び強度	21、33、42			

とし、実際の運搬時間を想定して、練上がりから 60 分で目標値を満足するよう化学混和剤の添加量を調整した。

3.4 試験項目および方法

フレッシュコンクリート試験では、スランブ、空気量、コンクリート温度の測定を練上がりから 0、30、60、90 分および 120 分で実施した。圧縮強度試験は、標準養生、柱模擬試験体 (1000×1000×1000mm) より採取したコアで実施した。供試体の採取および模擬試験体の打ち込みは、練上がりから 60 分で行った。

3.5 フレッシュコンクリート試験結果

図-11 に、呼び強度 33 の BF30、BF60 のスランブの時間変化を示す。スランブは時間経過とともに低下する傾向で、特に、夏期では 90 分から 120 分での低下が大きく、60 分以降では管理値を外れるものも見られた。

なお、空気量については、スランブと同様に BF 使用率に関わらず、60 分で 4.5±1.5% の管理値を満足した。

3.6 圧縮強度試験結果

a. 生コン工場の強度算定式との関係

標準養生材齢 28 日の圧縮強度と生コン工場の強度算定式との比較の一例を図-12 に示す。実機実験にあ

たって採用した強度算定式は前述のとおり、生コン工場が運用する普通ポルトランドセメントと高炉セメントB種の強度算定式をベースに、事前実施した試し練りの結果を考慮して決定している。

BF15、BF30の標準28日の圧縮強度は、いずれの生コン工場においても採用した強度算定式と同等か上回る結果となった。一方で、BF60、BF70では、X工場では同様に強度算定式と同等か上回る結果であったが、Y工場では強度算定式を下回る結果となった。なお、Z工場はX工場と同様の傾向であった。結合材水比と圧縮強度の関係を見ると、いずれのBF使用率、生コン工場においても採用した強度算定式と同等の傾きである。

実物件への適用にあたっては、実際に採用されるBF使用率を考慮し、実機実験を実施したうえで、生コン工場の強度算定式との関係を把握し、必要に応じて傾きを保持したまま負側に平行移動するなどの方法により、安全を考慮した適切な強度設計ができるものと考えられる。

b. 構造体強度補正值 (28S91)

標準養生材齢28日の圧縮強度と構造体コンクリートの材齢91日の圧縮強度の差である構造体強度補正值28S91の標準値については、建設省告示第1102号およびJASS5でそれぞれ3または6N/mm²と示されている。実機実験の結果から得られた材齢91日のコア強度と28S91の関係を図-13に示す。また、建設省告示第1102号の根拠資料となった実験結果⁹⁾を併記した。全体的な傾向として、一般的に知られるように、コア強度が大きいほ

ど28S91が大きくなる傾向が確認できる。季節の影響としては、標準期が小さく、冬期、夏期の順に大きくなる傾向がみられる。また、設計基準強度18~36N/mm²の範囲では、おおむね3または6N/mm²を満足していた。

3.7 実機実験のまとめ

荷卸し60分を目標にしたフレッシュ性状は、所定の品質を満足し、通常のコンクリートと同様、出荷時にスランプ等を化学混和剤の添加量で調整することにより、現場適用可能であることが確認できた。また、調査設計は生コン工場の強度算定式をベースに算定が可能で、構造体強度補正值28S91は、建設省告示第1102号およびJASS5の標準値である3または6N/mm²と同等であった。

4. 現場適用

4.1 現場適用の概要

現場適用した建物は、RC造と鉄骨造が複合する2階建ての当社技術研究所(茨城県つくば市内)の室内環境実験棟で、その基礎・地中梁にBF使用率70%のコンクリートを272m³打設する計画とした。品質基準強度が30N/mm²で、打設が夏期のため、構造体強度補正值28S91を6N/mm²とし、調査管理強度を36N/mm²とした。

コンクリートの調査と使用材料を表-7に示す。W/Bは実機実験を行い、生コン工場の高炉セメントB種の強度算定式を参考に決定した。目標スランプは18cm、空気量は4.5%、許容差をそれぞれ±2.5cm、±1.5%とし、

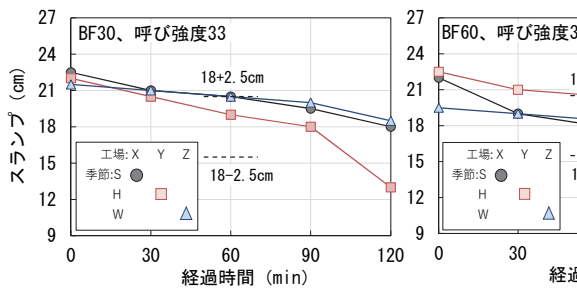


図-11 スランプの時間変化

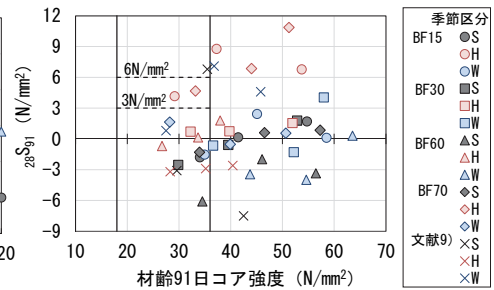
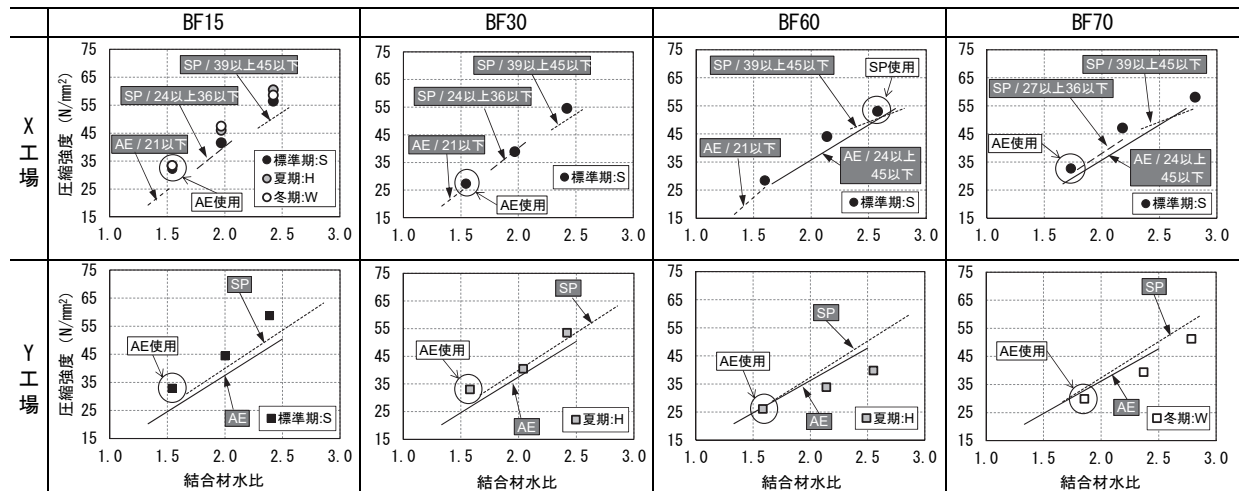


図-13 材齢91日のコア強度と構造体強度補正值28S91



図中「AE」はAE減水剤を使用した場合、「SP」は高性能AE減水剤を使用した場合、数値は呼び強度

図-12 標準養生材齢28日の圧縮強度と生コン工場の強度算定式との比較の一例

管理値とした。生コン工場は、工事現場から運搬時間約60分の場所に位置した。

打設は2回に分け実施した。1回目の打設は115 m³で、受入れ試験、圧縮強度試験を4回行った。2回目の打設は157 m³で、受入れ試験を6回、圧縮強度試験を4回行った。

4.2 実施結果

スランプ、空気量の試験結果を図-14に示す。受入れ試験は練上がりから60~80分程度で行い、スランプ、空気量ともに管理値を満足した。なお、出荷時のスランプは22cm程度とした。受入れ時のコンクリート温度は28~31°Cであった。

圧縮強度試験結果を図-15に示す。材齢28日の圧縮強度は、いずれも調和管理強度36N/mm²を満足した。

今回用いたコンクリートのCO₂発生量の削減率は、普通ポルトランドセメントを用いた呼び強度36の生コン工場における標準配合のコンクリートに対して61%で、272m³の打設に対して削減量は48tと試算される*。

*インベントリデータは、普通ポルトランドセメントを772kg-CO₂/t、BFを35.6kg-CO₂/tとした¹⁰⁾

5. まとめ

一般流通するBFを用いた環境配慮型コンクリートの実用化を目指し、BF使用率やBF種類の違いがコンクリートの諸性状におよぼす影響を把握するための室内実験、およびフレッシュコンクリート性状の時間変化や構造体強度の特性を確認するための実機実験を行った。その結果から、コンクリートの調合、製造、および施工に必要なデータを得て、BF使用率が10~70%の範囲におけるコンクリートの調合設計・施工マニュアルを整備した。そして、現場適用性を実証するため、BF使用率70%で、品質基準強度が30N/mm²のコンクリートを実建物の基礎・地中梁に272m³打設した。本適用では、普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートに対して、61%のCO₂発生量の削減効果となった。

6. あとがき

2章の室内実験および3章の実機実験は、青木あすなろ建設、浅沼組、安藤ハザマ、熊谷組、鴻池組、五洋建設、銭高組、鉄建建設、東急建設、東洋建設、長谷工コーポレーション(主査)、矢作建設工業、および奥村組の13社で組織された「CELBIC研究会」において実施したもので、この研究会で調合設計・施工マニュアルを整備し、日本建築総合試験所より建設材料技術性能証明(GBRC材料証明第20-04号、CELBIC-環境配慮型BFコンクリート-)を取得している。この性能証明と適用実績を携え、今後、普及展開を進めていきたい。

表-7 コンクリートの調合と使用材料

W/B (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)						Ad (B×%)
		W	B		S		G	
			C	BF	S1	S2		
39.0	44.2	168	129	302	516	227	961	0.95

セメントC：普通ポルトランドセメント 密度3.16g/cm³
 混和材BF：高炉スラグ微粉末4000 密度2.89g/cm³
 細骨材S1：陸砂 茨城県潮来市島須産 表乾密度2.58g/cm³
 S2：砕砂 栃木県栃木市鍋山町産 表乾密度2.67g/cm³
 粗骨材G：碎石2005 茨城県つくば市産 表乾密度2.70g/cm³ 実積率60.0%
 化学混和剤Ad：高性能AE減水剤(遅延型) BF高含有用
 練混ぜ水W：地下水

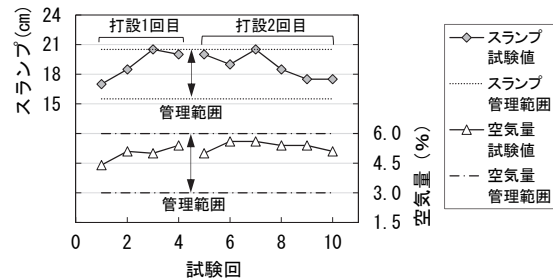


図-14 受入れ試験結果(スランプ、空気量)

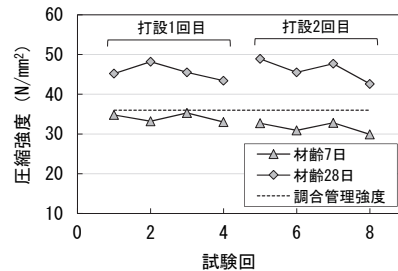


図-15 圧縮強度試験結果

【参考文献】

- 1) 日本建設業連合会、「低炭素型コンクリートの普及促進に向けて」、2016.4
- 2) 辻大二郎ほか、「混合セメントを用いたコンクリートの耐久性(その7)」、日本建築学会大会学術講演梗概集、2016.8、pp.49-50
- 3) 小林利充ほか、「高炉セメント A 種相当品を使用したコンクリートの基礎的性状に関する検討」、日本建築学会大会学術講演梗概集、2017.8、pp.61-62
- 4) 金子 樹ほか、「セメント混合における高炉セメント A 種相当のコンクリートの諸性状(その1~その3)」、日本建築学会大会学術講演梗概集、2017.8、pp.63-68
- 5) 溝野博之ほか、「混和材を高含有したコンクリートの基礎的性状(その1~その3)」、日本建築学会大会学術講演梗概集、2011.8、pp.185-188
- 6) 大岡督尚ほか、「高炉スラグ微粉末を高含有した環境配慮型コンクリートの基礎物性(その1~その3)」、日本建築学会大会学術講演梗概集、2016.8、pp.79-84
- 7) 辻大二郎ほか、「高炉スラグ高含有セメントを用いたコンクリートの基礎物性(その1~その3)」、日本建築学会大会学術講演梗概集、2011.8、pp.205-210
- 8) 日本建築学会、「高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの技術の現状」、1992
- 9) 棚野博之ほか、「型枠の取り外しに関する管理基準の検討」、建築研究資料、No.168、2016.3
- 10) 日本建築学会、「高炉セメントまたは高炉スラグ微粉末を用いた鉄筋コンクリート造建築物の設計・施工指針(案)・同解説」、2017.9

オールラウンド免震®の実建物への適用（その2）

－観測記録に基づく微振動対策ダンパーの適用効果－

Application of All-round Isolation System to an Actual Structure (Part 2)

- The Effect of Viscous Dampers based on Observational Records -

小山慶樹* 山上 聡* 舟木秀尊* 安井健治*

要 旨

一般的な免震装置に微振動対策ダンパーを組み合わせた『オールラウンド免震®』建物において、微振動対策や地震対策効果を確認する目的で、建物竣工前に起振実験、竣工後に常時観測や常時微動計測を行っている。本報では、微振動対策ダンパーが Maxwell モデルによってモデル化が可能で、精度よく起振実験を再現することができ、設計段階から微振動対策ダンパーの適用効果を把握できることを示す。また、常時観測記録からオールラウンド免震が一般的な免震建物に比べて 1.5 倍程度の減衰定数を有し、微振動対策効果があることを示す。最後に、建物稼動中に常時微動計測を行い、微振動に対する設計クライテリアを満たしていることを確認する。

キーワード：免震建物、微振動対策ダンパー、起振実験、常時微動計測

1. まえがき

マグニチュード9級の巨大地震などを経験し、免震建物の安全性や事業継続性の向上が再認識され、重要拠点となる建物の多くに免震構造が採用されるようになった。しかし、免震建物は一般に地盤への逸散減衰が期待できず、免震層の水平剛性が耐震建物に比べて小さいので、交通振動や建物内の機械振動などの微振動に対して揺れやすい。その結果、精密機器を扱う生産施設などでは、測定精度の悪化や製品の不良率増加を招く恐れがある。

そこで、著者らは通常の免震装置に微振動対策ダンパーを組み合わせた「オールラウンド免震」を開発し、実建物に適用した。その建物において、竣工前に起振実験や常時微動計測を行い、通常の免震建物に比べてオールラウンド免震は、微振動に対して変位振幅を大幅に低減させる効果があることを確認した²⁾。

本報では、オールラウンド免震の微振動対策効果が計画段階から把握可能であることを確認するため、起振実験を解析により再現できることを示す。また、建物が稼動中の状態で得られた常時観測、および常時微動計測記録を分析し、オールラウンド免震の微振動対策効果を明らかにし、設計クライテリアを満たしていることを確認する。

2. 建物概要、および微振動対策ダンパーの概要

オールラウンド免震を適用した建物外観を写真-1に示す。宮城県内に建設された本建物は、精密・微細加工を伴う超硬小径エンドミルの開発センターである。大地震時の安全性向上と常時の微振動対策を行うため、通常の免震装置に加え微振動対策ダンパーを2基設け、オールラウンド免震とした。建物概要を表-1に、免震層伏



写真-1 建物外観

表-1 建物概要

構造	基礎免震構造 地上2階、純ラーメン架構 S造（1階大梁SRC造、小梁RC造）	
基礎	既製コンクリート杭	
高さ	10.075m	
建築面積	1,529.17m ²	
延べ床面積	2,859.82m ²	
免震装置	支承材	高減衰ゴム系積層ゴム支承 (HRB) 10基
		天然ゴム系積層ゴム支承 (NRB) 8基
	減衰材	弾性すべり支承 (SB) 6基
		オイルダンパー (OD) 4基
		微振動対策ダンパー (VD) 2基

※以下、免震装置には()内の記号を用いる。

* 技術研究所建築研究グループ

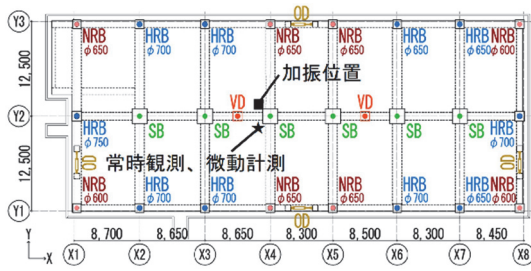
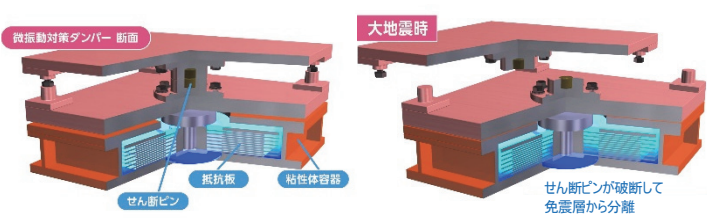


図-1 免震層伏図



(a) 通常の場合 (b) 揺れが大きい場合

図-2 微振動対策ダンパーの概要

図を図-1に、微振動対策ダンパーの概要を図-2に示す。本ダンパーは、微振動対策のほか、風揺れが懸念される免震建物の居住性能の改善を目的に開発された免震装置である。高粘度の粘性体を使用し、粘性体容器内に抵抗板を多層化することで、平面形状が800mm×800mmとコンパクトになり、異方性を有さず極めて微小な変形から大きな抵抗力を発揮できる。また、震度5弱程度以上の大きな揺れによりせん断ピンが破断し、微振動対策ダンパーが免震層から分離し、通常の免震建物として機能する特徴がある。

3. 微振動対策ダンパーを有する解析モデルの妥当性

3.1 解析モデルの妥当性確認方法

ここでは、解析モデルに用いる重量や免震装置の設計値を変化させ、竣工直前に行った起振実験を解析で再現できるようにフィッティングさせる。設計値の変化率を評価し、設計段階で微振動対策ダンパーの適用効果が把握できることを確認する。

3.2 起振実験概要

起振実験では、図-1に示すように X4-Y2 通りの建物中央付近の1階床に加振装置を取付け、そこにスライド支承、錘(≒30kN)を設けた。また、X方向に最大加振力が一定となるように錘を正弦波加振し、サーボ型速度計を用いて速度を計測した。サンプリング周波数が200Hzとし、定常応答の継続時間が81.92秒以上となるように計測時間を定めた。これらの条件の下、オイルダンパーと微振動対策ダンパー機能の有無を実験因子とし、以下3ケースの起振実験を行った。

- CASE 1 : B+OD(通常の免震構造)
- CASE 2 : B+VD
- CASE 3 : B+OD+VD

ここで、Bは支承材、ODはオイルダンパー、VDは微振動対策ダンパーを示す。

3.3 解析モデル

解析モデルは、免震層より上部を剛体と仮定した1質点系せん断モデルとし、免震層には支承材の復元力と減衰材の抵抗力を考慮し、内部粘性減衰は無視した。

上部構造の重量は、1質点系線形モデルの共振曲線を起振実験結果にフィッティングさせた時の算定重量(44,546kN≒設計重量×0.8)²⁾を基準値とした。

表-2 免震装置の基準値諸元

	水平剛性 k_d [kN/cm]	減衰係数 C_d [kN・s/cm]	モデル
NRB+SB	267.9	—	Linear
OD	1400.0	25.0	Maxwell
VD	1393.6	366.6	Maxwell
HRB	(1)式による特性値の総和		

免震層全体を考慮した免震装置の基準値諸元を表-2に示す。天然ゴム系積層ゴム支承(NRB)は100%せん断歪み時の水平剛性を、弾性すべり支承(SB)はすべりが生じる前の水平剛性を基準とした線形の履歴則とした。また、減衰材(OD、VD)はMaxwellモデル¹⁾とした。一方、微小歪み時($\gamma < 1\%$)における高減衰ゴム系積層ゴム支承(HRB)の等価水平剛性 k_{eq} については、森井ら³⁾により提案されている(1)式の非線形履歴則から求まる等価剛性 k_{eq} を1基あたりの基準値とした。

$$k_{eq} = 22 \cdot k_{eq(\gamma=100\%)} / (1 + \gamma / 1.5\%) \quad (1)$$

ここで、 $k_{eq(\gamma=100\%)}$ は100%せん断歪み時の等価剛性、 γ は支承材のせん断歪みを表し、1基あたりの $k_{eq(\gamma=100\%)}$ はゴム外径が650mmで6.57kN/cm、700mmで7.46kN/cm、750mmで8.66kN/cmとした。また、ゴム外径ごとに(1)式から求めた k_{eq} に基数を乗じたものを合算し、全HRBの等価剛性を求めた。以上の各基準値に対して、特性変化率 V を乗じたものを解析モデルの諸元とした。

3.4 再現性の確認

最初に、1階床の加振力を外力とした時刻歴応答解析を行い、速度応答のフーリエスペクトルが50Hz以下の振動数領域において、実験結果とフィッティングするように特性変化率 V を算定した。フィッティングには、Levenberg-Marquardt法^{4), 5)}によるカーブフィット法を用いた。また、上部構造の基準重量に対して±5%、各免震装置の基準値に対しては-90%～+900%の特性変化を考慮した。実験結果と解析結果のフィッティング例を図-3に示す。いずれのケースにおいても、解析結果は起振実験を精度よく再現していることが分かる。

次に、特性変化率 V の算定結果を図-4に示す。横軸は加振力の振動数とし、(a)が上部構造の重量、(b)がHRBの等価剛性、(c)がその他の支承材(NRB+SB)の水平剛性、(d)、(e)がOD、(f)、(g)がVDに関する特性変化率を示す。(a)では、 V_m が平均で1.01となり基準重量

と概ね等しかった。また、(b)では、(1)式から求まる等価剛性に対して、 V_{keq} が最大で 1.5 倍程度となったが平均で 1.01 となり、(1)式の妥当性が確認できた。(c)では、 V_{kb} の平均値が 1.1 となった。(d)より、 V_{Cod} は共振点付近では概ね 2.0 となり、振動数が小さい場合には非常に大きな値を示した。また、(e)では、 V_{kod} が共振点付近で大きくなる傾向を示した。(d)、(e)において、OD の特性変化率が大きくばらついた理由としては、摺動摩擦による抵抗力や OD 接合部のわずかなゆるみの影響を解析モデルに考慮していないことが原因として考えられる。(f)、(g)では、 V_{Cvd} の平均値が 0.92、 V_{kvd} の平均値が 1.46 となり、OD の有無によらず安定しており、設計時に考慮する製造ばらつきや温度変化による特性変化 (0.55~2.07%) の範囲内であった。

最後に、全ての免震装置を考慮した CASE3 のみの V の平均値を用いて、共振曲線を再現した。再現した共振曲線と実験結果の比較を図-5 に示す。いずれのケースでも、再現した共振曲線は実験結果とよい対応を示した。

以上のことより、VD は Maxwell モデルでモデル化が可能で、設計時に考慮する特性変化の範囲内で精度よく起振実験を再現でき、設計段階でも微振動対策ダンパー

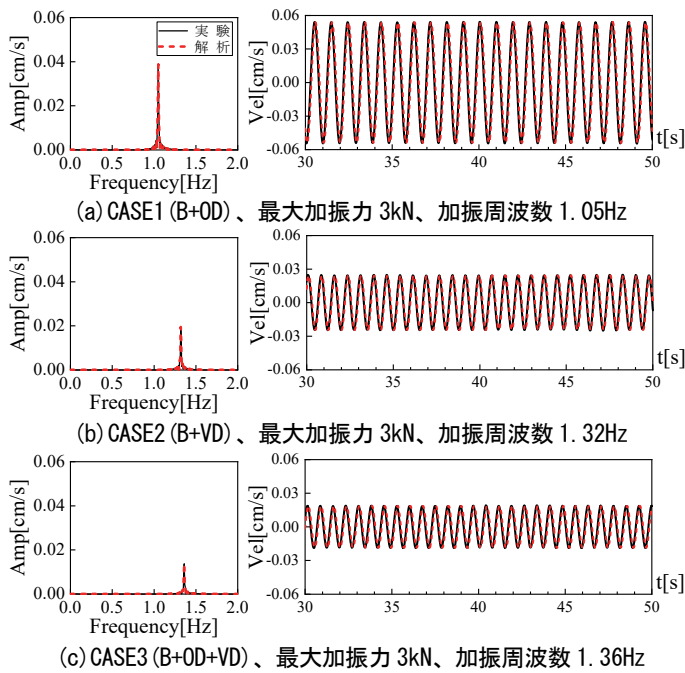


図-3 起振実験結果のフィッティング例

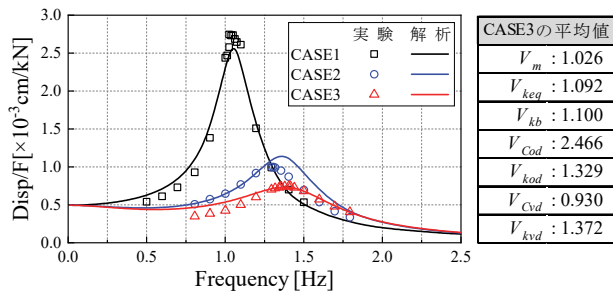


図-5 共振曲線

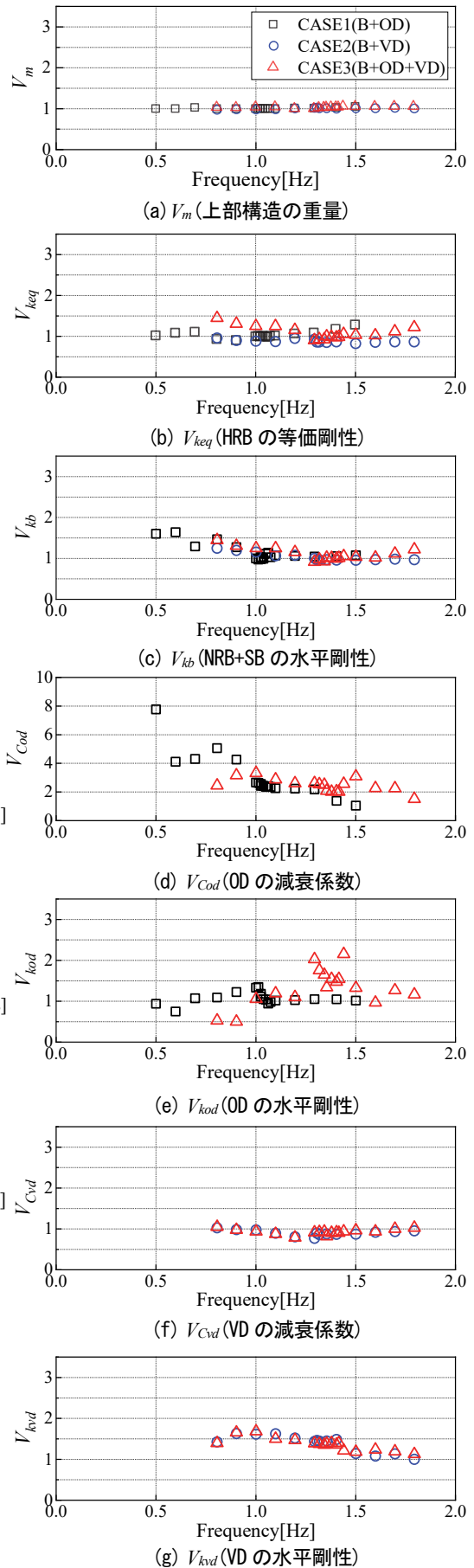


図-4 特性変化率 V の算定結果

の適用効果を把握できることが確認できた。

$$h = 1 / (2 \times \text{Amp.Ratio}) \tag{2}$$

4. 建物稼働時の微振動対策効果

4.1 常時観測記録に基づく微振動対策効果

強震観測を目的に、サーボ型加速度計による常時観測を行っている。計測位置は図-1に示すように、X4-Y2通りの耐圧盤、1階床、R階床面とし、サンプリング周波数は100Hzとしている。

2021年2月13日23時7分頃に発生した福島県沖地震時に、震度5弱の揺れを観測した。その際、微振動対策ダンパーが想定通りに免震層から切り離され、通常の免震建物として機能した。そこで、地震前をオールラウンド免震、地震直後のせん断ピンが破断した状態を通常の免震として、小地震(震度2)時、および微動時(夜間)の観測記録から建物の振動特性を評価し、オールラウンド免震の微振動対策効果を確認した。図-6に小地震時(震度2)、図-7に微動時(夜間)の加速度時刻歴、フーリエスペクトル(振幅)、耐圧盤に対する1階床のフーリエスペクトル比、位相差を示す。なお、観測記録に対して0.1Hz~30Hzまでのバンドパスフィルター処理を施し、Parzen ウィンドウ幅は0.1Hzとした。減衰定数 h はフーリエスペクトル比(振幅)から、(2)式により評価した。

ここで、Amp.Ratio：フーリエスペクトル比(振幅)

一次固有振動数 f_0 、減衰定数 h を表-3に示す。表より、 f_0 は微動時に比べ小地震時の方が0.5~0.7倍となり長周期化している。これは、免震層の水平歪み量に起因する支承材の等価水平剛性の違いが影響しているものと考えられる。上部構造の重量が等しいと仮定すると、微振動対策ダンパーを2基設けたオールラウンド免震では、通常の免震に対して免震層の水平剛性は微動時で1.2倍、地震時で1.8倍程度増加し、減衰定数 h は微動時で1.3倍、地震時で1.5倍程度増加することで、耐圧盤に対する1階床のフーリエスペクトル比を概ね3割低減している。

4.2 設計クライテリアとの比較

表-3 振動特性(常時観測記録)

		入力レベル	f_0 [Hz]	h	Amp.Ratio
X方向	通常免震	微動	2.36	0.058	8.64
		小地震	1.06	0.118	4.24
	オールラウンド免震	微動	2.55	0.084	5.94
		小地震	1.36	0.165	3.03
Y方向	通常免震	微動	1.91	0.072	6.90
		小地震	1.05	0.108	4.62
	オールラウンド免震	微動	2.20	0.077	6.48
		小地震	1.46	0.161	3.10

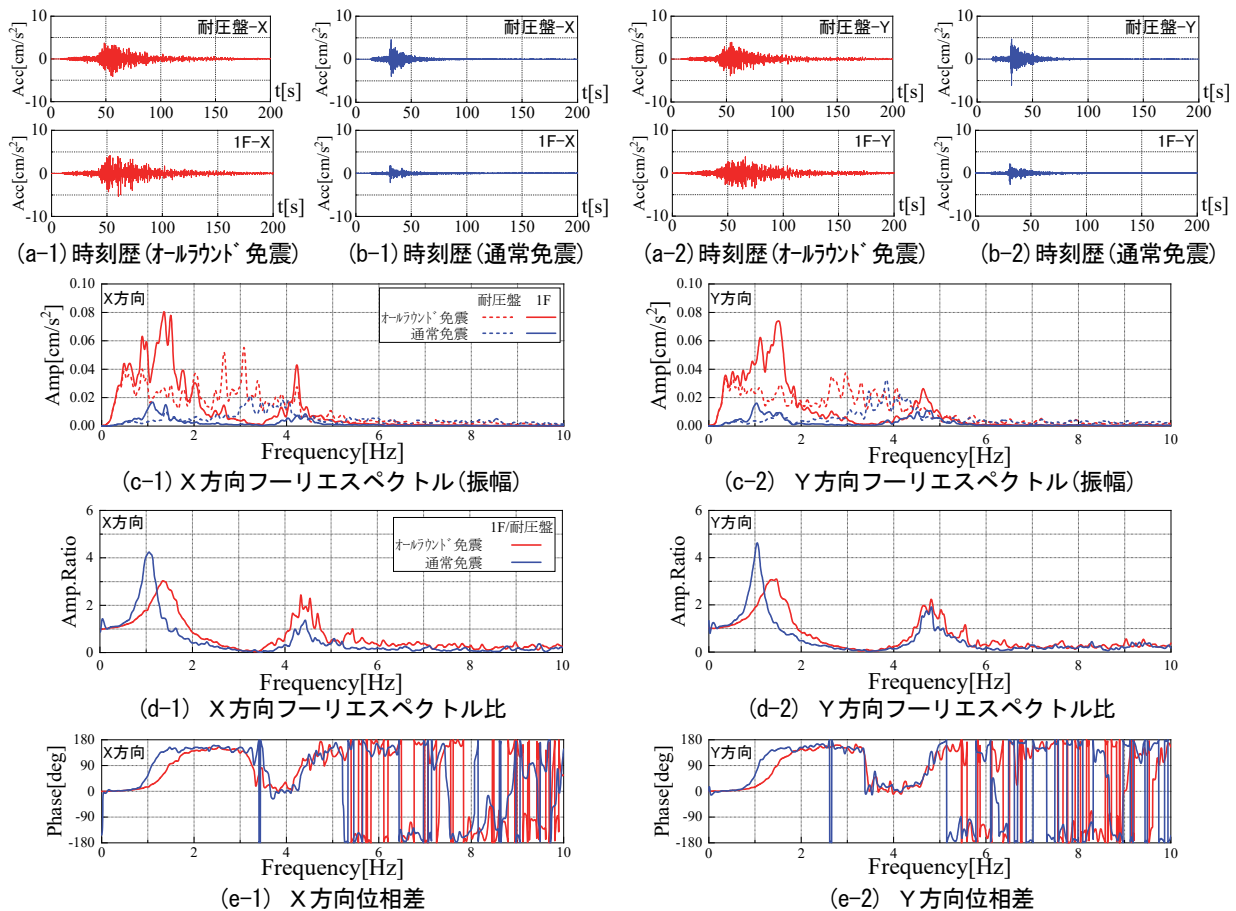


図-6 小地震時(震度2)の加速度時刻歴、フーリエスペクトル(振幅)、フーリエスペクトル比、位相差

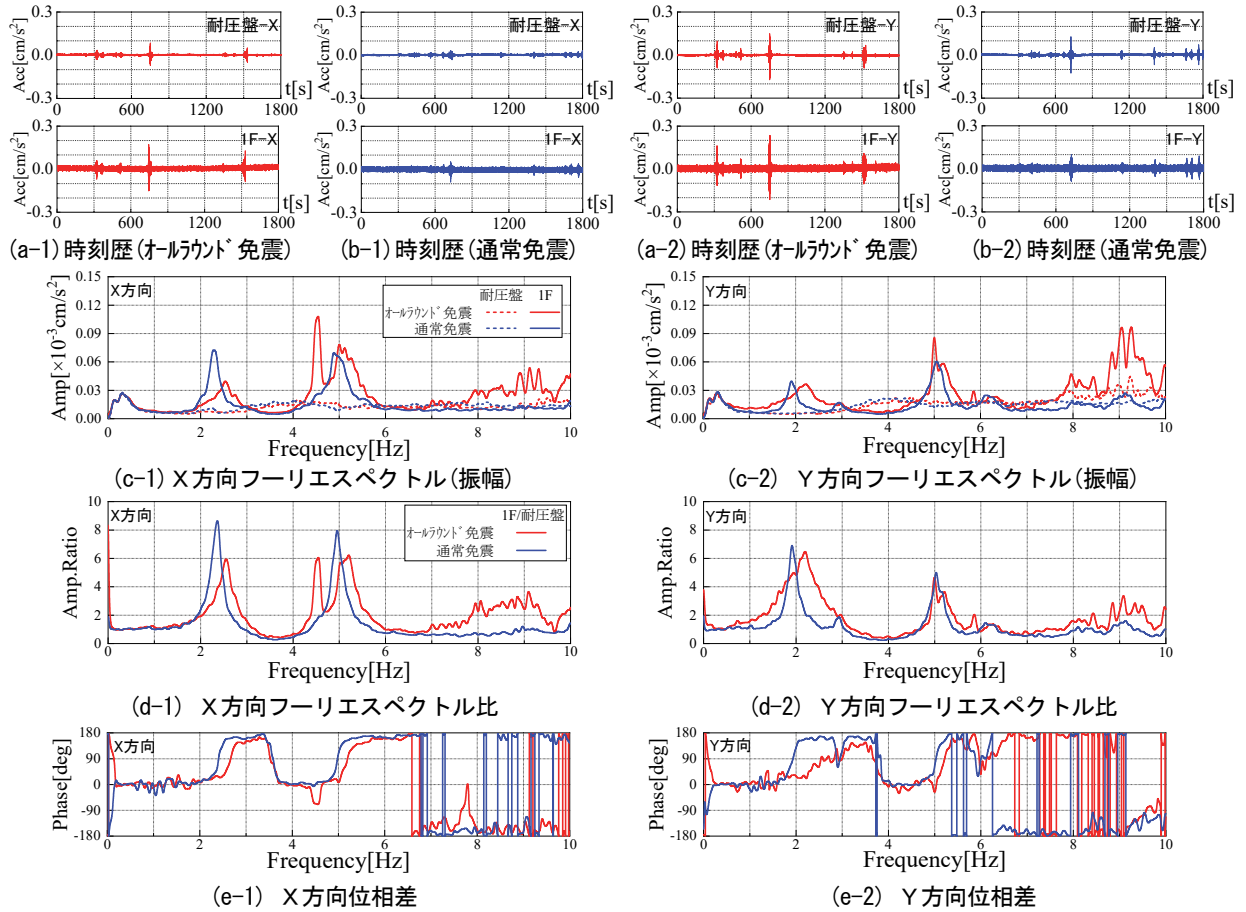


図-7 微動時(夜間)の加速度時刻歴、フーリエスペクトル(振幅)、フーリエスペクトル比、位相差

建物稼働時の微振動に対し、設計クライテリアが担保されているかを確認する目的で、オールラウンド免震下で常時微動計測を行った。常時観測と同位置付近の耐圧盤、1階床にサーボ型速度計を設置し、サンプリング周波数を100Hzとした。ここで、1階床の日中と夜間6時間分の計測記録を対象にRD法⁹⁾を用いて、減衰定数 h を評価した。なお、3秒間を1サンプルとし、各サンプルが重複しないように抽出した。RD法から求まる自由振動波形に対して、非減衰固有振動数 \bar{f} を収斂させ、Levenberg-Marquardt法^{4), 5)}を用いたカーブフィット法を適用し、(3)式にフィッティングするように、減衰定数 h を求めた。

$$x = \frac{x_0}{\sqrt{1-h^2}} e^{-h\bar{\omega}t} \cos(\sqrt{1-h^2}\bar{\omega}t) \quad (3)$$

- ここで、 x : ある時間の振幅
- x_0 : 非減衰時の最大振幅
- h : 減衰定数
- $\bar{\omega}$: 非減衰固有円振動数(=2π \bar{f})
- t : 時間

なお、計測記録には非減衰固有振動数 \bar{f} に対して±0.5Hzのバンドパスフィルター処理をした。RD法による自由振動波形を図-8に、算定した減衰定数 h を表-4に示す。速度振幅レベルの平均値は、概ね日中で

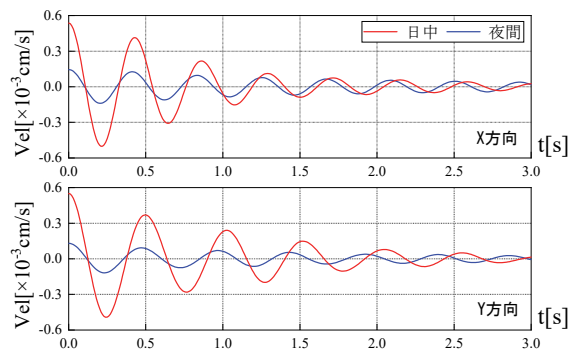


図-8 RD波形(日中と夜間の比較)

表-4 RD法から算定した減衰定数 h

		振幅レベル [×10 ⁻³ cm/s]	\bar{f} [Hz]	h
日中	X方向	0.538	2.32	0.070
	Y方向	0.551	1.96	0.070
夜間	X方向	0.145	2.39	0.031
	Y方向	0.131	2.08	0.047

0.55×10⁻³cm/s、夜間で0.14×10⁻³cm/sとなった。また、減衰定数 h は日中で7%、夜間で3~5%程度となった。前項で算定した減衰定数 h はフーリエ振幅比の応答倍率からの簡易評価値であり、減衰定数 h を過大評価する傾向がある。また、計測に用いた加速度計と速度計の分解能の違いもあり、本節の方が前節に比べ精度よく微動

時の減衰定数 h を評価していると考えられる。応答の傾向としては、4.1 節と同様に振幅レベルが大きくなるほど、減衰定数 h が大きくなる傾向を示した。

次に、微振動対策効果が設計クライテリアを満たしていることを確認する。常時微動計測から求めるフーリエスペクトルと設計クライテリアの比較を図-9に示す。ここで、隣接するS造耐震構造の建物で常時微動計測を行い、そのフーリエスペクトル(振幅)の最大値以下となるように設計クライテリアを定めた。図より、X、Y方向ともに最大振幅は設計クライテリアを全ての振動数領域で満たし、最大で概ね半分となっていることが確認できた。

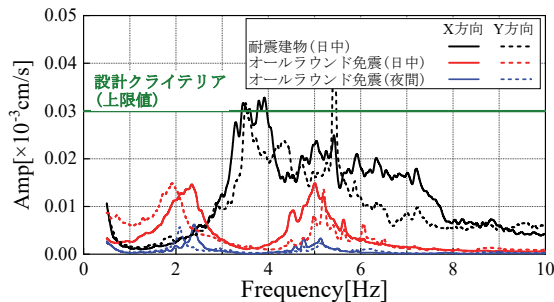


図-9 設計目標値との比較

5. まとめ

通常の免震建物に微振動対策ダンパーを2基設けたオールラウンド免震建物において、竣工前の起振実験および、建物稼働時の常時観測、常時微動計測から以下の知見を得た。

- i. カーブフィット法を用いて免震層の諸元を考慮した解析結果から、振幅レベル 0.01mm~0.1mm 程度の極めて微小な歪みに対しても、起振実験を精度よく再現できることを確認した
- ii. 微振動対策ダンパーは、Maxwell モデルでモデル化が可能で、かつ設計時に考慮する特性変化の範囲内であった
- iii. 免震装置の特性変化を適切に考慮することで、設計段階から微振動対策ダンパーの適用効果が評価できる
- iv. 強震観測用の常時観測記録から、2基の微振動対策ダンパーを設けたオールラウンド免震は、通常の免震建物に比べて減衰定数を1.5倍程度にし、振幅レベルを概ね3割低減できる
- v. 常時微動計測記録より、建物稼働中の最大速度振幅は設計目標値の1/2以下に納まり、設計クライテリアを満たしていることを確認した

6. あとがき

本研究を遂行する上で、日進工具株式会社様にご協力

頂いた。ここに記して感謝の意を表す。今後も継続して常時観測を行い、オールラウンド免震の有効性について検証を続けていきたい。

【参考文献】

- 1) 宮崎 充、澤田 毅、長島和央、川井伸泰、山田高之、山上 聡、舟山勇司、安井健治、「多層せん断粘性ダンパーの開発と実用化(その1~その4)」、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造II、pp.367-374、2010.7
- 2) 舟木秀尊、山上 聡、小山慶樹、山際 創、「オールラウンド免震®の実建物への適用—微振動対策ダンパーの性能確認—」、奥村組技術研究年報、No.46、pp.85-90、2020.9
- 3) 森井雄史、竹内貞光、吉田一博、遠田正明、安達一喜、「免震部材の微小変形時の等価剛性が環境振動評価に及ぼす影響と簡略的な応答評価法の提案」、日本建築学会技術報告集、第21巻、第49号、pp.1101-1105、2015.10
- 4) Levenberg, K., "A Method for the Solution of Certain Problems in Least Squares", Quart. Appl. Math. Vol.2, pp.164-168, 1944.
- 5) Marquardt, D., "An Algorithm for Least-Squares Estimation of Nonlinear Parameters," SIAM J. Appl. Math. Vol.11, pp.431-441, 1963
- 6) 国土交通省免震材料認定番号 MVBR-0232 認定資料
- 7) 柴田明德、最新耐震構造解析、森北出版、1981.6
- 8) 田村幸雄、佐々木淳、塚越治夫、「RD法による構造物のランダム振動時の減衰評価」、日本建築学会構造系論文報告集、第454号、pp.29-38、1993.12

係数励振を利用した制振技術の研究

Study of Vibration Control Using Parametric Excitation

安井健治* 小山慶樹* 柳沼勝夫** 川澄悠馬***

要旨

構造物のパッシブな制振には、その固有振動数に同調させた付加マスを用いる動吸振器が使われることがある。この制振装置は構造物の固有振動数における制振効果は大きいものの、付加マスにより構成される新たな振動系の共振現象から逃れることはできない。そこで、この共振現象の発生を防ぐ新たな制振装置として係数励振の特性を応用した制振装置の研究に取り組んでいる。

振り子とねじり棒ばねを連結した制振装置を提案し、振動実験と応答解析によりその効果を確認したので報告する。

キーワード：係数励振、動吸振器、自由振動実験、起振実験、応答解析

1. まえがき

構造物の振動を抑えるために、動吸振器は様々な場所で利用されている。質量・ばね・減衰からなる多自由度系の構造物の固有振動数を特定し、その固有振動数に同調させた付加マスを大きく振動させることにより、構造物の振動エネルギーを吸収し制振効果を発揮する。

付加する1自由度系としては、大型スラブの上下振動対策にばねと重りを利用した例¹⁾、高層建築物の風揺れ対策に振り子を利用した例²⁾等がある。

動吸振器の特性として、減衰定数 $h=0.01$ の振動モデル(主系)に対し、固有振動数比 $\alpha=1$ 、質量比 $\mu=0.05$ 、減衰定数 $h=0.05$ と $h=0.10$ とした質点系を付加した時の振動数比(主系の固有振動数 ω_m と外力の振動数 p の比)と応答倍率の関係を図-1に示す。主系の固有振動数(ω_m)における制振効果は大きい(●)ものの、1質点系を付加することにより、新たに構成された2質点系の共振(▼)が見られる。

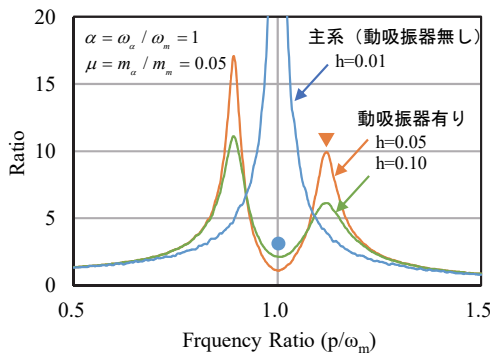


図-1 動吸振器を取り付けた主系の応答倍率

このような共振現象を防止することができる制振装置として係数励振の特性を利用した研究が、藪野ら³⁾によって行われている。

係数励振とは、通常は定数とされる振動系の係数(パラメータ)が周期的に変化することで起こる振動現象で、ばね-質量系では定数とされる質量やばね定数などの係数が周期的に変化するような場合に発生する。

係数励振の例として、公園などにあるブランコの1人乗りの揺らし方がある。外部からの補助なしに1人でブランコを漕ぐ動作は、立ち漕ぎの場合、上半身を上下させ、座り漕ぎの場合は足を上下させる動作を行う。これらは漕ぎ手の重心を上下させることに等しい。これをブランコと漕ぎ手をあわせた一体の系と考えると、振り子のロープの長さが短くなったり長くなったりすることに相当する。図-2に示すようにロープの長さで決まるブランコの固有振動数の2倍の振動数で重心の上下運動を行うことで、ブランコを大きく揺らすことができる。

そこで、筆者らは、この係数励振の特性を利用した新たな制振装置の研究に取り組むこととした。今回、係数励振の理論を取り入れた制振装置を考案し、簡易な振動模型に取り付けて振動実験を行い、あわせて制振装置と振動模型をモデル化したので報告する。

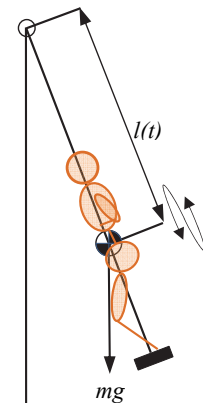


図-2 ブランコの物理モデル

*技術研究所建築研究グループ **技術研究所環境研究グループ ***技術研究所土木研究グループ

2. 係数励振を利用した制振装置と試験体の概要

2.1 係数励振を利用した制振装置の概要

係数励振を利用した制振装置の概要を図-3に示す。本装置は、上下方向に振動する主系に振り子を取り付けたもので、振り子の固有振動数を上下方向に振動する主系の固有振動数(2f)の1/2(f)に同調させる。この時、主系の上下方向の振動は振り子に働く重力加速度(g)が振り子の固有振動数の2倍で変動することに相当し、係数励振の特性により振り子の揺れを励起する。振り子が水平方向に1往復する間に上下方向に2往復することから、主系の上下方向の固有振動数と同調し、大きく振動することにより主系の振動を低減する。

振り子の固有振動数は主系の1/2であり、振動方向が直交しているため主系と連成することはない。したがって、振り子の揺れが励起される振動数帯域でのみ動作し、振り子の振幅が大きいほど応答低減効果が大きくなる。そのため、振り子の質量が小さくとも効果を発揮し、減衰は小さいほど望ましい。これは従来の動吸振器とは異なり、本制振装置の大きな特徴といえる。

ただし、振り子の初期位置が通常は主系の鉛直下方にあるため、主系の上下振動は振り子を振動させる方向に作用しない。振り子を作動させるためには、外部から刺激を与え振動を励起させる必要がある。

2.2 試験体の概要

試験体の概要を図-4に外観を写真-1に示す。制振装置の効果を確かめるため、主系の振動が大きくなるよう減衰が小さい両端ピン支持とした鋼製単純梁の中央に制振装置を取り付け、 piezoアクチュエータを用いて起振実験を行った。piezoアクチュエータと付加マスは、取り付けることができる範囲で、梁中央にできる限り近づけ、中央から70mmの位置に取り付けた。

2.3 制振装置の概要

制振装置の概要を図-4にあわせて示す。制振装置の固有振動数を幅広く設定できるように、振り子にねじり棒ばねを連結した。制振装置の固有振動数は、振り子の腕の長さ、振り子の質量とねじり棒ばねのねじり剛性により決まる。制振装置の固有振動数を梁の固有振動数の1/2に同調させるため、振り子の腕の長さを調整できるようにした。

制振対象となる梁とその付加質量の合計約4.9kgに対し、制振装置稼働部となる振り子の質量は0.065kgで約1/75の質量比となっている。制振装置の仕様を表-1に、試験体の質量を表-2に示す。

2.4 piezoアクチュエータの概要

試験体を加振するため上下方向の加振機として、piezoアクチュエータに0.395kgの付加マスを結合した。piezoアクチュエータは変位制御で加振することができ、

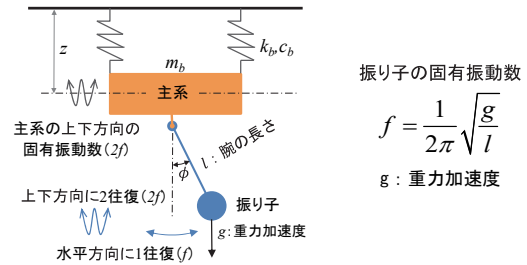


図-3 係数励振を利用した制振装置の概要

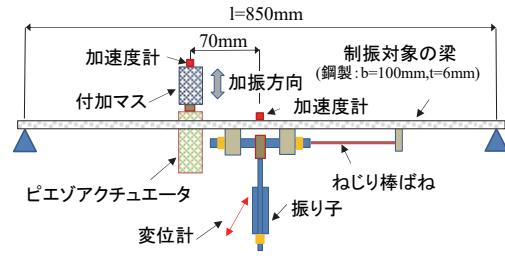


図-4 試験体の概要

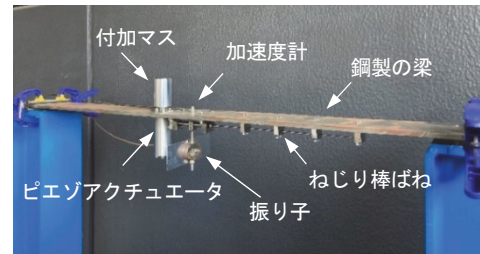


写真-1 試験体の外観

表-1 制振装置の仕様

名称	断面諸量	単位	諸量
ねじり棒ばね	直径	m	0.002
	長さ	m	0.250
	ねじり剛性	N・m ²	0.462
振り子可動部	慣性モーメント	kg・m ²	7.726×10 ⁻⁵
	振り子の長さ	m	0.025~0.060
	質量	kg	0.065

表-2 試験体の質量

名称	質量(kg)
梁	3.978
piezoアクチュエータ	0.205
付加マス	0.395
制振装置(可動部以外)	0.224
制振装置稼働部	0.065

ファンクションジェネレータにより任意の振動数・変位の正弦波で梁を上下方向に加振する。

制御可能な変位は、制御信号0V~5Vに対し、応答変位0μm~80μmとなっており、オフセット電圧2.5Vを与え、±2.0Vの正弦波加振を基本とした。

2.5 計測概要

制振効果を確認するために梁中央部とpiezoアクチュエータに結合した付加マスに加速度計を、制振装置の動きを把握するために振り子の水平方向に変位計を配置した。加速度の計測には電荷出力型加速度計(質量:2g、感度:0.3pC/(mm/s²))、周波数範囲:fc~10kHz、最大加

速度：50,000m/s²)を、変位の計測には、非接触型の透過型レーザー変位計(測定幅 30mm、分解能 15μm)を用いた。

振り子の振れ角は、 $\sin \theta \approx \theta$ が成立する範囲で水平変位を振り子の腕の長さで除したものとした。

計測は、周波数分解能を 1/100Hz とするため 100 秒以上の計測とし、サンプリング周波数 655.36Hz、計測点数 65,536 点を基本とした。

3. 振動実験結果

3.1 自由振動実験による同調結果

制振の対象となる梁の上下方向の固有振動数を把握するために自由振動実験を実施した。振り子を作動させない状態で梁中央部をインパルスハンマーで打撃し、加速度を計測した。梁には制振装置のほかピエゾアクチュエータと付加マスを取り付けている。100 秒間の計測の間に 5 回打撃した。

実験結果を図-5 (a)、(b)に示す。梁の振動は各回とも 10 秒以上継続し、固有振動数は 16.13Hz であった。

1 回目の自由振動波形から対数減衰率により減衰定数を評価した。図-5 に、フィッティング結果をあわせて

示す。減衰定数は、 $h=0.0022$ と評価された。

次に振り子の固有振動数を梁の固有振動数の 1/2 に同調させるため、振り子の自由振動実験を行った。振り子に強制変位を与えたのち解放し、振り子の変位を計測した。振り子の腕の長さを調整し、同調した後の実験結果を図-6 (a)~(d)に示す。

振り子に強制変位を与え自由振動をさせると、振り子の揺れが梁に対する起振力として作用し、梁の振動を励起した。振り子が揺れ始めるに従い、梁の振動が徐々に大きくなるが、振り子の振動が小さくなると、梁の振動も小さくなっている。振り子の振動は 5 秒程度で収束しているのに対し、梁の振動は 10 秒以降も継続している。

梁の固有振動数 16.13 Hz に対し、振り子の固有振動数は 8.06 Hz で梁の振動数の約 1/2 に調整できていることを確認した。梁の固有振動数は、自由振動実験結果と比べるとわずかに違うが、振幅レベルによるものと考えられる。

振り子の自由振動実験結果から、振り子、梁それぞれの減衰を対数減衰率により評価した。結果を図-6 (a)、(c)にあわせて示す。振り子の減衰定数は $h=0.014$ 、梁の減衰定数は、 $h=0.0024$ と評価された。

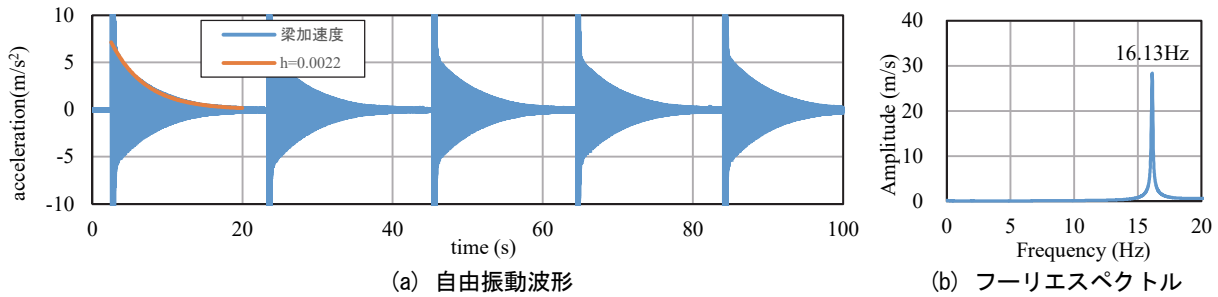


図-5 梁の自由振動実験結果

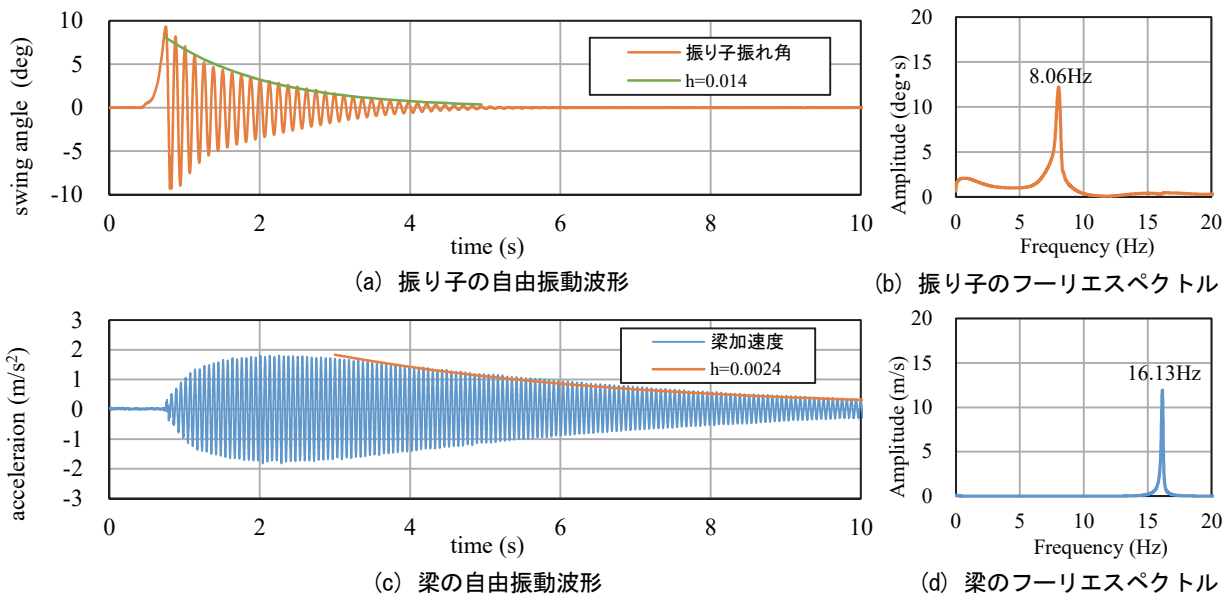


図-6 振り子の自由振動実験結果

3.2 起振実験による制振効果の確認

制振装置の制振効果を確認するためにピエゾアクチュエータを用いた起振実験を行った。

自由振動実験で得られた梁の固有振動数を考慮し、16.05Hz～16.30Hzの間を0.01Hz刻みで加振した。

計測は、加振振動数ごとに梁と振り子の振動が定常となったことを確認した後100秒間とした。

本装置は、完全に静止した状態では上下方向の振動のみでは作動しないため、振り子に外部からわずかな刺激を与え振動させた。また、主系の固有振動数を挟む一定の帯域でのみ作動し、それ以外の帯域では停止するため、振り子の振動が定常状態を維持した周波数範囲を「制振有り」とした。

制振効果を評価するため、梁の応答加速度とピエゾアクチュエータの付加マスの応答加速度の差分を梁への入力加速度とし、梁の応答加速度の入力加速度に対する応答倍率、位相差を求めた。算定には、各振動数における加速度波形のフーリエスペクトル値を用いた。

起振実験の結果を図-7に示す。(a)に応答倍率、(b)には位相差を、制振有り・無しをあわせて示す。

制振無しの場合、応答倍率は16.16Hzが最も大きく30.5倍となった。また、入力加速度に対する応答加速度の位相差もおおよそ90°のずれとなっていることから梁の固有振動数といえる。自由振動実験結果から評価された固有振動数とほぼ等しい。

応答倍率は固有振動数に対して左右対称ではなく、固有振動数より低い周波数では共振曲線の立ち上がりの勾配が大きく、固有振動数より高い周波数範囲では勾配が穏やかになっており、弱い非線形の性状を示している。

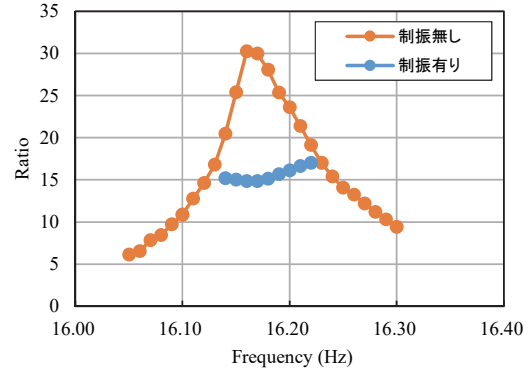
制振有りの場合、固有振動数における応答倍率は15倍程度であり、制振無しの場合に比べおおよそ1/2になっている。応答倍率は、固有振動数での倍率が最も小さく、加振振動数が固有振動数から離れるにつれ大きくなっている。本装置は、共振することにより効果を発揮し、同調した固有振動数の帯域以外では動作しないため、制振装置有りの主系の応答が制振装置無しの応答を超えるといった悪影響を与えることはない。

3.3 共振点における制振効果

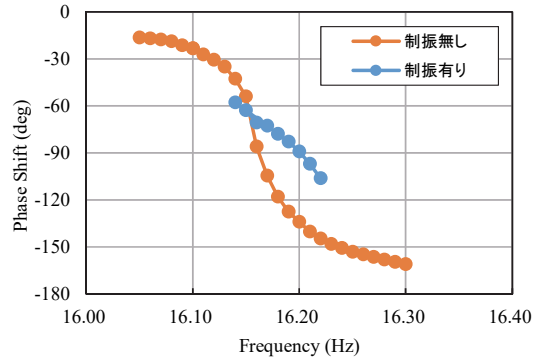
共振振動数16.16Hzに対し、ピエゾアクチュエータへの入力信号のレベルを変え(±1.75V[0.24m/s²]、±2.0V[0.29m/s²]、±2.25V[0.34m/s²])、制振効果を確認した。

入力加速度と梁の応答加速度の関係を図-8に示す。制振無しの場合、付加マスの加速度が大きくなるにつれて応答加速度が大きくなっている。一方、制振有りの場合は、入力加速度の増加に比べ応答加速度の増加は極めて小さい。

入力加速度と振り子の振れ角、入力加速度と制振有りの応答倍率をあわせて図-9に示す。入力加速度が大きくなるに従い、振り子の振れ角が大きくなることでより



(a) 加振振動数と応答倍率



(b) 加振振動数と入力加速度に対する応答加速度の位相差

図-7 起振実験結果

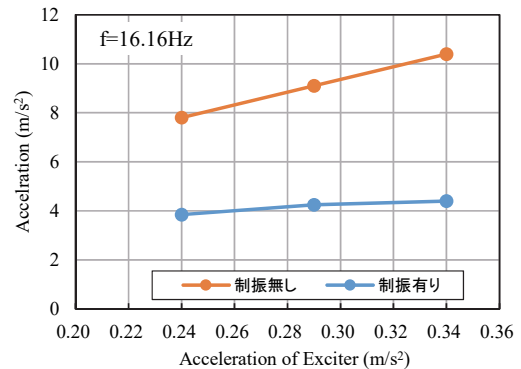


図-8 入力加速度と梁の応答加速度

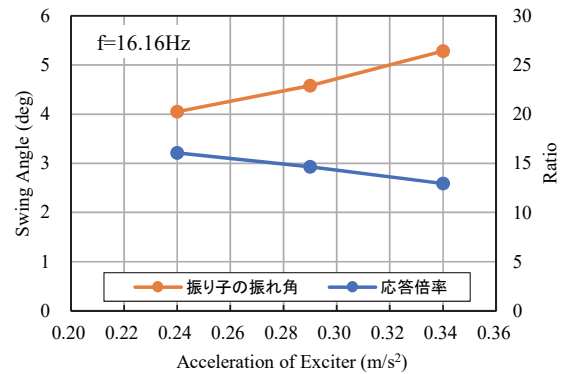


図-9 入力加速度と振り子の振れ角、応答倍率

大きな制振効果を発揮し、梁(主系)の応答倍率は小さくなっている。

4. 制振装置のモデル化

4.1 梁のモデル化

応答解析により、振動実験結果を検証する。振動実験に用いた梁を図-10のようにモデル化した。梁を曲げとせん断を考慮した9要素に分割し、両端部はピン支承とした。制振装置の質量 m_p と Piezoアクチュエータと付加マスの質量 m_d を質点に作用させた。このモデルの固有値解析では、1次の固有振動数は16.20Hzとなり、共振曲線から求めた固有振動数16.16Hzとほぼ一致した。

次に、応答解析の簡便化のため、梁を等価なばね-質点系モデルに置換する。

梁の等価質量を m_b 、梁の中央部の鉛直方向の変位を z とすると、梁の運動エネルギー T は、式(1)となる。

$$T = \frac{1}{2} m_b \dot{z}^2 \quad (1)$$

次に、図-11に示すように、支点から x 離れた位置の鉛直変位 u は、式(2)と表せる。

$$u = z \left(\frac{3x}{l} - \frac{4x^3}{l^3} \right) \quad 0 \leq x \leq \frac{l}{2} \quad (2)$$

梁の断面積を A 、密度を ρ とすると、梁の運動エネルギー T は、式(3)となる。

$$\begin{aligned} T &= \frac{1}{2} (m_p + m_d) \dot{z}^2 + \frac{1}{2} \int_0^{l/2} 2\rho A \dot{u}^2 dx \\ &= \frac{1}{2} (m_p + m_d + \frac{17}{35} \rho A l) \dot{z}^2 \end{aligned} \quad (3)$$

式(1)と式(3)から梁の等価質量 m_b は、式(4)となる。

$$m_b = m_p + m_d + \frac{17}{35} \rho A l \quad (4)$$

式(4)から、梁の等価質量は2.828kgと算定され、単純梁のばね定数は、 $k_b = 48EI/l^3$ より $2.854 \times 10^4 \text{ kgs}^{-2}$ となることから、等価1質点系モデルの固有振動数15.99Hzが得られる。これは、実験から得られた固有振動数よりわずかに小さいが、解析モデルにおける理想的なピン支持に比べて試験体の梁両端のピン支持の固定度が大きいため、ばね定数が解析モデルより大きくなったと推測される。

4.2 Piezoアクチュエータのモデル化

Piezoアクチュエータは変位制御されていることから入力信号 y から出力加速度 y^* を、式(5)のように2次遅れ系でモデル化し、運動方程式に組み込む。要素実験から算出した時定数を表-3に示す。

$$y^* = T_1 \ddot{y} + T_2 \dot{y} + y \quad (5)$$

4.3 制振装置の運動方程式

制振装置が取り付けられた梁と制振装置を、質点モデルとしてモデル化する。モデル化したものを図-12に、運動方程式を式(6)～式(8)に示す。

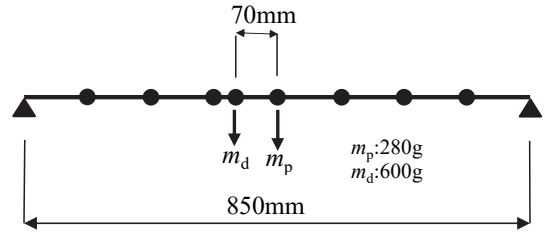


図-10 梁のモデル

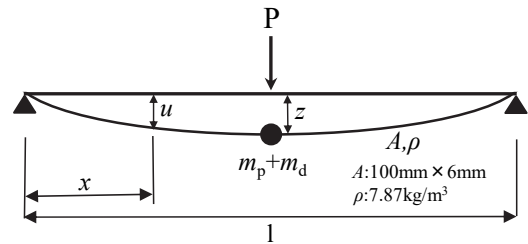


図-11 梁の変位

表-3 Piezoアクチュエータの時定数

名称	時定数
T_1	2.0×10^{-6}
T_2	5.0×10^{-4}

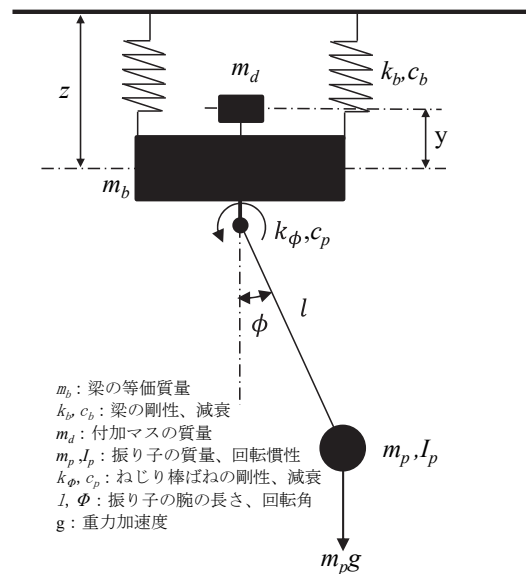


図-12 梁と制振装置のモデル化

$$\begin{cases} (m_b + m_p + m_d) \ddot{z} + c_b \dot{z} + k_b z \\ + m_p l \ddot{\phi} \sin \phi + m_p \dot{\phi}^2 \cos \phi \\ - \frac{m_d T_2}{T_1} \dot{y} - \frac{m_d}{T_1} y + \frac{m_d}{T_1} y^* = 0 \end{cases} \quad (6)$$

$$I_p \ddot{\phi} + m_p l \ddot{z} \sin \phi + c_\phi \dot{\phi} + m_p g l \sin \phi + k_\phi \phi = 0 \quad (7)$$

$$\ddot{y} + \frac{T_2}{T_1} \dot{y} + \frac{1}{T_1} y - \frac{1}{T_1} y^* = 0 \quad (8)$$

式(6)は質点としてモデル化している梁の鉛直方向、式(7)は制振装置の振り子の回転方向、式(8)はピエゾアクチュエータの鉛直方向運動方程式である。

式(6)の $m_p \ddot{\phi} \sin \phi$ と式(7)の $m_p \ddot{z} \sin \phi$ が相互に作用し、梁の上下方向の振動が制振装置の振り子に入力されることにより梁の振動が小さくなる。

応答解析では、積分方法にNewmarkのβ法を適用し、積分ステップごとにNewton-Rapson法により状態量を求める。この時の状態量は $x = (z, \phi, y, \dot{z}, \dot{\phi}, \dot{y}, \ddot{z}, \ddot{\phi}, \ddot{y})$ となる。

5. 応答解析結果

5.1 応答倍率

実験結果の応答解析では、解析モデルのばね定数を調整して、試験体との整合性を図った。固有振動数に対する振動数比と応答倍率の関係について、解析結果と実験結果をあわせて図-13に示す。

制振無し固有振動数における応答倍率は約30倍であり、実験結果とほぼ一致していることから梁のモデル化は妥当と考えられる。一方、制振有りの応答倍率は振り子の動作範囲で15倍程度であり、制振動作範囲を含め実験結果をおおむね再現していることから、制振装置は適切にモデル化されていると考えられる。

しかし、解析結果は固有振動数においてほぼ対称な形状を示しており、実験結果が示す弱い非線形性を示すには、非線形性を考慮したモデル化が必要である。

5.2 減衰定数の検討

振り子の減衰が制振効果に与える影響を把握するため、減衰定数をパラメータに解析を行った。振動数比と応答倍率の関係を減衰定数ごとに図-14に示す。

制振装置無しの応答倍率30倍に対し、実験結果より得られた減衰定数 $h=0.014$ では約15倍、 $h=0.010$ では約10倍、 $h=0.005$ では約5倍と、減衰定数が小さくなるほど、制振効果(低減効果、低減範囲)が大きくなる事が確認できる。

6. まとめ

係数励振の特性を利用した制振装置を提案した。振り子とねじり棒ばねを連結した制振装置を用いた模型振動実験と応答解析により、以下に示す事項を確認した。

- i. 質量比 1/75 の制振装置により、新たな共振現象を起こすことなく、梁の応答が約 1/2 程度に低減する
- ii. 梁と制振装置を適切にモデル化した応答解析により、制振効果を精度よく評価することができる
- iii. 制振装置の減衰が小さいほど、制振効果(応答低減率・応答低減範囲)が大きい

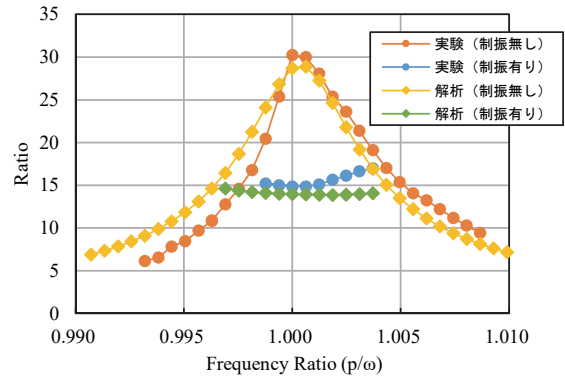


図-13 振動数比における応答倍率

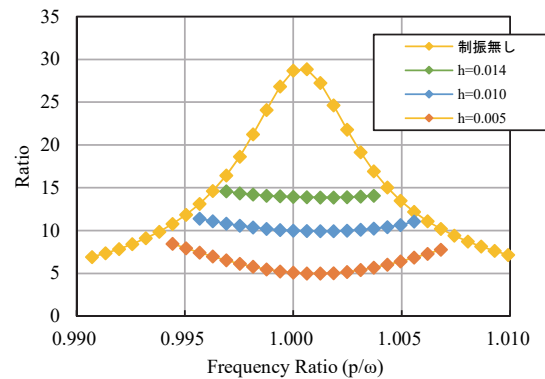


図-14 減衰定数と応答倍率

7. あとがき

係数励振の理論を応用した新しい制振装置の効果が確認できた。有害な共振応答を生じることが無く、極めて小さな質量比と減衰係数でも振幅レベルが大きくなるほど制振効果を発揮する特長がある。今後は、実用化を目指して装置の改善を図りたい。

【謝辞】

本研究の遂行にあたり、筑波大学 藪野 浩司教授に指導を戴いた。ここに記して感謝の意を表す。

【参考文献】

- 1) 柳沼勝夫、稲留康一、「床揺れ防止用制振装置の開発」、奥村組技術研究年報、No.34、pp. 141-146、2008
- 2) 大塚 将、岡 靖弘、早川邦夫、安井健治、舟山勇司、「転がり振り子による超高層建物の制振」、奥村組技術研究年報、No.16、pp. 103-108、1990
- 3) A. Shibata, S. Ohishi, H. Yabuno, 「Passive method for controlling the nonlinear characteristics in a parametrically excited hinged-hinged beam by the addition of a linear spring」、Journal of Sound and Vibration 350、pp. 111-122、2015

技術研究所管理棟のZEB化改修効果

－エネルギー削減実績と快適性評価－

Effect of ZEB Renovations

at the Technical Research Institute Head Office

- Energy Use Reductions and Evaluations of Comfort -

中西史子* 岩下将也** 坂崎 隆* 松永智弘** 稲留康一**

要 旨

奥村組技術研究所管理棟は、改修時に汎用的で実効性の高い技術を組み合わせることで Nearly ZEB を達成した中規模事務所ビルであり、運用の過程で得られた知見を元に、環境技術を積極的に提案していくための ZEB の実証施設となっている。今回は建物運用時のエネルギー収支を確認するため、毎月のエネルギー消費量の実績値を設計値と比較して運用状況の監視および運用方法の見直し等を行った。その結果、1年間の運用実績としても Nearly ZEB を達成していることを確認した。また、ZEB 化改修後の建物について執務者にアンケート調査を行い、室内環境に対する満足度やそれらの要因、さらに設備の出力状況による感じ方の変化等を確認した。

キーワード：ZEB、改修、事務所、エネルギー収支、室内環境、快適性

1. まえがき

温暖化対策の国際的な枠組みであるパリ協定では、「脱炭素化」が目標として掲げられた。これを背景に、2030年、さらには2050年を見据えた我が国の長期低炭素ビジョン¹⁾では、省エネルギー化や再生可能エネルギー利用による着実な取り組みの推進が示されている。その1つの目標として建築物におけるZEBの普及促進が挙げられ、2030年のZEB普及目標の達成²⁾に向け、業界各社がこれに取り組んでいる。

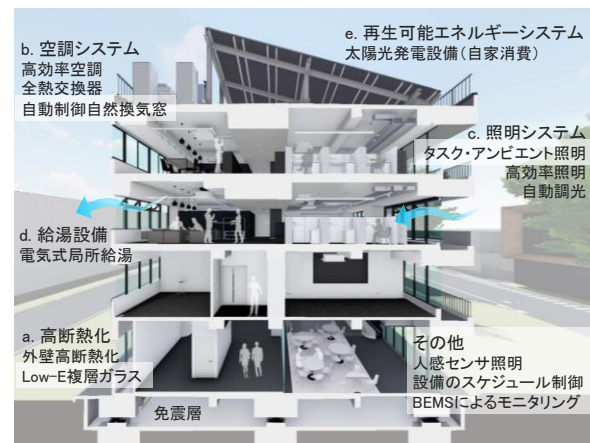
新築着工される建築物に比べて、ストック建物の棟数が圧倒的に多いことから、新築のみならず、改修建物についてもZEB化を進めていくことが普及展開の鍵となる。そのためには、特殊な技術や高価な技術に頼らずとも、既存建物にも適用できる汎用的な技術の組み合わせによってZEB化が達成可能であること、また、改修による消費エネルギーの削減効果の実証データに加えて、快適な空間が同時に提供されていることも示していくことが求められる。

このような背景から、筆者らは汎用的で実効性の高い省エネルギー技術、創エネルギー技術の組み合わせによって、2020年1月に自社施設である技術研究所管理棟（以下、本建物）をZEB化改修した³⁾。今回は本建物の改修後1年間の運用において、建物のエネルギー消費

実績の分析および快適性に関するアンケート調査を行った。本報では、これらの結果を紹介する。

表－1 建物概要

建物名称	奥村組技術研究所管理棟
建物場所	茨城県つくば市
建物用途	事務所
延べ面積	1,330.10m ²
建築面積	362.82m ²
階数・構造	地上4階 RC造 基礎免震
竣工年月	1986年1月
ZEB化改修年月	2020年1月



図－1 導入したZEB技術

*東日本支社建築設計部 **技術研究所環境研究グループ

2. ZEB化改修建物の概要

2.1 ZEB化改修技術

表-1に、ZEB化改修を行った建物概要を、図-1に、導入したZEB技術の概要を示す。本改修で導入した要素技術は以下の通りである。

a. 高断熱化

開口部にはLow-E複層ガラス (FL6+Air10+Low-E6)、外壁は断熱材が50mmとなるようにウレタンフォームを増し吹きして外皮の断熱性能を向上させた。

b. 空調システム

高効率タイプのビル用マルチエアコンおよび全熱交換器を採用した。また、3階の南北開口部には、中間期の冷房負荷削減のため自動制御自然換気窓を採用した。写真-1に、自然換気窓を、図-2に、3階の平面プランを示す。

c. 照明システム

執務空間には、タスク・アンビエント方式を採用した。写真-2に、執務空間を示す。アンビエント照明により執務空間全体としての必要な明るさを確保し、各デスクのタスク照明により執務に必要な机上面照度を調整する計画とした。アンビエント照明では、机上面平均照度で300lx以上、タスク照明を点灯させることで750lx (オフィスの照明照度推奨基準値⁴⁾)以上の照度が得られる。また、2~4階に明るさセンサを設置し、明るさに応じてアンビエント照明を自動調光させる計画とした。

d. 給湯設備

温水の使用場所が、給湯室および便所の洗面のみであるため、電気温水器を用いた局所給湯方式とした。

e. 再生可能エネルギーシステム

図-3に、太陽光発電システム接続図を示す。システム容量32.5kWの太陽光発電パネル (計167m²) を、最大発電量が得られる傾斜角15°にして本建物の屋上に設置し、年間で323.6GJの発電量を得る計画とした。本システムは自家消費型であり、発電量が施設内の消費量を上回った際に発生する逆潮流を検知し、パワーコンディショナを停止させる逆電力継電器 (以下、RPR) を、施設全体の受電盤 (第一変電所) に設置している。これにより、発電した電力は施設全体で消費することが可能となった。

2.2 設計一次エネルギー消費量の結果

エネルギー消費性能計算プログラム (以下、WEBプログラム) を用いて算出した一次エネルギー消費量の結果 (以下、設計値) を図-4に示す。図中の太陽光発電量は、便宜上、負の消費量としている。各設備の設計値を、基準一次エネルギー消費量 (以下、基準値) と比較すると、空調49%、換気39%、照明78%の削減となり、建物全体では55%削減した。さらに創エネルギー分を反映させると76%の削減となり、Nearly ZEBを達成した。



写真-1 自然換気窓 写真-2 執務空間

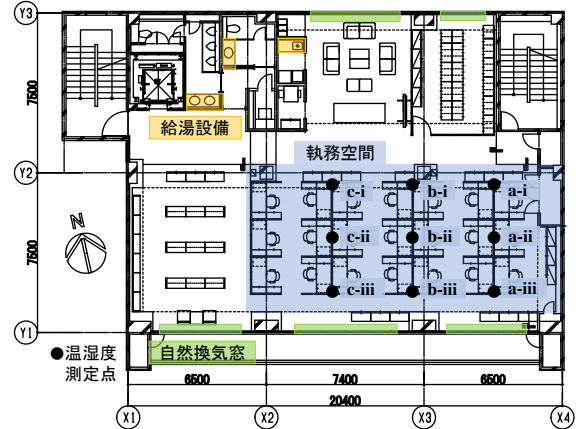
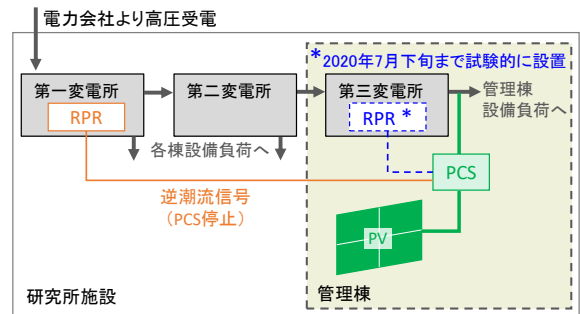


図-2 3階 (基準階) の平面プラン



凡例) RPR: 逆電力継電器 PCS: パワーコンディショナ PV: 太陽光発電パネル

図-3 太陽光発電システム接続図

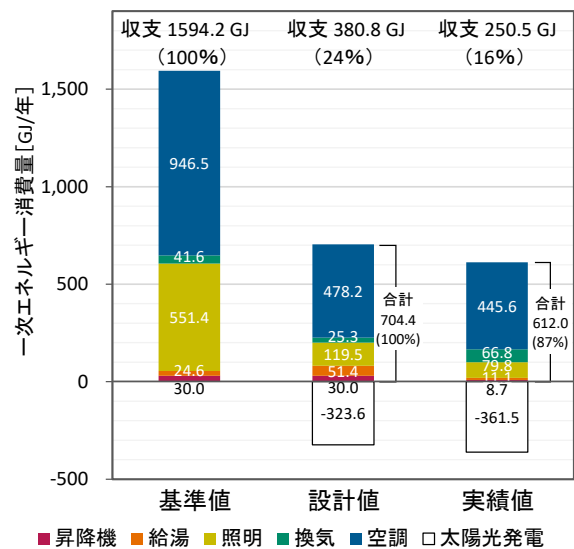


図-4 一次エネルギー消費量 (基準値との比較)

3. 照度の設定方法

3.1 調光システムと分析方法

照明については、南側開口部近傍の天井に設置した明るさセンサが周辺の明るさを検知し、アンビエント照明出力を自動的に変更する仕組みとなっている。設計仕様である常時 300lx 以上の机上面照度を確保するため、自動調光システムの以下の2つの機能が活用されている。

- i. 天井の明るさセンサが周辺照度と出力を検知し、周辺照度に応じて出力を自動調光する機能
- ii. 最大照度と最小照度を定め制御範囲を制限する機能

図-5に、調光システムの概要と照度の分析方法を示す。開口部からの採光は、デスクの開口部側に設置したやや高めのパテーションに遮られ、机上面には反射・散乱光のみが到達する。明るさセンサは、光量の大きい窓からの採光と、光量の小さい室内の反射・散乱光を同時に検知するため、机上面照度に基づく的確な制御は困難である。そこで、曇天日と晴天日において、照明を消灯した状態で、南面開口部の窓鉛直面照度と窓際の机上面照度を測定し、窓へ入射する自然光と、机上面へ到達する反射・散乱光の光量を測定した。また、机上面照度を窓鉛直面照度で除した値（以下、到達率）を算出し、窓へ入射した光が机上面に到達している量を推定した。

3.2 照明の調整

図-6に、曇天日と晴天日における窓鉛直面と机上面の照度測定結果を、図-7に、その時の自然光の到達率を示す。なお、晴天日の日没直前の窓鉛直面照度の顕著な増大は、西日の傾きによって直達光が鉛直面に到達した結果である。曇天日は、窓鉛直面照度および机上面照度に小刻みな変動はあるが、到達率はほぼ一様に 0.6~0.7%程度で推移している。一方、晴天日は、窓鉛直面照度に応じて机上面照度はなだらかな凸型になっているが、到達率は 15:00 頃を頂点として徐々に低下しており、0.5%程度となった日没直前と日の入り後が、机上面照度が最も低くなる時間帯といえる。そこで、日没直前に 300lx 以上を維持できるように出力の下限値を再検討し、その結果を踏まえて出力の下限値を 65%に設定した。これにより、採光条件に関わらず最低照度 300lx を維持し、日中は自動調光で出力を抑える効果が期待できる。

図-8に、調整後の晴天日における机上面照度の変動とエネルギー消費率（夜間に 300lx 以上を維持できる最大出力時のエネルギー消費を 100%とした場合のエネルギー消費の割合）を示す。日中の電力量は、100%の出力時に対して 20%程度削減されていることを確認した。これは、晴天日の自然光による机上面の照度が 50~100lx であることを考慮すると、妥当な割合といえる。また、日没後は、目標照度に合わせて安定した照度を維持していることも確認した。

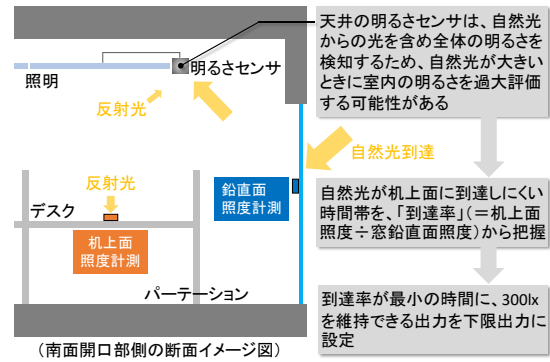


図-5 調光システムの概要と照度の分析方法

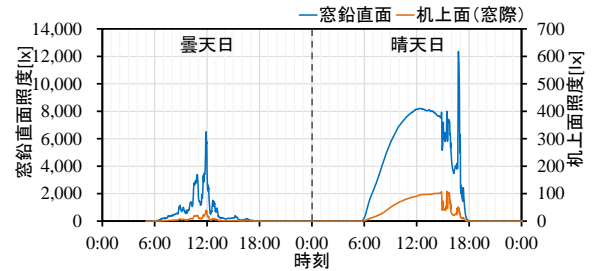


図-6 照度測定結果

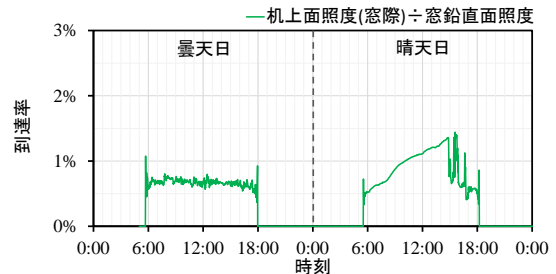


図-7 自然光の到達率

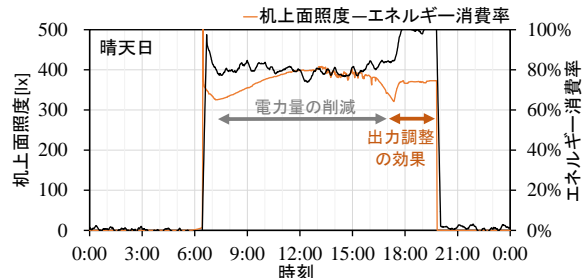


図-8 机上面照度の変動とエネルギー消費率

4. 改修後初年度のエネルギー消費実績と分析

4.1 分析概要

年間および月間の一次エネルギー消費量の実績値の分析と、主要設備として空調と照明について分析を行った。

4.2 年間一次エネルギー消費量

改修後初年度の運用実績として、2020年4月から1年間のエネルギー計測データの分析を行った。図-4中に一次エネルギー消費量の年間実績（以下、実績値）を示す。実績値は設計値を下回り、発電量を加味したエネルギー収支で、基準値に対して84%の削減となった。エネルギーの内訳も概ね設計値と同様の傾向であるが、設計値と比較して実績値に大幅な増減が見られた換気設備

(設計値比 264%)、給湯設備 (設計値比 22%)、昇降機 (設計値比 29%) については、以下の原因が考えられる。

a. 換気設備の消費量の増大理由

本建物の主たる換気設備は、便所の排気であり、これを 24 時間稼働させている。実稼働時間が、標準室使用条件の稼働時間 (週 5 日、1 日あたり 13 時間) に比べて大きいことが原因と考えられる。

b. 給湯設備の消費量の減少理由

本建物の実働人員が、WEB プログラムの計算前提となる標準室使用条件⁵⁾の利用人数 (室面積から自動換算) の 1/3 程度であること、夏期に便所洗面の給湯を停止させたことによる利用日数の減少が原因と考えられる。

c. 昇降機の消費量の減少理由

昇降機は本改修で新設しているが、改修前から在籍している大半の執務者は習慣的に階段を利用しており、使用時間が少ないことが原因と考えられる。

4.3 月間一次エネルギー消費量

図-9 に、月別一次エネルギー消費量の実績値を示す。照明、換気および昇降機は、季節による変動は見られない。空調は、冷暖房負荷の発生する夏期 (7~9 月)、冬期 (12~2 月) で特に増大し、給湯は冬期 (12~4 月) に増大している。

一般的な建物では電力会社から直接受電することが多いが、本建物は施設全体で電力を契約しており、第一変電所受電盤に RPR を設置している。そこで、建物単体で受電した場合の自家消費型システムの特性を把握するため、4~7 月は RPR の設置位置を本建物の第三変電所受電盤に試験的に変更した。その結果、この期間は、電力消費量が発電量を下回る時間が増え、逆潮流の検知による発電停止が頻繁に生じたことにより、発電量が低減したことがわかった。一方、8 月以降は、発電量が増大したことを確認した。

4.4 空調エネルギーの分析

空調については、1 時間ごとのエネルギー分布を確認した。図-10~12 に、2~4 階の空調室外機の 1 時間ごとの電力量と外気温の関係を示す。図中には、ピーク電力発生日時と、室外機の定格値 (冷房、暖房、最大暖房) を併せて示す。なお、定格値の表記に合わせ、本分析は最終エネルギー消費の電力量で示している。空調設定温度は階ごとに任意としているが、夏期は 25~26℃、冬期は 22~24℃に設定されていることが多かった。

ピーク電力量は、夏期では 2~4 階共通で 8 月の夏期休暇明けの午後に発生し、冬期では 2、4 階で 1 月の年末年始休暇明けの早朝に発生していた。本建物は RC 造であることから、熱負荷のピークは、長期休暇中に躯体に蓄熱あるいは躯体が冷却されたことが影響していると考えられる。ピーク時以外の電力量は定格値未満となっており、想定した空調能力が適切であることを確認した。また、執務室と打合せエリアが一体となっている 3、4

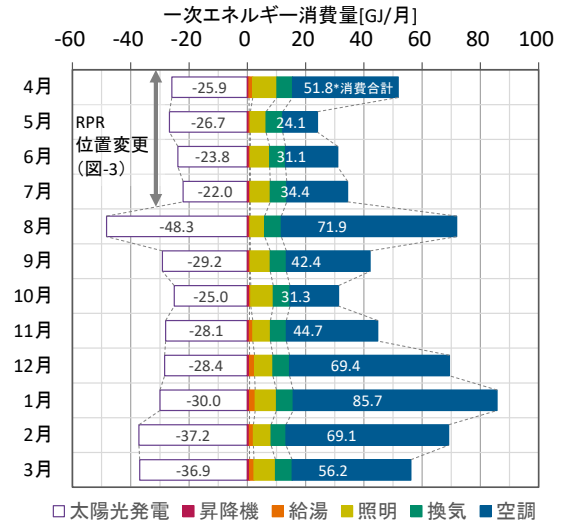


図-9 月別一次エネルギー消費量 (実績値)

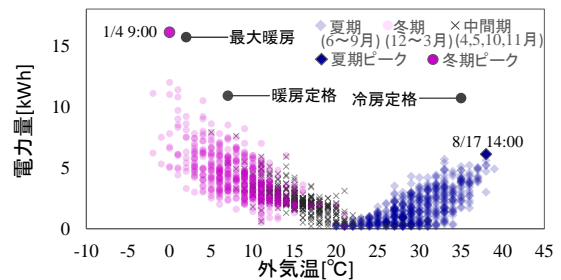


図-10 2階の空調電力量分布

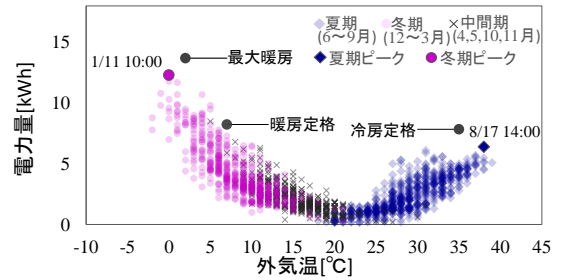


図-11 3階の空調電力量分布

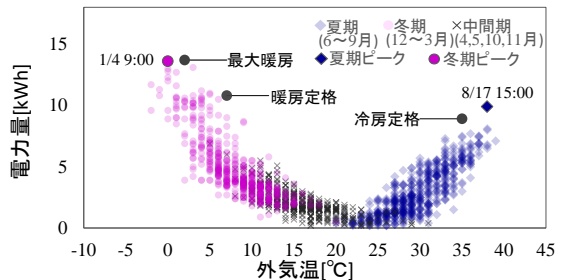


図-12 4階の空調電力量分布

階に比べ、会議室 2 室と執務室 1 室を備える 2 階は低負荷での運転時間が多いことも確認した。

4.5 照明エネルギーの分析

照明については、図-8 に示した通り、アンビエント照明の自動調光機能の設定方法による省エネルギー効果について確認した。今回は、ZEB 化改修の有効な手段としてタスク・アンビエント方式を採用したが、照度の設定に課題があったため運用面を見直し、エネルギー消費を過度に損なうことなく適切な照度を確保した。

5. 執務者の温熱・光環境評価の調査

5.1 調査概要

改修後の温熱環境、光環境の快適性の実態を把握するため、執務者に対してアンケート調査を行った。表-2に、アンケート調査概要、表-3に、設問および回答の選択肢を示す。アンケートは、設問ごとに5つの選択肢から当てはまる項目を選択する方法とし、1日に3回、年間9日(全27回)実施した。なお、実施時は、アンビエント照明の出力と、照度や快適性の関係を把握するため、自動調光機能は切り、調光率を固定した。

本報では代表的な回答例として、夏期8月4日9:00~11:00、冬期12月11日9:00~11:00のアンケート結果について示す。表-4に、アンケート実施時の回答内訳、室内温湿度平均およびアンビエント照明出力を示す。8月4日の照明出力は、設定値(65%)よりも低い状況を想定したものであり、12月11日の照明出力は、設定値に近い状況を想定したものとなっている。

5.2 結果と考察

a. 温熱環境

図-13に、アンケート実施時の執務空間の温湿度測定結果を、図-14に、温熱環境に関するアンケート結果を示す。なお、図-13の測定番号は、図-2中に示した温湿度測定点の番号に対応する。

温冷感や乾湿感に関するアンケートでは中間的な回答が多いものの、12月は8月と比較すると温湿度が低く、寒さや乾燥を感じる回答が多かった。また、8月に暑いと回答した人の多くは、座席の位置が建物東側階段室の近傍であった。夏期の温湿度測定結果を確認すると、特に3、4階の東側階段室付近(a-i)の温度が高くなっており、新型コロナウイルス感染症対策として階段室の扉を常開にしていたため、下階からの暖気が流入したことが原因として考えられる。ドラフト感を感じる割合は、12月は8月に比較すると若干減少していた。温熱環境の満足度については、中間的な回答の割合が12月の方で増加しているが、ばらつきが目立つ結果であった。

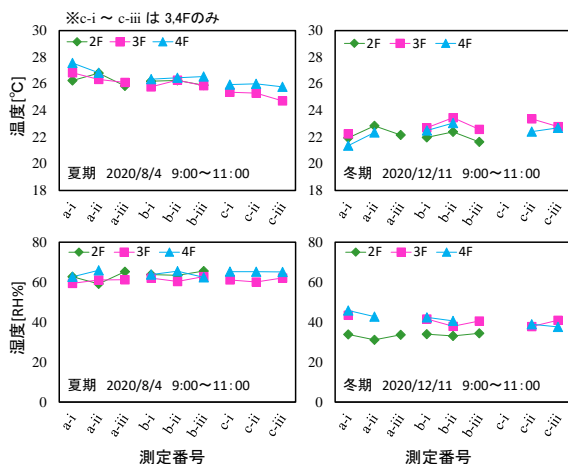


図-13 アンケート実施時の執務空間の温湿度測定結果

表-2 アンケート調査概要

対象者	管理棟2~4階の執務者36名
対象室	管理棟2~4階の執務室(茨城県つくば市)
実施方法	・ Microsoft Forms を使用 ・ 回答期限付きURLを対象者(36名)にメール送付 ・ 自席在席者が現在どのよう感じているかを回答
実施期間	日 8/4, 8/20, 8/27, 9/10, 9/14, 10/26, 12/4, 12/9, 12/11 時間 ①9:00~11:00 ②13:00~15:00 ③16:00~18:00 ※12/4以降、③16:00は16:30に変更

表-3 アンケートの設問および回答の選択肢

温熱環境	
Q1. 現在の温冷感について、どのように感じていますか	1.寒い 2.やや寒い 3.適当 4.やや暑い 5.暑い
Q2. 現在の乾湿感について、どのように感じていますか	1.乾いた感じ 2.やや乾いた感じ 3.どちらともいえない 4.やや湿った感じ 5.湿った感じ
Q3. 現在、気流による不快感(=ドラフト感)を感じていますか	1.感じない 2.あまり感じない 3.どちらともいえない 4.少し感じる 5.感じる
Q4. 現在の温熱環境の満足度について、どのように感じていますか	1.不満 2.やや不満 3.どちらともいえない 4.やや満足 5.満足
光環境	
Q5. 現在の自分のデスクの明るさについてどのように感じていますか	1.暗すぎる 2.やや暗い 3.ちょうどいい 4.やや明るい 5.明るすぎる
Q6. 現在の光環境の満足度について、どのように感じていますか	1.不満 2.やや不満 3.どちらともいえない 4.やや満足 5.満足

表-4 アンケート実施時の回答内訳など

	8月4日 9:00~11:00	12月11日 9:00~11:00
回答者数(回答率)	21人/36人(58%)	15人/36人(42%)
回答者男女比	男18人 女3人	男12人 女4人
天候	晴れ	晴れ
屋外温湿度	29.3°C 73.3%RH	9.1°C 82.0%RH 早朝霧
室内温湿度平均	26.1°C 63.1%RH	22.2°C 38.6%RH
アンビエント照明出力	25%	75%

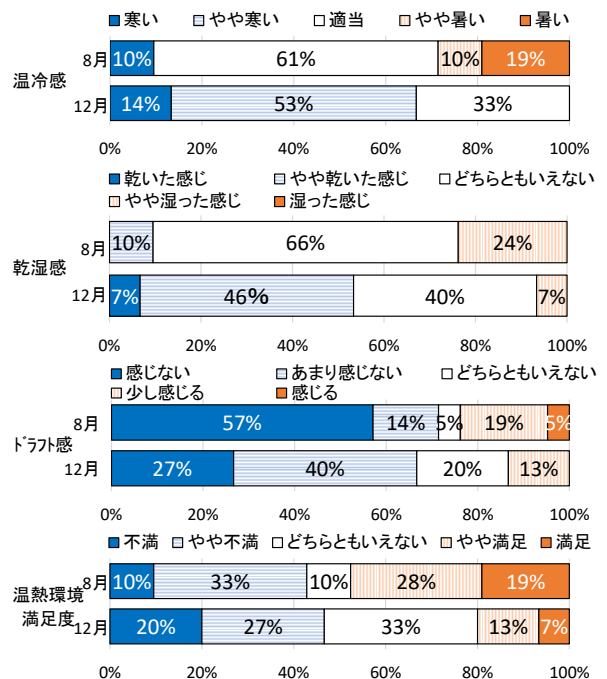


図-14 温熱環境に関するアンケート結果

b. 光環境

図-15 に、光環境に関するアンケート結果を示す。デスクの明るさ感については、アンビエント照明の出力を25%とした8月は、「やや暗い」の回答が見られたが、これを75%とした12月の結果では、不満側の回答はなくなった。

また、全アンケートを通じて推測されたのは、机上面照度が750lxを超えていた場合でも、着席時に視線を上にあげるなどして、机上面だけでなく自席周辺の印象も含めて評価していることであった。

そこで、調光出力別の光環境を、開口部からの採光の影響を排除した状況で評価するため、上記2回のアンケートとは別に、冬期の日没後(16:30以降)にもアンケートを実施した。表-5に、出力別のアンケート結果とタスク照明使用率を示す。なお、評価は表-3に示した設問回答番号を数値尺度として、その平均値を求めた。

日没以降のアンケートであるため、回答者の数は少ないものの、調光の出力を上げることで、光環境の満足度が向上していること、タスク照明の使用率が減っていることがわかる。一方、自由回答では、タスク照明によって明るさをコントロールできることに満足感を得るといった回答も多くみられた。アンビエント照明で十分な照度を確保することで執務者に「タスク照明を使用しない」という選択肢が加わり、個人の好みに合わせて環境を構築しやすくなった結果、全体の満足度が向上したと考えられる。

6. まとめ

自社施設のZEB化改修後の2020年4月～2021年3月までの1年間の運用の中で取得したエネルギー消費量に関するデータを整理・分析し、以下の結果を得た。

- i. 建物のエネルギー消費量の実績値は、基準値に対して84%削減され、運用においても設計で想定したエネルギー性能を達成していることを確認した
 - ii. 設計値と実績値の差は、計算時の標準室使用条件と、運用時の使用条件の違いが主な原因として挙げられる
 - iii. 自家消費型の太陽光発電システムを採用しており、RPRの位置を本建物の受電盤から施設全体の受電盤へ変更することで、発電量が增大することを確認した
 - iv. 執務室に採用した空調機は、定格容量の中で運用ができていますが、複数の室で空間が仕切られている2階においては比較的低負荷での運転が多い
- また、執務者へのアンケートや照明出力の設定調整を行い、以下の結果を得た。
- i. 温熱環境について、大きな不満は指摘されていないものの、冬期の温湿度分布に関連した寒さおよび

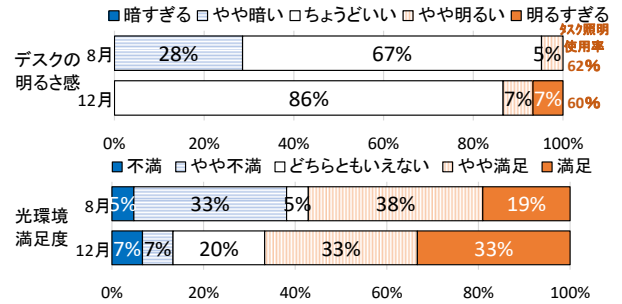


図-15 光環境に関するアンケート結果

表-5 出力別のアンケート結果とタスク照明使用率

	アンビエント照明出力 (回答者数)		
	25% (n=7)	50% (n=13)	75% (n=5)
Q5.現在の自分のデスクの明るさ	2.71	2.85	3.40
Q6.現在の光環境の満足度	3.14	3.31	3.40
タスク照明使用率	57%	46%	40%

び乾きの評価結果や、夏期の温度分布に関連した暖気の流入による暑さの評価結果を得た

- ii. 机上面への採光の到達が最も少なくなる時間帯に照明の最低出力を設定し、調光下でも机上面で所定の照度以上を維持できることを確認した
- iii. アンビエント照明の出力向上による設備の最適化や、十分な照度がある空間において、タスク照明の使用の可否を執務者が自分で決められることが、光環境の満足度の向上に関係することを確認した

7. あとがき

ZEB化の提案、普及を進める上では、省エネルギー性のみならず快適性の面も意識した環境建築を追求する取り組みが不可欠である。省エネルギーと快適性の両立を根底におき、今後も継続してエネルギー収支を監視・分析していきたい。また、今回新技術として導入したタスク・アンビエント方式の照明や自然換気窓の最適な設定・運用方法についても、執務者の実際の感じ方と合わせて検証し有効性を整理していく予定である。

【参考文献】

- 1) 中央環境審議会地球環境部会、「長期低炭素ビジョン」、2017.3
- 2) 平成30年度ZEBロードマップフォローアップ委員会、「平成30年度ZEBロードマップフォローアップ委員会とりまとめ」、2019.4
- 3) 松永智弘、坂崎 隆、中西史子、岩下将也、稲留康一、「技術研究所管理棟のZEB化改修」、奥村組技術研究年報、No.46、pp.97-102、2020.9
- 4) JIS Z 9110、「2010 照度基準総則」
- 5) 国立研究開発法人建築研究所、「平成28年省エネルギー基準に準拠したエネルギー消費性能の評価に関する技術情報(非住宅建築物)」、2016

音環境プレゼンテーションシステムの拡充

Expanding a Sound Environmental Presentation System

柳沼勝夫* 稲留康一*

要旨

音環境性能（音の響き方や遮音など）は通常、数値で示すことが多く、一般の人にはその性能をイメージしにくい。そこで、当社では設計仕様から音環境を予測計算し、計算結果を音源データに施した試聴音を作成・再生できるシステムを開発している。従来のシステムではノートパソコンで試聴音を作成していたが、今回これをクラウド上で行えるようにシステムを拡充した。その結果、処理速度が大幅に向上し、打ち合わせ先で仕様変更があった場合も即時にそれに対応した試聴音を作成できるようになった。また、使用機器はモバイル端末とヘッドホンのみであるので、インターネットに接続可能な場所であればどこでも使用でき、可搬性に優れたシステムとなった。

キーワード：音環境、性能評価、試聴音、クラウド、モバイル端末、プレゼンテーション

1. まえがき

建物の音環境性能は、日本建築学会編「建築物の遮音性能基準と設計指針」に記載されている遮音性能基準を参考に決めることが多い。遮音性能基準には、騒音レベル (dB) や D 値、L 値などの遮音等級、想定した音源が生活の中でどの程度の音として聞こえるかといった生活実感が示されており、これらをもとに事業主と協議のうえ性能を決める。ただし、これらの評価値は一般の人には馴染みが薄く、実際の音環境をイメージしにくい。そのため、引き渡し後に、イメージしていた音環境と異なるといった指摘が挙げられることもある。

このような背景から、当社では、音環境性能を一般の人でも理解しやすいように、実音をもとに音環境性能を施した音を試聴できる「音環境プレゼンテーションシステム」¹⁾を開発している（以下、既開発システム）。

近年、ICT の発達により、スマートフォンやタブレットなどのモバイル端末の收音や再生に関する性能が向上している。大学での音環境教育に利用する事例²⁾などもあり、大容量で高速演算が可能なクラウドも安価に提供されはじめてきた。そこで今回、可搬性や計算処理速度を向上させるため、既開発システムをモバイル端末とクラウドを利用したシステムに拡充した。これによって打ち合わせ先で仕様変更があった場合でも、即時にそれに対応した試聴音を作成できるシステム（以下、拡充システム）となった。

本報では、システムの概要と実建物におけるシ拡充システム精度の検証事例について述べる。

2. 拡充システムの概要

2.1 拡充システムの構成

拡充システムの構成を写真-1に、概要を図-1に示す。



写真-1 拡充システムの構成

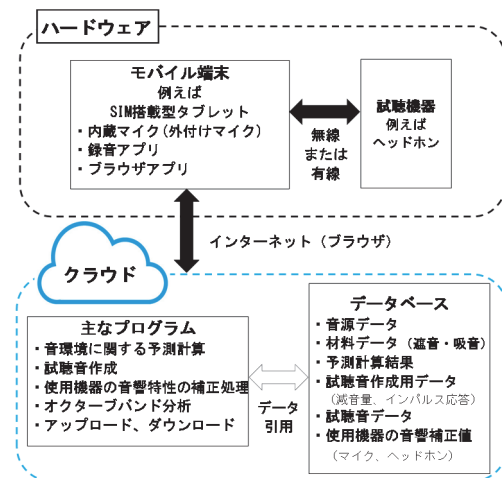


図-1 拡充システムの概要

* 技術研究所環境研究グループ

拡充システムでは、音源の收音や試聴音の再生にモバイル端末とヘッドホンを利用する。音環境に関する予測計算、試聴音作成などの計算プログラムやデータベースはクラウドに実装されているので、インターネット経由でクラウドに接続し、プログラムやデータを利用する構成となっている。

2.2 ハードウェア

モバイル端末は、インターネットを利用するためSIM搭載型を基本としている。また、收音マイクを内蔵、または外付けマイクを利用可能なものとする。ヘッドホンは、音環境性能の評価対象周波数である 50Hz 帯域～5000Hz 帯域の音を再生できるものを利用する。

2.3 クラウド

a. 音環境に関する予測計算機能

拡充システムでは、音環境に関する以下、i～ivの6項目の予測計算が行える。これらのプログラムはクラウドに実装されている。

- i. 外部騒音に起因する室内騒音
- ii. 室間遮音性能（隣室から伝搬する騒音）
- iii. 建物内外から敷地境界へ伝搬する騒音
- iv. 空調設備に起因する室内騒音
- v. 床衝撃音遮断性能
- vi. 室内残響時間

それぞれの計算には、これまでに当社で研究してきた知見^{3)~5)}を反映させている。

b. 試聴音作成

モバイル端末からクラウドにアップロードした音源データや、データベースに登録してある音源データと予測計算結果をもとに試聴音を作成する。試聴音作成の概要を表-1に示す。

i～viについては、予測計算結果から減音量フィルターを作成し、音源データをフィルター処理することで試聴音を作成する。

vの床衝撃音遮断性能は、JIS規格による標準衝撃源（タイヤ、ボール、タッピング）の衝撃力から床衝撃音レベルを求める。しかし、予測計算結果をそのまま反映した試聴音は作成できないため、スラブ厚や床仕上げ構造、仕上げ天井などの条件ごとに收音した標準衝撃源による床衝撃音から計算した条件に近い音源データを抽出し、その床衝撃音レベルと計算値のレベル差を減音量としたフィルターを作成する。なお、重量床衝撃音は、50Hz～630Hz帯域が評価対象であることから、対象外の周波数についてはフィルター処理して再生しない。

viの室内残響時間では、無響室で收音した朗読音等の音に、音響シミュレーション等により予測したインパルス応答やインパルス応答の実測値を畳み込み演算することにより試聴音を作成する。

c. 使用機器の補正処理機能

使用する收音マイクやヘッドホンには、それぞれ固有

表-1 試聴音作成の概要

	計算項目	音源（例）	対象周波数帯域	評価音作成方法
i	外部騒音に起因する室内騒音	交通騒音（道路・鉄道）	50Hz～5000Hz	減音量に応じたフィルター処理
ii	室間遮音性能	会議室の話し声 ホテルTV音 ※空気伝搬音	100Hz～5000Hz	
iii	建物内外から敷地境界へ伝搬する騒音	屋外設備 室内設備	50Hz～5000Hz	
iv	空調設備に起因する室内騒音	空調設備		
v	床衝撃音遮断性能	床衝撃音（重量・軽量）	重量床衝撃音 50Hz～630Hz 軽量床衝撃音 50Hz～5000Hz	收音時と予測計算時の標準衝撃源による床衝撃音レベル差に応じたフィルター処理
vi	室内残響時間	会議室の話し声 教室の話し声	100Hz～5000Hz	インパルス応答を用いた畳み込み演算

の音響特性があることから、作成した試聴音を忠実に再生するために音響特性を補正する必要がある。そこで、あらかじめ求めた補正值をもとに、收音した音源や作成した試聴音をフィルター処理して補正する。なお、使用機器の音響特性に対する補正值は、3章で述べる方法で求める。

これらの試聴音作成や補正といった波形処理の処理速度は、従来、ハードウェアの処理能力に依存していた。しかし、システムではクラウドを利用することで、ハンドリングの良いモバイル端末で高速な処理を行うことが可能となった（波形のフィルター処理に30秒程度）。

3. 使用機器の音響特性に対する補正方法

3.1 マイクの音響特性と補正方法

モバイル端末にタブレットを使用した時のマイクの音響特性を確認した事例を述べる。

a. 周波数特性

評価対象周波数の音を対象マイクで收音できることを実験的に確認する。

無響室にてスピーカからピンクノイズ（雑音）を発生させ、1m離れた位置に精密騒音計（RION社製NA-28）とタブレット（内蔵マイク、外付けマイク）を設置して收音した。收音データの1/3オクターブバンドレベルを図-2に示す。

タブレットの外付けマイクと精密騒音計は、対象周波数範囲である50Hz～5000Hz帯域において概ね一致している。一方でタブレット内蔵マイクは、80Hz帯域以下の低い周波数でレベル差が見られる。したがって、重量床衝撃音や設備音等の低音域で問題となる音には外付けマイクを利用する。

b. 收音可能レベルと線形性

拡充システム使用時は、使用者の聴力障害への配慮や騒音対策が必要になる騒音の大きさを踏まえ、收音する音圧レベルを 30dB~80dB と想定している。また、マイクについては、その周波数特性が收音する音圧レベルに応じて線形変化するものを利用する。そのため、使用するマイクの收音可能レベルと周波数特性の線形性を実験的に確認する。

ピンクノイズの音量を 30dB~80dB とし、タブレット内蔵マイクと精密騒音計で收音した。收音した音を 1/3 オクターブバンド分析し、タブレット内蔵マイクと精密騒音計の対応を検討した。代表例として、1000Hz 帯域の結果を図-3 に示す。

精密騒音計の値を真値とした場合、タブレット内蔵マイク使用時は 30dB~80dB で概ね線形に変化した。他の周波数も同様な傾向であった。したがって、想定している音圧レベルの範囲で周波数特性が線形変化することから、一定の補正值で補正が行える。

c. 補正方法

対象マイクが拡充システムで利用できることを確認後、図-2 に示す精密騒音計とマイクの 1/3 オクターブバンドレベルのレベル差を算出し、その値を補正值と定める。その後、補正值に応じたフィルターを作成し、收音波形にフィルター処理して補正する。

3.2 ヘッドホンの音響特性と補正方法

a. 周波数特性

ヘッドホンは用途や好みに応じたチューニングがされているものが多く、作成した試聴音を忠実に再生するには、ヘッドホン独自の周波数特性をキャンセルする必要がある。

無響室でダミーヘッドにヘッドホンを装着し、タブレット経由で音源ソース（ピンクノイズ）を再生した。音源ソースとヘッドホン再生音の 1/3 オクターブバンドレベルを図-4 に示す。

平坦な周波数特性の音源ソースに対比して、実験したヘッドホン再生音は周波数ごとに異なり、特に 400Hz~1000Hz 帯域の音を強調する特性となっている。

b. 再生可能レベルと線形性

音源ソースのレベルを 10dB~80dB の範囲で変えてヘッドホン再生し、ヘッドホンの再生可能レベルと線形性を検討した。代表例として、1000Hz 帯域の結果を図-5 に示す。

20dB~80dB の範囲でヘッドホン再生できており、音源ソースの 5dB ピッチのレベル変化に応じて線形に変化している。また、他の周波数帯域も同様な結果であった。20dB まで再生が行えることから、例えば、室間の遮音を検討する際に、音源室で 75dB 発生している音源に対して、室間遮音性能で Dr-55 までの効果を試聴音として表現できる。

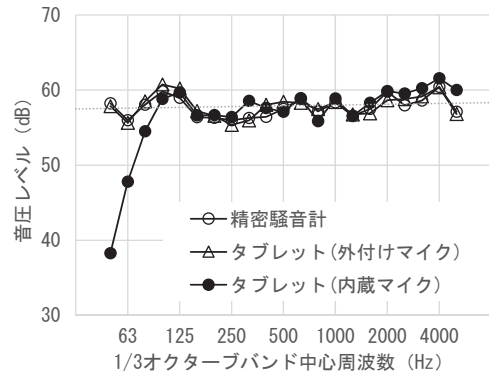


図-2 收音データの周波数特性

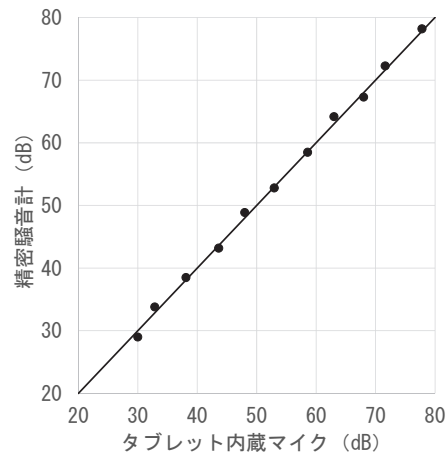


図-3 收音可能レベルと線形性 (1000Hz 帯域)

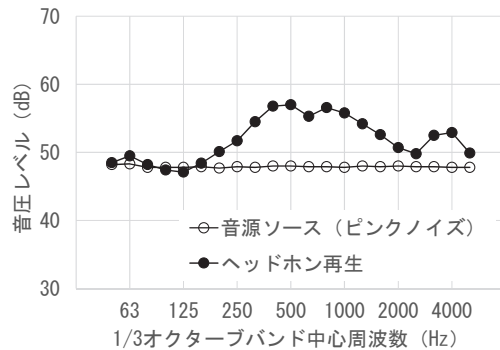


図-4 ヘッドホン再生音の周波数特性

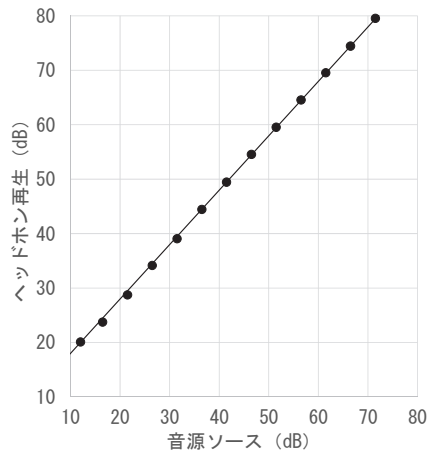


図-5 再生可能レベルと線形性 (1000Hz 帯域)

c. 補正方法

ヘッドホンが拡充システムで利用できることを確認後、マイクの補正方法と同様にフィルターを作成し、ヘッドホンの音響特性をキャンセルするフィルター処理を行う。

4. 実建物におけるシステム精度の検証事例

4.1 検証概要

オフィス室内を利用し、室間遮音性能について拡充システムの前予測精度と試聴音の作成・再生精度を検証した。測定室の概要を図-6に、測定状況を写真-2に示す。

会議室と執務室間の界壁は、乾式二重壁 (TLd-40) である。会議室と執務室の廊下扉は、エアタイトが設置されていない一般的なスチール製親子扉である。

会議室を音源室とし、スピーカからピンクノイズまたは男性朗読音を再生した。その再生音を拡充システム (タブレット内蔵マイク使用) でそれぞれ収録して、音源データとした。なお、収録精度の検証のため、精密騒音計 (RION 社製 NA-28) でも収録を行った。一方、受音室である執務室にはダミーヘッドを設置して会議室からの伝搬音を収録した。また、JIS A 1418 : 2000「建築物の空気音遮断性能の測定方法」により音源室と受音室の室間音圧レベル差の測定も行った。

4.2 収録精度

収録精度が試聴音の作成精度に影響を及ぼすため、拡充システムによる収録データと精密騒音計による収録データを比較した。精密騒音計の音圧波形と拡充システムで収録した音圧波形 (マイク補正後) を図-7に、それぞれのオクターブバンドレベルを図-8に示す。

拡充システムで収録した音圧波形の形状や振幅は、ピンクノイズおよび男性朗読音ともに精密騒音計で収録した音圧波形とほぼ同形状、同振幅である。オクターブバンドレベルでは1dB以内の誤差であり、普通騒音計と同等の精度で収録できていることがわかる。

4.3 予測計算精度

拡充システムによる予測計算精度を確認するため、室間音圧レベル差の予測計算結果 (予測計算値) と JIS 規格の測定により求めた室間音圧レベル差 (実測値) を比較した。比較結果を図-9に示す。なお、予測計算に用いる扉の遮音性能はカタログ値がないため、実測による遮音性能を利用した。

実測値に対して予測計算値は 125Hz~4000Hz 帯域において概ね対応しており、精度良く室間音圧レベル差を予測できているといえる。

4.4 試聴音作成・再生精度

拡充システムで作成した試聴音の音圧波形とダミーヘッドに装着したヘッドホンで再生された試聴音の音圧波形 (ヘッドホン再生、写真-3参照)、受音室でダ

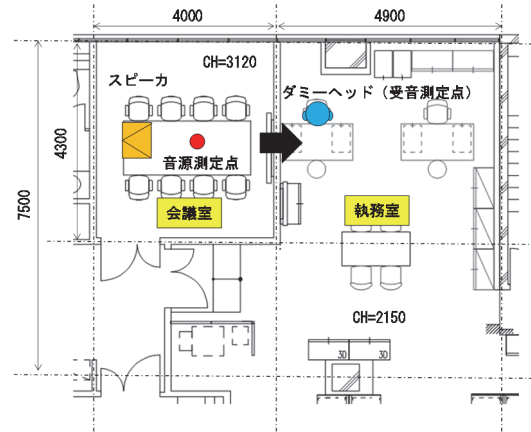


図-6 測定室の概要



写真-2 測定状況

ミーヘッド収録した音圧波形 (実測値) を図-10 に示す。また、それぞれのオクターブバンドレベルを図-11に示す。なお、受音室の暗騒音を図中に示すが、男性朗読音再生の場合、受音室での実測値が 1000Hz 帯域以上では暗騒音の影響を受けているため評価から除外した。

ヘッドホン再生音は、試聴音および実測値の音圧波形とほぼ同形状、同振幅であり、オクターブバンドレベルも同程度である。このことから、拡充システムで作成された試聴音がヘッドホンで正しく再生できており、実際の音を再現出来ているといえる。

以上により、拡充システムによる収録~予測計算~再生の一連の流れを通して実際の音が再現出来ていることから、使用機器の補正処理が適切であり、試聴システムとして十分に利用できると考える。

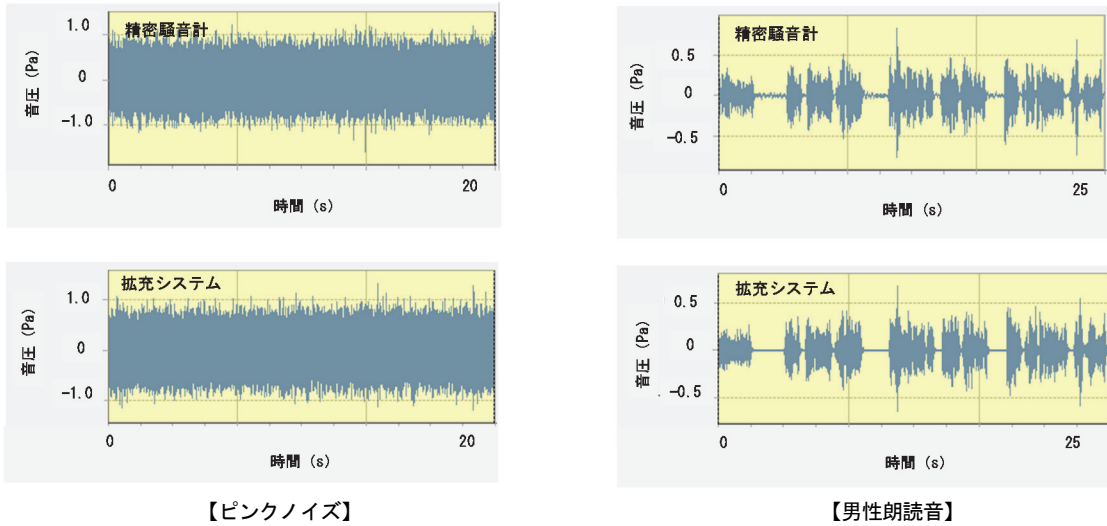


図-7 音圧波形 (音源室側)

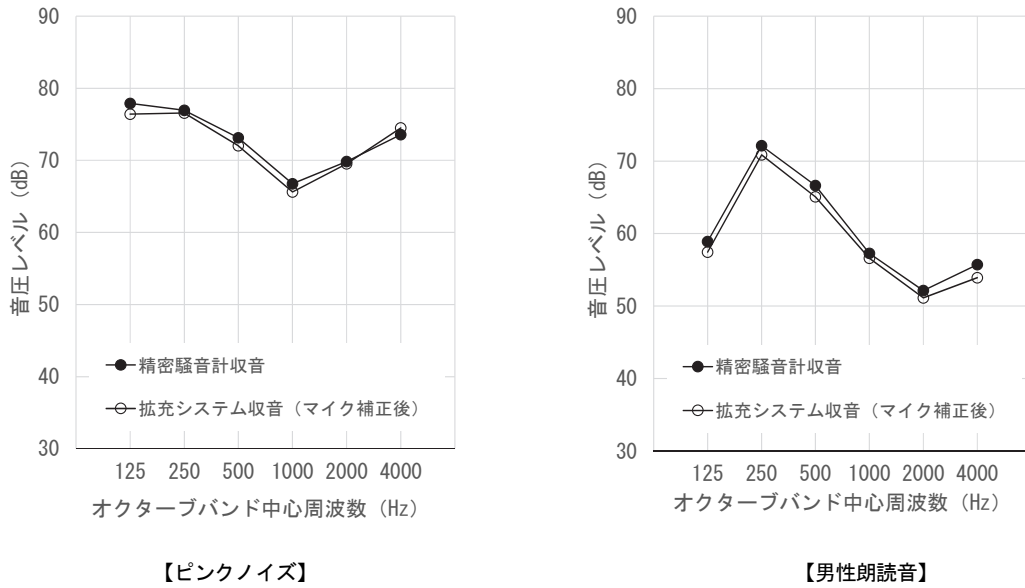


図-8 オクターブバンドレベル (音源室側)

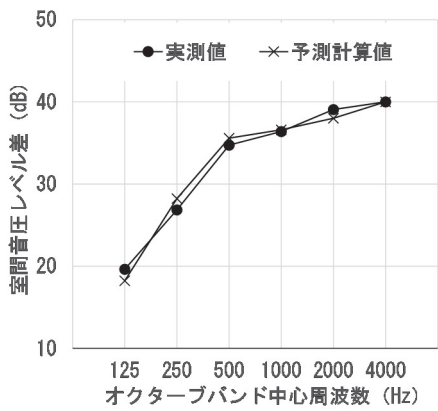


図-9 室間音圧レベル差



写真-3 ヘッドホン再生状況

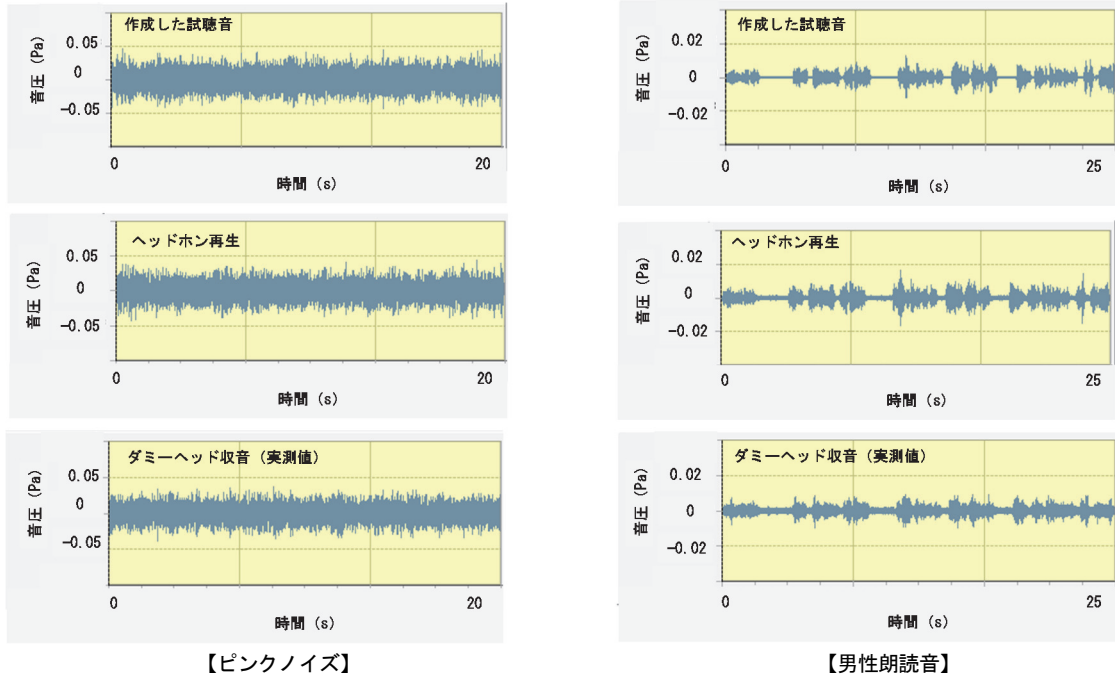


図-10 音圧波形 (受音室側)

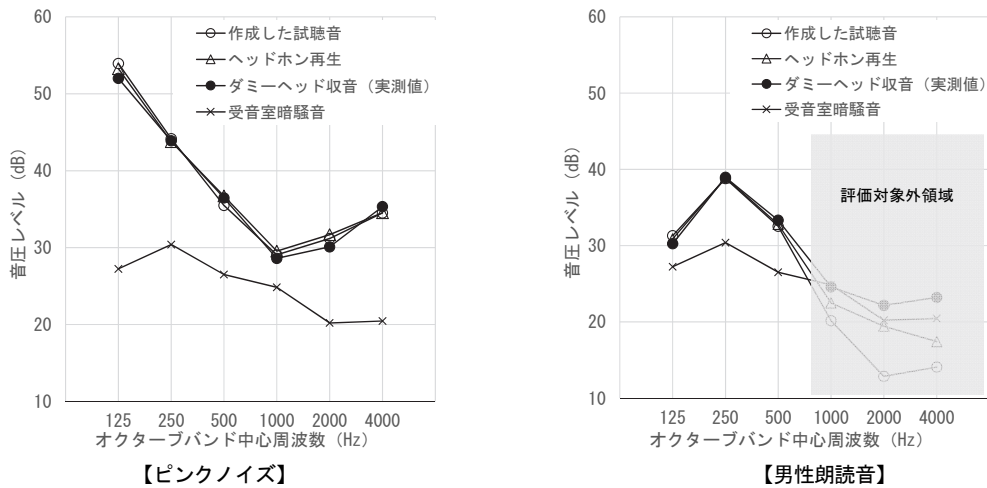


図-11 オクターブバンドレベル (受音室側)

5. まとめ

可搬性と計算処理速度に優れた構成で、既開発のシステムをインターネットに接続可能な場所であればどこでも使用出来るシステムに拡充した。また、使用機器の音響特性を把握し、收音と再生時に補正処理を行うことで、既開発システムと同様に実際の音を精度よく再現できることを確認した。

既開発システムを拡充したことによる可搬性や計算処理速度を向上させた利点を活かして、今後は実務に展開していきたい。

【参考文献】

1) 児玉朗蘭、稲留康一、「音環境プレゼンテーションシステムの開発」、奥村組技術研究所年報、No.3、

pp.107-112、2009

2) 佐藤史明、阪上公博、尾本章、「音環境導入教育へのスマートフォンの利用—精度の検証とサウンドマップの作例—」、日本音響学会誌、70 巻、5 号、pp.260-265、2014

3) 稲留康一、飛松幸彦、「側路伝搬音の予測手法に関する研究 (その 1) 窓からの廻り込み音の予測手法」、奥村組技術研究年報、No.26、pp.93-98、2000

4) 稲留康一、山上 聡、「床衝撃音予測手法に関する研究—実大試験床版の概要および実験結果—」、奥村組技術研究年報、No.31、pp.87-92、2005

5) 柳沼勝夫、稲留康一、「樹脂製インナーサッシによる二重窓の遮音性能」、奥村組技術研究年報、No.35、pp.101-106、2009

膨潤抑制剤を利用した除去土壌の 再生資材化技術に関する基礎研究（その 2）

Study of Efficient Reuse Technologies for Removed Soil with Swelling Inhibitors (Part 2)

羽瀨博臣* 清水祐也* 今井亮介*

要 旨

現在、東日本大震災で発生した原子力発電所事故由来の放射性物質に対して除染作業が進められており、その際に除染作業で発生した除去土壌（約 1,400 万 m³）を減容化し、再生資材として利用するために、湿式分級処理する方法が検討されている。一方、中間貯蔵施設における受入分別時の異物除去を効率化するために改質材が用いられているが、改質材には高吸水性樹脂が数%配合されているものがある。

高吸水性樹脂は高い吸水膨潤性があるため、湿式分級処理で回収された土壌の土質特性に影響を及ぼす懸念がある。本研究では、湿式分級処理で回収された土壌を用いて構築した盛土、及び高吸水性樹脂の吸水膨潤性を打ち消す膨潤抑制剤を添加して構築した盛土を設置し、盛土資材に膨潤抑制剤を適用した場合の土質特性や環境への影響に関する基礎的評価を実施した。その結果、膨潤抑制剤の適用は、「土質特性の向上に寄与する」、「周辺環境や人の健康に悪影響を及ぼさない」、「雨水等の浸透性が向上する」こと等を確認した。

キーワード：除去土壌、減容化、湿式分級処理、高吸水性樹脂、膨潤抑制剤

1. まえがき

平成 23 年 3 月に発生した東日本大震災に伴う福島第一原子力発電所の事故に由来する放射性物質の拡散に対して、広範囲の除染作業は完了したが、帰還困難区域においては特定復興再生拠点を中心に現在も除染が進められている。また、これらの除染で発生した除去土壌が大量であることから、その減容・再生利用についての各種検討が行われている。

環境省が主催する減容・再生利用技術開発戦略検討会等では、放射性セシウム濃度が 1.5 万～6.2 万 Bq/kg（平成 30 年 10 月時点の濃度で約 134 万 m³ が対象）の除去土壌を再生資材として利用するために、湿式分級処理する方法も検討されている。この処理方法は、放射性物質がより吸着されやすい土壌の細粒分²⁾を除去して再利用可能な土壌を得る方法である。

また、湿式分級処理の対象となる土壌には、中間貯蔵施設における受入・分別時の異物除去を効率的に行うために改質材が用いられており、この改質材の中には、数%の高吸水性樹脂（以下、SAP：Super Absorbent Polymer）が配合されているものがある。この SAP は水

と接触すると数百倍に体積膨張し、内部に水を取り込む³⁾。このため、湿式分級処理で回収される土壌の粗粒分（以下、回収粗粒土壌）の含水率が增大することとなり、土木資材として利用する際には転圧作業等の効率低下が生じる可能性がある。さらに、SAP の保水機能については、農林業分野での研究事例はあるが、力学特性についての報告は少ない。

一方、膨潤した SAP に塩化カルシウムなどの多価陽イオンを含む薬剤（以下、抑制剤）を加えると膨張が抑制され、取込んだ水分を放出する特性が知られている³⁾。

そこで本研究では、この特性を利用し、抑制剤を湿式分級処理の解泥処理工程で添加する方法により、SAP の吸水膨潤性を打ち消す抑制剤の適用効果、及び抑制剤添加に伴う土質特性への影響を把握することを目的とした。本報告では、回収粗粒土壌を盛土資材等として再生利用した場合の力学特性及び浸出水水質等の環境への影響評価結果を報告する。

なお、本報告は、中間貯蔵・環境安全事業株式会社（以下、JESCO）が環境省より受託した、平成 31 年度及び令和 2 年度中間貯蔵施設の管理等に関する業務の成果^{4) 5)}の一部であり、奥村組技術研究年報 No.46「膨潤

* 土木本部土木部環境技術室

抑制剤を利用した除去土壌の再生資材化技術に関する基礎研究⁶⁾の続報として報告するものである。

2. 試験の概要

本試験では、実際に中間貯蔵施設で分別された除去土壌を用いて盛土を構築し、1 年間にわたって盛土の沈下や土質、水質等の実挙動を確認した。

対象とした盛土は、福島県大熊町の JESCO の技術実証フィールド内に構築された 3 体の盛土である。盛土は、次節に示す提供土壌、及び提供土壌を湿式分級処理して回収した回収粗粒土壌を用いて構築した。なお、提供土壌は、複数回に分けて搬入されたため、均質化を図るためにバックホウで混合・攪拌し、原料土壌とした。盛土構築までの試験フローを図-1 に示す。構築した 3 体の盛土は、表-1 の盛土の諸元に示すように、抑制剤添加の有無等の諸条件により各盛土 A~C を仕切板で区切り、ケース 1~6 に区分した。

盛土の配置図を図-2 に、盛土 A の模式図を図-3 に、構築した盛土の全景を写真-1 に示す。各盛土は崩れや法面を保護するため、盛土全体を透水性のある防塵シートで覆い、盛土 C については、細粒分が多い土壌であったため、さらに飛散防止のために保護マットで盛土全面を被覆した。土質試験は盛土構築時と解体時に実施し、沈下量等のモニタリングについては 1 年間実施した。盛土内からの浸出水に対しては、抑制剤を添加することによって生じる放射性セシウム等の溶出の促進や硫酸第一鉄に含まれる鉄分の増加、硫酸イオンによる pH の低下等、浸出水の水質の変化を確認することを目的に、水質モニタリングを行った。その際、盛土の表面を流れて防水堤に入ってきた水による稀釈等が生じないように、防水堤を内外で分ける構造とし、各ケースとも図-4 に示す横 1m×縦 2m の内側防水堤で仕切った範囲(ケース 1 を例としてハッチング部分)から集水した浸出水を採取した。なお、湿式分級処理試験等の過程については、奥村組技術研究年報 No.46⁶⁾を参照されたい。

表-1 構築した盛土の諸元

盛土名	A (盛土を仕切板で区切り 2 種類の土壌で構築)		B (盛土を仕切板で区切り 2 種類の土壌で構築)		C (盛土を仕切板で区切り 2 種類の土壌で構築)	
	1	2	3	4	5	6
ケース番号	1	2	3	4	5	6
改質材 3wt% 追添加	なし		あり			
抑制剤 0.5wt% 添加 ^{※1}	なし	あり	なし	あり	なし	あり
湿式分級処理	あり				なし	
底面寸法 (m) ^{※2}	W:1.5 L:3.0	W:1.5 L:3.0	W:1.5 L:3.0	W:1.5 L:3.0	W:1.5 L:3.0	W:1.5 L:3.0
上面寸法 (m) ^{※2}	W:0.5 L:1.1	W:0.7 L:1.1	W:0.5 L:1.1	W:0.7 L:1.1	W:0.4 L:1.1	W:0.5 L:1.1
高さ (m) ^{※2}	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
材料湿潤重量 (t)	5.4	4.7	4.5	5.4	2.7 ^{※3}	3.4 ^{※3}
盛土体積 (m ³)	2.22	2.37	2.21	2.36	2.08	2.23
単位体積重量 (t/m ³)	2.43	1.98	2.04	2.29	1.30	1.53
土質区分	細粒分まじり礫質砂	細粒分まじり礫質砂	細粒分質礫質砂	細粒分質礫質砂	砂まじり細粒土	砂まじり細粒土
細粒分混入率 (%)	13.0	14.0	16.9	16.9	87.7	86.1
含水率 (%)	17.0	18.7	20.1	19.2	42.0	43.7
締固めの方法	<ul style="list-style-type: none"> ・ 一層のまき出し厚は約 35cm ・ 転圧は各層をバックホウのパケットにて抑え、表面は手作業にて法表面等を仕上 ・ ケース 1 から 6 の 1 層目を構築後、ケース 1 に戻り 2 段目の構築といった手順で各盛土を構築 					
沈下板	<ul style="list-style-type: none"> ・ 各ケース 2 個×6 ケース=12 個を設置 ・ 沈下板寸法はロッド (L=0.5m) 付き鋼板 (40cm×40cm) で、天端より深さ 30cm に埋設設置 					

※1: 硫酸第一鉄を原料土壌に対して湿潤重量比で 0.5wt% 添加

※2: 盛土構築直後の実測値

※3: 追添加した改質材と抑制剤量は含まない

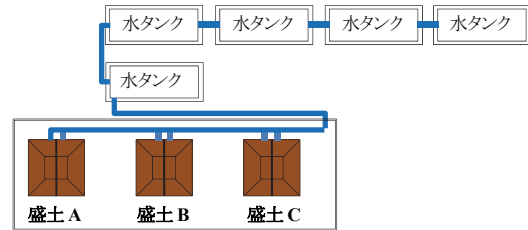


図-2 盛土配置図

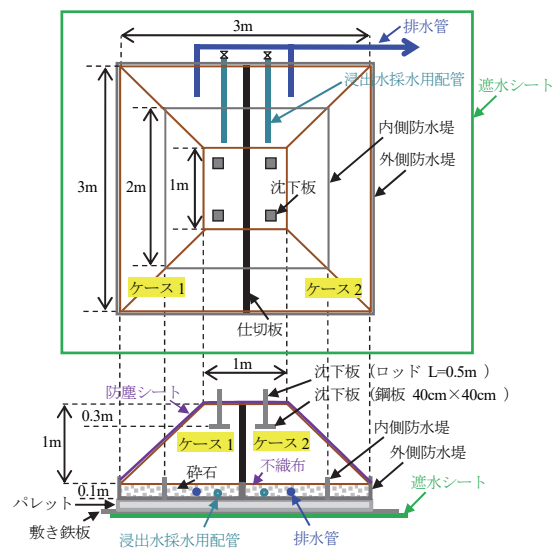


図-3 盛土 A 模式図

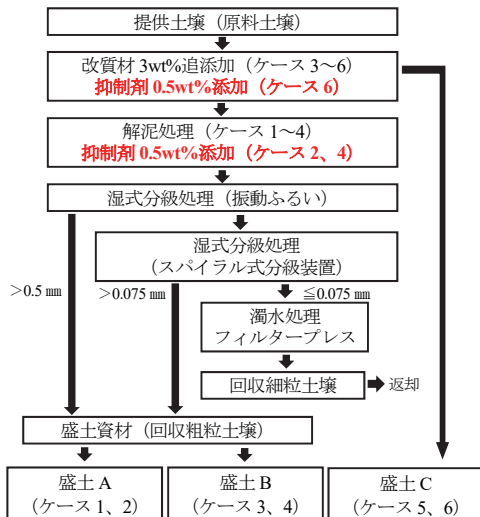


図-1 盛土作成フロー

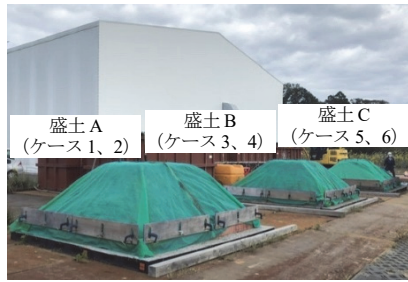


写真-1 構築した盛土

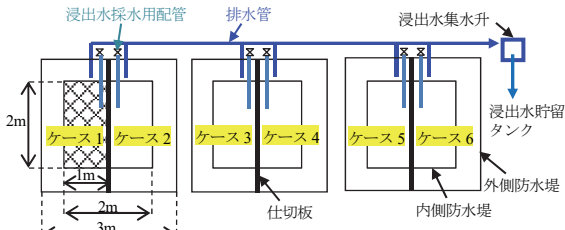


図-4 浸出水排水経路模式図

3. 提供土壌

試験に使用した土壌は、中間貯蔵施設内における異物除去の際に 2wt%程度の改質材が添加された除去土壌であり、提供土壌と称する。ただし、同材に含まれるSAPの配合率については不明である。提供土壌の性状を表-2に、粒度分布を図-5に示す。なお、提供土壌は、ダンプトラック数台に分けて搬入され、下記に示す性状・粒度分布は、そのうち代表試料1検体の測定結果である。

表-2 提供土壌の性状

項目	物性
地盤材料の分類名	細粒分質礫質砂
自然含水率	23.4%
放射性セシウム濃度	2,375Bq/kg

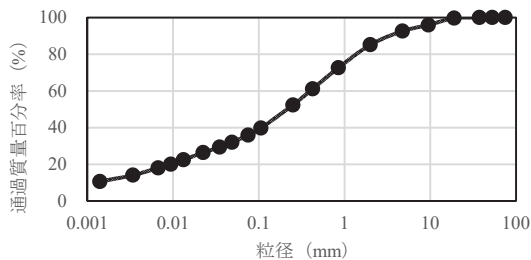


図-5 提供土壌の粒度分布

4. SAPを含む改質材と膨潤抑制剤

本試験では、SAPを含む3種類の改質材(写真-2)の中から、「実証規模以上の使用量に対して調達が可能であること」及び「過去に中間貯蔵事業における実証事業等で評価されていること」を考慮して、シリカ系材料を主材とした市販品の改質材C(以下、改質材)を選定した。また、抑制剤は、4種類(写真-3)の中から、改質材に対し膨潤抑制効果を有し、再生利用土壌への影響がより少ないと考えられる硫酸第一鉄・七水和物(以下、FeSO₄)を採用した。

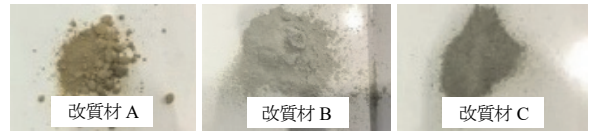


写真-2 改質材

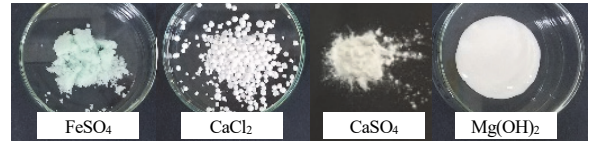


写真-3 膨潤抑制剤

5. 盛土のモニタリング

5.1 モニタリング項目・実施頻度

モニタリング項目を表-3に示す。各項目の実施頻度は下記の通りである。

- i. 原位置測定：月1回 計12回
- ii. 土質試験：盛土構築時と解体時 計2回
- iii. 浸出水の水質分析：月1回 計12回

表-3 モニタリング項目

名称	試験名	試験方法
原位置測定	原位置コーン貫入試験	JGS1431
	盛土沈下量	JGS1712
土質試験	コーン指数試験	JISA1228
	一軸圧縮試験	JISA121
	一面せん断試験	JISA121
	締固め試験	JISA1210
	含水比試験	JISA1203/JGS0122
浸出水の水質分析	電気伝導度	JIS-K-0102.13
	pH	JIS-K-0102.12.1
	強熱減量	JIS-K-0102.14.5
	溶解性鉄	JIS-K-0102.57.4
	硫酸イオン	JIS-K-0102.41.3
	ナトリウム	JIS-K-0102.48.2
	マンガン	JIS-K-0102.56.4
	TOC	JIS-K-0102.22.1
	放射性セシウム	Ge 半導体検出器
浸出水採水量	採取量計測	

5.2 モニタリング方法

表-3で示したモニタリングの各項目のうち、沈下量については、盛土天端に設置した沈下板2箇所の変化量を計測した。土質試験は、盛土構築時と解体時に実施し、浸出水に関しては、各盛土に敷設した採水用配管からの浸出水採水量の計量と水質分析を実施した。また、夏季については植生状況も観察した。

6. 盛土のモニタリング結果

6.1 原位置測定

a. 原位置コーン貫入試験

原位置コーン貫入試験の結果を図-6に示す。原位置コーン貫入試験は、各ケースの盛土天端で解体時に実施し、いずれも抑制剤を添加したケース2、4、6の方が、抑制剤添加なしのケース1、3、5に比べ、それぞれ高い値(14~36%)が得られた。この結果から、抑制剤の添加がコーン貫入抵抗値の増大に繋がったと考えられる。

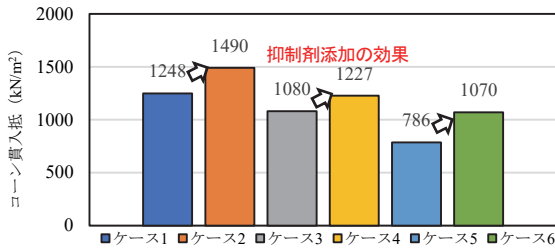


図-6 原位置コーン貫入試験の結果

b. 盛土沈下量

盛土沈下量の結果を図-7に示す。回収粗粒土壌（盛土 A、B）に対して、細粒土壌を含む湿式分級処理をしていない土壌（盛土 C）が大きく沈下した。これは土質の違いによるものと、盛土Cの構築時の含水率（ケース 5：42.0%、ケース 6：43.7%）が、ケース1~4の含水率（17.0%~20.1%）に比べ高かったことによるものと考えられる。一方、比較対象のケース1と2、ケース3と4、及びケース5と6については、抑制剤添加なしのケース（ケース1、3、5）に比べ、抑制剤添加ケース（ケース2、4、6）の方が沈下量は小さい結果となった。これらの結果から、SAPを含む改質材含有土壌に抑制剤を添加することで盛土等の沈下を抑制できることが確認できた。

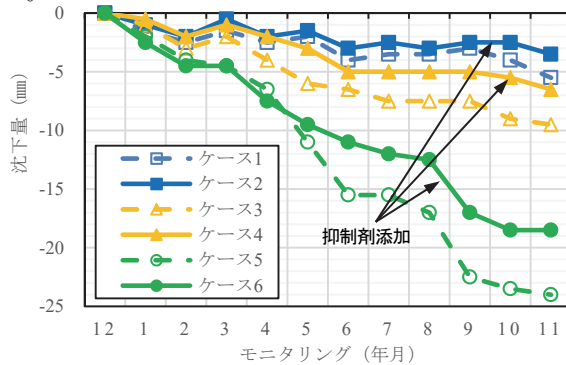


図-7 盛土沈下量の結果

6.2 土質試験

a. 結果概要

表-4 土質試験項目と結果の概要

盛土名		A		B		C	
ケース番号		1	2	3	4	5	6
改質材 3wt%追加		なし		あり			
抑制剤 0.5wt%添加		なし	あり	なし	あり	なし	あり
湿式分級処理		あり					
コーン指数 (kN/m²)	盛土撤去時不攪乱試料	抑制剤を添加したケースで増加した(+4%)		抑制剤を添加したケースで低下した(-2%)		抑制剤を添加したケースで増加した(+35%)	
	盛土撤去時不攪乱試料	ケース 1,5 では試料採取できなかった。ケース 3, 4 の比較ではケース 4 が大きな値 (9%) を示した					
一面せん断試験せん断応力 τ (kN/m²)	盛土撤去時不攪乱試料	高い値であった (229~365)				低い値であった (88, 84)	
	盛土撤去時不攪乱試料	抑制剤を添加したケースで低下した (-12%)	抑制剤を添加したケースで低下した (-12%)	抑制剤を添加したケースで増加した (+43%)	抑制剤を添加したケースで増加した (+43%)	抑制剤を添加したケースで低下した (-55%)	抑制剤を添加したケースで低下した (-55%)
締固め試験	盛土撤去時最適含水比 (%)	抑制剤を添加したケース (2, 4, 6) が若干大きな値 (3~8%) を示した					
	盛土撤去時最大乾燥密度 (g/cm³)	湿式分級処理した土壌 (粗粒分) は 1.635~1.731、分級していない土壌は 1.012, 1.004 となった。抑制剤の添加による差異はなかった					
含水比試験	含水率で表記 (%)	湿式分級処理した土壌 (粗粒分) に比べ、分級していない土壌は高い値を示したが、抑制剤の添加による差異はなかった					

実施した土質試験項目とその結果の概要を表-4に示す。なお、表中のコメントは、比較対象のケース1と2、ケース3と4、及びケース5と6を中心に記載した。

b. コーン指数試験

盛土天端から深さ約 60cm の位置で採取した不攪乱試料によるコーン指数試験の結果を図-8に示す。盛土 A（ケース 1、2）及び盛土 B（ケース 3、4）では、ほとんど差は生じなかった。盛土 C（ケース 5、6）では、抑制剤を添加したケース 6 が 35%高い値を示した。この要因として、盛土 C は、元々盛土構築時の含水率が盛土 A、B と比べて高かったことから、抑制剤の効果が顕著に現れた結果と推察される。

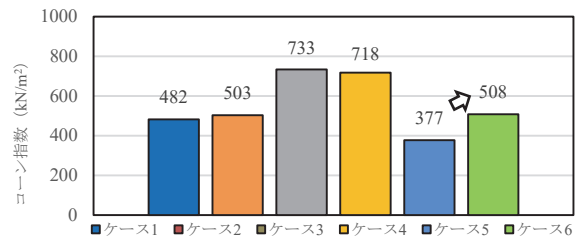


図-8 コーン指数試験の結果

c. 一面せん断試験

一面せん断試験の結果を図-9に示す。せん断応力は、測定値より、垂直応力を 200kN/m² として算出したものである。その結果、盛土 B（ケース 3、4）において、抑制剤添加ケース 4の方が未添加のケース 3と比べ約 11%（229→258kN/m²）高い値を示したことから、抑制剤の添加によりせん断応力が向上したと推察される。一方、改質材を追添加していない盛土 A（ケース 1、2）では、抑制剤を添加することでせん断応力が低下（365→323kN/m²）していることから、SAP と結合しなかった過剰な抑制剤は、せん断応力を低下させる可能性が示唆された。

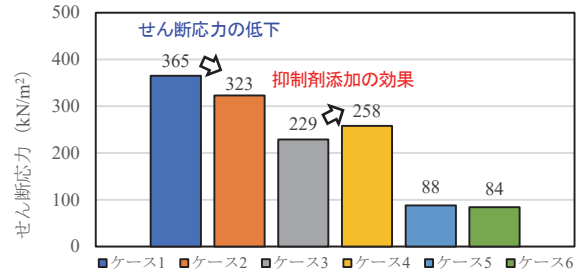


図-9 一面せん断試験の結果

d. 含水比試験

盛土構築時と盛土解体時における含水率の結果を図-10に示す。湿式分級処理した土壌（粗粒分）ケース1~4に比べ、湿式分級処理していない土壌ケース5~6の含水率の方が高い値を示したが、抑制剤の添加による差異はなかった。また、盛土解体時の含水率は、全てのケースについて盛土構築時と比べ 2.5~8.2 ポイントの水分脱水が生じる結果となった。この含水率の低下は、試験開始時に比較的高い含水状態で盛土を構築したこと、及び1年間の乾湿の繰り返しで土壌中の SAP の保水能力が低

下りしたことによるものと考えられる。盛土構築時に高含水率の土壌を用いざるを得なかった背景としては、工程及びテント施設内空間の制約もあり、湿式分級処理後の土壌に対してわずかな脱水処理しか出来なかったという事情も影響している。

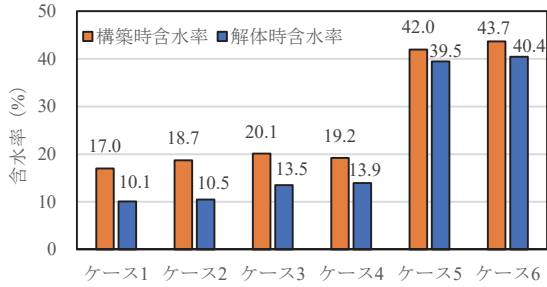


図-10 含水比試験の結果

6.3 浸出水の水質分析

a. 結果概要

浸出水の水質分析結果を表-5に示す。なお、表中のコメントは、比較対象のケース1と2、ケース3と4、及びケース5と6を中心に記載した。これら浸出水の水質分析の結果から、抑制剤添加による周辺環境への悪影響は低いと評価できる。

表-5 浸出水の水質分析

盛土名	A		B		C	
ケース番号	1	2	3	4	5	6
改質材3wt%追加	なし		あり			
抑制剤0.5wt%追加	なし	あり	なし	あり	なし	あり
湿式分級処理	あり				なし	
電気伝導度	ケース2の方が高い傾向		ケース4の方が高い傾向		4月と7月の結果において、ケース6の方が高い傾向	
pH	ケース2の1検体を除き、ケース2の方が若干低い傾向		ケース4の方が若干低い傾向		4月と7月の結果において、ケース6の方が若干高い	
強熱減量	ケース2の方が高い傾向		1月と4月は、ケース3の方が高い値、7月はケース4の方が高い値		ケース6必要量がとの比較1度も確保出来ず	
溶解性鉄	ケース2において、盛土構築後1ヶ月後までは排水基準超過、以降は排水基準以下		ケース4において、盛土構築後1ヶ月後までは検出されていたが、以降は不検出		ケース5の1月に検出されたが、排水基準以下	
硫酸イオン	ケース2の方が高い傾向		ケース4の方が高い傾向		ケース6の方が7月の結果において、高い傾向	
ナトリウム	ケース2の方が高い傾向		ケース4の方が1月と7月において、高い傾向		ケース6の方が4月の結果において、高い傾向	
マンガン	いずれの月も排水基準以下					
TOC	ケース1の方が高い場合が5回、ケース2の方が高い場合が4回と両ケースに顕著な違いは認められない		浸出水採水量の少なかったケース3の1月(0.1L)及び6月(0.05L)において、約40mg/Lと比較的高い数値		ケース6必要量がとの比較1度も確保出来ず	
放射性セシウム	全ての試料において不検出					
浸出水採水量	40.47L	73.46L	4.95L	64.0L	21.7L	1.1L

b. pH

pHは、各ケース7.2~8.7の範囲であった。ケース2の1検体のみ8.7を示し、排水基準(pH:5.8-8.6)を満

たさなかったものの、添加した抑制剤は酸性であり、その添加によるpHの低下は確認されなかったことから、pH低下の要因となる可能性は低いと考える。

c. 溶解性鉄

盛土構築から1ヶ月後までは盛土Aの抑制剤添加ケース2で溶解性鉄が排水基準を超過した。これは抑制剤に見合うSAP量がなく、過剰に抑制剤を添加したことが要因であると推察される。この点から、湿式分級処理した回収粗粒土壌の埋戻し直後に土壌に付着した鉄を含む洗浄水が流出する可能性があることは留意点の一つと考える。ただし、一旦低下した鉄の濃度が再び上昇することは確認されておらず、長期的に鉄の流出が続く可能性は低いと推察される。

d. 硫酸イオン

硫酸イオンは、抑制剤を添加した各ケースで高い値が確認された。盛土構築直後のケース2では、最高1300mg/Lで検出されているものの、海水の硫酸イオン濃度が約2600mg/L⁸⁾であることから、周辺環境への悪影響は低いと考える。

e. マンガン

福島県内の土壌には鉄やマンガンが含まれることがあるとの知見から、マンガンはモニタリングの対象としている。実際、マンガンは盛土構築直後にケース2及び4で若干高い濃度で検出されたが、全ての試料で排水基準(溶解性マンガン:10mg/l以下)以下あるいは不検出であった。このことから、抑制剤添加により土壌中のマンガンの溶出が促進される可能性は低いといえる。

f. 放射性セシウム

放射性セシウムは、全ての試料において不検出であったことから、湿式分級処理や抑制剤添加により放射性物質の流出が促進されることはないと考えられる。

g. 浸出水採水量

浸出水採水量を図-11に示す。浸出水採水量は、月1回の水質分析の際に、浸出水採水用配管から浸出水を採水し計量した累積値であり、発生浸出水の全量ではない。なお、盛土C(ケース5、6)に関しては、保護マットで覆ったことで雨水が浸透しづらかったため検討の対象外とする。ケース1~4においては、抑制剤添加ケース(ケース2、4)の方が、浸出水採水量が多い結果となった。比較対象のケース1と2、並びにケース3と4では、細粒分混入率はAとBの差異はほとんどなく(ケース1~4でそれぞれ13%、14%、16.9%及び16.9%;前述の表-1より)、抑制剤添加ケース(ケース2、4)の浸出水採水量が多いことから、抑制剤添加によりSAPの保水能力が低減され、浸出水採水量の増大に繋がったと考えられる。また、盛土Bは、盛土Aと比べ細粒分混入率が若干高いことに加え、改質材を追加している。そのため、ケース3はSAPの吸水により浸出水採水量がさらに少なく、ケース4は抑制剤に

よって SAP の吸水機能が抑制され、盛土中の余剰水が下方流下し易くなった可能性が考えられる。すなわち、抑制剤の添加によって、雨水等の浸透性が向上し、浸出水量が増大したことが推定される。また、抑制剤の添加の有無により、土壌周囲の水分の保持形態（自由水と非自由水）が変化している可能性等も推察される。

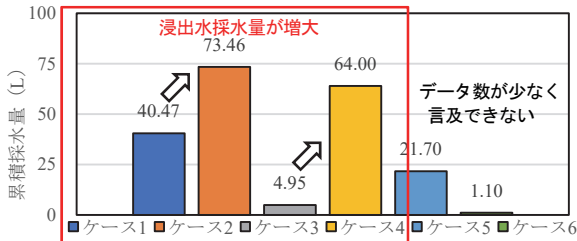


図-11 浸出水採水量

6.4 植生状況

浸透水への影響を考慮し、盛土表面の植生の刈り取りを実証試験期間中に3回行い、概略の植生量を測定した。例として、2020年9月10日（盛土構築後約10ヶ月）の刈り取り量は、ケース1～4でそれぞれ3.5kg、3.7kg、3.3kg、及び2.8kgである。盛土の位置関係や日当たりの差があるため、定量的な評価をすることはできないが、写真-4に示すように、抑制剤を添加したケース2及び4でも植生の繁茂が観察されている。加えて、前述の浸出水の水質分析においても抑制剤添加による環境への悪影響は低い結果が得られたことから、これらの添加材による植生環境への影響は生じていない結果といえる。なお、ケース5及び6については、細粒分が多い土壌であったため、飛散防止のために保護マットで盛土全面を被覆していたこともあり、盛土表面の植生自体が観察されていない。



写真-4 盛土南面の植生（2020年9月10日）

7. まとめ

回収粗粒土壌を盛土資材として SAP を含む可能性のある土壌や SAP を追添加した土壌の特性と、それに抑制剤を適用した時の効果と土質特性の変化及び抑制剤添加に係る環境への影響評価を行った。その結果を以下にまとめる。

- i. 土壌中の SAP の膨潤性が認められる場合、抑制剤の添加はコーン貫入抵抗値や沈下抑制など、土質特性の向上に寄与する
- ii. 土壌中の SAP 量に見合う適正な抑制剤の添加量であれば、周辺環境や人の健康に悪影響を及ぼさ

ない

- iii. 抑制剤を適用した盛土では雨水等の浸透性が向上する

以上の結果から、湿式分級処理を経て回収された粗粒土壌について、SAP の存在は土質特性に著しい影響を及ぼすものではないが、沈下量等を増大させる可能性があること、またそれに抑制剤を添加することで沈下量を抑制する効果が期待できること等を明らかにした。しかしながら、SAP による浸透水挙動への影響や抑制剤の効果等については十分な検討をすることが出来ておらず、今後の課題としてさらに検討を進めていく。

【謝辞】

本研究の遂行、及び実証事業推進に際して、環境省、JESCO の関係者各位ならびに国立研究開発法人国立環境研究所廃棄物・資源循環研究室の遠藤和人室長に指導を頂いた。ここに記して感謝の意を表す。

【参考文献】

- 1) 環境省、「減容・再生利用技術実証の現状と今後の予定一大熊分級技術実証事業一」、中間貯蔵除去土壌等の減容・再生利用技術開発戦略検討会（第11回）、2019
- 2) 伊藤健一、「放射性 Cs の土壌粒度別分布傾向と分級による減容化への取り組み」、粘土科学、Vol.54、No.1、pp.36-42、2015
- 3) 東 貴宏、宮田貴光、星野由雅、森下浩史、「新素材・高吸水性ポリマーを用いた授業実践」、教育実践総合センター紀要、No.10、pp.205-210、2011
- 4) 株式会社奥村組、「平成31年度除去土壌等の減容等技術実証事業（その7）膨潤抑制剤添加処理により除去土壌の再生利用を効率化する技術報告書」、<http://www.jesconet.co.jp/interim/information/josenjishso.html>
- 5) 株式会社奥村組、「令和2年度除去土壌等の減容等技術実証事業（その3）膨潤抑制剤添加処理により除去土壌の再生利用を効率化する技術報告書」、<http://www.jesconet.co.jp/interim/information/josenjishso.html>
- 6) 清水祐也、今井亮介、小西正郎、山田正彦、「膨潤抑制剤を利用した除去土壌の再生資材化技術に関する基礎研究」、奥村組技術研究年報、No.46、pp.103-108、2020
- 7) 高橋正通、柴崎一樹、仲摩栄一郎、石塚森吉、太田誠一、「高吸水性高分子樹脂を添加した土壌の物理・化学・生物特性」、公益財団法人国際緑化推進センター、森林立地62(1)、51～59、pp.4-5、2020
- 8) 国土交通省、水文水質データベース、7.地質環境その他項目、<http://www1.river.go.jp/100308.html>

有機物混入土壌の再生利用に関する基礎的研究

Fundamental Study on Recycling Soil Containing Organic Matter

今井亮介* 羽瀨博臣* 清水祐也*

要旨

中間貯蔵施設に貯蔵される除染で発生した土壌（以下、除去土壌）や、近年多発する豪雨等で発生する災害発生土砂は異物を取り除いて再生利用することが求められている。しかし、これら除去土壌や災害発生土砂には草木等が含まれていることが多く、さらに除去土壌には高吸水性樹脂を含む土壌改質材が加えられる場合がある。このような草木や高吸水性樹脂等の異物（総称して有機物）が混入した土壌は、時間の経過とともにその土質特性がどのように変化するか、環境にどのような影響を及ぼすかについて不明な点が多い。

そこで、有機物混入土壌を盛土資材等として効率的に再生利用するために、有機物の長期的変化や有機物混入土壌の土質特性の変化を検証することを目的に複数の試験と分析を行った。その結果、有機物の暴露試験では、その長期的な変化を捉える指標として化学的酸素要求量（COD）やIR分析が活用できる可能性があること、有機物混入土壌の盛土試験では、土壌中の有機物量は時間の経過とともに減少し、盛土の沈下や、土壌の力学特性に影響を与える等の知見が得られたので報告する。

キーワード：有機物、高吸水性樹脂、盛土、土質特性

1. まえがき

2011年3月11日の東日本大震災に伴う福島第一原発事故から10年が経過し、放射性物質汚染からの回復を目指した除染事業が進められている。除染作業で発生した土壌は、分別等処理施設において異物除去が行われており、そこでは土壌改質材が使用されることが多い。この改質材には、高吸水性樹脂（ポリアクリル酸ナトリウム、以下、SAP：Super Absorbent Polymer）という有機物を含むものがある¹⁾²⁾。このSAPは水と接触すると体積が数百倍に及ぶ吸水膨潤性があるため、SAPを含んだ土壌を再生資材として利用した場合、土質特性に影響を及ぼすおそれがある。

また、令和2年7月豪雨等の豪雨災害が近年多発している。これら豪雨災害では、草木等を多く含んだ土砂が多量に発生する。このような土砂については振動ふるいや比重選別機等を用いて草木の除去が行われるが、細かいものは除去されず残留する。これら土砂に含まれる草木は時間経過とともに腐食が進むため、再生資材として利用した場合、土質特性に影響を及ぼすおそれがある。

SAPや草木といった有機物が混入した土壌（以下、有機物混入土壌）を再生資材として利用するには、その有機物に応じた土質特性や、利用した場合の影響を把握しておく必要がある。

そこで本研究では、有機物混入土壌を再生資材として

効率的に利用するために、有機物の特性及び有機物混入土壌の土質特性の長期的変化を検証することを目的として「稲わら等の有機物の暴露試験」と「稲わらやSAPを混合した有機物混入土壌の盛土試験」を行った。これらの試験内容と試験から得られた知見を報告する。なお、暴露試験は2018年11月より行っており、2019年度の奥村組技術研究年報 No.45にて、中間報告をしている³⁾。本報では、中間報告以降の変化について報告する。

2. 稲わら等の有機物の暴露試験

2.1 試験概要

有機物は、小動物や微生物等の分解者によって溶脱や細片化、異化等の作用により分解される。また、紫外線によりその性状が変化する。本研究では、有機物の経時変化に伴い、有機物の特性がどのように変化するか検証することを目的として、4種類の有機物試料を屋外に置き、2つの条件（雨の影響の有無、以下、「雨あり」、「雨なし」）のもと暴露試験を行った（写真-1）。なお、「雨なし」の試験体は5mmの透明アクリル板で屋根を設けたため、紫外線の照射量は「雨あり」の10~20%前後と想定される。

試験期間：2018年11月～2020年11月（2年間）

試験場所：茨城県つくば市

* 土木本部土木部環境技術室

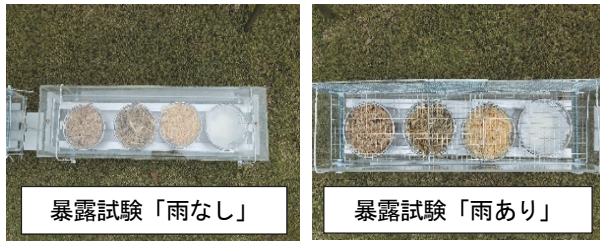


写真-1 暴露試験

2.2 使用材料

有機物として、ひのき、稲わら、広葉樹及びSAPを対象として試験を行った。使用材料の諸元を表-1に、使用した有機物試料を写真-2に示す。

表-1 使用材料の諸元

ひのきチップ	
製品目	ひのきのふかふかマット
稲わら	
製品目	敷きわら
広葉樹チップ	
製品目	広葉樹おがくず
SAP	
製品目	サンフレッシュ ST-500D
製作会社	SDP グローバル株式会社
成分	アクリル酸重合体部分ナトリウム塩架橋物 97%
形状	粉末状
色	白色
臭い	ほとんど無臭
pH	6.1 (製品の0.5%生理食塩水分散液)

2.3 試験結果

a. 有機物の変化

各試料の状況を写真-2に、湿潤質量及び含水率を表-2に示す。

これらから分かるように、ひのき、稲わらおよび広葉樹については、「雨なし」試料は茶色に変化し、湿潤質量は12~21%減少した。「雨あり」試料は灰色に変化し、かつ、試料片も小さくなったことが確認できた。また、湿潤質量は29~61%減少した。土壌と混合した稲わらが30日で質量が50%以上低減した実験報告⁹⁾もあることから、有機物が分解され、雨風の影響により流出し、さらに雨や紫外線の影響でその挙動がより進行したと推察される。一方、含水率をみると、ひのきと稲わらは全ての試料で10~15%程度減少しているのに対し、広葉樹は「雨なし」試料で1.8%増、「雨あり」試料で3.5%減となり、保水状態に違いが生じた。

SAPについては、「雨なし」試料の湿潤質量は6%(50g→53g)増加した。その要因は、吸湿によるものと考えられ、SAP表面は紫外線等の影響から茶色に変色しているものの、内部は白色の状態が観察されたことや含水率の増加(9.6%→10.9%)から、SAPの保水能力が維持されていると考えられる。一方、「雨あり」試料で

は、SAP下に敷いたガーゼのみが残りSAPの存在がほとんど確認出来ない状態となった。これは、風雨や乾燥によってSAPが流出したことが原因と考えられる。



写真-2 有機物試料

表-2 有機物の変化

No	降雨条件	摘要	初期状態 (2018/11/18)			最終状態 (2020/11/11)		
			目視形態	質量 ^{※1} (g)	含水率 (%)	目視形態	質量 ^{※1} (g)	含水率 (%)
1	雨なし	ひのき	木肌色	14	19.6	濃茶色	11	3.0
2		稲わら	濃茶色	18	12.0	茶色	15	3.2
3		広葉樹	茶色	65	12.2	茶色	57	14.0
4		SAP	白色	50	9.6	茶色	53	10.9
5	雨あり	ひのき	木肌色	14	19.6	※2	10	3.6
6		稲わら	濃茶色	18	12.0	灰色	7	3.1
7		広葉樹	茶色	65	12.2	灰色	45	8.7
8		SAP	白色	50	9.6	※3		

※1: 湿潤質量

※2: 表面付近は灰黒色で下層は木肌呈す

※3: ガーゼのみでSAPの存在が確認できなかったため測定不可

b. 劣化指標としての可能性

本検討では、有機物の分解等の長期的変化を「劣化」と呼ぶこととした。この劣化の状態を汎用的な分析方法で定量的に評価する指標(以下、劣化指標)の提案を目指し、2018年度³⁾から検討を行ってきた。劣化指標の候補として選定した項目とその可能性評価を表-3に示す。

検討の結果、化学的酸素要求量(COD)は、全ての有機物試料で、初期状態に比べて暴露した試料の測定値が増加する結果が得られたことから、劣化指標として活用できる可能性があるとして評価した(図-1)。

表-3 劣化指標としての可能性評価

項目	2018年度測定			暴露試験後 2020年度測定		評価	
	初期状態	劣化促進 ^{*1}		雨なし	雨あり		
ひのき	TOC (g/kg)	12	16	△	42	6	×
	BOD (g/kg)	18	22	△	39	14	×
	COD (g/kg)	114	536	○	1100	813	○
	強熱減量(%)	100	100	×	96	90	×
稲わら	TOC (g/kg)	23	29	△	28	10	×
	BOD (g/kg)	80	26	△	63	18	△
	COD (g/kg)	552	876	○	844	981	○
	強熱減量(%)	88	86	×	85	73	×
広葉樹	TOC (g/kg)	4	16	△	10	5	×
	BOD (g/kg)	3	29	△	18	8	△
	COD (g/kg)	176	555	○	395	721	○
	強熱減量(%)	99	83	×	97	96	×
SAP	TOC (g/kg)	17	102	△	70		×
	BOD (g/kg)	0	0	△	4		×
	COD (g/kg)	53	177	○	690		○
	強熱減量(%)	58	59	×	58		×

^{*1}: 2018年度実施の高温高压試験の測定値³⁾。記号(○、△、×)は、劣化指標としてなり得るかの可能性を2018年度に評価したものである。
^{*2}: SAPの存在がほとんど確認できず測定不可。

生物化学的酸素要求量(BOD)は、種類により異なる結果が得られたことから、対象とする有機物を選択することで活用できる可能性があると評価した(図-2)。

一方、全有機体炭素(TOC)の測定値は一定の傾向が得られなかったため、また、強熱減量の測定値は変化が小さいため、指標としての適用性は低いと評価した。

次に、汎用的な分析方法である赤外分光分析(IR分析)を用いてIRスペクトルから劣化状態を観察した(図-3)。赤外分光法は、物質に赤外光を照射し、透過または反射光を測定することで試料の構造解析や定量を行う分析手法である。本分析はKBr法(固体の測定)にて行っており、供試体の厚さによりスペクトル全体の透過度が異なるため、透過度のスペクトル形状について相対的な比較検討を行った。

図-3に示すIRスペクトルからは、有機物の分子構造中のO-H(水酸基)やC=O(カルボニル基)、C-Oの特徴的なスペクトルの出現を確認した。

ひのきと広葉樹のIRスペクトルでは、O-HとC-Oの相対的なピークの高さに着目すると、初期状態に比べて暴露後のスペクトルはC-Oが減少し、O-Hが増加していることが読み取れる。このことは植物中のセルロースやリグニンに含まれるC-O-C(エーテル)が分解され、O-Hが生成される現象をとらえている可能性が高い。

SAPのIRスペクトルでは、初期状態に比べて「雨なし」試料は、C=Oのピークが減少し、また1500~1700cm⁻¹にかけてピークの形状の変化(図-3中の青丸部)が観察された。この変化はSAPの劣化による変化をとらえている可能性が高い。また、O-Hのピークの増加は吸湿によると推察している。「雨あり」試料は風雨等により流出した可能性が高いため検証は行わなかった。

これらの分析結果から、IR分析により植物やSAPの分解等の変化を評価できる可能性が示唆された。詳細の

検討は今後の課題と考える。

なお、CODの測定値では、2018年度に劣化の促進試験としての適用性を検討した高温高压(200°C、1.0Mpa、160分)で処理した供試体も増加結果が得られた。このことから、高温高压処理により有機物の劣化が短時間で再現できる可能性があるとして評価した(図-1)。

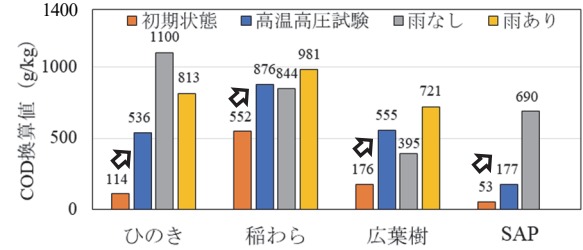


図-1 COD測定結果

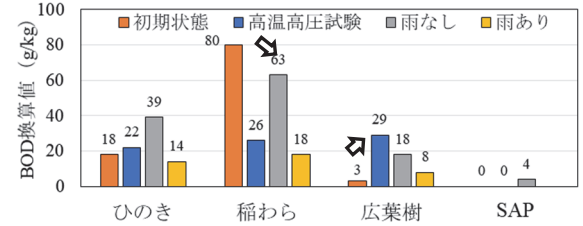


図-2 BOD測定結果

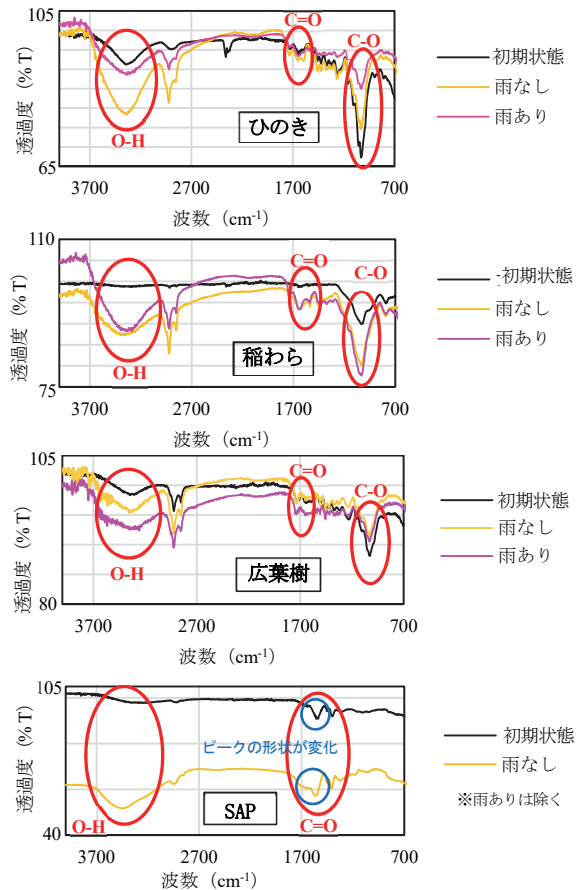


図-3 IR分析結果

3. 有機物混入土壌の盛土試験

3.1 試験概要

土壌中の有機物の長期的な変化や土質特性、力学特性

への影響を検証することを目的に、SAPを含む改質材と稲わらを混合した土壌にて盛土を構築し、盛土試験を行った(写真-3)。盛土試験では、沈下量測定や原位置コーン貫入試験等の土質試験により検証を行った。

試験期間：2019年9月～2021年3月(約18ヶ月)
 試験場所：茨城県つくば市

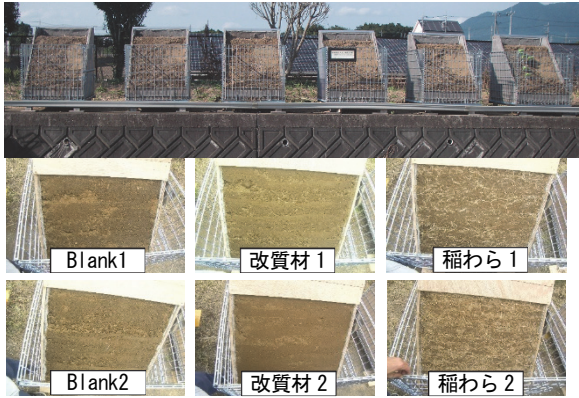


写真-3 盛土構築状況(下段は構築直後の盛土表面)

3.2 使用材料・盛土の諸元

盛土の構築手順を以下に示す。また、使用材料の諸元を表-4に、各盛土の粒度分布を図-4に、構築した盛土の諸元を表-5に示す。

【盛土の構築手順】

- i. 型枠：メッシュパレット、コンパネ、保護シートを用いて土壌充填容積417.8Lの型枠を6個用意
- ii. 土壌：10cm スケルトンバケットを用いて異物を除去
- iii. 混練：二軸ミキサーで約60kgごとに5分間混練し、均質化及び添加物(改質材、稲わら)と混合
- iv. 土壌充填：3層に分け、締固め後、層厚が1、2層は30cm、3層目は20cmとなるように混練後土壌を投入
- v. 各層の締固め：型枠パイププレートで約2秒間接地面表面を満遍なく1往復
- vi. 締め固め度：各層の仕上がり面を対象にプロクター貫入で貫入量を測定評価

表-4 使用材料の諸元

土壌	建設発生土 礫まじり砂質細粒土、または砂礫質細粒土 自然含水比43.3%
添加物	改質材 珪酸塩鉱物系中性土壌改質材 アクリル酸ナトリウム(SAP)系高分子結合剤を0~10%含む
	稲わら 約5cmに切断して使用

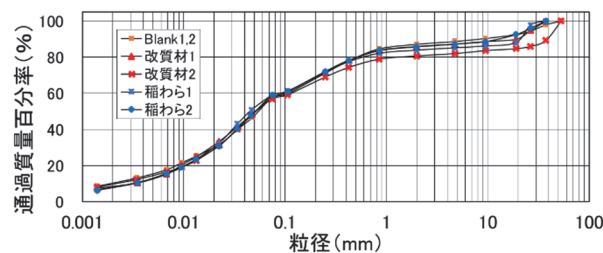


図-4 各盛土の粒度分布

表-5 構築した盛土の諸元

盛土名	Blank1	Blank2	改質材1	改質材2	稲わら1	稲わら2
添加物	なし	なし	改質材* 3wt%	改質材* 6wt%	稲わら 1wt%	稲わら 2wt%
高さ(m)	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
充填土壌質量(kg)	474.2	497.1	479.4	479.9	449.9	366.2
盛土体積(L)	417.8L	417.8L	417.8L	417.8L	417.8L	417.8L
湿潤密度(t/m³)	1.13	1.19	1.15	1.15	1.08	0.88
含水比(%)	43.3	43.3	38.1	35.5	38.9	36.6
土質区分	礫まじり 砂質細粒土	礫まじり 砂質細粒土	砂礫質 細粒土	砂礫質 細粒土	砂礫質 細粒土	礫まじり 砂質細粒土

※改質材質量の数%のSAPを含む

- vii. 沈下量測定：各型枠の盛土表面3箇所にて沈下量測定用平板を設置し、法面保護板を外して沈下測定

3.3 試験結果

a. 盛土沈下量

盛土の沈下量測定結果を図-5に示す。

盛土の507日経過後の沈下量は、稲わら2(2wt%添加)の6.4mmが最も大きく、次いで、改質材2(6wt%添加、改質材質量の数%のSAPを含む)の4.3mmとなった。その他の盛土は、稲わら1(1wt%添加)2.0mm、Blank1(添加なし)1.8mm、Blank2(添加なし)1.0mm、改質材1(3wt%添加、改質材質量の数%のSAPを含む)0.7mmと小さな値を示し、土壌中の有機物の混入量が多いほど沈下量が大きくなる結果が得られた。このことから、土壌中の有機物の分解等による体積変化(縮減)が盛土の沈下に影響を与える可能性が高いと推察される。

なお、改質材2は盛土構築後230日あたりまで隆起し、その後、沈下が進行する測定結果が得られた。盛土の隆起はSAPの吸水膨潤の影響と推測される。一方、SAPは乾湿の繰り返しにより保水機能が低下することが報告されている⁹⁾。また、膨潤したSAPは塩化カルシウム等の多価陽イオンに反応すると、膨張が抑制され取り込んだ水分を放出する性質から、土壌中の陽イオンの吸着によりその機能が低下した可能性がある。これらの要因によって、土壌中のSAPの保水機能が徐々に低下し、膨潤したSAPの体積が縮減したため、一旦隆起した盛土がその後沈下したと推測される。

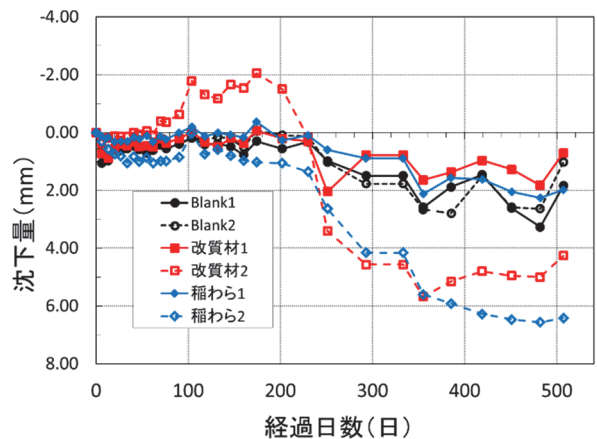


図-5 盛土の沈下量測定結果

b. 土質特性

盛土の構築時と 18 ヶ月経過後の解体時に実施した土質試験の結果概要を表-6 に、試験結果を図-6 に示す(一部の試験で中間期 9 ヶ月経過後の測定結果を含む)。

表-6 土質試験の結果概要

試料名・試験名	試験名	試験法	構築時の測定値に対する解体時の数値の比率
攪乱試料	強熱減量	JGS 0221	79~90%に低下
	最大乾燥密度	JGS 0711	101~109%に増加
	最適含水比	JGS 0711	90~100%に低下
	コーン指数	JGS 0716	113~312%に増加
	自然含水比	JGS 0711	71~98%に低下
原位置試験	コーン貫入抵抗 ^{※1}	JGS 1431	55~91%に低下
不攪乱試料	一軸圧縮強度	JGS 0511	14~21%に低下

※1: 試料表面から 5~70cm までの平均値

強熱減量は、すべてのケースで構築時に比べて解体時の測定値が減少する結果が得られた。このことより、時間の経過とともに土壌中の有機物が分解されて減少した可能性が高いと考える。しかしながら、有機物を添加しないケース (Blank1, 2) の強熱減量が 13%と高い値(有機物を多く含む)だったため、今回の試験で添加した有機物(最大で稲わら 2%)の変化の検証には至らなかった。

最大乾燥密度は、すべてのケースで若干の増加を、最適含水比は若干の減少を示した。土壌中の有機物の減少により、相対的に土粒子量が増加したため、このような結果が得られたと推察できる。

コーン指数は、すべてのケースで測定値が増加する結果が得られた。このことより、土壌中の有機物が減少するとコーン指数が改善される可能性があることが示唆される。しかしながら、その増加量は有機物を添加しないケース (Blank1, 2) の方が大きくなる結果であったことから、もともと土壌に含まれていた有機物が試験で加えた有機物に比べて、より分解が進行したとも考察できるが、詳細については検証するには至らなかった。

自然含水比はすべてのケースで、構築時より解体時の測定値が減少する結果が得られた。また、SAPや稲わらを添加したケースの方が減少量が小さくなる傾向があった。このことから、土中の SAP のみならず稲わらが水分を保持しているとも考察できる。しかし、解体時に Blank1、改質材 1 及び改質材 2 の土壌を採取し、ふるいを用いて SAP の膨潤性を確認したところ、膨潤は確認できなかったことから、盛土の解体時には SAP の保水機能は低下している可能性が高いことも考えられる。

一方、原位置でのコーン貫入抵抗試験では、構築後に一旦測定値が上昇し、解体時に大きく減少した。また、一軸圧縮強度試験(不攪乱試料)では、解体後に強度が低下する結果となった。これらの測定値は、時間の経過とともに土壌中の有機物が減少して土質(土壌の資材としての品質)が向上していると推測される他の測定結果と相反するものであった。盛土の自然含水比が構築時は

最適含水比に近かったが解体時には減少していた可能性や、不攪乱試料のサンプル採取時に供試体が損傷したことが、その原因の一つとも考えられるが、詳細の検証には至らなかった。

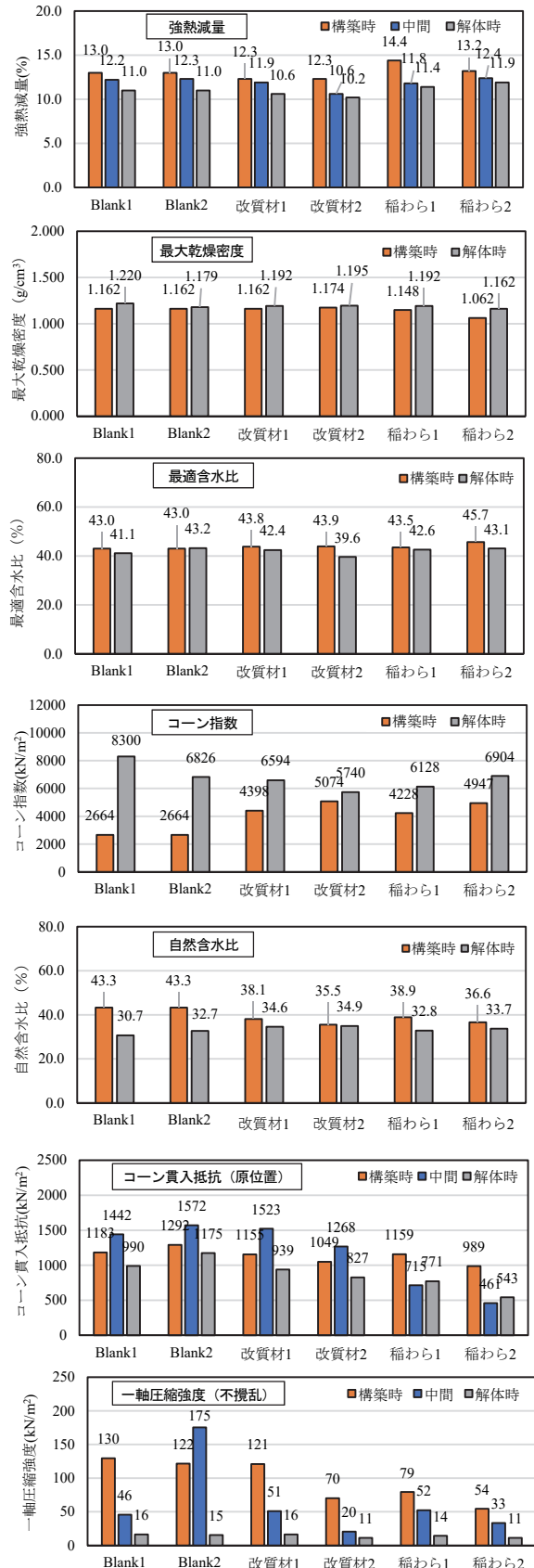


図-6 土質試験の結果

c. SAP の測定方法の検討

SAP は、水を取り込み体積が数百倍に膨張する吸水能力があるため、浚渫工事、大雨による土砂災害の軟弱な土砂の運び出し等での使用が想定されるが、SAP を含む改質材が過剰に添加された場合は、土質特性に影響を及ぼす懸念がある。しかし、土壌中の SAP の質量や体積の測定方法は現状では確立していない。そこで、SAP を溶解して溶液中の濃度測定を試みた。

まず、測定する前段階として、検液を作成するために 5 種類の有機溶媒での SAP の溶解試験を行った。溶媒にはジメチルホルムアミド、ジメチルスルホキシド、テトラヒドロフラン、アセトニトリル、アセトンを用いて、各溶媒 10ml に SAP0.10g を加え、3 分間超音波照射したところ、SAP はいずれの有機溶媒にも溶けなかった。

次に pH を変化した水での SAP の溶解試験を行った。水溶液は無色透明で SAP が溶けているようにみえるが、攪拌しても濃淡の差が生じる結果となった。写真-4 に溶解試験の SAP の状態を示す。このような状態の検液ではあるが、紫外可視分光法 (UV-Vis) による測定を行った。測定方法を表-7 に、UV-Vis のスペクトルを図-7 に示す。図-7 に示すように、pH 4, 7, 10, 13 の検液で 210~230nm 付近に緩やかなピークが確認された。

また、pH12 の水酸化ナトリウム水溶液とアンモニア水溶液を溶媒とし、近赤外線分光法 (NIRS) による測定を行った。測定方法を表-7 に、NIRS のスペクトルを図-8 に示す。図-8 に示すように、いずれの水溶液でも 1400~1480nm 付近にピークが確認された。

これらの測定結果より、中性域を含めた水を溶媒とし、検液を UV-Vis や NIRS で測定することにより SAP の検出 (存在の有無) が可能であるとの知見を得ることができた。しかしながら、定量化手法の確立には至っていない。SAP の定量評価方法は、今後の課題と考える。

4. まとめ

有機物混入土壌を盛土資材等として再生利用する場合を想定し、土質特性の長期的な変化について有機物の暴露試験と有機物混入土壌の盛土試験を実施した。その結果、以下のような知見を得ることができた。これらの知見により、有機物を含む土壌の利用に際しては、有機物の分解等を考慮することの重要性が示唆された。

- i. 有機物は時間の経過とともに変色や湿潤質量の減少等が生じ、その変化は雨等の影響を受けた方が大きい
- ii. 有機物の経時変化や劣化等の状態を示す指標として、COD 測定や IR 分析が活用できる可能性がある
- iii. 盛土土壌中の有機物量は時間の経過とともに減少し、盛土の沈下や土壌の力学特性に影響を与える

iv. 中性域を含めた水を溶媒とし、検液を UV-Vis や NIRS で測定することにより、SAP の検出が可能である。ただし、定量化手法の確立には至っていない

v. 土壌中の SAP は乾湿の繰り返し等の要因により、徐々に保水性が失われる可能性が高い

しかしながら、2018 年から行ってきた本研究では土壌中の有機物の変化の定量的評価には至っておらず、評価方法のさらなる検討が今後の課題と考える。

表-7 SAP の測定方法

測定法	UV-Vis 測定	NIRS 測定
SAP 濃度	500mg/L	10mg/L
pH 調整剤	HCl, NaOH	NaOH, NH ₄ OH
溶媒 pH	1, 4, 7, 10, 13	12
振とう	24 h, 150 rpm, 303 K	
測定機	紫外可視分光光度計 JASCO, V-630	近赤外吸収分析装置 Perkin Elmer Lambda 900Z

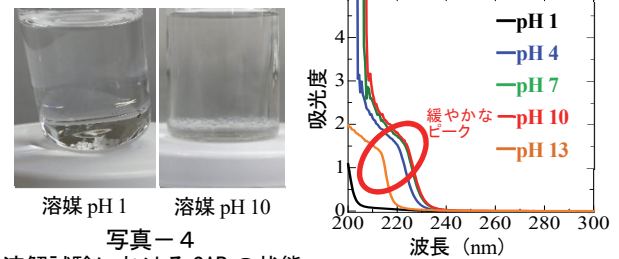


写真-4 溶解試験における SAP の状態

図-7 UV-Vis スペクトル

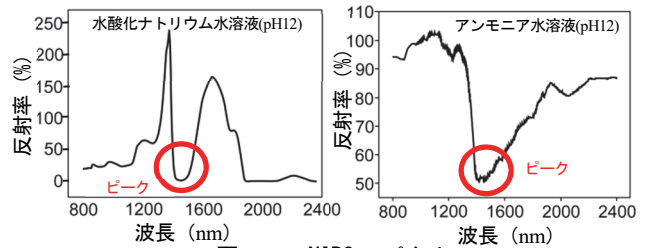


図-8 NIRS スペクトル

【謝辞】

本研究では、佐賀大学の 大渡教授と川喜田准教授に御指導を、同大学理工学部理工学科化学部門で SAP の溶解試験や分析を実施して頂いた。ここに記して感謝の意を表す。

【参考文献】

- 1) 環境省除染情報サイト、<http://josen.env.go.jp/>、2019.3
- 2) 中間貯蔵除去土壌等の減容・再生利用技術開発戦略検討会 (第 10 回) 資料 2 「中間貯蔵除去土壌等の減容・再生利用技術開発戦略進捗状況について」、2019.3
- 3) 今井亮介、小西正郎、清水祐也、白石祐彰、「土中有機物の劣化促進試験及び分析方法の検討」、奥村組技術研究年報 No.45、pp.115-122、2019
- 4) 村井 隆他、「稲わらの土壌型別分解能及び分解促進剤の効果」、農業・食品産業技術総合研究機構東北農業試験研究協議会、東北農業研究第 17 号、pp.100-102、1975.10
- 5) 高橋正通他、「高吸水性高分子樹脂を添加した土壌の物理・化学・生物特性」、森林立地 62 巻 1 号、pp.51-59、2020