

油圧式削岩機の打撃による振動を利用した トンネル切羽前方地山の弾性波速度予測

Predicting Seismic Velocity Ahead of Tunnel Face using Drilling Vibration of Hydraulic Drilling Machine

塚本耕治*

要旨

トンネル切羽前方地山の調査技術の一つである油圧式削岩機を用いた削孔検層法の応用技術として、油圧式削岩機が地山を削孔する際の振動を利用することにより、地山等級区分の重要な指標である弾性波速度の分布を把握できる弾性波探査法を開発した。トンネル現場において実証実験を行い、有効な調査法であることを確認した。

キーワード：削孔検層、油圧式削岩機、トンネル切羽前方、弾性波トモグラフィ解析

1. まえがき

トンネル坑内から行う切羽前方探査の一つに、油圧式削岩機等により切羽前方の地山を削孔し、削孔速度や油圧などのデータから削孔位置の地山性状を定量的に評価する削孔検層法¹⁾がある。この削孔検層法は、ドリルジャンボの油圧式削岩機に油圧計や油量計を取り付けて切羽前方に30m程度の削孔を行い、油圧式削岩機の油圧や油量などの機械データを用いて削孔速度や単位掘削体積当たりの掘削に要したエネルギーである掘削体積比エネルギーを求め、その大きさや変動などから切羽前方の地山状態を予測する調査法である。削孔検層法は、地山の硬軟の程度を把握する場合に有効な探査法であるが、地山状態を評価する削孔速度や掘削体積比エネルギーなどの指標は地山だけでなく、打撃圧や回転圧、フィード圧などの圧力変化や削孔ずりの粒度の違いや排出状態によっても変化することから、データの信頼性が低下し、地山を精度よく予測することが難しい状況にある。

一方、事前調査の屈折法弾性波探査から得られる弾性波速度は、現地踏査やボーリング調査などの結果とともに地山区分の際に用いられ、トンネルの支保選定における重要な指標になっている。また、掘削に伴う地山挙動に影響を及ぼす地山の強度と相関関係があることから、弾性波速度を直接扱うことのできる調査法は地山状態を精度よく予測する上で有効となる。これらのことから、削孔検層の実施に併せて、先端のビットが打撃により地山を破碎する際に発生する振動をトンネル切羽の吹付け面に設置した複数の受振器で計測し、その受振波形を利

用してトモグラフィ解析を行うことで、トンネル切羽前方地山の弾性波速度分布を予測する調査法を開発した。

本稿では、トンネル現場での削孔検層時に、削孔振動を追加して計測する本調査法の有効性を確認するために行った現場実験の結果について述べる。

2. 調査法の概要

調査法の基本的な概念図を図-1、調査法の流れを図-2に示す。油圧式削岩機が地山を掘削する際、ドリフトに伝播する振動を後部に設置したパイロットセンサーにより計測し、同時に、ビットが地山を打撃する振動を切羽面に設置した複数の受振器により計測する。次に、

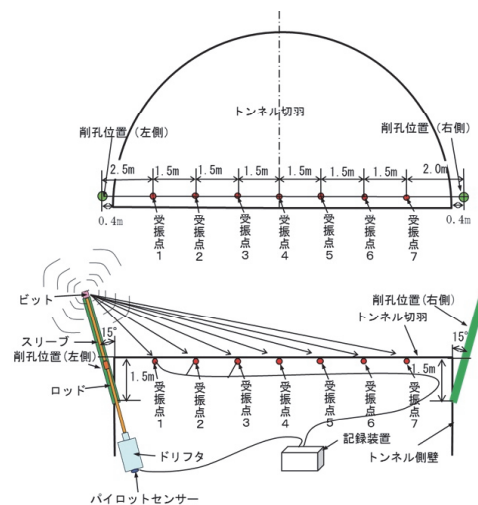


図-1 調査法の基本的な概念図

*技術研究所土木研究グループ

パイロットセンサーにより計測した波形を用いてビットが地山を打撃する時刻（発振時刻）を求める。また、この発振時刻を用いて削孔振動の波形処理を行い、S/N比を向上させる。さらに、発振時刻と受振器に到達するまでの時間（観測走時）とビット位置のデータを用いてトモグラフィ解析を行うことにより、切羽前方地山の弾性波速度分布を把握する。

3. 現場実験

3.1 現場概要

実施場所は、奈良県南部の幅 8.5m、延長 980m、内空断面積 65m² の道路トンネルである。実験位置の地質状況を図-3に示す。地質は、四万十層群上部白亜系の堆積岩で、頁岩を主体として砂岩、緑色岩類、凝灰岩などを含有するメラングジュ層が分布する。実験は、出口側の坑口から 157m 手前の位置で行った。

3.2 発振時刻の把握実験

地山の弾性波速度を求めるためには、油圧式削岩機のビットが地山を打撃する時刻（発振時刻）が必要になる。削孔中は、孔内において打撃、回転を繰り返しているビットにセンサーを直接取り付け地山を打撃する時刻を計測することができない。そのため、ドリフタの振動を利用してビットの打撃時刻を把握することにした。図-4のように、ビットを地山に押し当てた状態にして打撃し、削岩機のドリフタ、およびビットに発生した振動を加速度計1と加速度計2で計測した。計測した振動波形を図-5に示す。長さ 3.66m のロッドを使用した場合は 0.709ms の時間差になり、ドリフタに設置した加速度計1の振動波形からビットの打撃時刻を求めることができる。また、事前の実験から、ロッドを接続すると打撃時刻が1本当たり 0.542ms の遅延が確認されており、パイロセンサーと受振点の初動の時間差から 0.709ms とロッドの追加接続による遅延時間（ロッド追加接続の本数×0.542ms）を引くことにより、発振点と受振点の走時を求めることができる。

3.3 計測手順と計測波形

削孔振動の計測では、図-1のように、トンネル切羽のモルタル吹付け面の7箇所（削孔位置と同じ高さで1.5m間隔）にφ55mm深さ20cmの孔を油圧式削岩機で削孔した。削孔した孔にモルタルを挿入して受振器を設置した（写真-1、写真-2）。また、トンネル切羽の左側と右側の2箇所において、切羽面から1.5m手前の側壁部からトンネル軸に対して15°の角度で切羽前方方向に削孔を行った。計測機器の仕様を表-1に示す。伝播距離が20m以上になるため、距離減衰により振動振幅の小さくなる削孔振動の走時を高い感度で計測する必要があることから、24bitのA/D分解能で24kHzのサンプリング周波数の計測装置を用いた。なお、トモグラフィ

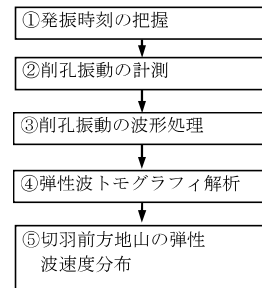


図-2 調査法の流れ

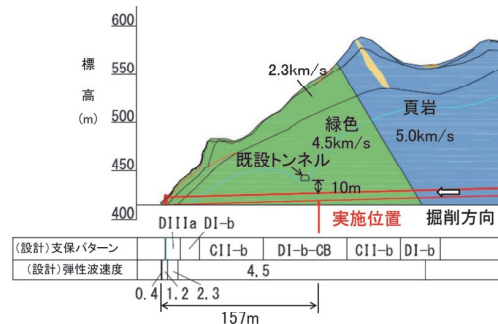


図-3 実験位置の地質状況

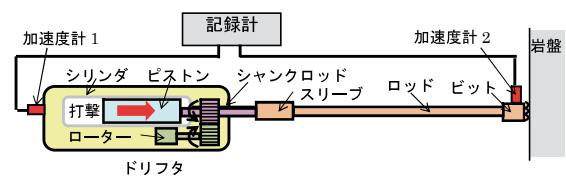


図-4 発振時刻の把握実験

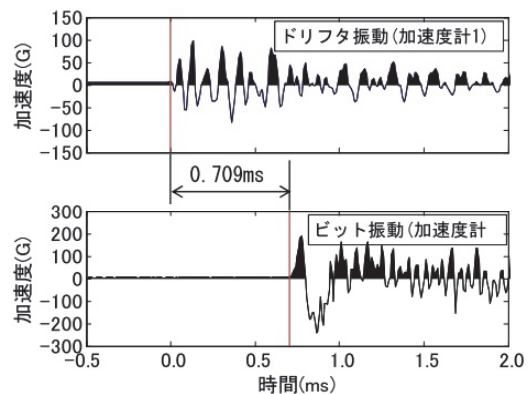


図-5 ドリフタ振動とビット振動の関係



写真-1 受振器設置状況 写真-2 パイロットセンサーの設置状況

フィ解析に必要な発振位置（ビットが地山を打撃した位置）のデータは、削孔層層において削孔長を計測する場合と同様にフィードの油圧回路に設置した油量計を用いて計測した。

3.4 振動波形の波形処理

削孔振動の波形処理手順を図-6に示す。以下に処理手順ごとに説明する。

a. 打撃ごとの波形に分割

削岩機に設置したパイロットセンサーと切羽面の受振器で受振した波形を、打撃ごとの波形列として図-7に示す。打撃ごとの波形は、パイロットセンサーで受振した波形の加速度振幅が±10Gを超えた時点を初動と見なして2msをプレトリガーとし、20msの波形を受振器で受振した波形を含めて抽出する。パイロットセンサーで受振した波形の初動付近を図-8に示す。これは、ピストンがシャンクロッドを打撃することにより発生した振動がドリフタのフレームを伝播したものであり、波形がパルス状にならないため、波の立ち上がりを読み取る初動に最大0.320msのばらつきが生じた。

b. 波形のスタッキング処理

ビットが地山を打撃する際、破碎したずりやビットと地山の間に挟まり、一様な打撃ができないことがあり、図-9に示した1回目の波形のように打撃による振動と異なる振動が入る場合がある。また、前述のパイロットセンサーの初動誤差により、図-10に示すように受振波形の初動位置（◀）が打撃ごとに0.3ms程度ばらつくことが分かる。複数回の振動波形をそのままスタッキング処理（波形データを時系列で足し合わせる処理）を行うと、S/N比が低下して初動の読み取りに誤差を生じるため、各波形間の相互相関関数を求め、相関係数の低い波形は振源として扱わない波形として除外した。この各波形間の相互相関関数²⁾は、式(1)～式(3)から計算することができる。

$$\mu(i) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N y_n(i) \quad (1)$$

$$C_k(i, j) = \frac{1}{N} \sum_{n=k+1}^N \{y_n(i) - \mu(i)\} \{y_{n-k}(j) - \mu(j)\} \quad (2)$$

$$R_k(i, j) = \frac{C_k(i, j)}{\sqrt{C_0(i, j)C_0(i, j)}} \quad (3)$$

ここに、

- $y(i)$: i 打撃による振動データの振幅値、 N : データ数、
- $\mu(i)$: i 打撃による振動データの平均値、 k : ラグ、
- $C(i, j)$: i 打撃と j 打撃による振動データの相互共分散関数、
- $R(i, j)$: i 打撃と j 打撃による振動データの相互相関関数

打撃10回分の振動波形に対して求めた相互相関関数の最大値を表-2に示す。 i が1から10の相関関数のうち平均値が最も大きくなるラグ（ここでは $i=8$ ）を用いて時間をシフトさせた波形列を図-11に示す。ラグを用いて時間をシフトさせることにより、各波形の初動

表-1 計測機器の仕様

計測機器名	計測項目	おもな仕様
受振器	地山振動	型式: MC型速度計
		出力: 104mV/cm/s
		共振周波数: 28Hz
パイロットセンサー	ドリフタ振動	型式: 圧電型加速度計
		出力: 0.103mV/G
油量計	削孔長	流量範囲: 0~80/min
		出力: 12V (パルス)
		最大圧力: 30MPa
記録装置		チャンネル数: 16
		分解能: 24bit
		サンプリング: 1.5~96kHz

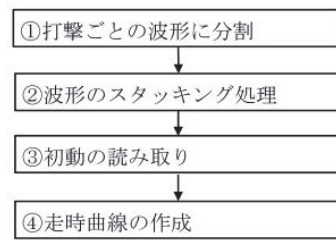


図-6 波形処理の手順

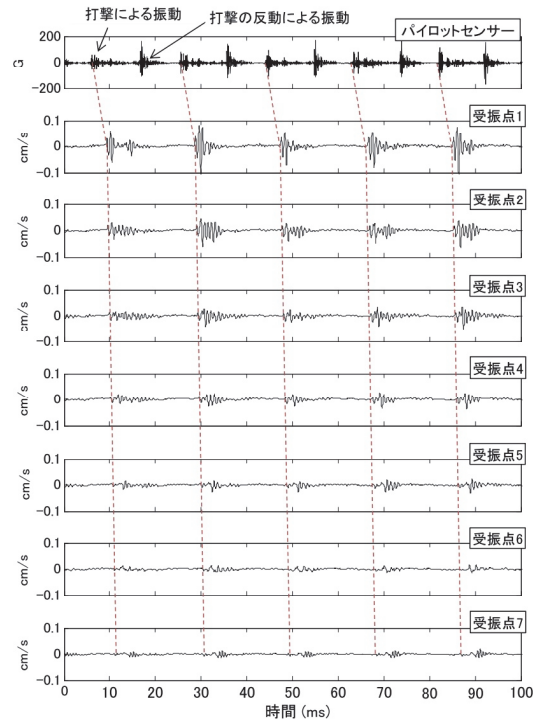


図-7 計測した振動波形例

位置が一致することが分かる。このうち、1回目と3回目の打撃による波形の相関値が0.78、0.88で0.9より小さくなっている。これは、図-9の受振波形列のうち1回目の打撃による波形には10ms付近、3回目の打撃による波形には7ms付近において他の打撃の波形に見られない振動を観測していることから、この影響を受けて相関値が低下していると推察される。したがって、0.9

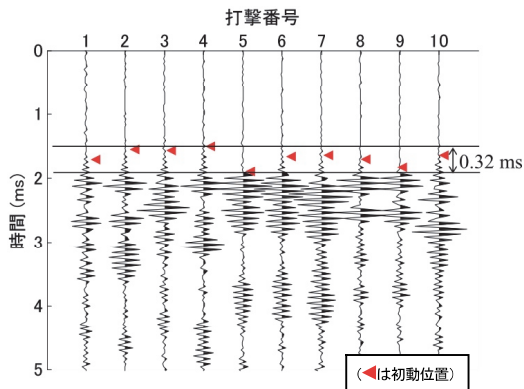


図-8 パイロットセンサーの波形

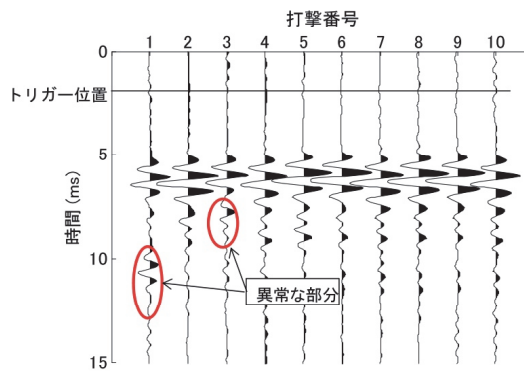


図-9 受振点1における受振波形

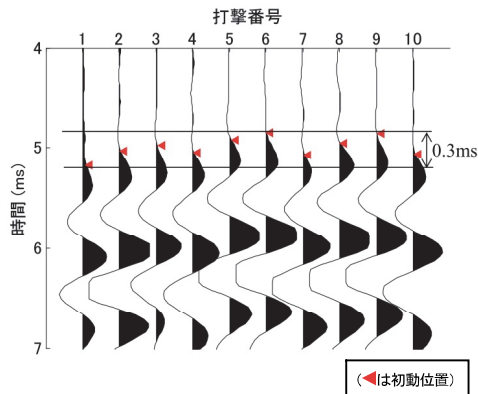


図-10 受振点1における受振波形の初動付近

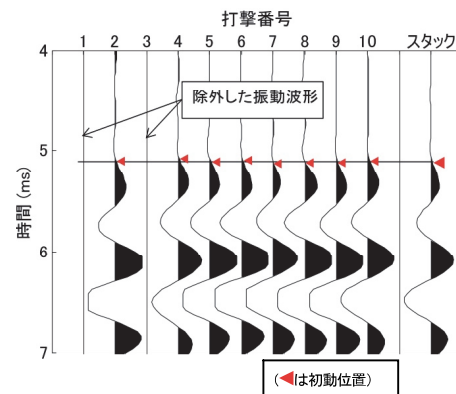


図-11 受振点1における受振波形のスタッキング

より小さくなる1回目と3回目の打撃による波形を除外してスタッキング処理する。

初動の時刻で整列した振動波形の時系列データを足し合わせる計算がスタッキング処理である。この処理により、ランダムノイズは打ち消しあうため小さくなる。

c. 初動の読み取り

ピットの打撃位置を発振点として弾性波は球面状に広がり、単位面積当たりのエネルギーは震源からの距離の二乗に反比例して減衰する。そのため、受振点で計測される波形の振幅値は距離が長くなると急激に減衰してノイズとの区別が難しくなる。そこで、スタッキング処理により、S/N比を向上させた各受振点の波形に対し、初動位置をピックアップして各波形の初動時刻を求める。

d. 走時曲線の作成

ドリフタ振動、および受振点1、受振点4、受振点7でのスタッキング処理した振動波形について、ドリフタ振動の最大振幅値の20%を閾値に設定して削孔長0.2m間隔で波形を整理した結果を図-12～図-14に示す。図中には、波形ごとに初動の位置(点)をピックアップし、この点を通る線を引くことにより求まる走時曲線(打撃により発生した弾性波(P波)が受振点に到達した時間と切羽からの削孔長の関係を表す)を示している。削孔長0.2mにおける走時は、受振点1で0.630ms、受振点4で1.683ms、受振点7で2.364msであり、削孔位置から

表-2 振動波形間の相互相関関数の最大値

i \ j	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	R>0.9	平均値
1	1.000	0.815	0.843	0.763	0.780	0.816	0.781	0.818	0.804	0.793	1	0.821
2	0.815	1.000	0.879	0.872	0.914	0.945	0.888	0.921	0.945	0.870	5	0.905
3	0.843	0.879	1.000	0.865	0.884	0.887	0.829	0.863	0.838	0.862	1	0.875
4	0.763	0.872	0.865	1.000	0.949	0.915	0.934	0.936	0.903	0.929	7	0.907
5	0.780	0.914	0.884	0.949	1.000	0.971	0.948	0.962	0.946	0.945	8	0.930
6	0.816	0.945	0.887	0.915	0.971	1.000	0.952	0.964	0.957	0.926	8	0.933
7	0.781	0.888	0.829	0.934	0.948	0.952	1.000	0.960	0.949	0.941	7	0.918
8	0.818	0.921	0.863	0.936	0.962	0.964	0.960	1.000	0.979	0.969	8	0.937
9	0.804	0.945	0.838	0.903	0.946	0.957	0.949	0.979	1.000	0.948	8	0.927
10	0.793	0.870	0.862	0.929	0.945	0.926	0.941	0.969	0.948	1.000	7	0.918

離れた受振点になるほど、走時が大きくなることが分かる。受振点1～受振点7の走時曲線を整理した結果を図-15に示す。この走時曲線は、発振点と受振点の波線経路上の地山の弾性波速度値が反映されており、一般に直線ではなく複雑な形状になる。

3.5 削孔検層による地山評価

トンネル切羽の左側と右側の2箇所で行った削孔検層の結果について述べる。切羽前方地山の評価には、削孔時の油圧式削岩機の削孔速度、打撃圧やフィード圧などの機械データから求まる削孔エネルギー E を用いた。

削孔エネルギーは、地山が軟質になるほど小さく、硬質になるほど大きくなる傾向がある。切羽左側の削孔エネルギーを図-16に、切羽右側の削孔エネルギーを図-17に示す。切羽左側の削孔エネルギーは、切羽から深さ2.8mの区間が200J/cm³程度にある。2.8m～10.3m

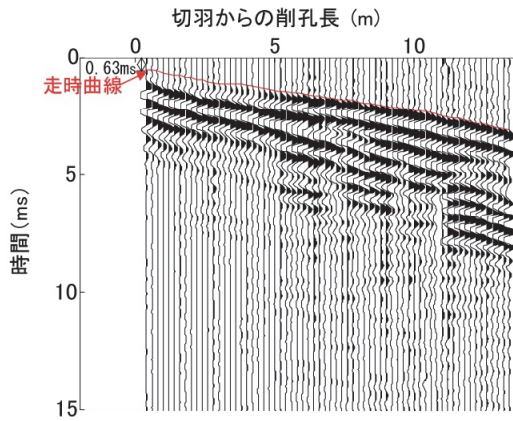


図-12 受振点 1 における受振波形列

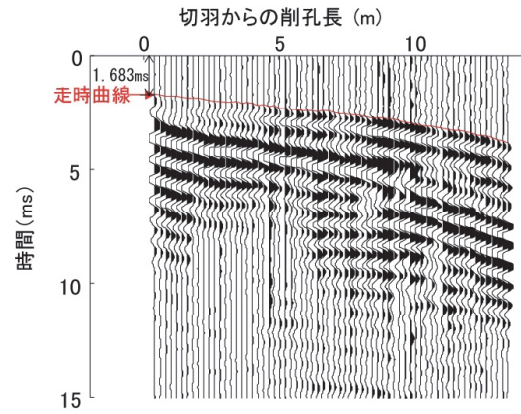


図-13 受振点 4 における受振波形列

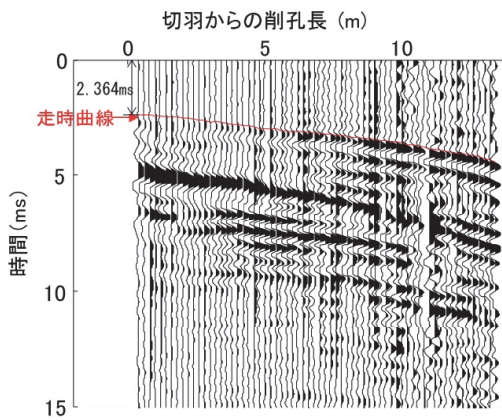


図-14 受振点 7 における受振波形列

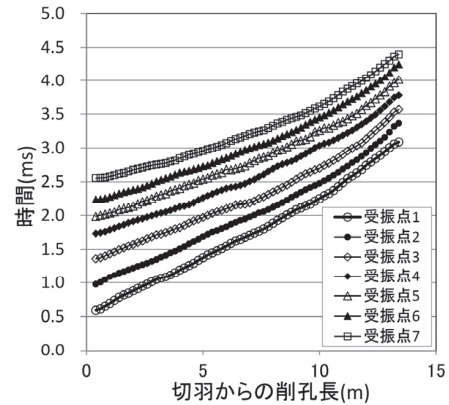


図-15 受振点における走時曲線

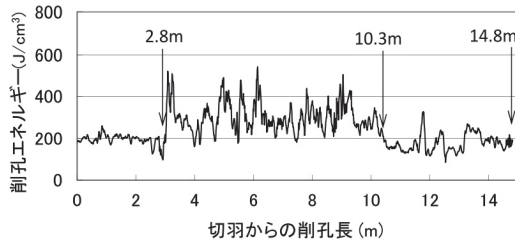


図-16 切羽左側の削孔エネルギー分布

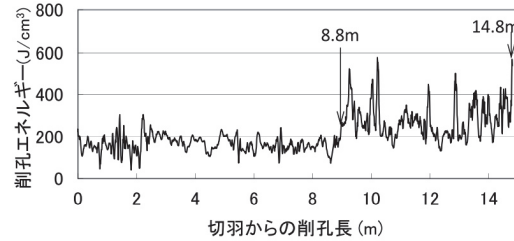


図-17 切羽右側の削孔エネルギー分布

の区間では、削孔エネルギーの最大値が $550\text{J}/\text{cm}^3$ 程度になり、値が大きく変動する。さらに、 $10.3\text{m}\sim 14.8\text{m}$ 区間では、再び $200\text{J}/\text{cm}^3$ 程度になる。

一方、右側の削孔エネルギーは、切羽から深さ 8.8m 区間が $50\sim 300\text{J}/\text{cm}^3$ の範囲にある。 $8.8\text{m}\sim 14.8\text{m}$ 区間では削孔エネルギーの最大値が $600\text{J}/\text{cm}^3$ 程度に増加し、変動の幅が大きくなる。

削孔エネルギーの大きさから削孔長で分けられた範囲について求めた削孔エネルギーの平均値を表-3に示す。左側の $2.8\text{m}\sim 10.3\text{m}$ と右側 $8.8\text{m}\sim 14.8\text{m}$ では、削孔エネルギーの平均値が $304\text{J}/\text{cm}^3$ と $276\text{J}/\text{cm}^3$ であり、同程度の値である。このことから左側の深さ 2.8m から右側

の深さ 8.8m は同じ層の境界面であり、境界が平面で連続していると仮定すると、切羽面に対して 20° 程度傾いていることが推測される。

3.6 トモグラフィ解析

調査対象領域を囲むように多数の発振点と受振点から物性値に関する情報を得る方法の総称をトモグラフィと呼ぶ。図-15の走時データを用いて走時トモグラフィ解析を行い、切羽前方地山の弾性波速度分布を求めた。解析は、観測走時とその時点の速度分布に対して波線法によって得られる理論走時との差を最小にするように速度分布を反復修正する方法³⁾を用いた。解析条件を表-4に示す。解析のセルの大きさは、 $1\text{m}\times 1\text{m}$ とし、受

表-3 削孔エネルギーの区間平均

切羽左側		切羽右側	
削孔長 (m)	区間平均 (J/cm ²)	削孔長 (m)	区間平均 (J/cm ²)
0~2.8	190	0~8.8	164
2.8~10.3	304	8.8~14.8	276
10.3~14.8	196		

表-4 トモグラフィ解析の解析条件

波線数	462
セル分割数	断面方向 : 16 切羽前方方向 : 14
セルサイズ	1m×1m
反復計算法	最小2乗法
収束判定誤差	2%
反復回数	20回

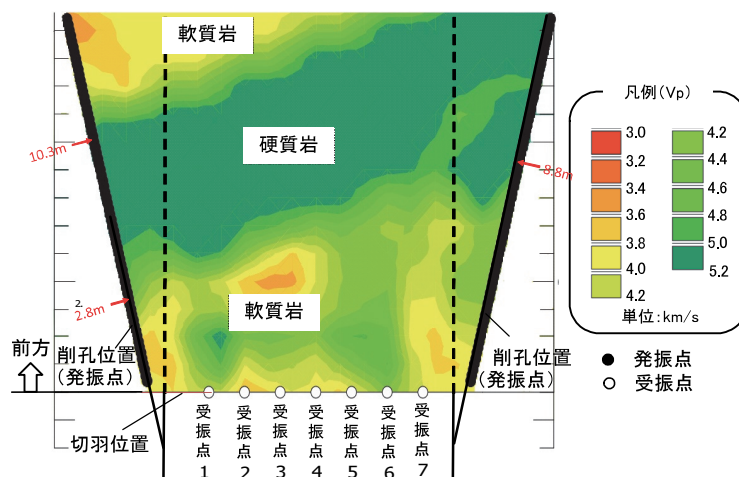


図-18 切羽前方地山の弾性波速度推定

振点と発振点が入るように解析領域をトンネルの断面方向に 16、切羽前方方向に 14 のセルに分割した。解析には最小 2 乗法を用い、観測走時と計算走時の相対 RMS 残差が収束判定誤差内に収まるように繰り返し計算を行った。なお、終了時の繰り返し計算回数 4 回で相対 RMS 残差は 1.8%である。

トモグラフィ解析で求めたトンネル切羽前方の弾性波速度分布を図-18 に示す。切羽付近には、弾性波速度が 3.5km/s~4.5km/s の地山が分布しているが、切羽前方の 3m 付近から 5km/s 程度の速度の速い地山が左から右に徐々に拡大して現れること、その地山が切羽前方に約 5m の厚さで断面方向から 20° の傾きで層状に存在していることが、弾性波速度分布の結果から予測される。削孔エネルギーの変化から地山変化が予想される位置を図中の矢印で示している。左側の削孔検層の削孔距離 2.8m から 10.3m の区間で弾性波速度が 4.4km/s から 5km/s になること、右側の削孔検層の 8.8m 付近では、5km/s の地山が出現しており、削孔エネルギーの結果と弾性波速度分布の結果は、比較的良好に対応している。

4. まとめ

開発した探査法では、削孔検層の際に切羽に受振器を設置して削孔振動を計測し、その波形から受振点と削孔位置の走時を読み取ってトモグラフィ解析を行うことにより弾性波速度分布を把握できる。得られる弾性波速度

分布は削孔エネルギーの結果ともよく整合し、有効であることを確認した。これまでの削孔検層では、地山の物性値を直接把握することが困難なこと、得られる情報が削孔位置の線状の地山評価であった。本手法を適用することにより、地山物性である弾性波速度を 2 次元平面で把握することが可能である。低速度帯の出現によるトラブルを未然に防ぎ、有効な事前対策により安全性の向上を期待できる。

5. あとがき

今後、トンネル現場への適用を通じて、岩質や探査深度など適用範囲について検討する。また、トモグラフィ解析の分解能を向上させるためには、波線数を増やす必要があることから、削孔したボーリング孔内に受振器を設置する方法も追加して実施する予定である。

【参考文献】

- 1) 塚本耕治ほか、「削孔検層システムによるトンネル切羽前方の地山予測」、奥村組技術研究所報、No.38、pp.76-79、2012
- 2) 北川源四郎、「時系列解析プログラミング」、岩波書店、pp.39-45、1993
- 3) 佐々宏一ほか、「建設・防災技術者のための物理探査」、森北出版、pp.120-124、1993

トンネル工事における CIM/ICT の取組み

ー山岳トンネル CIM ソフトの開発、

シールド工事における人工衛星データの活用ー

Development of CIM and ICT Technologies for Tunnel Construction

- A New CIM Software for Mountain Tunneling and Shield Tunneling with Satellite Data -

宮田岩往*

要 旨

山岳トンネル工事、およびシールド工事において CIM/ICT 技術を施工に活用した事例を報告する。山岳トンネル工事において CIM を導入するには、基本となる 3 次元地盤モデルを作成し、トンネル掘削や地山に関する各種計測データの登録、煩雑な 3 次元 CAD の操作などで多大な時間を必要とし、現場への導入と運用には高いハードルがあった。そこで、データ作成の簡易性と快適な操作性を実現する山岳トンネル CIM 用ソフトウェアを開発して、現場の実務で CIM を効率的に運用した。シールド工事では、シールド機の掘進に合わせて直上の道路やその周辺地域の地表面変位状況を把握し、その変位量を最小限に抑えながら安全に掘進することが重要である。しかし、道路上の交通状況や周辺地域における私有地の問題から従来の測量器による測量が困難な場合も多く、また計測に多大な労力を要している。そこで、SAR 衛星データを用いて地表面変位測量を実施し、従来のレベル測量と同等の精度で、面的な変位量を効率的かつ安全に計測できることを実証した。

キーワード：CIM、ICT、準 3 次元地盤モデル、可視化、SAR 衛星

1. まえがき

国土交通省は、建設事業全体の高度化と生産性向上を目的に平成 24 年度から CIM¹⁾ の試行業務を開始し、平成 25 年度からは試行工事へと段階的に適用範囲を拡大して導入効果・課題の検証を進めてきた。平成 28 年度末には、工種ごとの CIM 導入ガイドラインを策定し、CIM の取組みをより広く進めている。また、平成 28 年度から開始した i-Construction²⁾ は、当初の ICT 土工に続いて、今年度から ICT 舗装工、ICT 浚渫工が導入され、施工段階で 3 次元モデルを活用する動きが活発化しており、CIM の本格導入に向けた動きが加速している。また、様々な ICT 技術が急速な進歩を遂げており、これらの ICT 技術を施工現場に活用することで、建設事業における課題とされる生産性向上への期待も高まっている。

今回、これらの CIM/ICT 技術をトンネル工事に適用し、山岳トンネル工事については CIM の導入を、シールド工事については ICT 技術を施工現場に適用し、施工管理の高度化と生産性向上に取り組んだ。

山岳トンネル工事へ CIM を導入するに当たっては、基本となる 3 次元地盤モデルを作成し、同モデルにトンネル掘削や地山に関する各種計測データを連携させる必要がある。しかしながら、これらの作業には煩雑な 3 次元 CAD の操作などで多大な時間を必要とし、また、導入した CIM を円滑に運用するためには、その扱うデータ量の多さから高性能なパソコンが必要であるなど、現場への導入とその運用には高いハードルがあった。そこで、施工現場の実務で CIM を効率的に運用するためのトンネル CIM 用ソフトウェアの開発を行った。開発にあたり、航空測量などによって取得される大量の点群データを統合表示でき、大量データの高速度処理が可能で高いレスポンスを持つパソコ社保有の 3 次元基本ソフトウェア「PADMS」をベースとして、それを山岳トンネル CIM 用にカスタマイズすることにより、データ作成の簡易性と快適な操作性を実現し、これにより現場の CIM 導入、運用にかかる負荷を大幅に軽減させることができると考えた。また、CIM の本格導入に向けて CIM 技術検討会³⁾ トンネル WG⁴⁾ で取り纏めた「CIM トンネルモデル作成ガイドライン」⁵⁾ を念頭に開発を進

*管理本部情報システム部

めた。この CIM 技術検討会は、建設関係団体のメンバーで構成され、平成 24 年に発足した会であり、国土交通省の CIM 制度検討会と有機的に連携し、CIM の本格的な導入に向けて検討を進めており、平成 28 年度からは CIM 制度検討会と統合し、「CIM 導入推進委員会」として活動を継続している。本報では、これらの山岳トンネル工事における CIM の取組みについて報告する。

シールド工事では、道路上の交通状況や周辺地域における私有地の問題から従来の測量器による地表面変位測量が困難な場合も多く、また計測に多大な労力が掛かっていることから、効率的かつ安全に地表面変位状況を計測する測量手法の確立が課題となっている。そこで、人工衛星によって撮像された SAR (Synthetic Aperture Radar : 合成開口レーダー) ⑩ のデータを用いることで、効率的かつ安全に地表面変位を計測できると考え、従来のレベル測量と同等の精度で計測できるか検証を行った。これらのシールド工事における ICT 技術を活用した取組みについて報告する。

2. 山岳トンネル工事における CIM の取組み

2.1 概要

山岳トンネル工事の施工現場において CIM を円滑に運用するために山岳トンネル CIM 用ソフトウェアを開発して実工事に適用し、山岳トンネル工事における施工情報の可視化による施工管理の高度化と生産性向上に取り組んだ。

2.2 山岳トンネル CIM ソフトの開発

従来、山岳トンネル工事へ CIM を導入するには、ハイスペックなハードと 3 次元 CAD ソフトによる煩雑な操作により 3 次元地盤モデルを作成するなど、導入準備と現場での実務運用には高いハードルがあった。そのため、パスコ社が保有する「PADMS」をベースに、現場実務でスムーズに活用できる山岳トンネル CIM ソフトを開発した。「PADMS」は、元々 UAV や航空機、MMS など多種多様な計測センサーによって取得・生成された点群データなどの大容量 3 次元基盤情報データを、複数取り込んで統合表示させる機能を保有しており、大量データの高速処理を得意としているソフトウェアであった。そこで、トンネル CIM の基となる 3 次元地盤モデルには、国土地理院から公開されている基盤地図情報、およびトンネル線形情報の 3 次元データと、地質平面図・地質縦断面図の 2 次元図面を組み合わせることで簡易的に 3 次元地盤モデルを表現する「準 3 次元地盤モデル」を採用することとした (図-1)。この「準 3 次元地盤モデル」は、「CIM トンネルモデル作成ガイドライン」に準拠しており、最小の手間と時間で 3 次元地盤モデルが作成できる点が優れている。これによ

り、3 次元地盤モデルの作成時間が飛躍的に短縮できた。

また、日々の掘削管理に使用している測量・計測システムなどで得られる切羽情報 (切羽の写真・切羽観察記録・地山評価点)、支保工パターン、削孔検層システムなどによる切羽前方探査情報、およびボーリングデータなどの情報を「準 3 次元地盤モデル」に取り込んで連携させることで、山岳トンネル工事に関する施工情報を可視化・一元管理できるトンネル CIM モデルを構築した (図-2)。このトンネル CIM モデルは、図-3 に示すように切羽ごとの切羽観察記録がデータベース化されて自動連携されており、図-4 に示すように切羽ごとの切羽写真や切羽断面の天端部、左肩部、右肩部および総合地山評価点が点数によって色分けされて表示される。

また、図-5 に示すように地山等級に合わせて実際に設置された実施支保工パターンがパターンごとに色分けされて表示される。この CIM モデルには、他にもボーリングデータや削孔検層システムデータなどの切羽前方探査データを統合して表示させることができ、モデルから削孔検層システムによる削孔エネルギー値グラフを参照することもできる (図-6)。

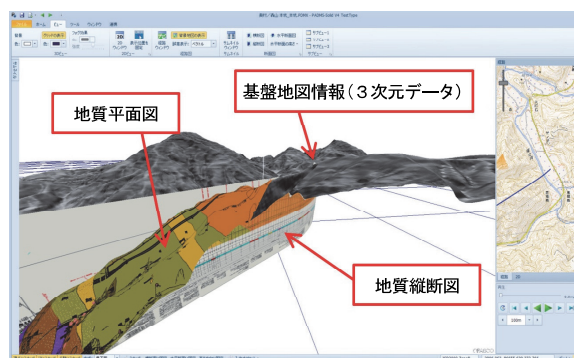


図-1 準3次元地盤モデル

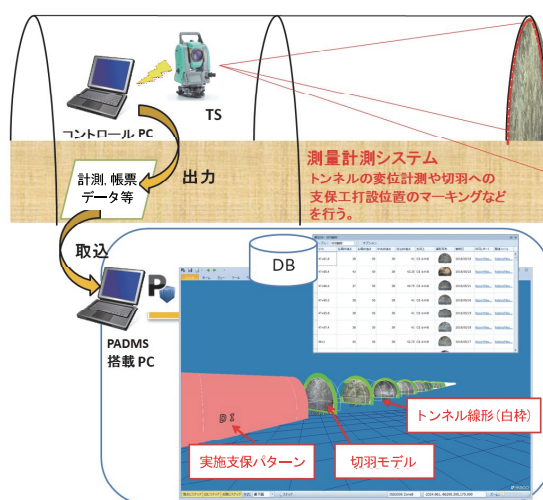


図-2 測量・計測システムとのデータ連携

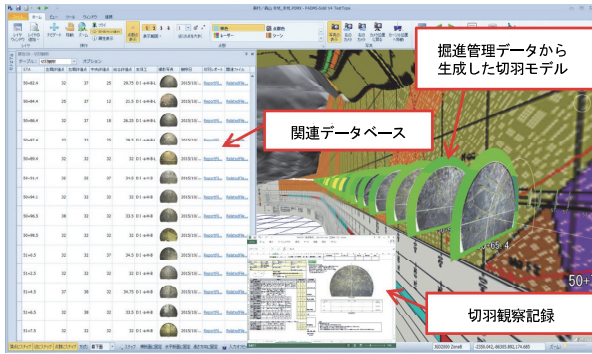


図-3 切羽情報とデータベースとの連携

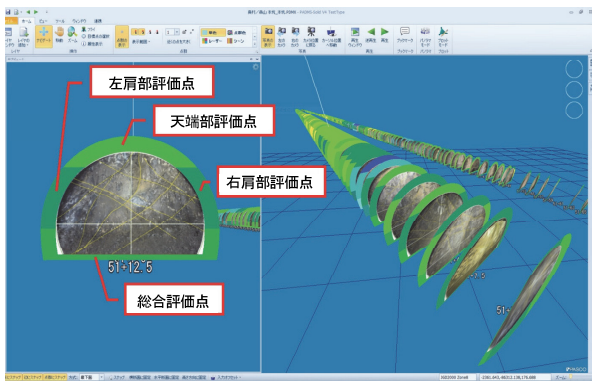


図-4 切羽写真と地山評価点の表示例

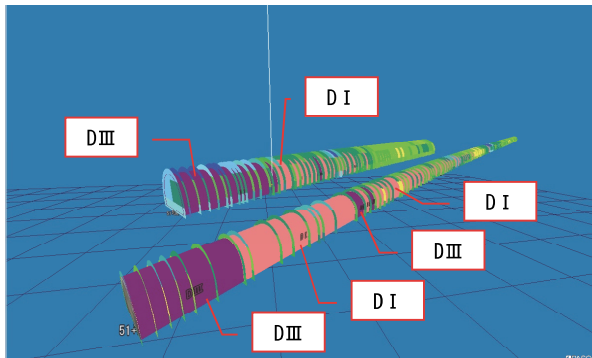


図-5 実施支保工パターン表示例

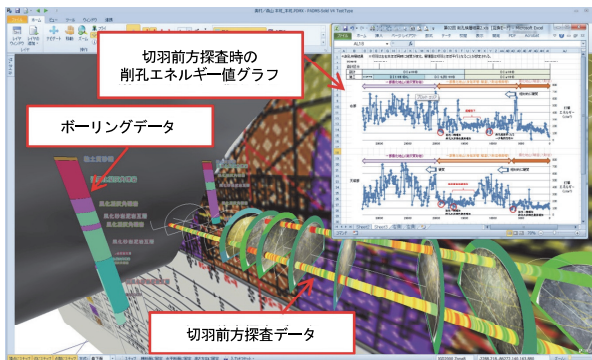


図-6 切羽前方探査データおよびボーリングデータ

2.3 実施結果

山岳トンネル工事の施工現場において CIM を円滑に運用するために山岳トンネル CIM 用ソフトウェアを開発し、トンネル CIM の基となる 3 次元地盤モデルに「準 3 次元地盤モデル」を採用することで、3 次元地盤モデルの作成に要する時間を 1/10 に低減した。具体的には、本坑および避難坑の延長がそれぞれ約 1.7km の工事で、従来は約 10 日程度要していたモデル作成時間が約 1 日に短縮できた。また、日々の施工管理で蓄積している測量・計測システムのデータを取り込むことで、簡単に施工情報の可視化が可能となった。さらに、大量データの高速処理と高いレスポンスに強みをもつパソ会社の「PADMS」をベースに開発したことで、さほどスペックが高くない通常のパソコンでも動作できるようになり、実際の施工現場における実用レベルでのトンネル CIM の効率的な運用を実現した。

3. シールド工事における ICT 技術の取組み

3.1 概要

掘進管理データから生成した切羽モデル

シールド工事の施工現場において、人工衛星によって撮像された SAR データを用いた変位測量をシールド工事に適用し、従来のレベル測量と同等のミリ単位の高精度を確保しつつ、地表面を面的かつ広範囲に測量できることを実証した。

3.2 SAR 衛星による測量手法

SAR 衛星は、地球を周回するレーダー衛星の一種で、地球に向けてマイクロ波を照射し、その反射波を受信することによって対象物の観測を行うものである。SAR 衛星は、太陽光を光源として撮影するという通常の撮影原理とは異なり、自らマイクロ波を照射し、その反射情報から地表面を観測するため、天候の影響を受けにくく、悪天候時や夜間においても地表面の情報の取得が可能である。

今回の計測は、2007 年と 2010 年にドイツの宇宙機関が打ち上げて運用している TerraSAR-X (図-7) と呼ばれる SAR 衛星のデータを利用した。なお、この SAR 衛星の回帰日数 (撮影頻度) は 11 日周期となっている。

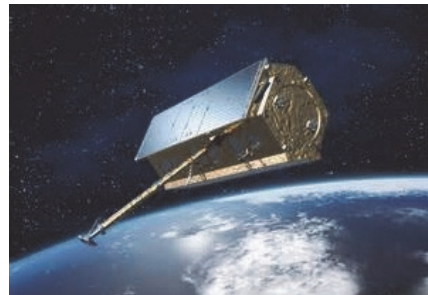
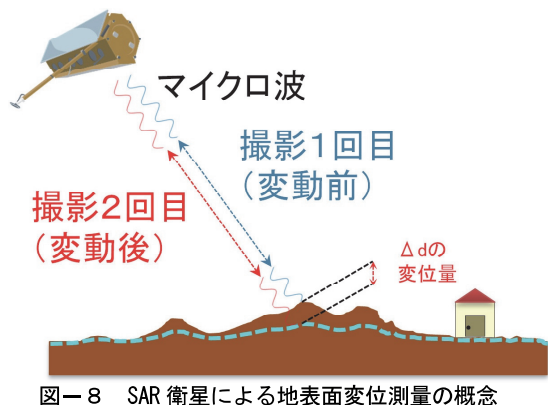


図-7 TerraSAR-X

今回用いた反射波データ解析手法は、図-8に示すように異なる時期における受信波長の位相差の違いから変位量を推定するもので、地面、電柱、照明灯、建築構造物の上面や側面など、SAR衛星データを安定して計測可能な点(PS点)を抽出し、このPS点における位相差データ(Δd)を用いて解析を行うものである。



3.3 シールド工事への適用

今回適用したシールド工事における掘進ルートの周辺は、駅に近く戸建住宅および集合住宅が密集するエリアであり、交通量が多い上に歩道が狭く、従来のレベル測量のみでは測量位置制限を受けることが懸念されていた。適用したシールド工事の概要を表-1に、SAR衛星の観測内容を表-2に示す。SAR衛星による対象地域の観測は、衛星進行方向の測点間隔0.24mで、シールド掘進開始から完了までの約1年2か月の期間に計30回以上実施した。この高密度・高頻度でのSAR衛星観測は国内初の事例である。

3.4 SAR衛星による地表面変位計測の精度確認

SAR衛星による地表面変位計測結果と現地におけるレベル測量を比較することで精度検証を実施した。図-9は、現地のレベル測量値-SAR衛星による測量値の誤

差を度数分布表示させたものである。SAR衛星による地表面変位測量の精度は、現地レベル測量結果を真値とした場合、平均二乗誤差(以下、RMSE)において1.8mmの結果となった。また、本工事の完了時点における変位状況は、現地のレベル測量において平均-0.7mm(標準偏差1.4mm)、SAR衛星による地表面変位測量において平均-0.7mm(標準偏差1.6mm)であり、両者とも本工事による変位が小さいという同様の傾向を示している(図-10)。また、計測したPS点は、シールド機の掘進ルート上を、10m²あたり約6点の高い観測密度で観測できており、地表面の変位を面的に捉えることができた(図-11)。

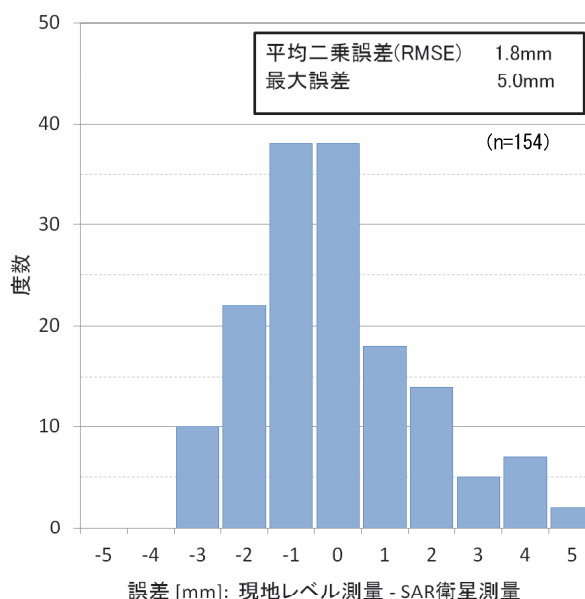


表-1 適用したシールド工事の概要

工事名称	新川第6排水区新川6号幹線(雨水)(その1)公共下水道工事
工事場所	京都市西京区川島松ノ木本町他地内
発注者	京都市上下水道局
施工業者	奥村組・岡野組・日新建工特定建設工事共同企業体
工事概要	泥土圧式シールド工法 延長1,176m シールド外径2,890mm

表-2 SAR衛星の観測内容

衛星名	高度	観測幅 ^{※1}	回帰日数	入射角度	地上分解能 ^{※2}
TerraSAR-X(独)	514 km	4km×3.7km	11日	40度	0.24m

※1: 直角方向×衛星進行方向 ※2: 衛星進行方向

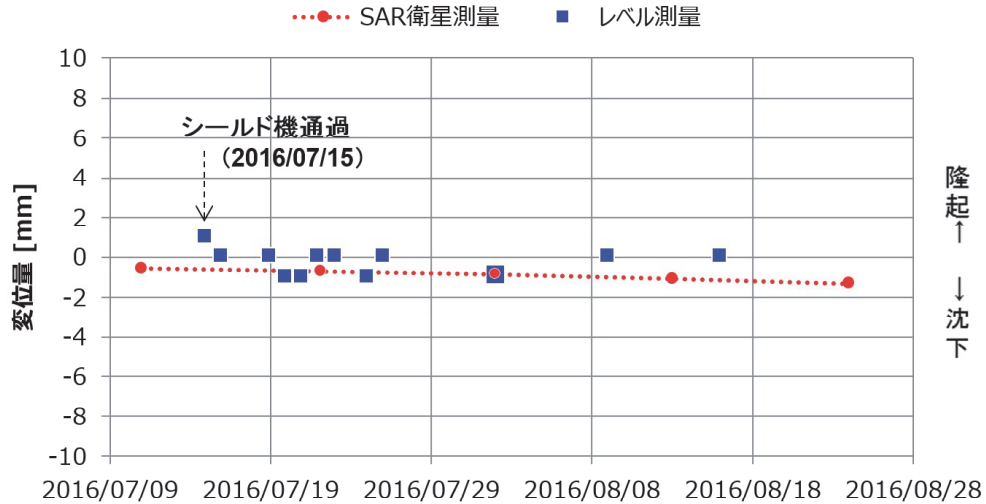


図-10 No.28 地点付近における変位測量結果の比較

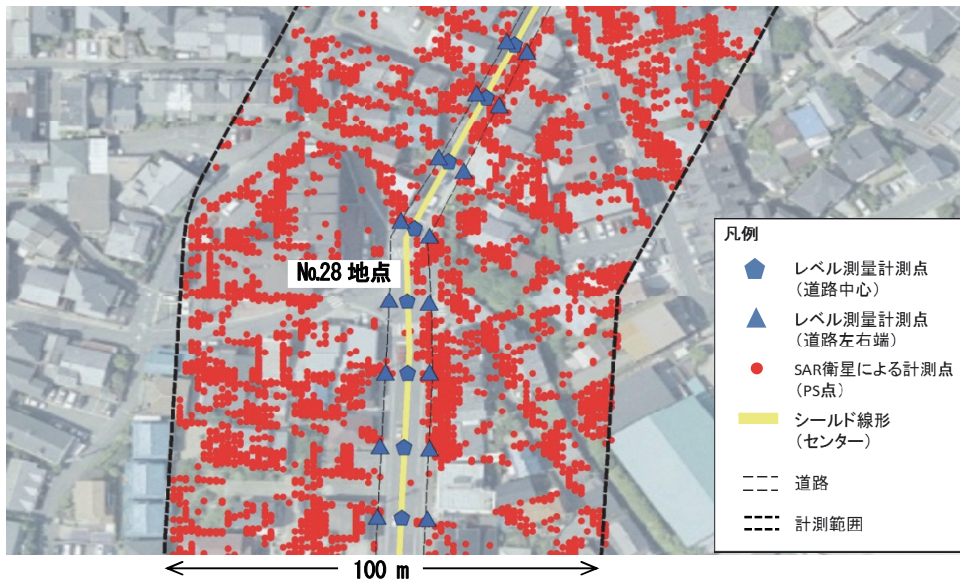


図-11 No.28 地点付近における計測点の比較

3.5 実施結果

現場のレベル測量と同程度 (RMSE 1.8mm、最大誤差 5.0mm) の良い精度で変位傾向を捉えることができた。また、計測した PS 点は、10m²あたり約 6 点の高い観測密度であり、地表面の変位を面的に捉えることができた。

課題としては、現場での変位計測を開始する前から、事前に SAR 衛星による計測を行っておく必要があることと、SAR 衛星による変位計測間隔は 11 日周期となることから、リアルタイムでの計測はできないため、日次で測量する地表面変位測量を補完する位置付けとなることである。

4. あとがき

国土交通省が推進している CIM を山岳トンネル工事に、また最先端の ICT 技術である SAR 衛星データによる

地表面変位測量をシールド工事に適用した。

山岳トンネル工事については、山岳トンネル CIM 用ソフトウェアを開発し、トンネル CIM の基となる 3 次元地盤モデルに「準 3 次元地盤モデル」を採用した。また、日々の施工管理で蓄積している測量・計測システムのデータを取り込むことで、施工情報の可視化による施工管理の高度化とトンネル CIM の効率的な運用を実現し、生産性を向上した。このトンネル CIM モデルには山岳トンネル施工に関する情報がデータベース化されており、竣工後は CIM 本来の目的である維持管理データとしても活用できる。また現在、このトンネル CIM モデルを用いて切羽前方地山の予測への活用を検討しているところである。

シールド工事については、最先端の ICT 技術である SAR 衛星データによる地表面変位測量を現場適用し、衛星進行方向の測点間隔 0.24m でシールド掘進開始か

ら完了までの約1年2か月の期間に計30回以上観測を行った。このような高密度・高頻度でのSAR衛星観測は国内初の事例となった。実際の変位測量開始前から事前に計測を行っておくことと、衛星の回帰日数により計測間隔が11日周期となることなどの課題もあるが、建設業従事者の減少への対応として有効なICT技術であり、シールド工事に限らず工事全般に広く適用範囲を拡大し、業務効率化に最適な活用場面の検討と今回の測量手法のレベルアップを図っていきたい。

【参考文献】

- 1) CIM 技術検討会、「CIM 技術検討会 平成 27 年度報告」、pp.2-3、2016.6
- 2) 国土交通省大臣官房技術調査課 工事監視官 山下眞治、「国土交通省における CIM の取り組み【CIM の新たな検討体制】」、CIM 2016、一般財団法人経済調査会、pp.4-5、2015.7
- 3) CIM 技術検討会、「CIM 技術検討会 平成 27 年度報告」、p.1、2016.6
- 4) CIM 技術検討会、「CIM 技術検討会 平成 27 年度報告」、p.14、2016.6
- 5) CIM 技術検討会、「CIM 技術検討会 平成 27 年度報告【別冊資料】」、pp.59-62、2016.6
- 6) 山中雅之、森下 遊、大坂優子、「干渉 SAR 時系列解析による地盤沈下の検出」、国土地理院時報、No.124、pp.1-14、2013
- 7) 塚本耕治、「削孔検層法によるトンネル切羽前方探査—打撃によるエネルギーを指標に用いた地山評価—」、土木技術、Vol.70、No.9、pp.27-32、2015.9

シールド工事での自然由来重金属含有土の浄化技術

一分級洗浄と鉄粉処理を用いた泥水シールド排泥の砒素汚染土浄化

Clarification System of Natural Heavy Metals Containing Soil in Shield Tunneling Site

- Purge of Arsenic-contaminated Soil in Slurry Shield Tunneling with Classification and Magnetic Separation -

今井亮介* 白石祐彰** 小河篤史* 吉田英典***

要旨

近年、シールド工事で砒素や鉛等の自然由来の重金属に遭遇する問題が顕在化している。これらを汚染土壌等として場外搬出処分すると膨大な費用がかかるとともに、最終処分場への負荷が増大することが問題となる。そのため、シールド工事で遭遇する重金属含有土壌の浄化技術の開発と実用化の検討を行った。本技術は、泥水シールド工法の処理プラントに土壌の分級洗浄設備、および砒素や鉛等の重金属を吸着する鉄粉を混合攪拌して回収する設備を付加して、工事で発生する排泥の浄化を行うものである。今回は、東北地方のシールド工事で発生した土壌溶出量基準を超過する砒素を含む排泥を用いて、室内試験と実験プラントによる実規模実験を実施した。その結果、本技術で排泥に含まれる砒素を基準以下まで浄化できることを確認した。また、実規模のシールド工事を想定して、処理プラントの検討と処理費用の算定を行った。その結果、一定量以上の浄化処理を行えば、汚染土壌等として場外搬出処分する方法より、工事費用を削減できることを確認した。

キーワード：泥水シールド、自然由来重金属、砒素、浄化、分級洗浄、鉄粉

1. はじめに

我が国には、砒素や鉛等の自然由来による重金属を含む土壌が広く分布している。そのため、建設発生土や工事排水に含まれる自然由来の重金属等による環境リスクの問題は 1990 年代より増加し始め、2003 年に土壌汚染対策法が施行される中で、より注目されるようになった。2010 年には、同法の改正で自然由来重金属等含有土壌が規制対象となり、今日、これらの問題の解決は建設工事における必須の検討課題となっている¹⁾。

土壌汚染対策法は、一定の手順によって基準不適合土壌が存在するとみなされた土地を要措置区域等と指定し、その区域の土壌に対する措置の方法や搬出される汚染土壌の管理方法を定めている。そのため、トンネル等のこれら区域に指定されない土地から発生する土壌は同法の対象外として扱われる。しかし、同法の改正時には、区域に指定されない土地であっても、基準不適合土壌の運搬やその処理に当っては汚染土壌と同等の扱いをするべきであるとの施行通知が出されている（土壌汚染対策法

施行通知、環水大土発 100305002 号、平成 22 年 3 月 5 日)。また、多くの自治体の条例では基準に適合しない建設発生土の埋め立てを認めていない。そのため、基準不適合土壌は、同法で許可を得た汚染土壌処理施設へ搬出されることが多い。

また、建設汚泥の再生利用に関するガイドライン（建設汚泥の再生利用に関するガイドラインの策定について、国官技第 46 号、平成 18 年 6 月 12 日）では、土壌環境基準、または土壌汚染対策法に基づく土壌含有量基準に適合しない建設汚泥は再生利用の対象外とされている。そのため、基準に適合しない建設汚泥はセメント工場や管理型の処分場等に搬出されることが多い。

このような状況の中で、シールド工事等の建設現場で基準を超過する土壌や建設汚泥が発生した場合、その処分に多額の費用がかかってしまうことになる。

そこで、筆者らは多量の建設発生土や建設汚泥が発生するシールド工事のコスト削減と最終処分場への負荷の低減を目的とし、発生土や汚泥から有害な重金属を取り除く浄化技術の検討を行った。

* 土木本部環境技術室 ** 技術研究所環境研究グループ *** 東日本支社土木第 1 部

その中で、重金属等による汚染土壌の洗浄プラントと機能が類似する泥水シールド工法のプラントに比較的安価に浄化設備を付加することができることに着目した。

そこで、分級洗浄設備と重金属を吸着する鉄粉の混合攪拌と磁力選別機による回収設備を処理プラントに付加して、泥水シールド工事で発生する排泥を浄化する技術の検討を行った。さらに、その技術の実証実験を行い、その効果と適用性を検証した。また、試験結果に基づいて、実規模プラントの設計とコスト試算を行ったので、これらの内容を報告する。

2. 浄化技術の概要

2.1 浄化設備の全体構成

一般的に泥水シールド工法の処理プラントでは、シールドマシンから輸送される排泥を振動ふるいとサイクロンを用いて、粗粒分（75 μm 以上）と細粒分（75 μm 未満）を含む泥水に分離する。粗粒分は一次処理土としてプラントから排出され、建設発生土として盛土等の埋め立てに利用される。細粒分を含む泥水は貯泥槽に貯蔵され、再びシールドマシンの切羽に循環されるが、余剰分はフィルタープレス等の脱水機械で処理され、二次処理土（脱水ケーキ）として排出される。これらの二次処理土は産業廃棄物（建設汚泥）として処理される。

本技術は、泥水シールド工法の処理プラントに分級洗浄設備と鉄粉の混合攪拌設備と回収設備を付加するものである。粗粒分は分級洗浄設備で分級洗浄し、細粒分を含む泥水には鉄粉を混合攪拌した後、磁力選別機により鉄粉を回収する。これら2つの機能により、土壌中の重金属を土壌溶出量基準以下まで低減させることができる。排泥の処理プラントの概要を図-1に示す。

2.2 分級洗浄

一般的に自然由来の重金属含有土は人為的な汚染土壌に比べて、砒素等の重金属の含有量は少ない。土壌溶出量（環境省告示第18号）が環境基準の数倍程度であり、土壌含有量（環境省告示19号）が基準を超えることは殆どない。また、粒径が細くなるほど単位重量当たりの砒素の溶出量は多くなる。そのため、75 μm 未満の細

粒分を分離すれば、諸基準を超過することは少ないと考えられている。しかし、プラントで用いられるサイクロンで分離した一次処理土は75 μm 未満の細粒分が若干混在し、土壌溶出量基準を超過してしまうおそれがある。そのため、一次処理土を分級洗浄機（スパイラルウォッシュャー）で再洗浄して細粒分を取り除く。

2.3 鉄粉浄化処理

水中で鉄粉は、その表面に含水酸化鉄を生成する。含水酸化鉄は砒素や鉛等の重金属イオンを捕捉しながら結晶化する。この性質を利用し、75 μm 未満の細粒分を含む泥水に、砒素や鉛を吸着する鉄粉を混合攪拌した後、ドラム型磁力選別機により鉄粉を回収する。鉄粉による重金属浄化の概念を図-2に示す。

実証実験では、JFE ミネラル株式会社が開発した重金属吸着鉄粉（MSI-X）を使用した。本製品による自然由来の砒素を含む土壌（土壌溶出量0.030mg/L）のビーカーテストでは、鉄粉を10回転用いて、すべての処理土壌の分析で溶出量を環境基準以下に低減できたと報告されている。重金属吸着鉄粉（MSI-X）を写真-1に、その物性を表-1に示す²⁾。

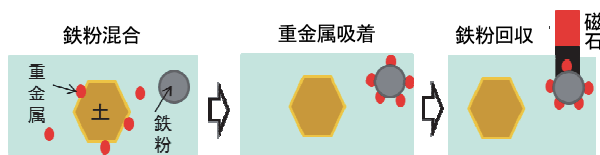


図-2 鉄粉による浄化の概念

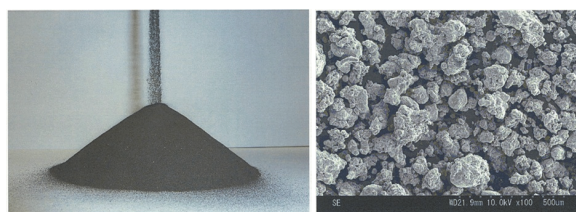


写真-1 重金属吸着鉄粉（MSI-X）

表-1 重金属吸着鉄粉（MSI-X）の物性

成分	外観	粒径	嵩比重	pH
Fe98%以上	暗灰～黒色	Av.130 μm	Av.3.0g/cm ³	6～8

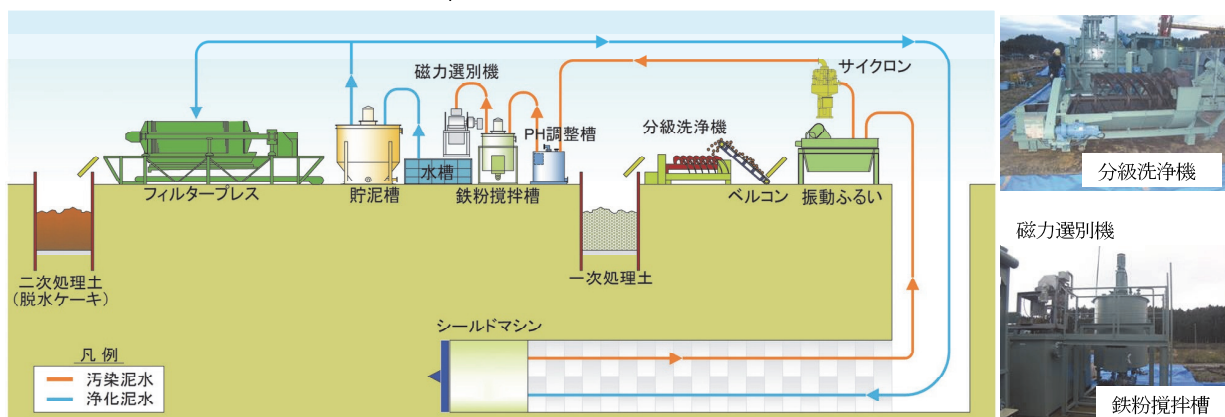


図-1 処理プラントの概要

3. 室内試験及び実証実験

3.1 浄化対象土壌

室内試験および実証実験の試料には、東北地方の泥水シールド現場で発生した一次処理土とサイクロンを通して泥水を再び混合し、シールドマシンから圧送されてきた排泥を再現したものを使用した。再現した排泥の物性値を表-2に、排泥中の土粒子の分析値を表-3、図-3に示す。なお、排泥の pH は 9.2 と高い値を示した。排泥に裏込材のセメント分が若干混入していたためと考えられる。

表-2 再現した試験用排泥の物性値

項目		一次処理土	泥水
混合前	比重	1.8t/m ³	1.2t/m ³
	混合比	体積比	1
		重量比	1
混合後	pH	9.2	
	含水率	68%	

表-3 再現した排泥の土粒子の分析値

項目	分析値	基準値	分析方法
土壌溶出量 (砒素及びその化合物) (mg/L)	0.012~0.015	0.01	環境省告示第18号
土壌含有量 (砒素及びその化合物) (mg/kg)	2.5	150	環境省告示第19号
土壌中の鉄の全含有量 (mg/kg)	35000 (3.5%)	なし	底質調査法
粒度分布	図-3 参照		レーザー法+ふるい法

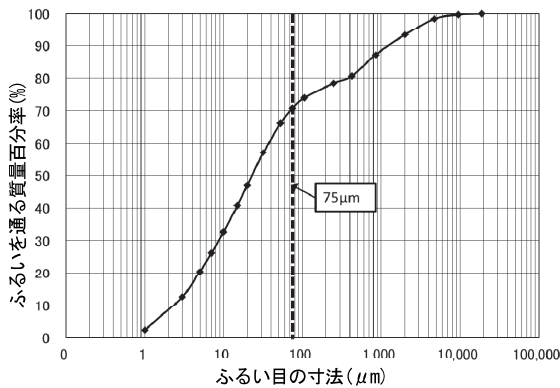


図-3 排泥の粒度分布

3.2 室内試験

実証実験に先立ち、室内試験を行い、分級洗浄と鉄粉の混合・磁力回収の効果および pH の調整による鉄粉の浄化効果を確認した。

a. 分級試験

(a) 試験目的と方法

分級洗浄による浄化の効果を確認するために、以下の手順で試験を行った。

- i. 2L ポリ容器に再現した排泥を 1,290g 入れ、2 時間振とうする

- ii. 泥水を目開き 75μm 篩でふるう

- iii. 篩を通過した泥水を遠心分離機により、土壌と水に分離する

- iv. 分級した土壌の砒素溶出量を分析する

(b) 試験結果

分級した土壌の分析結果を図-4に示す。粗粒分(75μm 以上)の土壌の砒素溶出量は 0.006mg/L と土壌溶出量基準を下回る結果が得られた。一方、細粒分(75μm 未満)の土壌の溶出量は 0.038mg/L と高い値を示した。

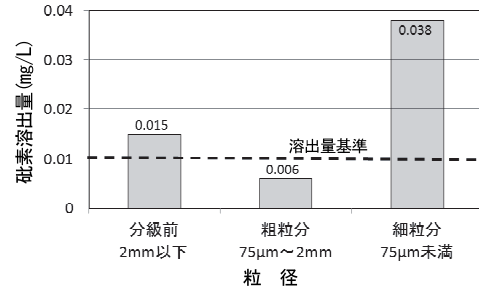


図-4 分級した土壌の分析結果

b. 鉄粉による砒素浄化試験

(a) 試験目的と方法

砒素の濃度が高い値を示す細粒分(75μm 未満)の鉄粉による浄化効果を確認するために以下の手順で試験を行った。

- i. 500mL ポリ容器にサイクロンを通して泥水 240g を入れ、泥水中の土粒子(乾土)に対し、重量比で 5%、10%の鉄粉(MSI-X)を入れる
- ii. ポリ容器を 10 分振とうする
- iii. 泥水をポリバケツに入れ、磁石で鉄粉を取り除く
- iv. 遠心分離機により泥水を土壌と水とを分離する
- v. 磁石で取り除くことのできなかった微鉄粉が遠心分離により沈降管の底に沈むので、沈降管上部の土壌を採取する
- vi. 分離した土壌の砒素溶出量を分析する

(b) 試験結果

鉄粉による浄化処理を行った土壌の分析結果を図-5に示す。鉄粉の添加に比例して、砒素の溶出量が低減することを確認した。5%の添加では土壌溶出量基準を満たすことはできなかったが、10%添加すれば基準を下回る結果が得られた。

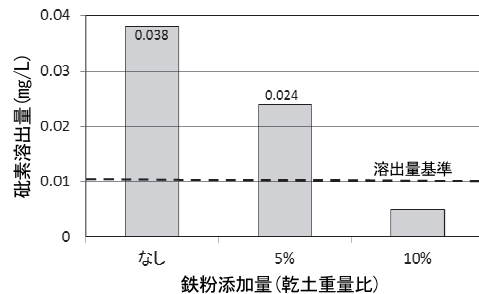


図-5 鉄粉による浄化処理した土壌の分析結果

c. pH調整による鉄粉量低減試験

(a) 試験目的と方法

前述した鉄粉による浄化試験で、細粒分の砒素の浄化効果が確認された。しかしながら、試験に使用した試料のpHが9.2と高いため、鉄粉の添加量を低減することにより浄化費用の低減を図ることを目的とし、鉄粉処理にpHの調整を合わせて砒素の浄化効果を確認した。以下に試験方法を示す。

- i. 500mL ポリ容器にサイクロンを通した泥水240gを入れ、64%硫酸を添加し、泥水のpHを7、6、4付近に調整し、泥水中の土粒子（乾土）に対して、重量比で5%の鉄粉（MSI-X）を入れる
- ii~vi. 「b. 鉄粉による砒素浄化試験」と同じ

(b) 試験結果

pH調整と鉄粉による浄化処理を行った土壌の分析結果を図-6に示す。試料を中性（pH7）に調整し、鉄粉を5%添加した場合、細粒分の砒素溶出量が基準を下回る結果（0.006mg/L）が得られた。また、酸性（pH6および4）に調整すると、さらに低減する結果（定量下限値0.005mg/L以下）が得られた。

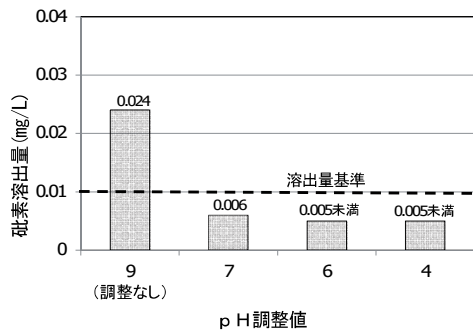


図-6 pH調整と鉄粉処理を行った土壌の分析結果

3.3 実証実験

前述する室内試験で、分級洗浄と鉄粉混合・回収による自然由来の砒素含有土壌の浄化効果を確認できた。そこで、実工事を模擬したプラントによる実証実験を実施した。

a. 実験方法

(a) 実験概要

実証実験では、泥水シールド工場の排泥処理の一連の工程を模擬した実験プラントを用いて、シールド現場から輸送した砒素を含む排泥約34m³の浄化処理を行った。実験概要を表-4に、実験プラントを写真-2に示す。実験では、室内試験と同様にpH調整と鉄粉の添加量による浄化効果を確認するとともに、磁力選別機を通過する泥水の流量と回数を変化させ、鉄粉の回収能力を把握した。

(b) 実験手順及び使用機械

図-7に実験のフローを示す。

表-4 実証実験概要

期間	平成28年11月24日～12月24日	
実験場所	宮城県大崎市奥村組三本木倉庫	
試験試料	東北地方の泥水シールド現場から輸送した排泥および一次処理土（物性値は3.1参照）	
浄化処理量	排泥約2m ³ ×17ケース=34m ³	
パラメータ	鉄粉添加量（%一乾土重量）	なし、5、10
	鉄粉攪拌時間	10分
	pH調整	なし、7、4
	磁力選別機通過時間（L/min）	50、100、150
	同通過回数	1回、2回



写真-2 実証実験プラント

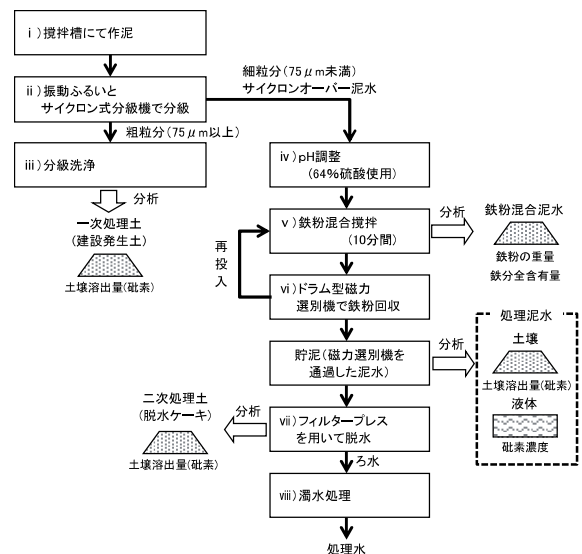


図-7 実証実験処理フロー

i) 作泥

攪拌槽を用いて、現場より搬入した一次処理土と細粒分を含む泥水を混合攪拌（混合比：3.1参照）し、工場で発生した排泥を再現する（写真-3）。

ii) 分級

振動ふるいとサイクロンを用いて、一次処理土と泥水と分離する（写真-4）。

iii) 分級洗浄

分級洗浄機（スパイラルウォッシャー）を用いて、一次処理土を分級洗浄する（写真－5、6）。

iv) pH 調整

pH 調整槽にて、サイクロンで分離された泥水が所定の pH になるまで、希硫酸を添加する（写真－7）。

v) 鉄粉混合攪拌

pH を調整した泥水に鉄粉（MSI-X）を投入し、鉄粉攪拌装置を用いて、10分間攪拌する（写真－8、9）。

vi) 鉄粉回収

鉄粉を混合攪拌した泥水を、所定の流量でドラム型磁力選別機に投入し、砒素を吸着した鉄粉を回収する。本実験では、磁選機を通過した泥水を再度投入して鉄粉の回収効果を確認した（写真－10）。

vii) 脱水

フィルタープレスを用いて、磁力選別機を通過した泥水を脱水して、二次処理土（脱水ケーキ）を排出する（写真－11、12）。

viii) 濁水処理

フィルタープレスから排出されるろ水は濁水処理装置で水処理を行い、分級洗浄設備で再利用した。



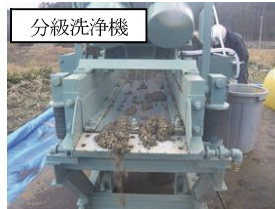
写真－3 作泥(排泥再現)



写真－4 分級



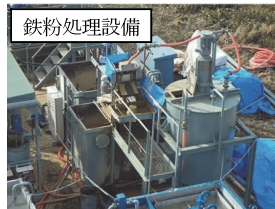
写真－5 分級洗浄



写真－6 分級洗浄処理



写真－7 pH調整



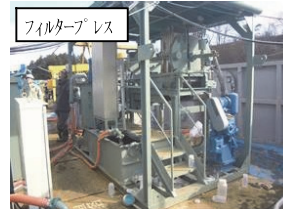
写真－8 鉄粉処理



写真－9 鉄粉攪拌翼



写真－10 鉄粉回収(磁力選別)



写真－11 脱水



写真－12 二次処理土

(c) 分析

実験での分析対象と分析項目を表－5に示す。

表－5 分析対象と分析項目

分析対象	分析項目
一次処理土	砒素の土壌溶出量（環境省告示第18号※1）
磁力選別機を通過した泥水	①遠心分離器で土壌と液分に分離 ②分析 土壌分：砒素の土壌溶出量（同上） 液分：砒素濃度（JIS K 0162 61.2）
二次処理土	砒素の土壌溶出量（同上）
鉄粉回収量※2	泥土混じり鉄粉の重量 泥土混じり鉄粉の鉄全含有量（底質調査法）

※1 土壌溶出量 0.005mg/L 未満の値は測定器の検出値であり、分析会社の定める定量下限値以下である。

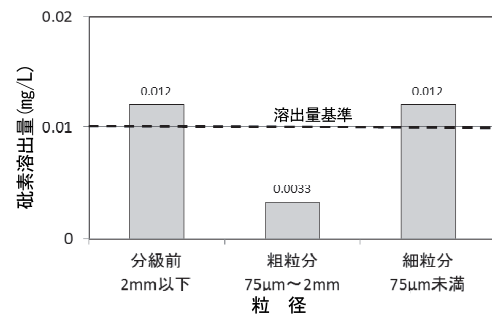
※2 磁選機から排出される鉄粉には、土粒子が混在するため、鉄粉の回収量は泥土混じりの鉄粉の重量と鉄の全含有量より、以下の計算式で算出している。

$$\text{鉄粉回収量} = \text{泥土混じり鉄の回収重量 (kg-乾土当り)} \times \text{鉄粉の全含有量 (\%)} \times \{97\% (\text{鉄粉中の鉄分配比率}) \div 85\% (\text{使用前鉄粉の鉄全含有量の分析結果})\}$$

b. 実験結果

(a) 分級洗浄効果

振動ふるい、サイクロン、分級洗浄設備により排出された粗粒分（75μm 以上）と泥水に含まれる細粒分（75μm 未満）の砒素の溶出量の分析結果を図－8に示す。洗浄分級された粗粒分の溶出量は 0.0033mg/L（6検体 0.0030～0.0039mg/L の平均値）であり、元土の 1/3～1/4 程度まで低減された。



図－8 分級した土壌の砒素溶出量

(b) pH 調整と鉄粉処理による効果

サイクロンを通過した細粒分を含む泥水の pH 調整と鉄粉処理を行い、土粒子分と液分の砒素分析を行った。その結果を図－9に示す。砒素は高アルカリでは溶解しやすくなる。そのため、pH を 7 に調整するだけで砒素の測定値は 1/3 程度に低減した。更に鉄粉処理を行うことにより、基準値の 1/10 程度まで低減することが確認された。

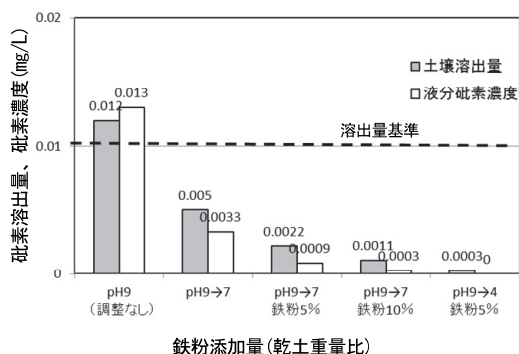


図-9 泥水の砒素分析結果

(c) 磁力選別機による鉄粉の回収効率

ドラム型磁力選別機を通過する鉄粉を混合した泥水の流量を変える(50、100、150L/min)とともに、計2回通過させて、混合した鉄粉量に対する回収率を求めた。鉄粉の回収率を図-10に示す。

1回目の通過では流量が50L/minのケースで平均86.1%の回収結果が、100L/minのケースで最も回収率が高い(平均92.1%)結果が得られた。測定のパラッキも配慮し、今回の試験で使用した磁力選別機は100L/min以下の流量であれば85%以上の鉄粉の回収が行えると考えられる。

磁力選別機を通過した泥水を再び、同機に通した場合は、泥水の流量に係わらず5~6%の鉄粉を回収することを確認した。

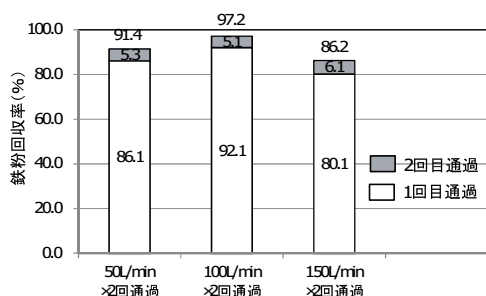


図-10 磁力選別機による鉄粉の回収率

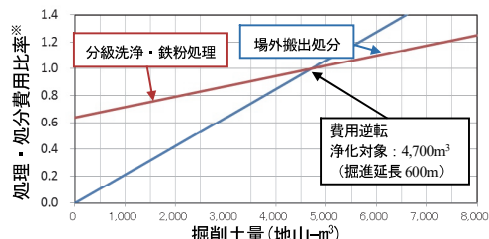
4. 実工事での浄化費用の算定

前述した実験の結果を踏まえて、実工事の処理プラントの設計を行い費用の算定を行った。想定する泥水シールド工事モデルの概要を表-6に示す。

費用算定は、泥水処理プラントに付加する砒素の浄化設備の損料をインシヤルコストとし、鉄粉他の薬剤費、運転管理費、浄化した土壌の運搬・処分費をランニングコストとして加算した。そして、同量の掘削土を汚染土壌等として運搬・処分する場合の費用と比較した。費用の比較結果を図-11に示す。費用比較では4,700m³(掘進延長約600m)以上の砒素汚染土を浄化処理した場合、工事費用が安くなる結果となった。

表-6 想定する泥水シールド工事モデルの概要

項目		数量他
シールド外径		3.33m
シールド延長		4,500m
掘削量(地山)		39,000m ³
プラント排泥処理量		170m ³ /h
プラント設置期間		23ヶ月
土質	粒度分布	粗粒分(75μm以上) 70%
		細粒分(75μm未満) 30%
土壌の汚染(砒素)		土壌溶出量基準の3倍程度
鉄粉	添加量(MSI-X)	10%-乾土
	転用回数	5回



金額を1.0とした場合の比率を示す。
※分級・鉄粉処理と場外搬出処分が同じとなる金額を1.0とした場合の比率
図-11 浄化費用の比較

5. おわりに

分級洗浄と鉄粉を用いた浄化処理による砒素を含むシールド排泥の実証実験を実施し、以下の結果を得た。

- i. 分級前の土壌の砒素溶出量に対して、分級洗浄により、粗粒分の溶出量を1/3~1/4程度に、pH調整と鉄粉処理により、細粒分の溶出量を1/10程度に低減することができた
- ii. 磁選機により、混合した鉄粉の85%以上を回収することができた
- iii. 室内でのピーカー試験と実証実験では同等の砒素分析結果が得られたことより、今後はピーカー試験で鉄粉添加量等のプラント設計が行える
- iv. 費用試算では、一定の量(4,700m³)以上の汚染土壌を本技術の処理の対象とした場合、場外搬出処分を行うより、コストを削減できる

以上より、本技術は実工事での適用性が高いと考えられる。ただし、その適用性は対象土壌の粒度分布等の諸条件に左右されるため、実際の工事では、室内試験による適用性の確認と浄化設備の個別設計を行う必要がある。

今後は、自然由来重金属に遭遇したシールド工事において、本技術を発注者に提案していく所存である。

【参考文献】

- 1) (独)土木研究所、(一財)土木研究センター、地盤汚染対応技術検討委員会、建設工事で発生する自然由来重金属等含有土対応ハンドブック、大成出版社、2015
- 2) 石神大輔、渡辺哲哉、「鉄粉『MSI-X』を用いたシールド工事等の自然由来重金属への対応」、環境浄化技術、2014.9-10、pp.81-82

高強度鉄筋を用いた既設 RC 柱の曲げ補強工法の開発

－耐震補強性能の評価と施工の効率化－

Development of Axial Reinforcement Method for Existing Reinforced

Concrete Column Using High Strength Reinforcing Bars

- Seismic Strengthening Performance Evaluation and Construction Efficiency Improvement -

山口 治* 三澤孝史** 廣中哲也** 松本恵美*

要 旨

河川内や建築限界近傍の RC 柱に対して薄層の耐震補強が可能な曲げ補強工法を開発した。柱の軸方向および周方向の補強鉄筋に高強度鉄筋を使用して、吹付けモルタルで既設柱と一体化することで薄層の補強を実現した。これにより RC 巻き立て工法に比べ、補強厚さを 1/3 程度に低減できることを確認した。また、軸方向鉄筋先端を突起加工することで、定着性能向上と既設鉄筋の損傷リスク低減を可能にした。さらに、プレミックスの吹付けモルタルの使用により型枠作業が不要となり、施工の効率化と品質の安定を実現した。

耐震性能評価のため正負交番載荷実験を実施した結果、無補強試験体に比べて最大荷重が 1.5 倍、降伏後の変形性能が 1.1 倍程度となり、既存の設計式による計算値との整合を確認した。

キーワード：耐震補強、曲げ補強、高強度鉄筋、吹付けモルタル、プレミックス

1. まえがき

1995年に発生した阪神淡路大震災以降、RC造の高架橋や橋梁における柱のせん断耐力向上を目的とした耐震補強が進められ、現在までにせん断補強の耐震化が完了しつつある。一方、構造物における使用環境は建設当時から変化し、大量輸送や車両高速化に伴う荷重の増加、設計地震動の変更による要求耐力の上昇により、既存柱の曲げ耐力が不足し、補強が必要な事例が生じている。

曲げ補強工法は、軸方向鉄筋を配置した RC 巻き立て工法や、端部を基部または頂部に定着させ一体化を図った鋼板巻き立て工法が一般的である。RC 巻き立て工法は、鋼板巻き立て工法と比較して安価に補強できるが、補強厚さが厚く、河積阻害や建築限界の制約がある柱での適用が困難なため、補強厚さの薄い巻き立て工法が求められている。

そこで、補強鋼材を普通鉄筋から高強度鉄筋に変更して小径化を図り、高耐久性の吹付けモルタルで既設柱と一体化することで、補強の厚さが薄くて軽量で、型枠省略による工程短縮とコスト縮減が可能な RC 柱の曲げ補強工法（以下、本工法）を開発した。

耐震補強工法の性能確認として、軸方向鉄筋の定着性

能試験および実大橋脚を想定した壁式橋脚の 1/4 縮小モデルによる正負交番載荷実験を実施した。また、施工の効率化と品質の安定を目的に、吹付けモルタルのプレミックス化に向けた配合検討と施工試験を実施した。

本稿では、本工法の耐震性能確認のための正負交番載荷実験結果と施工の効率化に向けた吹付けモルタルのプレミックス材料の検討結果を報告する。

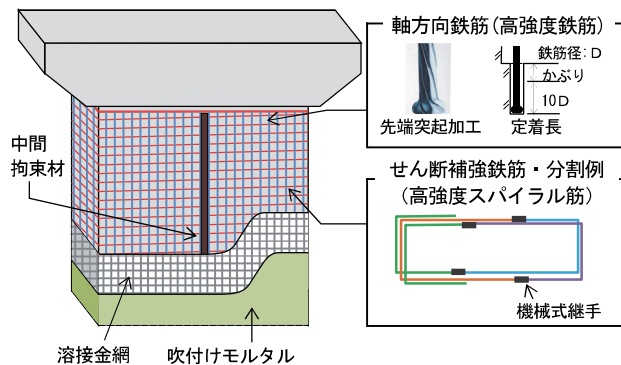


図-1 高強度鉄筋を用いた曲げ補強工法の概要

*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. 工法概要

図-1に、本工法の補強構造の概要図、図-2に補強部断面詳細図を示す。既設RC柱の外側に配置する軸方向鉄筋およびせん断補強鉄筋には高強度鉄筋を用い、吹付けモルタルで既設柱と一体化させる。軸方向鉄筋には、降伏強度 1,275N/mm² の高張力鋼（以降、ウルボン）または降伏強度 685N/mm² の高強度鉄筋（以降、USD 685）を使用する。せん断補強鉄筋は、スパイラル状に加工したウルボンを使用する。高強度鉄筋を使用することにより、普通鉄筋を使用する場合に比べ、鉄筋径を小さくできるため補強厚さが薄くできる。軸方向鉄筋は、短い定着長で所定の定着力を確保するため、鉄筋の先端を突起状に加工し、専用の定着モルタルで基部に定着する。軸方向鉄筋の定着長は、試験により鉄筋径の10倍を確保することで十分な定着力を發揮することを確認した。また、高強度鉄筋は、普通鉄筋に比べて削孔径を10%程度低減でき、削孔による既設鉄筋の損傷リスクを抑えることができる。せん断補強鉄筋は、当社開発技術である既設RC柱のせん断補強工法「スパイラル筋巻立法」により、工場で加工した分割ピースのせん断補強鉄筋を現場でスパイラル状に組み立てる。接合部分は機械式継手とすることで施工性が向上した。

また、断面の縦横比が大きい壁式橋脚に対しては、中間拘束材を用いることで、長辺の中間部でのせん断補強鉄筋のはらみ出しを抑制し、所定の曲げ耐力を發揮することが実験により確認できた。

吹付けモルタルには、特殊混和剤や合成短繊維などの収縮低減材料を使用して、ひび割れ抵抗性と耐久性の向上を図った。現地で練り混ぜて吹き付けることで、補強部が薄くなり、型枠組立・解体の省略による施工の効率化が可能となる。

さらに、全ての工程において人力施工を標準としており、狭隘箇所や揚重困難な橋桁下部での施工を可能にした。RC巻き立て工法に比べて、補強厚さが1/3程度に低減されるほか、鋼板巻き立て工法に必要な揚重機械が不要となり、狭隘箇所でも適用できるため、施工性の向上と適用場面の拡大が可能となる。

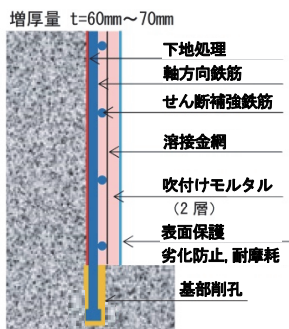


図-2 補強部断面詳細図



写真-1 引抜き試験状況

3. 力学的性能試験

3.1 定着性能試験

軸方向鉄筋の定着性能確認のため、補強鉄筋の種類（ウルボン、USD 685）、先端形状（球形突起あり、突起なし）、定着長（10D、20D D：鉄筋径）をパラメータとした引抜き試験を実施した（写真-1）。試験は、鉄筋コンクリートブロック試験体の中央にかぶりを除く定着長を確保した鉄筋を後施工で定着させ、油圧ジャッキで引張荷重を作用させた。鉄筋の抜け出しを確認し、規格降伏強度以上で荷重の最大点を確認して終了とした。

試験結果を表-1に、ウルボンの引張応力-変位関係を図-3にそれぞれ示す。先端の突起がない場合は鉄筋と定着材の付着力不足により規格降伏応力に達する前に鉄筋が抜け出したのに対して、突起がある場合は、ばらつきがあるものの、定着長10D、20Dともに抜け出しが起らず、規格降伏応力を超えて鉄筋が破断した。よって、軸方向鉄筋の先端に突起を設けて、かぶりと10Dを加えた長さを定着長として確保する仕様とした。

表-1 定着性能試験結果

試験ケース	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5
鉄筋種類	ウルボン (φ12.6mm)			USD685 (D10)	
降伏強度	1,275N/mm ²			685N/mm ²	
先端形状	突起なし	球形突起		球形突起	
定着長	20D	10D	20D	10D	
最大引張応力(N/mm ²)	920	1,344	1,356	862	858
破壊形態	鉄筋抜け出し	鉄筋破断	鉄筋破断	鉄筋破断	鉄筋破断

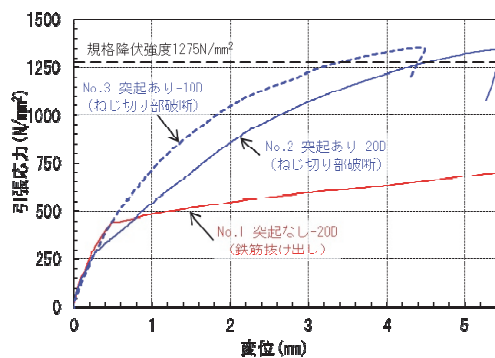


図-3 引張応力-変位関係(ウルボン)

表-2 正負交番荷重実験ケース

ケース	既設部	
	引張鉄筋	せん断補強鉄筋
N	D13(SD345)、D25 引張鉄筋比 0.45%	D6(SD295A)、6本 200mmピッチ、千鳥配置 せん断補強鉄筋比 0.06%
曲げ補強部		
ケース	引張鉄筋	せん断補強鉄筋
B1	ウルボンU7.1 13本 (SBPDL 1275/1420) 補強筋比 0.07%	ウルボンU7.1 (SBPDL 1275/1420) 2本 75mmピッチ 機械式継手 補強筋比 0.07%
B2	D10(USD685) 13本 補強筋比 0.13%	同上
B3	ウルボンU7.1 13本 (SBPDL 1275/1420) 補強筋比 0.07%	ウルボンU7.1 (SBPDL 1275/1420) 2本 75mmピッチ 継手なし 補強筋比 0.07%

3.2 正負交番載荷実験および実験ケース

3.2.1 試験体製作

正負交番載荷実験の試験体は、実大の鉄道橋脚を1/4に縮小した試験体（断面寸法 1.5m×0.5m）を用いた。実験ケースを表-2に示す。

既設橋脚を想定した補強なしの試験体（ケース N）と、これに曲げ補強した試験体3体（ケース B1~B3）の計4体について正負交番載荷実験を行った。補強軸方向鉄筋は、ケース B1、B3 でウルボンを、ケース B2 で USD685 を使用し、基部への埋め込み側の鉄筋先端に突起を設けて定着させた。せん断補強鉄筋は、全ての補強ケースでウルボンのスパイラル筋を用いた。実大橋脚での補強工事では継手が必要なることを考慮し、ケース

B1、B2 はネジ式の機械式継手、ケース B3 は継手なしとすることで、継手が耐震性能に与える影響を確認した。ケース N の構造図を図-4、配筋断面図を図-5、配筋側面図とひずみゲージ位置を図-6にそれぞれ示す。

ケース N は、曲げ破壊先行であるが、現行の耐震基準では曲げ耐力が不足する柱となるよう配筋を決定した。ひずみゲージは、軸方向鉄筋の柱下端から上方に900mm、基礎内部の下方500mmの範囲と、帯鉄筋には柱下端から上方に800mmの範囲に取り付けた。

ケース B1~B3 の補強配筋断面図を図-7、補強軸方向鉄筋とひずみゲージ位置を図-8、せん断補強鉄筋とひずみゲージ位置を図-9に示す。補強軸方向鉄筋量は、「鉄道構造物等設計標準・同解説（コンクリート構造

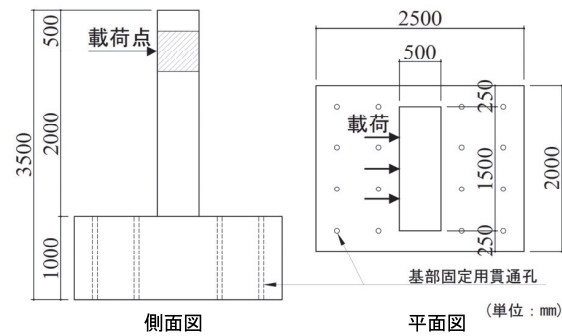


図-4 試験体構造図（ケース N）

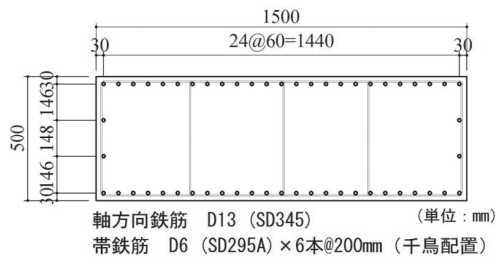


図-5 配筋断面図（ケース N）

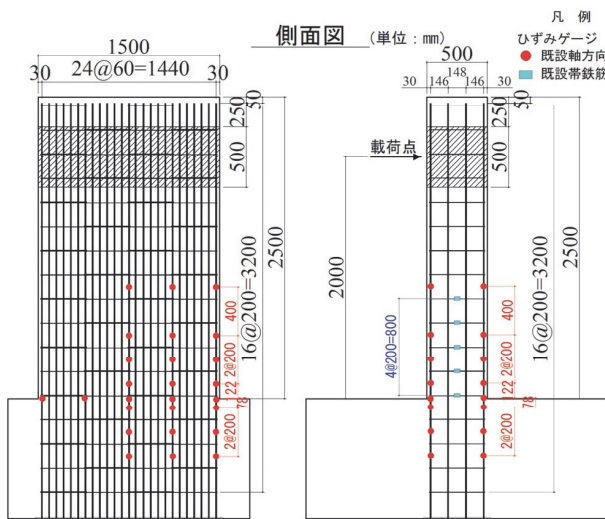


図-6 既設配筋側面図・ひずみゲージ位置図（ケース N）

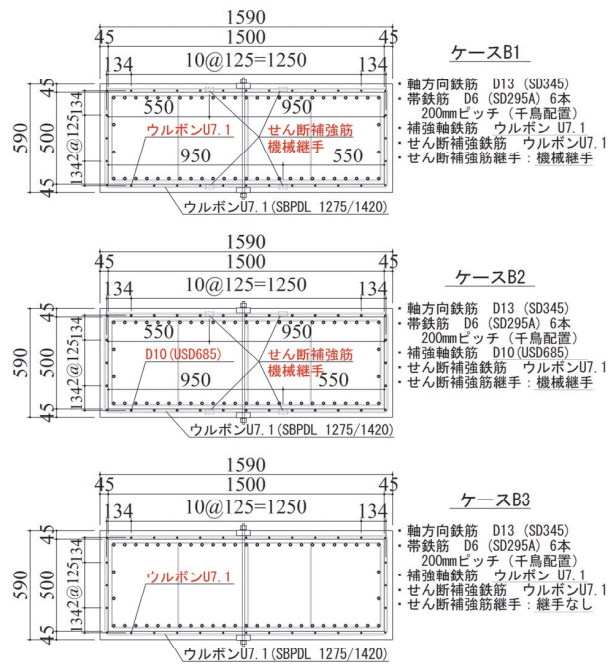


図-7 補強配筋断面図（ケース B1~B3）

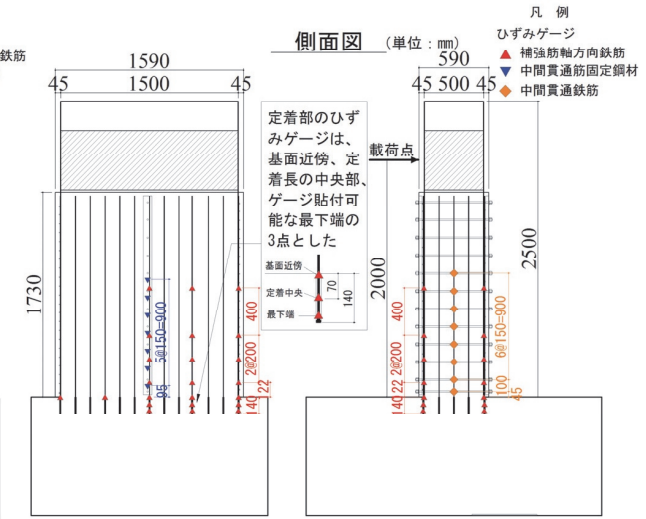


図-8 補強軸方向鉄筋・ひずみゲージ位置図（ケース B1）

物)」²⁾ (以下、RC標準)により、各ケースで曲げ耐力が同程度になるよう計画した。また、曲げせん断耐力比は、ケース N を含めた 4 体で同程度になるよう配置した。各試験体耐力の計算結果を表-3に示す。

コンクリートの配合は、実大橋脚を想定して既設試験体基部 30N/mm²相当、柱部 27N/mm²相当とした。吹付けモルタルは、「高張力スパイラル筋巻立工法」¹⁾と同様に、現場練り混ぜ時のスランプを 10.5cm±2.5cm、設計強度 50N/mm²とした。コンクリートの配合を表-4、吹付けモルタルの配合を表-5に示す。

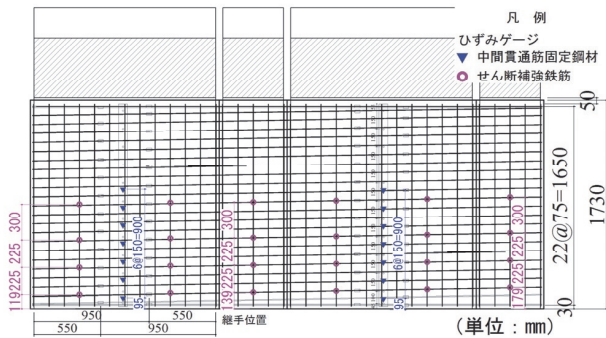


図-9 せん断補強鉄筋・ひずみゲージ位置図 (ケース B1)

表-3 試験体の耐力試算

	曲げ耐力 (kN・m)	せん断耐力 (kN)	曲げせん断 耐力比
ケースN	662	596	1.80
ケースB1	1,036	919	1.77
ケースB2	1,032	936	1.82
ケースB3	1,036	919	1.77

試算条件

- ・コンクリート f_{ck} =30N/mm²
- ・鉄筋の降伏強度は規格値を使用
- ・せん断スパン:2m
- ・せん断補強筋のウルボンの設計降伏強度750

表-4 コンクリートの配合

使用箇所 種類	単位量(kg/m ³)					
	セメント C	水 W	細骨材1 S1	細骨材2 S2	粗骨材 G	混和剤 A
基礎部 30-18-20N	324	170	594	253	956	3.24
柱部 27-18-13N	296	195	625	161	979	2.96

セメント: 普通ポルトランドセメント、密度3.16g/cm³
 細骨材1: 君津産陸砂、密度2.57g/cm³、吸水率2.40%、粗粒率2.10
 細骨材2: 津久見産砕砂、密度2.63g/cm³、吸水率2.37%、粗粒率3.75
 粗骨材: 両神産砕石、密度2.71g/cm³、吸水率0.56%、粗粒率6.53
 混和剤: AE減水剤、密度1.04g/cm³

表-5 吹付けモルタルの配合

使用箇所	合成短繊維 容積比 (%)	単位量(kg/m ³)						
		水 W	セメント C	混和材 1 EA	混和材 2 SF	細骨材 S	混和剤 1 (C×%) (1.5%)	混和剤 2 (B×%) (0.6%)
補強部	0.05	240	532	43	53	1413	7.985 (1.5%)	3.769 (0.6%)

セメント: 普通ポルトランドセメント、密度3.16g/cm³
 混和材1: 膨脹材、密度2.92g/cm³
 混和材2: シリカフェーム: 密度2.20g/cm³、比表面積10m²/g以上
 細骨材: 富津産山砂、密度2.61g/cm³、吸水率1.28%、粗粒率2.44
 混和剤1: 収縮低減剤: 密度1.02g/cm³
 混和剤2: 高性能AE減水剤: 密度1.05g/cm³
 合成短繊維: ポリプロピレン樹脂、密度0.91g/cm³、繊維長6mm、13dt(g/10km)

断面寸法の縦横比が大きい柱に対して、せん断補強筋による軸方向鉄筋の座屈制御を確実にするため、せん断補強筋の外側に中間拘束材 (PL75mm×28mm, SS400) を両側に配置し、柱の長辺中央部に設けた貫通孔にφ13mmのPC鋼棒 (以降、中間PC鋼棒) を通して両面からナットで拘束した。

写真-2に試験体製作状況を示す。フォーミングに削孔した孔に軸方向鉄筋を建て込み、定着材により定着した(写真-2(a))。続いて、中間PC鋼棒の挿入・定着、せん断補強筋の設置、中間拘束材の取り付け、溶接金網の設置の順に施工した(写真-2(b))。その後、吹付け定規を設置し、吹付けモルタルを2層に分けて施工した(写真-2(c))。吹付け後、1週間の湿潤養生を経て試験体を完成させた(写真-2(d))。

3.2.2 実験方法

写真-3に荷重装置を示す。試験体をPC鋼棒(φ32mm)により反力床に固定し、柱上部から鉛直荷重用油圧ジャッキにより上部工相当の一定軸力1.0N/mm²を荷重した状態で、水平荷重用油圧ジャッキの伸縮により交番荷重した。鉛直荷重用油圧ジャッキは、スライダを支承を介して荷重フレームに設置しており、試験体の水



(a) 軸方向鉄筋の設置 (b) せん断補強鉄筋の組立



(c) モルタル吹付け (d) 補強完了

写真-2 試験体製作状況

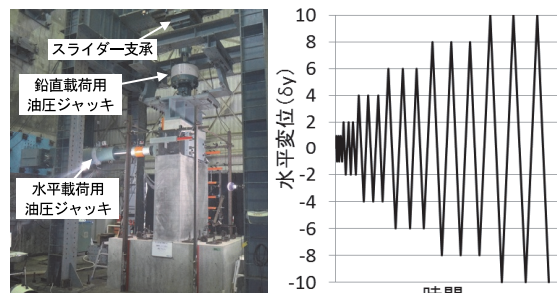


写真-3 荷重装置

図-10 荷重パターン

平変位を妨げない構造とした。

荷重は、ケース N について所定の軸力導入後、軸方向鉄筋が降伏するまで向鉄筋が降伏するまで荷重制御で水平荷重し、降伏時変位の正負平均値を $1\delta_y$ とした。軸方向鉄筋の降伏後は変位制御により、 $1\delta_y$ 、 $2\delta_y$ 、 $4\delta_y$ ・・・と偶数倍に変位レベルを増加させて荷重した。なお、各変位レベルにおける繰り返し回数は3回とした(図-10)。ケース B1~B3 については、ケース N の $1\delta_y$ を用いて変位制御で荷重した。荷重は、荷重が最大荷重の1/2程度を下回った時点で終了した。

3.2.3 試験結果

正負交番荷重実験の結果、破壊の順序は、曲げひび割れの発生、既設および補強の軸方向鉄筋の降伏、柱基部コンクリートの圧壊、かぶりコンクリートの剥落、軸方向鉄筋の座屈・破断の順に生じ、全ての試験ケースにおいて曲げ破壊した。補強ケースでは、既設柱と補強部分の剥離がなく、破壊の過程、ひび割れの性状から既設柱と補強部分が一体化していることが確認できた。

ケース N における既設軸方向鉄筋降伏時の平均変位は 9.3mm であった。補強ケースの試験の結果、既設軸方向鉄筋は $1\delta_y$ より小さい変位 (6.2mm~9.0mm) で降伏し、その後に補強軸方向鉄筋が降伏した。理由として、補強鉄筋の降伏ひずみが既設鉄筋に比べて大きいことに対して、補強断面が薄く既設鉄筋と補強鉄筋の断面位置の差が小さいことが考えられる。

ケース B1~B3 について、荷重点における水平荷重と水平変位の関係を図-11 に示し、図中にケース N の結

果を併記する。曲げ補強したケース B1~B3 の最大荷重は、ケース N に比べて約 1.5 倍となった。図-12 に、試験結果の包絡線と計算結果の比較を示す。既設部分と補強部分が一体となっていると仮定して、RC 標準に準拠して算出した Y 点、M 点、N 点を計算結果とした。RC 標準による計算値は、試験結果と概ね良い整合を示しており、既存の設計式を用いて評価できることを確認した。

図-13 に各ケースの包絡線図、表-6 に荷重試験結果の一覧を示す。図中には RC 標準に示されている Y 点、M 点、N 点を試験結果と併せて示す。曲げ補強したケース B1~B3 は、M 点の荷重(耐力)がケース N に比べ 1.5 倍以上増加し、N 点変位(変形性能)は約 1.1~1.2 倍に増加した³⁾。

荷重試験後に試験体の損傷箇所をはつり、鉄筋の損傷状況を観察した。軸方向鉄筋の座屈範囲は、補強なしで柱基部から高さ $h=600\text{mm}$ 程度に対し、補強ケースは $400\text{mm}\sim 500\text{mm}$ で、座屈範囲が狭くなった(写真-4)。

各ケースにおける既設および補強の軸方向鉄筋の座屈水平変形量を図-14 に示す。ケース N では、既設鉄筋の水平変形量の最大値が $h=200\text{mm}$ で 62mm に対して、補強ケースでは既設軸方向鉄筋の最大水平変形量の平均が $h=150\text{mm}$ で 72mm 、補強軸方向鉄筋が $h=125\text{mm}$ で 74mm となり、座屈範囲が高さ方向に小さくなり、水平方向の変形が大きくなる傾向となった。これは、曲げ耐力が上昇し、荷重パターンが $12\delta_y$ から $16\delta_y$ に増加した影響と推察される。

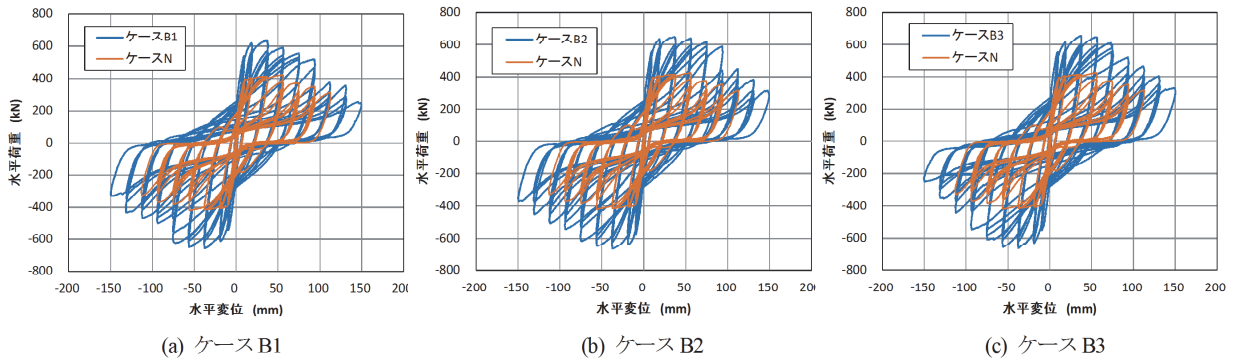


図-11 水平荷重—水平変位の関係

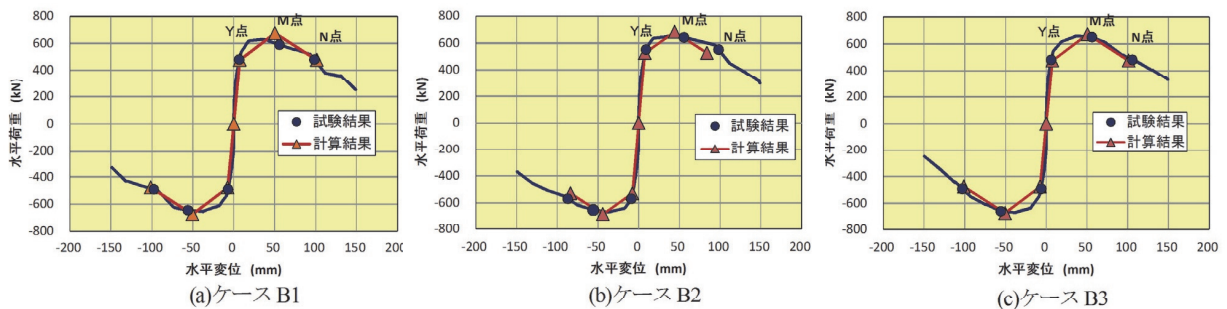


図-12 試験結果の包絡線と計算結果の比較

軸方向鉄筋の破断状況を表-7に示す。ケースNでは既設鉄筋の破断は見られなかったが、補強ケースでは既設軸方向鉄筋と補強軸方向鉄筋の双方に破断が見られた。破断位置は、 $h=100\sim 110\text{mm}$ 程度で、座屈の最大変形位置から少し下方となった。軸方向鉄筋をウルボンで補強したケース(B1, B3)では、破断が1~2本であったが、USD685(B2)では7本破断した。主鉄筋の種類によって破断の本数が異なる結果となり、引張強さが影響していると推測される。なお、せん断補強筋は補強ケース全てにおいて破断や継手の損傷は見られなかった。

主鉄筋の抜け出しの有無を把握するため、基部のコア削孔と吹付けモルタルの剥落片を観察した(写真-5)。補強基部では補強鉄筋、定着材、母材が強固に付着し隙間や浮きなどは見られず、変形や抜け出しの痕跡は見られなかった。同様に、上部も吹付けモルタル剥落片に鉄筋のふしが残っており、抜け出しなどは見られなかった。

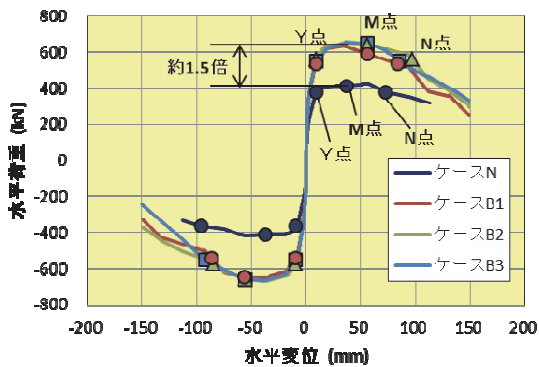


図-13 各ケースの包絡線の比較

表-6 載荷試験結果の一覧

	ケースN		ケースB1		ケースB2		ケースB3	
	変位 (mm)	荷重 (kN)	変位 (mm)	荷重 (kN)	変位 (mm)	荷重 (kN)	変位 (mm)	荷重 (kN)
Y点	9.3	371.9	6.9	485.7	9.0	560.1	6.2	485.7
M点	37.2	413.6 (1.00)	56.0	618.5 (1.50)	55.8	647.1 (1.56)	55.9	654.2 (1.58)
N点	84.2 (1.00)	371.9	98.1 (1.17)	485.7	92.6 (1.10)	560.1	104.4 (1.24)	485.7
じん性率	9.1 (1.00)		14.3 (1.58)		10.3 (1.14)		17.0 (1.87)	

注) RC標準²⁾に準拠して算出したY点、M点、N点を示す
 数値は正負の平均値を示す
 ()内の数値は、ケースNの各諸量を基準とした比率を示す

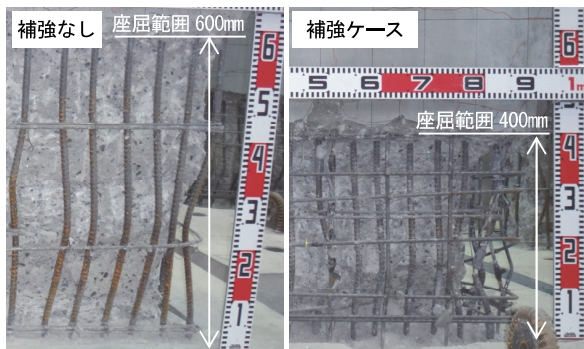


写真-4 軸方向鉄筋の座屈範囲

4. 省力化施工の検討

4.1 吹付けモルタル工の現状と改善点

本工法では、RC柱のせん断補強工法として実用化されている「スパイラル筋巻立工法」¹⁾の吹付けモルタル材料と施工技術を適用した。この現場配合吹付けモルタル材(以下、現場配合材料)は、ひび割れ抵抗性と耐久性を有し、材料費用を抑えられる利点がある反面、細骨材の含水率によって現場で配合を替える必要があるなど品質の安定性に課題があった。そこで、ひび割れ抵抗性と耐久性を確保し、施工時の品質安定および施工の効率化を目的に、吹付けモルタルのプレミックス化を検討した。

4.2 プレミックスモルタルの検討

プレミックス化に当たり、現場配合材料の品質を確保し、施工の効率化に寄与するよう、粉体と水を現場で練り混ぜて施工できる材料を目標とした。

配合を表-8に示す。現場配合材料では、粉体・乾燥剤の5種(セメント、細骨材、膨張材、シリカヒューム、合成短繊維)と液体混和剤2種(収縮低減剤、高性能AE減水剤)、水を使用している。液体材料を同等性能の粉体に置き換えた配合で2ケース(配合1、2)、品質の確保に重点を置き、現場配合材料の粉体部分のみをプ

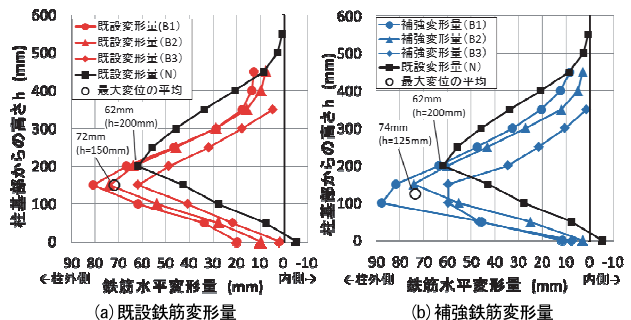


図-14 軸方向鉄筋の座屈変形量の比較

表-7 軸方向鉄筋の破断状況

ケース	既設軸方向鉄筋			補強軸方向鉄筋		
	全数(本)	破断数(本)	破断率	全数(本)	破断数(本)	破断率
ケースN	54	0	0%	-	-	-
ケースB1	54	21	39%	32	1	3%
ケースB2	54	20	37%	32	7	22%
ケースB3	54	26	48%	32	2	6%

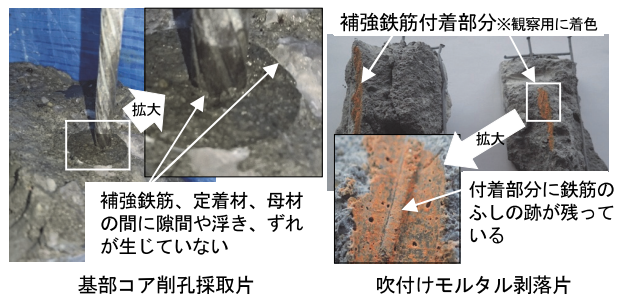


写真-5 補強軸方向鉄筋の抜け出し確認状況

表-8 プレミックスモルタルの検討配合一覧

配合種類	短繊維容積比 (%)	単位量(kg/m ³)										セメント : 普通ポルトランドセメント、密度3.16g/cm ³ 合成短繊維 : ポリプロピレン樹脂、密度 0.91g/cm ³ 、繊維長6mm 混和材1 : 膨張材、密度 2.92g/cm ³ 混和材2 : シリカフェーム : 密度 2.20g/cm ³ 細骨材1 : 利根川川砂(絶乾)、鹿島産、密度2.56g/cm ³ 細骨材2 : 人工珪砂、密度2.56g/cm ³ 砕石粉 : 石灰石粉、秩父産 : 密度2.72g/cm ³ 混和剤1 : 収縮低減剤(粉体) 混和剤2 : 高性能減水剤(粉体) 混和剤3 : 収縮低減剤(液体) : 密度1.02g/cm ³ 混和剤4 : 高性能AE減水剤(液体) : 密度 1.05g/cm ³
		水 W	セメント G	混和材1 EA	混和材2 SF	細骨材1 S1	細骨材2 S2	砕石粉 LS	混和剤1 (G×%)	混和剤2 (B×%)	混和剤3 (C×%)	
配合1	0.05	240	530	43	53	1400	-	-	7.950 (1.5%)	0.626 (0.1%)	-	-
配合2	0.05	240	530	43	53	-	1400	-	7.950 (1.5%)	0.626 (0.1%)	-	-
配合3	0.05	227	513	41	51	1354	-	-	-	-	7.695 (1.5%)	3.025 (0.5%)
配合4	0.05	227	513	41	51	-	1286	68	-	-	7.695 (1.5%)	3.025 (0.5%)

表-9 吹付け試験結果

試験項目\配合		配合1	配合2	配合3	配合4
物性試験	練り混ぜ性能	○良好	○良好	○良好	○良好
	圧縮強度(N/mm ²)	-	-	65.0	69.8
	テーブルフロー(mm)	-	-	146×145	142×138
	付着性能(N/mm ²)	-	-	2.34	2.20
	ばらつき【標準偏差】	-	-	【0.21】	【0.55】
施工試験	ひび割れ抵抗性	-	-	○初期ひび割れなし	○初期ひび割れなし
	圧送性	×閉塞 圧送不可	×閉塞 圧送不可	○良好	○良好
施工試験	吹付けの可否	-	-	○良好	○良好
	コテ均し性状	-	-	○良好	△可能
	材料価格比 (現場配合材料を1.0)	1.81	1.65	1.70	1.54



模擬壁面 (L型擁壁)

吹付け状況

写真-6 吹付け試験状況

レミックスとした配合で 2 ケース (配合 3、4) の計 4 ケースを製作した。また、材料調達の容易さを考慮し、細骨材を 2 種類とした。配合 1 と配合 3 は天然川砂の乾燥材、配合 2 と配合 4 は人工珪砂をブレンドして現場配合相当の粒度とした材料を使用した。

4.3 吹付け試験

各配合の材料を練り混ぜた後、L 型擁壁に補強鉄筋を配置した模擬壁面に吹付け試験を実施した。吹付け試験状況を写真-6 に示す。

吹付け試験では、モルタルの物性試験 (練り混ぜ性能、圧縮強度、テーブルフロー値、既設壁面への付着性能、ひび割れ抵抗性)、および施工試験 (圧送性、吹付けの可否、コテ均し性状の評価) を実施した。

4.4 試験結果

吹付け試験結果を表-9 に示す。収縮低減剤と減水剤を粉体で添加した配合 1 と配合 2 は、練り混ぜ後の圧送中に配管内で閉塞したため、現場適用が困難と判断し、吹付け試験および物性値の試験を省略した。

収縮低減剤と減水剤を液体で添加した配合 3 と配合 4 は施工可能であったが、骨材に人工珪砂を使った配合 4 は、圧送圧力が高くコテ均しの抵抗が大きい結果であった。モルタル物性値は、どちらも規格値を満足する結果であったが、付着試験 (試験数 n=4) を実施した結果では、配合 3 に比べて配合 4 では付着性能にばらつきが見られた。材料価格は天然川砂を使った配合 3 が配合 4 に比べて 1 割程度、現場配合材料に比べて 7 割程度増加する結果となった。これらのことから、適用する現場の状況に応じて、施工性の高い配合 3 と価格的に優位な配合 4 を選択できる。

5. あとがき

正負交番載荷実験の結果から、本工法により曲げ耐力が約 1.5 倍向上し、変形性能が 1.1~1.2 倍に増加するとともに、曲げ補強効果を既存の設計式により評価できることが確認できた。また、吹付けモルタルはプレミックス化により、現場での配合や計量作業が軽減されて施工の効率化が可能となった。今後は、鉄道橋、道路橋をはじめとした曲げ補強を必要とする RC 柱に対して、施工性が良く、耐久性が高い薄層の耐震補強技術として、本工法を提案していきたいと考える。

本開発は、公益財団法人鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部コンクリート構造研究室に試験計画および結果の評価について技術指導をいただいた。

【参考文献】

- 1) 財団法人鉄道総合技術研究所、「既存鉄道コンクリート高架橋柱等の耐震補強設計・施工指針 ースパイラル筋巻立法編一」、1996.12.
- 2) 公益財団法人鉄道総合技術研究所、「鉄道構造物等設計標準・同解説 (コンクリート構造物)」、丸善、2004.4.
- 3) 公益財団法人鉄道総合技術研究所、「受託業務報告高張力筋を用いた曲げ補強工法による耐震補強効果確認試験に関する技術指導」、2016.6

災害廃棄物に関する種類別発生量の推定手法の構築

—UAV と画像解析を用いた実証実験—

Volume Estimation Method for Respective Types of Disaster Debris

- In Situ Experiments with UAV and Image Analysis -

前川亮太* 大塚義一** 小河篤史** 大矢好洋*** 濱谷洋平****

要 旨

近年、東日本大震災をはじめ、常総水害、熊本地震等の大規模災害が頻発している。こうした災害の復旧、復興の初期段階として、大量の災害廃棄物の速やかな処理が重要である。本研究では、災害廃棄物の処理計画策定で最初に必要となる、災害廃棄物の発生量の推定手法を構築した。従来の推定手法は、建物倒壊数等から簡易的に災害廃棄物発生量を算出するものであり、発生量の実体に基づいた手法ではなかったため、精度に問題があった。このことから本研究の目的として、①発生した災害廃棄物の量を測量により迅速かつ正確に把握しつつ、②既存手法では困難であった、可燃物や不燃物といった種類別の発生量の把握を掲げた。そこで、今回は UAV を用いた広範囲の迅速な測量と画像解析を併用し、特に画像の持つ色相に着目し開発を進めた。この結果、全体発生量の把握については 3D レーザースキャナと同等の精度で体積を算出できた。さらに色相分布を併用し、災害廃棄物の仮置き表面における種類別分布の推計手法を開発することができた。

キーワード：災害廃棄物、UAV、画像解析、色相

1. 背景と目的

東日本大震災以降、広島土砂災害、常総水害、熊本地震災害、岩手水害等の大規模な災害が頻繁に発生している。こうした災害では、大量の災害廃棄物が発生し、その処理を迅速かつ確に実行することが被災地での迅速な復旧及び復興に重要となる。

災害廃棄物の処理を計画する上で必要不可欠な情報として、発生量の推定値が挙げられる。既存の発生量推定手法¹⁾²⁾は、発生物の原単位と建物倒壊数等から簡易的に算出するものであり、発生量の実体に基づいた手法ではない。このため、既存の手法は事前の想定やシミュレーションには有効であると考えられるものの、災害直後には、実際に発生した災害廃棄物を対象に、その量を一定以上の正確さで把握する手法が必要であると考えた。

このことから、本研究の目的として、①発生した災害廃棄物の量を測量により迅速かつ正確に把握しつつ、②既存手法では困難であった可燃物や不燃物といった種類別の発生量の把握を掲げた。そこで、今回は UAV (Unmanned Aerial Vehicle) を用いた広範囲の迅速な測量と画像解析を併用し、特に画像の持つ色相に着目し開発を進めた。

被災地においては、可燃物、土嚢袋に入れられた状態

で集積された土砂及び流木など、多様な種類の災害廃棄物が不規則に集積されている。本研究では、平成 28 年 8 月に発生した台風 10 号により岩手県岩泉町に発生した災害廃棄物を対象に、仮置きされた状態の災害廃棄物等について、久慈地区、中里地区及び小川地区の 3 地区において UAV 測量により体積を推計した。また、体積推計値の比較対象として、地上に設置した 3D レーザースキャナ (以下、LS) による測量も実施した。

災害廃棄物の種類別発生量の推定については、個々の物体が有する色相が環境の明るさの影響を受けにくいことに着眼した。最初に、廃棄物に近接して撮影した画像から廃棄物の種類ごとの色相を特定し、次に UAV による空撮画像に含まれる色相を分析し、主要な種類の災害廃棄物の発生量の推計手法の構築を試みた。

2. 推計手法の概要

2.1 UAV 測量の概要

UAV 測量では、UAV もしくはドローンと呼ばれる無人飛行体に測量機器を搭載し、飛行しながら空中から測量する (写真-1)。

UAV 測量は、土工事を中心に既に様々な工事現場において取り入れられている。本研究で対象とする災害廃

*技術研究所 **土木本部環境技術室 ***土木本部土木営業部 ****東日本支社土木第3部

棄物は、土工事現場の土砂と比較すると、形状の凹凸が細やかであり、材質や色彩が多彩であるという特徴がある。このことから、土工事における UAV 測量と比較すると、体積の正確な把握が難しい。この点を考慮し、本研究では災害廃棄物の体積発生量の推計に適したメッシュ幅に関する検討を行っており、後述する。

前述のとおり、本研究では UAV 測量との比較対象として、従来手法である LS による測量も実施している。UAV 測量と LS 測量の特徴を示す。表一 1 のとおり UAV 測量は LS 測量に対して、現地で実施する計測作業が著しく短いという利点がある。このことが、体積算出までのトータル時間も UAV の方が LS に対して短時間で完了することの要因となっている。計測時間が短いことは、復旧に向けた諸工事が中断なく実施される被災地では大きなメリットとなる。このことが本研究で UAV に着目した理由の一つである。

表一 1 に示す処理時間は解析対象の面積規模のほか、画像解像度やメッシュ間隔の影響を受ける。表一 1 では 1 画素につき地上寸法が 1.2cm の条件で撮影し、画素ごとにメッシュを設定した結果を示している。この解像度は、国土交通省が定めた UAV を用いた土工の管理基準³⁾に則った。解像度及びメッシュ間隔と処理時間の関係については後に詳しく述べる。



写真一 1 UAV 測量装置

表一 1 UAV 測量と LS 測量の所要時間の比較

計測場所	計測方法	所要時間		合計
		計測時間	処理時間 (モデル作成 ノイズ除去 体積算出)	
久慈地区 (36,006m ²)	LS	3時間	5時間	8時間
	UAV (高度50m)	10分	6時間	6時間 10分
小川地区 (12,734m ²)	UAV (高度50m)	10分	6時間	6時間 10分
中里地区 (74,849m ²)	LS	5時間	5時間	10時間
	UAV (高度50m)	2時間※	6時間	8時間
	UAV (高度80m)	10分	5時間	5時間 10分

※計測中の UAV 充電時間を含む

なお表一 1 のうち、中里地区での高度 50m の UAV において計測時間が長い理由は、計測中に 1 回の充電を要したためである。それでも LS と比べて計測時間を大幅に短縮できた。

次に測量対象物の形状について、LS では設置位置から投射するレーザーが届く範囲が測定範囲となり、設置位置から見通せない位置は測定できない。さらに、測定中に機器が安定する設置位置を確保する必要がある。一方、UAV 測量では空中から真下方向で撮影可能な範囲は全て測定範囲となる。この点が UAV 測量の利点である。逆に、垂直面やオーバーハング下は UAV では測定できない。しかしそのような形状は、仮置きされた災害廃棄物には稀有であるため、本研究に UAV 測量が有効であると考えた。

なお、UAV と LS ともに光を用いるため降雨、降雪時には測定が困難となる。さらに、UAV 測量は安定した空中撮影が必要条件であるため、夜間や強風時も測定は困難となる。このように、UAV は LS に対して気象条件から受ける制約が大きいことに留意し、現地の条件に適した手法を選択する必要がある。

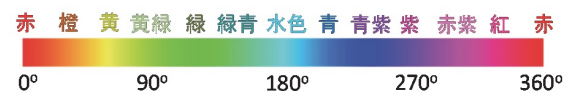
2.2 画像解析の概要

今回の UAV 測量では UAV にデジタルカメラを搭載して空中から 3 次元計測を行い、それらの画像から点群データ、オルソ画像（ひずみを補正した画像）を生成して対象物の体積を測定した。

一方、災害廃棄物の種類の判別については、素材ごとに有する固有色彩に着目した。デジタルカメラで測定された画像では、日照など気象条件の違いにより被写体の明度が影響を受ける。色相とは色合いのことであり、図一 1 のとおり 0° から 360° の角度で表わされる。個々の物体が有する色相は環境の明るさの影響を受けにくいいため、本研究では色相に着目した³⁾。

ピクセルごとに RGB から HSV 変換し、H (色相) から素材色を推測する。RGB とは光の 3 原色の Red、Green、Blue の頭文字であり、これを HSV (Hue : 色相、Saturation : 彩度、Value : 明度を使った色の表現方法) 形式に変換し、このうちの色相を用いて種々の分析を行った。

色相を 12 種類 (赤、橙、黄、黄緑、緑、緑青、水色、青、青紫、紫、赤紫、紅) に分類する。彩度が低く色相間の差が少なくなる場合は、明度に応じて 3 種類 (黒、灰、白) の計 15 種類に分類する。色相解析結果の例を図一 2 に示す。



図一 1 色相角度図

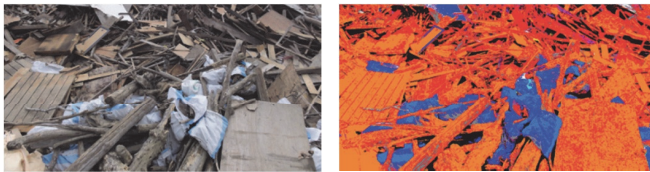


図-2 色相解析結果の例

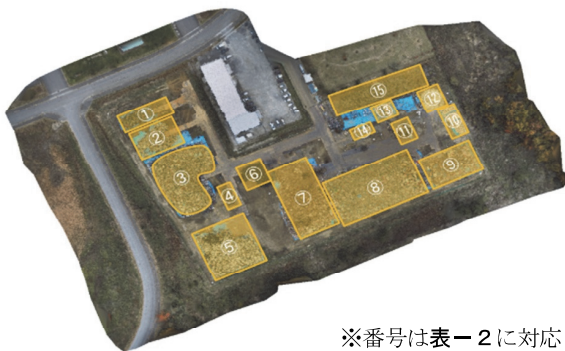
3. 実験結果

3.1 UAV の結果

a. UAV による体積算出結果

UAV による 3 次元計測データから点群データを作成し、体積を算出した。UAV による計測は、対象区域に標定を設置し、その座標を空撮することにより実施した。計測対象とした久慈地区のサイトにおける廃棄物種類別の配置図を図-3 に示す。図中の番号は、表-2 に示す種別に対応している。

次に LS を使用し 3 次元計測を行い、3 次元点群データを作成した。LS による計測は UAV 計測で使用した標定の上に三脚を据えターゲット板を設置することで世界測地系 10 系の座標に統一した。また、LS による計測は UAV 計測と比較し時間がかかるため、当該計測では図-3 仮置場配置図の⑦及び⑧の可燃物を主な計測対象と設定し、計測を行った。⑦及び⑧の可燃物の仮置き概況を図-4 に示す。



※番号は表-2 に対応

図-3 仮置場配置図



図-4 久慈地区可燃物の仮置き状況

表-2 UAV と LS の体積推計値比較

※番号は図-4 に対応

図中 番号	種別	体積推定値 (m ³)		UAV/LS
		UAV	LS	
①	自転車	110.7	—	—
②	家電	192.2	—	—
③	不燃物(大)	2066.7	—	—
④	不燃物(小)	23.2	23.2	1.00
⑤	家電 (リサイクル)	905.2	—	—
⑥	タイヤ	158.9	129.7	1.23
⑦	可燃物 (木くず・家具)	2205.5	2074.8	1.06
⑧	可燃物	2106.1	2115.5	1.00
⑨	たたみ	622.9	—	—
⑩	廃プラ	92.3	—	—
⑪	可燃物(家具)	37.8	34.2	1.11
⑫	石膏ボード	88.5	—	—
⑬	廃プラ	44.3	—	—
⑭	廃プラ	7.5	5.6	1.34
⑮	枝葉	623.7	—	—
合計		9285.5	—	—

UAV と LS それぞれの体積算出結果を表-2 に示す。体積算出のために設定した画像解像度やメッシュ間隔は前述の表-1 と同様である。⑦可燃物 (木くず・家具) については UAV による算出結果が 2205.5m³、LS が 2074.8 m³ となり両者の差が 6% となった。⑧可燃物については UAV が 2161.1m³、LS が 2115.5 m³ となり両者の差が 2% となった。

b. UAV による体積算出手法の効率化

次に、体積計算の効率化と精度の関係について検討した。土工事現場の土砂に比べて災害廃棄物の形状が多彩で細やかであることに着目し、計算の効率化と精度の観点から、災害廃棄物の体積推計に適したメッシュ幅に関する検討を行った。

体積の算出には、手持ちの点群データを適当なメッシュに分割し、一つのメッシュの四隅の標高平均値を用いている。そこで本研究では、点群データの情報量とメッシュ幅をそれぞれ変化させ、それに伴う体積推計値の変化を確認した。具体的には、点群データの解像度について前述の 1.2cm のほか、10cm に間引いたデータの 2 種類を検討対象とした。メッシュ幅については、0.2m から 0.1m 刻みで 1.0m までの 9 種類を検討対象とした。さらに、UAV の飛行高度を 50m と 80m の 2 種類設定した。これらの推計値を、LS によるデータから算出した体積値と比較した。

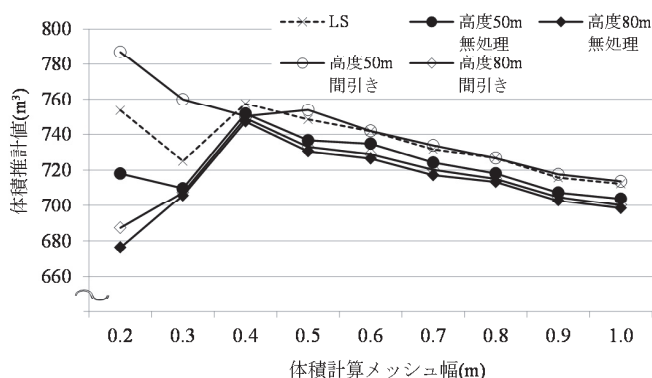


図-5 推定体積とメッシュ幅の関係

体積の推計結果を図-5に示す。ここで体積算出の対象は、中里地区においておよそ1,000m²にわたって仮置きされている、災害で発生した土砂である。

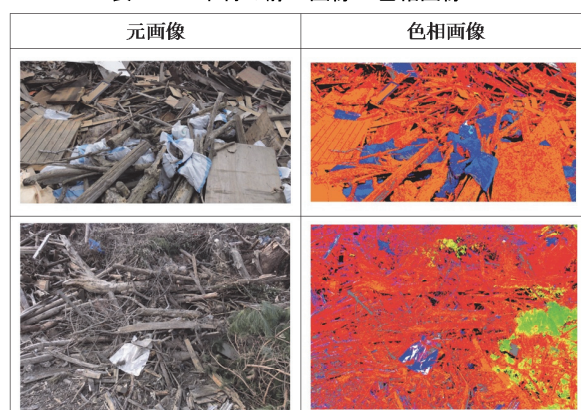
図-5のうちメッシュ幅0.2mについて、LSの結果を基準とすると、飛行高度50mの場合は間引きの有無に関わらず、LSとの差が5%以内となった。この結果は、飛行高度50mの間引き処理なしで実施した、前項の表-2の結果と一致している。これに対し、飛行高度80mの場合は、LSとの相違がおよそ10%となった。このことから、体積計測の精度については、点群データの解像度の間引きよりも飛行高度の影響が卓越していると考えられる。よって、適切な飛行高度を選べば、点群データのメッシュ幅による計算処理の効率化が有効であることが示唆される。

図-5のうちメッシュ幅が0.4mよりも長い、比較的粗い条件であれば、LSとUAVともに体積推計値の差異は小さかった。一般に、体積算出に要する解析処理時間はメッシュ数に比例し、言い換えるとメッシュ幅をn倍すると処理時間を1/n²に短縮することができる。このことから、メッシュ幅を0.4mよりも長くする程度の精度が許容される状況であれば、UAVによる計測はLSとの差異を小さく保ったまま、処理時間を短くするためにメッシュ幅を比較的自由に長くできると考えられる。

また図-5ではいずれの曲線もメッシュ幅0.4mを境に、メッシュ幅を長くするにしたがって体積推計値が一樣に小さくなった。この原因として、メッシュ幅に対する体積推計値のトレンドが被写体表面の形状に依存すると推察される。具体的には、今回の被写体の表面の概形が直線よりは凸型に近かったため、メッシュ幅を長くすることにより任意の二点間の表面の長さを実際より短く算出するに至ったと考えられる。

一方、メッシュ幅0.4m未満の場合について、体積推計値の傾向が曲線ごとに差異が大きくなった原因については更なる精査が必要である。積み上げられている災害廃棄物の一点一点の形状と照らし合わせつつ検証を続ける予定である。

表-3 木材の静止画像と色相画像



3.2 画像解析による種類別発生量の推計結果

a. 静止画像による種類ごと色相分析

災害廃棄物の種類の判別については、前述2.2のとおり、素材ごとに有する固有色に着目した。そのため最初に、①災害廃棄物のうちいくつかの典型的な種類について、UAVではなく近接して静止画を撮影し、種類ごとに卓越する色相を把握し、次に②オルソ画像（UAV撮影後ひずみ補正した画像）から色相分布を読み取り、災害廃棄物の種類ごとの発生量を推測するという手順で検討を実施した。

災害廃棄物の種類ごとの色相の分析を実施するため、中里地区にて木材を撮影した静止画像及び色相画像を表-3に示す。

表-3より、木材の可視光での色が多様であっても、色相として赤色で統一感が強く出力されることが確認できた。また、空隙は光の反射が極端に弱く、明度が下がり黒くなることが確認できた。このことから、色相画像での黒色の面積は木材の空隙率と関係があることが予想される。

さらに、白い化粧板や白い袋の色相が青いことも確認できた。一般に白い樹脂等は蛍光剤が配合されており、蛍光剤は紫外線を受けて青い光を放出するためスペクトル上では青が強調されると考えられる。また、葉の色相は緑であり、これ以外に緑の色相は極端に少ないことが確認できた。

これらをまとめ、木材に関する62枚の画像から種類ごとの色相を分析した結果を表-4に示す。

表-4 木材仮置場の色相分布

色相	割合(%)	素材
赤紫～黄	74.0	木、土
水色～紫、または白	8.2	ビニール
黄緑～緑青	0.8	葉
黒または灰色	17.0	不明

表-5 可燃物の静止画像と色相分布

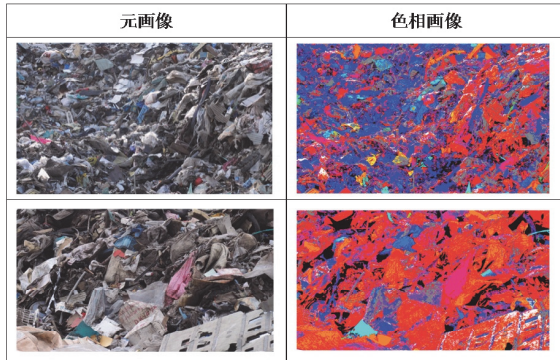


表-6 近接撮影による可燃物の色相分布

色相	割合(%)	素材
赤紫～黄	40.3	木、土、紙
水色～紫、または白	37.1	ビニール
黄緑～緑青	0.2	プラスチック
黒または灰色	22.6	不明

次に、可燃物を撮影した静止画像及び色相画像を表-5に示す。撮影箇所は前述と同じ中里地区である。

表-5より、ビニール袋に入れられた廃棄物は青い色相となる傾向が確認できた。この場合、内容物の区別は困難となることに留意が必要である。また、泥汚れは色相が赤になる傾向も確認できた。しかし、泥汚れ、赤い樹脂はともに色相が赤となり、色相だけでは識別出来ない場合があることに留意が必要である。

これらをまとめ、可燃物に関する13枚の画像から種類ごとの色相を分析した結果を表-6に示す。

b. UAV 測量画像による仮置き表面の種類分布の推計

前項で把握することができた種類ごとの色相を用いて、UAV 測量による画像から、地上に発生している災害廃棄物の表面に露出している量の種類別分布を推計した。

前項において可燃物の検討を行った中里地区の仮置き場を対象に UAV 画像によるオルソ画像から色相を分析した結果を表-7に示す。

表-7より、災害廃棄物の山のうち日陰部が青の色相となる傾向が把握できた。このことと表-6を照らし合わせると、青の色相は表-6においてビニールに区別されていたため、日陰の発生によりビニールが実際よりも多めに見積もられることになる。UAV 画像からの色相分析にあたってはこのことに留意が必要である。

UAV 画像による色相の分析結果のまとめを表-8に示す。表-6と表-8の比較からわかるとおり、災害廃棄物の種類ごとの区分で見ると「木、土、紙」において UAV による推計と近接撮影による推計との差異が2割程度、ビニールが1割程度となった。

表-7 UAV 画像による色相画像(可燃物)

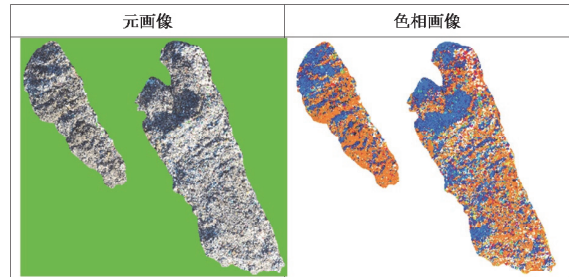


表-8 UAV による可燃物の色相分布

色相	割合(%)	素材
赤紫～黄	48.3	木、土、紙
水色～紫、または白	34.4	ビニール
黄緑～緑青	1.0	プラスチック
黒または灰色	16.3	不明

なお表-8では、前述の日陰部の処理は行っていない。したがって表-8においてビニールと判別された区分が実際よりは多い可能性がある。UAV 画像によるオルソ画像から色相を分析した結果と近接画像の結果との比較にはこのことを鑑みる必要がある。

分析の最後として、災害廃棄物の種類ごと、地区ごとの色相分布を比較する。色相は0°から360°の角度で表現されるため、分布の表現にはレーダーチャートが適切である。無色相に分類される黒、灰、白を省き、有色相だけで合計1.0になるよう正規化した上でレーダーチャート上に表現した。

色相分布の検討の最初として、表-3及び表-5で示した、中里地区で撮影された木材の画像と可燃物画像の色相分布を比較した結果を図-6に示す。図-6から把握できるとおり、木材は赤および橙の色相に集中している一方で、可燃物は赤に加えて青紫色相も強く出ていることが把握できる。これは可燃物には赤色相を示す土と青色相系を示すビニール・プラスチックが含まれているためと考えられる。木材色相、可燃物色相とも緑系色相は極端に少ない。

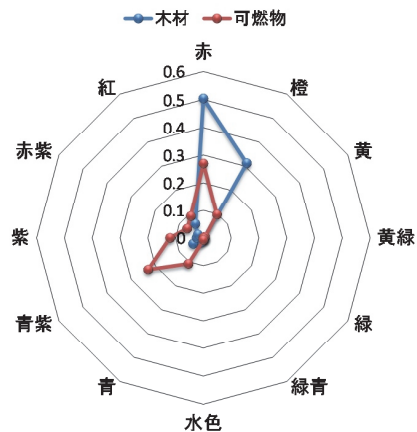


図-6 中里地区の木材と可燃物の色相分布比較

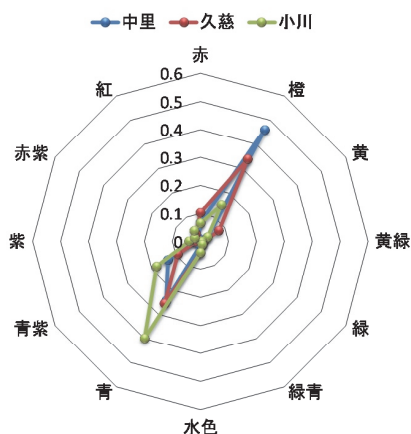


図-7 地区ごとの可燃物の色相分布比較

このように、災害廃棄物ごとに色相の相違を把握することにより、災害廃棄物の表面に露出している量の種類別分布について撮影画像から推計することが可能となる。

次に、可燃物の仮置場を UAV から撮影した画像に基づく色相分布を地区ごとに比較した。その結果を図-7に示す。図-7のうち中里地区については表-7や表-8に示す結果と同一である。これ以外の2箇所（久慈地区及び小川地区）の可燃物仮置場の色相分布を重ねて表示している。

3地区に関する共通の特徴として、橙と青の色相に集中しており、それ以外の色相は極端に少ないことが分かる。地区ごとの分布の相違点として、中里地区は比較的橙が多く、小川地区は比較的青が多い。これらに対して久慈地区はその中間にある。これは中里地区の可燃物は土が多く混ざること赤系の色相が強く出ている一方、小川地区の可燃物は比較的土が少なく、ビニール袋に入れた物が多かったため青系の色相が強く出たものと考えられる。これらから、久慈地区の可燃物は中里地区と小川地区の中間的な組成分布と推定される。

以上のとおり、近接撮影によって得られた種類ごとの色相を用いて、UAVからの撮影により、仮置き表面の種類分布の把握手法を構築することができた。

4. 結論

以上のとおり、平成28年8月に発生した台風10号により岩手県岩泉町に発生した災害廃棄物を対象に、UAV測量を用いた体積推定手法の検討を行った。得られた見解のうち主たるものは下記の3点である。

- i. UAVの活用により、準備、計測、解析の一連の所要時間についてLS計測と比較して短縮できた。特に計測についてはLSが数時間要するところ、UAVにより10分程度に短縮を図ることができた
- ii. 災害廃棄物の体積の推計について、UAV測量による値がLSに対して差異が5%程度となり、UAVが

LSと同等の精度を有することが確認できた。特にメッシュ幅を一定以上（今回の結果によると0.4m以上）とすると、体積推計値についてUAV測量とLSとの差異がより小さくなり、精度を保ちつつ解析時間を短縮させる可能性が見いだせた

- iii. 画像解析において、災害廃棄物の種類を画像の色相によって分類することの有効性が確認できた。

上記i.について、UAV測量においては実績のあるLS計測と比較して計測所要時間の大幅短縮を図ることができた（久慈地区でUAVが10分に対してLSが3時間、中里地区でUAVが2時間に対してLSが5時間）。

上記ii.の計測精度についても、UAVを用いた手法がLSと比較して相違が5%程度と、十分な体積計測精度を有することが確認できた。さらには、災害廃棄物の体積推計に適したデータ採取の条件について検討し、メッシュ幅が小さい条件（今回は0.3m以下）においてはUAVの飛行高度が体積推計値に及ぼす影響が大きいことや、メッシュ幅が大きい条件（今回は0.4m以上）においては、体積推計値に関するLSとの差異が小さくなることが確認できた。

さらに上記iii.の画像情報からの組成分析においては、仮置きされている災害廃棄物の表面に露出している範囲を対象に種類ごとの色相分布を特定することができ、体積分布の推計に資する手順を確立できた。課題として、表面画像の分析では袋や容器の中身の推定が困難であること、仮置場のうち表面に露出していない部分の分布との整合性の確認が必要であること、天候、日照の影響を受けて日陰の対応が必要であること、同色相系を示す物質間の分離が困難であることが考えられる。今後の実用を重ねつつ、異なる原理のセンシング技術を併用することにより、前述の課題の解決に取り組む所存である。

謝辞

今回の検討においては伊藤忠テクノソリューションズ株式会社と連携しつつ、画像解析技術について多大な協力をいただきました。ここに謝意を表します。

【参考文献】

- 1) 環境省、「災害廃棄物（避難所ごみ・し尿を除く）の推計方法」、災害廃棄物対策指針、技1-11-1、2014
- 2) 鶴巻峰夫、山本祐吾、吉田 登、「地域の資材ストック量にもとづく災害廃棄物の予測に関する基礎的検討」、土木学会論文集 G（環境）、Vol.71、No.6、pp. II_241-II251、2015
- 3) 村上 治、天野浄行、西山 哲、「カラーターゲットを用いた近接写真測量の効率化について」、写真測量とリモートセンシング、Vol.46、No.1、2007
- 4) 国土交通省、「空中写真測量（無人航空機）を用いた出来形管理要領（土工編）」、2016

輸送統合管理システムの開発

－ ICT による環境リスク管理や到着管理機能の統合化 －

Development of Total Management System Including Transport Control - Integration of Environmental Risk and Vehicle Arrival Management Function using ICT -

大塚義一* 小西正郎** 森本克秀** 今井亮介*

要 旨

近年、様々な激甚災害が多発しており、被災から迅速に回復を図ることが社会的要請として求められ、災害廃棄物の適切な処理が要点となる場面が多々ある。特に、東日本大震災では莫大な量の災害廃棄物等の処理・処分に加えて、同震災に起因して発生した放射性物質の広域的汚染からの環境回復が、除染等の国家的事業として進められている。この事業では、土木建築工事では被ばくに関する知見が少ない従事者のリスク管理、公道を利用して除去土壌等を輸送する場合の周辺環境影響へのリスク管理、さらに計画変更への迅速な追従性及的確な意思決定が求められる。そのためには、輸送・環境リスク・業務管理、計画変更追従性、および最適な運行管理を統括した一元管理と、輻輳する管理に対し最新の情報を反映させる現場マネジメント支援、あるいは代替が可能な輸送統合管理システムの構築が重要となる。ここでは、初期に構築した災害廃棄物処理と除染等工事に用いたシステムに輸送管理機能を組み込んで開発した輸送統合管理システムの機能について報告する。

キーワード：災害廃棄物、指定廃棄物、除染等工事、輸送管理システム、セシウム

1. まえがき

未曾有の災害をもたらした平成 23 年 3 月 11 日の東日本大震災 (Mw9.0) から約 6 年の歳月が経過し、福島第一原子力発電所の原子炉冷却機能喪失事故による放射性物質による環境回復を目指した除染事業では、帰還困難区域を除く除染特別地域の面的除染が平成 29 年 3 月で完了した。この除染事業で発生する除去土壌等は、1,600 万～2,200 万 m³と見込まれ、平成 27 年 3 月～平成 28 年 3 月までに実施されたパイロット輸送とその後の輸送実施計画に基づいた本格的な輸送で、貯蔵先の間中貯蔵施設保管場 (大熊町、双葉町) への搬出工事が進められている。今後は、復興・創生期間の最終年度である平成 32 年度までに 500～1,250 万 m³程度の除去土壌等が搬出される見通しである。また、1 キログラム当たり 8,000 ベクレルを超える放射性セシウム (Cs) を含む焼却灰等については、環境大臣が指定廃棄物¹⁾として指定して、管理型処分場に速やかに埋立処分する方針である。福島県では、100 カ所以上に分散保管されている焼却灰等を既存の管理型処分場 (旧フクシマエコテッククリーンセンター) に輸送する計画が進められている。これらの輸送対象物は放射性セシウムを一定量含むため、厳密

な輸送管理が必須であり、所定ルート逸脱の防止や万が一の事故への細心の対応が求められている。こうした対処と円滑な輸送を行うためには、輸送道中はもちろん、積み込み場所での積載物情報や受け入れ先の車両台数の標準化などを管理するためのツールの導入が有効である。

一方、既往の建設工事においては、国土交通省の i-Construction 推進の動きもあり、土や生コンクリートといった建設資材を運搬する車両の運行管理において幾つかのシステムが実用化されている。また、中間貯蔵事業の要求水準書では、これらの運行管理機能に加え、事業者システムとして多岐にわたる要求事項があり、事業に参画している各社がシステム開発を進めている状況にある²⁾。しかしながら、車両運行管理を主要機能としたシステムがほとんどであり、勤怠や安全教育履歴等のその他の機能との統合化を図った管理システムの構築には至っていない。

そこで、筆者らは、災害廃棄物処理事業³⁾と除染等事業で導入したシステムをベースとして、放射線被ばく線量管理、教育履歴や業務履行状況管理機能を改良し、さらに車両の到着管理機能等を組み込み、これらの一元管理によって効率的・省力的に関係業務を統括管理できる輸送統合管理システム (以下、「インフォクロス」) を開

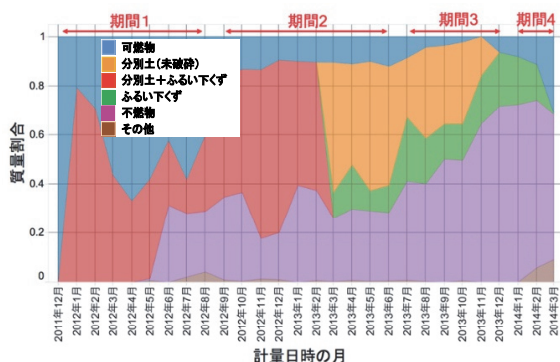
* 土木本部環境技術室 ** 東日本支社福島復興プロジェクト

発した。これらのシステムは、いずれも伊藤忠テクノソリューションズと共同で開発したものである。

2. システム適用事業の概要

2.1 災害廃棄物処理業務

平成 23 年の岩手県山田町における津波災害廃棄物の処理事業において、選別・破砕により分別した災害廃棄物を対象として、各処分先への搬出管理、車両運行管理、稼働重機の作業時間管理、搬出廃棄物の重量管理機能を有する「災害廃棄物統合管理システム」を開発した。本システムで、6 種類に区分管理した高度選別処理物を質量割合推移として記録した例が図一 1 である。本事業では、約 61 万トンの災害廃棄物を 200 台/日以上以上のダンプトラックで、選別場所と区分に応じた 28 カ所の処分先に対する搬出・運行管理によって不具合なく完了した。

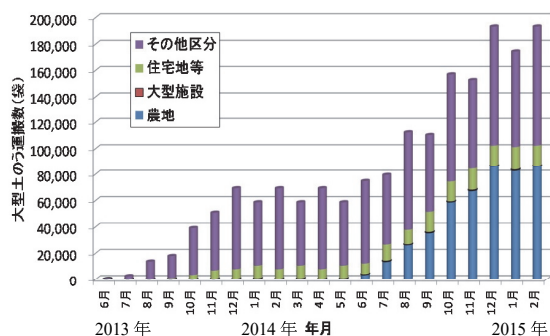


図一 1 高度選別処理物（6種類）の質量割合推移

2.2 本格除染工事

除染等事業を管理するために、災害廃棄物統合管理システムに大型土のう等の物のトレーサビリティ機能、作業員の勤怠管理、放射線被ばく線量管理、特別教育等

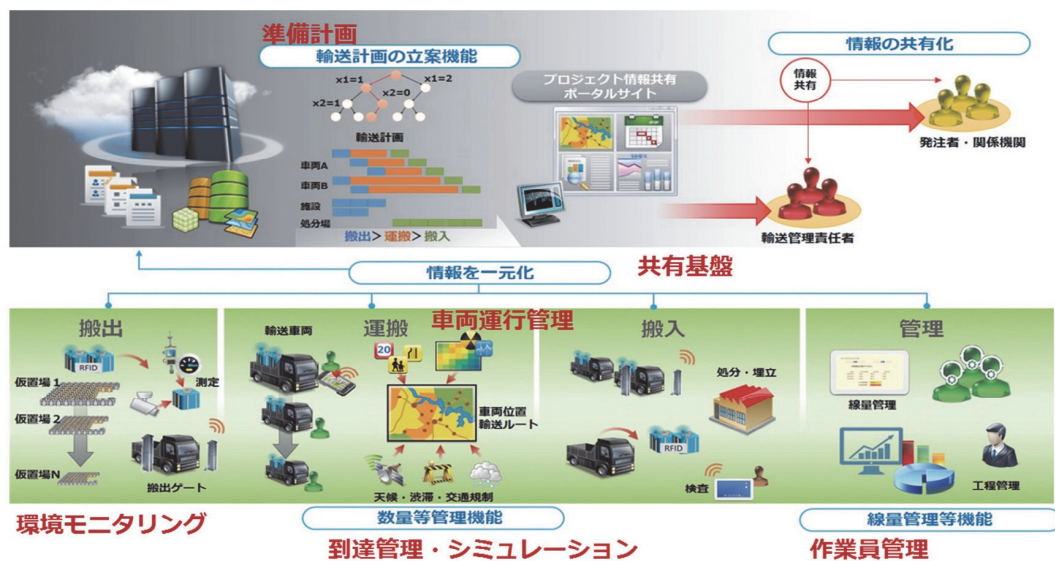
の履歴管理、および大型フレコン追跡機能等を追加した「除染統合管理システム」を開発し、平成 24 年からの葛尾村除染等工事に適用した。本工事は、宅地等 470 戸、農地 317ha、森林 646ha、その他用地約 450ha の除染と、除去した土壌等約 71.7 万袋の大型土のうを村内の仮置場等に保管する作業等が原設計である。導入システムで、延べ 492,061 人の従事者の勤怠・被ばく線量、約 176 万袋の大型土のうのタグ情報（表面線量、発生・保管場所等）を管理した。図一 2 に示すように、本システムで登録管理した大型土のうの運搬数推移は、発生場所の変遷、および区分毎の累計推移等を記録管理して除染工事を遂行した。



図一 2 発生場所ごとに管理した大型土のうの運搬数推移

2.3 指定廃棄物の詰替・搬出工事

福島県内の保管場所に保管されている指定廃棄物に対して、各保管場所で所定の収納容器に詰替え処理し、その後最終的に富岡町の管理型処分場に搬出する工事が現在進められている。この工事では、搬入先である処分・埋立場の車両待機場所が限られているために到着管理も必須である等の課題があった。そのため、図一 3 に示すように、搬出場所の環境モニタリング、従事する作



図一 3 輸送統合管理システム概念図

業員の被ばく線量管理、収納容器に詰替えられた指定廃棄物の積出しと搬出時の個体管理、車両運行、および到着管理機能を備え、これらの管理情報を極力人を介さずに収集する方式を導入し、それらをクラウドで共有して一元管理するインフォクロスを構築した。インフォクロスは、これ以前の対象物や人の勤怠等を管理するシステムに、省人化と効率化を図るための改善、および車両の到着管理機能等を加味して開発したものである。その開発内容を次節以下に示す。

3. 輸送統合管理システムの概要

3.1 インフォクロスの機能

平成 28 年度からの指定廃棄物詰替・搬出工事を効率的に進めることを目的として、既存システムの機能に RFID (Radio Frequency Identifier) タグの採用、事前の準備計画機能、車両位置情報をリアルタイムに把握する車両運行管理機能、作業員被ばく量の常時把握機能、運搬車両の到着管理機能および車両の運行シミュレーション機能等を付加した。

3.2 要素機能の開発と特長

a. RFID タグの採用による効率化

収納容器の管理に用いるタグ情報の効率的取得を目的として、非接触で読み込みを行うことができる RFID タグを採用した。RFID タグは廃棄物の運搬業務に使われた事例がないため、写真-1 に示す実車と実際に使用される収納容器 (サイズ: 1.5×1.5×0.5m) を用いた RFID タグの読み込み実験およびその他の機能確認実験を行った。これらの実験により表-1 の結果を得て、実際に使用できることを確認した。

b. 収納容器のトレーサビリティ管理

膨大な数の収納容器を指定の管理型処分場へ効率的に搬出するため、運搬車両に積載した収納容器毎の内容物、発生場所、放射線量等の情報をそれぞれの RFID タグから遠隔で読み込んで、クラウドサーバに保管し、そのデータを常時検出できるようにした。それによって収納容器の個体検索と確実なトレーサビリティを実現した。RFID タグを用いた収納容器の管理では、図-4 に示す作業毎に下記の業務を行い、収納容器の管理を行う方式とした。

- i. 搬出準備時: 保管場所で収納容器に RFID タグを取付け、線量、重量などの測定データと RFID タグ管理番号を紐付けてクラウドサーバに情報を転送
- ii. 搬出時: ゲート部で車両に積載した収納容器の RFID タグを一括して読み込み、指示書を発行するとともに搬出情報をクラウドサーバに転送
- iii. 受入時: ゲート部で搬出時と同様に RFID タグを一括して読み込み、搬出時と同じであることをクラウドサーバ内の情報と照合
- iv. 埋立時: RFID タグと埋立位置情報を紐付けて、クラウドサーバに情報を転送

なお、RFID タグには管理番号のみが記録されており紐付けられたデータは全てクラウドサーバに保管されている。さらに採用したシート上のタグ表面には管理番号が記載 (写真-1 参照) されており、運搬途中でタグが損傷しても、復旧が可能である。

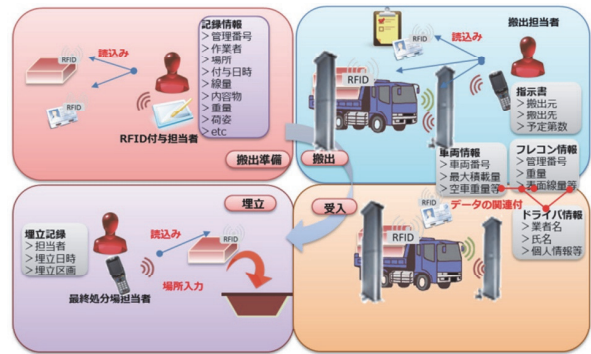


図-4 搬出準備から保管までの収納容器管理

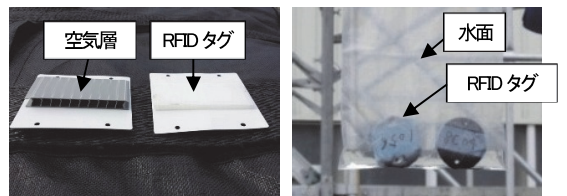


写真-2 タグ背面の空気層 写真-3 タグの水没状況

表-1 RFID タグ読み取り実験結果

確認項目	実験結果
車両速度	15km/h でも読み取り可能だが、5km/h 程度で確度が高い
アンテナ位置	高さ 3.0~3.7m、下向き約 25° 程度が最適
タグの取付け方法 (写真-2 参照)	収納容器上面あるいは側面に設置するタグ背面には、土の中の土壌に含まれる金属類による干渉を回避するために若干の空気層を設ける
収納容器位置	車両中央部に積み込み、タグ位置が運搬車両のあおりに遮へいされない箇所へ固定しなければならない
運搬車両認識用タグの設置	運搬車両に設置するタグは、ガラスに接しない工夫が必要
気象状況の影響 (写真-3 参照)	部分的な水没時に読み取り不能となる
高線量下の耐性	22~84 μ Sv/h の線量下に放置後も正常なタグ情報読み込みを確認



写真-1 RFID タグ読み込み実験状況

c. 作業員の被ばく線量の常時監視機能

全作業員の被ばく線量を確実に把握するため、全員にRFID 付きの個人カードと自動読み取り機能付きポケット線量計を携帯させ、作業員ごとの被ばく線量計測値や作業時間等のデータをリアルタイムで記録することで、作業員の個人被ばく線量の常時監視を実用化した。

この機能により、複数の保管場所で指定廃棄物等の詰替え業務に従事する作業員、最終処分場までの廃棄物運搬業務に従事する運転手等の被ばく管理が可能である。実施手順は、作業員や運転手が出退勤時、管理区域入退時および教育受講時に個人カードをRFID 読取機にかざして情報を記録（図-5参照）するもので、出退勤時や管理区域入退時に個人線量計の測定値を自動的に読取る方法で個人被ばく線量が累積され、管理値到達アラートで配置転換を考慮する等の管理を行うことができる。

また、本事業の特徴である複数箇所での同時作業であっても、分散して収集されたデータが即時クラウドサーバに転送され一元管理されるため、管理者は常時従事者の勤怠、被ばく管理を行うことができる。



図-5 従事者の勤怠、および被ばく線量管理

4. 到着管理による輸送計画の自動作成方法

搬出元から受け入れ先までの輸送を円滑に行うためには、運行ルートの交通状況が大きく影響する。その点を反映した合理的な輸送計画を作成するために、先ず数学モデルを構築した。同モデルのアルゴリズムは、最適化手法の一つである混合整数計画法を用いて、搬出場所・搬出時間帯・運行ルート・車両の必要台数等の最適解を算出し、最適な輸送計画を立案するものである。混合整数計画法は、整数値をとる変数と実数値をとる変数が混在する状況で、いくつかの等式や不等式の制約がある場合に、目的とする関数を最大化あるいは最小化する計算手法である。

この輸送計画に基づいて運搬作業指示を行う場面を想定すると、指定廃棄物の収納容器の運搬作業中に交通規制や渋滞等が発生した際、迅速に搬出元や受入施設に到着時刻を連絡し、簡便に運行調整ができることが望まし

い。そのため、運搬車両毎に現在地から目的地に到着する時刻を自動計算した結果を管理画面に数値表示できる統合管理システムの機能（到着管理機能）を組み込んだ。この到着管理機能によって、搬出入先との日常的な情報連携を密に図り、計画工程の履行をより確実に実行可能とした。

4.1 運行計画作成方法

運行計画は、計画期間および離散化データ数の違いにより、①年間月別計画、②月間日別計画、③当日運搬計画の3つの計画作成から構成する。以下に、年間月別、月間日別、および当日運搬計画作成の流れを示す。

a. 年間月別計画の作成

保管施設毎の予定運搬数、1日当たりの運搬数等をパラメータとして入力することで、全事業計画に基づく年次ごとの袋数の運搬が可能となるような保管施設毎・月毎の運搬袋数が計算され、以下の点が考慮された計画が自動作成される。

- i. 施設の受入能力範囲内で運搬袋数を各月に配分
- ii. 遠距離運搬だけの月や近距離運搬だけの月といった偏りを軽減するため計画期間内の仕事を平準化
- iii. 月毎に余裕を分散し受入施設毎の稼働率を平準化
- iv. 月単位で稼働する保管施設数を平準化

b. 月間日別計画

月間日別計画では、年間月別計画結果（月毎の運搬袋数）を入力値として、保管施設毎・日毎の運搬回数および運搬回数が計算される。月間日別計画では以下の点が考慮される。

- i. 施設の受入能力範囲内で運搬回数を各日に配分
- ii. 日単位での仕事を平準化
- iii. 受入施設の能力余裕を日毎に分配し受入施設毎の日々の稼働率を平準化
- iv. 保管施設の能力余裕を日毎に分配し保管施設の日々の運搬数を平準化

また、設定した運搬回数を基に、下記の順でトラックの必要台数が算出される。

- ・仕事を基に概算のトラック必要台数を算出
- ・運行パターンでトラック最小必要台数を推定

c. 当日運搬計画

当日運搬計画では、月間日別計画結果（日毎の運搬袋数・運搬回数）を入力値として、トラック毎・日毎の運行スケジュールが算定される。当日運搬計画では以下の点が考慮される。

- i. 受入施設でのトラック待ち時間を低減
- ii. 車両空車移動時間の短縮および稼働率を平準化
- iii. 遠距離運搬を受入施設の終了時間間際に計画しないことを配慮
- iv. 運転手の昼休み、稼働時間上限、事務所から荷積み場所までの距離を考慮

また当日運搬計画においては、トラック台数について以下の2つの手法を選択した計画の立案が可能である。

- i. 車両台数指定モードとして、指定した台数のトラックでの計画作成
- ii. 車両台数計画モードとして、なるべく少ない台数のトラックでの計画作成

4.2 運行計画作成結果

前節の年間月別、月間日別、及び当日運搬計画から、最終的には図-6のような各運搬車両の運行表を作成し、配車を行う。運搬中には運行管理システムにより、車両毎の運行状況をリアルタイムで把握し、運行表と差異が生じた際には、この状況を考慮した当日運搬計画を再計算することで、翌日以降の計画を再検討できる。

トラック1	荷積A	運搬	余裕	荷降C	
トラック2	荷積A	運搬	余裕	荷降C	
トラック3	荷積A	運搬	余裕	荷降C	
トラック4			余裕	荷降C	
トラック5	荷積B	運搬	余裕	荷降C	
トラック6	荷積B	運搬	余裕	荷降C	
設備A	荷積A	荷積A	荷積A	荷積A	
設備B	荷積B	荷積B			
設備C			荷降C	荷降C	荷降C

図-6 当日運行表の一例

5. シミュレーションによる輸送計画の評価

5.1 運行シミュレーションの方法

運行シミュレーションでは、表-2に示すように、道路情報等を設定したうえで、当日運搬計画結果を手順4として入力し、作業時間や走行時間にバラツキを持たせ実際の運行を模擬して事前評価を行う。運行シミュレーションでは、当日運搬計画の車両の1回目の荷積み開始時刻に荷積み場所から車両を出発させる条件からスタートし、次をアウトプット情報として選択できる。

- i. 荷積み→運搬→荷降→空走行を再現
- ii. 荷積みと荷降し場所での待ち時間を表示
- iii. 指定時刻に運搬中止イベントを発生させて、運搬中止時の状況を再現

5.2 シミュレーション結果

受け入れ先の管理型処分場での待ち台数や待ち時間のばらつきを検証する目的で、当日運搬計画に対して疑似乱数による変動を与えてシミュレーションした。その検証結果を表-3に示す。具体的入力値は、走行ルートの各区間に80km/hまたは40km/hの速度を設定し-10km/h~0km/hの間で4種類(ケースNo2~5)の1様乱数を発生させ運搬車両の遅延状況を模擬した。その結果、管理型処分場の受付では待ち台数で2~4台、待ち時間で6~17分(荷卸しでは待ち台数で2~5台、待ち時間で14~34分)の変動が生じることを確認した。この方法によって、設定した4つの目的関数の最適条件を事前に

把握できる。

交通事故などによる通行止めが発生した場合に、運行中止指示の適用範囲やそのタイミングについての検証結果を図-7に示す。図は、3台の車両に対し、仮に16時に運行中止指示が出た場合の検証で、最遅車両が17時15分に作業完了する結果である。これにより、中止した車両の積荷を受け入れる保管施設の作業延長時間、トラック運転手の労働延長時間、運搬車両の運行中止を行うタイミングが検証でき、当日運搬計画における遠距離運搬の受入施設到着時刻の条件を適正化できる。

当日運搬計画結果を入力値としてトラックを出発させ、走行時間の適正な余裕を検証した結果を表-4に示す。表中の※1は、受入施設の当日計画の到着時刻に対するシミュレーションの到着時刻との差で、プラスは遅延、マイナスは早着を示す。走行時間余裕とトラック台数はトレードオフの関係にあり、走行時間余裕を増やすと遅延は減るがトラック台数は増加する傾向がある。複数のシミュレーションケースの結果から、トラック台数と走行時間余裕値の相関を定量的に把握することができ、適正な走行時間余裕値を予め把握できる。

保管施設での搬出作業の開始時期による運搬回数と施設稼働率の予測結果を図-8に示す。ケース1は、保管施設の開始・終了月を指定しない場合、ケース2は、保管施設の最早開始月と最遅終了月を指定した場合であり、各ケースの運搬回数と施設稼働率を模擬した。平均運搬回数のグラフから、ケース1では保管施設側の運搬開始と終了月の制約がないため計画期間全体(76カ月間)の平準化が見込める。また、ケース2では保管施設側の運搬開始と終了月が設定されているため、計画期間全体の平準化が期待できないことが明らかになった。一方、平均稼働率のグラフでは、両ケースの場合での施設の稼働率(=100×受入袋数/受入可能袋数)が100%を超えないことを確認できた。ここで、受入可能袋数とは、受入施設が受け入れることができる最大の袋数である。

このように、各種の条件における運行シミュレーション

表-2 運行シミュレーションの実行手順

手順	実行名称	処理内容
1	道路ノード情報の設定	運搬経路上の分岐・合流・交差点(高速道路ICおよびCT、一般道の交差点)および保管施設ならびに受入施設を道路ノードとして設定する。
2	道路リンク情報の設定	運搬経路として使用する道路区間(リンク)の両端となる道路ノードおよびリンク種別(高速道または一般道)ならびに速度を設定する。
3	施設内の作業パラメータの設定	施設内の作業時間や移動時間、および作業場所や待機場所の数、ならびに操業条件を設定する。
4	当日運搬計画結果の取込み	当日運搬計画で立案した運搬タスク情報を読み込む。
5	運行管理上のイベント情報の設定	必要に応じて運行管理イベント情報(通行止めや運搬中止指示など)を設定する。
6	シミュレーション実行	シミュレータを起動し、手順1~5の情報を元に運行シミュレーションを実行する。

表-3 管理型処分場での待ち台数と待ち時間

受入施設	ケースNo	乱数系列	受付最大待ち台数	受付最大待ち時間	荷降し最大待ち台数	荷降し最大待ち時間
管理型処分場	1	-	3台	11分	3台	17分
	2	1	4台	17分	3台	14分
	3	2	2台	7分	5台	34分
	4	3	2台	6分	4台	18分
	5	4	2台	9分	2台	25分

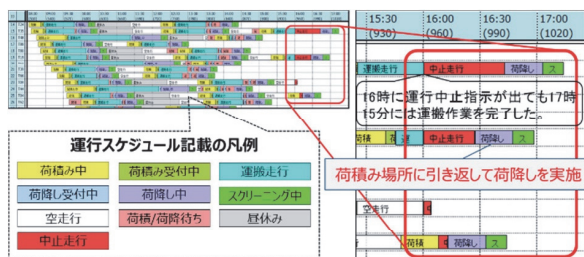


図-7 運行中止が発生した場合の運行スケジュール

表-4 走行時間の適正な余裕についての検証結果

検証ケース	当日計画	運行シミュレーション	
	運搬回数	計画されたトラック台数	受入施設到着時間差平均※1
ケース1 走行時間余裕なし	62回	26台	18.0分
ケース2 走行時間の15%を余裕として加算		28台(+2台)	-2.5分
ケース3 走行時間の30%を余裕として加算		29台(+3台)	-17.1分

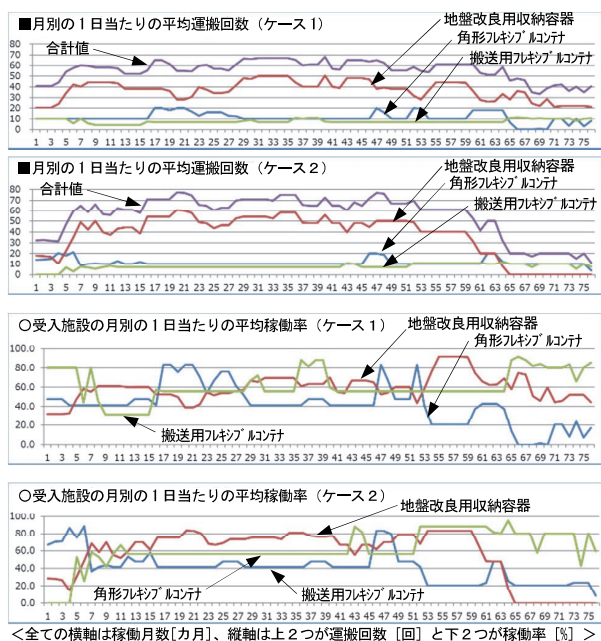


図-8 月別の1日当たりの平均運搬回数と平均稼働率

ン手法を予め実施しておくことで、現場で突然発生する様々な状況を把握でき、実際の運行管理に対して臨機応変に対応することが可能になる。

6. あとがき

福島県では放射性物質汚染対処特措法に基づいた特定廃棄物等と除去土壌等の仮置場からの搬出作業が実施されており、大型土のう1袋毎の管理や輸送車両のGPSを用いた常時モニタリングなど環境影響に細心の配慮を払いながら輸送事業が進められている。除去土壌等についてはパイロット輸送が平成26年度から約1年間運用され、その後に本格輸送が平成28年に開始され、それぞれ約4.3万m³、平成28年3月から同年11月の本格輸送で85,442m³の除染土壌等の輸送が完了した^{4), 5)}。平

成29年度の総搬入予定量は、概ね1年間で50万m³程度が計画されており、輸送車両は年間平均して350往復/日程度走行すると想定されている⁶⁾。平成28年12月時点での福島県内の輸送対象物量は、減容化前で1,870万~2,815万m³とされており、輸送量は今後も増大する見込みである。本事業はあくまでも30年を前提とした中間貯蔵であり、その後の再利用方法として、放射性物質濃度の低い土壌について、県外の造成事業等に活用する方針も検討されている。このような特殊な土壌という扱いではあるが、厳格な管理を伴う輸送は今後も長期にわたって継続されることになり、本開発技術の適用期間も長期に及ぶと考えられる。

本報告では、初期に開発した「災害廃棄物統合管理システム」および「除染統合管理システム」の概要と、被ばくをできるだけ低減するための作業の迅速化、および車両の待機時間調整機能付加による一連の運行の効率化を組み込んだインフォクロスの開発内容、および機能について述べた。前2者については既にも実績が得られているが、インフォクロスの運用効果は、今後の事業適用によって明らかにしていく予定であり、適用成果については改めて報告したい。

最後になるが、本システムに係る知見や基礎資料の提供に際し、伊藤忠テクノソリューションズ株式会社の各位には絶えず協力を頂いた。また、京都大学大学院の勝見武教授には災害廃棄物処理業務における研究データも参考にさせて頂いた。ここに謝してお礼申し上げる。

【参考文献】

- 1) 遠藤和人、「オフサイトにおける除染・放射性セシウム制御と土木技術」、土木学会誌、Vol.99、No.3、pp.18-21、2014
- 2) 前田建設工業株式会社、「除去土壌等の安全確実な輸送を実現する運行管理システムの開発」、プレスリリース、2015.2.18 など
- 3) 倉品 悠、今井亮介、森本克秀、酒井一紀、西村龍彦、「輸送統合管理システムの開発、環境浄化技術」、Vol.15、No.6、pp.50-55、2016.11-12
- 4) 環境省「パイロット輸送に係る検証報告について（平成28年3月改訂）」、<http://josen.env.go.jp/chukanchozou/action/investigative_commission/pdf/pilot_transportation_160331_01.pdf> (参照 2017.5.11)
- 5) 環境省「中間貯蔵施設への除染土壌等の輸送に係る検証報告（平成28年11月）」、<http://josen.env.go.jp/chukanchozou/action/investigative_commission/pdf/pilot_transportation_161129_01.pdf> (参照 2017.5.11)
- 6) 環境省「中間貯蔵施設への除染土壌等の輸送に係る実施計画（平成28年12月更新）」、<http://josen.env.go.jp/chukanchozou/action/investigative_commission/pdf/pilot_transportation_161222_01.pdf> (参照 2017.5.11)

パネルゾーンに超高強度鋼繊維補強コンクリートを用いた PCa 柱梁接合部の構造性能

Structural Performance of Precast Concrete Beam-Column Joint Using Ultra High Strength Steel Fiber Reinforced Concrete in the Panel Zone

細矢 博*

要 旨

パネルゾーンに超高強度鋼繊維補強コンクリートを用いた PCa 柱梁接合部の構造性能を検討するため、鋼繊維の体積混入率を実験変動因子とした 3 体の十字形 PCa 柱梁接合部試験体を用いて構造実験を行った。その結果、パネルゾーンの超高強度コンクリートを鋼繊維補強した場合、パネルゾーンでのひび割れの進展が抑制された。これにより、最大耐力時以降の耐力低下が抑えられ、変形性能（靱性）が向上することを確認した。また、残留ひび割れ幅も小さくなることを確認した。さらに、パネルゾーンの損傷が抑制されるため、補強しない試験体に比べて最大耐力が約 5%増大した。鋼繊維を混入すると、大地震後もひび割れ補修が容易になり、かつ耐力的にも有利になる。

キーワード：プレキャスト（PCa）、柱梁接合部、超高強度コンクリート、鋼繊維補強、構造性能

1. まえがき

当社は、図-1に示すように、鉄筋コンクリート造柱梁接合部における PCa 化技術の開発を行っている¹⁾。近年では、建築物の高層化に伴い、コンクリートの設計基準強度が 100N/mm² を超える超高強度コンクリートが用いられるようになったが、その一方、コンクリート強度が高くなるにつれ、脆性的な破壊性状を示すことが知られている。同時に、柱断面寸法の縮小化に伴って柱梁接合部の設計が困難になってきている。これらの問題を解決するために、当社では、構造部材に鋼繊維を混入した超高強度コンクリートを適用する研究を進めている²⁾。

本報告では、PCa 工法のさらなる合理化を図ることを目標に、柱梁接合部の高強度化、高靱性化を目指し、パネルゾーンに鋼繊維を混入した超高強度コンクリートを用いた PCa 柱梁接合部の部分架構実験を行い、鋼繊維混入によるひび割れ抑制効果、および靱性性能について検

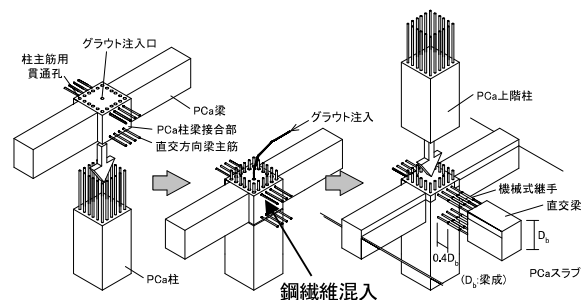


図-1 本 PCa 工法の概要

討し、柱梁接合部の構造性能の向上効果を評価した。

2. 実験概要

2.1 試験体

試験体の諸元を表-1に、試験体の形状・寸法、配筋を図-2に示す。また、使用した鋼繊維の諸元を表-2

表-1 試験体の諸元

試験体名	パネルゾーン			柱				梁					
	F _c (N/mm ²)	V _f (vol%)	横補強筋 (pw)	軸力比	F _c (N/mm ²)	断面 (mm)	主筋	横補強筋 (p _w)	F _c (N/mm ²)	断面 (mm)	主筋	横補強筋 (p _w)	
No.1	150	0	4-RB6.2×5 (SBPDN1275)	0.05	150	420	12-D22 (USD685)	4-RB6.2@60 (SBPDN1275)	60	360	16-D25 (SD490)	4-RB6.2@60 (SBPDN1275)	
No.2		0.5				420							400
No.3		1.0				0.35%							0.48%

F_c: コンクリート目標強度、V_f: 鋼繊維混入率 断面: 柱幅(B_c)×柱成(D_c)

断面: 梁幅(B_b)×梁成(D_b)

* 技術研究所建築研究グループ

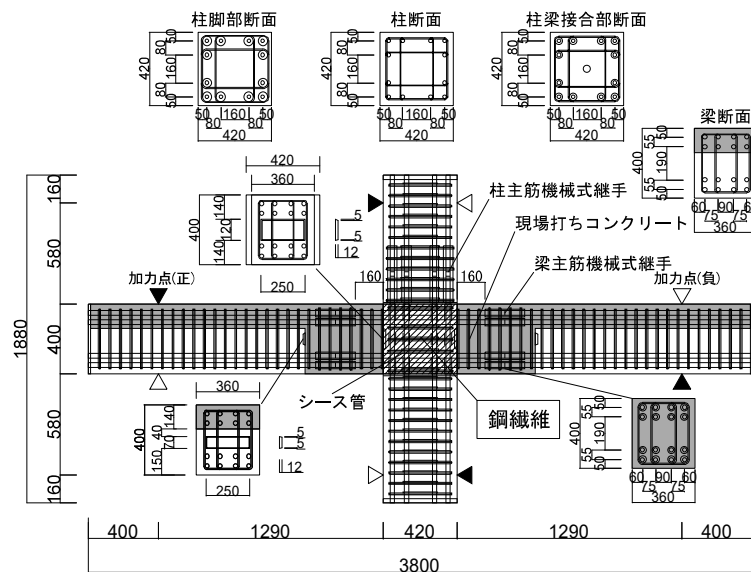


図-2 試験体の形状・寸法、配筋

表-2 鋼繊維の諸元

繊維長 (mm)	繊維径 (mm)	引張強度 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)
13	0.16	2830	210

に、コンクリートと鉄筋の材料試験結果を表-3および表-4に示す。試験体は、梁曲げ降伏先行型に計画した実物の約 1/2.5 に縮小した平面十字形試験体で、3 体製作した。実験変動因子は、パネルゾーンに混入させる鋼繊維の体積混入率とした。試験体 No.1 は、パネルゾ

表-3 コンクリートの材料試験結果

試験体名	目標 圧縮強度 (N/mm ²)	圧縮強度 (N/mm ²)	ヤング 係数 (kN/mm ²)	備考
No.1~3	150	159	45.1	柱
No.1		159	45.1	パネルゾーン (0.0vol%)
No.2		167	44.6	パネルゾーン (0.5vol%)
No.3	172	44.7	パネルゾーン (1.0vol%)	
No.1~ No.3	60	65.0	31.8	梁PCa部
		68.1	34.3	梁現場打ち部

表-4 鉄筋の材料試験結果

種類	降伏強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	ヤング 係数 (kN/mm ²)	降伏 ひずみ (%)	備考
D22 (USD685)	710	893	193	0.369	柱主筋
D25 (SD490)	519	683	189	0.275	梁主筋
RB6.2 (SBPDN 1275)	1408*	1450	196	0.718	横補強筋

*0.2%オフセット値

ンに鋼繊維を混入していない基準試験体である。試験体 No.2 および No.3 は、パネルゾーンに鋼繊維を混入させ、体積混入率をそれぞれ 0.5vol%、1.0vol%とした試験体である。

2.2 実験方法

試験体の加力については、柱の反曲点位置を油圧ジャッキで支持し、梁の反曲点位置に取り付けたアクチュエータで層間変形角を制御して加力を行った。加力サイクルは、層間変形角で R=± 1/400、± 1/200、± 1/100、± 1/67、± 1/50、± 1/33、± 1/25、± 1/20rad を各 2 回ずつ行う正負交番漸増繰返し載荷であった。

3. 実験結果

3.1 梁せん断力-層間変形角関係、および破壊性状

各試験体の梁せん断力-層間変形角 (Q-R) 関係、および最終破壊性状を図-3に示す。なお、柱部材、梁部材に発生したひび割れのみを黒色と赤色のペンでトレースした。(黒：正加力時、赤：負加力時)

Q-R 関係の図に点線で示した梁曲げ耐力の計算値は、材料試験結果を用いて ACI ストレスブロック法によって求めた値である。No.1 の負側を除くと、3 体ともに計算値は実験値を小さめに評価していることが分かる。

試験体 No.1 では、層間変形角 R=1/400rad 時に梁の曲げひび割れ、パネルのせん断ひび割れが、層間変形角 R=1/200rad 時に柱の曲げひび割れが順次発生した。その後、全試験体ともに、主筋に貼付したひずみゲージで計測すると、層間変形角 R=1/50rad 時に一段目主筋が梁端部で曲げ降伏し、層間変形角 R=1/33rad 時に二段目主筋が梁端部で曲げ降伏して最大耐力に達した。最大耐力

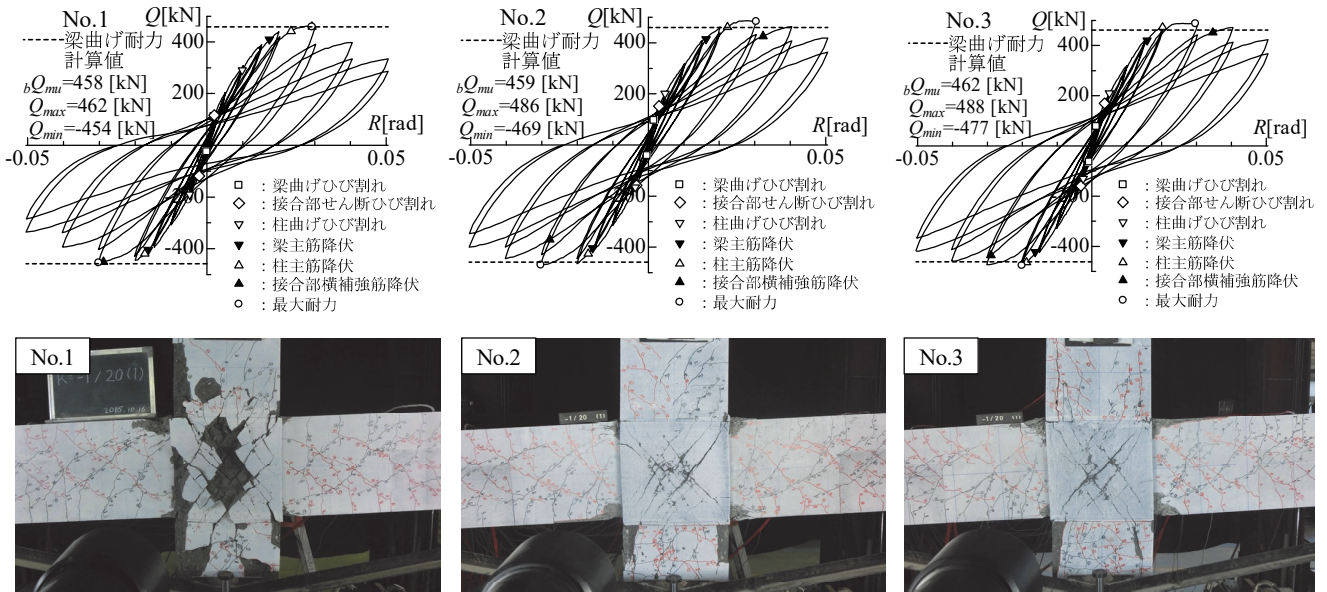


図-3 Q-R 関係、および破壊性状

以降において、全試験体でパネルのせん断ひび割れが拡大し、荷重が低下したが、鋼繊維補強した試験体 No.2 および No.3 は、鋼繊維補強していない試験体 No.1 と比較すると、パネルゾーンのひび割れ幅の拡大は軽微であり、荷重の低下もわずかであった。これらの破壊性状により、パネルゾーンに鋼繊維を用いることでパネルゾーンの損傷が抑制され、最大耐力時以降の耐力低下を抑えられることが確認された。また、層間変形角 $R=1/20rad$ 時において、試験体 No.2 と試験体 No.3 を比較すると、ひび割れ幅の大きいパネルゾーンでは、両試験体ともにせん断ひび割れが数本確認されたが、試験体 No.2 のパネルゾーンには、ひび割れ幅の小さいせん断ひび割れも多数みられ、ひび割れの分散が確認された。一方、試験体 No.3 では試験体 No.2 に比べ分散がわずかに劣っていた。最終的な破壊モードは、各試験体ともに梁曲げ降伏後のパネルせん断破壊 (BJ) と判断した。

3.2 梁主筋、および柱・パネルゾーン横補強筋のひずみ分布

1 サイクル目の正側最大荷重時における、試験体 No.1 と試験体 No.2 の梁上端一段目主筋のひずみ分布、および柱・パネルゾーンの横補強筋のひずみ分布を図-4に示す。梁主筋のひずみは、両試験体ともに、一段目梁主筋が梁端部において曲げ降伏した後に最大耐力に達しているため、梁主筋の降伏が最大耐力を決定する要因であることが確認できた。一方、鋼繊維補強した試験体 No.2 では、鋼繊維補強していない試験体 No.1 よりも、最大耐力以降における梁端部でのひずみが増大した。こ

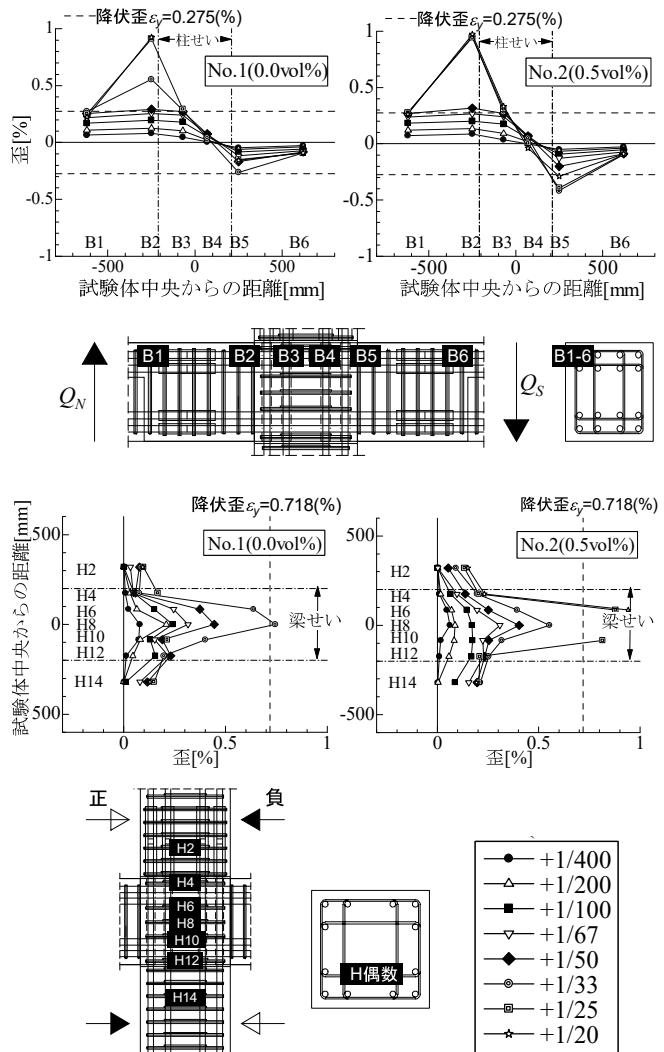


図-4 梁主筋、および柱・パネルゾーン横補強筋のひずみ分布

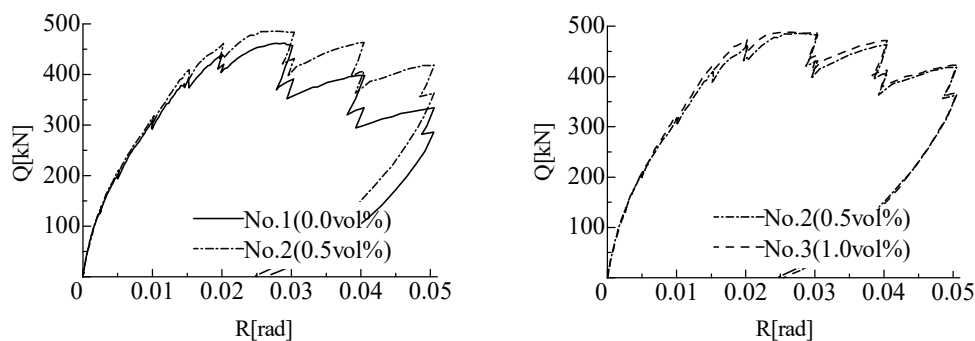


図-5 包絡線の比較(左図:鋼繊維補強の有無による比較, 右図:鋼繊維混入量の違いによる比較)

表-5 限界変形角の比率

試験体名	限界部材角* (rad)	比率
No.1	0.046	1.00
No.2	0.05以上	1.08以上
No.3	0.05以上	1.08以上

* 正方向・負方向加力時の平均値

表-6 最大耐力の比率

試験体名	最大耐力 (kN)	比率
No.1	462	1.00
No.2	486	1.05
No.3	488	1.06

れは、鋼繊維補強によりパネルゾーンのひび割れ損傷が抑制され、梁端部での曲げ損傷が進展したため、最大耐力以降において違いがみられたと考えられる。柱・パネルゾーンのみずみは、試験体 No.1 ではパネルゾーンの横補強筋が降伏した後に最大耐力に達しているが、試験体 No.2 では最大耐力に達した後にパネルゾーンの横補強筋が降伏した。これは、鋼繊維補強によってパネルゾーンの損傷が大変形時まで抑制されたため、降伏時の層間変形角に違いが生じたと考えられる。また、鋼繊維の混入量の異なる試験体 No.2 と試験体 No.3 では、みずみ分布の明確な違いはみられなかった。

3.3 梁せん断力-層間変形角関係の包絡線の比較

各試験体の梁せん断力-層間変形角関係の包絡線の鋼繊維補強の有無による比較、および鋼繊維混入量の違いによる比較を図-5に示す。鋼繊維補強していない試験体 No.1 と鋼繊維補強した試験体 No.2 による比較では、最大耐力に達した層間変形角 $R=1/33rad$ 以降において、試験体 No.2 は試験体 No.1 よりも耐力低下が小さくなった。これは、鋼繊維の混入によりパネルゾーンのひび割れの進展が抑制されたことで、最大耐力以降の耐力低下が抑えられ、変形性能が向上したことを表している。ここで、 $Q-R$ 関係の包絡線において、最大耐力から荷重が 80%に低下したときの層間変形角を限界変形角と定義し、表-5に示す。試験体 No.1 に対し、試験体 No.2、No.3 では限界変形角が大きいことが分かる。一方、最大耐力について、表-6から、鋼繊維を混入していない試験体 No.1 と鋼繊維を混入した試験体 No.2、No.3 を比較すると、試験体 No.2、No.3 は試験体 No.1 に比べて最大耐力が約 5%高くなっている。これは、試験体 No.2、No.3 では、試験体 No.1 に比べてパネルゾーンの損傷が軽微であったため耐力差が生じたものと考えられる。他

方、パネルゾーンに鋼繊維を 0.5vol%混入した試験体 No.2 と 1.0vol%混入した試験体 No.3 による鋼繊維混入量の違いによる比較では、最大耐力後の耐力低下がほぼ同じになっており、混入量の増大による変形性能の向上がみられなかった。これは、鋼繊維の混入量を倍増させたため、コンクリートの流動性やコンクリート中の鋼繊維の分散性が低下し、鋼繊維による架橋効果が十分発揮されなかったと推定される。

3.4 変形割合の推移

試験体 No.1 と試験体 No.2 の全体変形に対する梁、柱、およびパネルゾーンの変形割合を図-6に示す。最大耐力に達する層間変形角 $R=1/50rad$ までは両試験体ともに梁の変形割合が支配的であり、同様の傾向を示していたが、それ以降においては、パネルゾーンの変形割合に違いがみられた。鋼繊維補強していない試験体 No.1 では、最大耐力以降におけるパネルゾーンの損傷拡大に伴い、パネルゾーンの変形割合が急激に増加し、層間変形角 $R=1/20rad$ 時には 60%程度になった。鋼繊維補強した試験体 No.2 では、最大耐力以降において、パネルゾーンの変形割合が増加したが、試験体 No.1 と比較すると小さくなり、層間変形角 $R=1/20rad$ 時には 50%程度であ

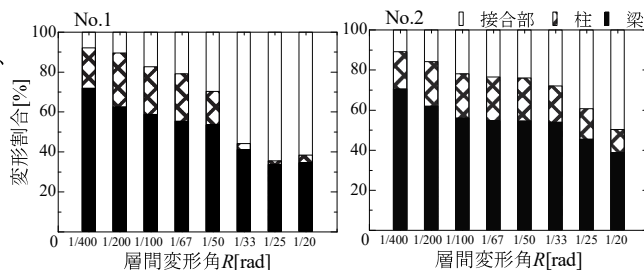


図-6 各部材の変形割合

り、柱の変形割合が増加した。また、鋼繊維の混入量の異なる試験体 No.2 と試験体 No.3 では、変形割合の明確な違いはみられなかった。

3.5 等価粘性減衰定数

等価粘性減衰定数と層間変形角の関係を図-7に示す。各試験体における等価粘性減衰定数には大きな違いがみられなかった。また、図中に示した破線は、武田モデルを利用した、等価線形化法に基づく下式の減衰評価式による計算値である。図に示されているように、全ての試験体において、層間変形角 $R=1/20\text{rad}$ まで実験値が計算値を上回った。従来の設計法を用いると、安全側に評価できることが確認された。

3.6 パネルゾーンのひび割れ性状

各試験体のパネルゾーンにおけるひび割れ幅と層間変

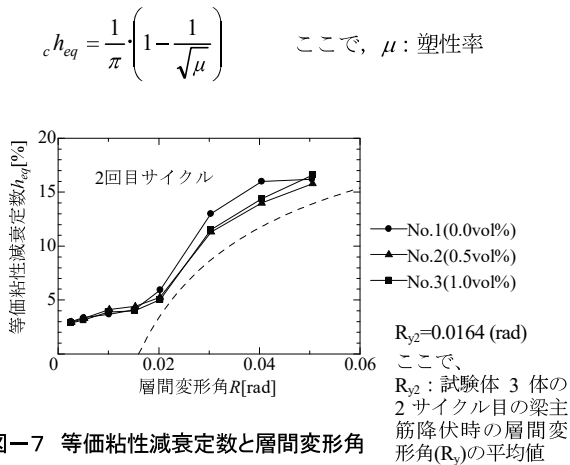


図-7 等価粘性減衰定数と層間変形角

形角関係を図-8に示す。ひび割れ幅は、パネルゾーンの写真画像において、拡大が顕著であったひび割れを正加力時と負加力時でそれぞれ3か所ずつ選定し、画像計測より算出した値である。鋼繊維補強していない試験体 No.1 と、鋼繊維補強した試験体 No.2 および No.3 を比較すると、試験体 No.2 および No.3 では、パネルゾーン内の鋼繊維によるひび割れの架橋で、ひび割れ幅の拡大を抑えることが分かった。また、試験体 No.1 では、大変形時において残留ひび割れ幅の拡幅が顕著であったが、試験体 No.2 および No.3 では、レベル2程度の地震動に相当する層間変形角 $R=1/50\text{rad}$ 時まで 0.5mm 以下に抑制されていることが確認された。これにより、パネルゾーンのコンクリートに鋼繊維を混入した場合は、レベル2程度の地震動を経験しても残留ひび割れ幅は微細であり、容易に補修が可能であると考えられる。

4. まとめ

実験変動因子をパネルゾーンのコンクリートに混入させる鋼繊維の体積混入率とし、3体の試験体を用いて構造実験を行った。その結果、

- i. 全試験体ともに、破壊モードは、梁曲げ降伏後のパネルせん断破壊 (BJ) となった
- ii. パネルゾーンを鋼繊維補強することで、パネルゾーンのひび割れの進展が抑制された。その結果として、最大耐力時以降の耐力低下が抑えられ、変形性能が向上することが確認された
- iii. 鋼繊維補強すると、パネルゾーンのせん断ひび割れ幅の拡大が抑えられ、損傷が低減し、残留ひ

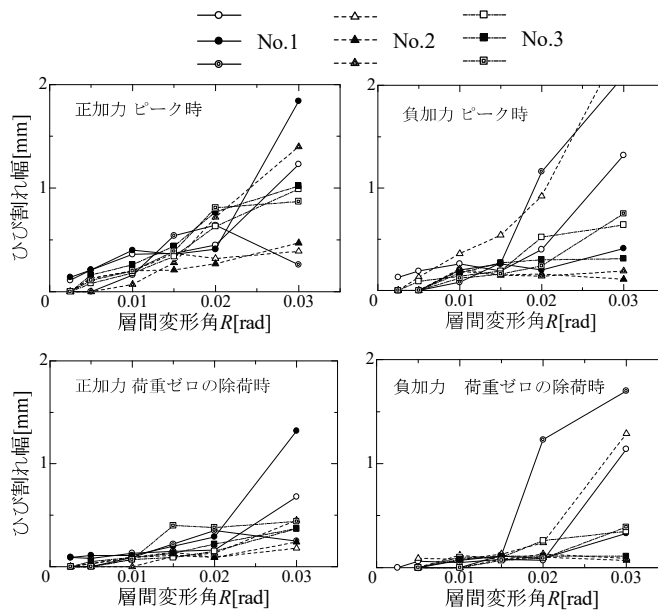


図-8 パネルゾーンにおけるひび割れ幅と層間変形角

び割れ幅も小さくなることが確認された

- iv. パネルゾーンを鋼繊維補強した試験体では、パネルゾーンの損傷が抑制されるため、補強しない試験体に比べて最大耐力が約5%増大した
- v. パネルゾーンのコンクリートに鋼繊維を0.5vol%混入すると、残留ひび割れ幅はレベル2程度の地震動を経験しても0.5mm以下に抑制され、地震後のひび割れ補修が容易であり、かつ最大耐力が向上することから設計上でも有利である
- vi. 今回の実験では、試験体 No.2 と試験体 No.3 を比較すると、鋼繊維混入量の増大による耐力、変形性能の向上はみられなかった

5. あとがき

柱梁接合部のパネルゾーンの超高強度コンクリートに鋼繊維を混入すると、構造性能が向上して最大耐力が増大し、変形性能も改善した。また、パネルゾーンの残留ひび割れ幅も縮小したので、超高強度 PCa コンクリートの柱梁接合部に適用するには有効であることが確認された。今後は、超高層建築物の部分架構に積極的に適用していきたい。

謝辞

本研究は、筑波大学の金久保利之教授、八十島章准教授に懇切丁寧なご指導、ご協力を頂いた。また、筑波大生の山田大氏、橋本京介氏には実験準備から論文作成に至るまで多くのご協力を頂いた。

また、本研究の試験体を製作するにあたり、東京鉄鋼(株)、および日本スプライススリーブ(株)より材料提供の支援を受けた。

関係各位に心より感謝申し上げます。

【参考文献】

- 1) 細矢 博、木村太一、金久保利之、八十島 章、
「PCa 柱梁接合部の構造性能に関する実験的研究 (その5, その6)」、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造IV、pp.761-764、2013.8
- 2) 細矢 博、河野政典、舟山勇司、益尾 潔、
「Fc150N/mm² 級コンクリートを用いた柱部材の構造性能に関する実験的研究 (その2)」、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造IV、pp.303-304、2014.9

超高耐久低収縮コンクリートのスラブ基盤への適用

Application of High-Durability Low-Shrinkage Concrete for Slab Base Material

河野政典* 松下弘幸** 杉岡秀紀*** 高島草麻**

要旨

歴史的建造物である薬師寺東塔の解体改修工事において新たにコンクリート製のスラブ基盤を構築することとなった。そのスラブ基盤に適用するコンクリートは、耐用年数が500年で乾燥収縮ひずみが 300×10^{-6} 以下の設計仕様であり、今回、これらの仕様を満足する超高耐久低収縮コンクリートの調合を得るため、収縮低減剤と膨張材の使用量、およびそれらの組合わせを因子とした調合実験を実施した。その結果、粗骨材に石灰石砕石を使用し、収縮低減剤と膨張材を併用した調合、および収縮低減剤をセメント質量の6%添加した調合において、 300×10^{-6} 以下を満足し、水セメント比42%で耐用年数500年を満足するコンクリートが得られることを確認した。実験結果に基づき、収縮低減剤を3%、膨張材を 20kg/m^3 を併用したコンクリートをスラブ基盤に 80m^3 適用した。

キーワード：超高耐久、低収縮、コンクリート、膨張材、収縮低減剤

1. まえがき

地球環境保護への関心が高まる中、環境負荷を低減させるため、建築物においては長期間の供用が求められつつある。鉄筋コンクリート構造物を長期間供用するためには、コンクリートの高耐久化に加えて、耐久性の低下に結びつく、ひび割れの発生を抑制することが重要である。その対策として、乾燥収縮ひずみを小さくすることが最も有効であり、日本建築学会の「建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 鉄筋コンクリート工事 2015」（以下、「JASS5」と称す）では、計画供用期間の級が長期および超長期における乾燥収縮率を 8×10^{-4} 以下に規定している。重要構造物や高い品質が求められる建物においては、より収縮ひずみが抑制されたコンクリートが要望され、同学会の「鉄筋コンクリート造建築物の収縮ひび割れ制御指針・施工指針（案）・同解説」（以下、「ひび割れ制御指針」と称す）においては、建物の目標性能に応じて 800×10^{-6} 以下に加え、 650×10^{-6} 以下、 500×10^{-6} 以下の3つの仕様区分が示されている。昨今、これらの仕様区分に対応するため、材料に石灰石骨材、収縮低減剤および膨張材を組合わせて使用し、コンクリートの収縮ひずみを抑制する研究が進められ、適用事例も報告されている¹⁾。

このようなひび割れ低減の重要性ならびに要望が高まる中、今回、歴史的建造物である薬師寺東塔の解体改修

工事において新たに構築するスラブ基盤に、耐用年数が500年で乾燥収縮ひずみが 300×10^{-6} 以下の設計仕様を満足する超高耐久低収縮コンクリートを適用した。適用に当たり、これらの設計仕様を満足するコンクリート調合を決定するための調合実験を実施した。本報では、調合実験、および実工事への適用の概要について報告する。なお、一連の実験、および工事への適用は「国宝薬師寺東塔高耐久基盤形成工事」の事業において実施したものである。

2. 調合実験

2.1 実験計画

調合実験の因子は、収縮低減剤と膨張材の使用量とした。使用量の水準と試験体の組合わせを表-1に示す。なお、粗骨材には収縮ひずみの低減効果が見込める石灰石砕石を100%の混入率で用いる計画とした。

使用材料を表-2に、コンクリートの調合を表-3に示す。セメントには、膨張材との組合わせで、普通ポルトランドセメントより膨張ひずみが大きいと報告されている中庸熱ポルトランドセメントを用いた²⁾。膨張材、収縮低減剤を使用しないSR0E00をベース調合とし、膨張材は、SR0E00のセメントの外割りで混入した。

水セメント比については、設計耐用年数500年を満足する中性化の抵抗性が得られる水セメント比を算出し、

*技術研究所建築研究グループ **西日本支社建築工務部 ***西日本支社ビルライフケア部

表一 試験体の組合わせ

記号	粗骨材 石灰石 100%	収縮低減剤の 添加率 (Cx%)*			膨張材の混入量 (kg/m ³)		
		0	3	6	0	20	25
SR0E00	○	○			○		
SR3E00	○		○		○		
SR6E00	○			○	○		
SR3E20	○		○			○	
SR6E20	○			○		○	
SR6E25	○			○			○

*収縮低減剤添加率：セメント質量割合

設定した。適用対象部材であるスラブ基盤の設計かぶり厚さ 50mm の条件で、中性化の進行予測を「鉄筋コンクリート造建築物の耐久設計指針・同解説」³⁾ に準じて行い、水セメント比を 44%以下とした。実工事においてコンクリートを供給する予定である生コン工場の標準配合を調査し、44%以下の条件を満足する配合から水セメント比 42%を採用した。

調査実験では、容量 55 リットルの強制二軸練りミキサーを用い、練上がりの目標スランプおよび空気量は 21 ± 2.0cm、4.5 ± 1.5%とした。

2.2 試験項目

試験項目と方法を表一 4 に示す。乾燥収縮ひずみの測定については、膨張材を用いた SR3E20 では JIS A 6202 附属書 2、それ以外の調査では JIS A 1129 による測定を実施した。乾燥収縮ひずみの評価は、乾燥材齢 26 週の値により行うこととした。ただし、膨張材を用いたコンクリートについては、JIS A 6202 で測定された膨張ひずみが生じ、その後、JIS A 1129 により測定された乾燥収縮ひずみが生じるものとして評価した。すなわち、式(1)に示すように JIS A 1129 で測定された乾燥収縮ひずみに、膨張ひずみ分を加えたひずみを膨張材コンクリートの乾燥収縮ひずみとした。SR3E20 の乾燥材齢 26 週の収縮ひずみは、SR3E00 の乾燥材齢 26 週のひずみに SR3E20 の膨張ひずみを加えた値、SR6E20 と SR6E25 は、SR6E00 の乾燥収縮ひずみにそれぞれの膨張ひずみを加えた値とした。

$$ex \ \epsilon_{ds} = \epsilon_{1129} - ex \ \epsilon_{6202} \quad (1)$$

$ex \ \epsilon_{ds}$: 膨張材コンクリートの乾燥収縮ひずみ

ϵ_{1129} : JIS A 1129 による乾燥収縮ひずみの測定値

$ex \ \epsilon_{6202}$: JIS A 6202 による材齢 7 日の膨張ひずみの測定値

耐用年数 500 年の対応確認は、促進中性化試験による促進中性化速度により行うこととした。屋内の炭酸ガス濃度を 0.1%と仮定し、かぶり厚さ 50mm に対して鉄筋

表一 2 使用材料

セメント	C 中庸熱ポルトランドセメント：密度 3.21
混和材	Ex 膨張材(エトリンガイト・石灰複合系)：密度:3.10
細骨材	S 山砂：京都府城陽産 密度:2.56 F.M.:2.80
粗骨材	G 石灰石碎石 2005：いなべ市藤原町東禅寺産 密度:2.69 F.M.:6.70
混和剤	SP 高性能 AE 減水剤：ポリカルボン酸系 SR 収縮低減剤

表一 3 コンクリートの調査

	W/C (%)	S/a (%)	単位量 (kg/m ³)					混和剤 (Cx%)	
			W	C	Ex	S	G	SP	SR
SR0E00	42	53.0	170	405	0	893	834	0.7	0
SR3E00	42	53.0	170	405	0	893	834	0.7	3.0
SR6E00	42	53.0	170	405	0	893	834	0.7	6.0
SR3E20	42	52.5	170	405	20	876	834	0.7	3.0
SR6E20	42	52.5	170	405	20	876	834	0.7	6.0
SR6E25	42	52.4	170	405	25	872	834	0.7	6.0

表一 4 試験項目と方法

項目	方法
スランプ	JIS A 1101
空気量	JIS A 1128
コンクリート温度	JIS A 1156
圧縮強度	JIS A 1108 標準養生 1, 4, 13 週
長さ変化	乾燥収縮試験 [調査 SR0E00, SR3E00, SR6E00]
	拘束膨張収縮試験 [調査 SR3E20, SR6E20, SR6E25]
促進中性化	JIS A 1153 [調査 SR6E20 を除く]

表一 5 フレッシュコンクリートの試験結果

	スランプ (cm)	スランプ フロー (cm)	空気量 (%)	コンクリート 温度 (°C)
SR0E00	22.0	38.8 × 36.7	4.4	21
SR3E00	23.0	47.0 × 43.5	3.5	21
SR6E00	19.0	32.5 × 31.5	3.5	21
SR3E20	23.0	45.0 × 42.0	3.0	21
SR6E20	21.5	34.8 × 34.0	3.0	20
SR6E25	21.5	34.5 × 34.5	3.4	21

腐食確率 3%以下を満足する 500 年の平均中性化深さを 30mm とすると、促進中性化試験における中性化速度係数の上限は 1.32mm/√週となる³⁾。したがって、それ以下であれば耐用年数 500 年を満足するものと判断した。

2.3 実験結果

a. フレッシュコンクリートおよび圧縮強度

フレッシュコンクリートの試験結果を表一 5 に示す。スランプ、空気量とも目標値を満足する結果であったが、

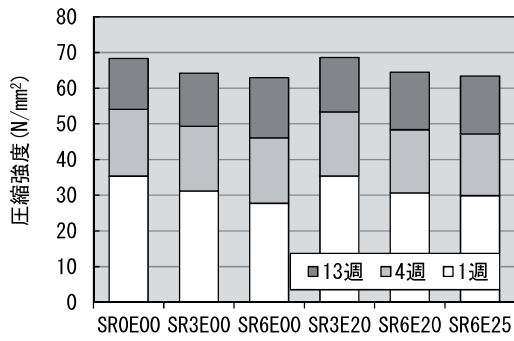


図-1 圧縮強度の試験結果

収縮低減剤を用いた調合は空気量がやや小さい傾向にあった。

圧縮強度の試験結果を図-1に、ベース調合となるSR0E00の圧縮強度に対する比として、収縮低減剤の影響を図-2に、膨張材の影響を図-3に示す。図-2に示すように、収縮低減剤の添加により圧縮強度が低下するが、材齢の経過とともにその低下率は小さくなり、既往文献と同様の傾向を示した⁴⁾。膨張材については、セメントの外割り混入としたため、20kg/m³の混入では強度増進がみられたが、25kg/m³では20kg/m³からの強度増進はみられなかった。

SR0E00に収縮低減剤を添加したSR3E00では強度が低下したが、SR3E00に膨張材を加えたSR3E20では膨張材の強度増進と相殺され、SR0E00と強度が同等となった。

b. 乾燥収縮ひずみ

(a) 収縮低減剤の効果

長さ変化の推移を図-4に示す。SR0E00の乾燥材齢26週の収縮ひずみは537×10⁻⁶であり、粗骨材に石灰石を用いたことにより一般的なコンクリートの収縮ひずみより小さく、ひび割れ制御指針の「高級仕様」に該当するコンクリートであった。

SR0E00に収縮低減剤を添加したSR3E00、SR6E00は、SR0E00の収縮ひずみのおおよそ5割以下となり、大きな収縮低減効果が確認された。図-5にコンクリートの質量減少率と長さ変化の関係を示す。収縮低減剤を用いたコンクリートでは、質量減少率に対して収縮側のひずみの変化が小さいことがわかる。

収縮低減剤の収縮低減効果として、式(2)から求めた収縮低減率を図-6に示す。

$$R_{SR} = (\epsilon_B - \epsilon_{SR}) / \epsilon_B \quad (2)$$

ここで、 R_{SR} : 収縮低減率

ϵ_{SR} : 収縮低減剤添加コンクリートの乾燥収縮ひずみ

ϵ_B : 収縮低減剤無添加コンクリートの乾燥収縮ひずみ (ここではSR0E00)

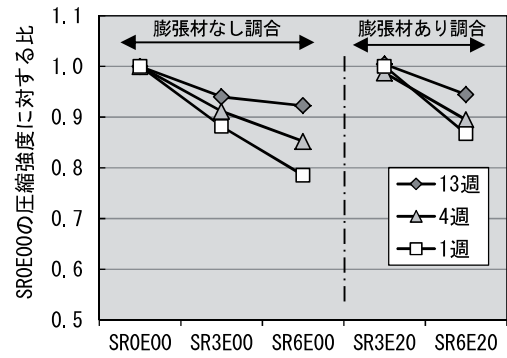


図-2 収縮低減剤の圧縮強度への影響

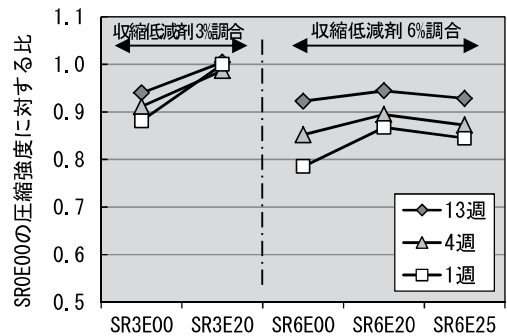


図-3 膨張材の圧縮強度への影響

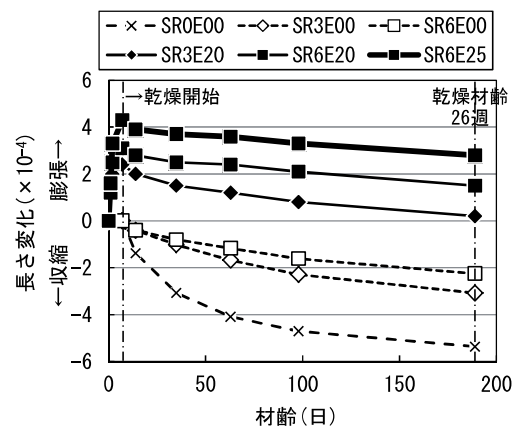


図-4 長さ変化の推移

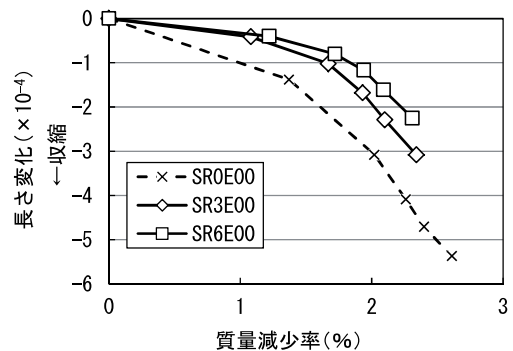


図-5 質量減少率と長さ変化の関係

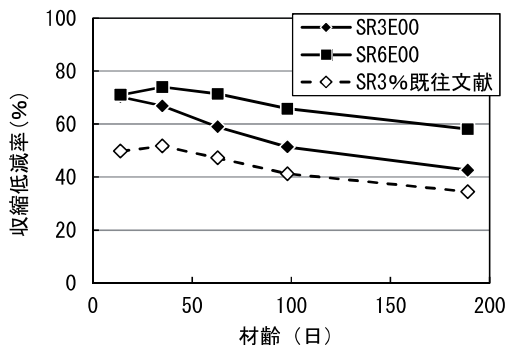


図-6 収縮低減率の推移

図-6には、SR3E00 と同一の収縮低減剤使用量における既往文献の収縮低減率⁵⁾を併せて示す。なお、既往文献の値とは、収縮低減剤使用量と収縮低減率の関係についての文献調査結果から提示されている近似式を用いて求めたものである。実験値は材齢の経過とともに低減率が緩やかに小さくなるものの、文献データと同様の傾向であり、また、SR3E00 の低減率については、文献データの平均値より大きい値であった。SR3E00 と SR6E00 を比較すると、添加率が2倍であるSR6E00のほうが低減率は大きかった。

乾燥材齢26週の収縮ひずみに対する4、8、13週の倍率を表-6に示す。SR0E00については、JASS5に示されている平均倍率⁶⁾とほぼ同じであったが、SR3E00、SR6E00については、「膨張材・収縮低減剤を使用するコンクリートの調合設計・製造・施工指針(案)・同解説」に示された平均倍率⁷⁾より大きく、特に材齢が小さいほどその差が大きい傾向にあった。図-6に示したように今回用いた収縮低減剤は、文献データよりも収縮低減効果が大きく、材齢が小さいほうが低減効果がより大きい傾向にあった。この傾向が倍率にも表れたと考えられる。なお、SR3E00 と SR6E00 の倍率はおおよそ同じであり、収縮低減剤の添加量による大きな違いはみられなかった。

(b) 膨張材の効果

膨張材を混入したコンクリートの膨張ひずみを表-7に示す。SR3E20、SR6E20、SR6E25 でそれぞれ240、310、430×10⁻⁶であった。膨張ひずみは、収縮低減剤の添加量が多いほど、また、膨張材の混入量が多いほど大きい結果となった。これまで低熱セメントや普通セメントを用いた場合、収縮低減剤と膨張材の併用により膨張ひずみが大きくなることが報告されているが⁸⁾、中庸熱セメントにおいても同様の傾向であることが確認された。

(c) 乾燥収縮ひずみの評価

乾燥材齢26週のひずみを表-7に示す。SR6E00 と収縮低減剤と膨張材を併用した計4調合のコンクリートが乾燥収縮ひずみ 300×10⁻⁶以下を満足した。SR6E20

表-6 乾燥収縮ひずみの倍率

	収縮低減剤無使用		収縮低減剤使用		
	JASS5 ⁶⁾	SR0E00	学会指針 ⁷⁾	SR3E00	SR6E00
乾燥材齢26週に対する4週の倍率	1.76	1.74	2.17	3.02	2.81
乾燥材齢26週に対する8週の倍率	1.31	1.31	1.48	1.83	1.92
乾燥材齢26週に対する13週の倍率	1.13	1.14	1.20	1.34	1.40

表-7 膨張ひずみと乾燥材齢26週のひずみ

	膨張ひずみ (×10 ⁻⁶)	乾燥材齢26週のひずみ (×10 ⁻⁶) [-:収縮, +:膨張]
SR0E00	0	-537
SR3E00	0	-308
SR6E00	0	-225
SR3E20	240	-68*
SR6E20	310	+85*
SR6E25	430	+205*

*式(1)によるひずみ

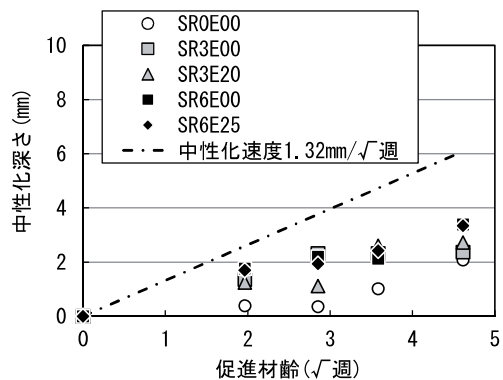


図-7 促進中性化試験結果

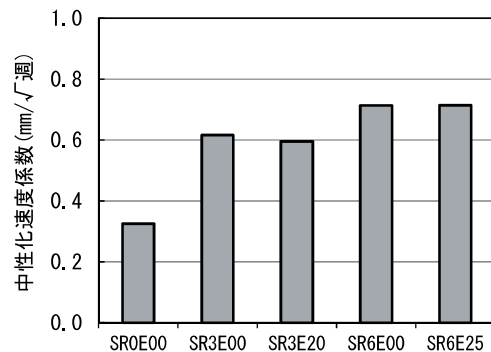


図-8 中性化速度係数

および SR6E25 については、膨張側のひずみに留まる結果であった。

c. 中性化速度

促進中性化試験結果として、促進材齢 21 週までの結果を図-7に、また、中性化の進行は時間の平方根に比例するものとして、実験データから最小二乗法により求めた中性化速度係数を図-8に示す。収縮低減剤を使用した調合の中性化の進行は、使用しないものよりやや大きい傾向にあるものの、いずれの調合も中性化の進行は小さく、中性化速度係数は 0.32~0.71 mm/√週であり、耐用年数 500 年を十分満足することが確認された。

膨張材の使用の有無については、SR3E00 と SR3E20、SR6E00 と SR6E25 の中性化速度係数はほぼ同じであり、中性化の進行への影響は小さいものと考えられる。

3. 実工事への適用

3.1 適用部材

適用部材の概要を表-8に示す。適用部材はスラブ基盤および梁で、コンクリートの打設量は 80m³ である。なお、コンクリート表面は石張り仕上げであり、雨水などによる凍結融解作用を直接受けない条件下にある。

3.2 コンクリートの調合と製造方法

コンクリートの使用材料は表-2に示す通りである。調合については、調合実験結果に基づき、強度の安定性を考慮し表-3に示す SR3E20 を採用した。コンクリートの調合管理強度は 36N/mm² である。

コンクリートの製造はレディミクストコンクリート工

表-8 適用部材の概要

所在地	奈良市内
適用部材	薬師寺東塔のスラブ基盤および梁 (スラブ面積 196m ²)
コンクリートの仕様	設計基準強度 30N/mm ² 耐用年数 500 年 乾燥収縮ひずみ 300×10 ⁻⁶ 以下
仕上げ	全面石張り仕上げ
打設量	80m ³
打設時期	2016 年 12 月

表-9 フレッシュコンクリートの試験結果

	試験回	スランブ (cm)	スランブ フロー (cm)	空気量 (%)	コンクリート温度 (°C)
打設 1 回目	①	22.0	39.0×35.5	4.5	15
	②	22.0	43.5×41.0	4.0	15
	③	21.5	39.0×37.0	3.2	16
打設 2 回目	①	22.5	42.0×42.0	5.1	13
	②	22.5	44.0×42.0	4.6	13
	③	22.5	42.0×43.0	4.5	13

場でを行い、膨張材については実機ミキサへ直接投入して練上げ、収縮低減剤についてはベースコンクリートを積載したトラックアジテータに投入して、ドラムの回転による攪拌を行いコンクリートを製造した。

3.3 実施工結果

a. フレッシュ性状と施工状況

荷卸しの目標スランブおよび空気量は 21±2.0cm、4.5±1.5%とした。荷卸しにおけるフレッシュコンクリートの試験結果を表-9に、フレッシュ試験の状況を写真-1に示す。スランブ、空気量ともに目標値を満足する結果であった。

コンクリートの打設はポンプ車のブーム配管により行った。打込み状況を写真-2に、スラブの出来形を写



写真-1 フレッシュ試験の状況



写真-2 打込み状況



写真-3 スラブの出来形（礎石設置後）

真-3に示す。スランプが21cmの設定であったこともあり、打込み施工性は良好であった。

なお、打設後は5日間の湿潤養生を実施した。

b. 圧縮強度

標準養生の圧縮強度の試験結果を表-10に示す。調合管理強度である36N/mm²を十分満足する強度が得られた。表中には供試体1個ごとの強度も併せて示すが、各打設日の3個の供試体の強度のばらつきは小さく、安定した品質のコンクリートが供給されていたと考えられる。

4. まとめ

歴史的建造物である薬師寺東塔の解体改修工事において新たに構築するスラブ基盤に、耐用年数が500年で、乾燥収縮ひずみが300×10⁻⁶以下となる超高耐久低収縮コンクリートを適用するため、収縮低減剤と膨張材の使用量、およびそれらの組合わせを因子とした調合実験を実施した。その結果、粗骨材に石灰石碎石を使用し、収縮低減剤と膨張材を併用した調合、および収縮低減剤をセメント質量の6%添加した調合において、300×10⁻⁶以下を満足することを確認した。また、収縮低減剤を6%添加し、膨張材を併用した場合、膨張側のひずみに留まる結果が得られた。そして対象部材においては、水セメント比42%で耐用年数500年を満足するコンクリートが得られることを確認した。

調合実験結果に基づき、収縮低減剤を3%、膨張材を20kg/m³を併用したコンクリートを歴史的建造物のスラブ基盤に80m³適用した。

5. あとがき

今回、現場適用したコンクリートの乾燥収縮ひずみの仕様が300×10⁻⁶以下であったが、よりひび割れの発生を抑えるため、調合実験で100×10⁻⁶以下が確認された調合を適用した。施工から5か月経過した時点では、ひび割れは確認されなかった。

今後も高まるであろうひび割れ低減の要望に応えるべく、より合理的な収縮低減効果が得られる材料の組合わせについて検討を進めたい。

謝辞

本実験の実施および工事への適用にあたり、法相宗大本山薬師寺様、奈良県文化財保存事務所様のご協力を頂いた。ここに、心より感謝申し上げます。

【参考文献】

- 1) 例えば、小川亜希子ほか、「無収縮タイプコンクリートの化粧打放し壁への適用」その1~2、日本建築学

表-10 圧縮強度の試験結果 [単位 N/mm²]

	材齢7日		材齢28日	
	打設	31.1	[平均]	48.5
1回目	30.4	31.3	49.3	49.5
	32.5		50.7	
打設	28.3	[平均]	46.9	[平均]
2回目	28.5	28.2	45.8	45.7
	27.9		44.5	

- 会大会学術講演梗概集(九州)、pp.155-158、2016.8
- 2) 兵頭彦治、谷村 充、鈴木康範、溝渕利明、「各種セメントを用いた膨張コンクリートのひずみ曲線の検討」、土木学会第63回年次学術講演会講演梗概集、5-439、pp.877-878、2008.9
- 3) 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」、pp.99-126、2016
- 4) 谷村 充、兵頭彦治、「収縮低減剤を用いたコンクリートの基礎性状、日本建築学会大会学術講演梗概集(北陸)、pp.757-758、2002.8
- 5) 日本建築学会、「膨張材・収縮低減剤を使用したコンクリートに関する技術の現状」、pp.211-212、2013.7
- 6) 日本建築学会、「建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 鉄筋コンクリート工事2015」、p.369、2015.7
- 7) 日本建築学会、「膨張材・収縮低減剤を使用するコンクリートの調合設計・製造・施工指針(案)・同解説」、p.102、2017.2
- 8) 日本建築学会、「膨張材・収縮低減剤を使用したコンクリートに関する技術の現状」、pp.120-121、2013.7

実免震建物における免震装置の水平剛性の評価

Evaluation of the Dynamic Characteristics of the Base-isolation System on the Actual Building

山上 聡* 舟木秀尊* 安井健治** 小山慶樹*

要 旨

竣工 30 年目を経過した免震建物を対象に、静的加力実験と自由振動実験を行い、免震層の水平剛性を比較検討した。その結果、自由振動実験から得た水平剛性は、静的加力実験における割線剛性と良い一致を示した。このことから、天然ゴム系積層ゴムと鋼棒製ダンパーを用いた免震建物の動的応答を、静的加力試験で得られた力学特性によって評価することの妥当性が確認できた。さらに、繰り返し変形と、温度変化が天然ゴム系積層ゴムの水平剛性に与える影響について検討した。その結果、繰り返し変形による剛性の変化はほとんど見られなかった。また、温度が高くなると積層ゴムの水平剛性が低下する傾向は、ゴムの材料試験の傾向とほぼ一致していることを確認した。

これらのことから、当初の設計条件の妥当性を確認でき、免震構造は十分な安全性と耐久性を有していることを確認した。

キーワード：積層ゴム、鋼棒製ダンパー、経年変化、繰り返し変形、温度変化

1. まえがき

近年発生した巨大地震において、免震構造の優れた地震時安全性が証明され、その普及に大きな期待が掛けられている。しかし、我が国で免震構造が実用化されて 30 年程度であり、免震建物を供用する数十年という長期間にわたる構造性能の評価と耐久性に関しては実証されていない。その中で奥村組技術研究所管理棟は日本初の実用免震ビルとして竣工後 30 年が経過した。免震構造のさらなる普及には、免震構造の性能と長期にわたる信頼性に関するデータの蓄積が重要であるとの認識に立ち、当社では竣工以来、建物と免震装置に関する様々な実験・計測を継続して行っている^{1),2),3),4)}。

免震建物の地震時の動的挙動を予測するには、免震装置の力学特性を適切にモデル化することが重要である。設計では通常、免震装置単体での静的加力試験より得られた特性を用いて免震層全体をモデル化する。しかし、実建物での免震装置の動的特性と静的特性とを実測した例は少ない。

そこで、実建物を用いて静的加力実験と自由振動実験を行い、免震装置の変位と荷重および周期の関係から水平剛性を比較検討した。

2. 対象建物および免震装置

対象とした免震建物は、つくば市内に建設され 1986 年 9 月に竣工した当社の技術研究所管理棟である。対象



写真-1 対象建物の外観

表-1 建物概要と免震装置

項目	諸元	
構造	RC造4階 基礎免震	
高さ	15.5m	
建築面積	348.18m ²	
延べ床面積	1,330.1m ²	
軒高	13.75m	
免震装置	積層ゴム	天然ゴム系積層ゴム φ500×25 基
	ダンパー	鋼棒製ダンパー φ50×12 基

*技術研究所建築研究グループ **技術研究所企画・管理グループ

建物外観を写真-1に、建物概要と免震装置を表-1に示す。免震装置には、天然ゴム系積層ゴム 25 基と、鋼棒製ダンパー12 基を使用している。

積層ゴムのゴム径は 500mm、ゴム層は 7mm×14 層であり、ゴム総厚は 98mm、鉛直・曲げ剛性の指標となる 1 次形状係数は 17.1、座屈荷重や水平剛性の指標となる 2 次形状係数は 5.1 である。ゴム材料は G4 相当である。

鋼棒製ダンパーは、4 巻のループ状の鋼棒よりなる弾塑性ダンパーである。鋼棒の直径は 50mm、ループの直径は 550mm、材質は S20C である。

3. 実験方法

3.1 実験の概要

建物の外部に構築した反力体に、2 台の油圧ジャッキを取り付けた載荷装置を設置し、静的加力実験と自由振動実験を行った。載荷状況を写真-2に示す。竣工時（1986 年）、2 年目（1988 年）、19 年目（2005 年）、30 年目（2016 年）とも、同じ載荷装置を用いて実験を実施している。免震装置の配置と加力位置を図-1に示す。実験は、鋼棒製ダンパーの有無による 2 ケースである。

水平剛性に影響を及ぼす経年変化以外の要因として、建物重量の変化と温度条件の違いが挙げられる。重量の変化は、竣工後大規模な改修を行っていないため軽微と考えた。温度の影響を極力除くために実験の実施時期を合わせた。また、気温の影響を把握する目的で、今回の実験では気温の異なる時期に実験を実施した。

3.2 静的加力実験

静的加力実験は、油圧ジャッキを用いて建物を片押しで加力し、所定の荷重に達したところで徐々に除荷する方法とした。このとき、免震装置の変形が約 100mm（積層ゴムのせん断変形率 $\gamma=100\%$ ）を超えないこととし、最大荷重の目標値を 3000kN（ダンパーあり）、2500kN（ダンパーなし）とした。

3.3 自由振動実験

自由振動試験は、油圧ジャッキにより建物に所定の変形 100mm を与え、載荷装置の解放ジャッキにより瞬時に開放し、上部構造を自由振動させた。

4. 実験結果

4.1 免震層の水平剛性（積層ゴム+鋼棒製ダンパー）

a. 静的加力実験

鋼棒製ダンパーが有る状態での静的加力実験から得られた荷重と変位の関係を図-2に示す。竣工時の実験データに精度上の問題があるため、ここでは 2 年後の 1988 年に実験したものを初期とした。同図には併せて設計値を示しており、初期剛性 $K_1=4459\text{kN/mm}$ 、2 次剛性 $K_2=2107\text{kN/mm}$ 、降伏荷重 $\sigma_y=1308\text{kN}$ である。

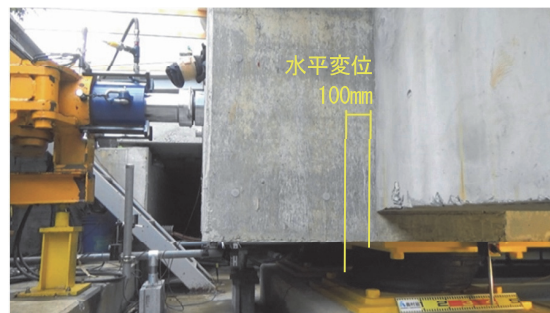


写真-2 載荷状況

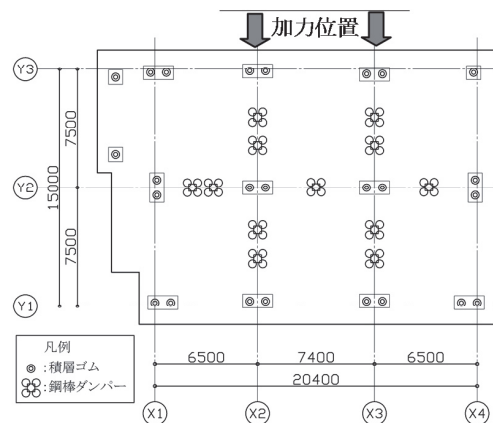


図-1 免震装置の配置

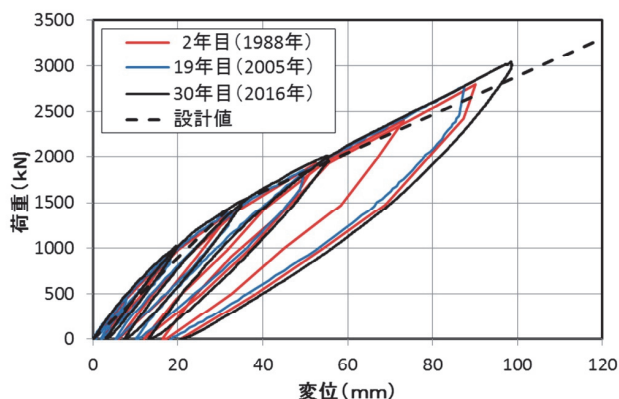


図-2 荷重と変位の関係（ダンパーあり）

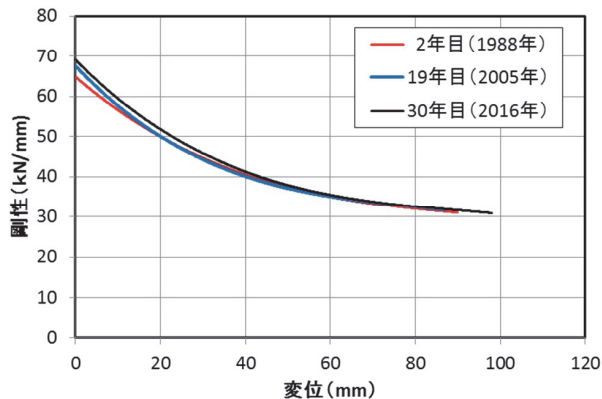


図-3 各変位における割線剛性（ダンパーあり）

図から静的加力実験の剛性と設計値はほぼ一致していることが確認された。鋼棒製ダンパーが降伏する 30mm 以降の 2 次剛性については、竣工後ほとんど変化は見られない。水平剛性を詳細に調べるため、荷重と変形の関係の包絡線から各変位における割線剛性を求め、図-3 に示す。19、30 年目において積層ゴムと鋼棒製ダンパーで構成される免震層全体の水平剛性に大きな変化は見られなかった。

b. 自由振動実験

自由振動実験より得られた変位の時刻歴波形の比較を図-4 に示す。初期変位の影響を除くため、初期サイクルを除く自由振動 10 回繰り返しに要した時間は、2 年目が 12.06 秒に対し、19 年目は 12.15 秒と長く、30 年目は 11.66 秒と 3.4% 短くなっている。19 年目が長くなった要因としては、鋼棒製ダンパーの固定度が低かったことが考えられるが、免震装置としての周期特性に大きな変化は見られない。各変位レベルにおける、免震装置の剛性の変化を評価するために、1/2 サイクルごとにおける周期と振幅を求め、各振幅（変位）における周期をプロットしたものを図-5 に示す。振幅が小さくなるにつれて周期は短くなっている。また、微小振幅の範囲ではばらつきはあるものの、2 年目に比べ 19 年目、30 年目と経年による変化は見られない。

c. 静的加力実験と自由振動実験による剛性の比較

図-5 に示した周期に対して、建物質量を 2,150t と仮定して剛性に変換したものを、静的加力実験結果（図-3）と合わせて図-6 に示す。自由振動実験と静的加力実験から求めた剛性は各変位で良く一致しており、建物の変位と周期の関係は、免震層を構成する免震装置の静的加力試験から得られる割線剛性により評価できることが確認できた。

4.2 積層ゴムの水平剛性

a. 静的加力実験

積層ゴムだけの静的加力実験における荷重と変位の関係を図-7 に示す。竣工時に比べ 19 年目、30 年目は剛性が高くなっている。

図-7 における包絡線から求めた各変位における割線剛性を図-8 に示す。変位が大きくなるにつれて剛性は小さくなる傾向にある。竣工時から 19 年目にかけては全体的に剛性が高くなっているが、19 年目から 30 年目への変化は少ない。

各変位における竣工時と 19 年目の剛性比、および竣工時と 30 年目の剛性比を図-9 に示す。変位が大きくなるにつれて剛性比は小さくなっている。剛性比を変位 0~100mm 間で平均すると、19 年目において竣工時から 8.7% 大きくなったのに対して、30 年目では竣工時から 9.7% 大きくなっている。

b. 自由振動実験

自由振動実験における変位の時刻歴波形を図-10 に

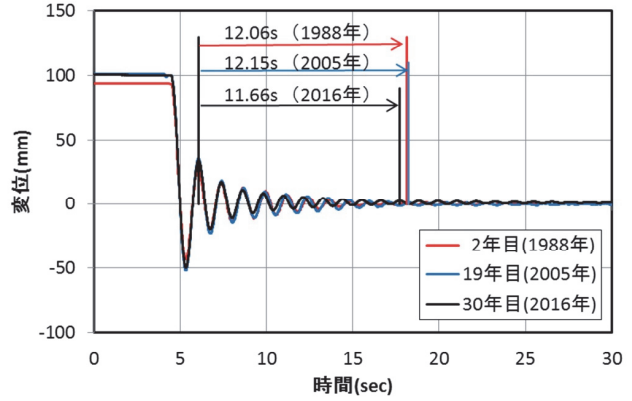


図-4 変位の時刻歴波形（ダンパーあり）

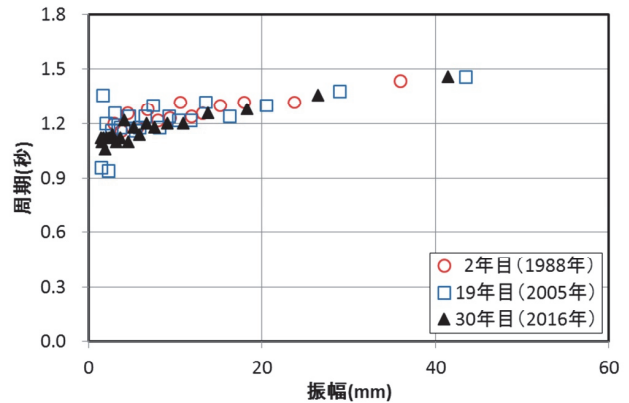


図-5 周期の変化（ダンパーあり）

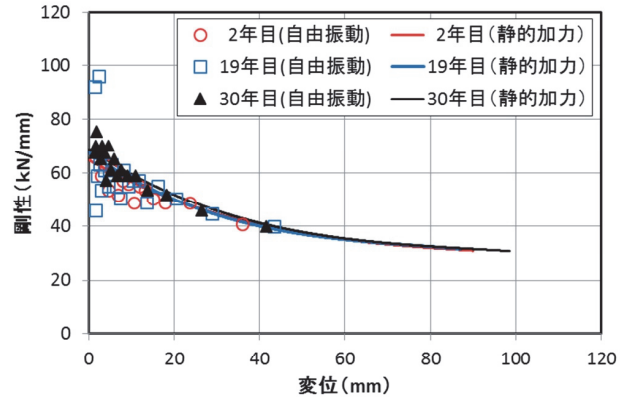


図-6 剛性の比較（ダンパーあり）

示す。ダンパーありと同様に自由振動 10 回繰り返しに要した時間は、竣工時が 18.48 秒であったが、19 年目では 17.83 秒となり、3.5% 短くなっていた。今回 30 年目では 17.67 秒となり、竣工時から 4.4% 短くなっている。建物質量は変化しないと仮定して積層ゴムの水平剛性の変化率を算出すると、19 年目では 7.4% 高く、30 年目では 9.4% 高くなっており、静的加力実験の結果とほぼ一致している。

積層ゴムの剛性の変化を評価するために、図-10 から求めた各変位における周期を図-11 に示す。変位に依存して周期が変わる傾向が見られ、19 年目と 30 年目の各振幅における周期は、竣工時から概ね 4% 程度短く

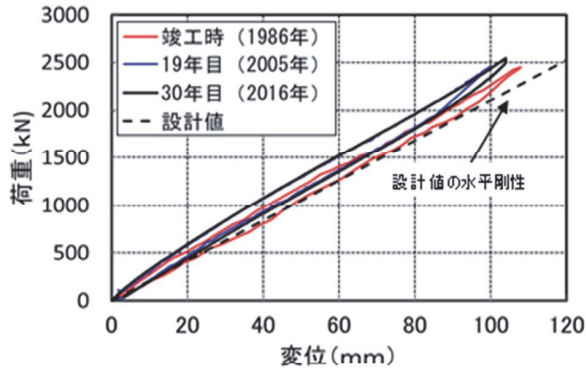


図-7 荷重と変位の関係 (ダンパーなし)

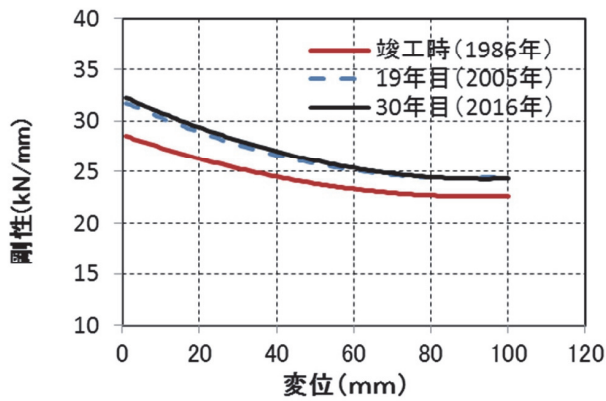


図-8 各変位における割線剛性 (ダンパーなし)

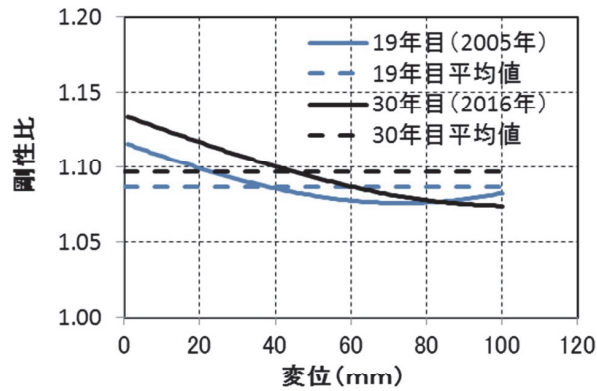


図-9 竣工時に対する剛性比 (ダンパーなし)

なっている。

c. 静的加力実験と自由振動実験による剛性の比較

自由振動実験から得られた剛性と静的加力実験から得られた各変位における割線剛性を比較し図-12に示す。自由振動実験と静的加力実験から求めた剛性は各変位で良く一致しており、建物の変位と周期の関係は、免震層を構成する免震装置単体の静的加力試験から得られる割線剛性により評価できることが確認できた。

4.3 鋼棒製ダンパーの水平剛性

鋼棒製ダンパーの特性を比較するために4.1のa.で求めた積層ゴムと鋼棒製ダンパーの割線剛性から4.2のa.で求めた積層ゴムの割線剛性を減じ、鋼棒製ダン

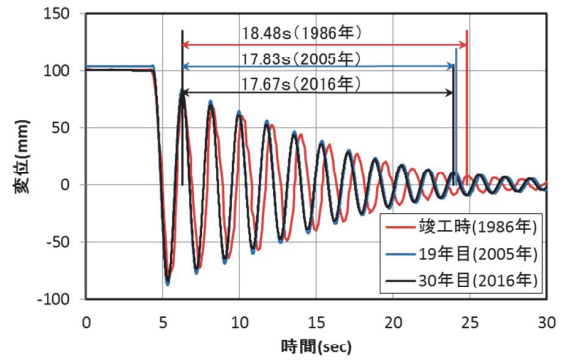


図-10 変位の時刻歴波形 (ダンパーなし)

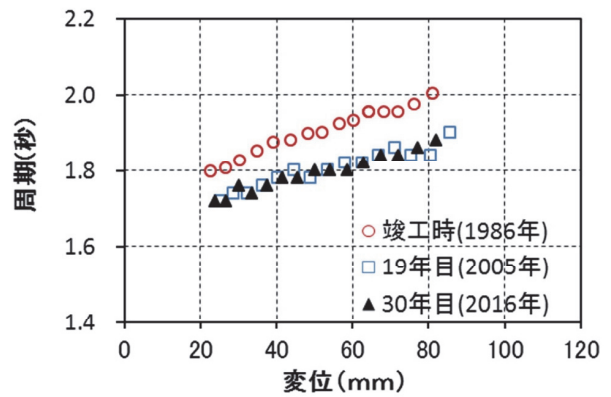


図-11 周期の変化 (ダンパーなし)

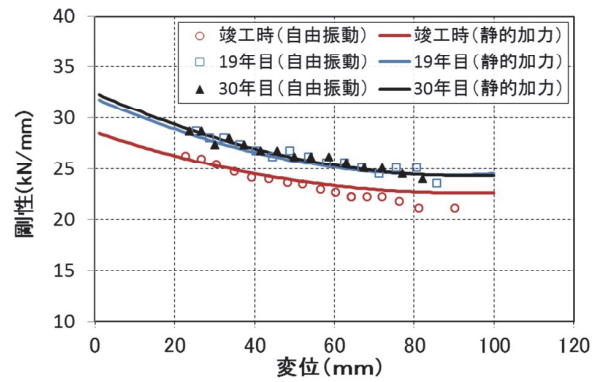


図-12 剛性の比較 (ダンパーなし)

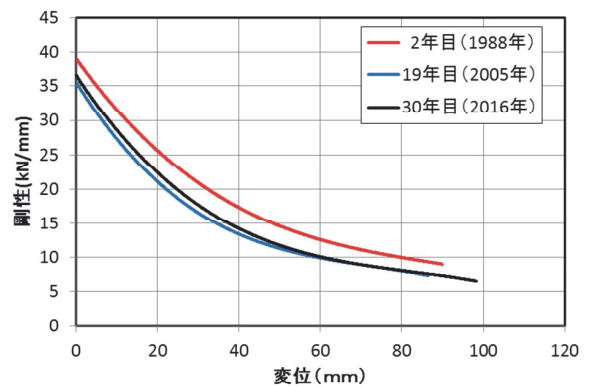


図-13 各変位における割線剛性 (ダンパーのみ)

パーのみの割線剛性として図-13 に示す。竣工時に比べ、経年時は4kN/mm程度小さくなっている。要因としては実験や地震応答における繰り返し変形による耐力低下が考えられるが、詳細については今後調査する。

5. 積層ゴムの水平剛性に影響するその他の要因

5.1 繰り返し変形の影響

2016年11月に積層ゴムのみで初期変位を10cm与えた自由振動実験を繰り返し行った。8日間で1日に2回~5回、合計29回の実験を行った。途中、静的加力実験を7回行っている。1回の自由振動実験による累積変形は約1.9mmであり、29回の合計で約55mmとなる。

自由振動実験における1回目と29回目の変位波形を

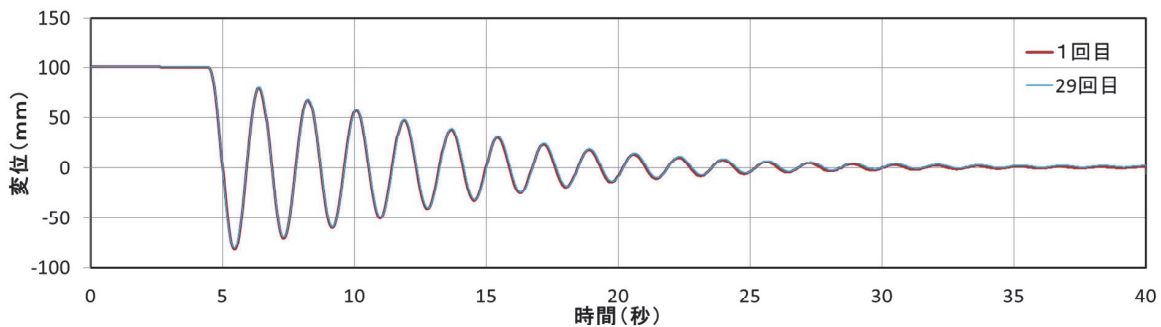


図-14 繰り返し前後での変位波形の比較

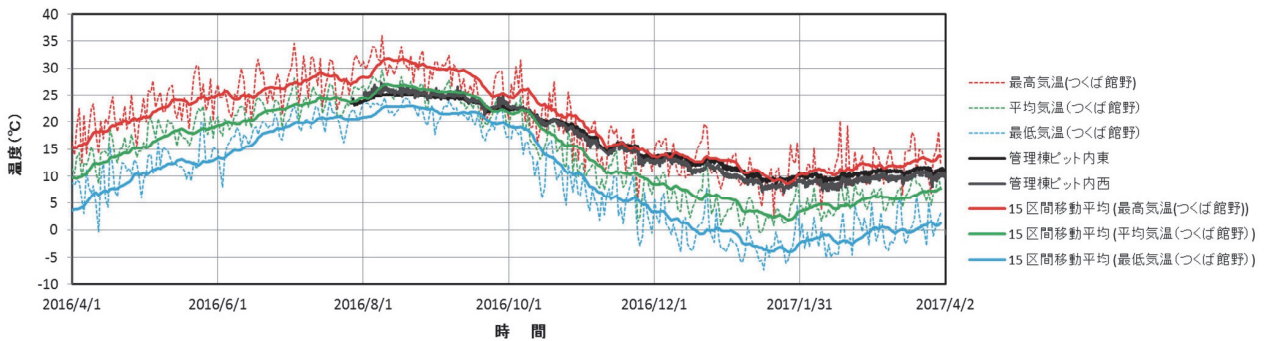


図-15 ピット内の温度と外気温の比較

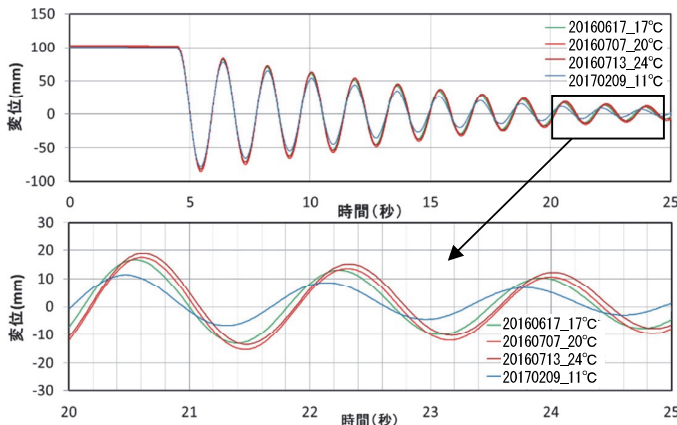


図-16 温度の違いによる比較

重ねて図-14 に示す。今回実験を行ったせん断変形率100%の範囲では、天然ゴム系積層ゴムの繰り返し変形による剛性変化はほとんど見られなかった。

5.2 温度変化の影響

a. 免震ピット内の温度変化

温度変化の影響を把握するために免震ピット内の温度を計測し、外気温と比較したものを図-15 に示す。免震ピット内の温度計測は2016年8月1日から2017年3月31日まで10分おきに行い、外気温はピット内気温の推定に一般性を持たせるため、最寄りの気象観測所のデータを用いた。ピット内の実測データと外気温の移動平均を比較した結果、当建物のピット内の温度は、夏期は平均気温、冬期は最高気温で変化していた。

b. 自由振動実験結果の比較

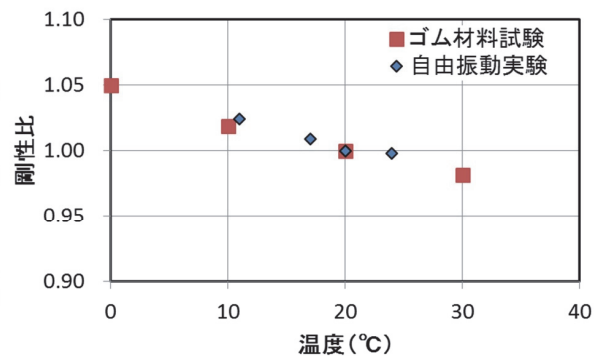


図-17 温度による剛性の変化率

積層ゴムの水平剛性に及ぼす温度の影響を確認するために、ピット内温度が 11℃、17℃、20℃、24℃のときの自由振動実験で得られた変位の時刻歴波形を図-16 に示す。また、4.2 の b. と同様に初期サイクルを除く自由振動 10 回繰り返して要した時間を基に、20℃を基準とした剛性の変化率を図-17 に示す。温度が低いほど剛性が大きくなっており、24℃から 11℃まで-13℃の温度変化に対し剛性は+2.6%程変化している。また、同時期に製造された積層ゴムから切り出したゴム材料のせん断試験を 2016 年に行った。材料試験は 0℃~30℃の範囲で行っており、20℃を基準とした試験結果を併せて同図に示す。水平剛性に及ぼす温度の影響について自由振動実験と材料試験の結果はよく一致しており、積層ゴムの水平剛性に及ぼす温度変化の影響は、ゴムの材料試験結果により評価できることを確認できた。

6. まとめ

免震建物を用いて静的加力実験と自由振動実験を行い、次のことが明らかになった。

- i. 静的加力実験と自由振動実験から得られた免震装置の水平剛性を比較し、免震建物の変位と周期の関係は、免震装置の静的加力試験から得られる割線剛性により評価できることを確認した
- ii. 天然ゴム系積層ゴムは、せん断変形率 100%の範囲においては、繰り返し変形による水平剛性の変化は、ほとんど見られなかった
- iii. 積層ゴムの水平剛性に及ぼす温度変化の影響は、ゴムの材料試験結果により評価できることを確認した

7. あとがき

本研究は、30 年前に日本で最初に実用化された免震建物を対象として実施している免震装置の経年変化に関する追跡調査の一環であり、これまでの検討で当初の設計条件の妥当性を確認でき、免震構造は十分な安全性と耐久性を有していることを確認した。今後は積層ゴムのクリープ変形や鋼棒製ダンパーの繰り返し変形における特性変化等について、引き続き検討を進める予定である。

本研究の遂行に当たり、共同研究者である福岡大学の高山峯夫教授と昭和電線ケーブルシステム社のご助力をいただいた。ここに記して謝意を表す。

【参考文献】

- 1) 安倍 勇、大塚 将、佐藤幸雄、原田 治、田中宏和、「免震構造の設計と信頼性の実証」、奥村組技術研究年報、No.13、1987
- 2) 安井健治、早川邦夫、山上 聡、「建物に設置された

積層ゴムの経年変化」、奥村組技術研究年報、No.32、2006.7

- 3) 安井健治、早川邦夫、山上 聡、「積層ゴムの経年変化」、奥村組技術研究年報、No.33、2007.7
- 4) 舟木秀尊、安井健治、山上 聡、小山慶樹、「免震建物に設置された積層ゴムの経年変化」、奥村組技術研究年報、No.42、2016.9

自動倉庫ラックのパレット免震装置に関する研究

Study on Seismic Isolation System for Storage Rack Pallets

小山慶樹* 舟木秀尊* 舟山勇司**

要 旨

東北地方太平洋沖地震や熊本地震において、立体自動倉庫のラックから積荷が落下して損傷する事例が生じた。さらに、落下した積荷が自動搬送機の走路を妨げ搬送機能が損なわれ、復旧に多大な時間と労力を要した。そのため、積荷の破損防止や事業継続の観点から、積荷の荷崩れ防止対策を行う必要性が高まっている。そこで、新設・既設ラックのどちらにも適用可能で、個々のパレットに対応した免震装置を設ける「パレット免震」システムを開発した。開発した免震装置は対策がないものに比べ、積荷下のパレットに生じる最大応答加速度を約 1/2 に低減することで荷崩れを防止し、地震終了後は元の位置に復帰することを確認した。また、奥村組技術研究所内の倉庫棟にラックを設け、開発した免震装置等の荷崩れ防止対策を適用した。

キーワード：立体自動倉庫、ラック、免震装置、傾斜すべり支承、地震応答解析、振動台実験

1. まえがき

東北地方太平洋沖地震や熊本地震などの巨大地震により、立体自動倉庫ラック（以下、ラック）の積荷が落下して破損する事例が生じた。さらに、落下した積荷が自動搬送機の走路を妨げ搬送機能が損なわれるなど、復旧に多大な時間と労力を要した。そのため、積荷の破損防止や事業継続の観点から、ラック内の積荷に対して荷崩れ防止対策を講じる必要性が高まっている。荷崩れ防止対策には、ラック全体を TMD（チューンド・マス・ダンパー）による制振構造にする方法^{例えぼ 1)}や免震構造にする方法^{例えぼ 2)}等がある。しかし、ラックの収容力を損なう可能性や、既存のラックに適用することが困難な場合もある。

著者らは、既にラック全体を対象とした制震システム³⁾を開発しているが、さらに今回は個々のパレットに対応した「パレット免震」システムを開発した。開発したパレット免震システムは、新設・既設ラックのどちらにも適用可能で、薄型の免震装置を用いることでラックの収容力を損なわないように配慮している。開発した免震装置の荷崩れ防止効果を振動台実験、およびシミュレーションにより確認した。

2. 免震装置の概要

2.1 免震装置の機構

図-1 に示すように、開発した免震装置は個々のパレットを対象とした免震システムである。ラックのフレームである腕木の上に、免震装置を容易に取り付けることができるため、新設・既設ラックのどちらにも適用可能である。

免震装置の機構を図-2 に示す。免震装置は、V 字に傾斜したすべり材と支持材から構成され、積荷を出し入れする方向に可動する。図-2 (b) に示すように、地震が発生すると、免震装置が滑動することでパレットの応答加速度が低減され、積荷の荷崩れや荷崩れを防止する

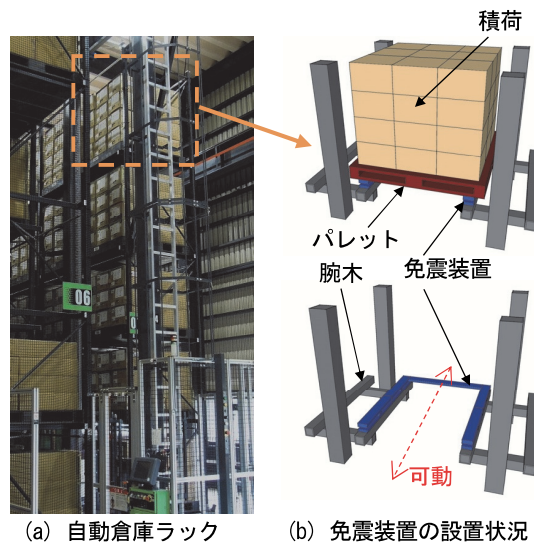


図-1 免震装置の設置イメージ

*技術研究所建築研究グループ **西日本支社建築設計部

ことが可能となる。

また、地震終了後はすべり材の傾斜による復元力によって、元の位置に復帰する機構となっている。免震装置の復元力特性の概要を図-3に示す。

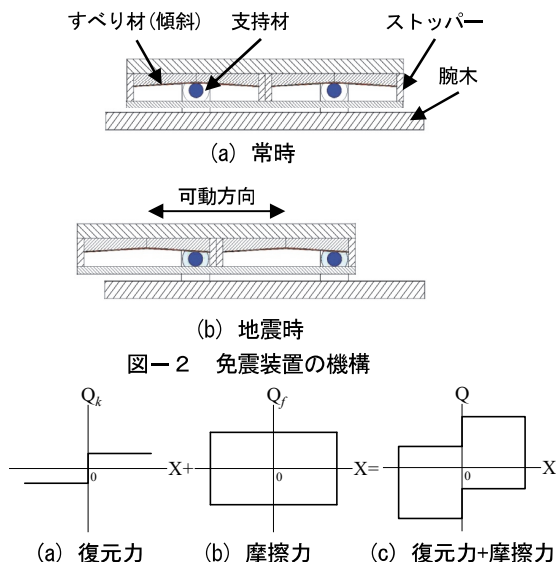


図-3 傾斜軸に沿った免震装置の復元力特性の概要

2.2 免震装置の力学特性

免震装置が滑動している場合の傾斜軸に沿った運動方程式は、図-4より次式で表される。

$$m(\ddot{x} + \ddot{x}_o) \cos \theta + Q_k + Q_f = 0 \quad (1)$$

ここで、 m :質量

Q_k : 復元力(= $\text{sgn}(x) m(\ddot{z} + \ddot{z}_o + g) \sin \theta$)

Q_f : 摩擦力(= $\text{sgn}(\dot{x}) \mu m \times \{(\ddot{z} + \ddot{z}_o + g) \cos \theta + \text{sgn}(x)(\ddot{x} + \ddot{x}_o) \sin \theta\}$)

\ddot{x}_o : 腕木の絶対加速度(水平方向)

\ddot{z}_o : 腕木の絶対加速度(鉛直方向)

x : 免震装置の相対変位(水平方向)

\ddot{x} : 免震装置の相対加速度(水平方向)

\ddot{z} : 免震装置の相対加速度(鉛直方向)

$$(\ddot{z} = \ddot{x} \tan \theta)$$

g : 重力加速度

μ : すべり材の摩擦係数

θ : すべり材の傾斜角

免震装置が静止する判定は(2)式により行い、静止している場合は(3)式となる。

$$|m\ddot{x}_o \cos \theta + Q_k| < |Q_f| \quad (2)$$

$$\ddot{x} = 0, \dot{x} = 0, x = \text{const} \quad (3)$$

ここで、図-3(a)より、傾斜による復元力は免震装置の水平変位の符号が切替わるところで不連続となるため、解析では便宜的に水平変位が $|r \sin \theta|$ (ここで、 r : 支持材の半径)以下となる微小変位区間においては、半径 r の円弧レール上を動くものと仮定した。

また、すべり材の傾斜による復元力から割線剛性を求めた等価周期 T_e は次式で表せる。

$$T_e = 2\pi \sqrt{\frac{x}{g \cdot \sin \theta}} \quad (4)$$

(4)式より、免震装置の等価周期は質量によらず、免震装置の相対変位とすべり材の傾斜角に依存し、一定の周期特性を持たない。図-5に免震装置の周期特性を示す。

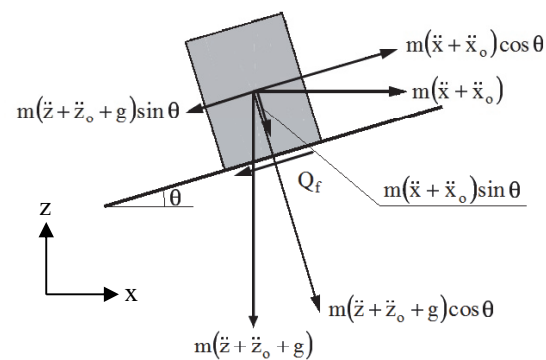


図-4 1質点系モデル図

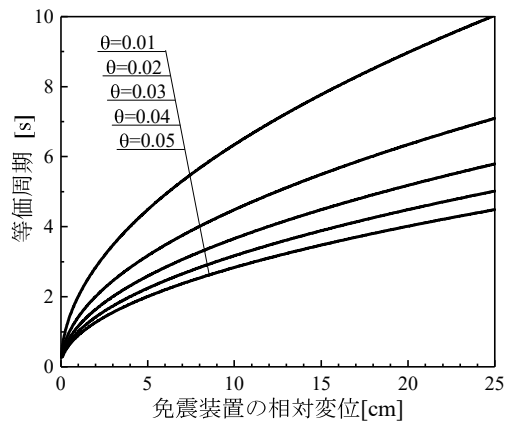


図-5 免震装置の周期特性

2.3 傾斜角と摩擦係数の検討

段ボールを多段に積んだ積荷の荷滑りは、ばらつきがあるものの概ねパレットの最大応答加速度が 200cm/s^2 程度で生じることが報告されている⁴⁾。そこで、積荷が荷崩れや荷滑りを起こさないように免震装置の最大応答加速度を 200cm/s^2 以下、かつ一般的なパレットサイズである $1\text{m} \times 1\text{m}$ に免震装置が納まるように、最大水平変位は 25cm 以下を目標性能とし、免震装置に採用するすべり材の傾斜角と摩擦係数をシミュレーションにより検討する。解析モデルは、積荷-パレット間、パレット-免震装置間では滑動が生じないものとした1質点系モデルとし、質点の質量を 700kg とした。解析パラメータは、免震装置の高さが大きくならないように、すべり材の傾斜角を $0.02 \sim 0.05\text{rad}$ とし、摩擦係数を $0.03 \sim 0.10$ とした。検討に用いた入力地震動は、表-1に示す、近年に起きた直下型・海溝型地震として観測された3波を採用した。解析結果の一例として、すべり材の傾斜角と

摩擦係数を因子とした免震装置の最大応答値を図-6に示す。図より、すべり材の傾斜角を 0.05rad 以下、摩擦係数を 0.07 以上とすることで、目標性能が得られることを確認した。

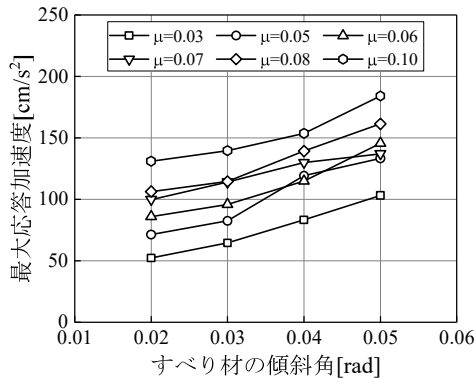
3. 縮小試験体の静的加力実験

支持材とすべり材間の摩擦係数を確認するため、水平ストロークを±10cm とした 0.4m×0.4m のパレットに対応した小型の免震装置を作成し、パレットを模擬した穴付きの板材上部に 10、20、30、40、50kg の錘を載せて静的加力実験を行った。

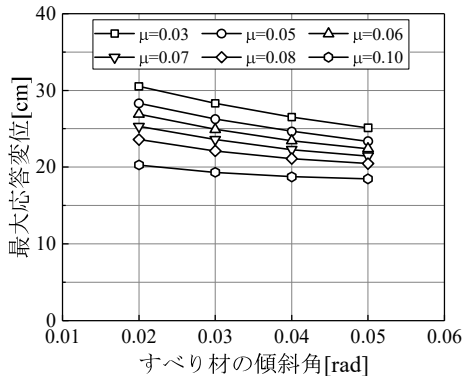
ここで、支持材は SUS 材を用い、すべり材には高荷重条件下において耐摩耗性を発揮するバックメタル付四ふっ化エチレン樹脂複層軸受材を採用した。また、すべり材の傾斜角は、免震装置に生じる水平方向の相対変位が過大とならないように 0.03rad とした。静的加力実験の状況を写真-1 に示す。加力装置により、免震装置を

表-1 入力地震動一覧

地震名	発生日	観測点	最大加速度 (方向)
兵庫県南部地震 (M7.3)	1995/01/17	神戸海洋気象台 (気象庁)	818cm/s ² (NS)
新潟県中越地震 (M6.8)	2004/10/23	新潟県小千谷市城内 (K-NET)	898cm/s ² (EW)
東北地方太平洋沖地震 (M9.0)	2011/03/11	福島県白河市 (K-NET)	1295cm/s ² (NS)



(a) 最大応答加速度(白河波)



(b) 最大応答変位(小千谷波)

図-6 免震装置の最大応答値

±9.5cm の範囲で水平方向に押し引きして、加力装置に付けたロードセルから水平荷重を計測した。

静的加力実験より得られた免震装置の荷重-変位関係を図-7に示す。また、すべり材の面圧と摩擦係数の関係を図-8に示す。すべり材の摩擦係数は、静的加力実験より得られた水平荷重から、すべり材の傾斜による復元力を差し引いた摩擦力から求め、面圧はヘルツの弾性接触理論⁹⁾より算定した。図より、すべり材の面圧が大きくなるほど摩擦係数が小さくなるが、摩擦係数は目標としていた 0.07 程度であることを確認した。

4. 振動台実験

4.1 振動台実験の概要

免震装置の振動特性やシミュレーションの妥当性を確認するために、振動台実験を行った。図-9に振動台実験で使用した免震装置の形状を示す。免震装置は高さ 5.3cm、すべり材の傾斜角を 0.03rad、支持材の半径を

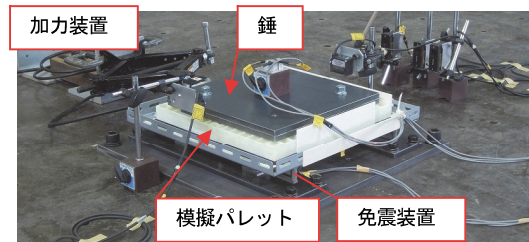


写真-1 静的加力実験の状況

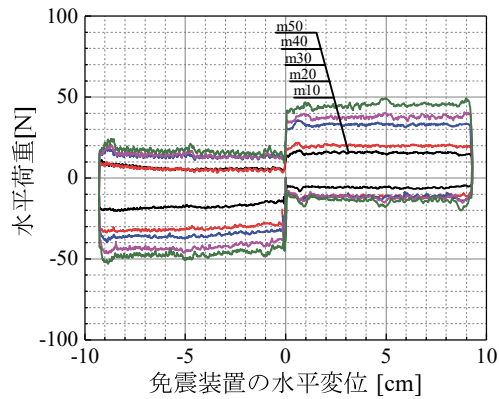


図-7 免震装置の荷重-変位関係

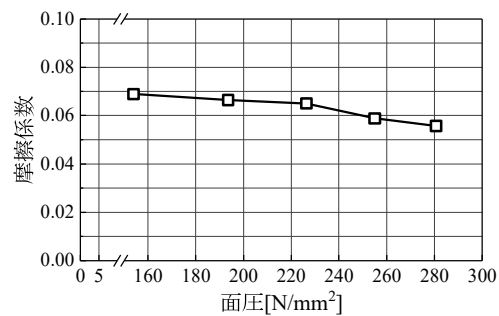


図-8 すべり材の面圧と摩擦係数の関係

2.0cm、水平ストロークを±20cmとした。なお、支持材およびすべり材は縮小試験体と同じ材料を用いた。免震装置の有無（以下、免震・非免震）の試験体を振動台上に設置し、1.3m×1.2mのプラスチック製パレットに積荷を載せ同時加振した。積荷の質量をパラメータとして約220、660、1,100kgの鉄板製の錘、および段ボール積荷を再現するために、約550kgの書籍を入れた段ボール製のキャビネットの計4ケースとした。振動台実験の状況を写真-2、加振終了後の状況を写真-3に示す。免震装置の可動方向をX方向として、入力地震動はランダム波(0.2~50Hz)、および正弦波(1.0Hz)の加振に加え、気象庁および防災科学技術研究所の強震観測より得られた観測波(2011年東北地方太平洋沖地震の白河市、1995年兵庫県南部地震の神戸海洋気象台)と1940年エルセントロ地震、1968年十勝沖地震の観測波を用いた。加振レベルは、最大加速度を100cm/s²から段階的に大きくし、原波、またはレベル2相当の地震動として最大速度50cm/sまでとした。

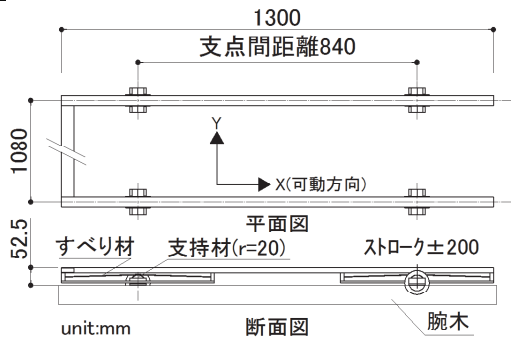


図-9 免震装置の形状

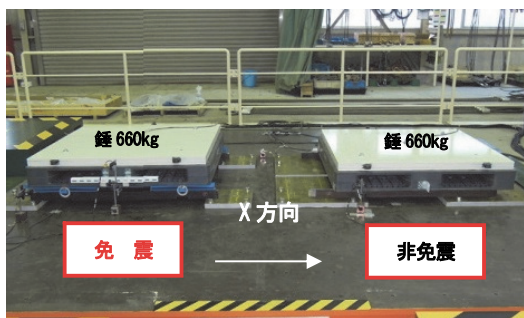


写真-2 振動台実験状況(積荷:錘)

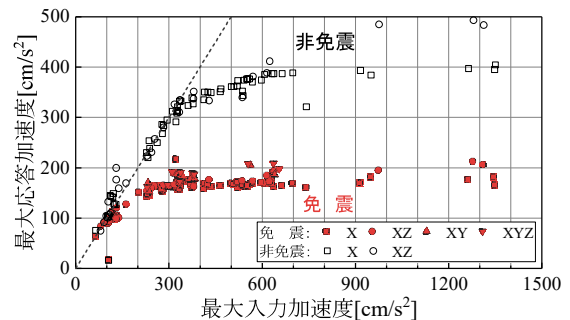


写真-3 振動台実験状況(加振終了後)

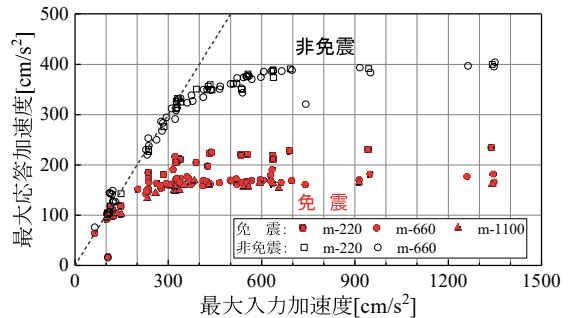
4.2. 振動台実験結果

図-10に最大入力加速度とパレットの最大応答加速度の関係を示す。図-10(a)に積荷の質量を660kg、一軸(X)、二軸(XY、XZ)、三軸(XYZ)加振した場合、図-10(b)に積荷の質量を220、660、1,100kg、X方向加振とした場合をそれぞれ示す。図より、鉛直動による影響で最大応答加速度にばらつきがあるものの、非免震パレットの最大応答加速度は300cm/s²程度からパレット-腕木間で滑動が生じ、400cm/s²程度で頭打ちとなることから、パレット-腕木間の摩擦係数は概ね0.3~0.4であることが分かる。

また、免震パレットの最大応答加速度は200cm/s²程度で頭打ちとなり、非免震に比べ最大応答加速度が約1/2に低減しており、一軸加振や三軸加振によらず、免震装置上のパレットは安定した応答低減効果が得られることが確認できた。図-10(b)より、質量が220kgの場合は、免震パレットの最大応答加速度が250cm/s²程度と他の質量の場合に比べて大きくなっており、すべり材



(a) 加振方向の影響(m=660kg)



(b) 質量の影響(X方向加振)

図-10 最大入力加速度と最大応答加速度の関係

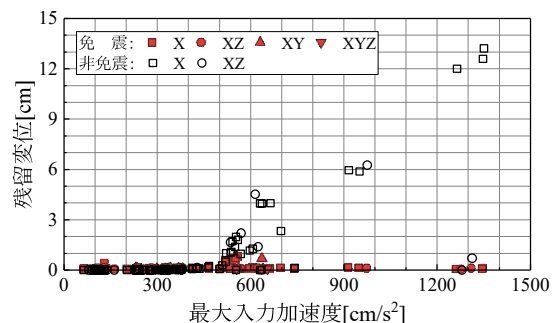


図-11 最大入力加速度とパレットの残留変位の関係

の面圧依存性に起因した摩擦係数の増加が確認できるが、660kg、1,100kg の場合の最大応答加速度は概ね 200cm/s² 程度で頭打ちとなることが分かる。

図-11 に最大入力加速度とパレットの残留変位（加振終了後の水平変位）の関係を示す。非免震パレットの残留変位は最大入力加速度が 400cm/s² 以上から徐々に増大しているのに対し、免震パレットの残留変位はすべり材の傾斜による復元力の影響で、免震装置が元の位置に戻るため、概ねゼロとなっていることが分かる。

4.3. 振動台実験結果とシミュレーションの比較

免震パレットの振動台実験結果とシミュレーション結果の比較を図-12 に示す。シミュレーションに用いた数値積分法は、Newmark の β 法 ($\beta=1/6$) とした。解析条件は、すべり材の傾斜角を 0.03rad とし、摩擦係数は免震装置の可動方向と直交方向の振動により、すべり材取付け治具と支持材取付け治具間の摩擦による影響を考慮して、0.070 から 0.074 に割増して検討した。

なお、免震装置に用いたすべり材には面圧依存性があるが、ラックに収容する積荷の質量が変動することから、ここでは一律の値とした簡易な応答評価を行った。

図-12 (a)~(b)は正弦波 (1.0Hz)、X 方向加振、最大入力加速度 400cm/s² の場合を示し、図-12 (c)~(d) は白河波、X 方向加振、最大入力加速度 650cm/s²、図-12 (e) は白河波、XYZ 方向加振、最大入力加速度 650cm/s² とした場合の主要動部分を拡大して示す。図より、2.2 で述べた解析手法は簡易な摩擦系剛体モデルであるため、実験に見られる取付け治具等の部分振動による高次振動やすべり材の微細な不陸による影響、積荷の振動による影響までは評価できていないが、加速度の主応答や変位応答は良く再現できており、免震パレットの評価手法として妥当であると判断した。

また、入力地震動の種類・強度が異なる場合や一軸加振、三軸加振においても、シミュレーション結果は応答加速度の主応答、応答変位とも振動台実験結果とよい対

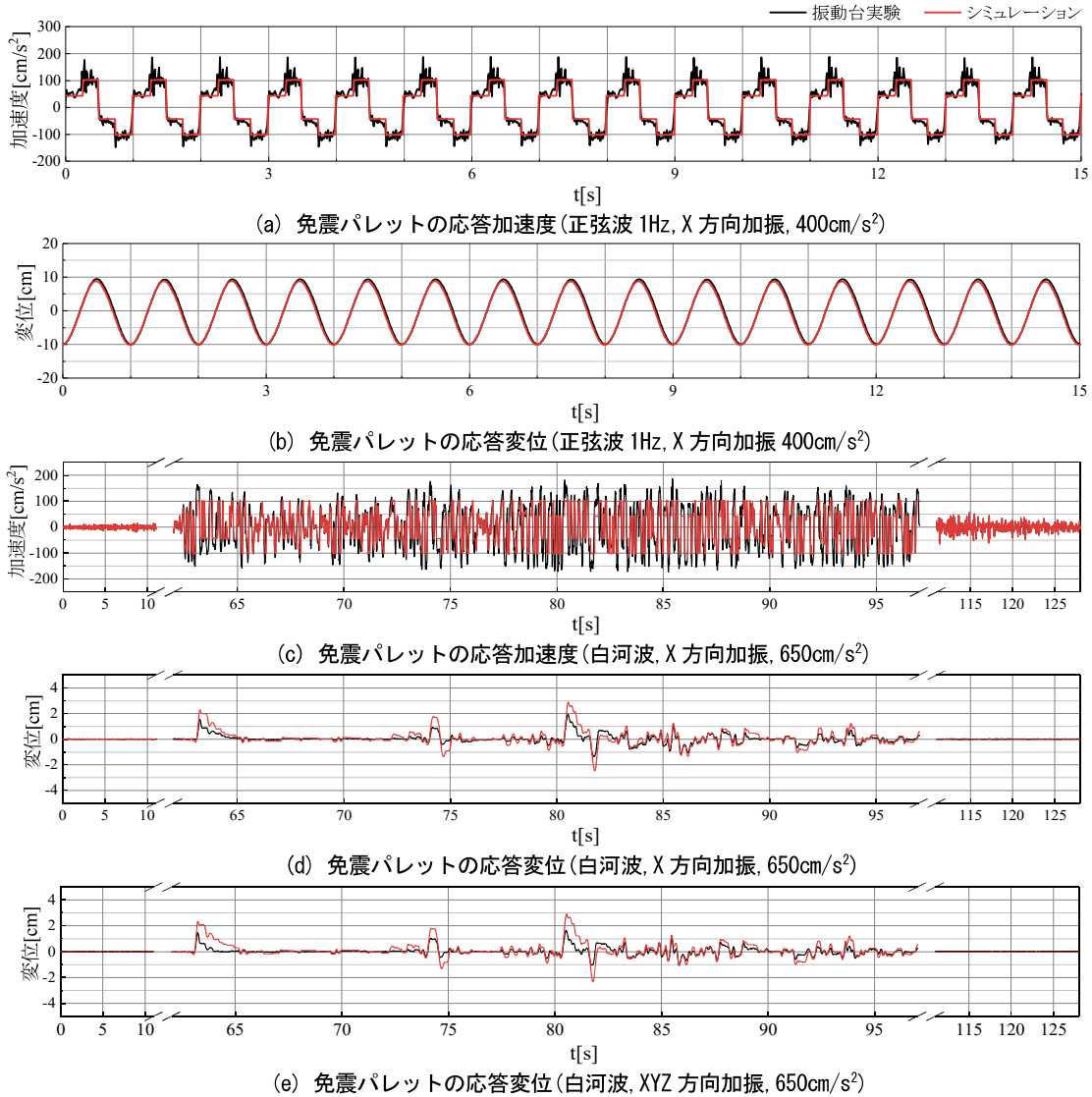


図-12 振動台実験結果とシミュレーション結果の比較 (m=660kg)

応を示し、2.2 で述べた解析手法の妥当性を確認することができた。

5. まとめ

自動倉庫ラックの個々のパレットを対象とした免震装置を考案し、静的加力実験・振動台実験を行い、以下の知見を得た。

- i. 免震装置の上に設置したパレットの最大応答加速度は、積荷の質量が小さくなるとすべり材の面圧依存性による影響によって僅かに大きくなるものの、概ね 200 cm/s^2 となり、非免震パレットの最大応答加速度に比べ、約 1/2 に低減することで積荷の荷崩れを防止することができた
- ii. すべり材の傾斜角を 0.03rad とした場合、傾斜による復元力により、加振終了後に生じる残留変位は概ねゼロとなり、元の位置に復帰することを確認した
- iii. 免震装置の水平ストロークを $\pm 20\text{cm}$ 、すべり材の傾斜角を 0.03rad とした場合、免震装置の高さは約 5.3cm となり、薄型の免震装置が開発できた
- iv. 入力地震動の種類や強度、一軸加振や三軸加振によらず、シミュレーション結果は振動台実験結果とよい対応を示し、シミュレーションにより免震装置の加速度の主応答や変位応答を評価できることを確認した

6. あとがき

2017年1月、技術研究所内に倉庫棟を新築し、自動ラックが設置された。自動ラックは7列設置されており、

開発技術の実証と見学者向けの展示を目的として、そのうち2列(1対)にラック制振³⁾を、2つの棚に本報で紹介したパレット免震装置を設けた。写真-4(a)~(d)に倉庫棟の外観、自動ラック全景、ラック制振、およびパレット免震装置の設置状況を示す。今後は、ラック制振、パレット免震装置の荷崩れ防止の効果を確認するために、地震観測を行う予定である。

なお、パレット免震装置はオイレス工業と共同開発した技術(特許出願中)である。また、防災科学技術研究所 K-NET および気象庁の強震記録を使用した。ここに記して感謝の意を表す。

【参考文献】

- 1) 木原幸紀他、「既存の立体自動倉庫を対象としたTMDを用いた制振改修構法(その1、その2)」、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造Ⅲ、pp.873-876、2012.9
- 2) 竹内 徹他、「積載物の落下防止を目的とした立体倉庫への免震支承の適用」、日本建築学会構造系論文集、第721号、pp.629-637、2016.3
- 3) 舟木秀尊他、「自動倉庫ラックの制振構造に関する研究(その1、その2)」、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造Ⅱ、pp.275-278、2016.8
- 4) 安川真知子他、「自動ラック倉庫における多段積荷のすべり落下挙動に関する一考察」、日本建築学会構造系論文集、第82巻、第732号、pp.183-192、2017.2
- 5) 日本道路協会、「道路橋支承便覧」、丸善、p.44、1973



(a) 外観



(b) 自動ラック全景



(c) ラック制振の脚部



(d) パレット免震装置

写真-4 倉庫棟に設けた開発技術

シャフト充填式解体コンクリート塊排出工法

Concrete Debris Removal Method Using Temporary Storage Shaft

茂木正史* 河野政典** 稲留康一* 柳沼勝夫*

要旨

建物の上層部で解体したコンクリート塊を低振動で地上まで卸す工法を開発した。解体建物の床に仮設開口を設け、さらに下部階では仮設開口を囲むシャフトを構築し、最上階で投下した解体コンクリート塊はこのシャフト内に蓄積され、排出される。小割したコンクリート塊がシャフト内で詰まることはほとんどないが、閉塞が発生する恐れのある排出口の上部に閉塞を抑制させる装置（以後「閉塞解放装置」と呼ぶ）を備え、閉塞に対するリスクの軽減を図っている。この工法により、超高層に分類される高さ 60m からコンクリート塊を投下しても、シャフトから 10m 離れた地点での振動は 55dB 以下に抑えられるとともに、騒音も規制値以下となる。なお、仮設開口を設けずに既存のエレベータシャフトを利用する場合もある。

キーワード：解体、シャフト、閉塞、振動、騒音

1. まえがき

高度成長期に建設された建物が建替え時期を迎え、今後、解体工事の需要は増加すると推測される。コンクリート系建物を解体する際には解体重機が用いられる。解体重機による解体方法は地上解体と階上解体に分類できる。地上解体は敷地に余裕があり、建物外部から解体できる場合に採用されるが、採用される建物の高さは解体重機のブームの長さに制限される。ロングブームを用いると、高さ 40m 程度の建物の解体まで対応できる。

狭小地に立地する建物や、地上からの解体ができない高さの建物を解体する際には、階上解体が採用される。階上解体は解体重機を建物の最上階に楊重し、上階から下階に向かって解体重機が降りながら建物を解体する工法である。この解体方法においては、地上まで解体コンクリート塊を卸す方法が作業の効率や周辺環境への影響を左右する。

これまで、エレベータシャフトなどの堅穴や、スラブの一部を先行解体して設けた仮設開口を利用して解体コンクリート塊を投下する方法が採用されている。その際、下部に緩衝材を敷くなどの工夫をしても落下時の振動が問題となる場合がある。また、解体物をクレーンで荷卸しする場合もあるが、クレーンを設置する場所が確保できる場合に限定され、コストの増加にもつながる。

そこで、クレーンを使わず、シャフトに充填させた解体コンクリートを閉塞することなく排出できる工法を開発した。本工法は、シャフト内に充填するコンクリート

の緩衝効果により振動を低減させることを狙った技術であり、充填高さにより振動レベル低減量を制御できる。

本報では、工法の概要、および開発に当たって実施した縮小模型と実大模型による実験結果を示す。

2. 工法の概要

2.1 解体コンクリートの排出方法

シャフト充填式解体コンクリート塊排出工法の概要を図-1に示す。以下の手順で階上解体により発生したコンクリート塊を地上階に卸し、排出する。

i. 事前工事

- ・下層階でシャフトの構築とシャフト位置のスラブの解体を行う（スラブに開口を設ける）
- ・上層階のシャフト位置のスラブを解体し、開口を設け、その解体コンクリート塊、および各階から発生するコンクリート系解体物をシャフトに充填する（振動対策用の緩衝材として利用）

ii. 解体重機による階上解体の開始

- ・最上階から人頭大以下に破碎した解体コンクリート塊をシャフト内に投下する
- ・シャフト内に 6m 程度の高さでコンクリート塊を充填させながら、地上でコンクリート塊を排出させる

2.2 工法の特長

本工法では、シャフト内にコンクリート塊を充填させるため、高さ 60m からコンクリート塊を投下しても、

*技術研究所環境研究グループ **技術研究所建築研究グループ



図-1 工法の概要

高さ 6m のコンクリート塊が緩衝材となり、発生する振動を人が体感できるといわれている振動レベル (55dB) 以下に抑えることができ、騒音も規制値以下になる。コンクリート塊を人頭大以下の大きさ (シャフト幅の 1/6 以下) とすれば閉塞しないが、閉塞が発生する場合に備えて閉塞解放装置を設け、閉塞に対するリスクの軽減を図った。

3. 縮小模型実験

本章では、縮小模型を用い工法の妥当性を確認するために実施した実験結果について示す。

3.1 シャフト底面の荷重

シャフトにコンクリート塊を詰めると、シャフトの底面が受ける荷重は、コンクリート塊の充填高さの増加に応じて増加する。しかし充填高さが増加すると、コンクリート塊とシャフト壁面の摩擦力によって壁面にアーチの支点が形成され、コンクリート塊にアーチが発生し、底面に作用する荷重は頭打ちになると予想された。

この現象を確認するための実験装置を図-2、写真-1に示す。底面に作用する荷重は図に示すように、排出口の反対側の壁に底面を模擬したパネルを蝶番で止め、排出口側は排出口より同パネルを突出させ、その先端の荷重をバネばかりで測定し、その測定値を底面に作用する荷重とした。なお、充填する碎石の径 (ϕ) は $10\text{mm} \leq \phi \leq 20\text{mm}$ と $10\text{mm} \leq \phi \leq 30\text{mm}$ の2ケースである。充填高さと底面圧力の関係を図-3に示す。碎石の粒度に関わらず、底面圧力は充填高さの増加にしたがって増加するが、一定の充填高さ以上になると増加せず頭打ちとなる。また、碎石の粒径が大きくなると、底面圧力が頭打ちになる高さや底面圧力の値が大きくなった。

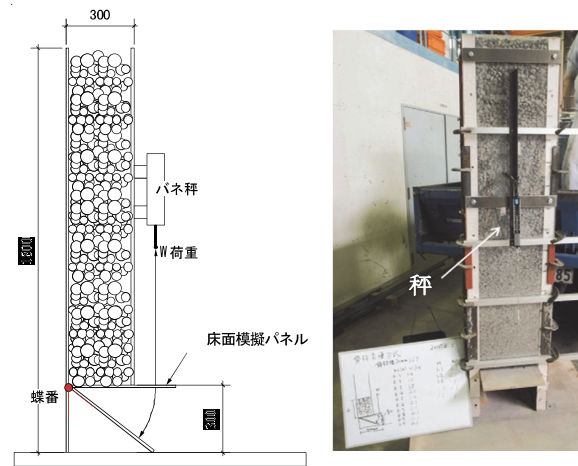


図-2 実験装置 (断面) 写真-1 実験装置

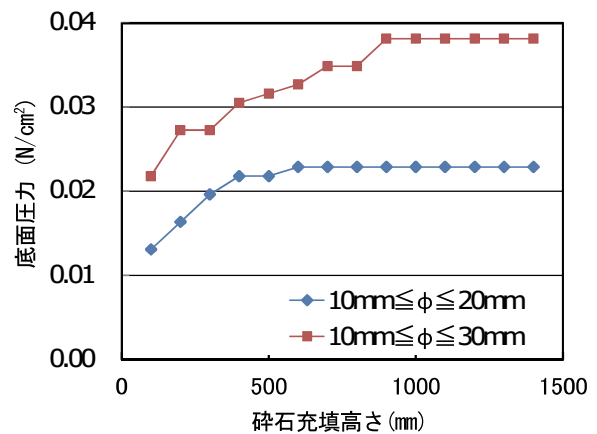


図-3 充填高さや底面圧力

3.2 シャフトの側圧

前節の結果より、シャフトの壁が受ける側圧も碎石の充填高さを増加させれば頭打ちになると予想される。そこで、碎石の充填高さや側圧の関係について縮小模型による実験を実施した。図-4、写真-2に実験装置を示す。受圧板を図-4に示すシャフト壁の L、U 点に設置して側圧を測定した。図-5に同一条件で繰り返した 3 回の測定結果を示す。図中の“L1st”は下のロードセルの 1 回目の測定結果である。測定点 L のロードセルの場合、碎石が受圧板にかかった (高さ 450mm) 後に側圧が発生し、その上部では充填高さの増加に伴う側圧の増加量は小さくなり、頭打ちになる。したがって、充填高さによって側圧の最大値は変化しないので、シャフトの壁は側圧の最大値を参考に設計できる。

3.3 閉塞解放方法の検討

アーチ効果により、底面荷重や側圧の最大値は充填高さによって変化しないことが分かった。しかし、この効果によって閉塞を発生させる恐れもある。実験から、閉塞は排出口上部で生じることが分かったので、この部分でアーチを崩す、次の閉塞解放方法を検討した。

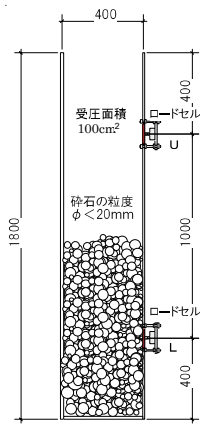


図-4 実験装置



写真-2 実験装置

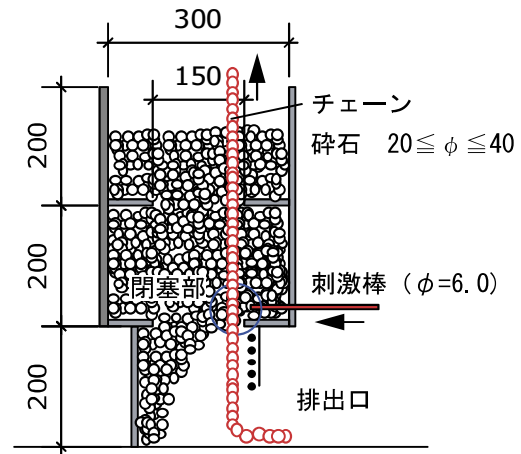


図-6 閉塞実験装置

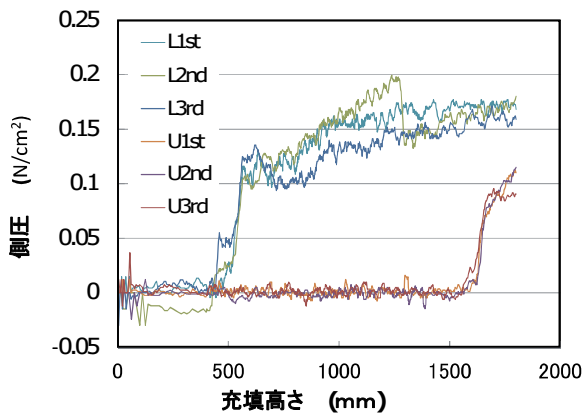


図-5 充填高さと同側圧



写真-3 鋼棒



写真-4 チェーン

- i. 閉塞部のアーチ支点を鋼棒で解放する
- ii. 閉塞部のアーチ支点を事前に仕込んだチェーンで解放する

図-6に閉塞実験装置を示す。実験装置の製作に当たっては閉塞が生じやすくなるように各層の境界の碎石が通過する面積を小さくした。写真-3に鋼棒の実験状況、写真-4にチェーンの実験状況を示す。鋼棒を使って約60Nの力で閉塞部を突くと、閉塞部が解放された。また、チェーンによる閉塞解放も可能であったが、チェーンのまわりに空洞ができた後はチェーンから碎石に力が伝わらなくなり、機能を果たせなくなる場合もあった。

3.4 縮小模型実験のまとめ

縮小模型実験により確認した内容を以下に示す。

- i. アーチ効果により碎石の重量がシャフトの底面に作用する圧力とシャフトの壁に作用する側圧は頭打ちとなる
- ii. 閉塞の支点は排出口の上部に生じ、この部分の碎石を鋼棒でずらすと閉塞は解放される

また、実工事における排出作業やシャフト構築に際して応用できる内容を以下に述べる。

図-7は実験結果より推測されるシャフト内で生ずる力である。図より、排出口が開いていると、シャフトに充填された碎石の重量をシャフト底面とシャフトの壁（側圧の鉛直成分）が支えている。⑤に発生する、碎石を外に押し出す圧力が図-3に示すように一定値となるため、排出される碎石量は一定量となる。また、充填高さが一定値を超えると、碎石の作用荷重は頭打ちになるので(図-3)、それ以後の排出長さは排出口の高さと摩擦力で決められる。したがって、排出作業において排出口の高さを調節することで状況の変化に応じて排出長さを変えることができる。また、シャフトの側圧は充填高さが一定値を超えると、高さによらず一定になるので(図-5)、シャフト壁の構造仕様はこの側圧に対して設定できる。

4. 実大模型実験

実大模型試験の実施に当たっては、実建物解体におけるコンクリート塊の径やシャフトの寸法を考慮した。実験の目的を以下に示す。

- i. コンクリート塊のシャフト内流動性と排出状況の把握
- ii. コンクリート塊充填時のシャフト側圧の把握
- iii. コンクリート塊投下時の振動・騒音の把握
- iv. 閉塞解放装置の動作確認

4.1 実大模型と計測概要

a. シャフト

シャフトの構造を図-8に、外観を写真-5に示す。シャフトはH型鋼を柱として、壁を鋼管パイプと合板で製作した。高さは10mである。また、排出口は鉄筋(φ32)を150mmの間隔で取り付けてその高さを変えられるようにした。

b. 側圧測定治具

図-9に側圧測定治具を示す。シャフトの側面の上下(U: +7,000mm、L: +1,650mm)に測定治具を設置した。図に示すように1,100mm×1,150mmの鋼板を受圧面とし、5個のロードセルで鋼板に作用する荷重を測定した。ロードセルの反力はH鋼柱で受けた。



写真-5 シャフトの外観（実験状況）

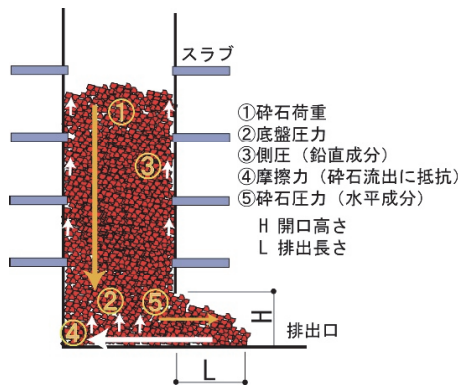


図-7 シャフト内の力

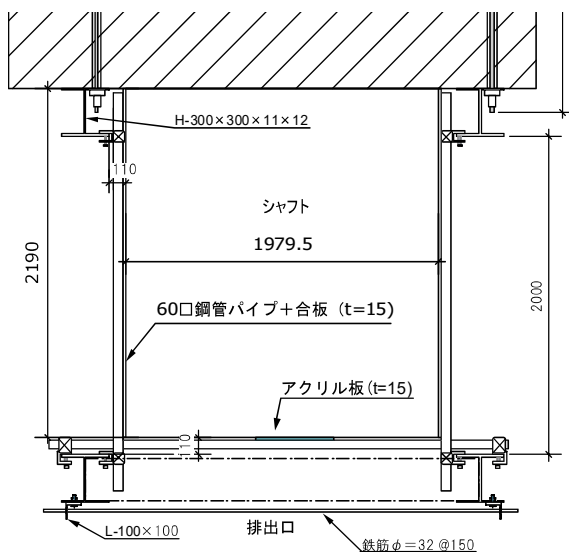
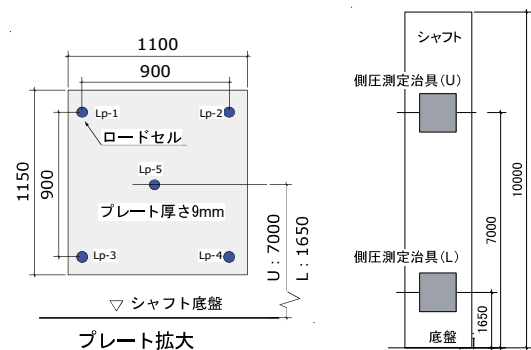
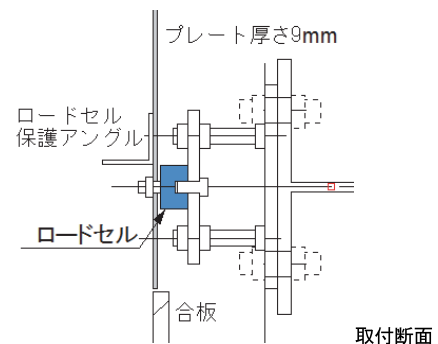


図-8 シャフトの構造（平面）



プレート拡大



取付断面

図-9 側圧測定治具

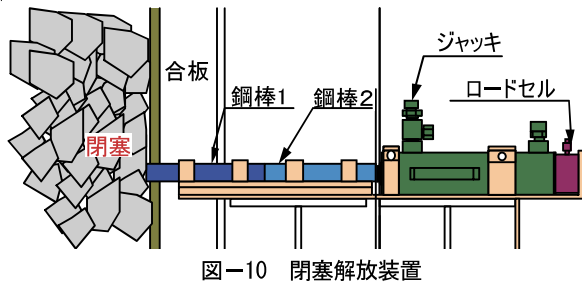


図-10 閉塞解放装置



写真-7 コンクリート塊

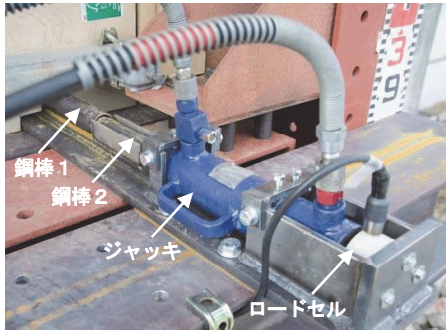


写真-6 閉塞解放装置

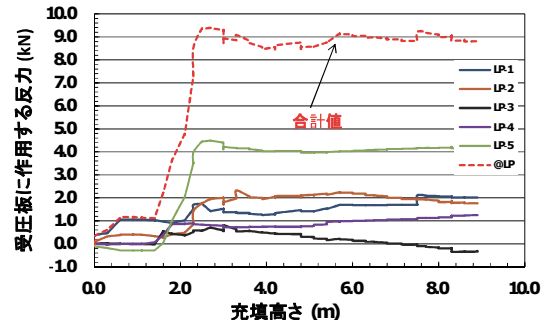


図-11 充填高さと同側圧

c. 閉塞解放装置

閉塞解放装置を図-10、写真-6に示す。ジャッキのシリンダーでシャフト内に鋼棒を押し込む構造となっており、ジャッキのシリンダーをシャフト内に挿入させないように製作した。この装置を排出口上部に3台設置して、遠隔操作した。また、シリンダー圧をジャッキ後部のロードセルで測定した。

d. コンクリート塊

建物解体で発生するコンクリート塊を想定して、コンクリート塊の径を $50\text{mm} \leq \phi \leq 350\text{mm}$ (最大径はシャフト幅の 1/6) 程度とした。なお、投下実験を繰り返すと小口径のコンクリート塊の割合が増加した。写真-7にコンクリート塊を示す。

4.2 実験手順

実験を以下のステップで実施した。

- ①排出口を閉鎖する
- ②底開きバケツに 0.5m^3 のコンクリート塊を積み込み、シャフト上部から投下する
- ③充填高さが 9m になるまで②を繰り返す
- ④充填高さが増加する過程において、側圧、振動・騒音を測定する
- ⑤充填高さが 9m に達したら、下部開口を開け、排出を開始する
- ⑥排出途中で、コンクリート塊をシャフトに再投下し、投下時の排出口部分への影響を確認する
- ⑦閉塞発生時は、閉塞解放装置を作動させるとともに、作動時にジャッキに働く荷重を測定する。

なお、閉塞解放実験では排出口上部のシャフトの内側に

閉塞を促進させる H 型鋼の閉塞促進梁を設けた(写真-8)。実験状況を写真-5に示す。

4.3 実験結果

a. 側圧測定結果

図-11 に、下部受圧板(H=1650)における充填高さと同側圧の一例を示す。投下実験を 5 回実施したが、いずれの測圧も同様の傾向を示した。受圧板に作用する荷重を 5 個のロードセルで測定し、ロードセルの合計値を側圧とした。コンクリート塊の充填高さが増加すると側圧(圧縮力)も増加するが、充填高さが約 2.5m 以上になると、側圧はほぼ一定になる。これより、一般的な階高の建物に本実験と同等寸法のシャフトを構築すれば、2 階以上の仮設シャフトの壁に作用する側圧はほぼ一定であると考えられる。

b. 閉塞解放実験

シャフトの排出口上部の内側に閉塞促進梁(H-250×250)(写真-8)を設置し、閉塞を促進させた。閉塞部より下部に蓄積されたコンクリート塊をシャフトの外まで排出すると閉塞が確認できた。写真-8にシャフトの内観、写真-9に閉塞時の排出口を示す。この状況で閉塞解放装置を作動させた。閉塞解放用鋼棒がシャフト壁内に約 80mm 挿入された瞬間に閉塞が解放され閉塞部とその上に堆積していたコンクリート塊が落下した。図-12に閉塞解放時のジャッキの荷重の推移を示す。約 30kN で閉塞部を押すことで閉塞部が解放された。その時の振動レベルは 54.4dB であった。他のケースも同様の傾向を示した。



写真-8 シャフト内観 写真-9 閉塞時の排出口

c. 排出状況

シャフトの高さ9mまでコンクリート塊を充填してから排出させた。目視確認した特徴を以下に示す。

- ・排出口の開口高さを1.3mとして排出させると、排出口面から約1.1mまで排出し(写真-10)、開口高さ2.3mでは約1.9mまで排出した。このコンクリート塊を除去すると同量が排出した。これより排出口の高さを変更することによって排出量を変えることができる。
- ・排出を続けてコンクリート塊の充填高さが約3mになった時点で、再度シャフト上部から0.5m³のコンクリート塊を投下したが、排出口部のコンクリートは静止していた。これは、縮小模型での実験結果で得られたように、充填高さが一定値を超えると、シャフト底盤で受けるコンクリート塊の荷重が頭打ちになることから推測できる。また、以上より解体作業時に排出口での作業と投下口での作業は独立して行うことができる。

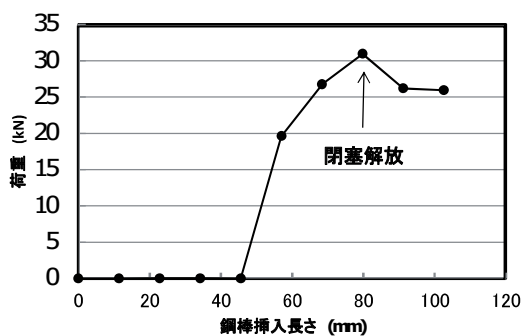


図-12 閉塞解放時のジャッキ荷重



写真-10 排出状況

4.4. 振動・騒音の測定結果

a. 振動

コンクリート塊の落下時は、コンクリート塊がシャフト内のコンクリート塊やシャフト面に衝突して振動が発生し、その振動が地盤へ伝搬する。

図-13 にコンクリート塊 (0.5m³) をシャフトの上部より自由落下させた時の鉛直方向の振動レベル最大値を示す。測定位置は、シャフト側面から10m離れた地盤上である。図に示すように、振動レベル最大値は充填高さ0m(落下高さ10.5m程度)では55dB程度であり、コンクリート塊の充填高さが高くなるにつれて低下し、充填高さ6m程度(落下高さ4.5m程度)では45dB程度まで低減した。

充填高さ別の周波数特性を図-14に示す。31.5Hz帯域~63Hz帯域で卓越している。さらに、充填高さ0.5m時の振動加速度レベルと比較して、各充填高さで周波数別に整理した振動加速度レベル低減量を図-15に示す。振動加速度レベルの低減量は周波数で異なる。充填高さによる低減効果は高周波数側に顕著に表れ、充填高さが高くなるほどこの傾向が著しい。

コンクリート塊の充填高さが高くなると振動レベルが減少することを確認したが、実測による評価では、充填高さが高くなるにつれて落下高さが低くなり、位置エネルギーが小さくなるので、充填高さの効果のみを評価できない。そこで、実測した振動レベルのデータに対して落下高さ分の振動レベルを減じ、落下高さ1mの場合の充填高さの効果を求めた。このデータを用いて、充填高さ0mと比較した振動レベル低減量で整理した結果を図-16に示す。なお、図中の回帰直線は、実用的な観点から1次近似とした。図より、充填高さ6m程度で振動レベルが8dB程度低減することが分かる。

また、実用的には、回帰式を参考にしてシャフト内のコンクリート塊の充填高さを変更し、解体現場の状況に応じて発生振動レベルを調整できる。

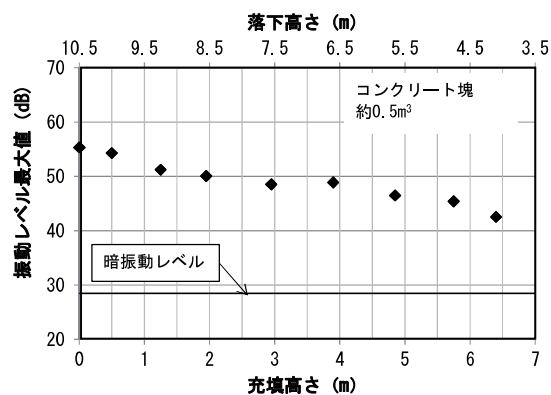


図-13 振動レベル最大値
(シャフト側面から10m離れた地盤上での実測値)

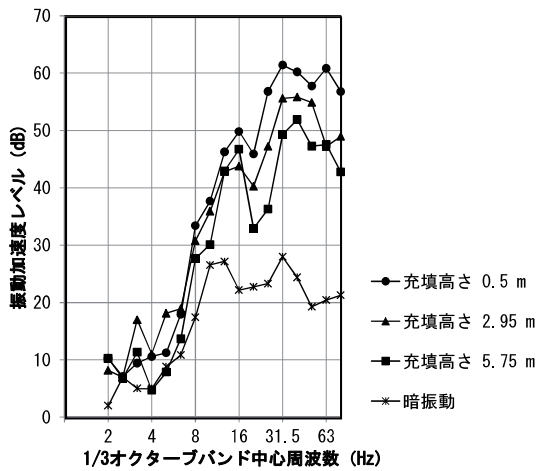


図-14 振動レベル最大時の周波数特性
(シャフト側面から10m離れた地盤上での実測値)

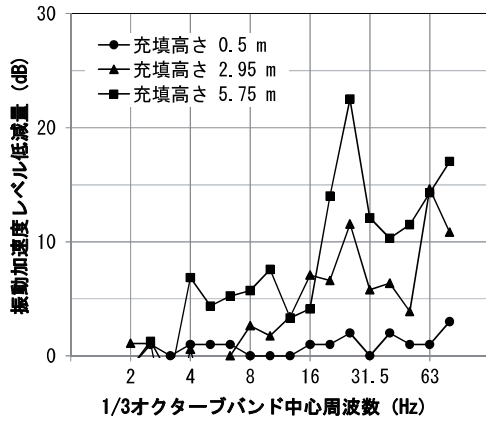


図-15 振動加速度レベル低減量
(シャフト側面から10m離れた地盤上での実測値)

次に、高さ60mのビルの解体を想定して60mのシャフトに本工法を適用した場合に発生するコンクリート塊落下時の振動レベルを推定した。推定には、図-13の充填高さ0m(落下高さ10.5m)の振動レベルを用いる。これに落下高さを60mにすることによる振動レベル増加量($20\log\sqrt{(60m/測定高さ)}$)を加え、図-16中の回帰式から求めたコンクリート塊の充填効果を減じた。この結果を図-17に示す。充填高さを6m以上にすれば落下高さ60mにおける振動レベルが55dB以下となり目標が達成できる。なお、これまでの推定では、シャフト面にコンクリート塊が衝突する振動の影響も含めているので鉄筋コンクリート造のエレベータシャフトのように剛性の高いシャフトを利用する場合にはさらに振動レベルが低減すると考えられる。

b. 騒音

振動の測定と同時にコンクリート塊(0.5m³)を自由落下させた時の騒音レベルを測定した。敷地境界を想定

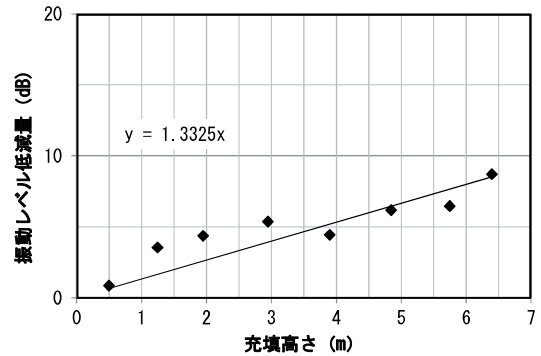


図-16 充填高さによる振動レベル低減量
(落下高さを1mに基準化)

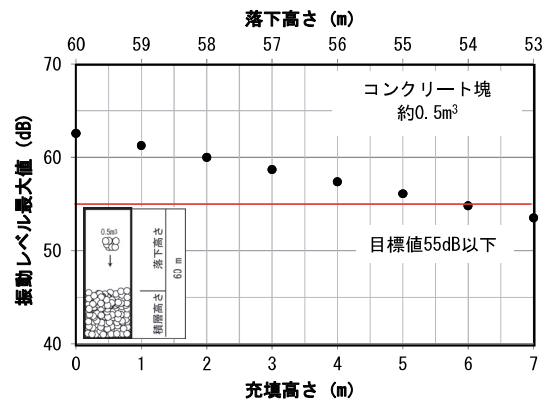


図-17 60m高さからコンクリート塊落下時の振動レベル最大値(計算値)

して、シャフト側面から10m離れた(高さ1.2m)位置での騒音レベル最大値を図-18に示す。目視結果より発生した騒音はコンクリート塊の落下時にシャフトの壁にぶつかる衝撃音と充填されたコンクリート塊とぶつかる衝撃音の合成音である。図より、発生する騒音は、充填高さが2m(落下高さ8.5m)程度になるまでは充填高さの増加にしたがって騒音レベルが大きくなるが、さらにコンクリート塊の充填高さが増加すると充填高さの増加にしたがい騒音レベルは低下していく傾向が表れた。これは、初期投下時は充填コンクリート量が増えるにしたがって、衝突して壁に当たるコンクリート塊の量が増え、第3、第4番目の投下コンクリートは側圧測定用の鋼板に衝突したので騒音レベルが増加したと考えられる。また、上部の減少傾向は落下高さが低くなっていくことと測定位置が音源と離れていくことが原因であると考えられる。

図-19に測定した騒音を1/3オクターブバンド分析した結果を示す。図に示すように125Hz帯域~4kHz帯域の広帯域でレベルが大きくなる周波数特性を示している。充填高さが高くなると、500Hz帯域以下の低周波数領域では低減効果がみられるが、500Hz帯域~2kHz帯域の

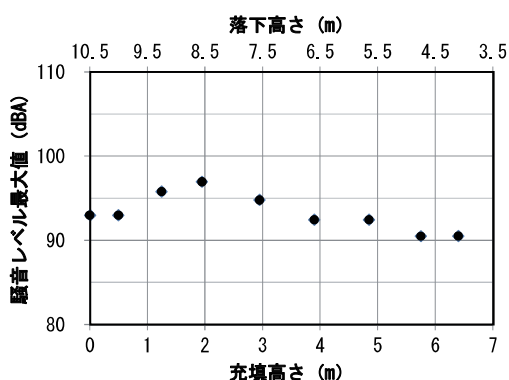


図-18 騒音レベル最大値 (シャフトから10m)

の高周波数領域では大きな違いがみられない。これは、コンクリート塊の落下時の状況から高周波数帯域の数値はシャフトの側圧を測定するために設置した鋼板へぶつかる衝撃音が影響している可能性がある。また、125Hz帯域～500Hz帯域では、充填高さ2.95mの音圧レベルが充填高さ0.5mや5.75mよりも大きい。充填高さ2m程度で騒音レベルが大きくなること(図-18)と対応していると予測できる。

実験で測定された騒音は、建物外に構築したシャフトにコンクリート塊を落下させて発生させたものである。実際の解体建物では建物内のスラブに仮設開口を開けてシャフトを構築したり、エレベータシャフトを利用するため、建物の外周壁の遮音効果が見込め、実測値よりも騒音レベルが小さくなることを考える。そこで、実測値を用いてシャフトから発生する騒音のパワーレベルを求め、シミュレーションソフト (SOUND PLAN Ver7.2 SoundPLAN GmbH 社) を用いて、①建物の壁 (コンクリート系) に囲まれた場合、さらに②工事中防音パネルで囲んだ場合の効果を確認した。シミュレーションモデルを図-20に、シミュレーション結果を表-1に示す。なお、シャフトの大きさは、本実験と同様とした。

建物の壁に囲まれた場合には、シャフト側面から10m離れた位置で最大67dBA程度となり、さらに工事中防音パネルを設置することで63dBA程度になった。これは、他の解体機械の騒音レベル (音源から10m離れた位置で約70dBA以上)³⁾と比べて小さいレベルである。また、発生音は、コンクリート塊が落下時にシャフトにぶつかる衝撃音の影響が大きい。実際に用いるシャフトの開口径は本実験よりもさらに600mm大きくする計画である。コンクリート塊のシャフトへの衝突を緩和でき、さらに騒音を低減できると考えられる。

5. あとがき

高さ60m級の高層建物を解体する場合でも、解体コ

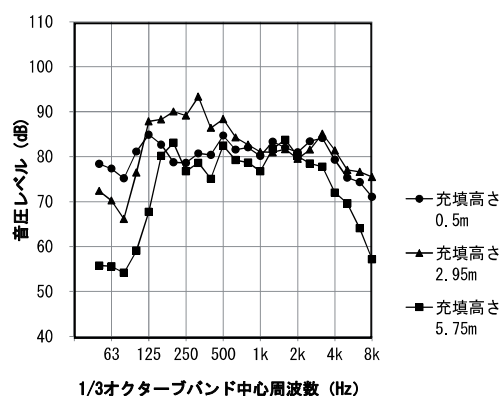


図-19 騒音の周波数特性 (シャフト側面から10m離れた地盤上での実測値)

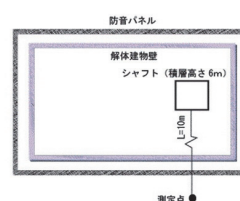


図-20 シミュレーションモデル

表-1 建物内シャフトから発生する騒音の予測

建物外周壁の条件	騒音レベル最大値(dBA)
建物の壁(コンクリート系に囲まれている場合)	67.3
建物周囲の工事中防音パネルをさらに追加した場合	63.2

ンクリート塊を最上階から投下できるシャフト充填式解体コンクリート塊排出工法を開発した。下部階にシャフトをつくり、このシャフト内にコンクリート塊を充填しながら排出させる。また、充填したコンクリート塊がシャフト内で閉塞する場合に備えて、閉塞解放装置を考案した。これは閉塞が発生しやすい排出口上部のスラブ上に設置して、小型ジャッキを用いて閉塞部のコンクリート塊をずらせて閉塞を崩す。また、排出口の高さ調整により排出量が変わること、投下口と排出口の作業が独立して可能であることも特長である。さらに、シャフトに充填するコンクリート塊の効果により振動が低減でき、その充填高さによる振動の低減量を明らかにした。本工法は中層建物を含めた実工事に適用できる。

【参考文献】

- 1) 環境省・大気環境局大気生活環境室、地方公共団体担当者のための建設作業振動対策の手引き、2012、p22
- 2) 伊奈 潔、建設工事における建物振動被害の判定方法、日本建築学会環境系論文集、第77巻、2012.6
- 3) (社)日本騒音制御工学会編、「地域の音環境計画」技報堂、p.116

パッシブリズミング空調システムの制御機能の拡充

Upgrading of Control Functions of Passive Rhythmic

Air-Conditioning System

岩下将也* 茂木正史* 稲留康一*

要 旨

パッシブリズミング空調システムは、空調を一定の時間間隔で発停させることで、温度変化に所定のリズムを与え、快適性を損なわずに空調エネルギーを削減する技術である。従来のパッシブリズミング空調システムは、室内温度に基づいて発停制御をかけていたが、湿度を同時に考慮することで、従来の方式からさらに空調の稼働時間を短くできる可能性がある。その方法として、温度と湿度を加味した PMV の時間平均値を用いる制御方法に着目した。常時計測した温度・湿度と、代謝量などその他の温熱要素より PMV を推定し、PMV の時間平均値に基づいて発停制御をかける方式とすることで、湿度が快適性を上昇させる条件下で、空調の稼働時間を従来方式より短縮させることができる。本報告では、システム構成の制御方法の改良点、および省エネルギー効果について報告する。

キーワード：パッシブリズミング空調システム、環境発電、温湿度、PMV

1. まえがき

近年、産業構造の変化に伴って非産業部門である建物の消費エネルギーの割合が増加しており、これらを削減させるため、国による継続的な施策の取り組みが進められている。2009 年度、経済産業省より 2020 年までに新築公共建物をネット・ゼロ・エネルギー・ビル（以下、ZEB）化するビジョンが掲げられ、それ以降、ZEB の定義の決定¹⁾、助成制度²⁾も進められている。すでに低層・中小規模ビルにおいては ZEB となる建物の実績が出始めており、今後は、より大規模な建物で ZEB を実現させていく必要がある。ZEB においては、建物全体のエネルギー消費量に対し、空調エネルギーの比率が大きくなると考えられ³⁾、ZEB の建物規模を拡大していくには空調エネルギーの削減が重要な課題となる。

また 2017 年度より省エネ法が改正され、延べ床面積 2000m² 以上の非住宅においては設計段階でのエネルギー消費量が規制されることとなった。今後は、先進的な建物に限らず、多くの非住宅建物で、省エネルギーな設計が必要とされるため、低コストで実現できる省エネルギー技術や対策が求められている。

当社では、1996 年に(国研)建築研究所、三機工業(株)とともに「パッシブリズミング空調システム」を共同研究・開発した⁴⁾。パッシブリズミング空調システム

は、空調のエネルギーを削減できる制御機能を備えており、かつ比較的安価に導入ができるため、ZEB の実現や非住宅ビルの省エネルギー化に寄与する。

本研究では、従来のパッシブリズミング空調システムの省エネルギー性能をさらに向上させることを目的とした制御機能の拡充を図った。無線の温湿度計を利用したシステム構成と予想平均申告(Predicted Mean Vote、以下、PMV)を用いた制御方法を導入し、実験により省エネルギー効果を確認した。パッシブリズミング空調システムの概要と、現在進めている拡充機能について紹介する。

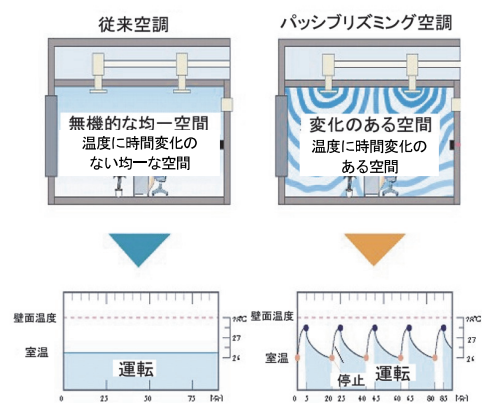


図-1 パッシブリズミング空調システムの考え方

*技術研究所環境研究グループ

2. パッシブリズム空調システム

2.1 システムの概要

図-1にパッシブリズム空調システムの概要を示す。一般的な空調が、時間変化のない均一な温度の維持を目標に制御をするのに対し、パッシブリズム空調システムは、空調を周期的に停止させ、温度変化のサイクルを生み出す制御を行う。このリズムが快適性に寄与することを被験者実験で確認しており⁹⁾、快適性を損なうことなく空調の停止が可能となり、それに伴う省エネルギー効果が得られる。

2.2 パッシブリズム空調システムの快適性

パッシブリズム空調システムの発想は、久野の提唱する二次元温冷感モデル⁵⁾(図-2)による。二次元温冷感モデルでは、人間の温熱感を、人体生理状態(体の熱さ、冷たさ)と、周囲環境状態(気温の高さ、低さ)を軸とした二次元平面で表す。平面の原点は、人体生理状態と周囲環境状態が平衡している中立域であり、その周辺は、「暖かい」、「暑い」、「涼しい」、「寒い」などの感覚にカテゴリーされる非中立域となる。非中立域の中の暖かい、涼しいなどの感覚は、中立域より快適性が増進される(積極的な快適性)と考える。

パッシブリズム空調システムは、計画的に空調を

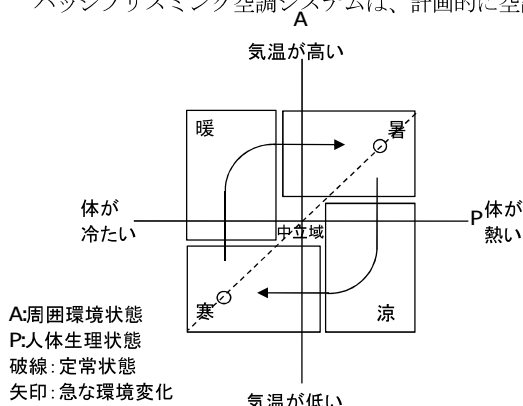


図-2 二次元温冷感モデル

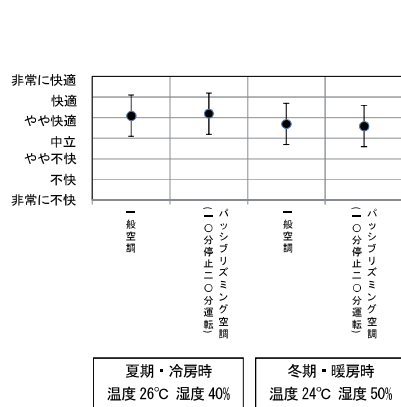


図-3 パッシブリズム空調システムの快適性 (被験者 15名の回答の平均と標準偏差)

発停させ、急な環境変化を与えることで、居住者に積極的な快適性を与え、快適性を損なうことなく空調エネルギーを削減させるシステムである。図-3に一般空調とパッシブリズム空調システムの快適性を比較した結果を示す⁹⁾。夏期冷房時は一般空調で26□(連続稼働)、パッシブリズム空調システムで、26~27.5□(空調停止時間10分、稼働時間20分のサイクル)、冬期暖房時一般空調では24□(連続稼働)、パッシブリズム空調システムで24~22.5□(空調停止時間10分、稼働時間20分のサイクル)となっている。一般空調とパッシブリズム空調システムの稼働時間が異なっているが、快適性は同等となっていることがわかる。

2.3 システム構成

被験者実験から得られた知見をもとに、空調を周期的に発停させ、温度変化のサイクルを生み出す制御方法と装置を開発している。図-4にパッケージ型空調を対象とした制御装置の構成、図-5に制御フローとその際の温度変化の一例を示す。空調が運転している状態で制御が開始されると、空調を稼働させ、20分経過したら10分間停止させる。ただし、停止中に設定温度より1.5°C以上温度が上昇した場合はフェイルセーフ機能として即座に稼働する。この処理を繰り返すことで、所定の温度範囲の中で空調の発停制御が実行され、空調停止に伴った熱源の省エネルギー効果が生まれる。

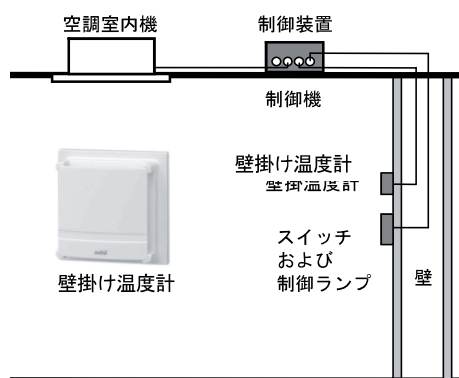


図-4 システム構成

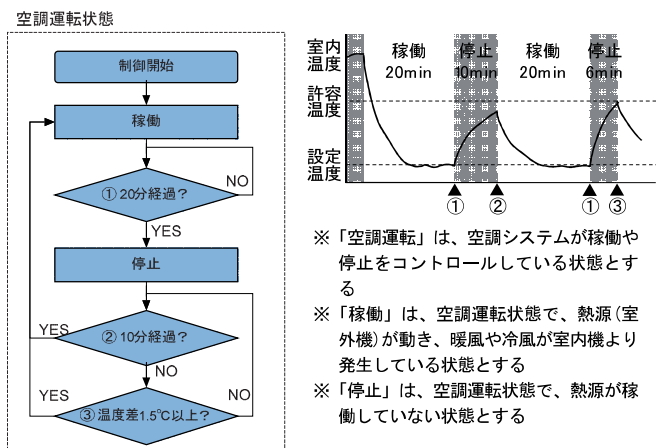


図-5 制御フローと温度変化

3. 制御機能の拡充

3.1 概要

従来のパッシブブリズミング空調システムは、単一の壁掛け温度計を用いて温度を取得し、これを基に室内機を発停させていたが、制御対象室が大きい場合に、温度の不均一性が顕著になるなどの弊害が現れた。また、人の温熱快適性は温度だけでなく湿度にも影響される。しかしながら、パッシブブリズミング空調システムの快適性実験では、湿度は一定としており、湿度変化に対応した制御機能は備えていなかった。

これらを踏まえ、今回は、空間内の標準的な温度を捉え、空間内の温度の偏りの影響を最小限にするため、多点に配置可能な無線温湿度計を用い、それぞれの温湿度計測値の算術平均を用いた制御が可能なシステム構成に改良した。また、湿度を考慮することで、より省エネルギーな運転を可能にする新たな制御方法を考案した。これらについて詳述する。

3.2 多点の温湿度計による計測・制御

図-6に拡張したシステム構成を示す。温湿度の多点計測には、電源線・信号線の配置、施工方法が課題であった。そこで、当社で開発した環境発電・無線温湿度計（以下、PV 無線温湿度計）を計測に用いた。図-7に PV 無線温湿度計の外観を示す。光発電パネルを電源としているため電源交換の必要がなく、温度・湿度・照度を計測し、無線送信する。照度 200lux で 30 秒ごとのデータ送信が可能であり、照度が高くなるほど、送信間隔は短くなる。

計測されたデータは、制御装置の中に格納した受信機へ送られる。計測から受信、受信後の平均値変換までの処理を、図-8に示す。PV 無線温湿度計の送信間隔は、環境照度に応じて変化するため、一定時間内で受信データの全平均を求めると、高照度環境に配置された計測器の値が多く含まれることとなり、厳密な平均値とならない。そのため、一度受信機側で各計測値の一分間平均値を求め、各一分間平均値から、空間平均温度と空間平均湿度を算出している。

また同一の空調ゾーニングの中で、温度が異なると考えられる複数箇所に PV 無線温湿度計を配置し、温湿度の空間平均値を算出することで、より標準的な温湿度による制御が可能となる。

3.3 PMV を用いた湿度の考慮

算出された空間平均温度・湿度をもとに、従来のパッシブブリズミング空調システムと同程度の快適性を保ちながら、よりエネルギーとなる制御方法を考案した。受信機で算出された空間平均温度・湿度より、温熱環境評価指数の一つである PMV を推定し、PMV の時間平均値をもとに発停を判断する。なお、PMV はファンガーによって提案された温熱環境評価指数であり、温熱環境

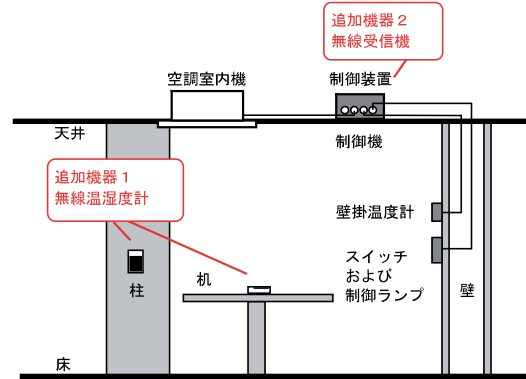


図-6 拡張したシステム構成

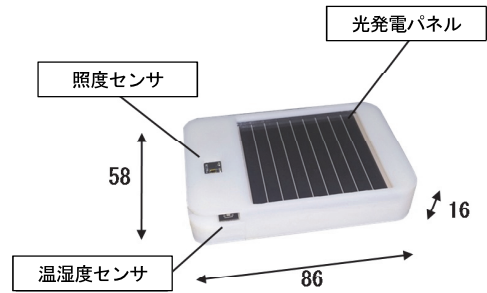


図-7 PV無線温湿度計

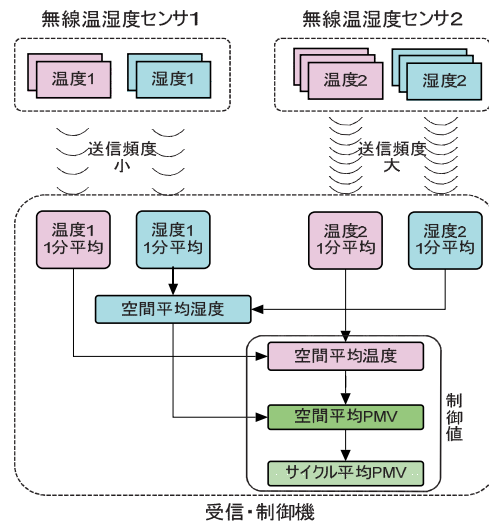


図-8 計測から受信、受信後の平均値変換までの処理

を形成する6要素（温度、湿度、気流、輻射温度、代謝量、着衣量）を基に、快適方程式から数値化された温冷感（図-9）を算出する。PMV は不快者数の割合の期待値（予測不快者率 PPD）と対応しており、ISO7730(1994)に採用されている代表的な温熱環境評価指数の一つである。

PMV を用いた冷房・暖房時の制御方法を図-10、11に、制御値の許容条件を表-1に、制御フローを図-12に示す。従来のパッシブブリズミング空調システムにおける実験条件より、発停間隔サイクルの時間平均（以下、サイクル平均）のPMVを求め、これに基づいた制御をす

る。空調の停止開始時を起点とし、計測ごとに起点からその時刻までの空間平均 PMV の時間平均値（以下、時間平均 PMV）を求め、10 分後に空調を 15 分から 20 分稼働する。15 分から 20 分の間で、時間平均 PMV が、表-1 に示す許容値に収まる場合、その段階で空調を停止させ、新たな停止-稼働サイクルに移る。つまり、湿度条件が有利な場合は、従来のパッシブリズム空調システムと同様のサイクル平均 PMV を保ちながら、稼働時間を最大で 15 分まで縮小させる。停止時間率（1 サイクルあたりの停止時間の割合）にすると、従来制御が 33%、新しい制御が 33~40% となり、最大で 7% 停止時間率が増大する。

またフェイルセーフとして、空調の停止中に空間平均 PMV、空間平均温度が表-1 の瞬時許容条件を外れた場合は、即座に空調を稼働する機能を加えている。

4. 実証実験

4.1 実験概要

PMV による新しい制御方法の冬期暖房時の運転実験および省エネルギー効果の確認実験を行った。実験室の測定点と空調配置図を図-13 に示す。暖房能力 4.0kW の室内機が室の東西に 2 台配置しこれらを同時に制御した。室外機の定格出力は 2.5kW である。PMV 無線湿度計は、室内機の風が直接当たらない机の上に配置した。

実験では、従来のパッシブリズム空調システムと、新しい制御機能を搭載したパッシブリズム空調システムを運転し、それぞれの動作状況、室外機のエネルギー消費量を比較した。日中の負荷変動の影響を除外するため、日没以降 18:30~20:00 の時間に 2 サイクル実施した。時刻変化に伴う温度のばらつきに配慮し、日を変えて 3 回実験をし、その日別平均の計測値を比較した。エネルギー消費量の比較は、一般空調の稼働実験も加え、上記 3 回の実験のうち外気温が近い日で比較した。

PMV は、湿度が高いほど大きくなる。従来制御では暖房時は相対湿度 40% を仮定していたため、本実験では 40% より高湿度となる場合に、PMV の時間平均値制御によって、空調稼働時間が短縮される動作確認をした。湿度は加湿器で調整し、従来制御の場合は、過去の被験者実験と同様、相対湿度 40%、新しい制御法の場合は、より PMV が有利な条件として相対湿度 50% を与えた。空調設定温度は 22℃ とした。

4.2 制御の確認

従来のパッシブリズム空調システムと、新しいパッシブリズム空調システムの PMV 推移を図-14 に示す。サイクル平均温度は従来制御で 22.1℃、新しい制御法で 21.8℃ と差があるが、サイクル平均 PMV は、湿度差が加味され、従来制御と新しい制御でともに -0.3℃ となっている。また、新しい制御においては、稼

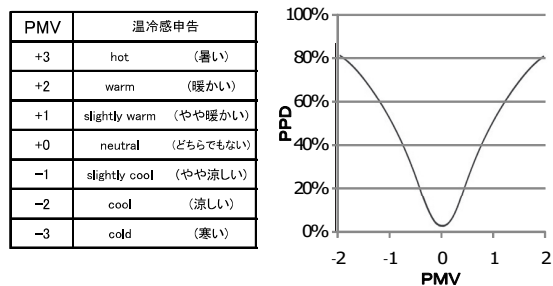
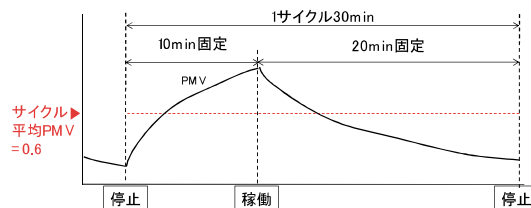


図-9 PMV の温冷感申告と PPD

従来制御: 10分停止20分運転(26℃~27.5℃、湿度50%)



拡張制御: 10分停止15~20分運転(22℃~27.5℃、湿度50%未満)

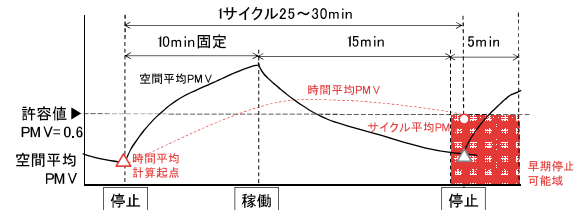
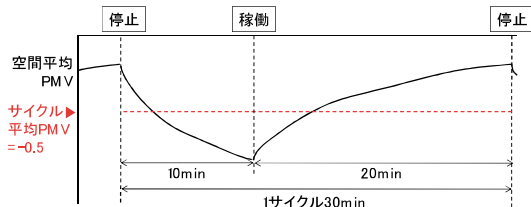


図-10 冷房時の時間平均 PMV による制御

従来制御: 10分停止20分運転(22℃~20.5℃、湿度40%)



拡張制御: 10分停止15~20分運転(22℃~20.5℃、湿度40%以上)

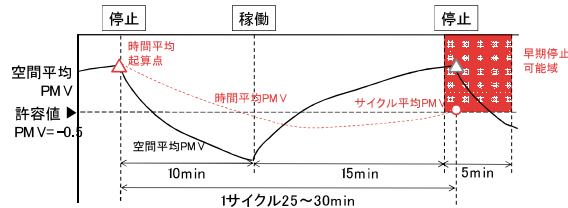


図-11 暖房時の時間平均 PMV による制御

表-1 制御値の許容条件

	稼働中止判断の許容値	停止継続判断の許容値
暖房時 着衣量 0.8clo 代謝量 1.2met 設定温度 22℃	時間平均 PMV -0.5 以上	空間平均 PMV -0.8 以上 空間平均温度 29℃ 以下
冷房時 着衣量 0.5clo 代謝量 1.2met 設定温度 26℃	時間平均 PMV 0.6 以下	空間平均 PMV 0.8 未満 空間平均温度 19℃ 以上

働時間が15分となっており、サイクル平均PMVに基づいた稼働時間を短縮する制御が確認された。

4.3 省エネルギー効果

一般空調と従来のパッシブリズム空調システム、新しいパッシブリズム空調システムの3パターンの室外機の電力（電力量の運転時間平均）を図-15に示す。一般空調に対し稼働時間の短縮によって、従来のパッシブリズム空調システムは36%の削減効果、新しいパッシブリズム空調システムは43%の削減効果が得られた。空調停止率が7%増加したことで、省エネルギー性能がさらに向上していることを確認した。

5. あとがき

パッシブリズム空調システムについて、多点の温湿度計測に対応できるよう、複数のPV無線温湿度計を用い、計測された温湿度から推定される平均PMVを基に、稼働時間を短縮する制御方法を考案した。

運転状況と省エネルギー効果を確認した結果、1サイクル当たりの稼働時間が5分短縮され、停止時間率が7%増大した。また、一般空調と比較したエネルギー削減率は、従来のパッシブリズム空調で36%、新しい制御を採用した場合で43%となり、省エネルギー効果が向上した。以上より、考案したシステム構成、および制御方法が想定通りの性能であることを確認した。

今後は、快適性に関する被験者実験を予定している。

【参考文献】

- 1) 経済産業省、「ZEB ロードマップ検討委員会 とりまとめ」、2016.12.17
- 2) 例えば、環境共創イニシアチブ、「平成28年度 ネット・ゼロ・エネルギー・ビル実証事業」
- 3) 岩下将也、「建築環境シミュレーション技術を活用したゼロエネルギービルの試設計」、奥村組技術年報、2016.10
- 4) 坊垣和明他、「パッシブリズム空調における快適性と省エネルギーに関する研究」、空気調和・衛生工学会論文集、No.64、1997.1
- 5) 久野 覚、「温熱環境の快適性とプレザントネス」、建築雑誌、Vol.110、No.1373、1995 6月号
- 6) 角谷三夫他、「パッシブリズム空調における快適性と省エネルギー効果に関する研究」、奥村組技術年報、No.22、pp.67-72、1996
- 7) (社) 空気調和・衛生工学会、「快適な温熱環境のメカニズム」、第2版、丸善(株)、2006.3.20

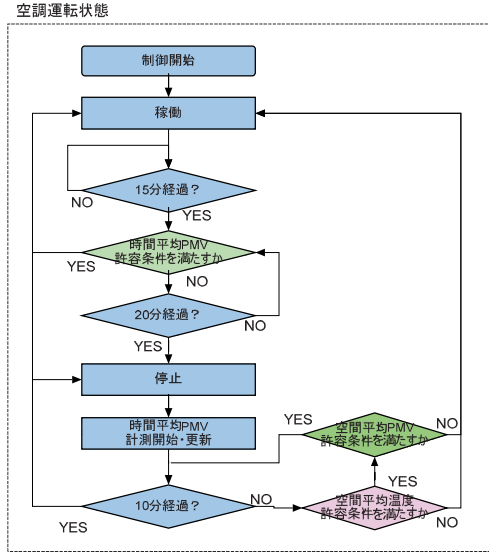


図-12 制御フロー

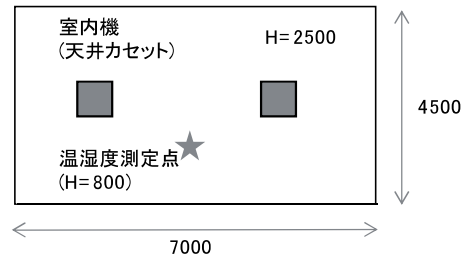


図-13 実験室の測定点と空調の配置

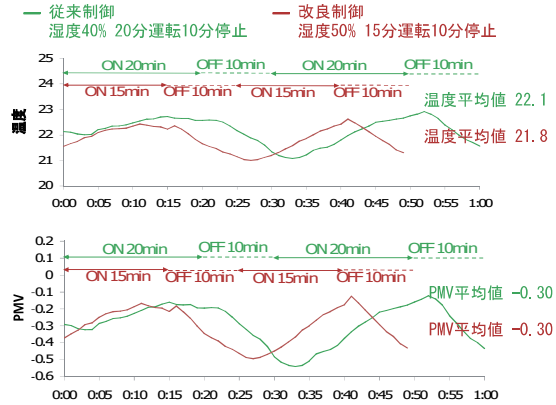


図-14 温度推移(上)とPMV推移(下)

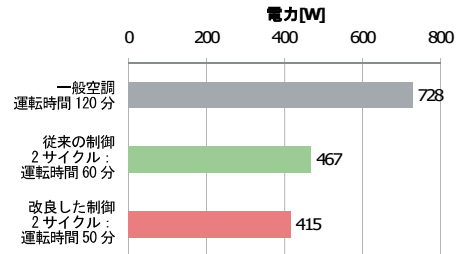


図-15 各制御パターンの電力量運転時間平均

アクティブ音場制御における制御スピーカの配置 および指向性に関する研究

Placement of Control Speaker for Active Noise Control

— Effects of the Speaker Radiation Pattern —

金澤朗蘭* 柳沼勝夫* 安井健治** 稲留康一*

要旨

騒音対策手法として、騒音と逆位相の音をスピーカから出力して騒音を打ち消す、Active Noise Control (以下、ANC と記す) がある。ANC は、基本的にマイクを配置したある点において騒音を低減させるシステムであり、ある面における騒音の低減には複数個のスピーカおよびマイクを必要とする。制御用スピーカおよび制御用マイクの数少なくするには、低減の対象を対象領域に最も影響する騒音に限定し、その騒音源近傍に制御用のスピーカを設置するのが効果的である。しかし、実際には設置可能な任意の場所に機器を配置せざるを得ない場合が多い。このため、合理的な ANC の機器配置には、低減対象の騒音、制御用スピーカおよび制御用マイクの位置に応じた対象領域における効果の予測方法が必要不可欠である。本報では、騒音がある一方向から伝搬する場合について、スピーカの位置とスピーカの指向性に応じた、騒音を低減させる領域における効果の予測方法を検討した。予測値と実験値を比較した結果、部分的に若干の差があるものの、ヒトの聴感における影響は小さく、実務的には十分適用性があることを確認した。

キーワード：能動騒音制御、スピーカの指向性、配置方法

1. まえがき

工場内では様々な騒音が存在しているが、生産状況を目視する必要性から、通常の騒音対策である遮音壁等で騒音源を囲うなどの対策ができない場合が多い。このため、遮音壁等を使用せずに作業員がいるエリアの騒音を低減したいという要望がある。騒音対策手法のひとつであるアクティブ・ノイズ・コントロール (Active Noise Control、以下 ANC と記す) は、視界を遮ることなくある領域での騒音を低減させることができる。ANC は、制御用のマイク位置において対象音を低減させるために、対象音と同振幅・逆位相の音を制御用のスピーカから出力する方法である。

ANC は、建設重機のエンジン音の対策¹⁾のように、騒音源の近傍に制御用スピーカを配置する場合には、制御用スピーカ1台および制御用のマイク1台で大きな騒音低減効果が得られる。しかし、騒音源から離れた位置に制御用スピーカを配置する場合、作業員がいるエリア等の領域全体の騒音を低減させるためには、多数の制御用スピーカおよび制御用マイクが必要になり、実現が難しい。

工場など実際の空間に適用する場合、騒音源の位置や伝搬方向、低減したい騒音の周波数は限定できる。したがって、騒音を低減させるための最適なスピーカ配置およびスピーカ放射角度とすることで、制御用のスピーカおよびマイクの数や数を数個または単一としても、対象領域の騒音を効果的に低減できると考えた。

本報告では、騒音を対象領域に一方向から伝搬するケースについて検討を行い、制御用スピーカの配置、指向性を考慮した騒音低減効果について、波面合成(波の重ね合わせ)の考えに基づいた予測方法を提案した。騒音による音場を領域内に均等に配置した数点で代表させ、スピーカからの制御音による音場との合成によって効果の得られる範囲を予測し、実験値と比較した。予測結果は、実験結果の傾向を概ね模擬できることを確認した。

2. ANC の対象領域と効果

ANC は、制御対象とする領域の広さにより、極小領域(耳元などの小さな領域)、閉空間全体、開空間における一部の領域、の3つに分類できる。対象の領域が広

*技術研究所環境研究グループ **技術研究所企画・管理グループ

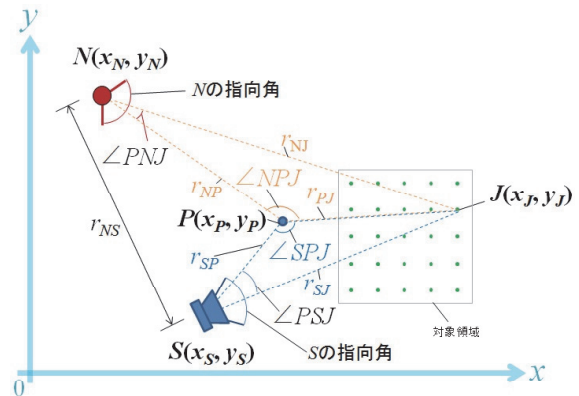
くなるほど、対象全体を制御するのが困難になる。

極小領域を対象とする ANC には、一般に広く普及しているノイズキャンセリングヘッドホンのように、耳元に制御用マイクおよび制御用スピーカを配置して、制御用マイク近傍の騒音を低減するもの²⁾³⁾や、耳元に制御用のマイクを、空間内に制御用のスピーカを配置し、スピーカから耳元のマイクまでの伝達関数を逐次計算することで、移動するマイク位置に追従して逆位相の音を制御用スピーカから出力し騒音を低減するもの^{4)~6)}等がある。このような ANC では、対象領域が狭いため、少ない数の制御用スピーカおよび制御用マイクで制御が可能であり、また高い周波数でも大きな効果が得られる。しかし、制御用のスピーカまたはマイクを耳元に配置する必要があり（イヤーマフ型）、工場においては作業の集中を妨げるなど、実際の適用には難しい場合がある。

閉空間全体を対象領域とする ANC は、空間内に存在する様々な周波数の音をすべて対象とするため、空間内に多数の制御用スピーカ、制御用マイクを設置する必要がある⁷⁾。このため、多数のスピーカやマイクが設置可能なスペースがあり、さらにある程度狭い空間である、自動車の運転室内のこもり音対策⁸⁾⁹⁾に適用されている。

上記の極小領域および閉空間を対象とする ANC は、領域全体を制御の対象としている。しかし、実際に騒音が伝搬する状況を考慮すると、対象領域は、工場内の作業員がいる場所のように大空間の中の一部や、工事現場等などの屋外において近隣へ騒音が影響する領域など、全体のうちの一部の領域であることが多い。一部の領域における騒音を対象とする ANC には、境界音場制御の原理¹⁰⁾に基づき、ある面を通過する騒音を低減させるもの¹¹⁾や、指向性の鋭いパラメトリックスピーカを利用するもの¹²⁾がある。これらの ANC では、対象領域内において、制御用マイク位置とその周囲において大きな効果を発揮するものの、それ以外の部分において増幅する場合がある。また、パラメトリックスピーカ単体では、通常、約 200Hz 以下の低音や 100dB 以上の大音圧の音を再生するのが難しく、ANC に適用できない場合がある。

対象領域における騒音の伝搬方向と同軸上に制御用のスピーカを配置すると、広い範囲で騒音と制御用スピーカからの制御音が同振幅・逆位相（もしくはそれに近い状態）となり、対象領域内で騒音が低減する。しかし、実際の工場においては必ずしも同軸上に配置できないため、騒音の伝搬方向と異なる方向に制御用スピーカを配置する場合がある。さらに、制御用スピーカの指向性によっては、対象領域内での効果や増幅位置が変わる。対象領域において騒音の卓越する周波数および伝搬方向を考慮し、制御用スピーカを効率的に配置し、適切な指向性を選定することで、少ない機材で、効果的に騒音を低減できると考えられる。そこで、騒音が一方向から伝搬



図一 位置関係

する場合について、制御用スピーカの配置と指向性を評価できる予測方法を検討した。

3. 振幅比と位相差に着目した予測方法

騒音源から伝搬する音波と制御用スピーカから伝搬する音波を、対象領域内に等間隔で設けた評価点において重ね合わせることによって、ANC の効果を予測する。なお、工場などの天井の高い空間を想定し、2 次元平面を仮定した。以下、考え方を示す。

図一に騒音源(N)、制御用スピーカ(S)、制御用マイク(P)、および対象領域を示す。評価点Jは対象領域内に等間隔に配置した。制御用マイク位置Pにおいて、騒音源Nおよび制御用スピーカSから伝搬する音波の速度ポテンシャルを式(1)および式(2)のように仮定する。なお、騒音源Nは正弦波、騒音源Nと制御用マイク位置PおよびJでなす角 $\angle PNJ$ を θ_1 、制御用スピーカSと制御用マイク位置PおよびJでなす角 $\angle PSJ$ を θ_2 とし、 θ_1 、および θ_2 が、騒音源および制御用スピーカの指向角よりも大きい場合、その評価点Jにおける騒音源および制御用スピーカの振幅を減衰させる。振幅の減衰特性は、騒音源および制御用スピーカの指向特性に応じた値（実測値や仕様データ）を使用する。

$$\delta_N = -\frac{Q_0}{4\pi r_{NP}} \frac{1 + \cos \theta_1}{2} e^{-ikr_{NP}} e^{i\omega t} \quad (1)$$

$$\delta_S = -\frac{\alpha Q_0}{4\pi r_{SP}} \frac{1 + \cos \theta_2}{2} e^{-i(kr_{SP} + \phi)} e^{i\omega t} \quad (2)$$

速度ポテンシャルと音圧の関係¹³⁾から、式(1)、式(2)を時間tで微分し空気密度 ρ_0 をかけると、N、Sの音圧となる。

$$P_N = i\omega \rho_0 \frac{Q_0}{4\pi r_{NP}} \frac{1 + \cos \theta_1}{2} e^{-ikr_{NP}} e^{i\omega t} \quad (3)$$

$$P_S = i\omega \rho_0 \frac{\alpha Q_0}{4\pi r_{SP}} \frac{1 + \cos \theta_2}{2} e^{-i(kr_{SP} + \phi)} e^{i\omega t} \quad (4)$$

ここで、

δ_N : Pにおける騒音源Nの速度ポテンシャル

- δ_S : P における騒音源 S の速度ポテンシャル
- P_N : P における騒音源 N からの伝搬音による音圧[Pa]
- P_S : P における制御用スピーカ S からの伝搬音による音圧[Pa]
- ρ_0 : 空気密度[kg/m³]
- ω : 角周波数 [rad/s]
- k : 波数 ($2\pi/\lambda$)
- λ : 波長[m] ($\lambda=c/f$, c : 音速[m/s])
- Q_0 : 音源 S_1 の強さ (体積速度) [m³/s]
- α : 騒音源に対する制御用スピーカの音源の強さを表す係数
- r_{NP} : 騒音源 N から P の距離[m]
- r_{SP} : 制御用スピーカ S から P の距離[m]
- θ_1 : 騒音源 N と制御用マイク位置 P および評価点 J でなす角 $\angle PNJ$
- θ_2 : 制御用スピーカ S と制御用マイク位置 P および評価点 J でなす角 $\angle PSJ$
- ϕ : 騒音源 N に対する制御用スピーカ S の位相差[rad]を示す。

ここで、騒音源 N の位置に対し、対象領域と制御用マイクの P 位置、および制御用スピーカ S の位置を決めると、図-1における r_{NP} , r_{SP} が既知となる。 P 点において騒音源 N からの伝搬音と制御用スピーカ S からの伝搬音の振幅比が 1、位相差が π のとき、騒音が打ち消されて P 点の音圧が低減する。このときの P_N および P_S の条件を求めると、振幅比について、式(1)および(2)の振幅に関わる部分の比から、

$$A_r = \frac{i\rho_0\omega \frac{\alpha Q_0}{4\pi r_{SP}} \frac{1+\cos\theta_2}{2}}{i\rho_0\omega \frac{Q_0}{4\pi r_{NP}} \frac{1+\cos\theta_1}{2}} = \frac{r_{NP}}{r_{SP}} \frac{\alpha(1+\cos\theta_2)}{1+\cos\theta_1} \quad (5)$$

P 点における振幅比 $A_r=1$ なので、

$$\alpha = \frac{r_{SP}(1+\cos\theta_1)}{r_{NP}(1+\cos\theta_2)} \quad (6)$$

より、 α が求められ、騒音源の音源強さに対する制御用スピーカの音源強さを設定できる。

続いて、位相差は、式(3)および(4)の位相から、

$$\Delta\phi = kr_1 - (kr_2 + \phi) \quad (7)$$

となり、 P 点における位相差 π なので、

$$\phi = k(r_1 - r_2) + \pi \quad (8)$$

より、 ϕ が求められる。

対象領域における ANC の効果は、騒音源と各評価点との距離 r_{NJ} 、制御用スピーカと各評価点との距離 r_{SJ} から、式(5)および式(7)の r_{NP} および r_{SP} に、 r_{NJ} 、および r_{SJ} を代入し、振幅比と位相差で求められる。 r_{NJ} 、 r_{SJ} は、 P 点と各評価点 J の関係から導くことができる。 P を直角座標の (x_p, y_p) としたとき、 P から評価点 J までの距離を r_{PJ} 、騒音源 N と P および評価点 J の内角 $\angle NPJ$ を θ_α 、

制御用スピーカ S と P および評価点 J の内角 $\angle SPJ$ を θ_β とすると、余弦定理から

$$r_{NJ} = (r_{NP}^2 + r_{PJ}^2 - 2r_{NP}r_{PJ} \cos\theta_\alpha)^{1/2} \quad (9)$$

$$r_{SJ} = (r_{SP}^2 + r_{PJ}^2 - 2r_{SP}r_{PJ} \cos\theta_\beta)^{1/2} \quad (10)$$

となる。

次に、各評価点における ANC の効果 E を、

$$E = \left(\frac{1}{T} \int_0^T D^2 dt \right)^{1/2} - \left\{ \frac{1}{T} \int_0^T (D+C)^2 dt \right\}^{1/2} \quad (11)$$

ここに、

E : 評価点における ANC の効果

D : 評価点における騒音源からの伝搬音

C : 評価点における制御用スピーカからの伝搬音

T : 周期[sec]

と考えると、 D および C は、評価点における振幅比 A_r および位相差 $\Delta\phi_j$ を用いて

$$D = \sin \omega t \quad (12)$$

$$C = A_r \sin(\omega t + \Delta\phi_j) \quad (13)$$

と表すことができる。なお、 D を単位振幅とし、 C の振幅を評価点 $J(x_j, y_j)$ における A_r である A_j とすることで、騒音源からの伝搬音と制御用スピーカからの伝搬音の振幅比を表現する。

よって、

$$E = \left(\frac{1}{T} \int_0^T \sin^2 \omega t dt \right)^{1/2} - \left[\frac{1}{T} \int_0^T \{ \sin \omega t + A_j \sin(\omega t + \Delta\phi_j) \}^2 dt \right]^{1/2} \\ = \left(\frac{1}{T} \int_0^T \sin^2 \omega t dt \right)^{1/2} - \{ 1 + A_j^2 - 2A_j \cos(\Delta\phi_j) \}^{1/2} \left[\frac{1}{T} \int_0^T \sin^2(\omega t + \Delta\phi_j) dt \right]^{1/2} \quad (14)$$

ただし、

$$\cos \phi_j = \frac{1 + A_j \cos \Delta\phi_j}{\sqrt{1 + A_j^2 + 2A_j \cos \Delta\phi_j}}$$

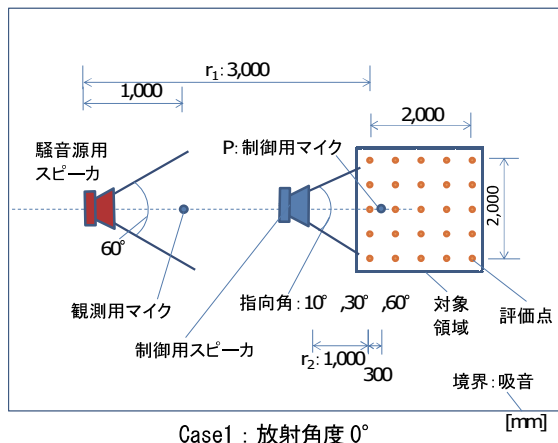
となる。ここで、式(14)の第 2 項の後半は、単位振幅をもつ正弦波の実効値なので、

$$E = \Lambda \left[1 - \{ 1 + A_j^2 - 2A_j \cos(\Delta\phi_j) \}^{1/2} \right] \quad (15)$$

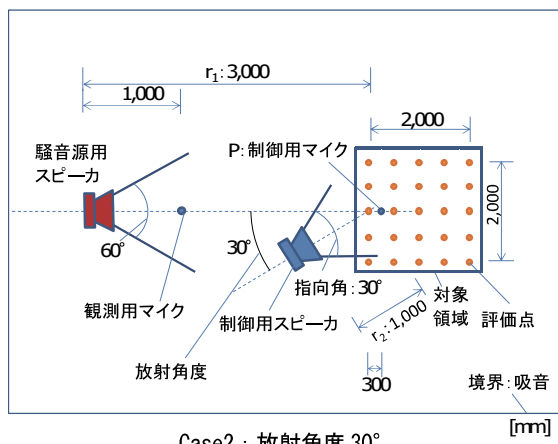
ただし、 Λ : 単位振幅の正弦波の実効値=0.707

となる。評価点において上式により効果を評価することで、騒音源、制御用スピーカ、および制御用マイク位置と対象領域の位置関係より、ANC による効果を予測できる。

式(9)~式(15)は、二次元空間を仮定しており、高さ方向の効果については検討していない。今回対象としている工場等は高い天井を有するため、騒音源、制御用スピーカ、制御マイク、評価点を同一高さとする事で、二次元空間と仮定できる。



Case1: 放射角度 0°



Case2: 放射角度 30°

図-2 実験条件 (無響室)

4. 実験値との比較

4.1 実験条件

実験状況を図-2に示す。実験室は無響室であり、反射音の少ない空間とした。実験は、騒音と制御用スピーカから制御音が同方向に伝搬する Case1 と、騒音の伝搬方向に対し、制御用スピーカからの放射音が角度を持って伝搬する Case2 の2 ケースとした。

実験条件を表-1に示す。騒音源に対する制御用スピーカの角度 (以下、放射角度) は、0° および 30° とした。騒音源に用いた正弦波は、63Hz、125Hz、250Hz、500Hz の正弦波とした。また、スピーカの指向角は周波数によって変化するため、事前の実測により指向角を決定した。実験に使用したスピーカの周波数と指向角を表-2に示す。Case1で使用したSPCは、再生可能周波数が400Hz以上であり、騒音源の周波数が500Hzの場合のみ実験に使用した。音圧の低減効果の確認は図-2に示す0.5mピッチで配置した評価点で行い、音圧を低減したい対象領域の大きさは、2m×2mの範囲とした。低減効果は、ANCのON/OFF時の、各測定点における音圧レベル差とした。

表-1 実験条件

	放射角度 (騒音源に対する 制御用スピーカの傾き)	使用スピーカ	
		騒音源用	制御用
Case1	0°	SP A	SP B、SP C
Case2	30°		SP B

表-2 スピーカの周波数と指向角

スピーカ名	公称 指向角	測定した指向角[degree]			
		63Hz	125Hz	250Hz	500Hz
SP A	60	90	60	60	60
SP B	30	90	50	40	30
SP C	1	-	-	-	2

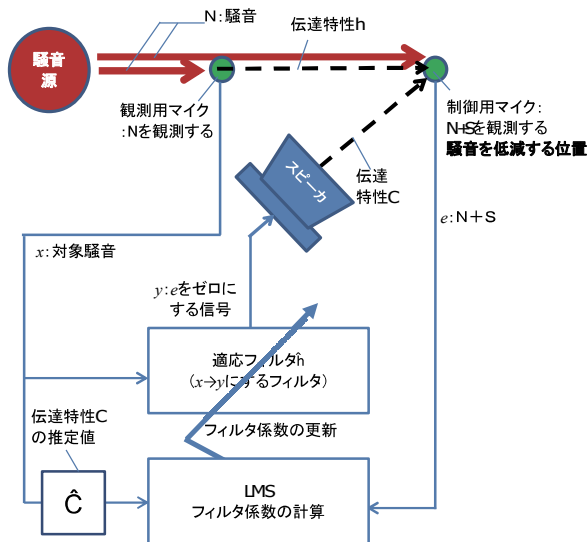
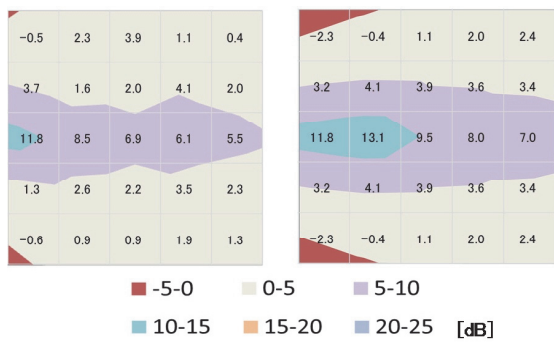


図-3 ANCに適用した制御方法

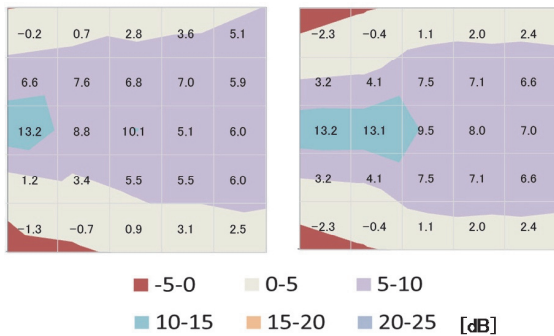
4.2 制御方法

ANCの制御方法は、図-3のブロック図に示す、Filtered-X-LMS アルゴリズム¹⁴⁾を使用した。この制御方法は、図に示す観測用マイクで観測した音圧を制御の対象とし、制御用マイクで観測する音圧を最小とするように、適応フィルタにより出力信号を制御し出力する方法である。適応フィルタは、観測用マイクで観測した対象騒音と、制御用マイクで観測した音をもとに逐次計算により適応フィルタが同定される。2章で述べたイヤーマフ型のANCの多くは、この制御方法を基本としている。

Filtered-X-LMS アルゴリズム制御は、制御用スピーカ、観測用マイクおよび制御用マイクの配置によってANCの効果は変わるものの、自由度が高い。ANCの効果の検討では制御用スピーカの位置を変更するため、Filtered-X-LMS アルゴリズム制御方法によるANCを適用し、実験を行った。



実験値 予測値
(a) 500Hz、放射角度 0° 指向角 2°



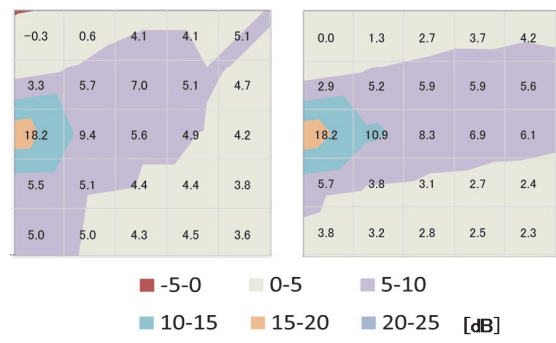
実験値 予測値
(b) 500Hz、放射角度 0° 指向角 30°

図一 4 実験値と予測値の効果比較 (Case1)

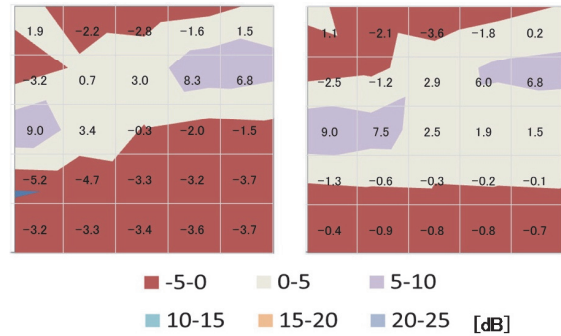
4.3 実験値と予測値

騒音源に対する制御用スピーカの放射角度が 0°、騒音源の周波数が 500Hz、騒音用スピーカの指向角が 60°、制御用スピーカの指向角が 30°および 2°の場合の、実験と予測による効果を図一 4 に示す。図中に示した値は実験および式(15)から得られた ANC の効果である。また、制御マイク近傍における実測値（効果が最大）の値を、予測計算における制御マイク位置の効果とした。

図一 4 (a) より、制御用スピーカの指向角が小さいため、5dB 以上の効果（ヒトが体感可能な差）が得られる範囲も狭く、帯状となった。また、5dB 以上の効果が現れる範囲は実験値が若干小さくなっているが、予測値とほぼ同等の範囲で効果が得られた。図一 4 (b) より、制御用スピーカの指向角が大きくなると、5dB 以上の効果が得られる範囲も広がった。また、5dB 以上の効果が得られる範囲は、実測値の方が大きくなったが、この理由として、制御用スピーカの減衰特性の影響が考えられる。予測では点音源として音源の減衰特性を与えていたが、騒音源および制御用スピーカに使用したスピーカの特性や評価点との距離によっては、面音源の減衰特性であった可能性がある。Case1 において、騒音源用スピーカと対象領域の距離は 4 波長以上離れていたが、制御用スピーカと対象領域の距離は 1 波長程度と近かった。



実験値 予測値
(a) 125Hz、放射角度 30° 指向角 50°



実験値 予測値
(b) 500Hz、放射角度 30° 指向角 30°

図一 5 実験値と予測値の効果比較 (Case2)

制御用スピーカの放射面積を考慮すると、対象領域と各スピーカとの距離に応じた減衰特性が実験と予測で異なり、振幅に差が生じたため、実験値と予測値に若干の違いが生じたと考えられる。

放射角度が 30°の場合の実験値と予測値を図一 5 に示す。図一 4 と同様、図中に示した数字は実験および予測によって得られた ANC の効果であり、制御マイク近傍における実測値（効果が最大）の値を、予測計算における制御マイク位置の効果とした。

図一 5 (a) より、制御用スピーカの指向角が 50° と Case1 よりも広いものの、放射角度があるため、5dB 以上の効果が得られる範囲は、放射角度に沿って帯状に現れた。5dB 以上の効果が得られる範囲は実測値の方が若干大きくなったが、予測値との差は小さく、ほぼ同等となった。図一 5 (b) より、図一 5 (a) と同様、放射角度に沿って効果が現れた。また、5dB 以上の効果が得られる範囲、増幅する範囲ともに実験値と予測値でほぼ一致しており、予測方法の妥当性を確認した。

実験値と予測値の比較より、放射角度によらず、また音源の周波数、および制御用スピーカの指向角に関わらず、制御用スピーカの放射方向に沿って効果が現れ、5dB 以上の効果が得られる範囲がほぼ同等となった。予測値と実測値の差についてもすべての評価点（測定点）

で5dB未満となった。制御用スピーカから離れた位置において、制御用スピーカの減衰特性の影響により実験値と予測値が若干異なる傾向があるが、数 dB 程度であり、実務上は十分に適用性があると考えられる。

5. おわりに

低減対象の騒音が対象領域に一方方向から伝搬するケースについて、制御用のスピーカおよびマイクの最適配置を決めるための、ANC の効果の予測方法を提案した。波面合成の考え方に基づいた方法により、対象領域における ANC の効果をほぼ模擬できた。ただし、今回の検討に用いた予測計算では、制御用スピーカと対象領域の距離に応じた減衰特性を考慮していないため、対象領域において制御用スピーカから離れるに従って効果の差が大きくなった。

今回の検討では、騒音が1方向から伝搬する場合について、制御用スピーカを1台配置した場合のANCによる効果の予測方法を検討した。より実際の状況を考慮するため、今後は、制御用スピーカと対象領域との距離に応じた減衰特性を考慮した予測方法を検討する。さらに、複数の騒音源および複数の制御用スピーカ、またこの場合の制御スピーカ同士の干渉による増幅を考慮し、予測に適用する方法について検討する。さらに、空間からの反射音の影響についても評価可能な方法について検討を行う。

【参考文献】

- 1) 金澤朗蘭、安井健治、柳沼勝夫、「フィードフォワード型能動制御による重機騒音の低減効果」、日本建築学会環境系論文集、第 82 巻 732 号、pp.97-103、2017.2
- 2) 山川航平、梶川嘉延、「ヘッドマウント型 ANC システムによるMR騒音の低減」、日本騒音制御工学会春季研究発表会講演論文集、pp.117-120、2013.4
- 3) 原田拓実、梶川嘉延、西村正治、「FPGA を用いたフィードフォワード型ANCシステムに関する基礎検討」、日本騒音制御工学会春季研究発表会講演論文集、pp.5-8、2016.4
- 4) 池田生馬、大野佳子、雉本信哉、「評価点の移動に追従する能動音響制御」、日本騒音制御工学会春季研究発表会講演論文集、pp.97-100、2013.4
- 5) 平 隆志、田中信雄、「騒音源情報推定による Virtual Sensing ANC」、日本機械学会論文集 (C 編)、78 巻 790 号、pp.162-173、2012.6
- 6) 宮崎信浩、梶川嘉延、「バーチャルマイクロホンを用いたフィードバック ANC システムに関する検討」、電子情報通信学会技術研究報告、第 112 巻 49 号、pp.59-64、2012.5
- 7) Stephan Elliott、「Signal Processing for Active Control」ACADEMIC PRESS、pp.188-189、2001
- 8) 鮫島俊哉、安岡正人、「状態フィードバック制御による室内残響抑圧」、日本音響学会誌 55 巻 1 号、pp.12-22、1999
- 9) 佐野 久、井上敏郎、高橋 彰、山下 剛、中村光勇、寺井賢一、中村由男、「低周波ロードノイズのアクティブ制御システムの開発(1) -実用化に向けた課題解決法とシステム概要-」、日本音響学会講演論文集、pp.499-500、2000.9
- 10) 西村正治、宇佐川毅、伊勢史郎、「アクティブノイズコントロール」、コロナ社、pp.64-65、2006
- 11) 仲島崇博、金 慎也、井本桂右、伊勢史郎、「Active Noise Reflection Unit (ANRU)の騒音低減効果における物理的な振る舞いに関する検討」、日本音響学会誌、Vol. 65、No. 9、pp. 461-468、2009
- 12) 小松崎俊彦、畑中健介、岩田佳雄、「パラメトリックスピーカを用いた能動騒音制御（音響特性に関する実験的検討）」、日本機械学会論文集(C 編)、pp.75-82、74 巻 737 号、2008.1
- 13) 吉川 茂、藤田 肇、「基礎音響学」、講談社サイエンティフィック、p.168、2002
- 14) 西村正治、宇佐川毅、伊勢史郎、「アクティブノイズコントロール」、コロナ社、pp.74-75、2006