

4次元シミュレーションシステムの開発と現場適用

－鉄道営業線近接工事における生産性向上－

Development of 4D Simulation Systems and On-site Applications

- Productivity Improvements in Construction Work near In-service Railway Facilities -

宮田岩往* 藤原真吾** 浦田啓行***

要 旨

建設業界の働き方改革に不可欠な施工現場における週休 2 日を実現するためには、無駄のない工程管理を行うことが重要である。そこで、国土交通省による BIM/CIM および i-Construction の推進により、施工現場で急速に進んでいる 3 次元データの活用に着目し、CIM モデルと工程データを連動させた 4 次元シミュレーションシステムの開発を行った。そのうえで、実データによる開発システムの検証を行うため、鉄道営業線近接工事 2 件に適用し、狭隘なエリアでの厳しい施工条件の中で、より綿密な施工計画が求められる現場において、施工途中の手戻りを防ぎ無駄のない工程管理が実現できることを確認した。本稿では、今回開発した 4 次元シミュレーションシステムと現場適用について報告する。

キーワード：BIM/CIM、i-Construction、4次元シミュレーション、働き方改革、工程管理

1. まえがき

現在、国土交通省が主導する BIM/CIM¹⁾ および i-Construction²⁾ の推進が建設業界の大きな流れとなっており、これまで 2 次元データの図面による施工管理を行ってきた建設現場においても、3 次元データの活用が急速に進んでいる。また、政府主導の働き方改革や建設産業活性化会議の報告では、適正工期の設定や施工現場での無駄のない工程管理の実現等により、建設業における週休 2 日の実現が官民一体となって取り組むべき具体的な施策として挙げられている。

そこで、CIM と工程管理に着目し、これらを連動させる 4 次元シミュレーション³⁾ システムの開発を行った。弊社では、2014 年度から (株) パスコ (以下、パスコ) と共同で CIM 対応型の 3 次元システムの開発を行ってきた。2018 年度には、(株) ビーイング (以下、ビーイング) の協力により、CIM モデルと工程を連動させる 4 次元シミュレーションシステムの開発を行った。本稿では、この 4 次元シミュレーションシステムの概要と現場適用について報告する。

2. 4次元シミュレーションシステム

2.1 システム概要

本システムは、パスコが開発した 3 次元レーザー点群などの大容量データを表示・解析するための 3 次元データ統合ソフトウェア「PADMS」をベースにして、施工現場での CIM 用の機能をカスタマイズするとともに、工程データとの連動機能を追加したものに CIM モデルおよび工程データを連携させたものである。連動する工程管理システムは、ビーイングの「BeingProject-CCPM (以下、CCPM)」を使用し、出力される工程データと CIM モデルを関連付けることで 4 次元シミュレーションを行うものである。PADMS と CCPM は双方向のデータ連動を実現しており、CCPM で保有する休日などの情報を PADMS に組み込むことにより、実現場での工程管理への適用を目指した。システム構成の概要を図 1 に示す。

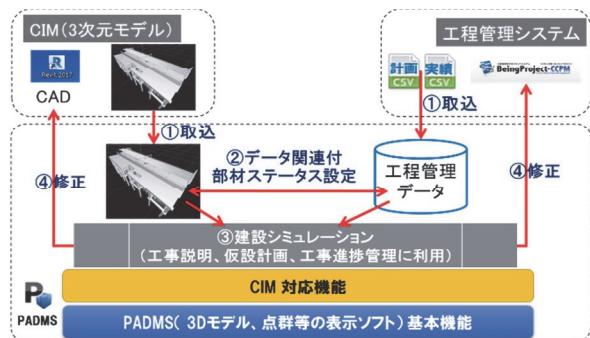


図 1 システム概要図

* ICT 統括センターイノベーション部 ** 西日本支社関西土木第 3 部 *** 西日本支社関西土木第 1 部

2.2 システムフロー

システムフローを図-2に示す。

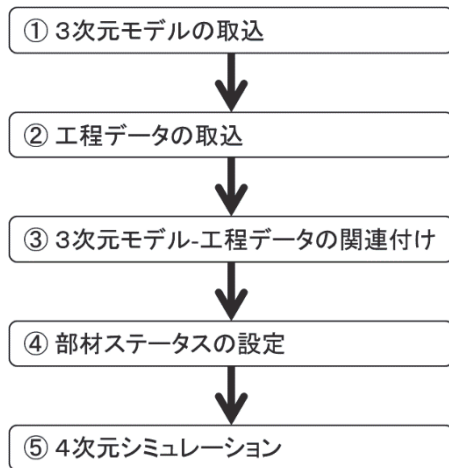


図-2 システムフロー

①3次元モデルの取込

3次元CADソフト(Autodesk Civil3D・Revitなど)で作成した3次元モデルをPADMSに取り込む(図-3)。その際、背景データとして周囲の地形モデルや現場の平面図も利用する。

②工程データの取込

CCPMで作成・出力した工程データ(CSVファイル)をPADMSに取り込むことで工程が反映される(図-4)。また、PADMSに工程データを直接入力することもできる。

③3次元モデルと工程データの関連付け

取り込んだ3次元モデルと工程データとの関連付けを行う(図-5)。

④部材ステータスの設定

4次元シミュレーションでは、工程の進捗により施工中、撤去中、完成、養生中などの状況を示す部材ステータスが変化する。これを表現するために、部材ステータスを工程に関連付けて色分けを行い、詳細な施工状況が分かるようにした(図-6)。

⑤4次元シミュレーション

①3次元モデルの取込～④部材ステータスの設定までを完了後、シミュレーションを行う。図-7に示すように、画面の上下に配置された3次元モデルと工程が連動して表示される。4次元シミュレーションを行うことで、工程に合わせた進捗状況が3次元モデル上で確認できる。また、3次元モデルによりシミュレーションすることで、施工状況を様々な角度から確認しながら工程を詳細にシミュレーションすることができる。

2.3 システムの特徴

a. 工程とCIMモデルの関連付け

工程とCIMモデルは一度関連付けを行うと、その関係性を保持できるため、施工順序や期間、名称が変更さ

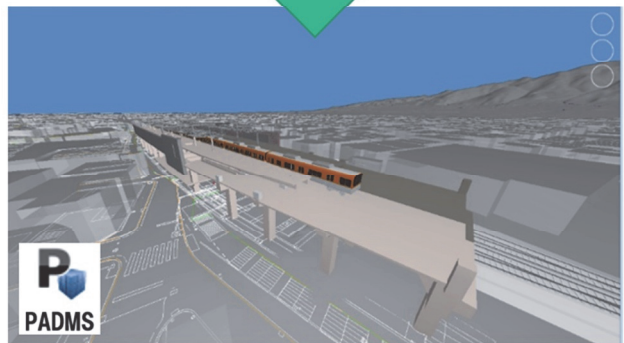
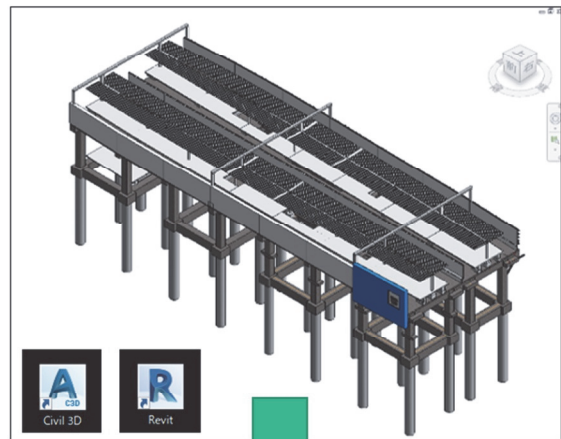


図-3 3次元モデルの取込

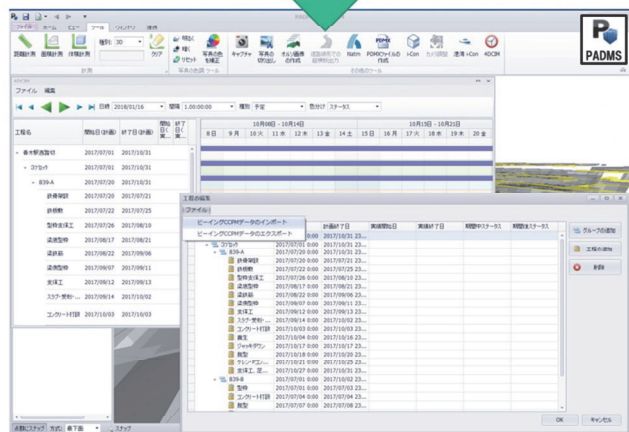
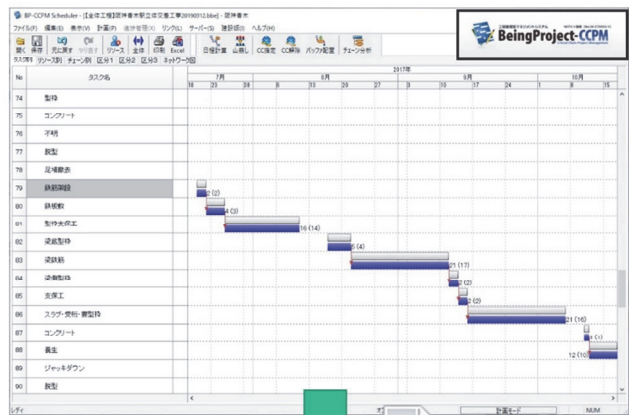


図-4 工程データの取込

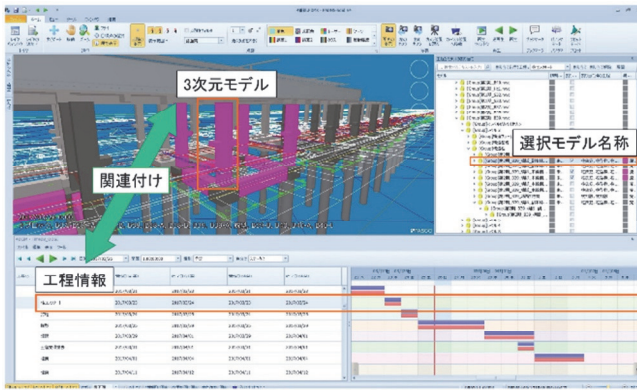


図-5 3次元モデル-工程データの関連付け

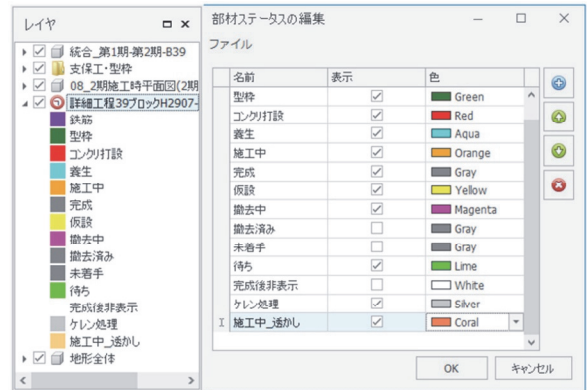


図-6 部材ステータス表示と設定

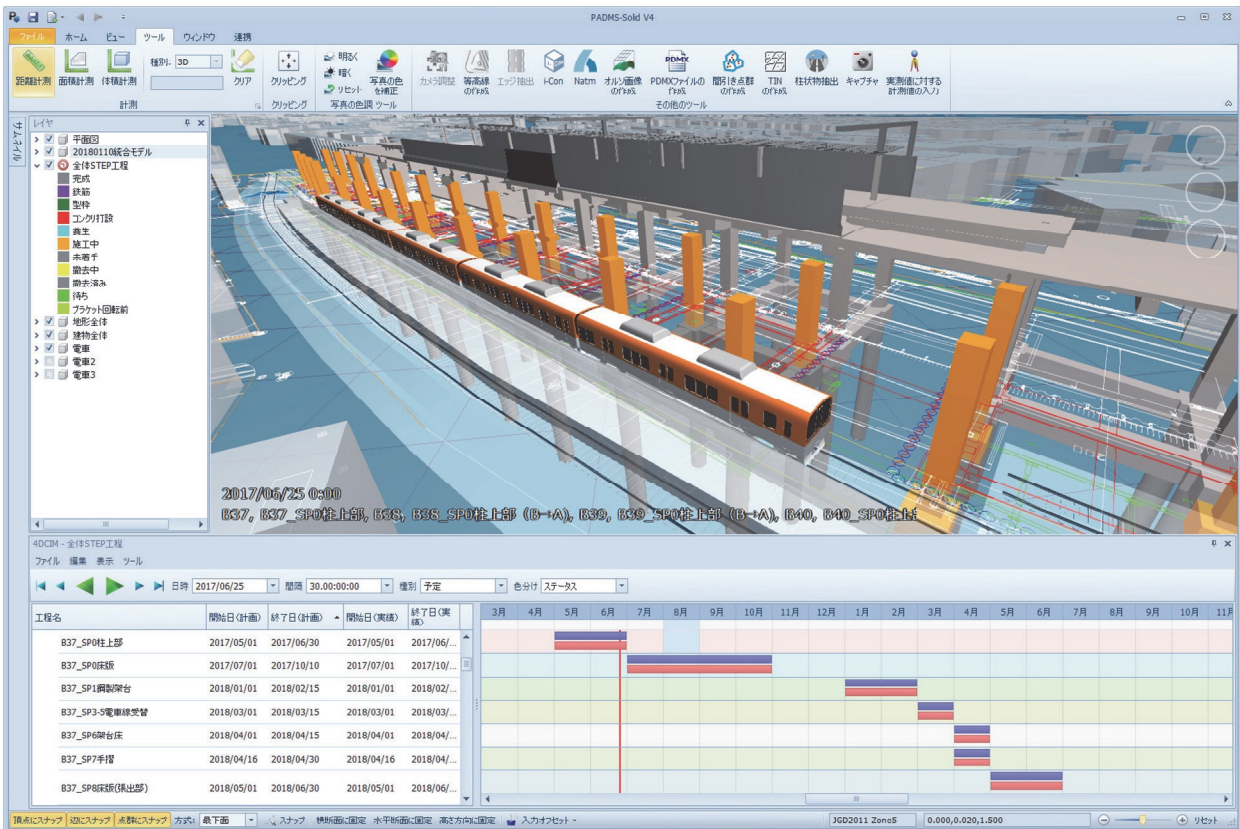


図-7 4次元シミュレーション

れても再度関連付けを行う必要はなく、繰返し4次元シミュレーションを行うことができる。

b. 部材ステータスのテンプレート化

前節 2.2④で示した部材ステータスは、現場の工種によって異なる。そのため、現場ごとの工種に合わせて、ステータスの設定情報をテンプレート化し XML ファイルに保存しておくことで、現場ごとに必要なテンプレートをインポートすることができるようにした (図-8)。

c. 仮設部材の簡易作成

CIM で作成する 3 次元モデルは、3 次元 CAD を利用して作成することが多いため、CAD オペレーターの不足や CAD 操作の難しさから時間とコストを要することが多い。そのため、本システムでは本体構造物の設計モデルは 3 次元 CAD で作成して取り込む一方、足場や型

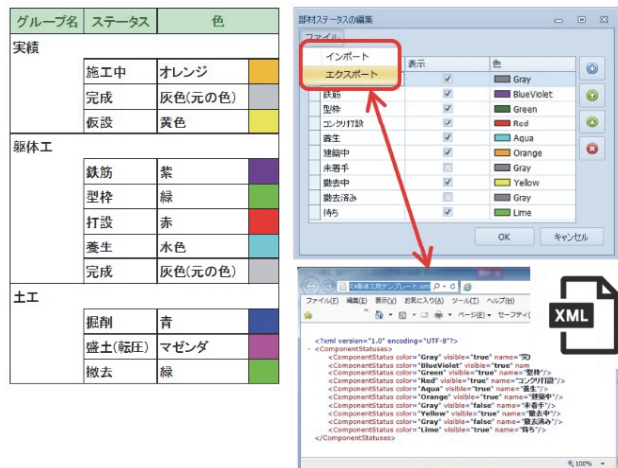


図-8 部材ステータスのテンプレート化

枠支保工などの仮設部材については、システム内で平面図を利用して簡易的に作成できる仕組みを採用した(図-9)。これにより、仮設部材を3次元CADでモデリングすることなく、本システムに組み込むことができる。

d. 工程管理ソフトとの連動による休工期等の反映

CCPM と PADMS とのデータ連携は、システムで保有する工程データと CIM モデルの部材ステータスとの関連付けの状況を CCPM と PADMS の相互に判断できるデータ構成とした。具体的には、CCPM から出力された一意のコードを含む工程データがそのまま PADMS に引き継がれる。また、PADMS 側で工程を追加する際も新たに一意のコードを含むデータが生成され、そのまま CCPM に取り込まれる仕様とした。これにより、CCPM、PADMS それぞれで工程を編集した際に、CIM モデルと工程データの関連付けが常に保持される。PADMS で 4次元シミュレーションを実施して工程を編集した場合、修正した工程を CCPM へ戻して再計算させることで、休工期やクリティカルパスを反映させることができる。また、CCPM で休工期等を反映した工程データを、再度 PADMS へ取り込むことで、休工期を反映した工程がシミュレーションできる(図-10)。

3. 現場適用

実現場のデータによる検証を行うため、駅部を含む営業線近接施工となる鉄道高架工事および鉄道本線地下化開削工事の2件の施工現場において、4次元シミュレーションの適用検証を行った。

3.1 駅部を含む営業線近接施工となる鉄道高架工事

a. 概要

当現場は、阪神電気鉄道株式会社発注の住吉・芦屋間連続立体交差事業の鉄道高架橋工事の施工現場である(表-1)。この現場では、CIM の試行を数年前から実施しており、駅舎部の CIM モデルと工程データを利用して4次元シミュレーションの適用検証を行った。

b. 実施内容

阪神青木駅付近の上り線高架化工事における一連の工程を CIM モデルと関連付けて4次元シミュレーションを実施した(図-11、12)。本工事の中で、高架化が先に完了した下り線駅舎部と、既設の営業線(上り線)駅舎部とに挟まれた狭隘なエリアでの施工となる上り線駅舎部付近の高架化工事は、新設スラブの一部が既設の営業線(上り線)の直上施工となる範囲を含む構造であるため、より綿密な施工計画が必要であった。営業線停止後の短時間に行う夜勤の線路閉鎖工事には非常に多くの工期を要するため、先に営業線直上部を除く部分のスラブを先行して分割施工し、その後、営業線直上の作業架台設置作業のみを線路閉鎖工事で行うことを検討した。作業架台設置後は、線路閉鎖工事を行う必要がないため、

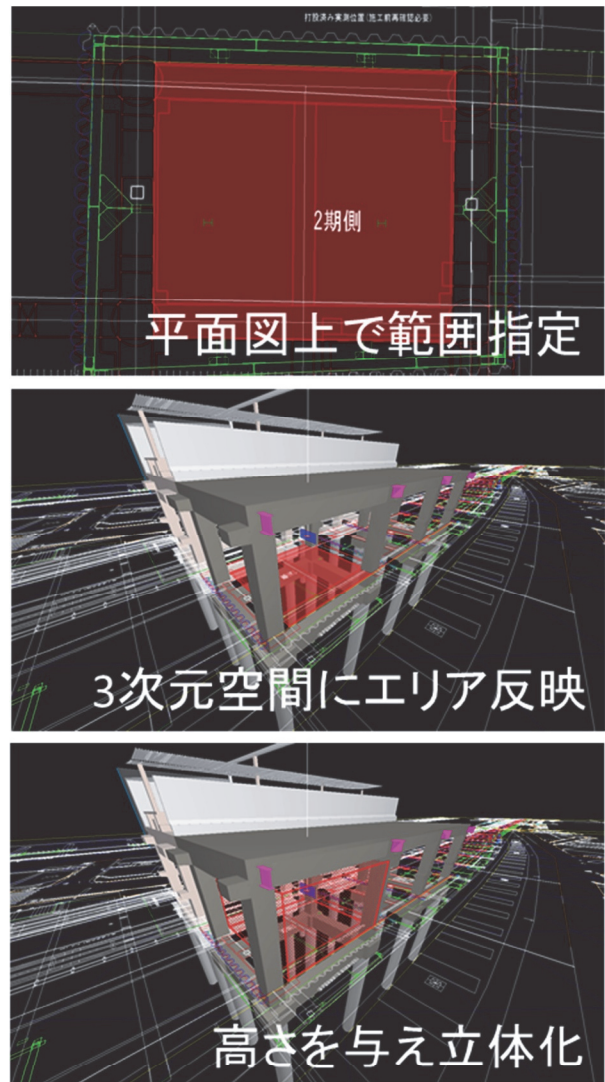


図-9 仮設部材の簡易作成

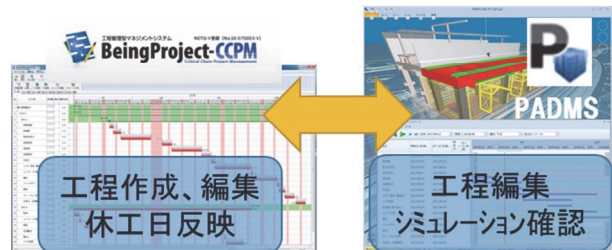


図-10 CCPM-PADMS のデータ連携

表-1 工事概要(鉄道高架工事)

工事概要	
工事名称	本線住吉・芦屋間連続立体交差工事(住吉川以東)の内土木関係主体工事第2工区
発注者	阪神電気鉄道株式会社
工事場所	兵庫県神戸市東灘区北青木4丁目付近
施工者	奥村組・銭高組・不動テトラ 特定建設共同企業体
工期	2006年07月19日～2020年03月31日
工事内容	連続立体交差工事(土木関係)一式 工事延長 L=470m(プラットホーム L=130m含む)

昼勤の線路近接工事で施工を行うことにより大幅な工期短縮が可能となる。スラブ分割施工を行うにあたり、作業架台を受けるブラケットや作業架台の設置作業の施工ステップについて4次元シミュレーションを実施し、クリティカルとなる工程である営業線直上施工の手順を詳細に検討した(図-13、14、15)。

c. 実施結果

4次元シミュレーションを行うことで、営業線直上施工を含む近接施工や輻輳作業が多い工区全体の状況を可視化・把握することができた。また、営業線直上施工の期間を短縮するためのスラブ分割施工において、より詳細・綿密な施工計画が可能となった。さらに、施工方法や工程の変更を検討する際に工程の矛盾にも気付くことができ、施工途中の手戻りを防ぎ、無駄のない工程管理が実現できた。

3.2 鉄道本線地下化開削工事

a. 概要

当現場は、JR東海道線支線地下化事業のうち、最起点側の北1工区(北区豊崎～中津・大深町の延長735m)の施工を担当しており、地上線路から地下線路へ至るアプローチ部のU型擁壁と地下鉄部のボックスカルバートを築造する工事である。

b. 実施内容

本工事は、工事延長 735m の施工区間を 35 ブロックに分割し、複数のブロックを同時に施工する工事である。そのため、施工ブロック間の取り合いや工区全体の工程を円滑に進めることを目的に、4次元シミュレーションを実施した。また、施工エリアは大阪の中心部に近いこともあり、躯体モデルと(株)ゼンリンの都市モデルとを背景モデルとして組み合わせた統合モデルとすることで、周辺環境との位置関係を分かりやすく表現した(図-16)。施工区間には、阪急神戸・宝塚・京都線および国道176号線の跨線橋の直下も含まれており、桁下高さ約6mの狭隘な作業空間で施工を行う必要がある。施工に伴う跨線橋の変位を最小に抑えつつ、跨線橋との接触事故を防止するため、施工に使用する重機のモデルを配置して4次元シミュレーションを実施し、実際の施工により近い施工計画を実施した(図-17)。

c. 実施結果

工程表と設計図面だけでは実際の施工時における問題点や施工ロスの発生を事前に見出すことが容易ではない工事であったが、4次元シミュレーションを実施することで、工区全体の施工状況を時系列で分かりやすく表現することができた。また、4次元モデルを任意の縦断面や横断面での切断が可能のため、鉄道本線の地下化開削工事において各ブロックでの細部の施工状況や重機モデルの配置状況を時系列で確認することができ、施工時の問題点や施工ロスを考慮した施工計画に有効であった(図-18、19)。

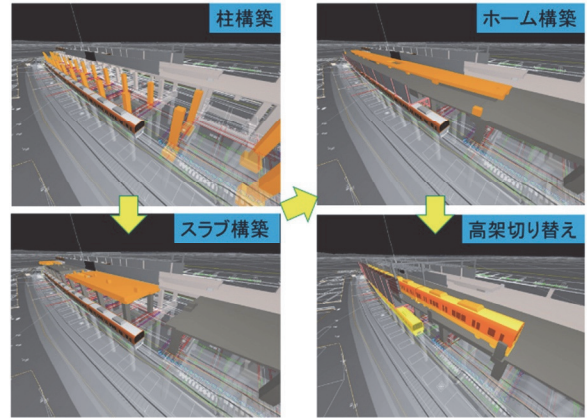


図-11 シミュレーション状況



図-12 施工状況

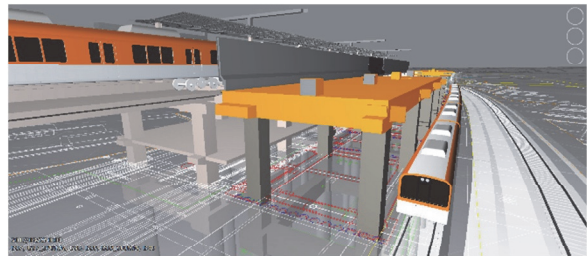


図-13 スラブ構築(直上部除く)

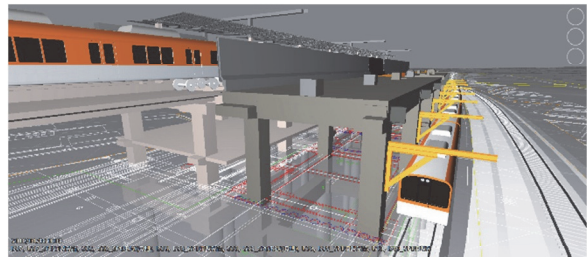


図-14 架台受けブラケット設置(直上部)

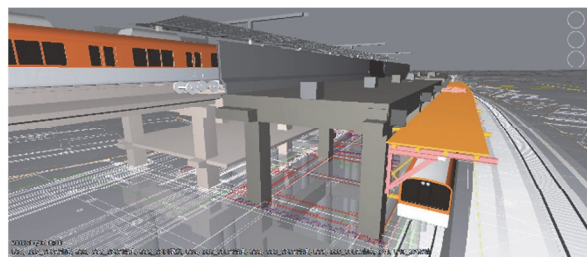


図-15 作業架台設置(直上部)

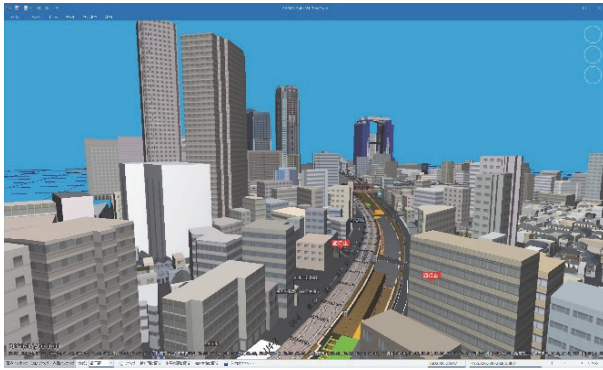


図-16 統合モデル

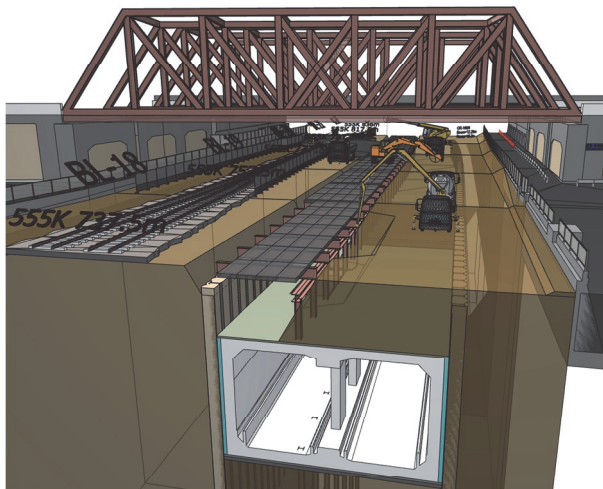


図-17 4次元シミュレーション（跨線橋下）

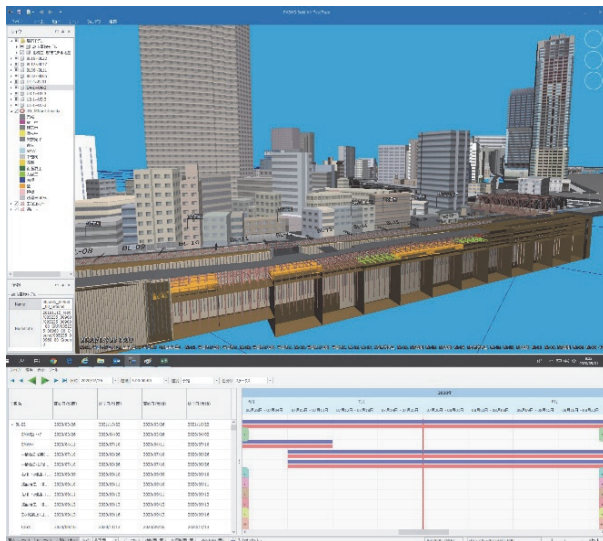


図-18 4次元シミュレーション（縦断面）

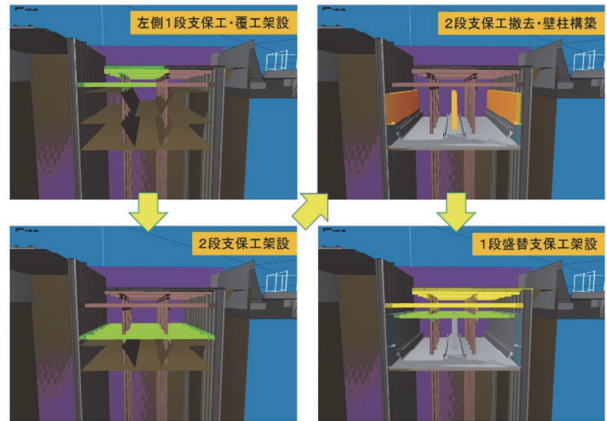


図-19 4次元シミュレーション（横断面）

4. あとがき

今回開発したシステムを施工中の2現場に適用し、4次元シミュレーションを行うことで、現場の生産性向上に有効であることが確認できた。今後は、適用現場を拡大し、様々な工種の工事への展開を進めるとともに、システムをブラッシュアップさせ、より生産性向上に役立つシステムを目指していく。また、4次元シミュレーションをスムーズに運用していくため、モデル化の外注を含めた運用体制を確立していく。さらに今後は、CIMモデル、工程データにコスト情報などの属性情報を加えた5次元シミュレーションシステムの実現に向けた検討も行っていく。

【参考文献】

- 1) 国土交通省、「発注者における BIM/CIM 実施要領（案）」、pp.1-24、2020.3
- 2) i-Construction 委員会、「i-Construction ～建設現場の生産性革命～」、pp.8-13、2016.4
- 3) BIM/CIM 推進委員会、「今後の BIM/CIM 運用拡大に向けた整理」、pp.6-24、2019.4

温度変化が軟弱粘性土の変形特性に及ぼす影響

－コンシステンシーの変化と圧密の関係－

Effects of Temperature on the Consolidation and Consistency of Clayey Soil

- Consideration of Elemental Experiments Using Various Clayey Soil -

小河篤史* 大塚義一** 白石祐彰***

要 旨

本研究では、再生可能エネルギーを活用した軟弱粘土地盤の改良工法を開発するため、地盤温度の変化が粘土の圧密特性とコンシステンシーに与える影響に着目した。地盤温度の上昇によって粘性土の圧密が促進されることはすでに知られているが、温度効果の程度は粘土種類によって異なり、一般化には至っていない。そこで、本研究では、2種類の工業粘土と港湾で浚渫された3種類の天然粘土を使用し、温度条件を変化させて室内実験を行い、圧密現象の温度依存性を追究した。1次元圧密試験の結果、いずれの粘土においても温度上昇とともに圧密係数が増加することが確認され、その要因は温度上昇にともなう間隙水の粘性低下が支配的であることが示唆された。また、土壌の液性限界試験および塑性限界試験の結果、温度変化が土壌のコンシステンシーに与える影響は粘土の種類によって異なるものの、そこから求められる活性度と圧密試験で得られる圧密係数の間には高い相関関係が示された。

キーワード：圧密、コンシステンシー、温度効果、圧密促進工法、軟弱粘性土

1. まえがき

近年、地球温暖化の影響、地下構造物からの熱の排出、地下ヒートポンプシステムの導入により、都市部の地温が上昇していることが指摘されている。これまでわが国では、地下10m以深の地盤温度は、年間を通して15～20℃程度で安定しているとされていた。このため、地盤や地下水の温度変化によって生じる物理的、化学的、生物学的な影響については、それほど多くの研究がなされていない。しかし近年、脱炭素社会の実現に向けて再生可能エネルギーの積極的な利用が求められていることから、地中熱ヒートポンプシステムをはじめとする地中熱利用が促進されることによって、地盤の温度変化がさらに顕著になることが予想される。そのため、温度変化によって生じる地盤の様々な挙動を追究することの重要性が高まっている。

地盤の物理的、化学的、生物学的特性が温度変化の影響を受けることは古くから知られている。なかでも、粘土の圧密においては、土粒子と間隙水の体積、間隙水の粘性、土壌粒子表面と間隙水の界面作用が温度変化の影響を受けることで、圧密沈下量や圧密速度も変化するこ

とが報告されている¹⁾⁴⁾。また、このような温度効果を利用して軟弱粘土地盤の圧密を促進する地盤改良法も提案されているが⁵⁾⁶⁾、地盤の加熱は大量のエネルギーを必要とするため加熱設備等の整備が高コストになるといった課題があり、いまだ実用化には至っていない。しかし、太陽熱などの再生可能エネルギーを利用することで、商用電源を利用するよりも経済的に地盤の温度を高められる可能性もあることから、本研究では、未利用熱を活用した新たな圧密促進工法の実現可能性を検討した。温度効果を利用した圧密促進法を開発するためには、粘性土の圧密現象における温度依存性を評価する必要があるが、既往の研究では、加熱による影響の度合いは粘土の種類によって異なるとされており、一般化されていない。圧密現象の温度依存性を一般化することができれば、圧密促進工法の開発だけでなく、地中熱ヒートポンプ導入時や地中蓄熱における地盤変形シミュレーションにも利用できる等、地中熱利用促進に大きく寄与することができる。本研究では、様々な種類の粘土を用いて温度条件を変化させて実験室実験を行うことにより、土壌のコンシステンシーと圧密の温度依存性を確認し、両者の関係を評価した。

*土木本部環境技術室 **営業本部 ***技術研究所環境研究グループ

表－1 使用材料の基本物性

	工業粘土		自然粘土 (港湾浚渫土)		
	カオリン粘土	笠岡粘土	大阪湾粘土	門司港粘土	徳山港粘土
土粒子密度 (g/cm ³)	2.601	2.675	2.621	2.641	2.580
塑性限界 (PL) (%)	30.2	24.6	39.2	32.4	37.0
液性限界 (LL) (%)	77.0	58.5	101.2	120.9	120.8
塑性指数 (PI)	46.8	33.9	63.0	88.5	83.8
2 μm 以下の粒子の割合 (%)	92.4	43.1	57.0	54.5	50.3
活性度	0.51	0.79	1.11	1.62	1.67
強熱減量 (%)	12.1	2.7	8.2	—	8.6
スメクタイト含有量 (%)	<3.0	36.0	9.4	—	15.0
主要鉱物	SiO ₂ 46.6 %	SiO ₂ 66.2 %	SiO ₂ 58.2 %	—	SiO ₂ 58.5 %
	Al ₂ O ₃ 38.3 %	Al ₂ O ₃ 19.3 %	Al ₂ O ₃ 14.5 %	—	Al ₂ O ₃ 16.3 %
	Fe ₂ O ₃ 0.85 %	Fe ₂ O ₃ 5.9 %	Fe ₂ O ₃ 6.7 %	—	Fe ₂ O ₃ 6.1 %
	CaO 0.05 %	CaO 1.2 %	CaO 4.3 %	—	CaO 2.5 %
	K ₂ O 0.24 %	K ₂ O 3.0 %	K ₂ O 2.1 %	—	K ₂ O 2.5 %
	MgO — %	MgO 0.51 %	MgO 2.1 %	—	MgO 2.4 %
	SO ₃ 0.16 %	SO ₃ 0.08 %	SO ₃ 1.9 %	—	SO ₃ 1.0 %
	Others 13.8 %	Others 3.81 %	Others 10.2 %	—	Others 10.7 %

2. 使用材料と実験方法

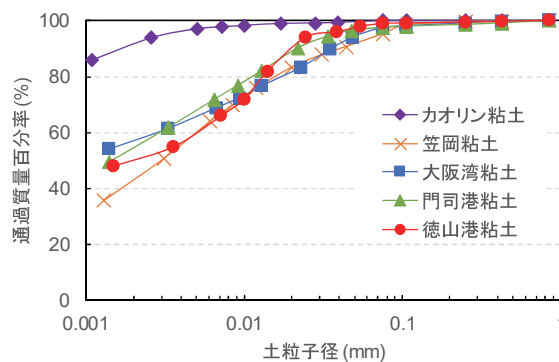
2.1 使用材料

本研究で使用した試料は、市販の工業粘土であるカオリン粘土 (ASP200、BASF Corporation)、笠岡粘土 (橋マテリアル株式会社)、および港湾浚渫粘土である大阪湾粘土、門司港粘土、徳山港粘土である。表－1に、各粘土の基本物性を示す。門司港粘土は、試料の量が限られていたため、強熱減量試験、スメクタイト含有量測定および鉱物組成試験を実施していない。

今回使用した材料は、室温条件におけるコンシステンシー特性が大きく異なった。液性限界は最も低い笠岡粘土で 58.5 %、最も高い門司港粘土で 120.9 %であった。同じ工業粘土でもカオリン粘土と笠岡粘土では液性限界が 20 ポイント程度、浚渫粘土でも大阪湾粘土とそれ以外の浚渫粘土では同じく液性限界が 20 ポイント程度異なった。一方、塑性限界試験の結果は、液性限界と比べると相対的に狭い範囲に収まっており、結果的に試料毎に塑性指数が異なった。

本研究では、粘土の界面作用の大小が圧密現象に及ぼす可能性が考えられることから、使用材料のスメクタイト含有量を確認した。スメクタイト系鉱物の代表的なものとしてモンモリロナイトがよく知られている。モンモリロナイトを多く含むベントナイトは一般的に比表面積が大きいため、粒子と間隙水の界面作用も大きく水と接して膨潤し、透水係数を大きく低下させることから遮水材等として利用されている。スメクタイト含有量測定の結果、笠岡粘土、大阪湾粘土、徳山港粘土には膨潤性スメクタイトが含まれることが確認され、なかでも笠岡粘土はスメクタイト含有量が 36 %と最も高く水和による膨潤の可能性が考えられる。一方、カオリン粘土のスメクタイト含有量は、定量下限値よりも低かった。

図－1に使用材料の粒度分布を示す。カオリン粘土は



図－1 使用材料の粒度分布

粒径 2 μm 以下のコロイド分を最も多く含んでいるが、塑性指数が低く不活性粘土であることがわかる。カオリン粘土以外の粘土は同様の粒度分布を示しており、それらの活性度はカオリン粘土と比べると笠岡粘土で 1.5 倍程度、大阪湾粘土で 2.0 倍程度、門司港粘土および徳山港粘土では 3.0 倍程度となり、自然粘土のほうが工業粘土よりも活性が高かった。

鉱物組成分析の結果、いずれの粘土も SiO₂ と Al₂O₃ が主であることに変わりはないが、カオリン粘土以外では、Fe₂O₃、CaO、K₂O が数%程度含まれることが確認されており、自然粘土は工業粘土と比較すると SiO₂ と Al₂O₃ 以外の割合が高かった。

2.2 実験方法

a. 液性限界試験と塑性限界試験

液性限界試験と塑性限界試験は、所定温度 (10°C、23°C、35°C、50°C) の恒温室内で JIS A 1205:2009 に準拠して実施した。このとき、試験に供する材料や試験装置は試験温度に調整された恒温室内で 12 時間以上静置した。また、試験開始時および試験中には粘土の温度を測定し、予め定めた温度になっていることを確認した後

b. 圧密試験

圧密試験は、図－2に示す装置を用い JIS A 1217:2009

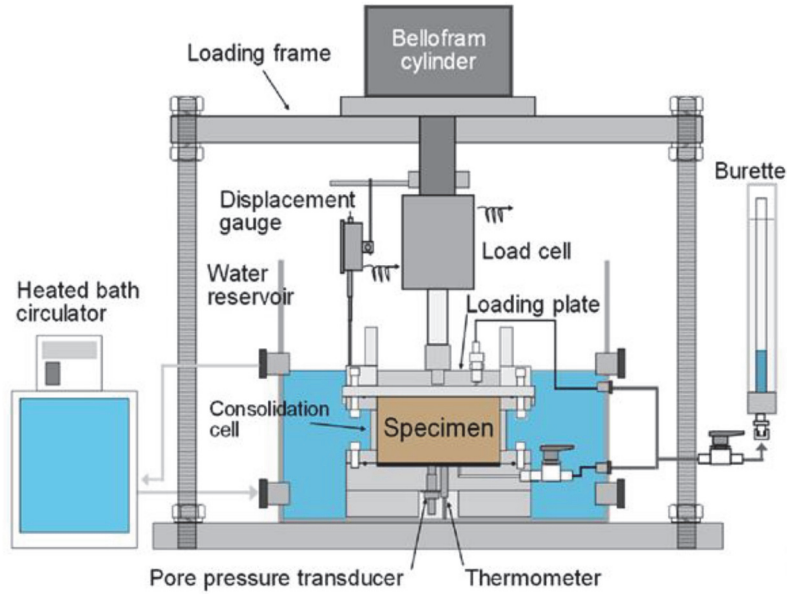


図-2 加温圧密装置

表-2 圧密供試体の初期条件

	湿潤密度 (g/cm ³)	飽和度 (%)	初期間隙比
カオリン粘土	1.44	94.4	2.38
笠岡粘土	1.55	94.2	1.86
大阪湾粘土	1.39	99.1	3.10
門司港粘土	1.35	99.6	3.64
徳山港粘土	1.35	99.7	3.51

に準拠して実施した。わが国の浚渫粘土の含水比は、液性指数が 1.0 以上になることも多いことが示されているため、各試料の初期含水比を液性限界の 1.1 倍に調整した。含水比を調整した後の試料を直径 10 cm、高さ 5 cm の円筒型セルに充填し、側方からハンマーで軽く打撃を与えて密実度を高めて供試体とした。試験開始時の供試体の湿潤密度、飽和度、初期間隙比を表-2 に示す。载荷はペロフラムシリンダーによって行い、圧密圧力は増加率 2 で 4.9~628 kPa とした。試験中の供試体温度は、円筒型セルを浸漬した浴槽内の水温によって制御し、各粘土とも 17℃、23℃、35℃、50℃、65℃ の一定温度で試験を行った。

3. 温度変化がコンシステンシーに及ぼす影響

図-3 に液性限界、塑性限界と温度の関係を示す。浚渫粘土である徳山港粘土と大阪湾粘土では、温度の上昇とともに液性限界に低下傾向がみられた。一方、工業用粘土のカオリン粘土と笠岡粘土では、液性限界は温度の影響を受けず、10~50℃ の範囲で概ね一定であった。塑性限界は、いずれの粘土においても温度変化によって大きな変化は確認できなかった。Jefferson ら⁸⁾ は、工業粘

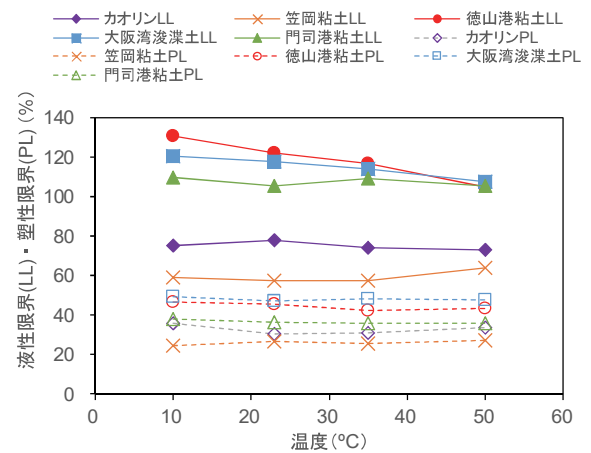


図-3 温度とコンシステンシーの関係

土であるカオリン粘土と Na 型ベントナイトを用いて 10~80℃ の範囲でフォールコーン試験法を用いて液性限界の変化を調べた結果、カオリン粘土は温度によって液性限界は変化しないが、Na 型ベントナイトは温度上昇にともなって液性限界が上昇することを報告しており、カオリン粘土の結果においては本研究と一致した。

本試験では、徳山港粘土と大阪湾粘土の液性限界のみが温度変化の影響を受ける結果となった。このとき、温度上昇に起因する間隙水の粘性低下に起因して粘土の液性限界が低下するのであれば、全ての粘土で温度上昇にともなって液性限界が低下するはずである。また、温度変化にともなう土粒子や間隙水の体積変化には差がないと考えられるため、徳山港粘土と大阪湾粘土のみで温度変化によって液性限界が変化した原因としては、温度変化によって間隙水と土粒子の界面作用に変化が生じ

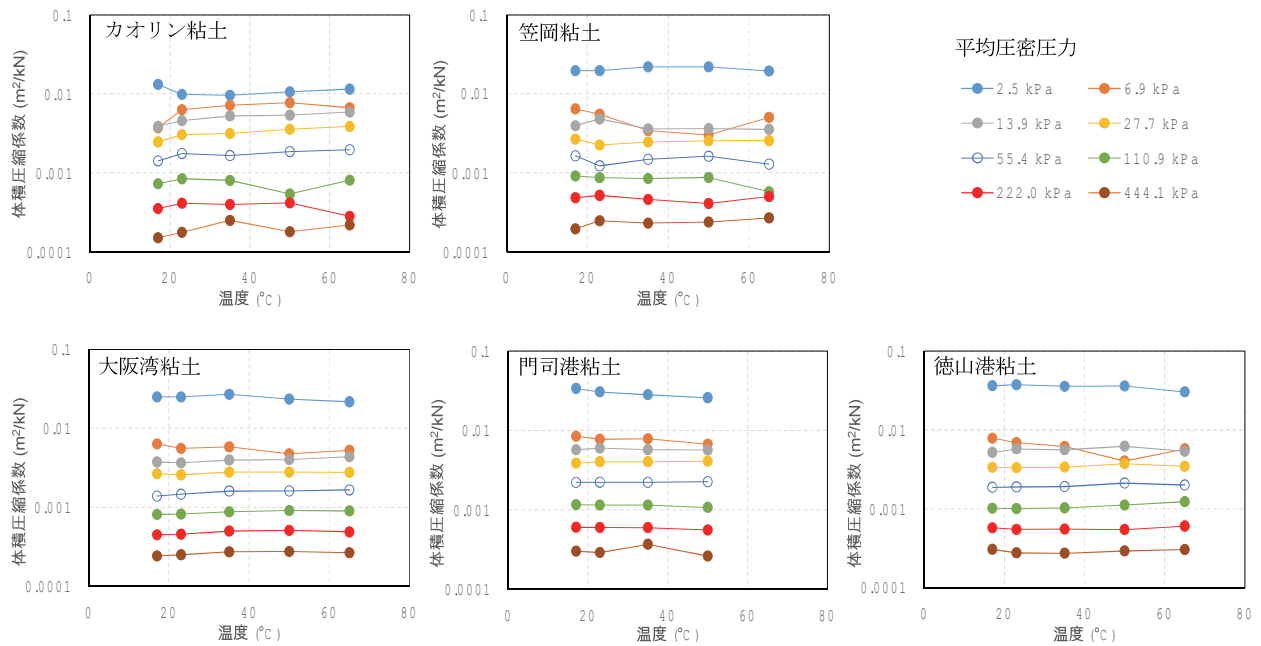


図-4 温度と体積圧縮係数の関係

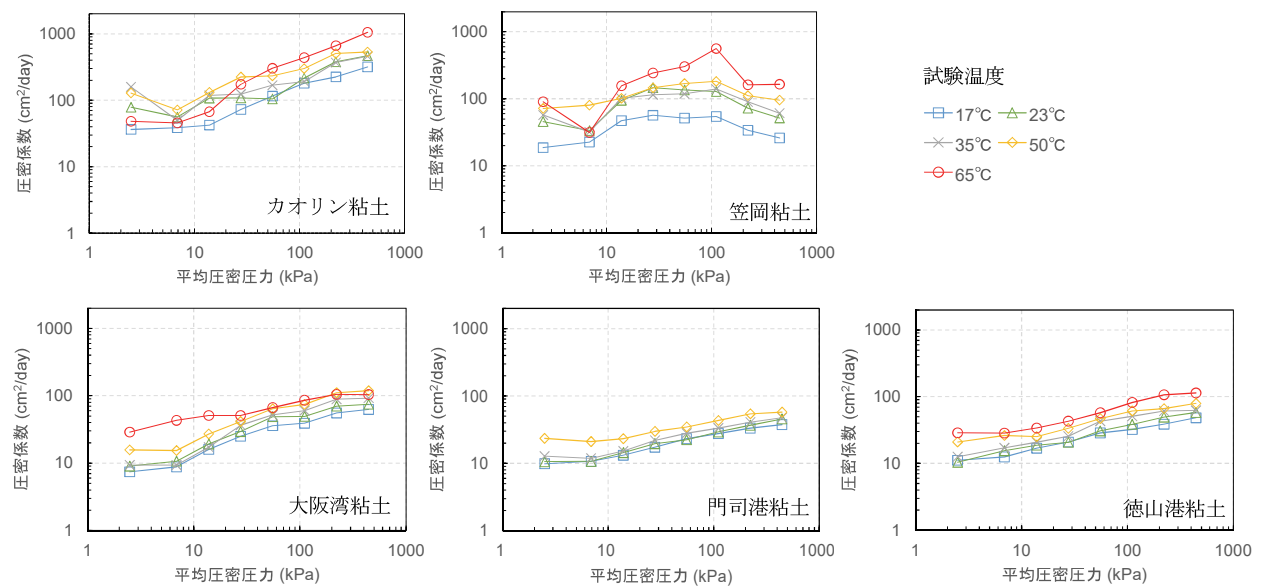


図-5 圧密圧力と圧密係数の関係

たことや、間隙水中への物質の溶解（例えば、陽イオンであるマグネシウムイオンやカリウムイオン）、海水由来の間隙水溶存成分の析出（例えば、炭酸カルシウム）等が考えられる。このように考えれば、そもそも間隙水量が少ない塑性限界試験において、塑性限界に温度依存性が確認できないことも説明できる。

4. 温度変化が圧密特性に及ぼす影響

4.1 圧縮特性と温度

図-4 に温度と体積圧縮係数の関係を示す。いずれの

粘土においても温度変化と体積圧縮係数には明確な関係性は見いだせなかった。工業粘土では温度の違いにより若干のばらつきが確認されたもののその変化に規則性はみられず、浚渫粘土では温度変化によらず概ね一定値であった。一方、圧密圧力と体積圧縮係数には各粘土に共通の傾向が確認され、圧密圧力が大きいほど体積圧縮係数は小さくなり、平均圧密圧力が 13.9 kPa 以上になると粘土の種類によらず体積圧縮係数はほぼ同様の値となった。したがって、粘性土の体積圧縮係数は、粘土の種類や温度変化の影響を受けず、圧密圧力に依存してその値が変化するといえる。

4.2 圧密速度と温度

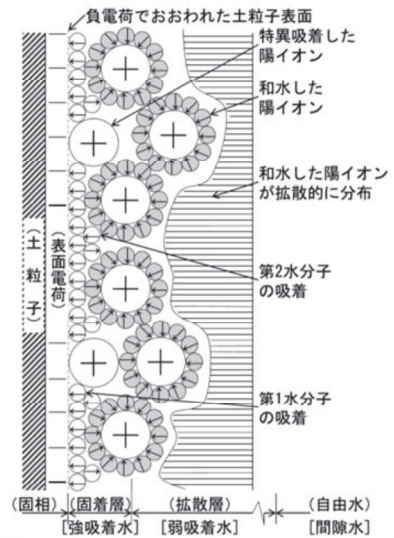
図一五に各粘土の圧密圧力と圧密係数の関係を示す。圧密係数は、笠岡粘土以外では2段階目の载荷以降、圧密圧力の増加とともに増加傾向を示した。これは、载荷圧力が増加すると土粒子の構造が密になろうとするが、その空隙は間隙水で満たされているため、透水性の低い粘性土では载荷初期の荷重を間隙水が受け持つため間隙水圧が高くなり、結果として動水勾配が大きくなって排水が促進されたものと考えられる。笠岡粘土では、平均圧密圧力 111 kPa までは他の粘土と同様の傾向を示したが、それよりも圧力が大きくなると圧密係数が低下した。これは、笠岡粘土に多く含まれる膨潤性のスメクタイト鉱物の影響が考えられる。土粒子は、その表面電荷によって水分子を吸着し、この吸着水の層は拡散電気二重層と呼ばれ通常は移動しないため、この部分は間隙水の排水には寄与しない(図一六)。スメクタイト鉱物は、他の粘土鉱物と比べると比表面積が大きく表面電荷が高いため、拡散電気二重層が厚く形成されるという特徴を有する。したがって、圧密圧力が小さいうちは、土粒子間の隙間も大きく過剰間隙水圧の上昇により排水が促進されるが、圧密圧力が大きくなり土粒子同士の距離が一定以上に近づくと、単純に土粒子によって空隙が狭まるだけでなく、土粒子周囲の拡散電気二重層の影響で透水に寄与する有効間隙が減少することで排水速度が低下し、圧密係数も低下したと推察される。大阪湾粘土や徳山港粘土もスメクタイトを含有するが、これらの浚渫粘土は既に海水中の陽イオンに長期間曝露されることによって電気的平衡状態にあり、試験中の温度変化によって拡散電気二重層の層厚が変化するほどの影響を受けず、工業粘土である笠岡粘土とは挙動が異なったものとする。

図一七に圧密係数と温度の関係を示す。縦軸は、各温度の各载荷段階(4.9~628 kPaの8段階)で得られた圧密係数の平均値と17°Cのときの圧密係数の平均値の比である。任意温度における圧密係数は式(1)によって計算できる。このとき、体積圧縮係数は4.1節で示したように温度依存性がないことから計算上は無視できる。したがって、任意温度の圧密係数と17°Cの圧密係数の比(c_{vt}/c_{v17})は式(2)のように表される。

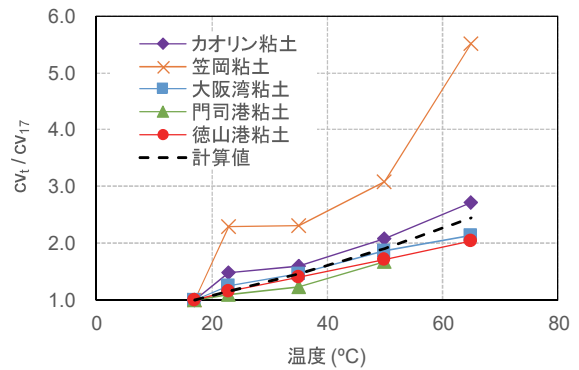
$$c_v = \frac{k}{m_v \gamma_w} \quad (1)$$

$$\frac{c_{vt}}{c_{v17}} = \frac{k_T/k_{17}}{\gamma_{wT}/\gamma_{w17}} \quad (2)$$

ここで、 C_v : 圧密係数、 C_{vt} : T°Cにおける圧密係数、 C_{v17} : 17°Cにおける圧密係数、 γ_w : 水の単位体積重量、 γ_{wT} : T°Cにおける水の単位体積重量、 γ_{w17} : 17°Cにおける水の単位体積重量、 k : 透水係数、 k_T : T°Cにおける透水係数、 k_{17} : 17°Cにおける透水係数、 m_v : 体積圧縮係数である。17°Cの透水係数は、式(3)のように求めら



図一六 土粒子・水界面のイオン・水分子吸着水の模式図⁹⁾



図一七 圧密係数の温度依存性の度合い

れ、これを式(2)に代入して得られる式(4)で c_{vt}/c_{v17} が計算できる。

$$k_{17} = k_T \times \frac{\eta_T}{\eta_{17}} \quad (3)$$

$$\frac{c_{vt}}{c_{v17}} = \frac{\eta_{17}/\eta_T}{\gamma_{wT}/\gamma_{w17}} \quad (4)$$

ここで、 η_T : T°Cにおける水の粘性係数、 η_{17} : 17°Cにおける水の粘性係数である。任意の温度T°Cにおける水の粘性係数は、Hillelの提案する式(5)¹⁰⁾で求められる。

$$\eta_T = -0.00046575 \cdot \ln T + 0.00239138 \quad (5)$$

計算から得られた圧密係数比は、23°C、35°C、50°C、65°Cのとき、それぞれ1.15、1.46、1.90、2.44となり、笠岡粘土以外では23~65°Cの範囲で実験値とよく一致した。温度変化にともなう水の密度変化は粘性係数の変化と比較して相対的に小さいことから、圧密係数が温度によって受ける影響は、間隙水の粘性係数の変化が支配的であることが確認できた。

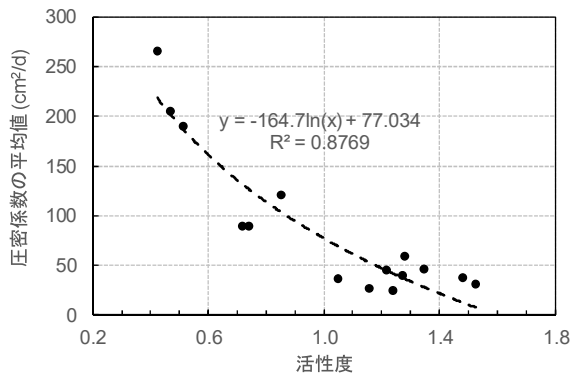


図-8 活性度と圧密係数の関係

図-8に活性度と圧密係数の関係を示す。活性度は、土粒子表面における物理的吸着や化学的結合の傾向の強さを表すもので、式(6)¹¹⁾によって計算できる。

$$A = \frac{I_p}{F_{2\mu m}} \quad (6)$$

ここで、 A ：土の活性度、 I_p ：塑性指数、 $F_{2\mu m}$ ：2 μm 以下の土粒子の割合(w%)である。なお、図-8では、コンシステンシー試験と圧密試験の温度条件が一致する23°C、35°C、50°Cの結果をプロットしている。図より、活性度と圧密係数には強い相関が示された。圧密係数は活性度が増加するにつれて低下し、活性度が小さいほど圧密係数の減少量は大きく、活性度が1.0以上になると粘土の種類によらず同程度に収束した。高活性の粘土は、一般的にその表面電荷が高く拡散電気二重層が比較的厚く形成されるため、有効間隙が小さくなり排水性が低下し、圧密係数が低下するものと考えられる。

5. あとがき

本研究では、市販の工業粘土および港湾浚渫土に対し、17°C~65°Cまでの異なる温度条件下で土のコンシステンシー試験および一次元圧密試験を実施し、粘土の圧密特性に及ぼす温度の影響を評価した。本研究の主な成果は以下のとおりである。

- i. 体積圧縮係数は、粘土の種類によらず温度変化の影響が小さく、圧密圧力に依存してその値が変化することを確認した
- ii. 圧密係数は、粘土の種類によらず温度上昇を受けて増大し、その上昇の割合は水の粘性係数の変化の影響を大きく受ける
- iii. 地盤温度を17°Cから35°Cまで加熱すると、圧密速度は約1.5倍になることから、加熱圧密工法の有効性が示された
- iv. 活性度と圧密係数平均値との間に高い相関関係が確認できたことから、圧密速度は簡易な物理試験により推測し得ることが示された

今後は、温度変化による間隙水の性状変化が界面作用

に及ぼす影響等を調べ、加温圧密メカニズムをさらに詳細に追求する。また、それらの知見から加温圧密工法の実サイトへの適用性を検討したい。

【参考文献】

- 1) Abuel-Naga, H.M., Bergado, D.T., Bouazza, A., and Ramana, G.V., "Volume change behaviour of saturated clays under drained heating conditions: experimental results and constitutive modeling", *Canadian Geotechnical Journal*, 44(8), 942-956, 2007
- 2) Mon, E.E., Hamamoto, S., Kawamoto, K., Komatsu, T., Moldrup, P., "Temperature effects on geotechnical properties of kaolin clay: simultaneous measurements of consolidation characteristics, shear stiffness, and permeability using a modified oedometer", *GSTF Int. J. Geol. Sci.*, 1(1), 1-10, 2013
- 3) Towhata, I., Kuntiwattanaku, P., Seko, I., Ohishi, K., "Volume change of clays induced by heating as observed in consolidation tests", *Soils Found.*, 33(4), 170-183, 1993
- 4) Towhata, I., Kuntiwattanaku, P., and Kobayashi, H., "A preliminary study on heating of clays to examine possible effects of temperature on soilmechanic properties", *Soils and Foundations*, Vol. 33, No. 4, pp. 184-190, 1993
- 5) K. Adachi, M. Murakami, "Consolidation Mechanism of Clayey Ground Under Heated-Drain Consolidation", *Proc. Jpn. Soc. Civ. Eng.*, 596, pp.39-48, 1998
- 6) Pothiraksanon, C.P., Bergado, D. T., Abuel-Naga, H. M., "Full-scale embankment consolidation test using prefabricated vertical thermal drains", *Soils Found.*, 50(5), 599-608, 2010
- 7) 水野健太、土田 孝、近井玲子、松永康司、「杭間粘土の応力履歴を考慮した低置換率 SCP 改良地盤の有限要素解析」、土木学会論文集 C、Vol.64、No.3、pp.550-564、2008
- 8) Jefferson, I., and Rogers, C. D. F., "Liquid limit and the temperature sensitivity of clays", *Engineering Geology*, Vol. 49, No. 2, pp. 95-109, 1998
- 9) 嘉門雅史、浅川美利、「土木学会編・新体系土工学 16 土の力学 (I) ~土の分類・物理化学的性質~」、技法堂出版、p. 62、1988
- 10) Hillel, D., "Fundamentals of Soil Physics, Academic Press", New York, 1980
- 11) Skempton, A.W., "The colloidal activity of clay", *Proceedings of the Third International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Vol. I, pp. 57-61, 1953

統合分析による下水道分野の 維持管理事業方式の検討手法

Examination of Integrated Analysis

to Evaluate Sewage Maintenance Management Business Methods

池田 元* 山口 治* 柴田憲一**

要 旨

我が国の下水道施設は、高度経済成長期以降、急速に整備が進められてきたことにより、一斉に更新時期を迎えるため、計画的な改築や更新を行うことが重要な課題となっている。解決の手法の一つとして、民間事業者が公共施設等の維持管理運営を行う PPP/PFI 事業の推進が推奨されているが、これまでに管路施設を含んだ包括的事業の実事例は少ない。その主な理由としては、委託者、受託者だけでなく、利害関係者（ステークホルダー）が非常に多いため、全関係者に有効で有益な事業スキームの構築に多大な時間と労力を要することが挙げられる。そこで本研究は、事業スキーム構築にあたり、初期段階の検討手法を確立することを目的とする。個々の地方公共団体が管理する下水道事業の現状を踏まえて、民間事業者の関与の程度が異なる 3 つの事業方式を選定し、既存の統合分析表を用いてステークホルダーごとの利益を定量的に算定し、比較した。その結果、検討手法の簡便性、有用性を確認することができた。

キーワード：下水道施設、老朽化、維持管理手法、PPP/PFI 事業、統合分析

1. まえがき

我が国の下水道施設は、高度経済成長期以降、都市化の進展や産業の急速な発達に伴う衛生問題および水環境問題を解決するため、急速に整備が進められてきた。その結果、大量の施設のストックを短期に集中して抱えることとなり、耐用年数を超えた施設が同時期に更新時期を迎えることから、その対策が急務となっている。また、管理者である地方公共団体等が抱える課題として、少子高齢化・人口の減少による下水道使用料の減少と下水道事業予算の削減、職員の人材・人員不足による執行体制の脆弱化、および技術力の低下が深刻化していることが挙げられる。

これらの課題が顕在化するなか、効率的・経済的で持続可能な維持管理運営体制の構築が求められており、先進的な地方公共団体では包括維持管理事業を展開する事例が見られる。

課題解決の取り組みとして、国土交通省は、2019 年 3 月に「下水道事業における公共施設等運営事業等の実施に関するガイドライン」²⁾の改訂を行い、下水道分野における PPP/PFI 事業の実施を推進するため、下水道管理者および民間事業者が取り組むべき事項を示した。同ガ

イドラインの PPP/PFI 事業に期待する効果は、下水道管理者に対しては、業務執行のための人員等の強化や適正な事業運営を行う体制の強化、民間ノウハウを活用した事業の効率化としている。一方、民間事業者に対しては、管路の維持管理を軸に迅速な老朽化対策や投資に創意工夫を促し、その対価として利益を享受することとしている。

内閣府は、毎年とりまとめる「PPP/PFI 推進アクションプラン」³⁾において、重点分野の一つとして下水道を挙げているが、2014~2017 年までの集中強化期間中の数値目標 6 件のうち、実施方針の対策完了済みは 2 件にとどまっている。その理由の一つとして、地方公共団体である管理者（委託者）や主に民間企業で構成される事業者（受託者）だけでなく、市民等の受益者、事業への融資者等多くの利害関係者（ステークホルダー）にも有効で有益な事業スキームの構築が必要であり、そのために時間と労力が費やされることが挙げられる。

そこで本研究は、事業スキーム構築にあたり、初期段階における簡便な検討手法を確立することで、地方公共団体が PPP/PFI 事業への検討を進めやすくすることを目的とした。検討手法の手順として、第 1 に、維持管理方式と契約形態の違いや民間事業者の関与の程度が異なる

* 東日本支社リニューアル技術部 ** 投資事業開発本部新事業開発部

3つの事業方式を選定し、従来型手法と合わせて4種の検討を行うこととした。第2に、実在する都市をモデルケースとして、各ステークホルダーの利益を既存の統合分析手法を用いて可視化し、事業方式別に集計した。第3に、それぞれの事業方式に作成した統合分析を比較することにより、事業方式の違いによる特徴を整理した。

2. 既往研究

2.1 既往研究のレビュー

国土交通省は、「下水道における新たなPPP/PFI事業の促進に向けた検討会⁴⁾」を開催し、下水道分野の官民連携についての検討を進めている。明尾ら⁵⁾は、下水道管路施設の官民連携スキームに関して、事業導入時における官民連携のリスク分担検討の必要性や、道路管理者と連携したデューデリジェンス調査の可能性について論じている。

宮本、北詰⁶⁾は、道路インフラにおけるPFI事業スキームの検討手法として統合分析手法を提案している。事業評価および事業スキームの検討においては、経済分析、財務分析、融資分析、財政支出分析の4つの視点を満足する必要があるとし、ステークホルダー間の受益と負担が相互に関連するため、統合して分析を行うことからこれらをまとめて「統合分析」と称している(図-1)。

(単位:10億円)

項目	主体	事業者	融資者	利用者	沿道立地者	社会	地主	政府	合計
建設費		-50							-50
用地費								-30	-30
運・維・管費		-40							-40
料金		100		-100					0
利用者便益				180					180
地価上昇						-24	24		0
物価下落				-24		24			0
融資		50	-50						0
返済		-66	66						0
サービス購入料		17						-17	0
税金		-4	-5	-6		-5	-8	29	0
合計		7	11	50	-24	19	16	-18	60

財務 融資 財政支出 経済

図-1 道路事業における統合分析表の例⁵⁾

大西ら⁶⁾は、この統合分析を用いて、実際の事業スキーム構築への適用可能性の検討を行っており、都市公園事業における各種事業方式の比較や公共施設等運営事業を対象に、各種インフラ事業での適用について論じている。

2.2 本研究の位置づけ

既往の研究や実施例において、統合分析表を用いて官民連携スキームを比較検討した具体的な事例は、都市公園事業や道路事業、空港事業で多く、下水道施設および管路に関しては概念的な検討に留まっている。

本研究は、下水道分野の維持管理において、統合分析手法を適用し、PPP/PFI事業選定の初期検討に活用する点において従来の研究と異なる。統合分析手法により事

業方式ごとに比較検討する手順は以下の通りである。

- i. 下水道管路施設の維持管理方式の特徴の整理
- ii. 統合分析に必要な指標の選定と、モデル都市を対象とした各方式の統合分析表の作成
- iii. 実際の地方公共団体をモデルとして、公開されている下水道事業運営情報(決算情報等)を用いた統合分析表への入力
- iv. 事業方式ごとのステークホルダーの利得の算出

3. 下水道分野における PPP/PFI 事業の実施状況

下水道分野の維持管理には、多様な形態のPPP/PFI事業が用いられており、下水道処理施設では全国約2,200箇所のうち、9割以上が民間委託を導入している。このうち、包括的民間委託が471件で全体の2割程度を占めている。しかし、管路施設では全国約47万km(全市区町村1,741団体)のうち、包括的民間委託が29件と少なく、PPP/PFI事業の適用が進んでいない(図-2)。その要因として、事業実施数が少ないことによる事業実施時の優位性の評価の信頼性、導入に要する期間の長期化、地方公共団体等と事業者の適正なリスク分担の設定の難しさ、現在の管路施設の資産評価の困難さ等が挙げられる。

上述の課題に対して、PPP/PFI推進アクションプラン³⁾では、人口20万人未満の地方公共団体について情報展開やインフラ分野全体の裾野拡大を図るため、地域の価値や住民満足度の向上、新たな投資・ビジネス機会の創出等、キャッシュフローを生み出しにくいインフラに対して(株)民間資金等活用事業推進機構の活用を薦めている。

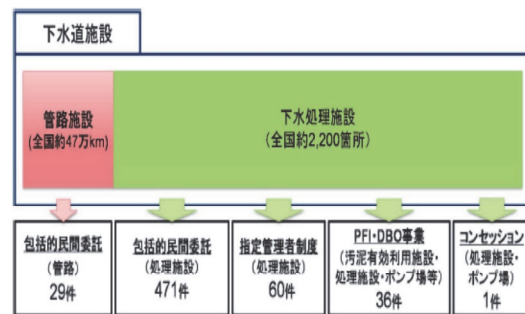


図-2 下水道事業における PPP/PFI 事業の実施状況²⁾

4. 下水道施設維持管理の事業方式

4.1 維持管理方式と契約形態

下水道事業の維持管理方式は、大別して「事後保全型」と「予防保全型」に分類される。事後保全は、管路施設の損傷や劣化が原因で生じる陥没や浸水に対して、発生後に対策を講じる管理方式である。一方、予防保全は、管路施設の損傷や劣化による陥没や浸水が生じないように、事前に対策を講じる管理方式である。予算の制約がある中で効果的かつ効率的に維持管理を行うには、損傷

や劣化の進行を事前に予測し、適切な対策を早期に行う予防保全型維持管理を行うことが、品質と費用の両面から有益であるため、事後保全型から予防保全型への移行が進められている。

委託者と受託者の契約形態は、単年度契約と複数年度契約に区分される。複数年度の契約締結は、民間事業者が主体的に運営に参画することで、民間資金、経営ノウハウ、新技術導入を活かし、事業の効率化や手続きの簡素化によるコストの縮減が見込める。

地方公共団体の運営する事業資金は、下水道使用料で運営する汚水処理と、地方公共団体の税収や国庫補助金をもとに運営する雨水処理に大別され、両者が混在する。このため、事業主体が民間事業者となると、全てを下水道使用料でまかなうことが困難である。そこで、従来通り雨水処理に要する税収等の費用を活用できるPFI事業の「混合型」の適用が検討されている。

上述の事項を勘案し、本研究で比較する事業方式は、
a) 従来型公共事業方式（以下、従来型）、
b) 重点管路更新型公共事業方式（以下、重点管路更新型）、
c) 包括的民間業務委託型公共事業方式（以下、包括民間委託型）、
および d) PFI事業方式（以下、PFI型）を選定した。なお、公共施設等運営事業方式（コンセッション方式）は、下水道料金単体での事業成立が困難なため、今回の検討から除外した。

4.2 事業方式の分類

本研究では、容易に入手可能なデータで検討できるよう、公開されている下水道関連事業の決算報告を用いることとした。下水道関連事業の費用は、下水道使用料を得て維持管理を行う「収益的収支」と、国や融資者等から資金を得て施設の改築、更新、新設を行う「資本的収支

」に区分される。本研究で比較する事業方式の内容は、以下の通りである。

a) 従来型

従来型は、これまで行ってきた事後保全型の維持管理方式。単年度ごとに発注手続きを行うため、発注に要する事務手続きと受託者決定までの時間を要する（図-3）。

b) 重点管路更新型

重点管路更新型は、従来型に加えて、ストックマネジメント計画を基に算出した予防保全型維持管理に移行するために必要な改築・更新の重点管路を並行して行う方式。a)に比べて管路施設の損傷、道路陥没の発生数が低減するが、従来通り単年度ごとに発注手続きを行うため業務量が更に増加し、各年度の重点管路更新の選定と実施のための費用が別途必要となる（図-4）。

c) 包括的民間委託型

包括的民間委託型は、b)の実施にあたり、複数の異なる業務の統合や、複数年度の契約締結等が可能な包括的民間業務委託の方式。発注手続きに伴う効率化や手続きの簡素化による業務量の削減につながり、さらに事業期間が長期になることにより、民間事業者のノウハウや創意工夫が期待できる（図-5）。

d) PFI型

PFI型は、b)の実施をPFI事業（混合型）で実施する方式。c)と同様、発注手続きの効率化や手続きの簡素化による業務量の削減が可能で、一般的にc)の事業期間に比べて長期であり、民間事業者の創意工夫の効果が増大する。加えて、民間資金を積極的に活用し管路の改築、更新を行うことで、早期対応によるリスク低減が期待できる（図-6）。

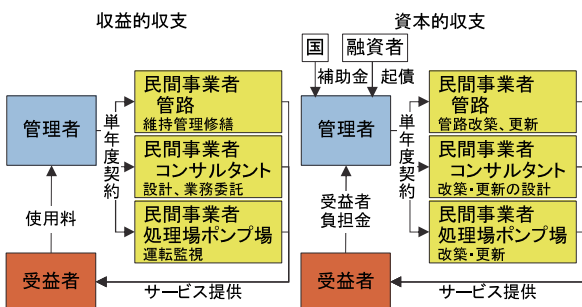


図-3 従来型の事業方式

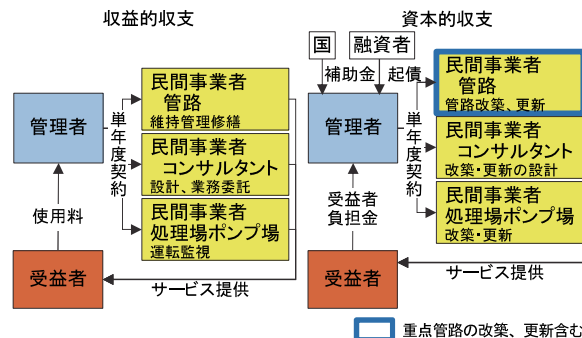


図-4 重点管路更新型の事業方式

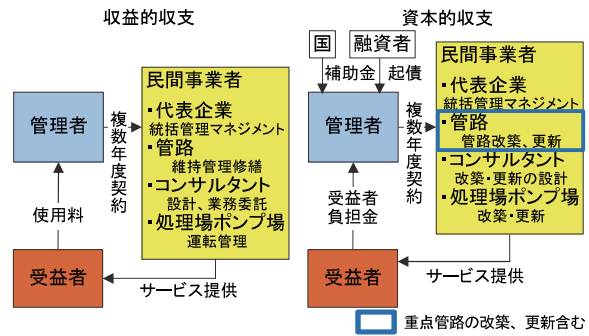


図-5 包括的民間委託型の事業方式

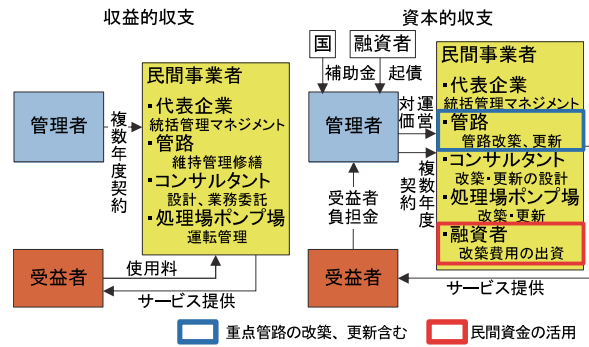


図-6 PFI型の事業方式

5. 下水道分野における統合分析の基本的な考え方

5.1 統合分析の概要

下水道分野における統合分析表の基本概念を表-1に示す。表頭にはステークホルダーを、表側には経済財務項目を示している。マイナス項目はステークホルダーの支出を、プラス項目は収入を示しており、各項目の合計が本事業におけるステークホルダーの利得（損益）を表している。なお、「←」は、ステークホルダー間の受益負担の関係を示している。

5.2 ステークホルダーの内訳

本研究では、ステークホルダーを民間事業者、受益者、管理者とした。民間事業者は、民間事業を統括する代表企業、管路企業、コンサルタント会社、処理場・ポンプ場業者、融資者の5者を選定した。日常管理業務の緊急性や地元企業の保護・育成の観点から、管路管理と処理場・ポンプ管理は地元企業を想定した。受益者は、市民、地主、社会の3者を選定し、適正な管理の徹底で得られるリスク低減効果や地価の上昇等を、数値化し比較できるようにした。管理者は、地方公共団体の下水道分野の所管部署（下水道部等）、地方公共団体（市町村）、国の3者を選定し、補助金等の授受の増減による経済的効果を可視化できるようにした。

5.3 経済財務項目

統合分析表で比較する経済財務項目は、収益的収支、資本的収支のほか、受益者リスク、下水道便益を選定した。そのうち、受益者リスクは、下水道管路の損傷に起因する浸水や道路陥没被害を想定し、「精神的被害」、「交通途絶波及被害」、「地価下落」の3種について選定し、数値化を行った（表-2）。選定項目の費用算定式

表-1 下水道分野における統合分析表の基本概念

項目		民間事業者	受益者	管理者
自治体の収支	収益的収支	収入	-	+
		支出	+	-
	資本的収支	収入	-	+
		支出	+	-
リスク			-	
下水道便益			+	

表-2 受益者リスクと算定式

リスク	算定式
精神的被害リスク	浸水地区人口 × 1人当りの精神被害評価額 ただし、床下浸水10万円/人 床上浸水80万円/人とする。
交通途絶波及被害リスク	走行時間増加損失（総走行時間費用） = 浸水時 - 平常時 走行経費増加損失（走行費用） = 浸水時 - 平常時
地価下落リスク	（精神的被害リスク額 + 交通途絶波及被害リスク額） × 0.2

は、国土交通省発刊の「下水道事業における費用対効果分析マニュアル」⁸⁾を参考に、モデル地域の規模に合致するように、また被害規模や期間が変動するように設定した。

6. 予防保全型維持管理の効果

各事業方式における重点管路の改築・更新効果を示した概念図を図-7に示す。横軸は時間経過、縦軸は損傷発生数を表している。従来型は、事後保全型の維持管理のため、老朽化の進展に伴い、陥没や浸水等に起因するリスクが増加する。一方、重点管路更新型をはじめとした予防保全型維持管理手法では、損傷のある管路の改築・更新を行うため、道路陥没や浸水等が起きるリスクは軽減される。また、事業方式によっては、早期に管路の改築・更新が完了するため、その後の管路維持管理にかかる費用や受益者リスクが軽減される。

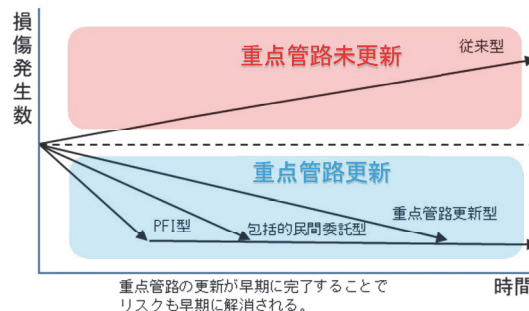


図-7 事業方式別損傷発生数の推移概念図

7. 統合分析によるケーススタディ

7.1 仮想モデル都市の設定

統合分析表を用いた維持管理方法の選定のため、仮想モデル都市（以下、A市）を設定して、検討期間30年における統合分析表を作成し、分析を行った。A市に関する入力情報は、公表される決算情報等を用いた。

A市は、総人口20万人の都市であり、今後の人口は本年をピークに減少し、30年後は下水道使用料収入が10%減少するものとした。A市は下水道ストックマネジメント計画を策定しており、今後30年で重点的に改築・更新する路線を、全延長900kmのうちの120km（以下、重点路線）としている。また、現在の維持管理は事後保全型であるが、今後は予防保全型の維持管理にシフトしたいと考えている。そのため、下水道ストックマネジメントで定めた重点路線の改築・更新を行う必要があり、工事費は320百万円/年と試算している。A市の課題として、今後想定される下水道予算の縮減や技術者の人員・人材不足がある。

7.2 財政評価のための検討手法

統合分析表を用いた検討は、現在および将来の財政状況の把握が不可欠となる。しかし、必要な情報や項目が

多岐にわたり、全ての情報を入手するには労力を要し、事業方法の選定・評価業務の障壁となる。そこで、本研究では、簡易に概略を把握する方法として、毎年公表されている下水道事業決算書を用い、起算の年度をベースに、将来予測を付与する方法を考案した。

A市における最新の下水道事業会計決算書内訳を図-8に示す。管路の改築・更新工事に必要な費用は、資本的収支の支出②で示す「建設改良費」2,100百万円のうち、実績を基準として15.2%の320百万円とした。下水道管路に起因する陥没等の緊急対応費は、収益的収支の支出⑦に示す「その他」300百万円のうち100百万円とした。

7.3 統合分析表による比較

本研究で作成した統合分析表の内訳と集計方法を図-9に示す。各事業方式で1年目から30年目まで統合分析表を作成し、合算して得られる合計を比較・評価する。下水道使用料は、人口減少を考慮して検討開始年次の2,900百万円から毎年均等に0.33%減少、30年後に10.0%減少し2,610百万円になることとした。

各事業方式の重点路線更新に伴う維持管理費用および受益者リスクの条件を以下に示す。

a) 従来型

重点路線の改築・更新が未了であるため、受益者リスクは毎年前年度比2%増加すると想定。

b) 重点管路更新型

重点路線の改築・更新が30年間で完了するため、これに伴い受益者リスクが毎年前年度比7%減少すると想定。

c) 包括的民間委託型

複数年度契約のメリットを活かし、重点路線の改築・更新が28年間で完了すると仮定。受益者リスクが年間8%減少し、重点路線の改築・更新が完了した後は陥没や浸水に伴う対策費が70%に減少すると想定。

d) PFI型

複数年度契約のメリットと民間資金を活用し、重点路線の改築・更新が10年間で完了すると仮定。受益者リスクが年間22%減少し、重点路線の改築・更新が完了した後は、陥没や浸水に伴う対策費が70%に減少すると想定。

7.4 集計結果のまとめ

事業方式ごとのステークホルダーの利得(損益)の集計結果を表-3に示す。a)従来型は、重点路線の改築・更新が進まないため、受益者リスクが増加し、市民の利益が4事業方式のうち最小となる。b)重点管路更新型は、重点路線の改築・更新が進み受益者リスクは減少するが、資本的支出が増加するため管理者の利益が4事業方式のうち最小となる。c)包括的民間委託型は、事業期間の短縮により早期に受益者リスクと維持管理費が減少して収益的支出が減少するため、市民と管理者の利益は重点管路更新型に比べて増加する。d) PFI型は、受益者リスクおよび収益的支出が更に減少するため、市民と管理者の利益は更に増加する傾向を得た。

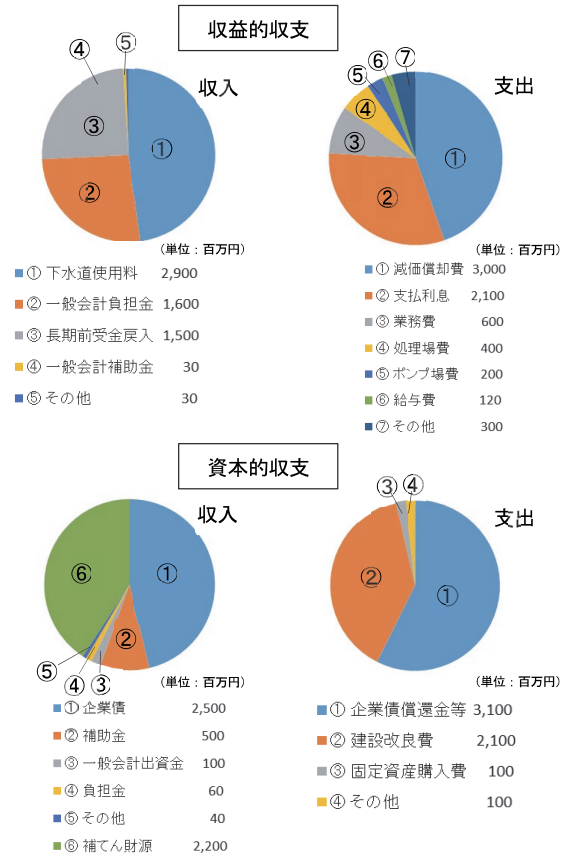


図-8 A市の下水道事業会計決算書内訳

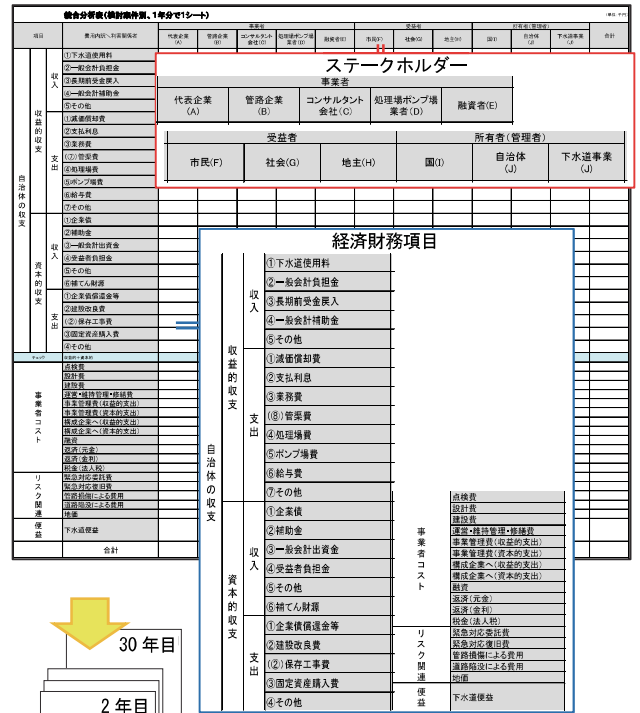


図-9 統合分析表の内訳と集計方法

表－3 事業方式別統合分析表の集計結果

(単位：10 億円)

管理形態	事業方式	民間事業者					受益者	管理者
		代表企業	管路企業	コンサル タント会社	処理場 ポンプ場 企業	融資者	市民 社会 地主	地方公共団体
事後保全型	a)従来型	—	24	30	38	8	△194	△9
予防保全型	b)重点管路更新型	—	29	30	38	8	△61	△61
	c)包括的民間委託型	11	28	29	38	8	△55	△46
	d)PFI型	10	23	25	35	9	△30	5

5. まとめ

本研究の成果を以下に示す。

- i. 事業方式の初期段階における導入検討の目的において、既知で容易に入手可能な下水道事業会計決算書を用いて統合分析表を作成し、評価する手法を考案した
- ii. 事業方式別の統合分析表を作成し、事業方式の違いによる特徴を整理し、定量的に評価したことで、統合分析手法の簡便性、有用性を確認することができた
- iii. 本研究で作成した統合分析表は、検討する地方公共団体の規模や将来予測に合わせて、パラメータの設定値を変えることにより、ステークホルダー間の受益と負担の可視化を可能とした
- iv. 本研究で取り上げた4つの事業方式の比較から、民間資金を積極的に活用し、早期に重点路線の改築・更新を行うことで、予防保全型の質の高い維持管理が可能となることが示された
- v. 損傷による陥没や浸水のリスクを早期に軽減することで、市民および管理者の利得が向上するPFI型が有効であるという結果が得られた

5. あとがき

本研究では、統合分析手法を用いて、下水道維持管理の事業方式の選定時間短縮を可能とする検討手法を確立することができた。初期段階の導入において、事業方式の目途を早期に得られ、予防保全型維持管理への導入がスムーズに進むために、今後活用されることを期待する。

一方で、本研究で構築した統合分析手法は、多くの不確定要素を標準化し、仮定を用いて推論している。したがって、算出された数値に対する信頼性を高めるためには、詳細計画に基づく検討が必要である。

また、事業の実施には、合意形成、導入可能性、将来予測、地域性への配慮等、様々な事案を考慮して決定する必要がある。今回選定されたPFI事業を例にとると、長期にわたる複数年契約により、受託した事業者の安定した雇用機会が確保され、委託者の手続き等にかかる業務量の削減効果がある反面、その他の民間事業者の事

業関与の機会喪失や技術力低下が懸念される。実際の事業化に際しては、これらの社会的側面を含めて総合的に配慮して事業手法の選択を行う必要がある点を申し添える。

本研究の趣旨を十分理解したうえで、適切に活用された結果、PPP/PFI事業をはじめとした官民連携事業の適用件数が増加し、下水道事業の持続可能な発展が実現することを望む。

【謝辞】

本研究の実施に際しては、東京都市大学宮本和明名誉教授に統合分析表の構築に際し指導を頂いた。また、関係する地方公共団体の皆様からは情報提供等で協力を頂いた。ここに記して感謝の意を表す。

【参考文献】

- 1) 明尾 賢、宮本和明、木下信之、「下水道管路施設の維持管理における官民連携の事業手法の課題と対策」、土木計画学研究・講演集、第 57 巻、2018.4
- 2) 国土交通省、「下水道事業における公共施設等運営事業等の実施に関するガイドライン」、2019.3
- 3) 内閣府、「PPP/PFI 推進アクションプラン」、2019.6
- 4) 国土交通省 Web サイト「下水道における新たな PPP/PFI 事業の促進に向けた検討会の資料について」、https://www.mlit.go.jp/mizukokudo/sewerage/mizukokudo_sewerage_tk_000382.html
- 5) 宮本和明、北詰恵一、「インフラ PFI 事業のためのリスクを考慮した経済・財務・融資・財政支出統合分析システム」、建設マネジメント問題に関する研究発表・討論会講演集、第 29 巻、2011.12
- 6) 大西智樹、宮本和明、太田雅文、小林乙哉、「都市公園 PPP 事業におけるスキーム選択のためのリスクを考慮した統合分析」、土木計画学研究・講演集、第 56 巻、2018.7
- 7) 大西智樹、宮本和明、「統合分析による公共施設等運営事業評価」土木計画学研究・講演集、第 57 巻、2018.12
- 8) 国土交通省水管理・国土保全局下水道部、「下水道事業における費用対効果分析マニュアル」2016.12

補修・補強材料のトレーサビリティシステム による維持工事の品質確保と効率化

Traceability System for Repair and Reinforcement Materials to Assure the Quality and Efficiency of Maintenance Work

松澤好洋* 山口 治*

要 旨

インフラ構造物の維持工事では、梱包が小さく多種・多量の材料を現場で練り混ぜて使用しており、品質管理に要する情報の収集と記録に多大な労力を費やしている。そこで、維持工事の品質確保と、情報収集管理の効率化による負担軽減を目的として、補修・補強材料のトレーサビリティシステムを開発した。その結果、維持工事の品質管理記録をクラウドで一元管理でき、タブレット端末などによる非通信環境下での入力が可能となり、QRコードによる材料梱包の最小単位での管理を実現した。現場での試行によりシステムの確実な動作を実証し、全数管理をする場合の品質管理情報の収集・集計に要する時間が4割軽減された。これにより、材料の品質管理情報の全数管理の促進と、効率的な維持工事の実施が可能となり、インフラ構造物の長寿命の促進に寄与できる。

キーワード：補修・補強、補修材料、トレーサビリティ、効率化

1. まえがき

我が国では、1960年代からの高度経済成長期に社会資本が集中的に整備され、耐用年数の目安となる築造後50年を超えるインフラストックが多く存在し、今後急速な老朽化の進行が懸念される。一方で、国内総人口は2011年から人口減少社会¹⁾となり、都市部への人口集中による地方の過疎化とインフラの需要減少により、新設工事に比べて、既存ストックの長寿命化を目的とした維持管理の重要性が増している。

適切な維持管理がされなかった構造物は、1990年後半から、損傷や倒壊、重大事故の発生²⁾など大きな社会問題となっており、その度に維持管理の重要性が高まってきた。現在では、適切な維持管理を行うことで、施設の状態を良好に保ち、また耐用年数の延長に寄与することが知られている³⁾。

維持管理の取り組み強化として、国土交通省は、平成26年にトンネル、橋等の点検を近接目視により5年に1回の頻度で実施し、健全性を4段階に区分することを省令、告示で定めた⁴⁾。そのため、現在の維持管理業務では、作業人員の確保が困難である⁵⁾とされている。

点検により発見された補修・補強箇所は、緊急度に応じて速やかに修繕、補修、補強（以下、維持工事）を実施し、必要に応じて計画的な改築や更新等を行う必要が

ある。しかし、高齢化の進展とともに、引退による建設業就業者の減少⁶⁾が続いており、従事者の確保とともに、作業の効率化技術の開発と運用により、適正な維持管理サイクルを構築する必要がある。

維持工事では、狭隘空間で短時間に小規模エリアを対象とした施工が想定される。このため、使用する材料（以下、補修等材料）は、梱包量が小さく、また、急結性を必要とするため、エポキシ樹脂等の有機材料や複数材料の混合型が多い。これらは、施工直前に練り混ぜを行うため、配合の管理、練り混ぜ時間、練り混ぜから硬化までの可使用時間管理が必要となる。品質管理は梱包材料の最小単位で実施し、構造物のどの部位に使用したか、全ての記録を現地で行う必要がある。このような煩雑な品質管理は、現在、日報等の報告書により人力で記録と保管を行っており、それが人員増の要因となっている。

補修等材料の品質管理記録は、工事完了後に損傷が発生した際の原因究明、応急・本復旧の計画立案、維持工事の実施において不可欠な情報である。したがって、構造物の適正な維持管理には、詳細かつ適切な情報収集と記録の保管、およびそれらの情報を必要な時に活用できる体制が求められている。そこで、維持工事の品質確保と、情報収集管理の効率化による負担軽減を目的として、補修・補強工事の材料におけるトレーサビリティシステム（以下、本システム）を開発した。

*東日本支社リニューアル技術部

2. 既往の研究

2.1 既往研究および実施例

国土交通省は、2017年10月に「インフラ・データプラットフォーム」⁹⁾の構想を発表し、国内で保有されるインフラ情報を横断的に統合し、官民間問わず維持管理に活用する取り組みを進めている。

道路分野の取り組みの例として、首都高速道路株式会社での、2017年からインフラの効率的な維持管理をトータルに支援・実現するスマートインフラマネジメントシステム「i-DREAMs®」⁷⁾の運用が挙げられる。

鉄道分野の取り組みの例として、東日本旅客鉄道株式会社での、橋梁・トンネル等検査情報の一元管理を行う「土木構造物管理システム MARS」²⁾の導入が挙げられる。また、東京地下鉄株式会社は、IoT化・データベースの利用による「地下鉄トンネル等の新しい維持管理技術」⁸⁾を用いて維持管理業務の高度化を図っている。上述のように、インフラ管理者は、所有する構造物に対して独自の情報集約システムを構築し、維持管理業務の基盤としている。

建設資機材や材料に注目した情報収集・管理の取り組みも進められている。中村ら⁹⁾は、シールド工事の築造におけるセグメント情報管理、受入検査管理等を統合し、維持管理に有効な情報を提供できる「シールド情報統合管理システム」を確立している。近藤ら¹⁰⁾は、鉄筋、型枠、二次製品等の個体管理が可能な材料について、管理コードを建設運搬物に直接付与せず、運搬の受け渡しをする設備間で情報を管理するシステムを考案している。

流動物の個体識別管理として、東ら¹¹⁾は、生コンクリートの配送から打設を一元管理する管理システムを開発、実用化しているほか、同種の技術は複数発表されて実用化されている。

2.2 本開発の独自性

前述の取り組みや開発技術は、新設構造物を対象とした技術や、インフラ構造物の点検、補修・補強履歴等の情報管理であった。維持工事の材料品質確認記録等は単独で工事記録ファイルに管理される例が多く、維持管理業務での活用が困難であった。また、短時間施工や小規模などの維持工事特有の条件により、過去の工事記録では、全ての材料の品質管理情報ではなく、施工日ごとや場所ごとなど代表値の管理のみを行う事案もみられる。

そこで、使用材料の全数に対して適正な品質管理とその記録を施工現場で容易に収集し、情報を管理・活用する仕組みとして本システムを開発した。ここでは、インフラ構造物に多く適用されている鋼構造およびコンクリート構造に対する補修等材料を対象とした。

3. 維持修繕工事特有の課題

3.1 施工の制約

維持工事は、災害時の緊急対応を除き、既に供用中のインフラ（道路、鉄道、上下水道等）を停止させないよう計画される。そのため、夜間や短時間施工等の時間的制約、道路片側規制等の場所の制約、狭隘な空間や不動施設の近接等の空間の制約を受ける。

これにより、補修等材料に求められる条件として、人力運搬と小規模施工に適した少量梱包、短時間で供用するための早期強度の発現、頻繁に補修できないことによる長期耐久性の確保が挙げられる。したがって、補修等材料は、早期強度を重視したエポキシ樹脂等の有機系材料や、長期耐久性に有利なセメント系の無機系材料、またはそれらを組み合わせた混合材料が実用化されている。

3.2 材料の特性

鋼構造およびコンクリート構造に対する補修等材料は、目的に応じて様々な工法の材料が開発・実用化されている。鋼構造では、主に防錆を目的とした塗料等、コンクリート構造では、ひび割れ注入、剥落防止の表面被覆、剥落後の断面修復等の補修材料と、増厚のセメント系材料や炭素繊維等の補強材料がある（表-1）。その多くは、2種類以上の材料の練り混ぜを要することが特徴である。また、補修・補強の目的が同一であっても、複数の工法や材料が存在し、製品ごとに管理値が異なる。加えて、使用環境に応じて夏用・冬用、速乾性・遅延性などにより品質管理値が設定されている。したがって、維持工事の品質を確保するためには、適正な配合、練り混ぜ、施工環境に応じた適正な管理を実施する必要がある。

表-1 維持工事の目的と代表的な材料

項目	目的	鋼構造	コンクリート構造
機能維持	防錆	塗膜防錆剤塗布(有機系材料)他	—
	劣化因子の浸透防止	表面塗装 他	表面改質剤、表面塗装 他
補修	ひび割れ	ストップホール、添接板設置 他	有機系材料注入(エポキシ樹脂等) 無機系材料注入(セメント系材料) 他
	防錆	塗膜防錆剤塗布 他	鉄筋防錆剤塗布(有機材料、無機材料) 他
補強	剥落防止	—	有機系表面被覆(エポキシ樹脂等)、繊維シート(有機系含浸材) 他
	断面修復	添接板設置 他	無機系材料、樹脂混合セメント材 他
補強	増厚	補強鋼材、添接板設置 他	コンクリート、セメント系材料(モルタル等)、樹脂混合セメント材 他
	繊維補強	炭素繊維 他	炭素繊維、アラミド繊維(有機系含浸材)他

凡例 赤太字:現地で2種類以上の練り混ぜを要する材料(水を含む)

3.3 品質管理の要件

前節の施工の制約、材料の特性を踏まえた品質管理の特徴と課題として以下の点が挙げられる。

- i. 材料の種類が多く、小さい梱包単位の補修等材料を多量に使用するため、施工場所での品質管理および情報収集の負担が大きい点
- ii. 現場で複数の添加材を練り混ぜた時点で品質が変化するため厳格な時間管理が必要な点
- iii. 気温・湿度などの現場環境の変化によって品質管理値が変化する材料が存在する点

iv. 工事により補修等材料が構造物の部位（場所）に
 帰属して管理される点

上記のとおり、管理項目数と個体数の組み合わせが膨大なため、品質管理の情報収集と記録に多大な労力を要する。現在は、施工管理の人員増で対応しており、工事価格の上昇や、人員不足による工事進捗の遅れなどの原因となっている。

本システムでは、上記の課題を解決するため、品質管理情報の収集の負担軽減、適正な練り混ぜ時間管理、個々の現場に応じた環境対応、施工後の構造物との関連付けを実現することを品質管理の要件とする。

4. システムの構築

4.1 システムの目標

本システムは、維持工事の計画時、資材搬入時、施工時の記録を一元管理することで、維持工事の品質管理記録を出力することができる。完成・引き渡し後には、点検・補修情報と合わせて、維持管理業務に活用できるデータベースの構築を目標とした（図-1）。

4.2 システム構築の要件

システム構築の要件は、品質管理要件、施工管理要件、維持管理要件、デバイス・データベース要件に分類し、それぞれを満足するよう仕様の検討を行った。各要件の詳細を表-2に示す。

このうち、複数の手法を候補とした場合の比較検討を行った項目について後述する。仕様の決定にあたり、全項目において汎用性と今後の継続性に配慮した。

4.3 検討内容と仕様の決定

データ一元管理手法は、クラウドサーバの活用と、ローカルサーバを比較した結果、複数現場の活用に伴うシステムの規模拡大と維持管理費用を考慮してクラウドサーバを採用した。

個体識別方法は、材料の梱包1つずつに個別認識コードを貼り付ける方式とした。識別する技術は、バーコード、QRコード、ICタグを比較した結果、材料の調達容易性、貼付等の負担、保有できる情報量、汎用性などを考慮して、QRコードを採用した（表-3）。

情報取得と操作端末は、汎用性が高く、QRコードの読み込みが可能なタブレット端末、およびスマートフォン（以下、携帯端末）を採用した。

データ取得を行う入力機能は、非通信環境での使用を可能にするため、独自の新規システムの開発と、既往の電子帳票アプリ（以下、既往アプリ）の活用を比較した。その結果、開発期間の短縮とコスト縮減が見込めることから、既往アプリを採用した（表-4）。

データ入力作業は、監督者（元請職員）、作業主任者（職長）、作業従事者（作業員）について役割を検討し、目標レベルと暫定レベルを設定した（表-5）。

目標レベルは、作業従事者の入力を基本として、通常作業の支障とならない操作の仕様とした。暫定レベルは、システム導入の初期段階や過渡期の対応として、作業主任者の一時的な操作で対応できるよう全体のシステムを調整した。

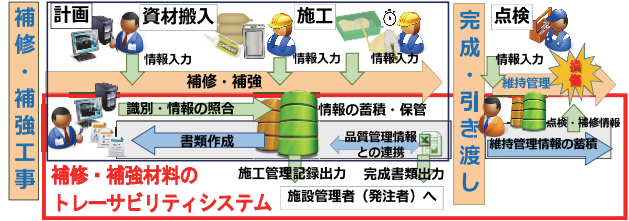


図-1 全体運用概念図

表-2 システム構築の要件

品質管理要件	施工管理要件
管理記録収集、整理の負担軽減	非通信環境での使用
材料使用期限管理	材料の在庫管理情報の取得
材料可使用時間管理	複数箇所での同時使用
配合管理記録の取得	施工場所の記録
環境条件を反映した管理基準	デバイス、データベース要件
維持管理要件	汎用性の確保
構造物と使用材料の関連付け	機器入手の容易性
構造物と施工記録の関連付け	メンテナンス性

表-3 個体識別技術の検討

種類	メリット	デメリット	評価
バーコード	・自作可能	・保持できる情報量が少なく、管理したい情報を保持できない	×
QRコード	・保持できる情報量が多く、管理したい情報を保持できる ・自作可能	・ペンキなどで見れなくなると読み取りが困難	○
ICタグ (RFID)	・保持できる情報量が多く、管理したい情報を保持できる ・再利用できる	・金属や液体の近傍で電波の影響が起き、読み取り困難 ・1枚約10円⇒コスト大 ・自作不可	△

表-4 非通信環境対応の開発方法の検討

構築方法	メリット	デメリット	期間	価格 (比率)	評価
新規システム構築	・入力、出力、マスタ機能の一元開発が可能	・開発費用、期間の増大	約2年※1	1.0 (基準)	×
既往アプリ導入	・開発期間と費用が短縮 ・アップデート、メンテナンス作業が不要	・カスタマイズの制約 ・連携機能の開発が必要	3ヶ月※2	0.18※2	○

※1：アプリ登録の審査に要する期間を含む
 ※2：データ連携システムの構築にかかる期間と費用

表-5 データ入力作業の役割分担レベルの設定

担当レベル	監督者 (元請職員)	作業主任者 (職長)	作業従事者 (作業員)
目標レベル	運用の指導 収集データ確認	現地指揮 施工条件の入力	作業中に現地で入力
暫定レベル	現地指揮 施工条件の入力	作業中に現地で入力 (人員増)	通常作業

4.4 システム構築要素

本システムは、材料情報・施工情報の入力を管理する入力機能、システム全体の管理を担うマスタ機能、帳票出力を管理する出力機能の3種類で構成される（図-2）。全ての機能はクラウドサーバ上に存在し、通信環境下での複数人同時アクセスと最新版管理を可能とした。

a. 入力機能

入力機能は、現場事務所でのPC入力と施工場所での携帯端末での入力を可能とした。入力画面の例を図-3に示す。

入力機能の開発は、既往アプリを採用して開発期間の短縮とコストの削減を図った。採用したアプリは、非通信環境下でデータを端末にストックし、通信可能環境でまとめてクラウドデータの更新をする機能を有するため、トンネルや高架橋の下などでの使用が可能となった。

施工現場でのQRコードの読み取りは、携帯端末の内蔵カメラおよび専用のコードリーダー（写真-1）により行う。個体識別情報が記録されたQRコードを読み込むことで、携帯端末に転送・記録され、各種管理情報とともにクラウドサーバに転送される仕組みとした。

入力機能は、搬入時の多量の情報入力を一括登録する機能を備える。また、現場での入力漏れや誤記録等の修正機能を権限付きで備えている。

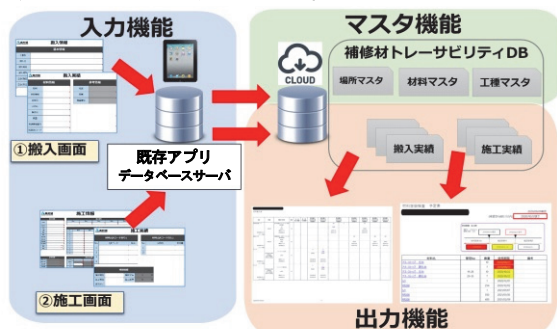


図-2 システム構成図



図-3 施工情報入力画面（タブレット端末の例）



写真-1 QRコードリーダー（端末イメージ）

b. マスタ機能

マスタ機能は、入力情報として携帯端末等から転送された情報を、QRコードに関連付けて一元集約する。マスタ機能の具体的な役割は、既往アプリとの連携機能、入力データのエラー警告と重複データの排除、入力のプルダウン選択項目となる各種マスタ情報の管理、出力機能への情報提供である。搬入時および施工時に取得する項目は、①主キー（QRコード）、②基本情報、③製造情報、④搬入情報、⑤施工情報、⑥品質管理情報、⑦工事引き渡し後に活用される施工場所情報（維持管理情報）、

⑧付帯情報で構成される。取得データは、マスタ機能で主キーであるQRコードと関連付けられる（表-6）。

本システムへの入力情報の登録は、搬入時と施工時の2回である（表-7）。搬入時登録は、施工現場に搬入された際にQRコードを読み込み、基本情報、製造情報、搬入情報を関連付ける。これにより、材料の入荷数量管理や使用期限管理が可能となる。施工時登録は、施工の開始時にQRコードを読み込み、施工情報、品質管理情報、維持管理情報となる施工場所を関連付ける。これにより、使用期限管理、練り混ぜ時間管理、可使時間管理、施工環境の可否、配合管理、使用数量管理、施工場所との関連付けが可能となる。使用した材料は、施工後に梱包材料に付与したQRコードとの関連がなくなり、新たに施工場所と関連付けられて管理される。

表-6 取得データ項目

情報種別	細別	情報種別	細別	情報種別	細別	
①主キー	QRコード	④	搬入日	⑥	使用量	
	管理番号		搬入時刻		温度(°C)	
基本情報	工事名	⑤	搬入場所名		品質管理情報	湿度(%)
	Lot No		搬入立会者			攪拌開始時刻
	材料名		施工日			施工開始時刻
③	材料種別名	⑤	施工立会者		⑦維持管理情報	施工終了時刻
	製造年月日		工種・種別・細目	施工場所情報		
	出荷日		施工方法			
	使用期限日		攪拌方法	⑧付帯情報		備考、写真

凡例 ①~④(■)搬入時入力 ⑤~⑧(□)施工時入力

表-7 入力項目とQRコードの関連付け

搬入時(1回目)		製造	搬入	施工	維持管理		
時系列	QRコード	基本情報	製造情報	搬入情報	施工情報	品質管理	維持管理
		入力	選りで入力	入力			
		：	：	：	：	：	：
		管理可能な項目	入荷数量管理、使用期限管理				
施工時(2回目)		製造	搬入	施工	維持管理		
時系列	QRコード	基本情報	製造情報	搬入情報	施工情報	品質管理	維持管理
		済み	済み	済み	入力	入力	入力
		：	：	：	：	：	：
		管理可能な項目	使用期限管理、練り混ぜ時間管理、可使時間管理、施工環境の可否、配合管理、使用数量管理、施工場所との関連付け				

c. 出力機能

出力機能は、結果の出力方法としてブラウザによる閲覧と、帳票形式の出力ファイルで対応した。出力ファイルは、各種形式（PDF、Excel）に対応し、汎用性を確保した。ブラウザによる出力画面は、検索による絞り込みで必要部分のみを表示、出力できる（図-4）。



図-4 出力画面例

帳票形式の出力は、現行の施工現場で品質管理記録として使用している項目を採用した。主な項目として、①材料の使用数量管理、②使用時刻や消費期限などの時間・時刻に関する品質管理、③温度・湿度等の環境管理である。

5. 現場適用

5.1 適用現場概要

評価・検証するため、本システムを2現場で使用し、全数管理を品質管理基準として適用した。適用現場は、夜間の補修工事現場で、その特徴を以下に記す(写真-2)。

現場1：地下鉄駅の塩害補修工事における吹付けモルタル材料と止水材への適用。施工時間は約2時間半で、練り混ぜ1箇所と施工場所1箇所構成される。適用前の品質管理基準は代表値管理であった。

現場2：都市高速道路地下トンネルの剥落箇所の修復における左官仕上げの断面修復材料への適用。施工時間は約4時間で、練り混ぜ2箇所と施工場所4箇所構成される。なお、適用前の品質管理基準は全数管理であった。

本システムの現場適用により、システムの使用状況(操作性、通信性)、現場への影響(人員の増減、工程への影響)、品質管理情報の収集・集計の3項目について、従来施工(適用前)との比較・検証を行った。



写真-2 適用現場の施工状況

5.2 試行結果

本システムの現場適用状況を写真-3に示す。現場での入力とシステムへの登録作業は、表-5に示した「暫定レベル」とした。2現場とも監督者(元請職員)の教育を受けながら作業主任者(職長)がデータ入力とシステムへの登録作業を行った。適用期間は、現場1では約3ヶ月(60日)、現場2では約1ヶ月(15日)である。

a. システムの使用状況

操作性は、画面の大きいタブレットを入力端末として使用したため、入力作業に支障がなく良好であった。現



写真-3 システム試行状況

場での入力に配慮し、記載文字の簡素化と最低限の入力項目としたことにより誤入力は生じなかった。通信性は、2現場とも地下構造物であったが、携帯端末の通信が可能な環境であった。試行中の運用として、データのサーバアップロードを現場ではなく事務所に戻った後に行うこととしたが、不具合なくデータ転送が可能であった。また、現場2では、複数の練り混ぜ場所に対して、それぞれ入力端末を同時に使用したが、複数稼働による不具合は見られなかった。適用後のヒアリングの結果、操作については適用前の現場で記入していた日報への記録と同等の記録時間で対応できたとの意見が出た。

b. 現場作業中の作業人員、工程への影響

本システムの導入に伴い、作業人員、工程に及ぼす影響をシステム導入の前後で比較した(表-8)。作業人員は、適用前を1.00とした場合、現場1では1.10、現場2では1.08と増加した。現場1では代表値管理から全数管理に変わったことで、作業主任者の報告量が増加したこと、QRコードの貼付、読み込み作業、今まで監督者が行っていた工事記録部分の入力の増加が影響している。工程については、施工の間に読み込み作業や入力作業を行うことができたため、現場1では1.02、現場2では1.00と大きな変化は見られなかった。

表-8 システム導入による作業人員と工程への影響

現場区分	現場1		現場2	
	適用前	適用後	適用前	適用後
品質管理基準	代表値	全数	全数	全数
入力作業レベル	暫定レベル	暫定レベル	暫定レベル	暫定レベル
作業人員(人)	360 ^{※1}	397.5 ^{※2}	105 ^{※3}	113.5 ^{※4}
	比率	1.00 → 1.10(+0.1)	1.00 → 1.08(+0.08)	
工程(日数)	60	61	15	15
	比率	1.00 → 1.02(+0.02)	1.00 → 1.00(±0)	

内訳・算出根拠
 ※1: 6人/日 × 20日 × 3ヶ月
 ※2: [増分37.5人] QR貼付6人、搬入時入力1.5人、施工時入力30人
 ※3: 7人/日 × 15日 × 1ヶ月
 ※4: [増分8.5人] QR貼付0.5人、搬入時入力0.5人、施工時入力7.5人

c. 品質管理情報の収集・集計作業

現場での品質管理情報の取得と、事務所での工事記録の入力を合わせた歩掛の比較結果を表-9に示す。適用前は、作業主任者が収集した施工情報を、監督者が事務

所で品質管理情報として整理していたが、適用後は、現場で施工と同時に情報の入力・整理が完了する。その結果、適用前から全数管理だった現場2では、適用前を1.00とした場合、0.57と減少した。代表値管理であった現場1では管理項数が6倍に増加したが1.35の増加で収まった。情報収集作業はQRコードの読み取り作業の影響により増加したが、集計作業の減少により、全数管理を行う際の全体の作業時間の短縮効果を確認できた。

表一 9 品質管理情報収集・集計の平均歩掛比較
単位:分/日

現場区分	現場1		現場2	
	適用前	適用後	適用前	適用後
比較対象	適用前	適用後	適用前	適用後
品質管理基準	代表値 →	全数	全数	全数
管理項数	1/バッチ →	6/バッチ	12/バッチ	12/バッチ
入力作業レベル	暫定レベル	暫定レベル	暫定レベル	暫定レベル
情報収集作業 (現場)	10※1	75※2	100※3	120※4
集計作業 (事務所)	60	20	180	40
合計	70	95	280	160
比率	1.00 → (基準)	1.35 (+0.35)	1.00 → (基準)	0.57 (-0.43)

内訳・算出根拠 ※1: 10分×1箇所 ※2: 2.5時間×0.5(従事割合) ※3: 25分×4箇所 ※4: 4.0時間×0.5(従事割合)

5.3 課題と展望

今回実施した2現場のうち、品質管理要件が全数管理の場合において、品質管理情報の収集と集計を含めた総合的な効率化が見込める結果であった。課題として、以下の3点が挙げられる。

- i. 現場で実施する作業の増加（入力、読込作業）
- ii. 入力作業の役割分担のうち「目標レベル」の実施
- iii. 現場搬入時のQRコード貼付作業の負担軽減

i および ii について、目標レベルでは、作業従事者が入力を行えるよう、手袋を装着したまま携帯端末を操作できるなどの作業中の入力操作性の向上が求められる。iii について、現場搬入時にQRコードを貼り付ける作業は、使用前の荷ほどきと再梱包が必要なため、改善が求められる。

上記を踏まえて、i および ii に対して、定置型の入力端末を使用した試行を通じた効果の検証と、iii に対して、材料製造元との連携を強化し、個体識別のためのQRコードの貼付を製造時に行う体制の構築を進めたい。

6. まとめ

本報告では、以下の項目を明らかにした。

- i. 維持工事の品質確保と効率化を目的とした補修・補強材料のトレーサビリティシステムを開発した
- ii. QRコードによる補修等材料の個体識別方法、クラウドを利用したデータ管理を利用した全数管理による品質確保、および、その品質保証への可能性を確認した
- iii. 本システムを現場で実証した結果、作業人員は

QRコードの貼付作業や入力作業で最大10%増加したが、工程（日数）は、施工の間に読み込み作業や入力作業を行うことができたため、大きな影響はなかった

- iv. 品質管理情報の収集と集計については、適用前から全数管理の現場に本システムを導入した結果、QRコードの読み取り作業によって情報収集の作業時間は20%増加したが、システムの集計作業の効率化により全体で43%の作業時間の減少を確認できた
- v. 本システムを作業従事者が実施する上で、現場での入力・読み込み作業の作業量の増加、手袋を装着した状態での入力操作性の向上、材料製造時のQRコード貼付体制の構築が課題として明らかになった

7. あとがき

本開発において、維持工事の品質確保と効率化を目的とした補修・補強材料のトレーサビリティシステムを構築し、現場での実証により効果を確認した。今後、本システムを用いて、補修・補強材料の品質管理として全数管理が進めば、維持工事品質の安定、維持管理業務の効率化が可能となる。また、その結果として、構造物の長寿命化の促進の一助となれば幸いである。

【参考文献】

- 1) 総務省統計局、「人口減少社会「元年また」は、いつか?」、<http://www.stat.go.jp/info/today/009.html>、2012.11
- 2) 土木学会、「平成 25 年度全国大会 特別セッション これからの社会インフラの維持管理・更新のあり方—土木学会で取り組むべき課題と対処戦略—」、2013.9
- 3) 国土交通省、「インフラメンテナンス情報」、<http://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/maintenance/01maintenance/index.html>
- 4) 国土交通省、報道発表資料「定期点検要領の策定について」2014.6.25
- 5) 国土交通省、「国土交通白書 2014」、PP39-40 図表 1-3-27、図表 1-3-30
- 6) 国土交通省、報道発表資料「産学官連携によるイノベーションの創出を目指します」、2019.5.30
- 7) 首都高速道路株式会社、「スマートインフラマネジメントシステム i-DREAMs®」、<https://www.shutoko.co.jp/efforts/safety/idreams/>、2017
- 8) 東京地下鉄株式会社、「東京メトロが展開する『地下鉄トンネル等の新しい維持管理技術』」、2018.3
- 9) 中村ほか、特許 5280891「セグメント受入れ管理システム」、出願日 2009.2.27
- 10) 近藤ほか、特許 523435「トレーサビリティシステムおよび運搬物管理方法」、出願日 2009.8.18
- 11) 東ほか、ニュースリリース「新設コンクリート構造物品質保証システムを開発」、<http://www.okumuragumi.co.jp/news/2007/index6.html>、2007

曲面天井用研掃システムの開発

－システムの概要と性能確認実験－

Abrasive blasting Systems for Curved Concrete Surfaces

- An Overview and Performance Assessment -

田中寛大* 西山宏一* 石井敏之**

要 旨

高速道路トンネル等で行う補修・補強工事における研掃作業（表面脆弱層の除去作業等）は、片側車線供用下で通行車両への粉塵の飛散を防止しながら、人力施工で行われている。この研掃作業は、高所で無理な姿勢での繰り返し作業となるため、作業効率の低下、処理面のばらつきや作業環境の悪化が問題となっている。このため、これまでに研掃作業を自動化し、道路トンネルや鉄道施設等の工事に適用して作業の効率化や作業環境の改善を図ってきた。しかし、適用範囲は平面に限られていたことから、曲面への対応が求められたため、今回、「曲面天井用研掃システム」を開発した。システムの性能を確認するため、実大模擬トンネルを用いた実験を行った。その結果、曲面の研掃作業の自動化によって、処理面のばらつきが非常に少ない研掃が可能になった。更に、高所等の危険な場所での作業を少なくすることによる安全性の向上、及び粉塵等の吸引による作業環境の改善が確認された。

キーワード：補修工事、研掃、自動化、効率化、粉塵防止

1. まえがき

高度経済成長期に整備されたコンクリート構造物の老朽化が顕在化しており、その延命化に、剥落防止材の接着やコンクリートの増厚等の補修・補強工事が行われている。その前処理として、既設コンクリート表面の脆弱層、劣化塗膜の除去及び目荒し等の研掃作業が必要となる。この研掃作業は、写真－1に示すようにディスクサンダや高水圧のウォータージェット等を用いて人力により行われていた。しかし、高所で無理な姿勢での繰り返し作業となるため、作業効率の低下や処理面のばらつき、



写真－1 人力による壁面の研掃作業

更に、粉塵等による作業環境の悪化等の問題点が指摘されていた。

このような状況から、研掃作業を自動化するため、ウォータージェットを用いた湿式の天井、壁・柱及び床用の研掃装置¹⁾と研削ビットを用いた乾式の天井用の研掃装置²⁾を開発し、道路トンネル、上下水道施設及び地下鉄施設の工事に適用してきた。しかし、これら装置は平面のコンクリート表面の研掃作業に限られていた。

このことから、今回、トンネル等の曲面を有するコンクリート表面の研掃作業を自動化した「曲面天井用研掃システム」を開発した。本報では、曲面天井用研掃システムの概要と実大模擬トンネルを用いた性能確認実験の結果について報告する。

2. 曲面天井用研掃システムの概要

曲面天井用研掃システム（以下、研掃システム）の概要を図－1、仕様を表－1に示す。

本研掃システムは、地上からの研掃条件の入力操作で曲面の研掃作業を自動化し、同時に発生した粉塵等の飛散を防止するものである。対象となるものは、道路トンネル等のコンクリート構造物の研掃であり、図－1に示

* 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

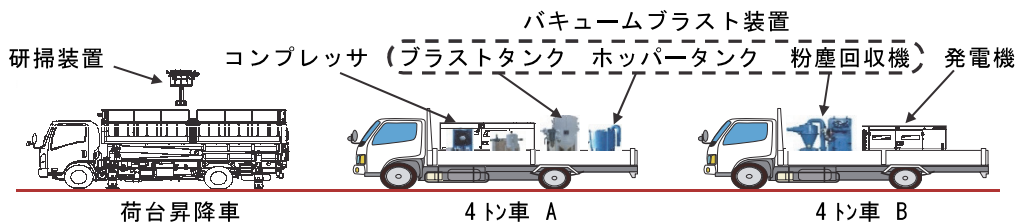


図-1 曲面天井用研掃システムの概要

すようにシステムの運搬・移動には3台の車両を使用し、現地でホース・ケーブルを接続して研掃作業が行えるようにした。また、曲面の研掃を対象にすることから、研掃方法には、小型で表面に非接触で実績のあるバキュームブラスト工法を採用した。

本システムは、以下の4つの装置から構成される。

- i. 噴射機を曲面の研掃面に押し付けながら正確に移動させる「研掃装置」
- ii. 噴射機からプラスト材を噴射して研掃し、同時に発生した粉塵等を吸引する「バキュームブラスト装置」
- iii. 研掃装置を運搬し、現地で昇降機として利用できる「荷台昇降車」
- iv. 発電機やコンプレッサ等の「付帯装置」

2.1 研掃装置

研掃装置の外観を写真-2、形状を図-2、研掃ヘッドの外観を写真-3、4に示す。

研掃装置には、写真-2、図-2に示すように、3層のフレーム上に、研掃ヘッドを上部に配した研掃機が設置されている。このフレームには、研掃面積を広くするため、トンネル軸方向に研掃装置を平行にする回転フレーム（中段）と、横行方向の移動量を大きくするスライドフレーム（上段）を設けた。研掃機は、スライドフレーム上を一定の速度での走行方向（トンネル軸方向）と横行方向（トンネル軸直角方向）に移動可能で、更に、研掃ヘッドをエアシリンダとボールネジによって鉛直方向に昇降させることができる。この研掃ヘッドには回転機構が設けられ、写真-3、4に示すように、4隅にキャスタを取り付けた荷重計、傾斜計及びロータリアクチュエータが取り付けられている。更に、曲面に一定の荷重で押し付けながら研掃を行う2台の噴射機が設置されている。

また、研掃装置は、地上のタッチパネルから研掃条件を入力することにより、噴射機を一定の荷重で曲面に押し付けながら、一定の速度で移動させることで、研掃作業の自動化が図られている。

以下に、研掃装置の主な特長を示す。

- a. 研掃ヘッドを曲面に接触させる方法

写真-2に示す研掃装置に設置された水平・鉛直距離計（トンネル表面までの距離を測定）より研掃面の角度を算出し、ロータリアクチュエータと傾斜計で研掃ヘッ

表-1 曲面天井用研掃システムの仕様

装置名	項目	仕様
研掃装置	寸法	L 3.0×W 1.75×H 1.954 m
	重量	10.7 kN
	回転角度	0~±5 deg
	走行範囲	2.16 m (トンネル軸方向)
	横行範囲	1.9 m (トンネル軸直角方向)
	上昇範囲	0.8 m
	走行速度	0~10.0 m/min
	施工高さ	4.0~7.5 m
バキュームプラスト装置	施工幅	90~100 mm (噴射機2台)
	プラストタンク	容量: 330 L (研削材貯留)
	アフタークーラ	エア駆動式
	ホッパータンク	容量: 300 L (研削材回収)
	回収機	バグフィルタ、サイクロン
	ノズル	長方形ノズル 穴径 9.5 mm
運搬車両	研削材	フェロニッケルスラグ材
	荷台昇降車	積載荷重 12 kN、最大高 5 m
付帯装置	コンプレッサ	100 馬力
	発電機	50/60 kVA

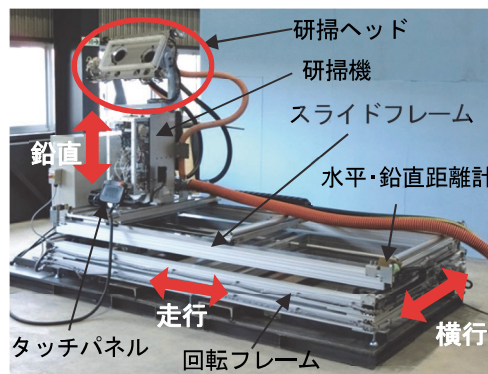


写真-2 研掃装置の外観

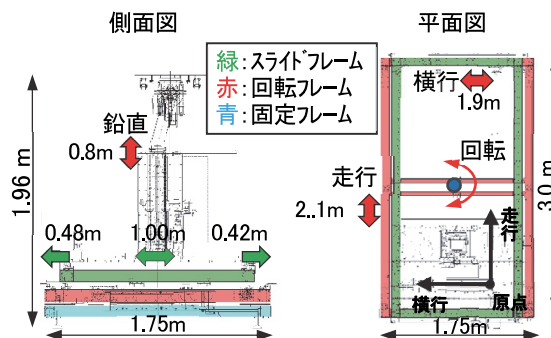


図-2 研掃装置の形状

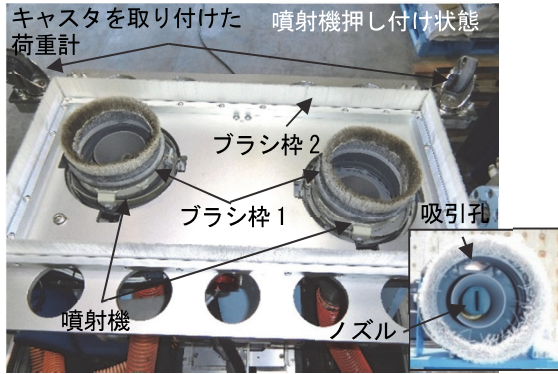


写真-3 研掃ヘッドの外観（研掃面側）

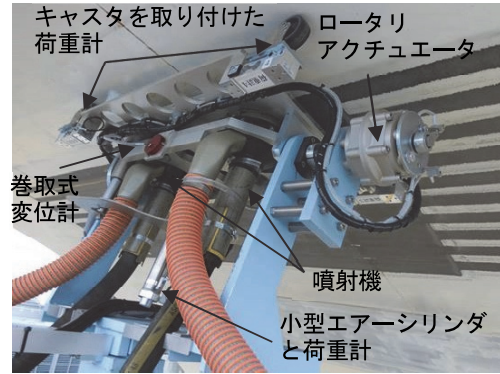


写真-4 研掃ヘッドの外観（研掃機側）

ドを研掃面の角度に設定できるようにした。これによって、研掃ヘッドは、トンネル表面に当たることなく研掃面直下へ迅速に移動でき、ボールネジとエアシリンダの押し上げによってソフトに接触させることが可能となった。また、接触後、ロータリアクチュエータのブレーキを解放することにより、走行及び横行による傾斜角の変動に対応するため自由に回転できるようになる。更に、研掃ヘッドの4隅にキャストを取り付けた荷重計によって、研掃ヘッドと研掃面との接触が判定される。

b. 研掃処理面のばらつきを少なくする方法

研掃ヘッドを押し上げた後、研掃ヘッド内に設けた小型のエアシリンダで噴射機を曲面の法線方向の研掃面に一定の荷重で押し付け、リニアブッシュによって研掃面の不陸に追従できるようにした。これらによって、研掃面と噴射機の距離が一定となり、処理面のばらつきが少なくなった。なお、研掃作業中は、噴射機の押付け荷重と押付け変位を荷重計と巻取式変位計で測定し、設定した研掃条件が保たれるように制御されている。

2.2 バキュームブラスト装置

バキュームブラスト装置の構成を図-3に示す。同装置は、ブラスト材による研掃を行うブラスト装置（ブラストタンク、エアータンク、アフタークーラ）と、発生した粉塵や微小な破片物や噴射後の研削材を吸引し分別する回収装置（ホッパータンク、回収機）からなる。

バキュームブラスト装置は、ブラストタンクへ送られてきた高圧圧縮空気と研削材を混合させたブラスト材を、噴射機内のノズルから噴射することでコンクリート表面を研掃し、同時に発生した粉塵や微小な破片物等をバキューム吸引する。なお、発生した粉塵等の飛散防止は、このバキューム吸引と、写真-3に示す研掃ヘッドの周囲と噴射機の先端に取り付けた2つのブラシ枠で行われている。

2.3 荷台昇降車

荷台昇降車の外観を写真-5に示す。荷台昇降車は、12kN までを積載して道路上の運搬が行え、現地では作業床の拡幅・昇降、更に移動用ローラを装備したローラジャッキにより、作業床を上げたまま車両移動ができる。

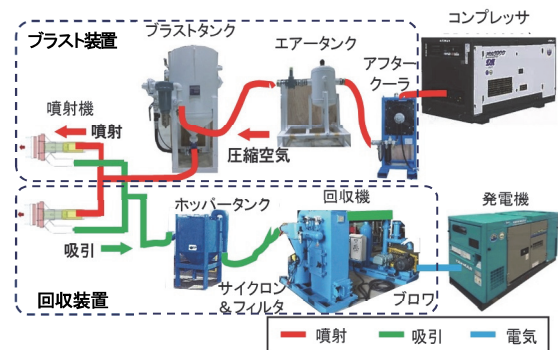


図-3 バキュームブラスト装置の構成



写真-5 荷台昇降車の外観（研掃装置積載）

本研掃システムでは、研掃装置を積載して運搬し、現地で研掃装置の昇降機及び作業床を上昇させた状態での車両移動による研掃装置の位置変更の手段として使用している。

3. 実大模擬トンネルを用いた性能確認実験

性能確認実験は、写真-6に示す、一般社団法人日本建設機械施工協会 施工技術総合研究所が所有する実大模擬トンネル（断面積 66m²、高さ 7.1m、最大幅 11.2m、延長 80m）において、1 車線を工事規制し、車載した研掃システムを工事規制帯に設置後、トンネル軸方向に壁部から天井部までの曲面の研掃作業を行った。確認項目は、自動化による運転状況、施工能力、処理面の状況及び粉塵等の吸引状況とした。



写真一六 実大模擬トンネルの外観



写真一七 性能確認実験の全景

3.1 実験手順

実験状況を写真一七、八、実験手順を図一四に示す。

手順は、写真一七に示すように、工事規制帯に車両を荷台昇降車から順に進入させ、所定の位置に荷台昇降車を設置し、車両間の制御・電源ケーブルやブラスト・吸引ホースを接続する。次に、発電機、コンプレッサ及び研掃装置を起動させ、タッチパネルから「自動研掃」を選択する。図一四において着色したプロセスに示す研掃条件の入力を行うことによって研掃作業の自動化が行われる。また、研掃準備から研掃終了まで、荷重計、変位計、距離計、圧力計、傾斜計等の計測データ及び算出された研掃ヘッドの位置座標等を、自動計測（サンプリング間隔 10Hz）により保存した。

研掃条件は、予備実験より定めていた、ブラスト噴射圧 0.3MPa、研掃ヘッド押し上げ圧 0.5MPa、噴射機の押付け荷重 200kN/2 台、研掃ヘッドの走行速度 6m/min で、図一五に示すトンネル軸方向に、壁部（1 ライン）、肩部（2 ライン）、天井部（3 ライン）の 3 つのラインに分けて研掃するものとした。

研掃作業の人員は 3 名で、車両 3 台の運転手が、研掃作業時にタッチパネルの操作とホース類の補助や引き直しを行うことにした。

3.2 性能確認実験の結果

a. 自動化による運転状況

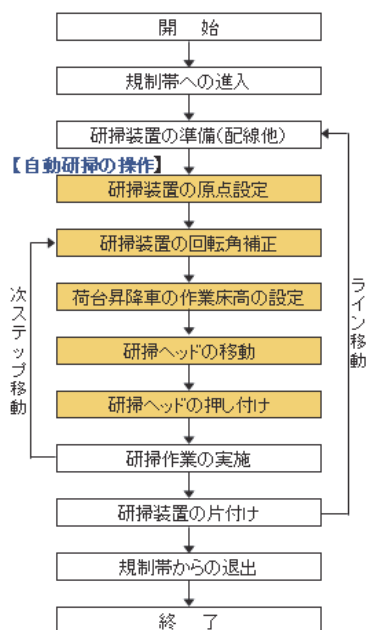
(a) 自動化運転状況

天井部の研掃作業の自動化による研掃ヘッドの走行位置と横行位置を図一六、研掃ヘッドの鉛直位置と研掃面角度を図一七に示す。

研掃ヘッドは、走行方向に 0.0~2.16m を 10 往復の計 20 回、横行方向に 0.90~0.43m へ移動し、鉛直方向に 0.52m 上昇し、傾きは 58~76deg へと変化した。横行と鉛直の移動は走行が反転する時に行われ、走行の反転ごとに、横行移動は 65~72mm、鉛直上昇は 21~32mm ずつであった。これらより、研掃ヘッドは、走行時には横行位置と鉛直位置及び研掃面角度に変化がなく、トンネル軸方向と平行に移動し、反転時には曲面に沿って天井部方向、すなわち道路中央側へ移動することを確認した。なお、鉛直方向の上昇量は、エアシリンダ（500mm）



写真一八 性能確認実験の自動化運転状況



図一四 性能確認実験の手順

とボールネジ（300mm）の和である。横行時の鉛直方向の上昇はエアシリンダのみで行っているが、走行移動中にその横行時の上昇量を 5 : 3 の割合でエアシリンダとボールネジに再配分し直す制御（ボールネジは伸長し、エアシリンダは収縮するが、鉛直位置は変わらない制御）を行っている。

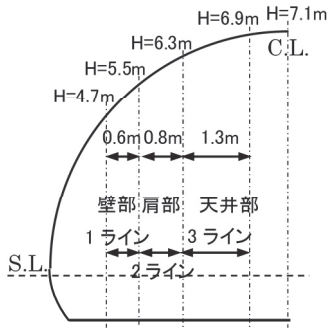


図-5 研掃作業時のライン設定

研掃ヘッドの4隅にキャストを取り付けた荷重計の出力値を荷重1～荷重4とし、その総和を研掃ヘッドの押付け荷重とする。自動化時の研掃ヘッドの押付け荷重の変動を確認するため、天井部での研掃ヘッドの押付け荷重の時刻歴を図-8に示す。走行時の研掃ヘッドの押付け荷重は約1300Nで、荷重1～荷重4の平均が200～400Nであった。研掃ヘッドに作用する荷重は変動が少なく安定しており、研掃ヘッドは曲面に安定した状態で押し付けながら移動していることが確認できた。また、走行反転時に荷重が低下する傾向がみられるが、これはエアシリンダの追随の影響と考えられる。

以上より、自動化における研掃ヘッドは、曲面を押し付けながら安定して滑らかに移動していることが確認できた。

(b) 研掃ヘッドの接触判定

研掃ヘッドの研掃面への接触判定は、荷重1～荷重4を用いて、①ロータリアクチュエータによる研掃ヘッドのブレーキの開放、②研掃ヘッドの確実な曲面への接触、の2種類により行っている。

研掃ヘッドの曲面への接触状況を確認するため、図-8において研掃ヘッドが接触する時間255～260sec間の時刻歴を図-9に示す。初めに、荷重1が256.2sec時点で研掃面に接触し、0.6秒後に荷重2、その0.4秒後に荷重3と4が同時に接触している。最初にブレーキ解放条件の5N以上の荷重になったのは荷重1で、接触直後(0.1秒後)に77Nと増加し、ロータリアクチュエータのブレーキが解放され、研掃ヘッドが回転できる状態になったことを示している。次に、荷重2と荷重3の対角荷重の個々が1.2秒後にともに200Nを超え、同時に押付け荷重が600N以上(接触条件)となっている。このことから、研掃ヘッドが確実に接触したと判断できる。図-8と同様に、接触直後の荷重1～4は220～380Nでほぼ均等になっており、曲面にキャストを介して研掃ヘッドが均等に接触していることが分かる。

(c) 噴射機と研掃面の距離(研掃面のばらつき)

天井部の噴射機の研掃面への押付け荷重と押付け変位の時刻歴を図-10に示す。

押付け荷重は200Nとしていたが、370N程度と85%程度大きく押し付ける結果を示した。これは、噴射機を

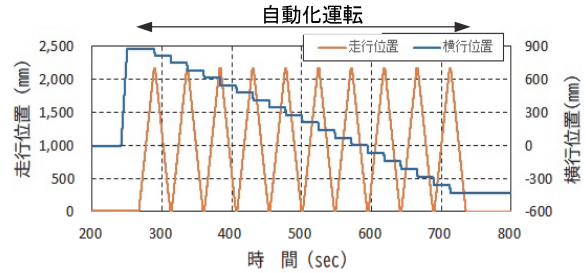


図-6 研掃ヘッドの走行位置と横行位置

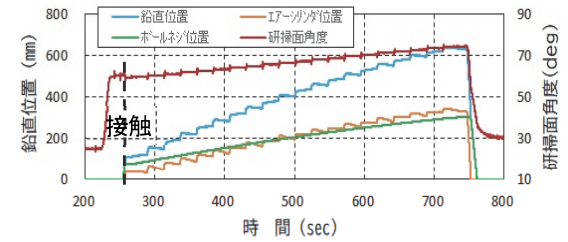


図-7 研掃ヘッドの鉛直位置と研掃面角度

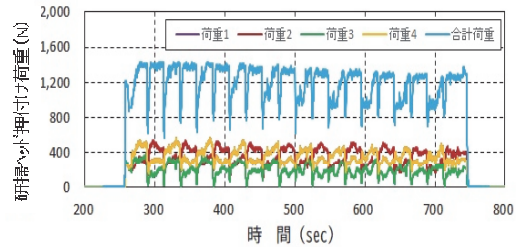


図-8 研掃ヘッドの押付け荷重

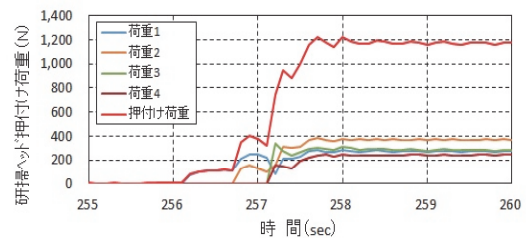


図-9 接触時の研掃ヘッドの押付け荷重

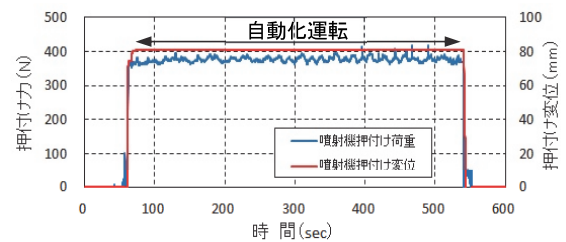


図-10 噴射機の押付け荷重と押付け変位

押し付ける小型エアシリンダ(断面積:1257mm²)の設定圧が0.3MPaと高く設定したことによる。一方、押付け変位は、設定の押付け荷重で60～70mm程度となるが、今回の実験では押付け荷重が大きかったため、押付け変位が80mm程度と大きくなり、ブラシを少し押し潰す状態になった。しかし、押付け荷重、押付け変位ともに研掃時にはほぼ一定となっており、ノズルから研掃面

までの距離が一定に保たれていることが分かる。これらより、自動化によって安定した研掃作業が行われており、処理面の状況は写真-9に示すように、大きなばらつきもなく施工できていることが分かる。

(d) 研掃ヘッドの走行速度

天井部の研掃ヘッド走行位置の時刻歴の一往復例を図-11に示す。自動化による研掃ヘッドの走行速度は6.0m/min (100mm/s) に設定している。図-11に示している近似式より、速度が100mm/sになっていることから、設定した速度に制御されていることを確認した。

b. 施工能力

研掃システムの施工能力を確認するため、時間当たりの研掃面積を求めた。研掃システムが規制帯に入り配管・配線等を行う時間を準備時間、タッチパネルによる研掃操作と次ステップへの車両移動時間を合わせた時間を研掃時間、研掃作業が終了し配管・配線の切り離しを行い規制帯から退出するまでの時間を撤去時間とした。なお、施工能力実験では、各ラインの施工長を16m (1ステップの施工長2m、研掃装置移動を8ステップ) として、研掃を行った。研掃作業後の次ステップへの移動は、荷台昇降車の作業床の高さを変えずに、荷台昇降車を運転しながらローラジャッキを使って前方に約2m移動させた。

各ラインの施工時間を表-2に示す。研掃システムの1時間当たりの研掃面積は10.9~14.3m²/時間で、平均12.1m²/時間であった。また、施工能力は天井部が壁部に比して高い結果になった。これは、研掃ヘッドの走行回数が、壁部で13回、肩部で16回、天井部で20回となっており、天井部に近づくほど走行回数が多くなったためと考えられる。壁部で走行回数が少ないのは、研掃ヘッドの横行移動量が最大の1.9mになる前に、鉛直移動量の限界値0.8mに達するためである。

c. 処理面の状況

処理面は、写真-9に示すように一様に研掃されているが、研掃走行間の一部には未研掃の部分が見られた。しかし、これは、研掃ヘッドの横行移動時に伴う隙間がなく、研掃ヘッドに取り付けている2台の噴射機の間隔を少し広く設定したことが原因と考えられる。

d. 粉塵等の吸引状況

粉塵の漏れを確認するために、実験では、研掃ヘッドに取り付けてあったブラシ枠2を取り外し、噴射機のブラシ枠1からの漏れを目視で確認することにした。

ブラスト噴射圧0.3MPa、走行速度4~8m/minでは漏れを視認できず、確実に粉塵が吸引されることを確認した。

4. あとがき

性能確認実験より、以下のことを確認し、本研掃シス

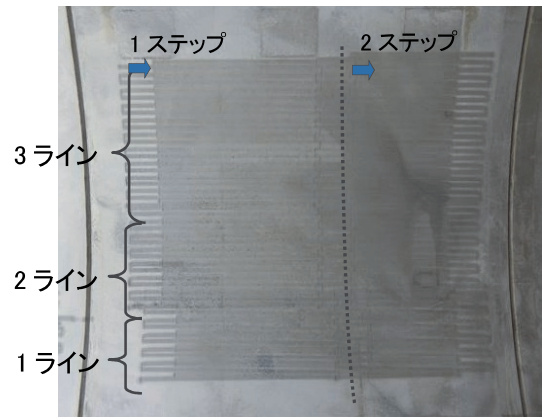


写真-9 自動化運転後の処理面の状況

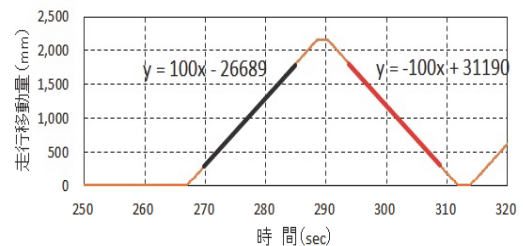


図-11 研掃ヘッドの走行位置と走行速度

表-2 施工時間と施工能力

項目		1ライン	2ライン	3ライン
施工時間(時間)	準備	0.25	0.28	0.23
	研掃	1.27	1.27	1.55
	撤去	0.20	0.25	0.25
	合計	1.72	1.80	2.03
研掃面積(m ²)		18.7	22.5	29.2
単位時間当たり(m ² /時間)		10.9	12.5	14.3
1人時間当たり(m ² /人・時間)		3.6	4.2	4.8

テムを現場に適用できる見通しが得られた。

- i. 実大模擬トンネルにおける曲面コンクリート表面の研掃作業を自動化による運転で行えること
 - ii. 発生した粉塵の飛散を防止できること
 - iii. 処理面のばらつきを非常に少なくできること
 - iv. 研掃作業人数は一般の作業員3名で行えること
- 今後は、現場への適用を図り、安全性の向上及び操作性の向上等システムの完成度を高めていきたい。

【参考文献】

- 1) 石井敏之、「ウォータージェットを用いたコンクリート表面処理機の開発と現場適用」、平成26年度新技術・新工法に関する講習会、pp.35-38、2015.2
- 2) 丸山八大、津村匡洋、石井敏之、「天井用車載型乾式研掃装置の自動化運転による地下鉄補修工事への適用について」、令和元年度建設施工と建設機械シンポジウム、pp.167-172、2019.12

端部 RC 造・中央部 S 造で構成される複合構造梁の開発

－終局強度と靱性能の評価－

Development of Hybrid Beam Consisted of H-Shaped Steel and Reinforced Concrete - Evaluating Ultimate Strength and Deformation Capacity -

岸本 剛* 山上 聡* 小山慶樹*

要 旨

梁の端部を RC 造、中央を S 造とする複合構造梁（ハイブリッド梁）は、S 造単一の梁と比較して部材の剛性を高め変形を抑えることができる。一方で、S 造の梁（S 梁）を RC 造の梁（RC 梁）に埋め込んで両者の応力伝達を図る場合、てこ機構により RC 梁に作用するせん断力が S 梁のせん断力よりも大きくなり、それは埋め込み長さが短いほど大きくなるため、一般的に埋め込み長さは鉄骨せいに対し 2.5 倍以上必要とされる。今回、埋め込み長さを鉄骨せいの約 2 倍と従来よりも短くしたハイブリッド梁の構造実験を行い、構造性能を明らかにするとともに、せん断余裕度と靱性能の関係や終局強度の算定方法の妥当性を確認した。

キーワード：複合構造梁、鉄筋コンクリート造、鉄骨造、せん断強度、靱性能

1. まえがき

物流倉庫や事務所ビルなどの建築物には、RC 造よりも軽量で大スパンが可能となる S 造が多く利用される。さらに、近年の鉄骨の材料費や加工費の高騰などから経済的な設計を実現するために、梁を S 造としたままで柱のみ RC 造とする混合構造が用いられることも多くなっている。しかし、この構造形式では一般に異種構造間の応力伝達を柱梁接合部で行うため、接合部の収まりが複雑になり、施工性の悪さが課題となっている。

これを解決する方法として、図-1 に示す柱と梁端を RC 造（以下、RC 梁）とし、梁中央を S 造（以下、S 梁）として、S 梁を RC 梁に埋め込む複合構造梁（以下、ハイブリッド梁）が注目されている。ハイブリッド梁では柱梁接合部を RC 造とするため施工性が良いことに加え、梁端が RC 造なので部材の剛性が高まり、梁のたわみや架構の変形角を小さくできる利点がある。

一方、このような埋め込み形式で応力伝達を図る場合、図-2 に示すように、S 梁が RC 梁に埋め込まれる区間（以下、切り替え区間）では、S 梁のせん断力は支圧反力によるてこ機構により RC 梁へ伝達され、それに伴い RC 梁のせん断力は S 梁のせん断力よりも大きくなる。この支圧反力に対し、図-3 に示すように、切り替え区間の始端側（S 梁側）、終端側（柱フェース側）にせん

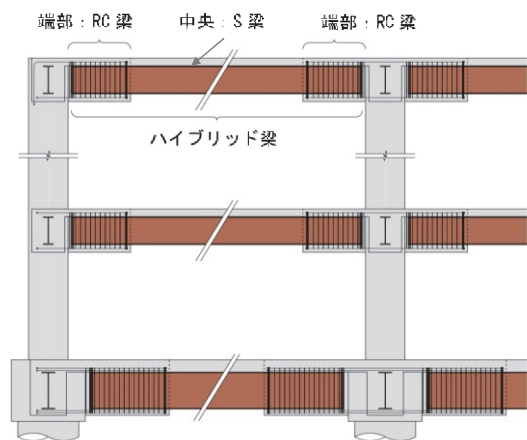


図-1 ハイブリッド梁を用いた架構例

断補強筋を高密度に配筋（以下、集中補強筋）し、その引張力で抵抗する方法が提案されている。しかし、てこ機構に伴う支圧反力は切り替え区間が短いほど大きくなることから、埋め込み形式では S 梁せいの 2.5 倍以上埋め込ませる必要がある。そのため、設計上の制約を大きく受けるものとなっている。

そこで、筆者らは切り替え区間を鉄骨せいの 2 倍程度まで小さくしたハイブリッド梁の開発を目指し、てこ機構を考慮したせん断力に対する集中補強筋量の算定方法

*技術研究所建築研究グループ

や、せん断余裕度（曲げ強度に対するせん断強度の比）と靱性能の関係について明らかにするため構造実験を行った。

2. 実験概要

2.1 試験体概要

表-1 に試験体一覧を、表-2 に材料試験結果を、図-4 に試験体形状を示す。試験体は実建物で適用するハイブリッド梁（梁内法長さが11~13m程度）の縮小モデルで、RC梁の曲げ降伏が先行するように計画した7体（No.1~7）、せん断破壊が先行するように計画した1体（No.8）の計8体である。

No.1~No.6は、集中補強筋の配筋量や形状、せん断補強筋が曲げ強度や靱性能に与える影響を確認するための縮尺1/2.5の試験体である。No.1は基準試験体で、集中補強筋の中子筋形状を両端135°フック形状とし、外周筋と合わせ計4本掛けを1組とし、貫通型の機械式定着具の両側に計4組配筋している。No.1に対しNo.2は同形状の集中補強筋を5組にした試験体、No.3はせん断補強筋比を1/2にした試験体である。No.4、No.5はNo.3に対し、集中補強筋量を因子とした試験体で、梁主筋には非貫通型の機械式定着具を用い、その片側にNo.3と同様の形状でNo.4では3組、No.5では2組配筋している。ここで集中補強筋量は、後述する計算で求まる必要量に対する実際の配筋量の比（集中補強筋余裕度）が、埋め込み始端側でNo.1とNo.3が1程度、No.4とNo.5が1以下になるように計画している。また、No.6は集中補強筋の中子筋の形状を溶接閉鎖型とし計6本掛けを3組配筋した試験体である。

No.7、No.8 は実大に近いスケールで曲げ強度やせん断強度を確認するため、載荷装置の上限となる縮尺 1/2で計画した。集中補強筋の形状は No.6 と同じとし、できるだけ多く配筋できるように機械式定着具の直上にも

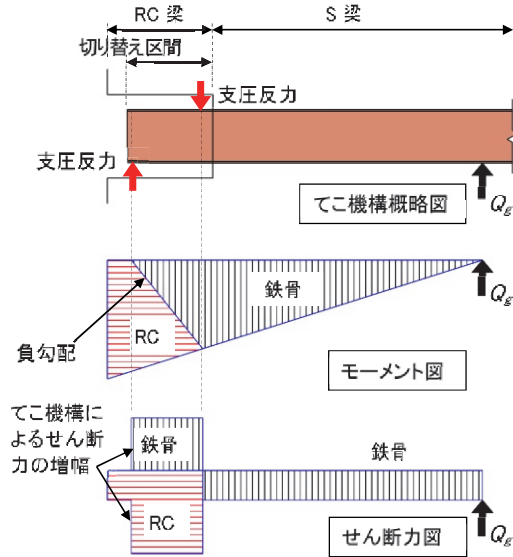


図-2 応力伝達モデル

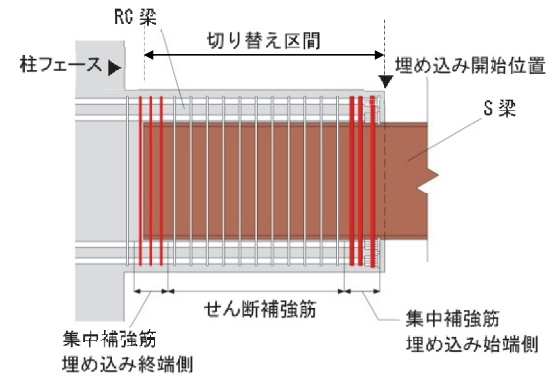


図-3 RC梁の詳細例

集中補強筋の一部を配置している。No.8 はせん断破壊となるように RC 梁幅とせん断補強筋を減らした試験体である。なお、試験体共通で設計基準強度は $Fc36$ とし、RC梁の切り替え区間を鉄骨せいの約2倍とした。

表-1 試験体一覧

試験体	試験体長 L (mm)	RC梁								S梁 ⁴⁾							
		断面 $b_c \times D_c$ (mm)	長さ L_{rc} (mm)	梁主筋 ¹⁾	せん断補強筋 ²⁾		形状	集中補強筋 ³⁾		断面	長さ L_s (mm)	切り替え区間 L_{src} (mm)					
					配筋	pw (%)		埋め込み始端側 配筋	埋め込み終端側 集中補強筋 余裕度								
No. 1	2480	400x560	800	6/2-D16	4-S6@50	0.64	A	4-S6x4組	1.04	4-S6x3組	1.07	BH-360x120 x6x12	1680	740 (2.06)			
No. 2								4-S6x5組	1.29		1.05						
No. 3								4-S6x4組	1.04		1.07						
No. 4					3-S6@75	0.32	B	4-S6x3組	0.73	1.00							
No. 5								4-S6x2組	0.50	4-S6x2組	0.69						
No. 6								4-S6@50	0.64	C	6-S6x3組				1.04	4-S6x3組	0.95
No. 7	2425	650x800	1075	8/2-D19	4-S8@60	0.51	C	6-S8x3組	0.98	4-S8x4組	1.39				BH-500x200 x9x16	1350	1000 (2.00)
No. 8		450x800		8/6-D19	4-S8@150	0.30		6-S8x4組	1.09	1.15	H-500x200 x10x16						

1) 梁主筋の鋼種、D16はSD390、D19はSD490、2) せん断補強筋の鋼種、全試験体785N/mm²級、3) 集中補強筋の形状、A:非溶接閉鎖型の中子筋を貫通タイプ機械式定着具の両側に配筋、B:非溶接閉鎖型の中子筋を非貫通タイプ機械式定着具の内側に配筋、C:溶接閉鎖型の中子筋を非貫通タイプ機械式定着具上に配筋、詳細は図-4参照、集中補強筋の鋼種、全試験体785N/mm²級、4) 鉄骨の鋼種はSN490B、切り替え区間 L_{src} はRCへ埋め込まれた鉄骨の長さ、()内は鉄骨せいに対する比率

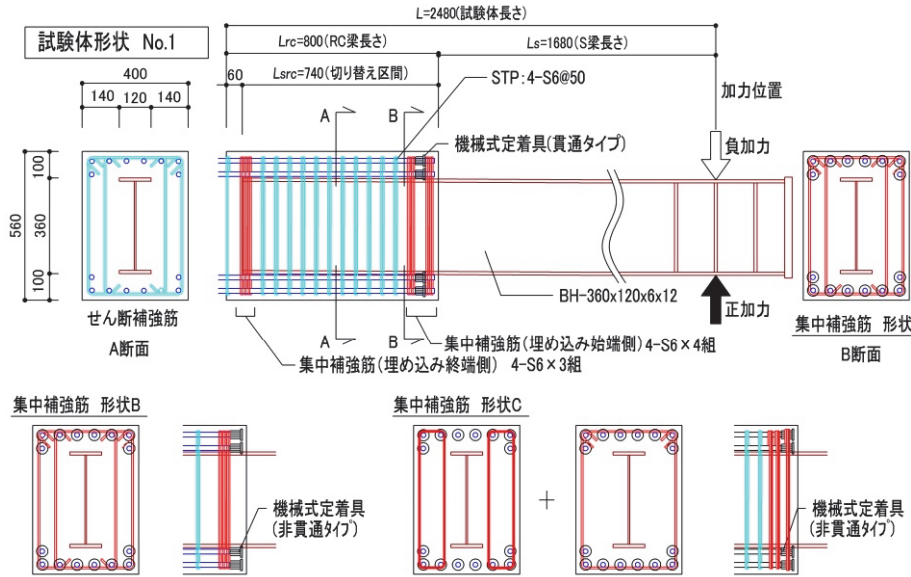


図-4 試験体形状

2.2 加力方法

載荷装置を図-5に示す。ハイブリッド梁の自由端側の先端に取り付けた1000kN押し引きジャッキにて片持ち梁形式で載荷した。その際、載荷に伴う変形により梁にねじれが生じないように、先端に面外振れ止め装置を取り付けた。

3. 実験結果および検討

3.1 荷重-部材角関係および破壊性状

写真-1にNo.1、No.5、No.8の $R=30.0 \times 10^{-3} \text{rad}$ における破壊状況を、図-6に試験体の荷重と部材角の関係を示す。また、図中には、各ひび割れ発生時期、および鉄筋の降伏時期も併せて示す。

No.1では、 $R=3.7 \times 10^{-3} \text{rad}$ にRC梁の側面に曲げひび割れが発生し、埋め込み始端側の小口面（以下、小口面）には $R=5.0 \times 10^{-3} \text{rad}$ に上フランジから斜めに伸びるひび割れが、 $R=7.3 \times 10^{-3} \text{rad}$ に下フランジから斜めに伸びるひび割れが発生し側面に繋がった。また、 $R=7.3 \times 10^{-3} \text{rad}$ に側面の中央にせん断ひび割れが発生して剛性が低下し、 $R=9.3 \times 10^{-3} \text{rad}$ に埋め込み始端近傍のS梁のフランジが、 $R=18.7 \times 10^{-3} \text{rad}$ に梁主筋が降伏ひずみに達し、 $R=30.0 \times 10^{-3} \text{rad}$ で最大荷重となった。その後、小口面のひび割れが大きく開き荷重が低下した。集中補強筋は降伏ひずみには達していない。S梁のフランジは降伏ひずみに達したものの、その後のひずみの伸びは梁主筋のひずみの伸びに比べ小さかったことから（図-8参照）、RC梁の曲げ降伏先行後のせん断破壊と判断した。

集中補強筋の少ないNo.5は、 $R=17.9 \times 10^{-3} \text{rad}$ に集中補強筋が降伏ひずみに達し、 $R=20.0 \times 10^{-3} \text{rad}$ に最大荷重に達した。最大荷重時には梁主筋は降伏ひずみに達していない。

表-2 材料試験結果

(a)鉄筋、鉄骨			
呼び名	試験体	σ_y N/mm ²	ϵ_y ×10 ⁻³
S6	No.1,2,3	979	5.09
	No.4,5	945	4.96
	No.6	905	4.64
S8	No.7,8	1037	5.41
	No.1,2,3	439	2.29
D16	No.4,5	438	2.23
	No.6	448	2.37
D19	No.7,8	452	2.43
PL12	No.1,2,3	365	1.79
	No.4,5	352	1.92
	No.6	367	1.76
PL6	No.1,2,3	398	1.95
	No.4,5	403	2.30
	No.6	383	1.76
PL16	No.7	371	1.77
	No.8	394	1.87
PL9	No.7	381	1.84
PL10	No.8	414	1.88
(b)コンクリート			
試験体	σ_B N/mm ²	E_c kN/mm ²	
No.1	38.2	30710	
No.2	42.7	31980	
No.3	38.2	30410	
No.4	42.3	31600	
No.5	38.9	29800	
No.6	41.3	32560	
No.7	40.0	31260	
No.8	37.7	31660	

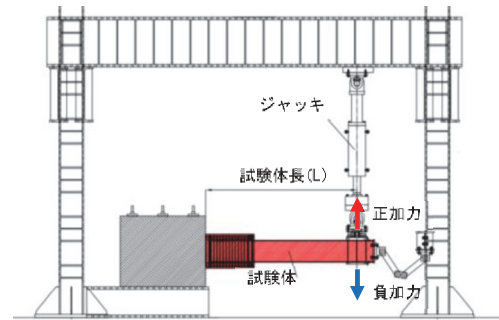


図-5 載荷装置

その後、RC梁の埋め込み始端側において鉄骨フランジ上下のコンクリートの剥落が進み荷重が低下し、小口面での支圧破壊となった。一方、No.1より集中補強筋量を増したNo.6は、最大荷重時 ($R=30.0 \times 10^{-3} \text{rad}$) まではNo.1と同様の破壊状況を示した。さらに、 $R=40.0 \times 10^{-3} \text{rad}$ まで荷重低下が緩やかであった。

No.7は、 $R=1.6 \times 10^{-3} \text{rad}$ にRC梁の側面に曲げひび割れが発生し、小口面には $R=2.5 \times 10^{-3} \text{rad}$ に上フランジから斜めに伸びるひび割れが、 $R=5.0 \times 10^{-3} \text{rad}$ に下フランジから斜めに伸びるひび割れが発生しRC梁側面に繋がった。その後、S梁のフランジ、梁主筋が降伏ひずみに達した後、 $R=30.0 \times 10^{-3} \text{rad}$ で最大荷重に達した。その後、荷重が低下し、No.1と同様にRC梁の曲げ降伏後のせん断破壊となった。一方、No.8は、 $R=15.0 \times 10^{-3} \text{rad}$ で最大荷重に達した後、RC梁側面のひび割れが進展するとともに荷重が急落した。梁主筋の降伏はみられず、RC梁でのせん断破壊となった。

図-7に正加力時における包絡線の比較を示す。荷重は4章に示すRC梁曲げ強度時の梁せん断力 ($v_c Q_{mu}$) で

無次元化している。集中補強筋の異なるNo.1、No.2、No.6では、 $R=20.0 \times 10^{-3} \text{rad}$ まで同様の包絡線を示したが、それ以降の荷重および変形性能に差がみられた。No.1に対し、集中補強筋量を増加させたNo.2、No.6は、No.1に比べ最大荷重は大きくなり、荷重低下も緩やかになった。同様に、集中補強筋の異なるNo.3、No.4、No.5の比較では、No.3とNo.4の包絡線はほとんど変わらないが、支圧破壊したNo.5のみ最大荷重が小さくなった。また、せん断補強筋比の異なるNo.1、No.3の比較では、せん断補強

筋の多いNo.1の方が荷重低下が緩やかであり、せん断補強筋比の増加により靱性能を向上させる効果がみられた。

3.2 切り替え区間の曲げモーメントの伝達

図-8に $R=10 \times 10^{-3}$ 、 $20 \times 10^{-3} \text{rad}$ における切り替え区間の鉄骨のフランジと RC 梁の梁主筋のひずみ分布を試験体 No.1、No.7 について示す。フランジのひずみは埋め込み開始位置を最大とし固定端側に向かい概ね直線的に減少している。一方、梁主筋のひずみはフランジのひずみに対し逆勾配で大きくなっており、 $R=20 \times 10^{-3} \text{rad}$ では

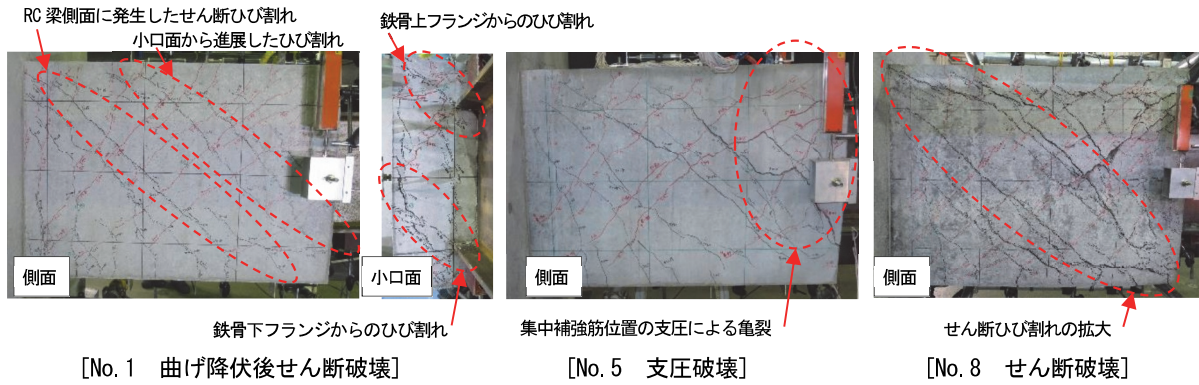


写真-1 破壊状況 ($R=30.0 \times 10^{-3} \text{rad}$)

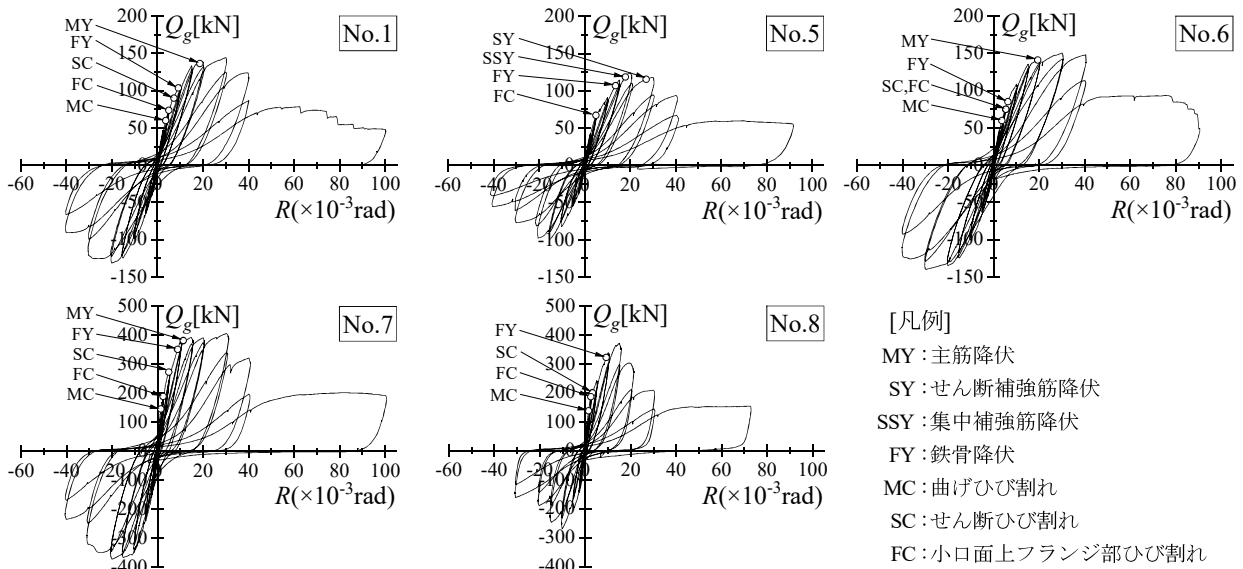


図-6 荷重一部材角関係

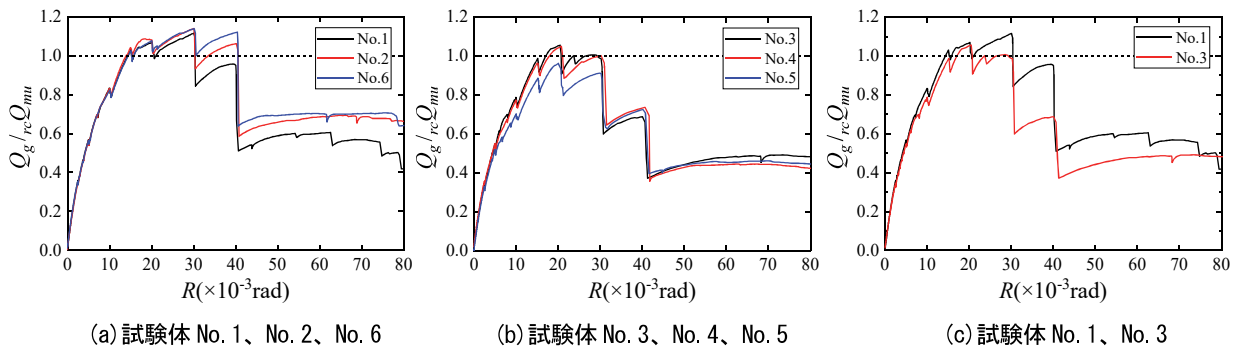


図-7 包絡線の比較

どちらの試験体も固定端側で降伏ひずみを大きく超えていた。これにより、S梁からRC梁に曲げモーメントが伝達され、RC梁の端部で曲げ降伏に至ったことがわかる。

3.3 切り替え区間の鉄骨のせん断力倍率

図-9に切り替え区間における鉄骨ウェブのひずみ測定位置とせん断力倍率を、図-10に試験体 No.1、No.6、No.7のR=10×10⁻³、20×10⁻³、最大荷重時のR=30×10⁻³radにおける鉄骨のせん断力倍率αを示す。αは切り替え区間の鉄骨に生じるせん断力(Q_s)をS梁のせん断力(Q_g)で除した値とする。ここで、Q_sは鉄骨ウェブに貼り付けたゲージからせん断応力度を計算し、各断面位置の応力分布を図-9のように仮定して求めた。各試験体ともほとんどの位置でαは1を上回った。また、最大荷重時にはNo.1やNo.6で、αは最大で2倍以上、No.7で1.5倍程度となっており、切り替え区間の鉄骨に生じるせん断力がS梁のせん断力よりも大きくなっていることがわかる。

同図に合わせて、計算による倍率(計算値)を実線で示す。計算値(α_c)は、図-9に示す支圧反力(Q_{B1}、Q_{B2})が埋め込み始端側、終端側の集中補強筋位置に互いに逆向きに作用すると仮定し、切り替え区間の鉄骨に生じる曲げモーメントが集中補強筋の終端側で0になるとして、力の釣合いより式(1)で求めた。いずれの実験結果も式(1)による計算値を下回っていることから、式(1)によるせん断力倍率は実験値を安全に評価することがわかる。

$$\alpha_c = \frac{l_{B1}}{l_{B2}} \quad (1)$$

ここで、l_{B1}:加力点から集中補強筋(始端側)までの距離(mm)、l_{B2}:集中補強筋間距離(mm)

3.4 せん断補強筋、集中補強筋のひずみの推移

図-11に曲げ降伏後せん断破壊したNo.1、小口面で支圧破壊したNo.5、せん断破壊したNo.8の集中補強筋も含めたせん断補強筋のひずみ分布を示す。No.1とNo.5では埋め込み始端側のひずみが大きくなっており、埋め込み側の支圧反力が大きくなっていることがわかる。No.1はせん断補強筋と集中補強筋は降伏ひずみには達していないが、No.5は最大荷重時に降伏ひずみに達し

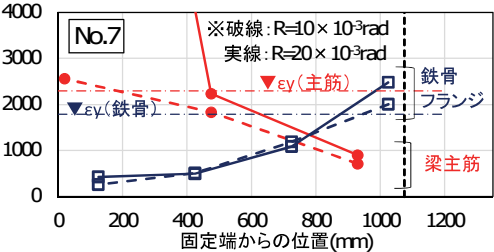
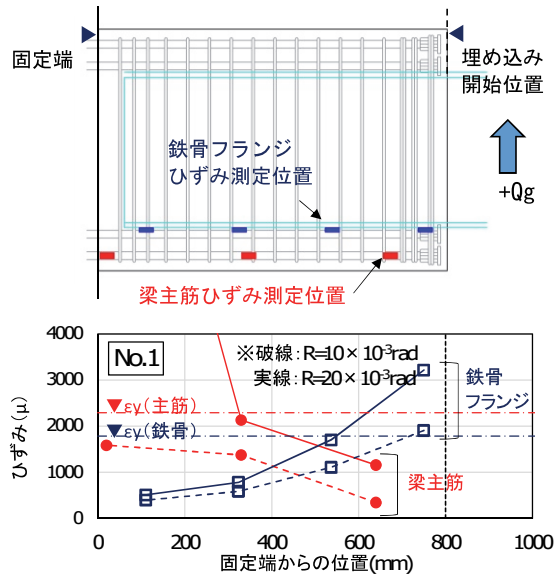


図-8 鉄骨フランジ、梁主筋のひずみ分布

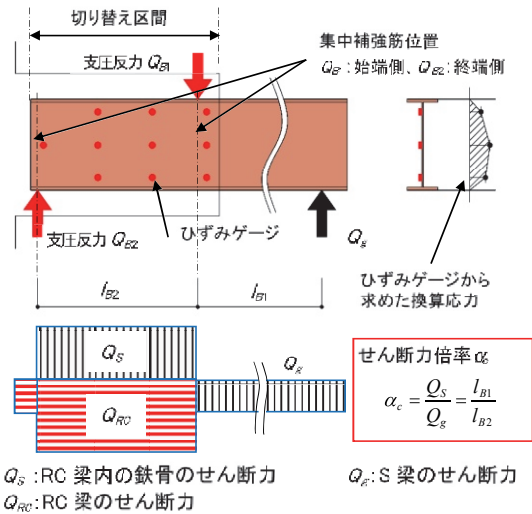
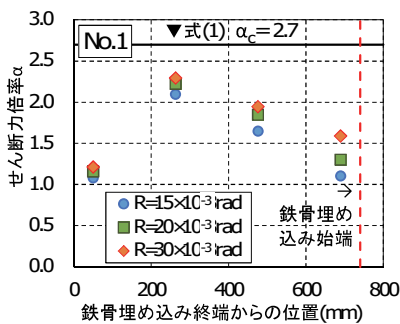
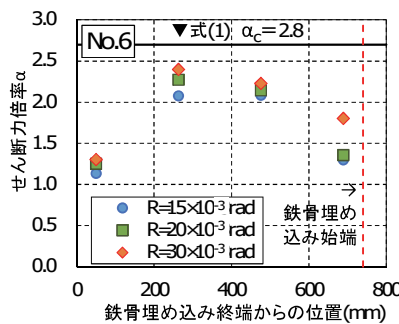


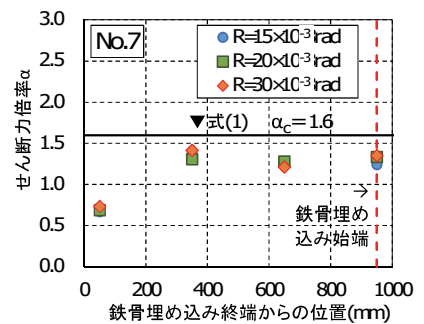
図-9 鉄骨のひずみ測定位置とせん断力倍率



(a) 試験体 No. 1



(b) 試験体 No. 6



(c) 試験体 No. 7

図-10 切り替え区間のせん断力倍率

ていた。また、No.8 は最大荷重時には集中補強筋よりもせん断補強筋のひずみが大きくなっていたが、それでも降伏ひずみの6割程度であった。せん断補強筋に高強度材料を使用した、RC 梁の破壊状況を見るとコンクリートの圧壊でせん断強度が決まったと推測される。

4. 耐力評価

4.1 RC 梁の曲げ強度およびせん断強度

a. 曲げ強度の評価

RC 梁の曲げ強度、および曲げ強度時のせん断力は文献²⁾に準拠した式(2)、(3)による。

$${}_{rc}M_u = 0.9 \cdot m a_t \cdot m \sigma_y \cdot {}_{rc}d \quad (2)$$

$${}_{rc}Q_{mu} = {}_{rc}M_u / L_0 \quad (3)$$

ここで、 $m a_t$: 引張鉄筋断面積(mm²)、 $m \sigma_y$: 引張鉄筋降伏強度(N/mm²)、 ${}_{rc}d$: RC 梁の有効せい(mm)、 L_0 : 試験体長さ(mm)

b. せん断強度の評価

図-9のような応力状態を考えると、RC 梁の切り替え区間では鉄骨と鉄骨以外の RC 梁に作用するせん断力の方向が異なる。そのため、RC 梁のせん断強度には鉄骨幅を除いた幅が応力伝達に有効と考え、文献³⁾のせん断強度式において、RC 梁の有効幅を全幅から鉄骨フランジ幅を引いた幅とする式(4)で評価する。また、せん断強度をハイブリッド梁のせん断力に換算すると、式(5)となる。

$${}_{rc}V_u = \min({}_{rc}V_{u1}, {}_{rc}V_{u2}, {}_{rc}V_{u3}) \quad (4)$$

$${}_{rc}V_{u1} = {}_{rc}Q_{tr} + {}_{rc}Q_{ar}$$

$${}_{rc}V_{u2} = \frac{\lambda \cdot \nu \cdot c \sigma_B + p_{we} \cdot \beta \cdot w \sigma_y}{3} {}_{rc}b_e \cdot {}_{rc}j_e$$

$${}_{rc}V_{u3} = \frac{\lambda \cdot \nu \cdot c \sigma_B}{2} {}_{rc}b_e \cdot {}_{rc}j_e$$

$${}_{rc}Q_{tr} = \mu \cdot p_{we} \cdot \beta \cdot w \sigma_y \cdot {}_{rc}b_e \cdot {}_{rc}j_e$$

$${}_{rc}Q_{ar} = \left(\nu \cdot c \sigma_B - \frac{(1 + \cot^2 \phi) p_{we} \cdot \beta \cdot w \sigma_y}{\lambda} \right) \frac{{}_{rc}b \cdot {}_{rc}D}{2} \tan \theta$$

$${}_{rc}Q_{su} = {}_{rc}V_u \times \frac{l_{B2}}{l_{B1} + l_{B2}} \quad (5)$$

ここで、 ${}_{rc}j_e$: トラス機構に関与する断面の有効せい(mm)、 ${}_{rc}b_e$: トラス機構に関与する断面の有効幅で外側のせん断補強筋芯々間距離から鉄骨フランジ幅を引いた値(mm)、 $w \sigma_y$: せん断補強筋降伏強度(N/mm²)、 β : せん断補強筋有効係数で実験結果より 0.6 とする、 p_{we} : 有効せん断補強筋比、 μ : トラス機構の角度を表す係数で、終局限界状態でのヒンジ領域の回転角 (rad) を曲げ降伏先行型の場合 0.01、

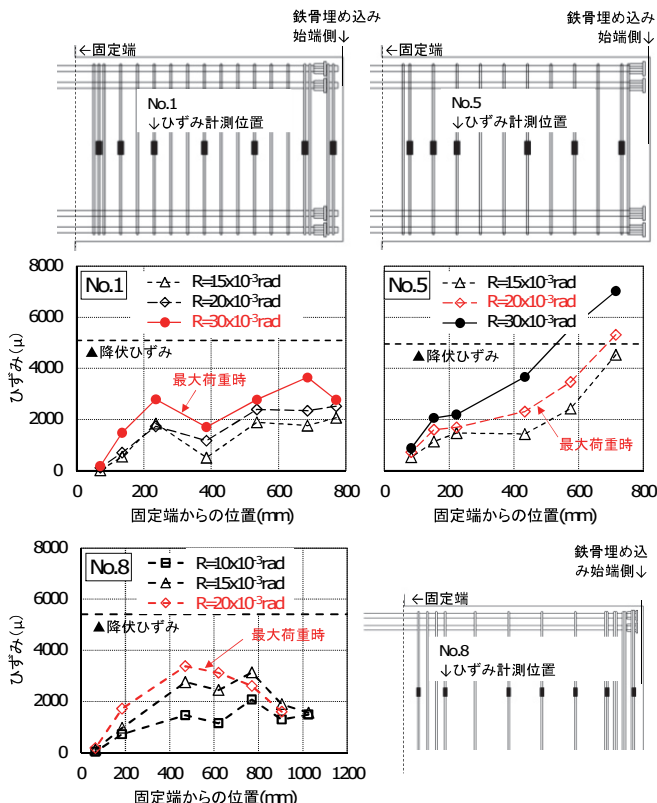


図-11 せん断補強筋、集中補強筋のひずみ分布

せん断破壊型の場合 0 として求める、 l_{B1} 、 l_{B2} : 支圧反力の作用位置 (mm) で図-9による、他の記号は文献³⁾を参照。

4.2 集中補強筋量の算定

S 梁のせん断力、および曲げモーメントは、切り替え区間で鉄骨フランジからの支圧力により RC 梁へ伝達される。そのため、図-9に示す切り替え区間の始端位置、終端位置において支圧反力に見合う集中補強筋を式(6)により算定する。

$$\left. \begin{aligned} a_{B1} &= Q_{B1} / w \sigma_{py} \\ a_{B2} &= Q_{B2} / w \sigma_{py} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

ここで、 a_{B1} 、 a_{B2} : 埋め込み始端側、終端側の集中補強筋断面積(mm²)、 Q_{B1} 、 Q_{B2} : てこ機構による支圧反力(N)で図-9による、 $w \sigma_{py}$: 集中補強筋の降伏強度(N/mm²)

4.3 実験値と計算値の比較

表-3に実験値と計算値の比較を示す。表中のせん断余裕度とは、式(5)によるせん断強度 (${}_{rc}Q_{su}$) を、式(3)による RC 梁の曲げ強度時のせん断力 (${}_{rc}Q_{mu}$) で除した値 (${}_{rc}Q_{su} / {}_{rc}Q_{mu}$) を示す。せん断余裕度が 1 以上、すなわち ${}_{rc}Q_{mu}$ が ${}_{rc}Q_{su}$ 以下となる No.1~7 では、No.5 を除き RC 梁の曲げ降伏後のせん断破壊となり、想定通り曲げ降伏が先行する結果となった。また、計算値 (Q_u) に対する実験値 (最大荷重 Q_{max}) は 1.05~1.14 となり実験

値は計算値を上回った。No.5 については、集中補強筋の配筋量が少なく、小口面で支圧破壊が先行し梁主筋が曲げ降伏していないことから、せん断余裕度が1以上にもかかわらず実験値は計算値を下回ったと考えられる。また、せん断余裕度が1未満であるNo.8では、RC梁がせん断破壊し、 Q_U に対する最大荷重 Q_{max} は1.05となり、実験値は計算値を上回った。

また、せん断余裕度と Q_{max} を rcQ_{mu} で無次元化した rcQ_{su} / rcQ_{mu} の関係を図-12に示す。同図中の実線は Q_{max} と計算値 (rcQ_{su} または rcQ_{mu}) が等しい値であることを示す。すなわち、せん断余裕度が1以上の領域では、実験値が実線を上回ってれば曲げ強度に対する計算値 (rcQ_{mu}) 以上であることを示し、同様に、せん断余裕度が1未満であれば、実験値がせん断強度に対する計算値 (rcQ_{su}) 以上であることを示している。No.5を除き、RC梁が曲げ降伏後にせん断破壊した試験体、RC梁でせん断破壊した試験体のいずれも実験値は実線を上回っていることから、今回の実験の範囲では、RC梁の曲げ強度は式(3)で、せん断強度は式(5)で評価できると考えられる。

4.4 せん断余裕度と限界部材角の関係

図-13に、せん断余裕度と限界部材角の関係を示す。限界部材角 (R_{80}) は、荷重一部材角関係において最大荷重の80%まで荷重が低下した時の部材角とした。ここで、梁部材の十分な靱性能を有する限界部材角を $R_{80}=40 \times 10^{-3} \text{rad}$ とした場合、それ以上の限界部材角を有する試験体のせん断余裕度の最低値は1.16であった。また、図-14に、集中補強筋余裕度と限界部材角の関係を示す。ここで、集中補強筋余裕度は、式(5)で求める必要量に対する実際の配筋量とした。同図によるとRC梁がせん断破壊したNo.8を除くと、集中補強筋余裕度の増加に伴い限界部材角も大きくなる傾向がみられる。限界部材角が小さいNo.4とNo.5は、集中補強筋余裕度が計算上大きく1を下回っており、靱性能確保に必要な集中補強筋が不足していたと考えられる。このことは、No.5の集中補強筋が降伏ひずみに達し、最終的に小口面で支圧破壊した結果からもわかる。以上より、今回の実験から、せん断余裕度1.16以上、集中補強筋余裕度を0.98以上、すなわち約1以上とすることにより、目標とする靱性能を確保できることがわかる。

5. まとめ

今回の実験により以下のことが確認でき、RC梁の靱性能確保に必要な集中補強筋量を提案する方法で配筋することによって、埋め込み長さを鉄骨せいの2倍程度に短くすることが可能となった。

- i. RC梁の曲げ降伏が先行した試験体の実験値/計算値は1.05~1.14となり、計算値は実験値を安全に評価する

表-3 実験値と計算値の比較

試験体名	計算値			実験結果		比較 Q_{max} / Q_U	
	rcQ_{mu} (kN)	rcQ_{su} (kN)	rcQ_{su} / rcQ_{mu} せん断余裕度	Q_{max} (kN)	R_{max} ($\times 10^{-3} \text{rad}$)		破壊形式
No.1	129	218	1.68	144	30.1	FS	1.12
No.2	129	225	1.74	147	30.1	FS	1.14
No.3	129	150	1.16	137	20.5	FS	1.06
No.4	129	149	1.16	135	20.8	FS	1.05
No.5	129	184	1.43	124	20.0	P	0.96
No.6	132	221	1.67	150	30.1	FS	1.14
No.7	358	660	1.84	406	30.4	FS	1.13
No.8	492	353	0.72	371	15.0	S	1.05

Q_{max} :最大荷重、 R_{max} : Q_{max} 時部材角、 rcQ_{mu} :RC梁の曲げ強度時せん断力、 rcQ_{su} :RC梁のせん断強度計算値、 $Q_U = \min(rcQ_{mu}, rcQ_{su})$ 、破壊形式:FSはRC梁の曲げ降伏後せん断破壊、PはRC梁の埋め込み始端面での支圧破壊、SはRC梁のせん断破壊

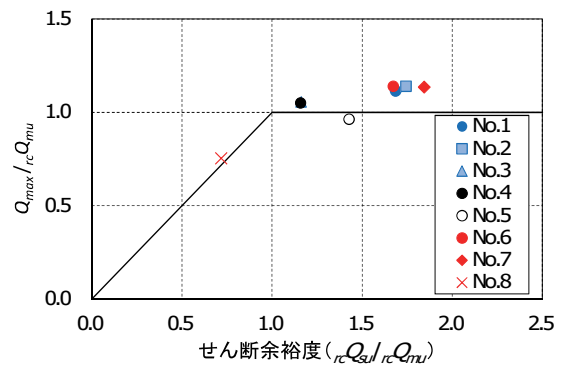


図-12 せん断余裕度と Q_{max} / rcQ_{mu} の関係

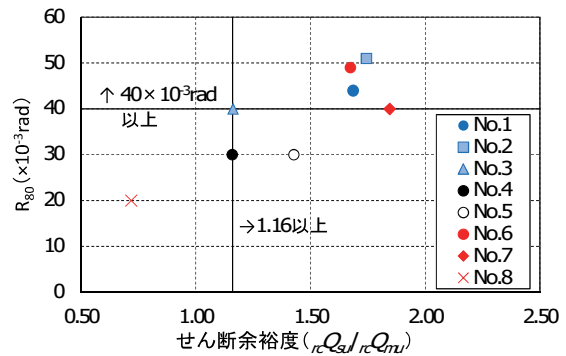


図-13 せん断余裕度と限界部材角の関係

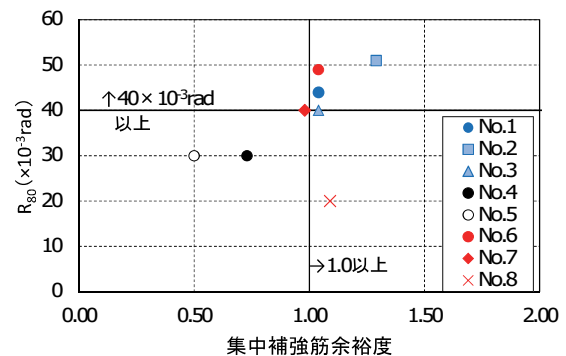


図-14 集中補強筋余裕度と限界部材角の関係

- ii. RC梁でせん断破壊した試験体の実験値/計算値は1.05となり、提案するせん断強度式により実験値を安全に評価する
- iii. せん断余裕度を1.16以上、集中補強筋余裕度を約1以上としたハイブリッド梁は、曲げ降伏先行型となり、必要な靱性能を確保できる

6. あとがき

S梁の端部をRC梁とするハイブリッド梁の構造性能を実験により明らかにした。今回の開発を機に、積極的に実建物へ提案していきたい。

【参考文献】

- 1) 日本建築学会、「鋼コンクリート構造接合部の応力伝達と抵抗機構」、2011
- 2) 日本建築学会、「鉄筋コンクリート構造計算基準・同解説」、2018
- 3) 日本建築学会、「鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型耐震設計指針・同解説」、1999

実建物で供用している積層ゴムの経年変化

－天然ゴム系積層ゴムのクリープ－

The Aging of Rubber Bearings in an Actual Building

- Creep Characteristics of Natural Rubber Bearing -

山上 聡* 上 寛樹* 舟木秀尊* 小山慶樹*

要 旨

免震建物の主要構造部材である積層ゴムの経年特性として、水平剛性の変化とクリープ変形の把握が重要である。しかし、これらは熱老化促進試験等からの予測によるものが多く、経年特性の信頼性を高めるには追跡調査等による検証が必要である。そこで、筆者らは積層ゴムのクリープ特性を把握するために、実建物（1986年9月竣工）で供用中である天然ゴム系積層ゴムの高さの変化量を竣工以来33年間計測してきた。その結果、天然ゴム系積層ゴムのクリープによる鉛直方向の変化量は33年間で2.5mm程度であり、設計の想定内で推移していることを確認した。

キーワード：天然ゴム系積層ゴム、経年変化、クリープ

1. まえがき

免震構造では、積層ゴムで建物を支持することにより、上部構造物が地震被害から守られている。そのため、積層ゴムについて、地震時の建物の応答に関する力学的特性だけでなく、長期間における耐久性についても正確に把握する必要がある。主要構造材料である積層ゴムには建物の法定耐用年数以上の耐用年数が求められるが、他の構造材料に比べてゴム材料は経年変化が大きいことが知られている。そのため、設計では建物の供用期間における積層ゴムの経年変化（特に、剛性変化やクリープ変形）を考慮するが、その多くは熱老化促進試験等による予測値に基づいている。また、積層ゴムが実建物に適用されて40年弱であり、建物の耐用年数における経年変化量を実証したデータがないため、設計では変化量に余裕を見る必要がある。さらに、設計を合理化するには、予測精度を向上させる必要があり、実建物等の追跡調査による検証が必要とされている。そこで、筆者らは、33年前に竣工した免震建物を対象として、天然ゴム系積層ゴム（以下、NRB）の水平剛性やクリープ変形等の経年変化に関する追跡調査¹⁾を実施してきた。これまでの調査の結果、NRBの水平剛性については、30年で9%高くなっており、これは、設計時の予測の範囲内であることを報告した^{2)~5)}。

一方、免震構造では、上部建物と擁壁頂部等との垂直クリアランスを確保する必要があり、その寸法は、積層ゴムのクリープを考慮して決められる。この場合、ク



写真－1 対象建物

表－1 建物概要

項目	諸元	
竣工	1986年9月	
構造	鉄筋コンクリート造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
	ダンパー	鋼棒製ダンパー φ50×12

リープ変形量が、5%程度なら設計上問題ないといわれている⁶⁾。また、建物全体でクリープ変形が均一に生じる場合は建物に与える影響は少ない。しかし、不均一なクリープ変形が過大に生じると、床に不陸が生じたり、梁に余分な応力が生じるなど、建物に悪影響を及ぼす可能性があるため、その変形量を正確に把握する必要がある。

*技術研究所建築研究グループ

弊社では、実建物で供用中である積層ゴムの高さを竣工時から計測してきており、本年度で 33 年分のデータが得られている。そこで、本研究では、そのデータを分析してこれまでのクリープ変形量を把握し、設計値と比較した結果について報告する。

2. 対象建物および免震装置

対象となる免震建物は、つくば市内に建設された奥村組技術研究所の管理棟であり、1986年9月に竣工している。対象建物を写真-1に、建物概要を表-1に示す。免震装置には、NRB25 基と、鋼棒製ダンパー12 基を使用している。免震装置の概略図を図-1、免震装置の諸元を表-2、免震装置の配置を図-2に示す。NRB 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 S1 は 17.1、座屈荷重や水平剛性の指標となる2次形状係数 S2 は 5.1 である。ゴム材料のせん断弾性率 G は 0.44N/mm²相当である。

本建物は、2005年5月から8月(約6900日目)にかけて、内外装および設備機器のリニューアル工事を行ったが、重量の大きな変化はない。また、2017年12月(約11400日目)に、X1-Y3通りのNRB25基を経年変化に関する要素実験のために抜き取り、新規の同等品と交換している。

3. 計測位置と計測方法

積層ゴム高さの計測点を図-3に、計測状況を写真-2に示す。計測対象は 25 基の NRB 全数とし、各 NRB のフランジプレート間の四隅の高さを台座に固定したダイヤルゲージを用いて計測し、竣工時からの高さの変化量(以下、変化量、NRB が縮む側を正值とする)と計測時のピット内温度を記録している。

計測時期は、変化量が多いと考えられる竣工後1年間は月1回、変化量が安定してきた2年目以降では年2回(免震層内の温度変化の影響を考慮し、毎年夏、冬の各1回)としている。

4. 計測結果

4.1 個々のNRBのクリープ変化量

個々の NRB のクリープ変化量について、図-4に示す。なお、クリープ変化量は支承四隅の変化量の平均値であり、後述する建物全体での温度補正式を用いて個々の NRB の温度補正を行った。また、経過日数は竣工時(1986年9月19日)を0日とした。個々のクリープ変化量を見ると、外周部にあたる西側の X0 通り、南側の Y1 通り、東側の X4 通りは 2~3mm 程度であるのに対

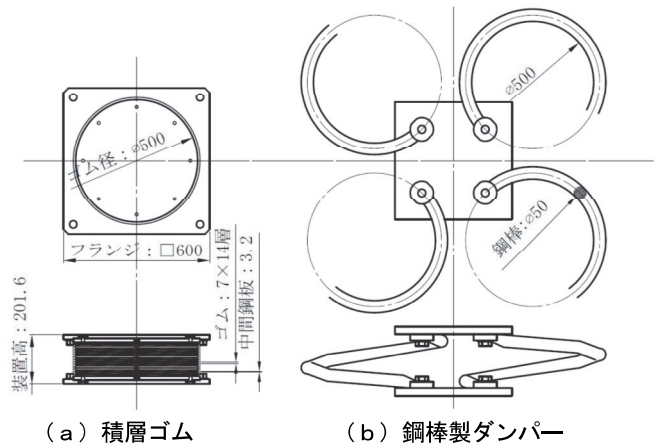


図-1 免震装置概略図

表-2 免震装置諸元

項目		諸元	
種類と型式		天然ゴム系積層ゴム A40-500×7-14	
ゴム特性 (SI単位換算)	硬さ (JISA)	40±3	
	25%応力	0.265±0.098 N/mm ²	
	伸び	600%以上	
	引張強さ	15.7 N/mm ² 以上	
形状	本体ゴム	φ500 t=7mm 14層	
	形状 係数	1次 S1	17.1
		2次 S2	5.1
種類と型式		鋼棒製ダンパー	
鋼棒	材質	S20C (JIS051)	
	形状	ループ状鋼棒 50φ (ループ径 550φ 4本)	

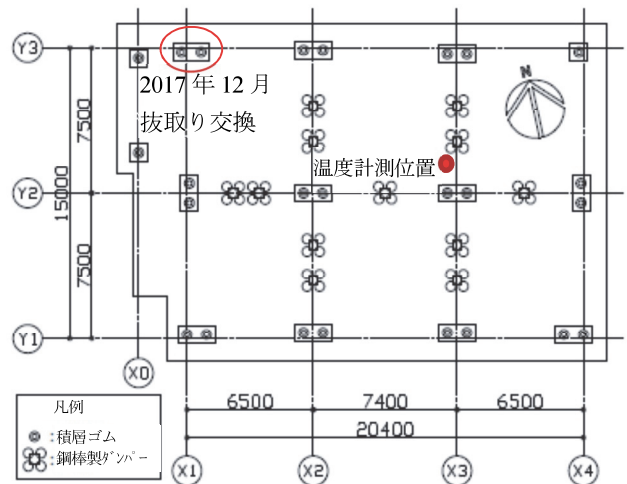


図-2 免震装置の配置

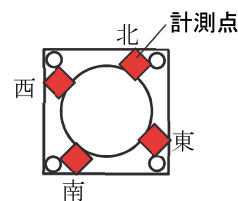


図-3 NRBの計測点

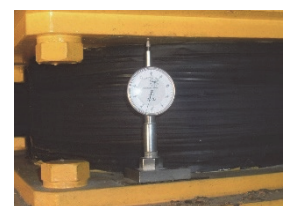


写真-2 計測状況

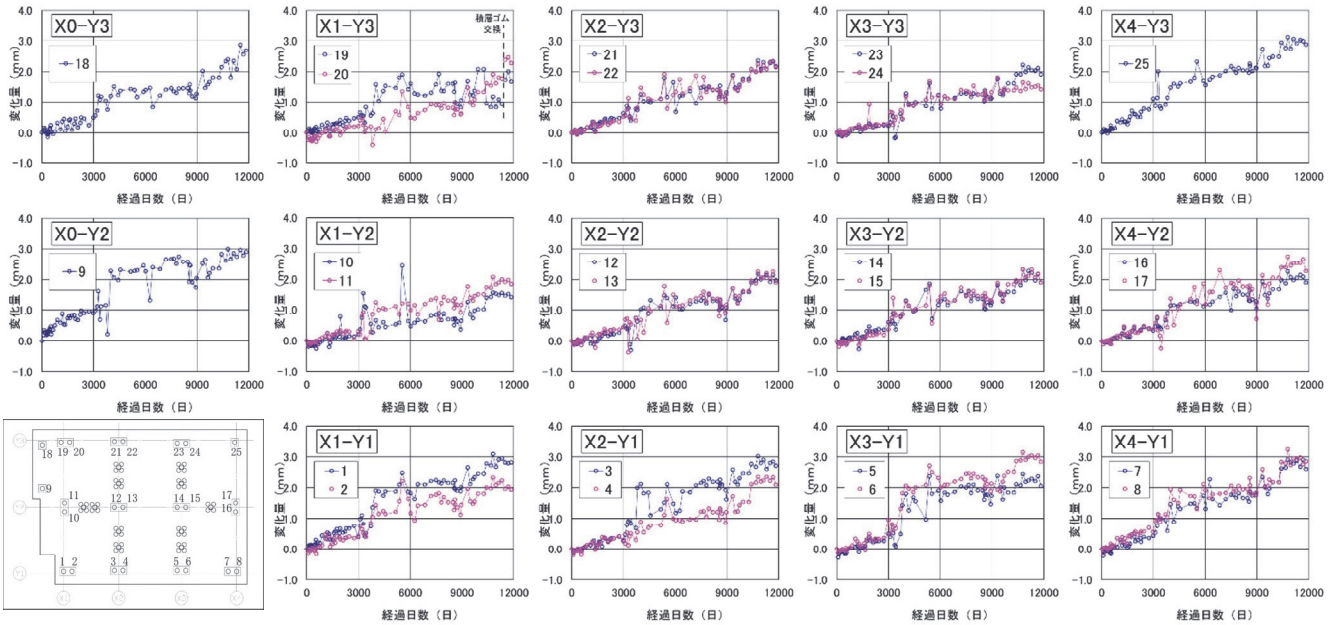


図-4 NRBの配置と単体のクリープ変化量

表-3 設計軸力とクリープ変化量

積層 ゴム	設計軸力 N	鉛直剛性 Kv	負担軸力 N2	面圧*	変化量 (mm)
	(kN)	(kN/mm)	(kN)	Mpa	
1	1586.0	1190.7	756.6	3.85	2.82
2		1305.4	829.4	4.22	1.94
3	1839.7	1177.0	949.5	4.84	2.71
4		1103.5	890.2	4.53	2.11
5	1866.9	1267.1	945.2	4.81	2.06
6		1235.8	921.8	4.69	2.84
7	1593.5	1367.1	830.7	4.23	2.62
8		1255.4	762.8	3.89	2.86
9	712.2	1348.5	712.2	3.63	2.90
10	1794.6	1188.7	863.5	4.40	1.41
11		1281.8	931.1	4.74	1.84
12	2395.9	1258.3	1214.5	6.19	1.96
13		1224.0	1181.4	6.02	1.90
14	2187.3	1162.3	1051.6	5.36	1.90
15		1255.4	1135.8	5.78	1.90
16	1618.0	1190.7	773.0	3.94	1.90
17		1301.4	844.9	4.30	2.27
18	712.2	1276.9	712.2	3.63	2.68
19	1388.7	1253.4	668.5	3.40	1.67
20		1350.4	720.2	3.67	2.27
21	1738.2	1168.2	767.1	3.91	2.16
22		1478.8	971.1	4.95	2.14
23	1493.0	1322.0	752.9	3.83	1.91
24		1299.5	740.1	3.77	1.42
25	1123.7	1306.3	1123.7	5.72	2.88
平均		1262.75	882.00	4.49	2.20

*面圧＝負担軸力／ゴム層断面積

■ : 外周部積層ゴム ■ : 内側、北側積層ゴム

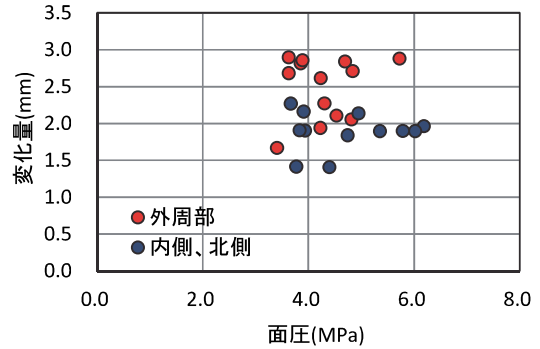


図-5 面圧とクリープ変化量の関係

し、中側、北側は1.5～2mm程度であった。スパン間の最大傾斜は、大きく見ても1/2000程度であり、クリープ変形が建物に悪影響を及ぼす程の差は生じていない。そこで、個々の負担軸力とクリープ変化量について調べた結果を、表-3に示す。当建物では、ほとんどの場所で、1つの柱の下に2基のNRBが配置されている。そこで、各柱位置の設計軸力を製品検査時の鉛直剛性の比で配分し、個々の負担軸力と面圧を求めた。当建物におけるNRBの面圧とクリープ変化量の関係を図-5に示す。個々のNRBの面圧は3.40～6.19MPa、クリープ変化量は1.41～2.90mmであった。当建物で使用されている面圧の範囲では、クリープ変化量との関係に有意な関係は見られなかった。この検討は設計軸力に基づく簡易検討であり、クリープの進行による装置高さの変化で軸力が再配分され面圧が変動していることが予想されるので、現時点で詳細な評価はできないが、比較的低面圧で使用している本建物においてはクリープ変形と面圧の有意な関係は見られなかった。

4.2 建物全体でのクリープ変化量

全NRBの変化量の平均値(以下、平均変化量)と計

測時の免震層内の温度を時系列で図-6に示す。なお、図中の赤丸で示した、2009年11月(約8400日目)と2013年12月(約10000日目)にはダイヤルゲージの交換と、フランジプレートの塗装をそれぞれ行った関係で、計測値が不連続となったため、この2か所については後のデータを前のデータに一致させて扱うこととする。

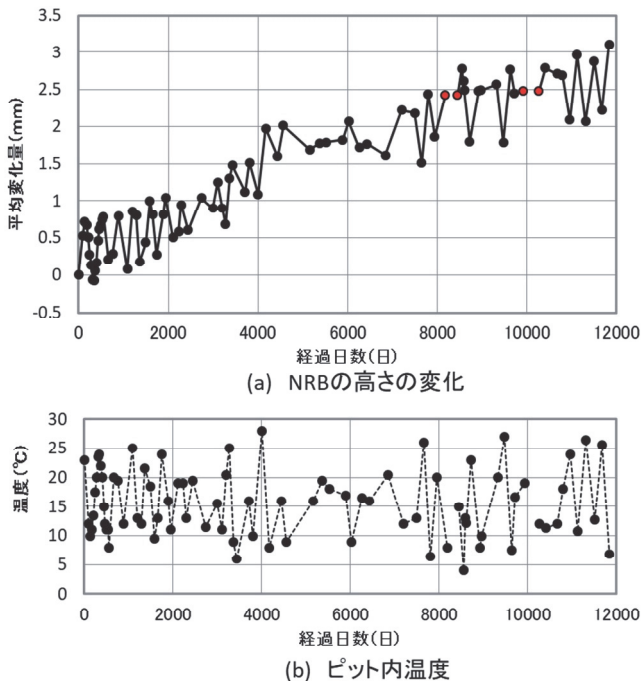


図-6 クリープの平均変化量とピット内温度

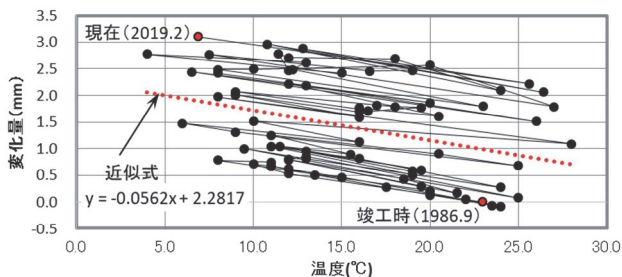


図-7 クリープの平均変化量と温度の関係

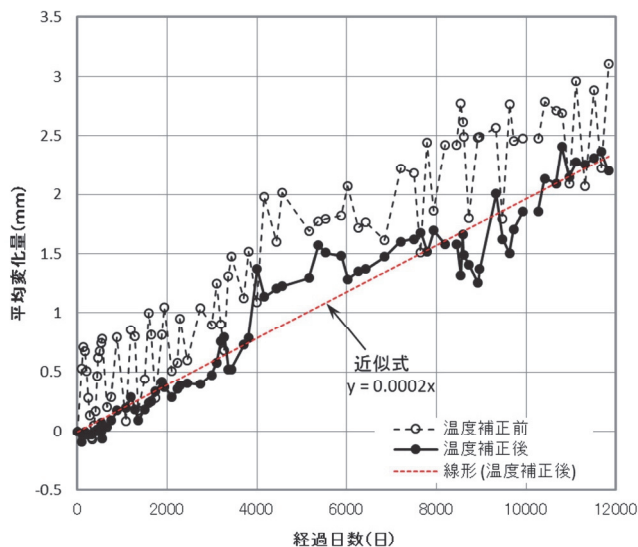


図-8 温度補正前後のクリープ変化量の比較

平均変化量は増減しながらも、長期的には増加している傾向がみられ、その増減の仕方はピット内温度の上下に対応していることから、計測値にはクリープ変形によるものと温度変化によるものが含まれていることが分かる。そこで、温度変化の影響を取り除くために、温度と平均変化量の関係について調べた結果を図-7に示す。温度による平均変化量を線形として近似すると、温度と平均変化量の関係は $-0.0562\text{mm}/^\circ\text{C}$ であった。これを用いて、平均変化量に対して 20°C に温度補正を行って温度変化の影響を取り除いたうえで初期値を0とした。温度補正前後のクリープ変化量の比較を図-8に示す。経過日数と温度補正後のクリープ変化量の関係を線形として近似式を求めると、 $0.0002\text{mm}/\text{日}$ であり、33年間(約12000日)での平均変化量は約 2.4mm である。

積層ゴムのクリープ量の予測については様々な研究がなされているが、長期の予測を行うことは難しいとされている。ここでは、いくつかの予測方法で推測した変化量と実測値とを比較し、図-9に示す。本建物の設計時点では、80年(約29200日)後のクリープ変化量を 400ϕ の積層ゴムの熱老化促進試験等の結果から予測しており、その値は 3mm 程度である。また、文献⁷⁾では、クリープ変化量について式(1)が提案されており、それによると80年後の計算値は 6mm 程度となる。計測値と比べると、現在のクリープ変化量は(1)式による計算値を下回っている。

$$\text{クリープ変化量}(\text{mm}) = \frac{t}{100} \times 17.2 \times \frac{\left(\frac{\sigma}{\sigma_0}\right)^{0.619}}{\left(\frac{G}{G_0}\right) \times S_1^{1.02}} \times \left(\frac{Y}{Y_0}\right)^{0.568} \quad (1)$$

- ここに、 t : ゴム総厚(98mm)
- σ : 面圧(4.48MPa)
- σ_0 : 基準面圧(10MPa)
- G : せん断弾性係数(0.44MPa)
- G_0 : 基準せん断弾性係数(0.39MPa)
- S_1 : 1次形状係数(17.9)
- Y : 期間(年)
- Y_0 : 基準年(1年)

次に、これまでの実測結果の傾向をもとに線形で推移するとすれば、80年後は 6mm と倍程度になる。

最後に、式(1)に倣い、経過日数のべき乗で近似式を求めると、クリープ変化量は式(2)で表わされ、80年後は 5.3mm 程度となった。

$$\text{クリープ変化量}(\text{mm}) = 0.0003537 \times x^{0.9351} \quad (2)$$

ここに、 x : 経過日数(日)

以上の結果から、当免震建物に使用しているNRBの80年後のクリープ変化量は 6mm 程度となり、設計時のクリアランスの 15mm より十分小さいと予測され、問題ないと考えられる。

【参考文献】

- 1) 安井健治、早川邦夫、山上 聡、「免震建物に設置された積層ゴムの経年変化」、日本建築学会技術報告集、第24号、pp.167-170、2006.12
- 2) 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、pp.91-94、2016.9
- 3) 山上 聡、舟木秀尊、安井健治、小山慶樹、「実免震建物における免震装置の水平剛性の評価」、奥村組技術研究年報、No.43、pp.81-86、2017.9
- 4) 山上 聡、上 寛樹、舟木秀尊、小山慶樹、「竣工後30年を経過した免震建物に使用されている免震装置の性能検証」、奥村組技術研究年報、No.44、pp.77-83、2018.9
- 5) 舟木秀尊、山上 聡、小山慶樹、「免震建物における積層ゴムの経年変化」、奥村組技術研究年報、No.45、pp.97-102、2019.9
- 6) 日本ゴム協会免震用積層ゴム委員会、「免震建築用積層ゴムと環境・耐久性」、免震用積層ゴム委員会技術報告、pp.Ⅱ-3、平成18年3月31日
- 7) 日本ゴム協会、日本免震構造協会、「改訂版 設計者のための建築免震用積層ゴム支承ハンドブック」(第2版)、pp.206-217、2017年

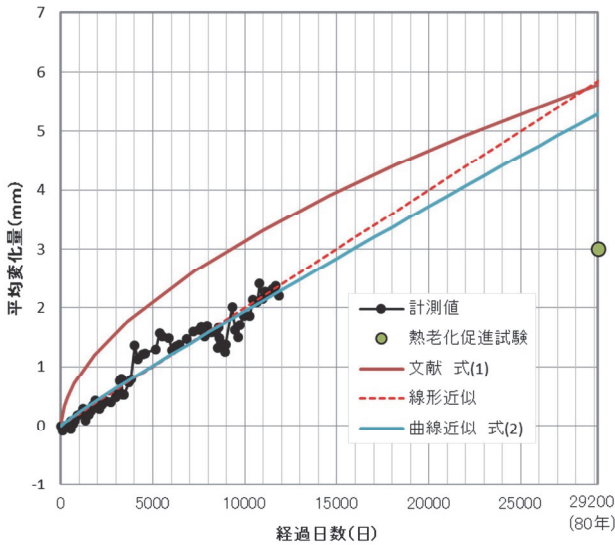


図-9 クリープの計測値と推定手法による比較

5. まとめ

33年間実建物で供用しているNRBのクリープ変化量の計測の結果、次のことが分かった。

- i. 個々のNRBのクリープ変化量について、配置場所による差が見られたが、建物に影響を及ぼすほどではなかった
- ii. NRBの高さの変化は、温度変化による影響を受けており、その変化量は $-0.0562\text{mm}/^\circ\text{C}$ であった
- iii. 33年間(約12000日)でのクリープ変化量は、約2.4mm(ゴム総厚の2.4%)であった
- iv. NRBの計測結果から推定した80年後のクリープ変化量は6mm(ゴム総厚の6%)程度となり、設計時の予測値より大きめとなったが、設計では余裕を見ており許容される範囲内であった

これらのことから、クリープ変形が建物に与える影響は小さく、竣工後33年を経過した免震建物が必要な安全性と耐久性を有していることを確認した。

6. あとがき

本研究は、1986年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と30年以上使用してきた免震装置の健全性を確認できた。今後も引き続き計測を継続し、免震建物の経年変化に関する知見を蓄積していく予定である。

本研究の遂行にあたり、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協力を頂いた。ここに記して謝意を表す。

オールラウンド免震®の実建物への適用

－微振動対策ダンパーの性能確認－

Application of All-round Base Isolation System to an Actual Structure

- Confirming the Performance of Viscous Dampers against Micro Vibrations -

舟木秀尊* 山上 聡* 小山慶樹* 山際 創**

要 旨

免震建物は、大地震時の安全性と事業継続性を飛躍的に向上させるが、一方で微小な振動に対して通常の耐震建物よりも揺れ易いという一面を持っている。したがって、「精密工作機械」や「電子顕微鏡」などの超精密機器が設置される免震建物では、交通振動や空調機器等によって建物に発生する微小な振動の影響を受けて生産性や測定精度の低下を招く恐れがある。「オールラウンド免震」は、通常の免震層に微振動対策ダンパーを併用することにより、大地震時の安全性と平常時の微振動抑制機能をあわせ持った高性能な免震システムである。今回、超精密機器を扱う免震建物にオールラウンド免震が採用されたことから、建物の完成に合わせて起振実験と常時微動計測を実施し、微振動対策ダンパーの性能確認を行った。その結果、オールラウンド免震は、微振動対策ダンパーを取り外した通常免震に比べて、建物内の微小な揺れを 1/3～1/4 程度に低減できた。

キーワード：免震建物、精密機器、微振動対策ダンパー、常時微動、起振実験

1. まえがき

東北地方太平洋沖地震や熊本地震において、免震構造の優れた安全性が証明され、その普及に大きな期待が掛けられている。免震建物は、大地震時の安全性と事業継続性を飛躍的に向上させるが、一方で微小な振動に対しては通常の耐震建物よりも揺れ易いという一面を持っている。精密工作機械や電子顕微鏡などの超精密機器が設置される免震建物では、建物に発生する微小な振動の影響を受けて生産性や測定精度の低下を招く恐れがあるとの指摘がある^{1)~3)}。そこで、筆者らは、免震建物の微振動特性を把握し、その対策方法を確立することを目的とした研究を実施している^{4)~5)}。「オールラウンド免震」とは、微振動対策ダンパーの採用により、大地震時の安全性と平常時の微振動抑制機能を実現した免震システムの呼称である。本報では、交通振動等を対象とした常時微動計測と、各免震装置の特性を把握するために実施した起振実験を踏まえ、オールラウンド免震の応答低減効果を評価した結果について報告する。

2. 対象建物および免震装置

オールラウンド免震を適用した建物を写真-1に示す。本建物は、宮城県黒川郡大和町に建設され、2019年11

月に竣工した、精密・微細加工を伴う超硬小径エンドミルの開発センターであり、大地震時の安全性と常時の微振動抑制が求められた。建物概要と免震装置を表-1に示す。免震装置には、支承材として天然ゴム系積層ゴム支承と高減衰ゴム系積層ゴム支承および弾性すべり支承を、減衰材としてオイルダンパーと微振動対策ダンパーを使用している。



写真-1 オールラウンド免震を適用した建物

表-1 建物概要と免震装置

項目	諸元
構造	上屋：鉄骨造
	1階梁：鉄骨鉄筋コンクリート造
高さ	地上2階、基礎免震 10.075m
建築面積	1,529.17m ²
延べ床面積	2,859.82m ²
免震装置	支承材 天然ゴム系積層ゴム支承 8基 高減衰ゴム系積層ゴム支承 10基 弾性すべり支承 6基
	減衰材 オイルダンパー 4基 微振動対策ダンパー 2基

*技術研究所建築研究グループ **東日本支社建築設計部

3. 微振動対策ダンパー

3.1 微振動対策ダンパーの概要

微振動対策ダンパーの概要を図-1に示す。本装置は水平方向に自由に動ける構造であり、免震建物に適用実績⁹⁾のある平面型粘性ダンパーを採用している。従来の平面型粘性ダンパーは、地震用に使用するため小振幅時の減衰力は小さく、また、装置の占める面積が大きい。そこで、変位ストロークを±50mmに限定し、制振建物で実績のある多層化⁷⁾を取り入れることで、省スペースで大きな減衰力を発揮する粘性ダンパーを実現した。粘性体には、高粘度の粘性体（SA-P：粘度範囲 7200～9600Pa・S）を使用した。ダンパーの諸元を表-2に示す。対象建物に使用した装置は、材料認定を受けた2タイプのうち、せん断面が14面のWSD-3.2-100である。各部寸法を図-2に示す。微振動時に高い減衰力を発揮させるため、本装置では、せん断ピンと粘性体容器との接合部の隙間が微小となるように高い精度で加工を行っている。また、装置のストロークを小さくするにあたって、変形が大きくなった際の装置を保護する機能としてトリガー機構を併設している。トリガー機構は、せん断ピン、サポート支柱等で構成される。せん断ピンの中央部にはくびれがあり、その径の大きさにトリガー機構の破断荷重が決定される。なお、せん断ピンの破断後の交換は容易である。

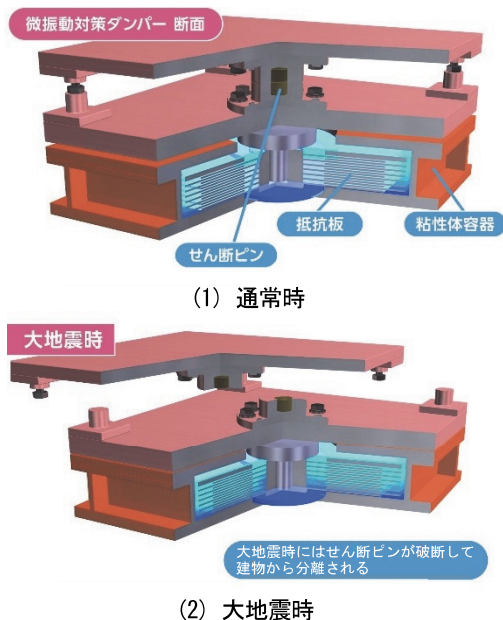


図-1 微振動対策ダンパーの概要

表-2 ダンパーの諸元

製品	せん断面積 S (mm^2)	ストローク L (mm)	層数	全体高さ H (mm)
WSD-1.8-100	1.825×10^6	±50	8	397.2
WSD-3.2-100	3.193×10^6	±50	14	402.0

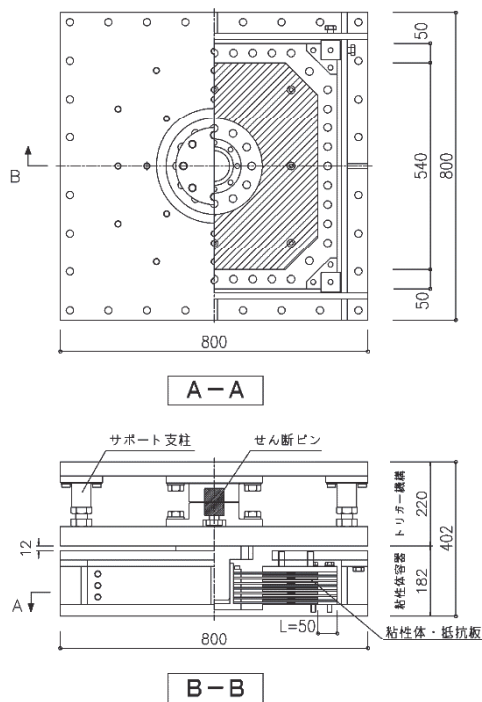


図-2 各部寸法

3.2 基本特性

微振動対策ダンパーの基本特性を確認するため、単体試験を行った。試験は2軸試験機を使用し、振動数0.1Hz～1.0Hz、振幅±1mm～±4mmの正弦波で加振した。試験結果の一例として振動数0.3Hzと0.5Hzの試験で得られたダンパーの水平変位と抵抗力の関係を図-3に示す。ダンパーは、±1mm程度の小さな振幅から確実に抵抗力を発揮しており、粘弾性の性状を示している。なお、他の実験結果から、振動数が同じであれば振幅によらずほぼ同じ勾配の履歴を示す結果が得られている。

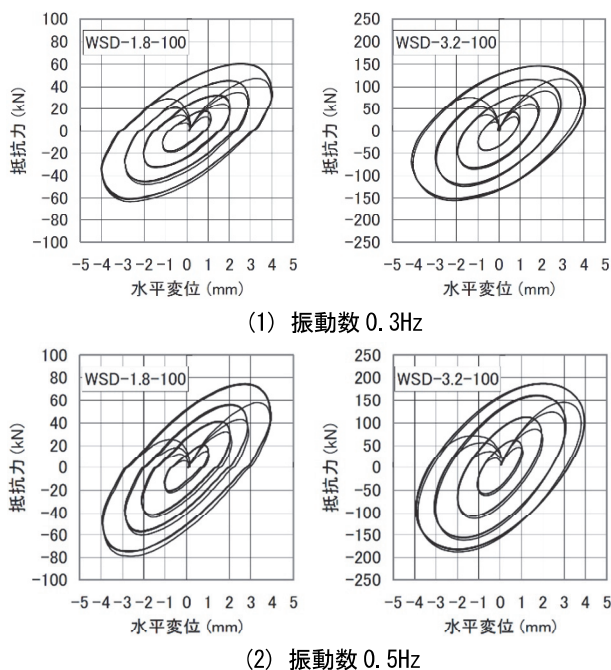


図-3 単体試験結果 (WSD-1.8、WSD-3.2)

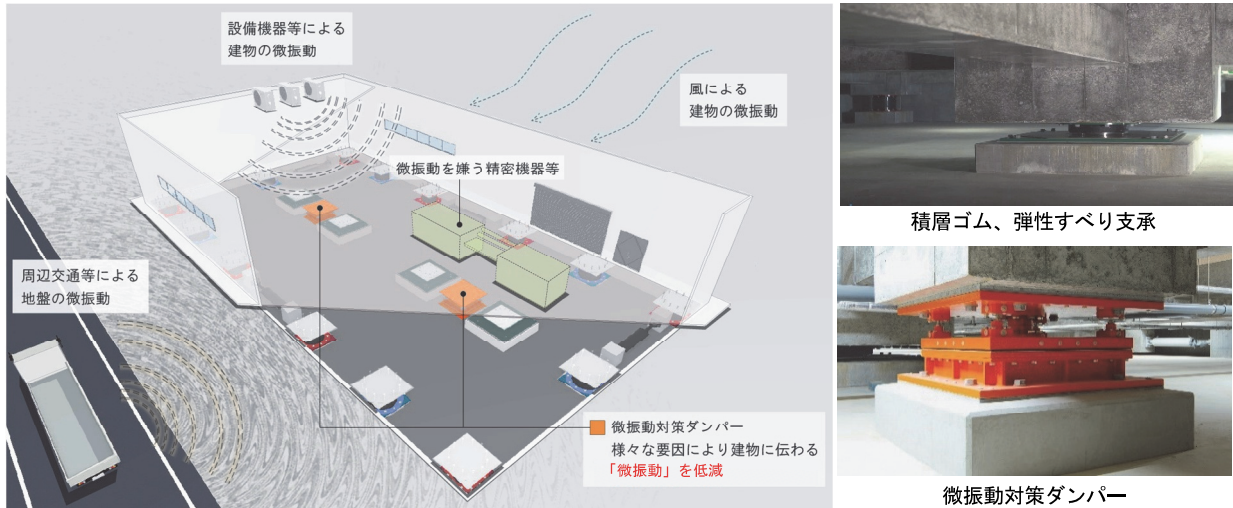


図-4 オールラウンド免震の模式図

4. 常時微動計測

4.1 測定計画

オールラウンド免震の模式図を図-4に、対象建物の免震装置の配置を図-5に示す。本建物では、複数の免震装置と微振動対策ダンパーを組み合わせている。常時微動計測は、交通振動を受ける建物内の振動レベルを確認するため、竣工前の時期に実施した。計測においては、東京測振製のサーボ型速度計を使用し、計測時間を10分間、サンプリング周波数を200Hzとした。測定ケースは、①積層ゴム等の支承材が設置された状態（減衰材なし）、②支承材とオイルダンパーが設置された状態（通常免震）、③支承材とオイルダンパーに加えて微振動対策ダンパーが設置された状態（オールラウンド免震）の3ケースとした。これは、微振動対策ダンパーと免震用オイルダンパーについて、微小振動に対する減衰効果を個別に把握するためである。測定位置は、免震層の床（建物への入力速度）と1階床（建物の応答速度）とした。また、測定方向は、XとYの2方向とした。

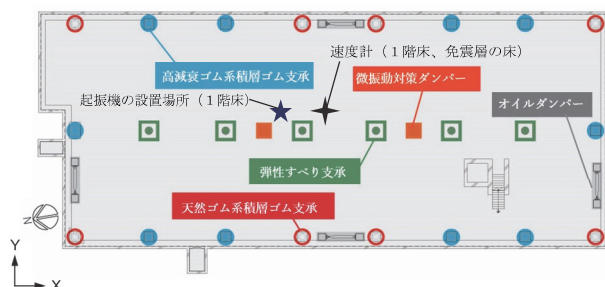


図-5 免震装置の配置

表-3 免震装置の種類と設計値 (200mm変形時)

		基数	等価剛性 (kN/cm)	等価減衰係数 (kN・s/cm)
支承材	天然ゴム系積層ゴム	8	49.2	—
	高減衰ゴム系積層ゴム	10	73.1	19.0
	弾性すべり支承	6	12.6	21.5
減衰材	オイルダンパー	2	—	25.0

4.2 測定結果

免震装置の種類と設計値を表-3に示す。積層ゴムのせん断弾性率は0.392N/mmであり、等価剛性と等価減衰係数は免震層が200mm変形した時の値である。微小振動時は、弾性すべり支承が滑らないことやオイルダンパーのガタ等の影響により、地震時よりも等価剛性は大きく、減衰効果は小さい傾向にある。オイルダンパーは地震時に、微振動対策ダンパーは通常時に有効である。

オールラウンド免震と通常免震の計測結果を設計目標値と比較して図-6に示す。揺れの大きさは、速度計測値をフーリエ変換し、変位に換算した。計画段階において既存建物（耐震構造）で計測した応答レベルを設計目標値（上限値）としており、これを満足する結果となった。免震層の床に対する建物1階床応答のフーリエ・スペクトル比を図-7に示す。卓越振動数に着目すると、支承材のみを設置したケース①が1.07Hz、支承材とオイルダンパーを設置したケース②が1.44Hz、支承材、オイルダンパーと微振動対策ダンパーを設置したケース③が1.74Hzであり、減衰材の付加に伴って卓越振動数は大きくなった。また、振幅比に着目すると、微振動対策ダンパーのない通常免震のケース②に比べて、微振動対策ダンパーを設置したケース③のオールラウンド免震では、応答の大きさが1/3程度に低減された。

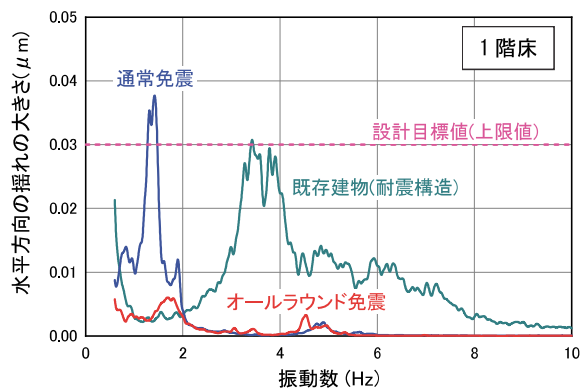
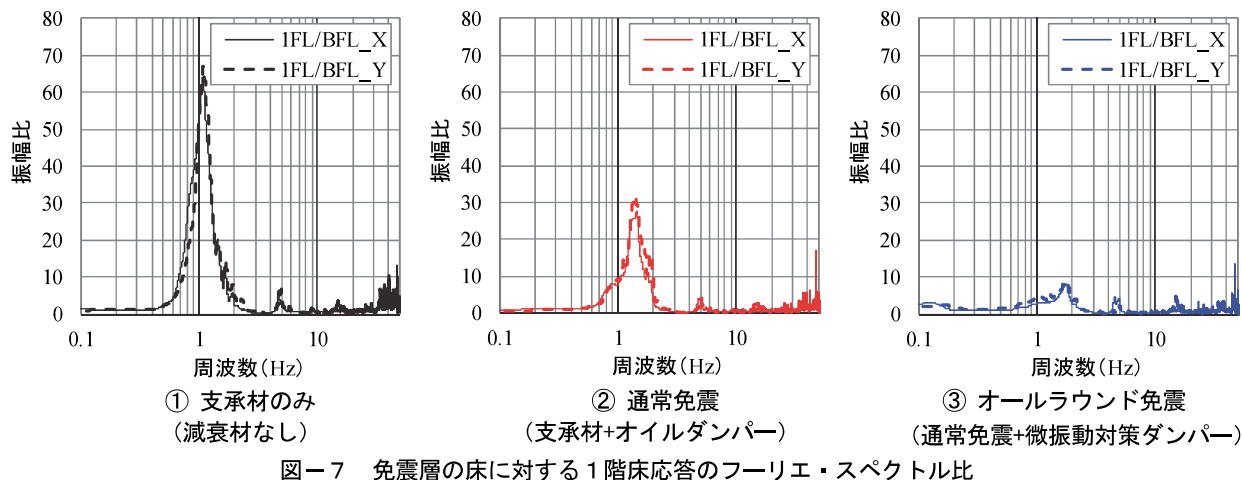


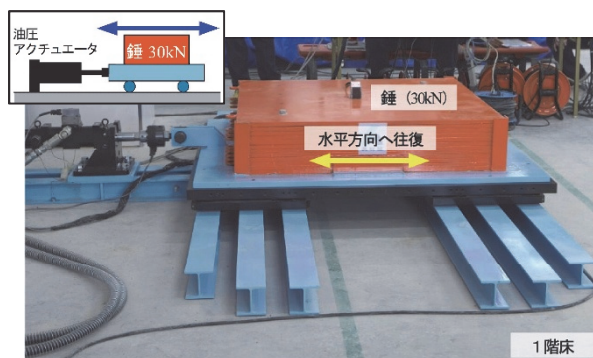
図-6 設計目標値との比較



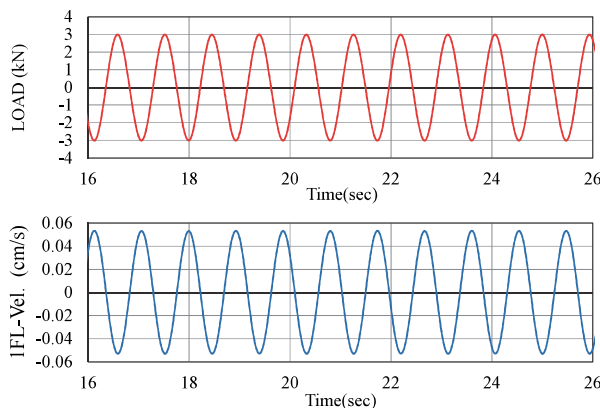
5. 起振実験

5.1 実験の概要

対象建物において起振実験を行い、微振動対策ダンパーの性能を確認した。起振実験の状況を写真-2に示す。実験では、1階に実験装置を設置し、油圧アクチュエータで加振される可動錘(重量 30kN)により建物を水平方向(X方向)に振動させた。実験は、①支承材のみが設置された状態(減衰材なし)、②支承材とオイルダンパーが設置された状態(通常免震)、③支承材と微振動対策ダンパーが設置された状態、④支承材とオイルダンパーに加えて微振動対策ダンパーが設置された状態(オールラウンド免震)の4ケースとした。

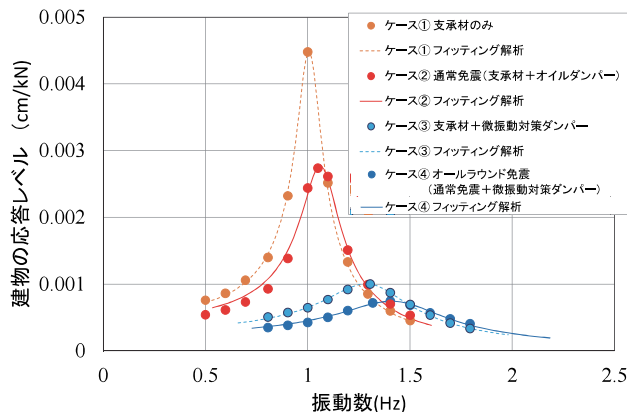


起振実験では、加振機の能力を踏まえて起振力の最大値が3kNとなるように加振時の変位を制御し、正弦波による加振を行った。その際、①~④の各状態における常時微動計測により得られた卓越振動数に対し、±0.5Hzの範囲で加振を行った。計測項目は、起振力(ロードセル荷重)と1階床の応答速度とした。計測時間は、定常応答を82秒、サンプリング周波数は200Hzとした。



5.2 実験結果

起振実験における測定結果の一例を図-8に示す。通常免震の応答レベルが最大となった1.07Hzの正弦波加振における起振力と1階床の応答速度を時刻歴波形で示している。測定結果には、0.2~3.0Hzの範囲でバンドパス・フィルタの処理を行っている。また、微振動対策ダンパーの効果を検討するため、計測データを高速フーリエ変換して、励起する周波数ごとの振幅を抽出した。そして、速度の振幅を固有円振動数 ω で除すことで変位振幅Aに変換し、単位起振力あたりの応答変位の振幅(A/F)を求めた。起振実験の結果から評価した免震装置の組み合わせごとの振動数と応答の関係を図-9に示す。それぞれのケースについて、測定値と併せて後述するフィッティング解析の結果を示している。オイルダンパーが設置された通常免震のケース②では、支承材のみが設置されたケース①の状態に比べて応答は約2/3に低



減されており、オイルダンパーによる減衰効果が確認できる。また、通常免震に微振動対策ダンパーを加えたオールラウンド免震のケース④では、通常免震のケース②よりも固有振動数が僅かに増加しているが、通常免震に比べて応答は約 1/3 に低減されている。

建物内に設置した起振機により、一定の円振動数で振動する起振力が、1 質点にモデル化した建物に与えられた場合、振幅の理論値は式 (1) で表される。

$$\frac{A}{F} = \frac{1}{\sqrt{((2\pi f)^2 - (2\pi x)^2)^2 + 4h^2(2\pi f)^2(2\pi x)^2}} \cdot \frac{g}{W} \quad (1)$$

ここに、 A : 応答変位 (cm)

F : 起振力 (kN)

f : 建物の固有振動数 (Hz)

x : 荷重の振動数 (Hz)

h : 減衰定数

W : 建物重量 (kN)

g : 重力加速度 (= 980.665 (cm/s²))

そこで、式 (1) により、建物重量 (W)、固有振動数 (f)、減衰定数 (h) をパラメータとしたフィッティング解析を行った。解析は、各装置を線形モデルと仮定した場合の推定であり、実験データの誤差やフィッティングの誤差を含んだ簡易的な評価である。反復アルゴリズムには Levenberg-Marquardt 法を採用し、建物重量は各免震装置の組み合わせで共通とした。フィッティング解析の結果を表-4 に示す。起振実験を行った際の建物重量は 44.546 kN と推定され、建物の構造躯体と仕上げが完成している状態での設計重量と概ね一致した。また、起振実験における免震建物の最大振幅は 0.013cm 程度であった。支承材のみのケース①の状態における固有振動数は 1.012 Hz、減衰定数は 0.062、最大振幅は 0.013 cm であった。オイルダンパーが設置された通常免震のケース②においては、固有振動数は 1.070Hz、減衰定数は 0.088、最大振幅は 0.008cm であり、微小振幅の領域でもオイルダンパーの減衰効果が確認された。支承材と微振動対策ダンパーのみが設置されたケース③の状態での固有振動数は 1.323Hz、減衰定数は 0.162、最大振幅は 0.003cm であり、減衰定数と免震層の水平剛性は、通常免震よりも大きい結果となった。通常免震に微振動対策ダンパーを

加えたオールラウンド免震のケース④の状態においては、固有振動数は 1.456 Hz、減衰定数は 0.180、最大振幅は 0.002cm であり、支承材と微振動対策ダンパーを設置したケース③の状態に比べて減衰定数は僅かに大きくなった。これらの結果より、微振動対策ダンパーを適用することで、対象建物の応答振幅は 1/4 程度に低減されており、微振動に対するオールラウンド免震の優れた減衰効果を確認できた。また、設計値と比較するため、フィッティング解析を踏まえて、免震装置を組み合わせた免震層全体の水平剛性 K と減衰係数 C を式 (2) より求めた。

$$K = \omega^2 m \quad (2)$$

$$C = 2h\omega m$$

ここに、 m : 建物質量 (= W/g)

各ケースにおける免震層全体の水平剛性と減衰係数を表-5 に示す。支承材のみのケース①において、免震層全体の水平剛性は、200mm 変形時の各支承材の設計値 (表-3) を足し合わせた全支承材の等価剛性に対し、13.6 倍となった。また、支承材とオイルダンパーを設置した通常免震のケース②では、設計値に対して概ね 15 倍となっており、微振動に対する免震建物の応答を検討するには、微小振幅に応じた支承材の水平剛性を用いて評価することが必要となった。減衰係数に着目すると、支承材のみの場合と比べて、オイルダンパーを設置することで減衰係数は 1.5 倍に、さらに微振動対策ダンパーを加えることで 4.2 倍となり、オイルダンパーと微振動対策ダンパーの各々の減衰効果を確認した。また、ケース①とケース②の差から求めたオイルダンパーの減衰係数は 18.2kN・s/cm であり、地震時の設計値 (表-3) に比べてやや小さいものの、振幅が 0.003cm 程度においてもオイルダンパーの効果が確認できた。これらの起振実験の結果とフィッティング解析による検討を踏まえて、微振動対策ダンパーの適用を検討する際、振動数と振幅レベルを限定すれば、各免震装置を線形モデルと仮定した評価が可能であると推察される。

6. まとめ

オールラウンド免震を適用した建物を対象として、常時微動計測や起振実験を行い、微振動対策ダンパーの

表-4 フィッティング解析の結果

免震装置の組み合わせ	建物重量	固有振動数	減衰定数	最大応答変位
	W (kN)	f (Hz)	h	A_{max} (cm)
① 支承材のみ (天然ゴム系積層ゴム、高減衰ゴム系積層ゴム、弾性すべり支承)	44.546	1.0124	0.0618	0.013
② 通常免震 (支承材とオイルダンパー)		1.0696	0.0883	0.008
③ 支承材と微振動対策ダンパー		1.3231	0.1616	0.003
④ オールラウンド免震 (支承材とオイルダンパー および微振動対策ダンパー)		1.4562	0.1799	0.002

表-5 免震層全体の水平剛性と減衰係数

免震装置の組み合わせ	水平剛性	減衰係数
	K (kN/cm)	C (kN・s/cm)
① 支承材のみ (天然ゴム系積層ゴム、高減衰ゴム系積層ゴム、弾性すべり支承)	$K_r = 1,838.0$	$C_r = 35.7$
② 通常免震 (支承材とオイルダンパー)	$K_{ro} = 2,051.6$	$C_{ro} = 53.9$
③ 支承材と微振動対策ダンパー	$K_m = 3,139.3$	$C_m = 122.1$
④ オールラウンド免震 (支承材とオイルダンパー および微振動対策ダンパー)	$K_{all} = 3,802.7$	$C_{all} = 149.5$

無において微動特性を確認した。その結果、以下の知見を得た。

- i. 常時微振動計測では、通常の免震は常時微振動が一部の振動数領域で設計目標値を越えてしまうのに対して、オールラウンド免震は全ての振動数領域で設計目標値を大きく下回ることを確認した
- ii. 建物内部で錘を水平方向に往復させて約3kNの起振力を与える起振実験により、オールラウンド免震の最大変位振幅は、通常の免震構造に比べて1/4程度に低減することを確認した
- iii. オイルダンパーと微振動対策ダンパーの有無をパラメータとした計測により、微振動を十分に低減するためには、微振動対策ダンパーの設置が有効であることを確認した

7. あとがき

本報告では、対象建物が竣工する前の性能確認について述べた。本建物における事業は、精密・微細加工の機器類が配備された後、本格的に稼働する。今後、建物が使用されている状態での常時微動計測を実施し、設計時のシミュレーションとの比較を行う予定である。また、微振動対策ダンパーは、免震建物の風揺れ対策⁸⁾として活用できることから、高層免震等に提案していきたい。

【謝辞】

本研究の遂行にあたり、微振動対策ダンパーの共同開発者であるオイレス工業のご助力を頂いた。また、オールラウンド免震を適用した実建物における測定では、日進工具株式会社様にご協力を頂いた。ここに記して感謝の意を表す。

【参考文献】

- 1) 藤田隆史、「超 LSI 工場の振動問題—微振動防振技術と免震技術—」、日本機械学会誌、第 89 巻、pp. 99-104、1986. 4
- 2) 古橋 剛、光阪勇治、徳武茂隆、松本吾朗、高瀬憲克、有馬文昭、「新幹線に隣接する免震半導体工場の微振動性状 その 1~その 3」、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造Ⅱ、pp. 711-718、1998. 9
- 3) 稲井慎介、石田琢志、成田修英、谷地敏和夫、森田泰弘、山本健史、「弾性すべり支承に制振用オイルダンパーを組込んだ免震装置の微振動測定による性能検証」、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造Ⅱ、pp. 581-582、2016. 8
- 4) 山上 聡、安井健治、山田高之、川井伸泰、「免震建物の微振動特性に関する研究」、奥村組技術研究年報、2008. 7
- 5) 宮崎 充、川井伸泰、山田高之、山上 聡、澤田

毅、長島和央、「多層せん断粘性ダンパーの開発と実用化 その 1 ダンパーの機構」、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造Ⅱ、pp.367-368、2010.9

- 6) 平野 晋、長岡 徹、川口澄夫、大塚 将、「偏心ローラー支承の実建物への適用 その 4 性能確認試験結果」、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造Ⅱ、pp. 367-368、1998. 9
- 7) 山本良隆、佐藤新治、池永雅良、斎藤賢治、栗林博之、石川晶一、林 政輝、「コンパクトタイプ粘性ダンパーの高層建物への適用例 その 2 粘性ダンパーの実大性能実験」、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造Ⅱ、pp. 995-996、1999. 9
- 8) 山田高之、舟山勇司、川井伸泰、宮崎 充、澤田毅、長島和央、「多層せん断粘性ダンパーの開発と実用化 その 3 超高層免震建物の風揺れ対策」、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造Ⅱ、pp. 371-372、2010. 9

非線形履歴則を有する構造物の非定常入力における エネルギー応答の統計的評価法に関する基礎的研究

Statistical Method for Evaluating the Energy Response of Structures

Exhibiting Nonlinear Hysteresis Subjected to Nonstationary Input Motion

小山慶樹*

要旨

エネルギーの釣合いに基づく耐震計算法において、地震時に構造物が吸収するエネルギー量が耐震性能の評価指標として重要な応答値となる。また、将来起こる地震動を完全に予測することが困難であることから、構造物の耐震性能を確認するためには地震動を確率論的に扱い、構造物の応答値を統計的に評価することが必要となる。

本報では、多自由度系にも対応したランダム応答解析法を用い、地震動を確率論的に考慮して構造物のエネルギー応答を統計的に評価する。基礎研究として構造物を1質点弾塑性系に置換したモデルを対象に、エネルギー応答の評価法を提案する。また、モンテカルロシミュレーションを用いて提案手法の妥当性を確認し、エネルギー応答の期待値、変動係数は構造物の固有周期、および入力地震動の振幅包絡線形状の影響が大きいことを示す。

キーワード：エネルギー、ランダム応答解析、非線形性、非定常性

1. まえがき

構造物の耐震設計法の一つにエネルギーの釣合いに基づく耐震計算法（以下、エネルギー法）がある。エネルギー法では、構造部材のエネルギー吸収能力から構造物の耐震性能が評価される。特定の地震動に対して、最大層間変形や最大加速度応答値に比べ、エネルギー応答値は比較的安定していることから、合理的に構造物の耐震性能を把握することができる。

一方、兵庫県南部地震（1995年）を契機として、地震観測網が充実し、長周期地震動やパルス性地震動などが観測され、地震動予測の研究が行われている。しかし、地震動は様々な不確実性を有しているため、将来起こる地震動を完全に予測することは困難である。

既往の研究^{1)~6)}などでは、構造物を確定とし、入力地震動を確率的に扱いエネルギー応答評価が行われ、総エネルギー入力の確率論的評価は可能であった。しかし、累積塑性ひずみエネルギーの確率論的評価に関しては、構造物の固有周期による適用範囲の限定や、非線形系への適用、多自由度系構造物への適用を考えた場合には更なる研究が必要であった。

そこで、本報では多自由度系の挙動や入力地震動の非定常性を考慮することが可能なランダム応答解析法を用

い、基礎研究として1質点弾塑性系モデルのエネルギー応答の評価法を提案する。また、モンテカルロシミュレーション結果と比較して提案手法の妥当性を確認する。その上で、非線形履歴則を有する構造物のエネルギー応答傾向を把握することを目的とする。

2. ランダム応答解析法

ランダム応答解析法は、構造物を確定として扱い、地震動を確率過程でモデル化し、構造物の応答の統計的特性を確率論的に評価する方法である。地震動の位相特性の影響を平均化した解を得ることができるため、応答の集積的特性を簡便に評価することが可能である。

2.1 半陰的時間積分法

本報で用いるランダム応答解析法は、Ohtori、Spencer⁷⁾の半陰的時間積分法を用いる。本解法は、非線形・非定常応答に適用可能であり、従来の解法では制限されていた大規模構造物などの複雑な挙動や、入力地震動の非定常性の影響を検討することが可能である。また、本解法は、非線形の状態方程式を統計的等価線形化手法により線形化し、各時間ステップで方程式を陰的に解く方法である。時刻 t における非線形運動方程式の状態方程式は、次式で表せる。

*技術研究所建築研究グループ

$$\dot{Y}_n = f(Y_n) + B_n W_n \quad (1)$$

ここで、 $Y_n = [X_n \dot{X}_n Z_n X_f]^T$ 、 X_n は変位ベクトル、 Z_n は履歴特性を表すための補助変数行列、 X_f は有色ノイズの状態ベクトル、 $f(\bullet)$ はシステム関数、 B_n は荷重ベクトル、 W_n はホワイトノイズであり、添え字 n は離散時刻 $n\Delta t$ を示す。応答の期待値は(1)式の期待値 $E[\bullet]$ を取り、次式から求まる。

$$E[Y_{n+1}] = D_n E[Y_n] + (1-\lambda) C_n B_n E[W_n] + \lambda C_n B_{n+1} E[W_{n+1}] \quad (2)$$

$$\text{ここで、 } D_n = I + C_n A_n, \quad C_n = \Delta t [I - \Delta t \lambda A_n]^{-1}$$

$$[\partial f / \partial Y]_{Y_n} \cong A_n$$

上式において、 $[I]$ は単位行列、 A_n は線形化された状態方程式の係数行列、 λ は $n+1$ ステップでの重みを示し、0.5 とした。これより、応答の共分散は次式から得られる。

$$\begin{aligned} Var[Y_{n+1}] = & D_n E[Y_n Y_n^T] D_n^T \\ & + (1-\lambda)^2 C_n B_n E[W_n W_n^T] B_n^T C_n^T \\ & + \lambda^2 C_n B_{n+1} E[W_{n+1} W_{n+1}^T] B_{n+1}^T C_n^T \\ & + \lambda(1-\lambda) C_n B_n E[W_n W_n^T] B_n^T C_{n+1}^T D_n^T \\ & + \lambda(1-\lambda) D_n C_n B_n E[W_n W_n^T] B_n^T C_n^T \end{aligned} \quad (3)$$

(3)式より、変位、速度の二乗平均平方根（以下、RMS）の応答値が得られる。また、総エネルギー入力、および累積塑性ひずみエネルギーの期待値は、得られた応答の共分散から評価できる。

2.2 履歴特性の統計的等価線形化

非線形履歴則として1階の微分方程式で表現可能な次式の Bouc-Wen（以下、B-W）モデル^{8),9)}を用いた。

$$F(x, \dot{x}, z) = \alpha kx + (1-\alpha)kz \quad (4)$$

$$\dot{z} = A\dot{x} - \beta|\dot{x}||z|^k - \zeta \dot{x}|z|^k \quad (5)$$

ここで、 x, k は変位、剛性を示し、 $\alpha, \beta, \zeta, A, \kappa$ は B-W モデルの形状を定めるパラメータである。(4)式は、統計的等価線形化を行うことで次式となる。

$$\ddot{z} \cong c_{eq} \dot{x} + k_{eq} z \quad (6)$$

ここで、 c_{eq}, k_{eq} は線形化係数である。本手法では、各時間ステップでアンサンブル応答の統計値を用いて線形化係数を評価する。

2.3 入力地震動のモデル化

ランダム応答解析法において、入力地震動はパワースペクトルと振幅包絡線関数でモデル化する必要がある。

表-1 入力地震動のスペクトル特性

地盤条件	Soft (軟弱地盤)	Hard (硬質地盤)
ω_{1g}	10.9	16.9
h_{1g}	0.96	0.94
ω_{2g}	1	
h_{2g}	0.995	

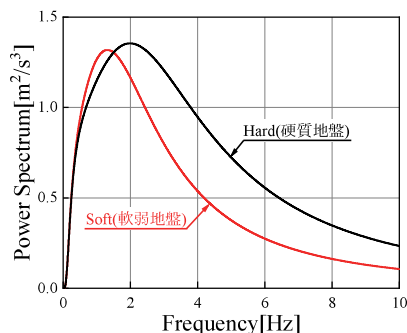


図-1 入力地震動のパワースペクトル

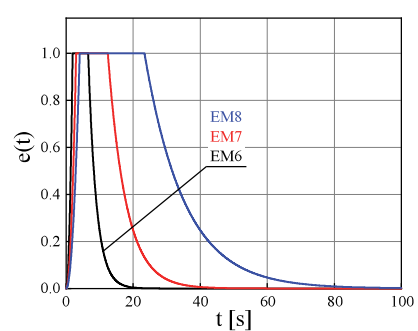


図-2 入力地震動の振幅包絡線形状

ここでは地震動のスペクトル特性として、次式の Clough-Penzien スペクトル¹⁰⁾を用いた。

$$S(\omega) = S_0 \frac{\omega_{1g}^4 + 4h_{1g}^2 \omega_{1g}^2 \omega^2}{(\omega_{1g}^2 + \omega^2)^2 + 4h_{1g}^2 \omega_{1g}^2 \omega^2} \cdot \frac{\omega^4}{(\omega_{2g}^2 + \omega^2)^2 + 4h_{2g}^2 \omega_{2g}^2 \omega^2} \quad (7)$$

ここで、 ω は円振動数、 S_0 はスペクトル強度を示す。 S_0 はピークファクターを 3.0 と仮定したときに想定した最大地動加速度になるように設定した。 $\omega_{1g}, h_{1g}, \omega_{2g}, h_{2g}$ はスペクトル特性を表現するパラメータである。表-1 に採用したスペクトル特性のパラメータ¹¹⁾を、図-1 に使用した入力地震動のパワースペクトルを示す。入力地震動の振幅包絡線形状は、図-2 に示した大崎の振幅包絡線形状¹²⁾を用いた。図中の EM は振幅包絡線形状を示すパラメータである。

3. 弾塑性系におけるエネルギーの評価

ここでは、ランダム応答解析法を用いた1質点弾塑性系における総エネルギー入力、および累積塑性ひずみエネルギーの期待値と変動係数の評価法を提案する。次に、想定するスペクトル強度を有する乱数位相波に図-1 で示したスペクトル特性、図-2 で示した振幅包絡線形状を付与した地震動 10,000 波を入力地震動とするモンテカルロシミュレーション（以下、MCS）より得られた解析結果の統計値と比較し、提案した評価法の妥当性を示す。

3.1 総エネルギー入力の評価方法

a. 期待値

B-W モデルの履歴特性を有する1質点弾塑性系の運動方程式は次式で表せる。

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + F(x, \dot{x}, z) = -m\ddot{x}_g \quad (8)$$

ここで、 m は質量、 c は粘性減衰、 \ddot{x}_g は地動加速度を示す。(8)式より、エネルギーの釣合式は次式となる。

$$m \int_0^t \ddot{x} \dot{x} dt + c \int_0^t \dot{x}^2 dt + \int_0^t F(x, \dot{x}, z) \dot{x} dt = -m \int_0^t \ddot{x}_g \dot{x} dt \quad (9)$$

(9)式の右辺より、総エネルギー入力の期待値 $E[E_I]$ は次式となる。

$$E[E_I] = m \int_0^t E[\ddot{x}_g \dot{x}] dt \quad (10)$$

入力地震動を非定常有色ノイズで規定すると、(8)式 の非線形状態方程式は、(1)、(4)、(6)式より次式で表せる。

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \\ z \\ x_{1g} \\ \dot{x}_{1g} \\ x_{2g} \\ \dot{x}_{2g} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\alpha \cdot \omega_0^2 & 2h_0\omega_0 & -(1-\alpha)\omega_0^2 & 2h_{1g}\omega_{1g} & -\omega_{2g}^2 & -2h_{2g}\omega_{2g} & 0 \\ 0 & c_{eq} & k_{eq} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\omega_{1g}^2 & -2h_{1g}\omega_{1g} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & \omega_{2g}^2 & 2h_{2g}\omega_{2g} & -\omega_{2g}^2 & -2h_{2g}\omega_{2g} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \\ z \\ x_{1g} \\ \dot{x}_{1g} \\ x_{2g} \\ \dot{x}_{2g} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ e(t) \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} W(t) \quad (11)$$

ここで、 ω_0 は固有円振動数、 h_0 は減衰定数、 $[x_{1g} \ \dot{x}_{1g} \ x_{2g} \ \dot{x}_{2g}]^T$ はフィルターを表現するための変数ベクトル、 $e(t)$ は入力地震動の振幅包絡関数、 $W(t)$ はホワイトノイズである。以上のことより、(10)式の $E[E_I]$ は次式から求まる。

$$E[E_I] = \int_0^t a_g \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} E[Y_n Y_n^T] [0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T dt \quad (12)$$

ここで、 $a_g = [\omega_{1g}^2 \ 2h_{1g}\omega_{1g} \ -\omega_{2g}^2 \ -2h_{2g}\omega_{2g}]$
 また、総エネルギー入力 V_E 、およびその期待値 $E[V_E]$ は、次式から求まる。

$$V_E = \sqrt{2E_I/m} = \sqrt{2 \int_0^t \ddot{x}_g \dot{x}_g dt / m} \quad (13)$$

$$E[V_E] = \sqrt{2E[E_I]/m} \quad (14)$$

b. 変動係数

非定常有色ノイズ入力に対する総エネルギー入力の変動係数は、大井他⁵⁾により次式から求めることができる。

$$c.o.v.[E_I] \approx \frac{1}{EP} \sqrt{\frac{2h_0\omega_0}{\pi(1-h_0^2)} \int_{-\infty}^{\infty} U_2(\omega) |A_2(\omega)|^2 d\omega} \quad (15)$$

ここで、 $EP = A_2(0) = \int_0^{\infty} [e(t)]^2 dt$
 $A_2(\omega) \leftrightarrow [e(t)]^2$ (\leftrightarrow はフーリエ変換を示す。)
 $U_2(\omega) = \frac{(3-4h_0^2)\omega^2 - 4\omega_0^2}{(\omega^2 - 4\omega_0^2)^2 + 16h_0^2\omega_0^2\omega^2} + \frac{1}{4h_0^2\omega_0^2 + \omega^2}$

ω_0 は固有円振動数、 h_0 は減衰定数を示す。なお、解析対象がホワイトノイズ入力に粘性減衰弾性系の場合、(15)式は厳密解となる。特に、(15)式は振幅包絡関数が(16)式の Bogdanoff の振幅包絡線関数¹³⁾の場合、総エネルギー入力の変動係数 $c.o.v.[E_I]$ は(17)式で表せる。

$$e(t) = \xi \times t \times \exp[1-\xi t] \quad (16)$$

$$c.o.v.[E_I] = \sqrt{\frac{\xi}{8(1-h_0^2)} \left(\frac{C_A}{C_B} + \frac{C_C + C_D - C_E}{C_F} \right)} \quad (17)$$

ここで、 $C_A = 8\xi^2 + 9\xi\omega_0 h_0 + 3\omega_0^2 h_0^2$
 $C_B = (\xi + \omega_0 h_0)^3$
 $C_C = 7\xi^3 (1-2h_0^2)$
 $C_D = \xi^3 \{ \xi(1-2h_0^2) + \omega_0 h_0 \} (\xi + 2\omega_0 h_0)$
 $C_E = \omega_0 h_0 (3\omega_0^2 + 8\xi^2 + 6\xi\omega_0 h_0) (2\xi h_0 + \omega_0)^2$
 $C_F = (\xi^2 + \omega_0^2 + 2\xi\omega_0 h_0)^3$

ξ は Bogdanoff の振幅包絡線形状を定めるパラメータである。(15)式の理論解は、任意の振幅包絡線形状に対して適用することが可能であるが、計算過程が複雑となる。そこで、簡便な(17)式を用いて、任意の振幅包絡線形状に対して適用可能な評価方法を提案する。

まず、(16)式の振幅包絡線形状の全パワーEPは次式か

ら求まる。

$$EP = \int_0^{\infty} [\xi \times t \times \exp[1-\xi t]]^2 dt = \exp[2]/(4\xi) \quad (18)$$

ここで、(18)式と任意の振幅包絡線形状の全パワーが等しくなるように、(18)式に任意の振幅包絡線形状の全パワーを代入して ξ を定め、(17)式から総エネルギー入力の変動係数を評価した。総エネルギー入力の速度換算値の変動係数 $c.o.v.[V_E]$ は、(14)式に1次近似2次モーメント法を適用して次式から求める。

$$c.o.v.[V_E] = E[V_E] / \sqrt{VAR[V_E]} \quad (19)$$

$$\text{ここで、} VAR[V_E] = \frac{VAR[E_I]}{2m \times E[E_I]} = \frac{c.o.v.[E_I]^2}{2m} E[E_I]$$

(15)、(17)、(19)式は、弾性系に対する評価式である。弾塑性系に対しては、式中の固有円振動数と減衰定数を等価円振動数と等価減衰定数に置換する必要がある。そこで、秋山のエネルギー評価で用いられている有効周期の概念¹⁴⁾を用いて、次式に示す等価円振動数 ω_{eq} と等価減衰定数 h_{eq} を定めた。

$$\left. \begin{aligned} \omega_{eq} &= 2\omega_0\omega_m / (\omega_0 + \omega_m) \\ h_{eq} &= (h_0 + h_m) / 2 \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

ここで、 ω_0, h_0 はそれぞれ弾性時の固有円振動数、減衰定数を示す。また、 ω_m, h_m は RMS 変位応答が最大のときに(2)式で示した状態行列 A_n を複素固有値解析して求めた瞬間固有円振動数、瞬間減衰定数とした。

以上のことより、(17)式の ω_0 、および h_0 を(20)式の ω_{eq} 、 h_{eq} に、読み替えて代入することで、総エネルギー入力の変動係数 $c.o.v.[E_I]$ を評価した。

c. MCS による評価法の妥当性

本項では、MCSの結果と比較し、3.1節のa項、b項で示した提案手法の妥当性を確認する。解析モデルは1質点弾塑性系とし、弾性固有周期 T_0 を1.0~5.0s、減衰定数 h_0 を0.02~0.10、せん断力係数 C_0 が0.2のときのせん断力を降伏せん断耐力 Q_y となるように設定した。入力地震動の継続時間は100s、最大地動加速度は0.3~3.0[m/s²]とした。地震動の振幅包絡線形状、およびスペクトル特性は2.3節による。MCSでは、非線形履歴則として Ramberg-Osgood(以下、R-O)モデル¹⁵⁾を用いる。R-Oモデルの骨格曲線を(21)式、履歴曲線を(22)式に示す。

$$\frac{\delta}{\delta_y} = \frac{Q}{Q_y} + \alpha \left(\frac{Q}{Q_y} \right)^\gamma \quad (21)$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{\delta + \delta_r}{2\delta_y} &= \frac{Q + Q_r}{2Q_y} + \alpha \left(\frac{Q + Q_r}{2Q_y} \right)^\gamma & \dot{\delta} \geq 0 \\ \frac{\delta - \delta_r}{2\delta_y} &= \frac{Q - Q_r}{2Q_y} + \alpha \left(\frac{Q - Q_r}{2Q_y} \right)^\gamma & \dot{\delta} < 0 \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

ここで、 δ は変位、 Q はせん断力を示し、添え字の y は降伏点を示す。また、 α, γ は R-O モデルのパラメータであり、 γ が大きくなるほど、非線形性が強くなる。 δ_r, Q_r は折り返し点の変位、せん断力を示す。

本報で用いるランダム応答解析法では、微分方程式で表現可能な履歴則しか扱えない。そこで、R-O モデルに対してB-WモデルのQ-δ関係が概ね等しくなるように、非線形最小二乗法による最適化を行い、B-W モデルのパラメータを定めた。履歴モデルの近似結果の一例を図-3に示す。図より、履歴曲線の一致精度が良好であることが分かる。

次に、弾性固有周期 T_0 を 1.0s、減衰定数 h_0 を 0.02、R-O モデルの γ を 5.0、地盤条件を Soft、振幅包絡線形状は EM7 を基本モデルとし、パラメータの違いによる総エネルギー入力の影響を検討した。総エネルギー入力の速度換算値の期待値 $E[V_E]$ の検討結果を図-4に示す。横軸は地動加速度の標準偏差 $\sigma[PGA]$ とし、○印が MCS、実線が提案手法、図中赤線が基本モデルを示す。図より、ランダム応答解析法より得られた $E[V_E]$ は MCS と良好対応を示しており、ランダム応答解析法の妥当性が確認できる。 $E[V_E]$ は、構造物の固有周期や履歴則の非線形性、入力地震動の振幅包絡線形状、地盤条件に影響を受け、減衰定数による影響が少ないことが分かる。

図-5に、総エネルギー入力の速度換算値の変動係数 $c.o.v.[V_E]$ の検討結果を示す。図より、ランダム応答解析法から得られた $c.o.v.[V_E]$ は MCS と種々の条件下で良好

な対応が得られ、提案手法の妥当性が確認できる。

$c.o.v.[V_E]$ は振幅包絡線形状、固有周期の影響が大きく、地盤条件や減衰定数の影響は小さい。また、履歴特性の非線形性が強くなると等価周期が大きくなることから、僅かに影響を受けている。一連の傾向として、最大地動加速度が大きくなるほど、 $c.o.v.[V_E]$ が収斂していることが分かる。これは、構造物が弾性・弾塑性が混在する不安定領域から弾塑性のみの安定した領域に移り替わることに起因すると考えられる。一般に定常 ($e(t)=1.0$) となる時間帯が短い地震動や長周期構造物は、応答が定常状態になりにくいことが言われており、構造物が定常応答になりにくい場合ほど、 $c.o.v.[V_E]$ が大きくなっていることが確認できる。

3.2 累積塑性ひずみエネルギーの評価

a. 期待値

累積塑性ひずみエネルギー W_p は、応答が十分に収まるまでを積分範囲とすると、(9)式の左辺第3項より次式で与えられる。

$$W_p(t) = \int_0^t F(x, \dot{x}, z) dt \quad (23)$$

(4)、(23)式より、累積塑性ひずみエネルギーの期待値 $E[W_p]$ は次式となる。

$$E[W_p] = \int_0^\infty E[F(x, \dot{x}, z)] dt \\ = \int_0^\infty K \{ \alpha E[x\dot{x}^T] + (1-\alpha) E[z\dot{x}^T] \} dt \quad (24)$$

また、累積塑性ひずみエネルギーの速度換算値 V_D 、およびその期待値 $E[V_D]$ は次式から求める。

$$V_D = \sqrt{2W_p/m} = \sqrt{2 \int_0^\infty F(x, \dot{x}, z) dt} \quad (25)$$

$$E[V_D] = \sqrt{2E[W_p]/m} \quad (26)$$

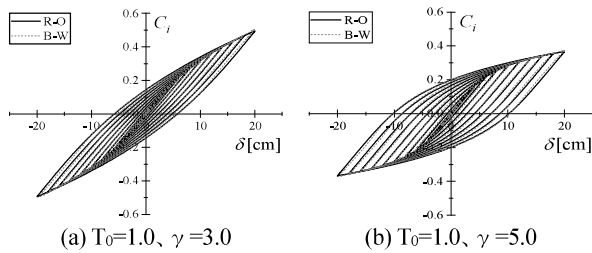


図-3 R-OモデルとB-Wモデルの近似例(Soft)

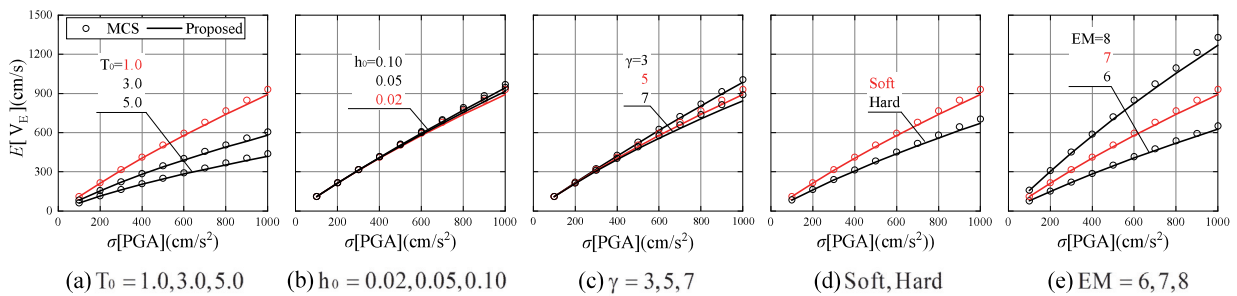


図-4 総エネルギー入力の速度換算値の期待値

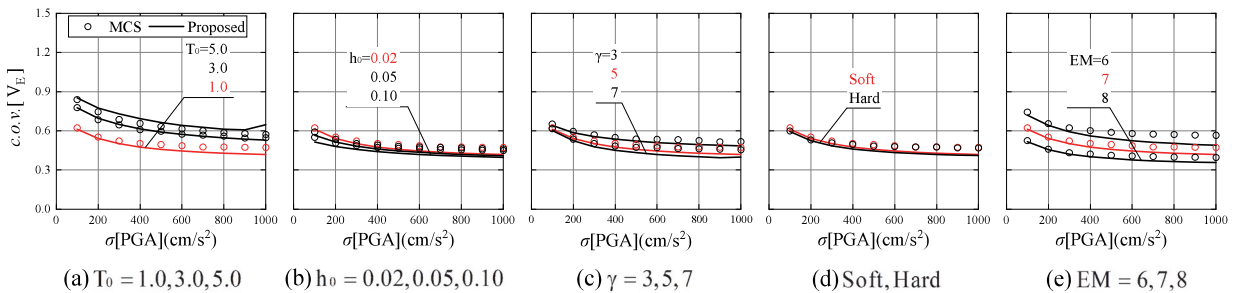


図-5 総エネルギー入力の速度換算値の変動係数

b. 変動係数

本項では、長周期領域においても適用可能な累積塑性ひずみエネルギーの変動係数の評価法を提案する。また、従来評価が難しいとされていた弾性・弾塑性が混在する領域での評価も同時に示す。

累積塑性ひずみエネルギーの変動係数の評価方法として、確率密度関数の変数変換を利用する方法を提案する。基礎変数(独立変数)を総エネルギー入力、従属変数を累積塑性ひずみエネルギーとして、次式の関数関係を仮定する。

$$W_p = g(E_i) \quad (27)$$

ここで、総エネルギー入力を確率変数として、累積塑性ひずみエネルギーの確率密度関数を次式より求める。

$$f_{w_p}(W_p) = f_{E_i}(E_i) \left| \frac{dg^{-1}(W_p)}{dW_p} \right| = f_{E_i}(g^{-1}(W_p)) \left| \frac{dg^{-1}(W_p)}{dW_p} \right| \quad (28)$$

ここで、 $f_{E_i}(E_i)$ は総エネルギー入力の確率密度関数で(12)、(17)式の総エネルギー入力の期待値と変動係数を用いて推定可能である。また、(27)式は便宜的に次式を仮定することとする。

$$E[W_p] = E[g(E_i)] = g(E[E_i]) \quad (29)$$

(29)式の総エネルギー入力の期待値と累積塑性ひずみエネルギーの期待値の関数関係 $g[\cdot]$ は、事前に入力強度を変化させ、ランダム応答解析法を行うことにより評価が可能である。

以上のことより、累積塑性ひずみエネルギーの分散が次式で導かれる。

$$VAR[W_p] = \int (W_p - E[W_p])^2 \cdot f_{w_p}(W_p) dW_p \quad (30)$$

また、累積塑性ひずみエネルギーの速度換算値に関しては、総エネルギー入力と同様に、1次近似2次モーメ

ント法を用いることで、次式から求まる。

$$VAR[V_D] = \frac{1}{2m} \frac{VAR[W_p]}{E[W_p]} = \frac{c.o.v.[W_p]^2}{2m} E[W_p] \quad (31)$$

$$c.o.v.[V_D] = \sqrt{VAR[V_D]} / E[V_D] \quad (32)$$

c. MCSによる評価法の妥当性

3.1節c項と同様のパラメータを用いて、MCS10,000回の結果と比較を行う。累積塑性ひずみエネルギーの期待値、および変動係数の比較結果を示し、3.2節のa項、b項に示した提案手法の妥当性を確認し、応答特性を確認する。

累積塑性ひずみエネルギーの速度換算値の期待値 $E[V_D]$ の検討結果を図-6に示す。図より、ランダム応答解析法により得られた結果は、MCSと良好な一致が得られている。また、 $E[V_D]$ は固有周期および振幅包絡線形状、地盤条件に大きく影響を受けるが、減衰定数による影響も若干認められる。また、入力強度が大きくなり、非線形性が強くなるほど、等価周期が大きくなるため $E[V_D]$ に影響が出てくる。

次に、累積塑性ひずみエネルギーの速度換算値の変動係数 $c.o.v.[V_D]$ の検討結果を図-7に示す。図より、提案手法はMCSと種々の条件下で良好な対応が得られており、提案手法の妥当性が確認できた。

$c.o.v.[V_D]$ は、地盤条件や減衰定数の影響はあまり受けず、振幅包絡線形状、固有周期の影響が大きく、履歴特性の非線形性に多少影響を受けることが分かる。振幅包絡線形状、固有周期の影響が大きい理由は、3.1節のc項で述べたように、構造物の応答が定常になりにくい場合ほど $c.o.v.[V_D]$ が大きくなったと考えられる。また、減衰定数の影響を受けない要因は、 $c.o.v.[V_D]$ が減衰定数の影響をさほど受けない総エネルギー入力の統計値を用いて評価していることに起因していると考えられる。

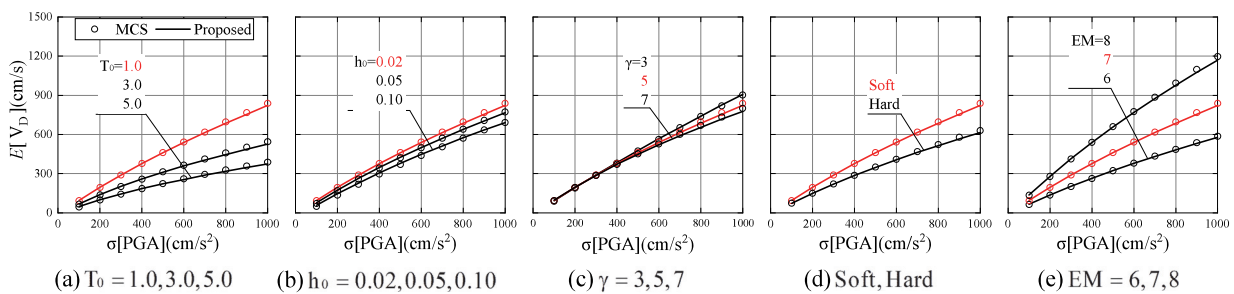


図-6 累積塑性ひずみエネルギーの速度換算値の期待値

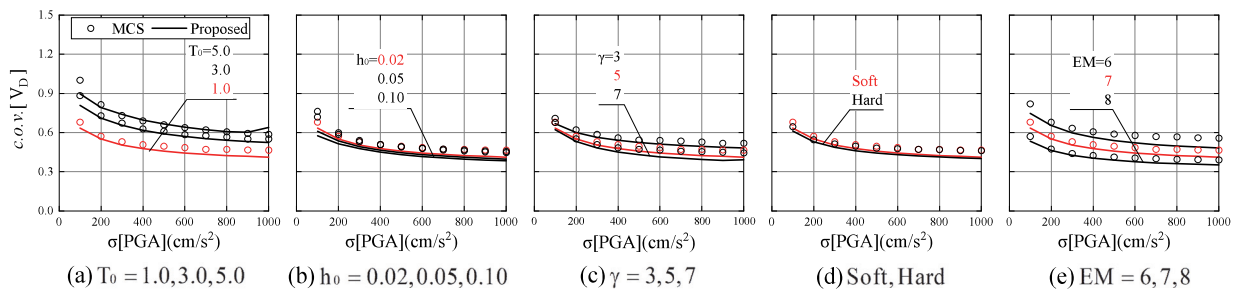


図-7 累積塑性ひずみエネルギーの速度換算値の変動係数

$c.o.v.[V_D]$ の応答特性は、 $c.o.v.[V_E]$ と同様に最大地動加速度が大きくなるほど、収斂している。この原因としては、構造物が弾性・弾塑性が混在する不安定な領域から弾塑性のみの安定した応答領域に移り替わることが挙げられる。

4. まとめ

本報では、1 質点弾塑性系構造物を対象に非定常入力時のエネルギー応答の統計的評価法を提案し、MCS 結果と比較することで、提案手法の妥当性を確認した。また、エネルギーの期待値と変動係数の応答傾向を示した。主要な結論を以下に示す。

- i. $Q-\delta$ 関係が概ね等しくなるように、任意の非線形履歴則を B-W モデルに近似することにより、総エネルギー入力および累積塑性ひずみエネルギーの期待値がランダム応答解析法から評価できることを示した
- ii. 非線形履歴則を有する構造物の総エネルギー入力の変動係数を、RMS 変位応答が最大のときの瞬間固有円振動数、および瞬間減衰定数を用いることで簡易に評価することを可能とした
- iii. 確率密度関数の変数変換を利用し、長周期領域にも適用可能な累積塑性ひずみエネルギーの変動係数の評価法を提案した
- iv. 総エネルギー入力、および累積塑性ひずみエネルギーの期待値は、固有周期や地盤条件、振幅包絡線形状による影響が大きい
- v. 総エネルギー入力、および累積塑性ひずみエネルギーの変動係数は、減衰定数や地盤条件の影響は小さいが、固有周期や振幅包絡線形状による影響が大きい
- vi. 総エネルギー入力、および累積塑性ひずみエネルギーの変動係数は入力強度が小さい領域では、応答の非定常の影響により、大きくなる傾向がある

5. あとがき

本報は文献 16)に地盤特性、構造物の非線形性の影響についての検討を加えたものである。1 質点系だけの検討に留まっているが、本評価手法自体は、多質点系、更にはフレーム系へと拡張が可能である。今後は、多質点系への適用に関して検討を進める。

また、本報を作成するにあたり、東京都市大学工学部原子力安全工学科教授大鳥靖樹氏にご指導を賜った。ここに、記して感謝の意を表す。

【参考文献】

- 1) 三宅辰哉、「耐震規範としての最大応答と累積応答の関係に関する考察」、日本建築学会構造系論文報告集、第 599 号、pp.135-142、2006.1
- 2) 中野富夫、松田 敏、「最大応答の期待値および標準偏差に関する統計的評価法」、日本建築学会構造工学論文集、Vol.54B、pp.211-217、2008.3
- 3) 洪起、田中 尚、「ホワイトノイズを受ける 1 自由度系の履歴吸収エネルギー」、日本建築学会構造系論文報告集、第 270 号、pp.99-103、1978.8
- 4) 松田 敏、「バイリニア系の相似性に着目したエネルギー応答性状の評価」、日本建築学会構造系論文報告集、第 614 号、pp.23-28、2007.4
- 5) 大井謙一、田中 尚、高梨晃一、「地震動による構造物へのエネルギー入力の統計量予測に関する基礎的考察」、日本建築学会構造系論文報告集、第 347 号、pp.47-55、1985.1
- 6) 三宅辰哉、福知保長、「粘性減衰を有する一質点系の累積塑性ひずみエネルギーに関する考察」、日本建築学会構造系論文報告集、第 470 号、pp.85-94、1995.4
- 7) Yasuki Ohtori, Billie F. Spencer Jr., "Semi-Implicit Integration Algorithm for Stochastic Analysis of Multi-Degree-of-Freedom Structures", ASCE Journal of Engineering Mechanics, Vol.128, No6, pp.635-643, 2002
- 8) Y.K.Wen, "Method for Random Vibration of Hysteretic Systems", ASCE Journal of Engineering Mechanics Division, Vol.120, No. EM2, pp.249-263, 1976
- 9) Y.K.Wen, "Equivalent Linearization for Hysteretic Systems Under Random Excitation", Journal of Applied Mechanics, Vol.47, pp.150-154, 1980.3
- 10) R.W.Clough, j.Penzien, "Dynamics of Structures", McGraw-Hill, 1986.
- 11) Sue and Wen, "Stochastic Evaluation of Seismic Structural Performance", J. Struct Eng, Vol.111, No6, pp.1204-1218, 1984.
- 12) 大崎順彦、新・地震動のスペクトル解析入門、鹿島出版会、1994
- 13) J.L.Bogdanoff, J.E.Goldberg, M.C.Bernard, "Response of a Single-Structure to a Random Earthquake Type Disturbance", Bull. Seismo. Soc. America, Vol.51 No2, 1961.4
- 14) 秋山 宏、建築物の耐震極限設計、東京大学出版会、1980.9
- 15) P.C.Jennings, "Periodic Response of a General Yielding Structure", Journal of the Engineering Mechanics Division Proceedings of the American Society of Civil Engineers, pp.131-165, 1964.4
- 16) 小山慶樹、大鳥靖樹、坂場律和、北村春幸、「非定常ランダム応答解析法を用いたエネルギー応答の統計的評価に関する研究」、構造工学論文集 B Vol.64、pp.207-213、2018.3

技術研究所管理棟の Z E B 化改修

ZEB Renovation of Technical Research Institute Head Office

松永智弘* 坂崎 隆** 中西史子** 岩下将也* 稲留康一*

要 旨

建物の一次消費エネルギー削減の取り組みとして、ネット・ゼロ・エネルギー・ビル（以下、ZEB）が推進されている。当社では、ZEB 化設計手法の検討や要素技術の開発を行うとともに、ZEB プランナーに登録し普及に努めている。技術研究所管理棟を汎用的で実効性の高い技術を組み合わせることで ZEB 化改修し、BELS（建築物省エネルギー性能表示制度）認証で Nearly ZEB の評価を取得した。

キーワード：ZEB、改修

1. まえがき

民生部門のエネルギー消費量は、他部門に比べ増加が顕著であり、省エネルギーの推進と再生可能エネルギーの活用が我が国にとって喫緊の課題となっている。その方策の一つとして、ZEB があり、エネルギー基本計画において、2030 年までに新築建築物の平均で ZEB の実現を目指すとする目標が掲げられている¹⁾。表-1 に ZEB の施策上の分類を示す²⁾。『ZEB』は建物の省エネルギーと敷地内に設置された再生可能エネルギー供給設備によって、消費エネルギーを年間で正味ゼロにする建物である。Nearly ZEB、ZEB Ready、ZEB Oriented は、その実現を指向した建物であり、どの程度『ZEB』に近いかを表している。建物の室用途などから定められる基準一次エネルギー消費量に対する削減率が一つの目安となるが、ZEB Ready では 50%以上、Nearly ZEB では再生可能エネルギー設備などの創エネルギーも加えて 75%以上の削減が必要となる。ZEB Oriented は、ZEB Ready や Nearly ZEB、『ZEB』の達成が難しいとされる大規模建物に限定し、未評価技術を加えることを条件に、建物用途によって 30%以上または 40%以上のエネルギー削減で達成されるよう定義が緩和されている²⁾。

当社においても、ZEB 化の試設計³⁾や要素技術の開発を行うとともに、ZEB プランナーに登録し、ZEB の普及に努めている。その取り組みの一つとして、写真-1 に示す日本初の実用免震建物として建築した技術研究所管理棟（茨城県つくば市：1986 年竣工、以下、本建物）の ZEB 化改修を行った。改修工事は、新築工事とは異なり法規制や施工可否の判断など様々な制約があることから、各々の技術を精査し、快適な執務空間を形成しながらも消費エネルギーを最大限削減できるような計

表-1 ZEB の施策上の分類

名称	定量的定義 (基準値からの削減率)		定性的定義	
	創エネ 除く	創エネ 含む		
『ZEB』	50% 以上	100% 以上	年間の一次エネルギー消費量が正味ゼロまたはマイナスの建築物	
Nearly ZEB	50% 以上	75% 以上	『ZEB』に限りなく近い建築物として、ZEB Readyの要件を満たしつつ、再生可能エネルギーにより年間の一次エネルギー消費量をゼロに近付けた建築物	
ZEB Ready	50% 以上	50% 以上 75% 未満	『ZEB』を見据えた先進建築物として、外皮の高断熱化及び高効率な省エネルギー設備を備えた建築物	
ZEB Oriented	建物用途	事務所 学校 工場等	40% 以上	ZEB Readyを見据えた高性能化及び高効率な省エネルギー設備に加え、更なる省エネルギーの実現に向けた措置を講じた建築物
		ホテル等 病院等 百貨店等 飲食店等 集会所等	30% 以上	



写真-1 技術研究所管理棟南側外観

画とした。また、汎用的で実効性の高い技術の組み合わせにより Nearly ZEB の実現を目指した。

本稿では、今回の改修工事で採用した省エネルギー、創エネルギー技術の概要と、設計段階での適用効果について報告する。

*技術研究所環境研究グループ **東日本支社建築設計部

表-2 建物概要

建物名称	技術研究所管理棟
建築場所	茨城県つくば市大砂387
建物用途	事務所
延べ面積	1330.10 m ²
建築面積	362.82 m ²
階数	地上4階
構造	RC造 免震
竣工年月日	1986.9
改修	2005.9
	2016.9 (1階のみ)
ZEB改修	2020.1

2. 改修建物の概要

表-2 に建物概要、図-1～3 に2、3、4階平面図を示す。RC造地上4階、延べ面積約1300m²の事務所である。1986年に竣工し、2005年に設備更新を含む大規模改修を実施した。建物形状は、東西に長い長方形であり真北から13°傾いている。2階は執務室と会議室、3階、4階は執務スペースと図書スペース、打合せスペースで構成されている。なお、1階はエントランスおよび展示スペースとなっている。南側は約1.5mのバルコニーが設けられている(写真-1)。断熱材は内断熱工法でスタイロフォーム20mm、窓ガラスはフロートガラス6mmである。

3. ZEB化の検討方針とその手順

3.1 Nearly ZEB 実現の検討方針

本建物は竣工後34年、大規模改修から15年が経過しており、改修に際しては、必要な機能について見直す必要がある。その機能要件を満たしたうえで、ZEBの実現を検討する方針とした。また、ZEBの普及を目的とした取り組みであることから、汎用的な技術の組み合わせによってZEBの実現が可能であることを検証する必要がある。そこで基本的な検討方針として、研究要素の高い特殊な省エネルギー技術は採用せず、国立研究開発法人建築研究所が公開する、建築物のエネルギー消費性能に関する技術情報から利用できる建築物のエネルギー消費量計算プログラム(非住宅版)⁴⁾(以下、Webプログラム)で、評価可能な汎用的技術の組み合わせのみでNearly ZEBの実現を目指すものとした。また、今後の省エネルギー技術の評価制度拡充を想定し、代表的な未評価技術も試験的に導入を検討した。

3.2 検討の進め方

ZEB化のための検討手順を記したもの(以下、ZEBチャート)を図-4に示す。ZEBチャートは、表-1に示したカテゴリをエネルギー消費率とエネルギー供給率の2軸で示したものであり、ZEBの定義や実現状況を示す際に広く使用されている。

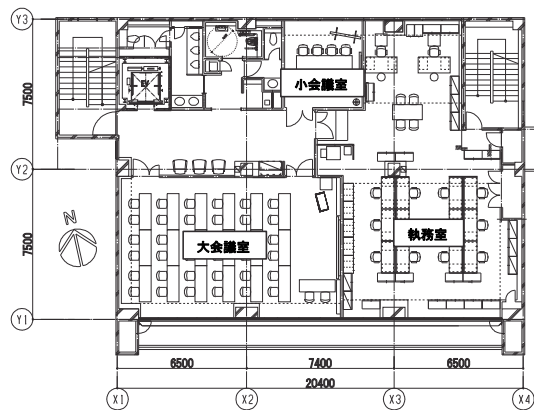


図-1 2階平面図

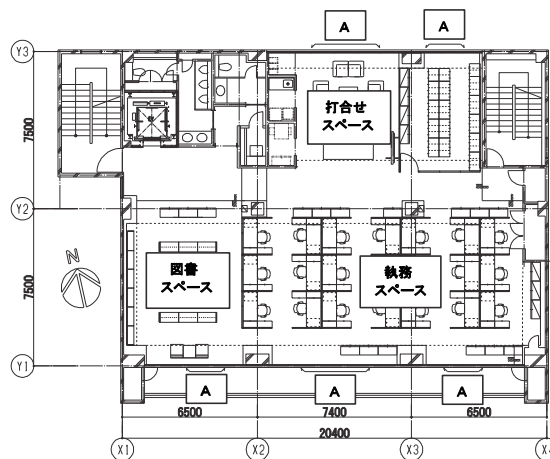


図-2 3階平面図

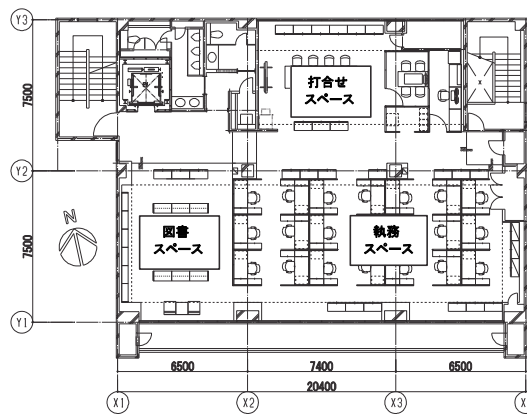


図-3 4階平面図

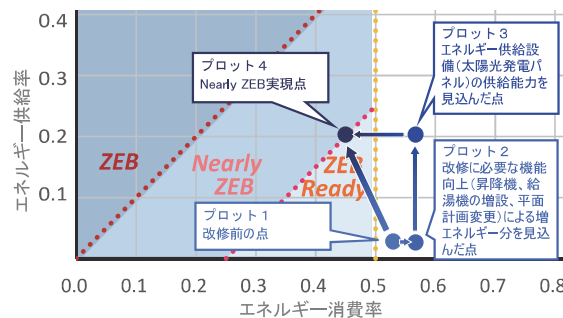


図-4 ZEBチャートを用いた検討手順

まず、現状把握として、改修前の設計値を ZEB チャート上にプロットした（プロット 1）。続いて、今回の改修によって新たに追加すべき機能要件を定め、これにより、新設、増設される設備とそのエネルギー消費量を求めた（プロット 2）。なお、基本的な平面プランに大きな変更はないものの、会議室の配置など軽微な変更をしている。これに伴い、基準値もわずかに変わっており、プロット 2 ではそれらの計画変更も加味した値とする。次に、屋上に敷設可能な太陽光発電パネルの面積・方位・傾斜角・性能を決定し、そこから算出されるエネルギー供給量を定めた（プロット 3）。最後に、Nearly ZEB を実現するために必要な省エネルギー量を求め、これを実現するための具体的な設備計画を検討した。

3.3 各プロットの内訳

各プロットにおけるエネルギーの内訳を図-5に示す。

a. プロット 1

本建物の執務スペースについては、改修前から照明の LED 化、高効率機器を用いた床吹き出し空調システムの採用、置換空調による搬送動力低減などの様々な省エネルギー技術を取り入れて、基準値に対し既に 47%のエネルギー削減が実現されていた。また、自家消費型の太陽光発電パネルを設置していた。

b. プロット 2

本改修では、エネルギー消費量に影響する設備として、昇降機の新設、全階の便所への給湯器の増設がある。また、平面プランについては大きな変更はないものの、昇降機の設置などから執務室のレイアウトの見直しをしている。これにより、エネルギー消費量が 5%増大する。

c. プロット 3 および必要なエネルギー削減量の計算

太陽光パネルの改修前後の設備仕様を表-3、その設置状況を図-6に示す。屋上北側にはキュービクルや室外機等の設備機器を配置していることから、太陽光パネルは南側に集中して敷設し、システム容量 32.5kW、年間 323.6GJ の発電量を得る計画とした。

これらの検討から、Nearly ZEB 実現に必要なエネルギー削減率 11.3%を求めた。

4. 採用した省エネルギー技術

オフィスビルでエネルギー消費量の大部分を占める設備は照明と空調である。その中でも空調設備が占める割合は最も高く、室内において人やパソコンなどの機器類から発生する内部負荷と、屋外から侵入する外部負荷を処理するためにエネルギーを消費する。内部負荷は、執務などにより生じるものであり、これを削減することは難しいが、外部負荷は、外皮（窓や外壁、屋根など）の高断熱化や熱回収可能な換気システムの採用により削減することができる。本章では、エネルギーを削減するた

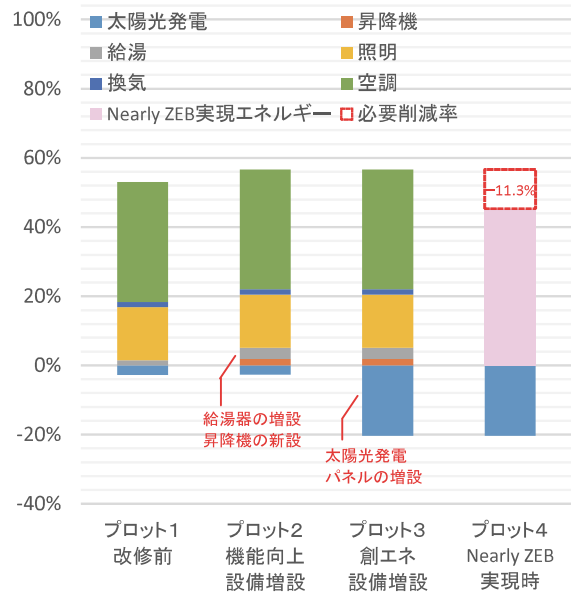


図-5 各プロットの内訳と Nearly ZEB 実現に必要なエネルギー削減率

表-3 改修前後の太陽光パネルシステムの仕様

	パワーエディ シヨナ効率	システム 容量	アレイ 面積	パネル 方位角	パネル 傾斜角	年間発電量
改修前	94%	4.4kW	26.2㎡	13°	10°	42.2 GJ/年
改修後	95.5%	32.5kW	167.6㎡	13°	15°	323.6 GJ/年

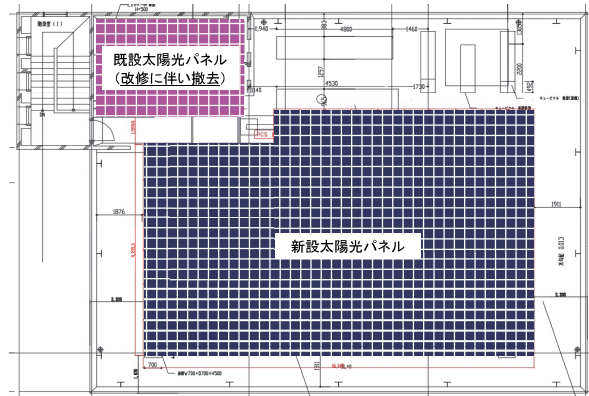


図-6 改修前後の太陽光パネルの設置状況

めに、検討・採用した技術について示す。

4.1 照明設備

照明機器は全館に LED を採用し、照明方式をタスクアンビエントとした。またアンビエント照明には、昼光センサーを設置することで昼光を有効利用し、照明エネルギーの削減を行った。

タスクアンビエント照明は、執務空間をタスクエリア（机上面）とアンビエントエリア（それ以外のエリア）に分割し、それぞれのエリアで必要照度を確保することで照明エネルギーを削減する技術である。今回採用したシステムは、調光タイプの汎用のベース照明と、机上に設置したタスクライトで各エリアの照明を確保する方式



写真-2 オフィス(日中)



写真-3 オフィス(夜間)

である。設定照度は、アンビエント照明で机上面高さの平均照度として 300lx、これにタスク照明を加えることにより机上面で 750lx（オフィスの照明照度推奨基準値）以上を確保した。なお、内装は反射率の高い白色系とし明るさ感が向上する工夫をしている（写真-2、写真-3）。これにより、エネルギー削減率で 7.8%の低減が得られた。

4.2 空調設備

4.1 に示したように、照明で 7.8%のエネルギー削減が可能であるため、空調設備で 3.5%以上のエネルギー削減を図れば、目標である 11.3%を満足できる。

空調の一次エネルギー消費量を低減させるためには、建物を高断熱化することによって熱負荷を抑え、定格能力の小さい空調機を選定することが有効となる。以下に、検討内容を示す。

a. 開口部の高断熱化

窓面は、日射による熱取得量が最も高く、室内環境への影響が大きい。そのため、ガラスの高断熱化を検討した。検討したガラスは、Low-E 複層ガラス、三層複層ガラスとした。

表-4 に単板ガラス（6mm）、Low-E 複層ガラス、三層複層ガラスとした場合の室内熱負荷（南側バルコニーによる日射遮蔽効果を考慮）の計算結果、表-5 に空調能力表を示す。

室内熱負荷を処理するためには、単板ガラスの場合は 10 馬力の空調能力が必要であったが、三層複層ガラスや Low-E 複層ガラスにすることで 8 馬力の空調能力で処理することができる結果となった。

b. 外壁の高断熱化

開口部を Low-E 複層ガラスもしくは三層複層ガラスとし、断熱材厚さ 40 mm（付加厚さ 20mm）と 70 mm（付加厚さ 50mm）と想定した場合の室内熱負荷計算結果を表-6 に示す。断熱材の厚さが増せば室内熱負荷が減ると予想したが、南面の大半を開口部が占めていることから、外壁部分の断熱材を増しても大きな効果は現れなかった。そのため、いずれのパターンでも空調能力を上げるまでには至らなかった。これらの検討結果から、

表-4 開口部の熱負荷比較

室名	大会議室(2階)	執務室(3階)	執務室(4階)	
面積[m ²]	81.9	248.2	243.5	
単板ガラス(改修前)	熱負荷[W]	14,855	23,658	23,625
	基準	1	1	1
Low-E複層ガラス	熱負荷[W]	13,898	19,843	20,225
	改修前との割合	0.94	0.84	0.86
三層複層ガラス	熱負荷[W]	13,775	19,344	19,779
	改修前との割合	0.93	0.82	0.84

表-5 空調能力表

システム相当馬力	6馬力	8馬力	10馬力
定格冷房能力[W]	16,000	22,400	28,000

表-6 ガラスと断熱材厚さによる熱負荷比較

		大会議室(2階)	執務室(3階)	執務室(4階)
		81.9 m ²	248.2 m ²	243.5 m ²
Low-E複層ガラス	断熱厚さ40mm	13,857 W	19,588 W	19,963 W
	断熱厚さ70mm	13,838 W	19,459 W	19,829 W
	70mm/40mm	1.00	0.99	0.99
三層複層ガラス	断熱厚さ40mm	13,743 W	19,089 W	19,517 W
	断熱厚さ70mm	13,715 W	18,997 W	19,384 W
	70mm/40mm	1.00	1.00	0.99

断熱材厚さは 40mm 以上、ガラスは Low-E 複層ガラスとした。これにより、エネルギー削減率で 4.7%の低減が得られ、目標値を達成することができた。

c. 空調方式の選定

改修前は、高効率機器を用いて床置型空調機による床吹出空調を採用していたが、汎用的な設備ではないため、室外機を一般的な中小規模オフィスで採用することが多いビル用マルチエアコンの高効率モデル、室内機を天井カセットとした全体空調を採用した。また、集中リモコンを設置し、中央制御可能な計画とした。なお、換気方式は、全熱交換器（排気から熱と湿気を回収し給気と熱交換する機器）による第一種換気とすることで、外気負荷の軽減を図った。

4.3 未評価技術

省エネルギーに寄与する技術の性能検証を目的に、未評価技術として、自然換気窓と空調の高効率運用システム（パッシブリズム空調）を採用した。



写真-4 北側自然換気窓

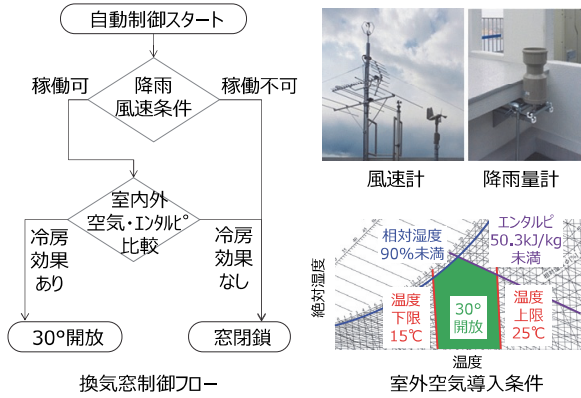


図-7 自然換気窓の開閉制御フロー

a. 自然換気窓

自然換気窓は、屋外の気象状況と室内外の温湿度を測定し、外気の取り込みによって冷房の省エネルギーが図れる状況を自動的に判断し、窓を開閉する技術である。図-7に、自然換気窓の開閉制御フローを示す。なお、導入外気の温度が低すぎると肌寒さなどにつながるため、下限値として15℃を設定している。適用効果の検証を目的に、これらを3階の南北窓面(図-2中のA部分)にのみ適用した。写真-4に北側に設置した自然換気窓を示す。

b. パッシブリスティング空調

パッシブリスティング空調⁵⁾は、室温を監視しながら、快適性を損なわない一定サイクルで空調機を発停する技術である。図-8に、パッシブリスティング空調の概要を示す。本空調は、快適性を維持しながら空調設備のエネルギー削減が図れるもので、独自技術であり、Webプログラムでは評価されないものの、実態的な省エネルギー効果が狙えることから、3階、4階に導入している。

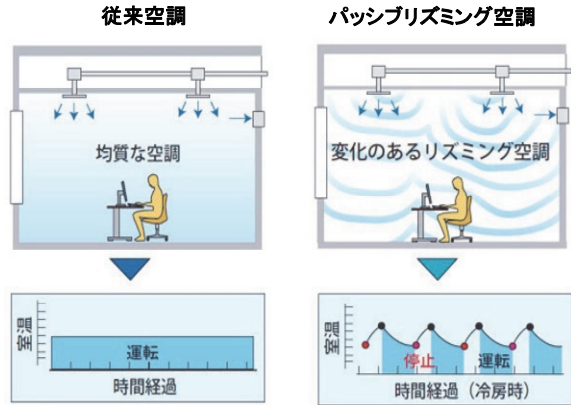


図-8 パッシブリスティング空調の概要

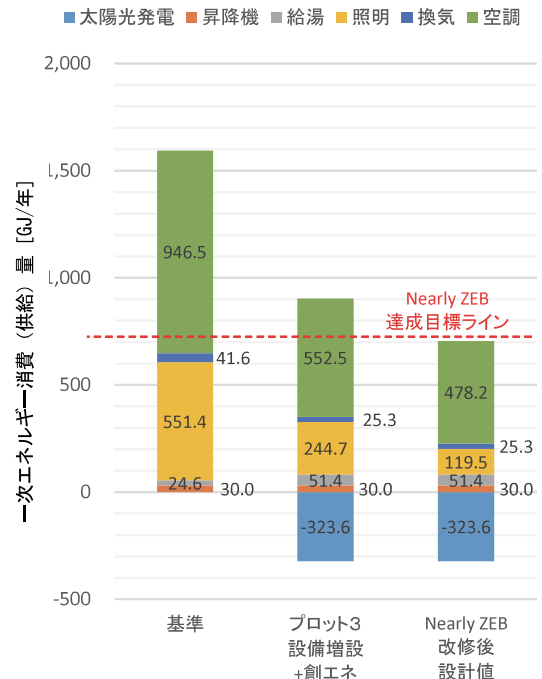


図-9 省エネルギー化によるエネルギー削減量

5. 省エネルギー性能評価の認証取得

4.1 および 4.2 に示した技術を適用し、Webプログラムで一次エネルギー消費量を求めた結果を図-9に示す。基準値に比べ、各項目のエネルギーは、空調49%、換気39%、照明78%の削減ができており、建物全体では55%のエネルギーを削減できている。これに太陽光発電による創エネルギー分を反映させると、76% (基準建築物と比較したときの設計建築物の一次エネルギー消費量の比率である BEI=0.24) となり、Nearly ZEB を達成で

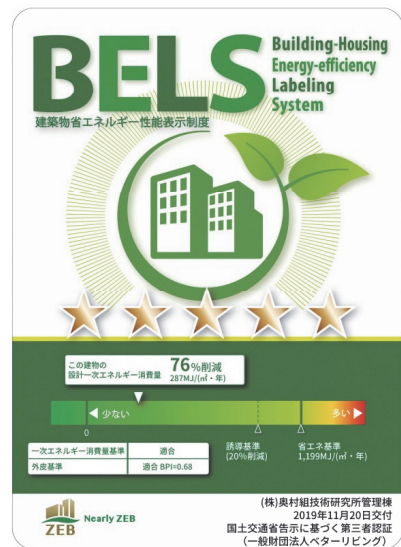


写真-5 BELS 認証

きている。

この結果をもとに、BELS（建築物省エネルギー性能表示制度）認証で、Nearly ZEB の評価を取得した（写真-5）。

6. まとめ

技術研究所管理棟の ZEB 化改修の概要について報告した。汎用の技術を効果的に利用することで Nearly ZEB を達成できた。今後、本建物において、未評価技術も含め、各技術の効果を検証していくとともに、オフィスとしての使い心地や快適性についても確認していく予定である。

なお、本改修工事は、「2019 年度（平成 31 年度）業務用施設等におけるネット・ゼロ・エネルギー・ビル（ZEB）化・省 CO₂ 促進事業」のうち「ZEB 実現に向けた先進的省エネルギー建築物実証事業」における「『ZEB』・Nearly ZEB 実現に向けた先進的省エネルギー建築物実証事業」（一般社団法人静岡県環境資源協会）に採択され、一般社団法人環境共創イニシアチブが公募する ZEB リーディング・オーナーの認定登録をしている。

【参考文献】

- 1) 内閣府、「エネルギー基本計画」、2014.4
- 2) 経済産業省、「ZEB ロードマップ検討委員会 とりまとめ」、2019.3
- 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」、奥村組技術研究年報、No.42、pp.95-100、2016.9
- 4) 国立研究開発法人建築研究所、「建築物のエネルギー消費量計算プログラム（非住宅版）」
<https://building.app.lowenergy.jp/>
- 5) 坊垣和明、有川悦朗、福森幹太、角谷三夫、宮城啓吏、「パッシブリスミング空調における快適性と省エネルギーに関する研究：第 1 報—パッシブリスミング空調が快適性に及ぼす影響に関する実験：夏期実験結果について」、空気調和・衛生工学会論文集、No64、pp.61-71、1997.1

膨潤抑制剤を利用した除去土壌の再生資材化技術 に関する基礎研究

Study of Efficient Reuse Technologies for Removed Soil with Swelling Inhibitors

清水祐也* 今井亮介* 小西正郎** 山田正彦***

要 旨

福島第一原子力発電所の事故により環境中に放出された放射性物質に対して除染作業が進められ、この除染作業で発生した除去土壌（約 1,300 万 m³）の中間貯蔵が進められている。中間貯蔵に際して、予め改質材を適量添加する処理が受入・分別施設で実施されている。一方、除去土壌の再利用に向けた減容化方法の一つとして、湿式分級処理が検討されている。改質材には微量の高吸水性樹脂を含むものがあり、この高吸水性樹脂により湿式分級処理で回収される再生資材の含水率増加等が生じることも考えられる。本研究では、湿式分級処理で得られた再生資材を利用する際の土質的特性に関する基礎的評価を実施した。また、高吸水性樹脂の膨潤を抑制する膨潤抑制剤の適用性についても検討した。その結果、「湿式分級処理過程で高吸水性樹脂が膨潤し、再生資材の含水率が増加する可能性がある」こと、「膨潤抑制剤添加により高吸水性樹脂の膨潤を抑制できる」こと等を確認した。

キーワード：除去土壌、減容化、湿式分級処理、高吸水性樹脂、膨潤抑制剤

1. まえがき

2011 年 3 月に発生した東北地方太平洋沖地震に伴う福島第一原子力発電所の事故に由来する放射性物質の拡散に対して、除染作業が進められている。除染作業で生じた除去土壌については、2017 年 6 月から中間貯蔵施設で異物除去処理されたものの貯蔵が進められ、2020 年 3 月現在では 9 施設が稼働している¹⁾。今後、この中間貯蔵施設に貯蔵された大量の除去土壌に対して、減容化と再生利用を進めることが重要とされている。

減容・再生利用技術開発戦略検討会等では、除去土壌のうち、放射性セシウム濃度が 1.5 万～6.2 万 Bq/kg（平成 30 年 10 月時点の濃度で約 134 万 m³ が対象）の除去土壌に対し、減容・再生利用方法の一つとして湿式分級処理が検討²⁾されている。湿式分級処理は、放射性物質がより吸着されやすい土壌中の細粒分³⁾を除去することで、再利用可能な土壌とする技術である。湿式分級処理の対象となる土壌には、中間貯蔵施設の受入・分別施設（以下、中間貯蔵受入・分別施設）における異物除去過程で、数%の高吸水性樹脂（ポリアクリル酸ナトリウム、以下 SAP：Super Absorbent Polymer）が配合された改質材が用いられている場合がある。この SAP は水と接

触すると数百倍に体積膨張し、内部に水を取り込む⁴⁾。この現象により、湿式分級処理で回収される粗粒土壌（以下、再生資材）の含水率が增大する可能性があり、運搬時の漏水や土木資材として利用する際の転圧作業の効率低下等が懸念される。また、現状ではそれを用いて構築した土木構造物の安定性等に関する知見がない。

一方、膨潤した SAP に塩化カルシウムなどの多価陽イオンを含む薬剤（以下、膨潤抑制剤）を加えると、膨張が抑制され、取り込んだ水分は放出される⁴⁾。

本研究は、この特性を利用し、湿式分級処理過程で膨潤した SAP に対し、膨潤抑制剤の添加による膨潤抑制効果の確認とそれに伴う土質特性の変化の把握を目的として進めている。本報告では、湿式分級処理で回収した粗粒分の膨潤性と膨潤抑制剤の適用効果を中心に報告する。なお、本実試験は、中間貯蔵・環境安全事業株式会社（以下、JESCO）が環境省より受託した、平成 31 年度の中間貯蔵施設の管理等に関する業務成果の一部である⁵⁾。

2. 試験の概要

湿式分級処理における SAP の挙動を把握するために

* 土木本部環境技術室 ** 技術研究所 *** 東日本支社東京支店土木営業第一部

以下に示す項目について試験を行った。なお、①～③の試験は、非汚染土壌を使って、(株)奥村組技術研究所で実施した。また、④～⑦の試験は、JESCO より提供を受けた中間貯蔵受入・分別施設で異物除去が行われた土壌（以下、提供土壌）を使って、除去土壌の減容等技術のための技術実証フィールドで実施した。

- ①改質材中の SAP が膨潤する可能性の検証試験
- ②有効な膨潤抑制剤の種類と量の検証試験
- ③SAP が再生資材に混入する可能性の検証試験
- ④提供土壌の膨潤性の確認試験
- ⑤提供土壌の改質材追添加による膨潤性変化の検証試験
- ⑥提供土壌に対する膨潤抑制剤の効果の検証試験
- ⑦湿式分級処理回収粗粒土壌の土質特性評価試験

3. 各試験の対象土壌

3.1 非汚染土壌

試験に使用した非汚染土壌は、茨城県つくば市内の畑地から採取した土壌であり、2mm 以上の土粒子と異物を取り除いて試験試料とした。非汚染土壌の物性を表-1 に、粒度分布を図-1 に示す。

表-1 非汚染土壌の物性

項目	物性
地盤材料の分類名	砂質細粒土
自然含水率	22.7%
0.075mm 通過百分率	58.7%

3.2 提供土壌

試験に使用した提供土壌は、中間貯蔵受入・分別施設内における異物除去の際に 2wt%程度の改質材が添加された除去土壌である。なお、添加情報のあった改質材に含まれる SAP の配合率については不明である。表-2 に提供土壌の物性を、図-1 に粒度分布を示す。

表-2 提供土壌の物性

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

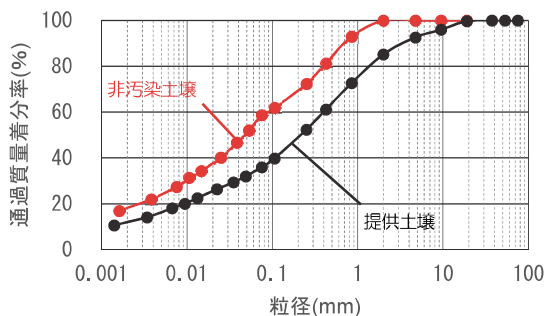


図-1 非汚染土壌・提供土壌の粒度分布

4. 使用した SAP を含む改質材、膨潤抑制剤、SAP

SAP を含む3種類の改質材（写真-1）と4種類の膨潤抑制剤（写真-2）を使用した。また、サイクロン分級装置を用いた試験では SAP 単体を使用した。

【SAP を含む改質材】

改質材 A：アルミナシリカ系材料を主材とする改質材
 改質材 B：天然鉱物系材料を主材とし、中間貯蔵受入・分別施設の1つで使用されている改質材
 改質材 C：シリカ系材料を主材とした市販品で、過去に中間貯蔵受入・分別施設の検討に係る実証試験で使用された改質材

【膨潤抑制剤】硫酸第一鉄・七水和物（以下、FeSO₄）、塩化カルシウム（以下、CaCl₂）、硫酸カルシウム（以下、CaSO₄）、水酸化マグネシウム（以下、Mg(OH)₂）

【SAP】OK-100：三洋化成工業株式会社

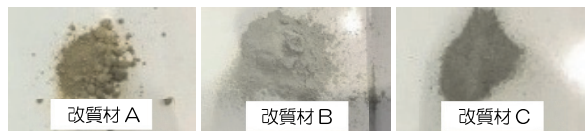


写真-1 改質材

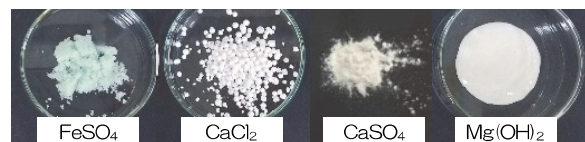


写真-2 膨潤抑制剤

5. 改質材中の SAP が膨潤する可能性の検証試験

土壌に混合された改質材中の SAP が湿式分級処理過程で膨潤する可能性について、0.075mm 目の篩を用いた湿式分級処理の模擬試験により検証した。

5.1 試験方法

水と接触し体積が数百倍に膨張した SAP は、0.075mm 目の篩を通過することなく、篩上に残留し、残留物の含水率と容積が増加すると考えられる。そこで以下の手順により試験を行った。試験状況を写真-3 に示す。

- ①非汚染土壌 100g に 1wt%、3wt%、5wt%の3通りで改質材を添加・混合（改質材 A、B、C を使用）
- ②水道水 500mL を添加し、100rpm で5分間振とう機に掛け泥水作成
- ③0.075mm 目の篩で、篩振とう機により3分間振とう
- ④篩上残留物の含水率測定と容積の目視確認

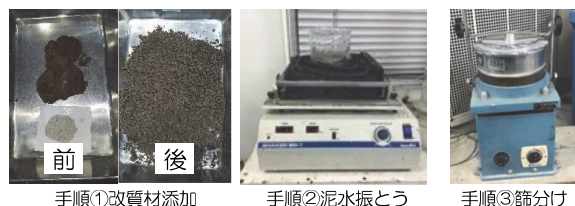


写真-3 試験状況

5.2 試験結果

改質材を添加することで、0.075mm 目の篩上残留物の容積が3種類の改質材のいずれも増加していることを、目視で確認した(写真-4)。また、図-2に示す通り、改質材の添加量に応じて篩上残留物の含水率が上昇した。これらの結果より、SAPを含む改質材を用いて異物除去処理が行われた除去土壌を湿式分級処理する場合、プラント内でSAPが膨潤する可能性があることを確認した。

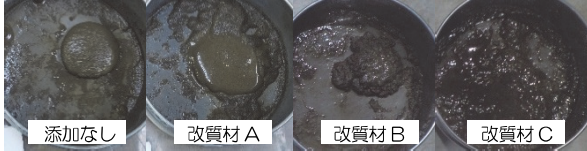


写真-4 改質材を3wt%添加した時の篩上残留物

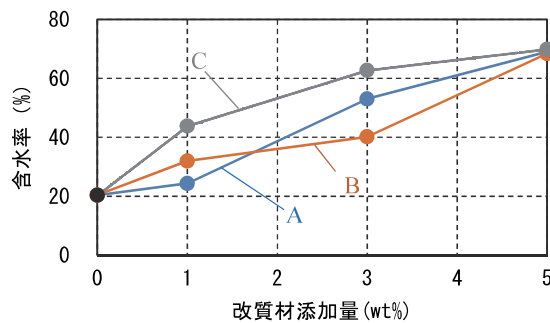


図-2 改質材添加量と篩上残留物の含水率

6. 有効な膨潤抑制剤の種類と量の検証試験

湿式分級処理過程で、土壌に混合された改質材中のSAPの膨潤を抑制することができる薬剤の選定と、有効な添加量を確認するための試験を実施した。

6.1 試験方法

以下の手順で試験を実施した。

- ①非汚染土壌 100g に改質材 A を 3wt%添加・混合
- ②水道水 500mL と FeSO₄、CaCl₂、CaSO₄、Mg(OH)₂ の4種類の膨潤抑制剤をそれぞれ土壌に対し 0.25wt%、0.5wt%、0.75wt% (Mg(OH)₂のみ 0.75 wt%ではなく 1.5 wt%) の3通りの割合で添加
- ③100rpm で5分間振とう機に掛け泥水作成
- ④0.075mm 目の篩で、篩振とう機により3分間振とう
- ⑤篩上残留物の含水率測定

6.2 試験結果

図-3に示すように、FeSO₄ と CaCl₂ では、添加量の増加に伴い、膨潤抑制効果が大きくなり、CaSO₄ では0.25wt%添加からほぼ横ばいの結果となった。一方で、Mg(OH)₂ では、含水率の低下は認められず、膨潤抑制効果が発現しないことがわかる。以上の結果から、FeSO₄、CaCl₂ および CaSO₄ が膨潤抑制剤として有効であることを確認した。

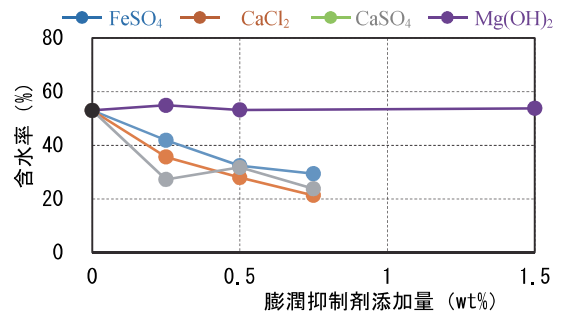


図-3 膨潤抑制剤添加量と篩上残留物の含水率

7. SAPが再生資材に混入する可能性の検証試験

湿式分級処理では、粒径により分離する振動篩と比重により分離するサイクロン分級装置による分級の組み合わせが汎用的に用いられ、それぞれ篩残留物およびサイクロンアンダーが再生資材として利用される。

本研究では、SAPを含む改質材を対象に0.5mm 目の篩(汎用的な振動篩の篩目サイズ)、および写真-5に示すサイクロン分級装置(株式会社三井製)を用いて、SAPの再生資材へ混入する可能性について検証した。



写真-5 サイクロン分級装置

7.1 試験方法

試験の手順を以下に示す。

【0.5mm 目の篩を用いた試験の手順】

- ①非汚染土壌 100g に改質材 A を 3wt%添加・混合
- ②水道水 500mL を添加し、100rpm で5分間振とう機に掛け、泥水作成
- ③0.5mm 目の篩で、篩振とう機により3分間振とう
- ④篩上残留物の含水率測定

【サイクロン分級装置を用いた試験の手順】

- ①水約 1.0m³ にSAP 約 60kg を添加・攪拌
- ②分級装置に送水 (0.1MPa)
- ③サイクロンオーバーとサイクロンアンダー500mL を0.075mm 目の篩で分け、篩上残留物の重量を測定
- ④①にFeSO₄を約3.0kg添加して②、③を実施
- ⑤①に土壌成分として砂53kgと笠岡粘土粉末60kgを添加して、②~④を実施

7.2 試験結果

篩を用いた試験では、写真-6のように改質材を添加した場合の篩上残留物の含水率や容積が増加したことから、振動篩による分級では、再生資材中に膨潤したSAPが混入する可能性があることを確認した。



写真-6 0.5mm 目の篩上残留物

サイクロン分級装置を用いた試験の材料混合条件 (Run1~4) と試験結果を表-3に示す。写真-7に示すように、土壌成分を添加ありで FeSO₄ の添加なし (Run3) のサイクロンオーバーでは、ゲル状の残留物 (SAP) が確認できる。また、Run3 のサイクロンアンダーや Run1 のサイクロンオーバーおよびサイクロンアンダーにおいても同様の残留物が確認できた。これらの結果より、サイクロン分級装置を用いた場合であっても SAPは粗粒分側と細粒分側の両方に分配されることが判明した。一方、FeSO₄ の添加ありの Run2 および Run4 では、上述のようなサイクロンオーバーおよびサイクロンアンダーの篩残留物は確認できなかった。また、表-3に示すように、土壌成分を添加していない Run1、2 のサイクロンオーバーおよびサイクロンアンダーの篩上残留物の湿潤重量では、FeSO₄ の添加なしの Run1 に比べ、添加した Run2 で小さい結果となった。これは FeSO₄ により SAP の膨潤が抑制された結果と考えられる。一方、土壌成分を添加した Run3、4 のサイクロンオーバーについては FeSO₄ 添加で減少したが、サイクロンアンダーは増加する結果となった。この原因については、今後の検証課題と考える。

表-3 サイクロン分級試験結果

Run	土壌添加	FeSO ₄ 添加	サイクロンアンダー(粗粒側)		サイクロンオーバー(細粒側)	
			容積(L)	湿重*(g)	容積(L)	湿重*(g)
1	なし	なし	65	221	994	154
2	なし	あり	70	54	992	11
3	あり	なし	69	194	932	91
4	あり	あり	64	284	924	31

※篩上残留物の湿潤重量



写真-7 サイクロンオーバー篩上残留物

8. 提供土壌の膨潤性の確認試験

除染作業で発生し、中間貯蔵受入・分別施設で改質材が添加された土壌を対象に、湿式分級処理を行った場合、膨潤が生じるかを確認するため、以下の試験を行った。

8.1 試験方法

- ①提供土壌 100g に水道水 500mL と FeSO₄ を土壌に対し 0.25wt%、0.5 wt%、1.0 wt% の 3 通りで添加・混合

- ②100rpm で 5 分間振とう機に掛け泥水作成
- ③0.075mm 目の篩で、篩振とう機により 3 分間振とう
- ④篩上残留物の含水率測定と容積の目視確認

8.2 試験結果

図-4に示すように、FeSO₄ の添加量を増やしても篩上残留物の含水率は、同剤未添加の試験における篩上残留物の含水率 (27.1%) より低下しなかった。また、写真-8のように、容積についても変化は確認できなかった。提供土壌については、改質材が 2wt%程度添加されているという情報を得ているが、膨潤抑制剤の添加による SAP の脱水挙動は確認されなかった。この原因については、今後の検証課題と考える。

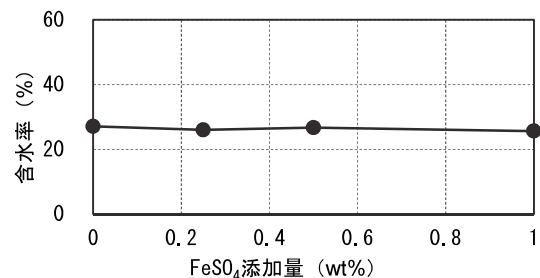


図-4 FeSO₄ 添加量と篩上残留物の含水率

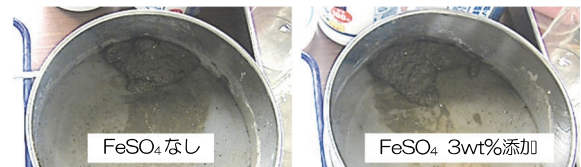


写真-8 FeSO₄ 添加による提供土壌の篩上残留物の変化

9. 提供土壌の改質材追添加による膨潤性検証試験

提供土壌に SAP を含む改質材 C を追添加したときの膨潤性について確認するため、以下の試験を行った。

9.1 試験方法

- ①提供土壌 100g に改質材 C を 1 wt%、2 wt%、3 wt%、5 wt% の 4 通りで添加・混合
- ②水道水 500mL を添加し、100rpm で 5 分間振とう機に掛け、泥水作成
- ③0.075mm 目の篩で、篩振とう機により 3 分間振とう
- ④篩上残留物の含水率測定

9.2 試験結果

写真-9のように、改質材追添加により、追添加なしに比べて篩上残留物の容積が増加した。また、図-5に示すように、改質材の追添加により含水率も増大した。これらの結果より、提供土壌自体には改質材中の SAP の膨潤を抑制する特性はないと考えられる。



写真-9 改質材追添加による篩上残留物の変化

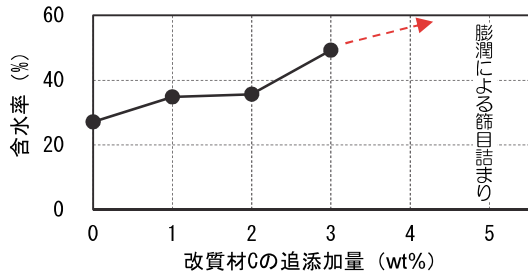


図-5 改質材追添加量と篩上残留物の含水率

10. 提供土壌に対する膨潤抑制剤の効果の検証試験

非汚染土壌を用いた試験結果と同様に、提供土壌に対しても膨潤抑制剤による SAP の膨潤抑制効果があることを確認するため、以下の試験を行った。

10.1 試験方法

- ①提供土壌 100g に改質材 C を 3 wt%追添加・混合
- ②水道水 500mL と FeSO₄ を土壌に対し 0.1 wt%、0.25 wt%、0.5 wt%、1.0 wt%の4通りの割合で添加
- ③100rpm で5分間振とう機に掛け泥水作成
- ④0.075mm 目の篩で、篩振とう機により3分間振とう
- ⑤篩上残留物の含水率測定と容積の目視確認

10.2 試験結果

図-6 に示すように、FeSO₄ の添加量増加に伴い、篩上残留物の含水率は減少し、0.25wt%添加からほぼ横ばいの結果となった。また、写真-10 のように篩上残留物の容積が縮小することが、目視で確認できた。以上の結果から、提供土壌を対象とした場合であっても膨潤抑制剤による効果があることを確認した。

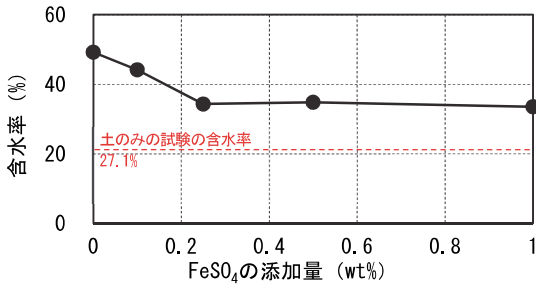


図-6 FeSO₄ 添加量と改質材追添加した提供土壌の篩上残留物の含水率



写真-10 FeSO₄ 添加による改質材追添加した提供土壌の篩上残留物の変化

11. 湿式分級処理回収粗粒土壌の土質特性評価試験

湿式分級処理で一般的に用いられるプラントにより、SAPを含む改質材を混合した提供土壌を湿式分級処理し、回収した粗粒土壌（再生資材）の土質特性を確認するこ

とで、本技術が再生資材に与える効果について検証した。

11.1 試験方法

技術実証フィールドに、写真-11 に示す湿式分級処理プラントを設置し、表-4 に示す条件に従って、湿式分級処理試験を実施した。湿式分級処理により回収した粗粒土壌の含水率や単位体積重量、コーン指数等の測定を行い、膨潤抑制剤の添加による再生資材に与える効果について検証した。ここでは、改質材の追添加と膨潤抑制剤の添加条件による土質特性の変化を顕著に捉えることができる含水率と単位体積重量の測定結果について示す。

追添加する改質材は改質材Cとし、追添加量は土壌に対し3wt%とした。また、膨潤抑制剤にはFeSO₄を採用し、添加量は土壌に対し0.5wt%とした。

湿式分級処理プラントは、汚染土壌の分級処理として汎用的に使用されている振動篩（篩目 2.0mm と 0.5mm の2段）、サイクロン分級装置（分級点 0.075mm）、ハイメッシュセパレータの組み合わせとした。処理フローを図-7に、処理条件を表-5に示す。

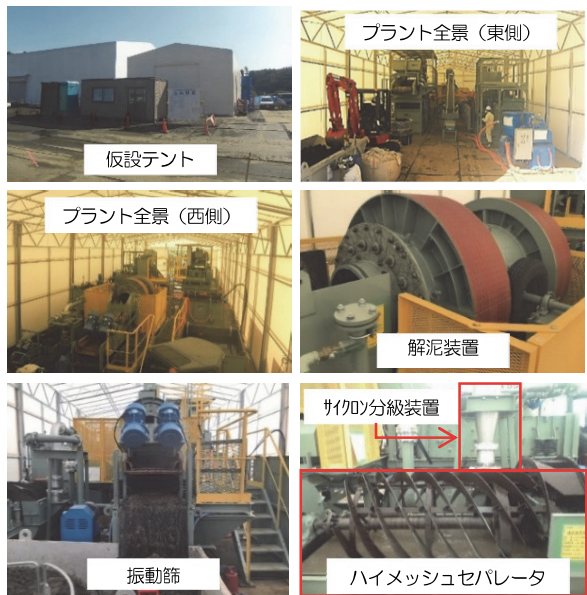


写真-11 湿式分級処理プラント

表-4 湿式分級処理ケースの実施条件

ケース	1	2	3	4
投入土壌量 (t)	12.01	11.6	11.7	12.0
投入土壌含水率 (%)	22.8	24.9	25.9	23.6
改質材追添加	なし	なし	あり	あり
膨潤抑制剤添加	なし	あり	なし	あり

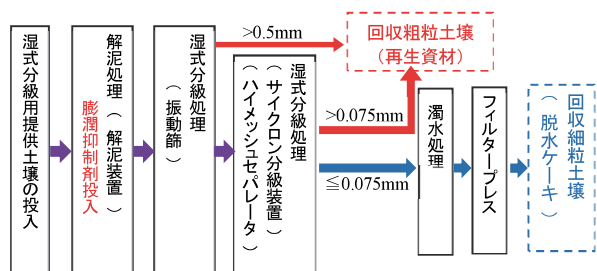


図-7 湿式分級処理フロー

表-5 処理条件

項目	条件	備考
土壌投入量	0.6m ³ /時間	バックホウを用いて投入
水添加量	5m ³ /時間	水道水を水処理して循環利用
膨潤抑制剤添加量	20L/時間	FeSO ₄ を約35%溶液として添加

11.2 試験結果

振動篩とハイメッシュセパレータから排出される回収粗粒土壌(0.075mm以上)を写真-12に示す。写真より、土壌のみのケース1に比べ、改質材を追添加したケース2は、高含水状態で排出されていることがわかる。

図-8に示す回収粗粒土壌の含水率では、土壌のみのケース1の場合は21.7%であり、改質材を追添加したケース3で28.4%に増加し、更に膨潤抑制剤を添加するケース4では、22.4%とケース1と同程度となった。また、図-9に示す回収粗粒土壌の単位体積重量では、土壌のみのケース1の場合は2.13t/m³であり、改質材を追添加したケース3では1.89t/m³に減少した。更に膨潤抑制剤を添加したケース4では、2.10t/m³とケース1と同程度となった。

以上のことから、SAPを含む改質材が本試験の追添加のケースと同程度添加された除去土壌を湿式分級処理により再生資材化する時には、含水率が30%近くまで増大する可能性があり、それを低減させる方法として膨潤抑制剤が有効であることを確認した。また、膨潤抑制剤は湿式分級処理回収粗粒土壌の単位体積重量を増大させる効果があることも判明した。なお、提供土壌に膨潤抑制剤を添加して処理を行ったケース2は、ケース1に比べ、含水率が1.4%増加し、単位体積重量は0.09t/m³減少しているが、この原因については今後の検証課題と考える。

12. まとめ

本研究でこれまでに得られた結果の考察を以下にまとめる。

- i. SAPを含む改質材が本試験の追添加のケースと同程度の割合で添加された除去土壌を、振動篩とサイクロン分級装置により湿式分級処理した場合、膨潤したSAPが再生資材に混入し、含水率の上昇と単位体積重量の減少が生じる可能性がある
- ii. これに対し、湿式分級処理時に膨潤抑制剤を添加することで、再生資材の含水率上昇や単位体積重量の減少を抑制できる
- iii. 膨潤抑制剤としては、FeSO₄、CaCl₂、CaSO₄が有効である

現在、技術実証フィールドにおいて湿式分級処理で得られた再生資材を用いて構築した実証盛土に対し、盛土材としての土質特性等に関するモニタリングを実施中である。その結果は、次報で報告する予定である。



写真-12 回収粗粒土壌 (再生資材)

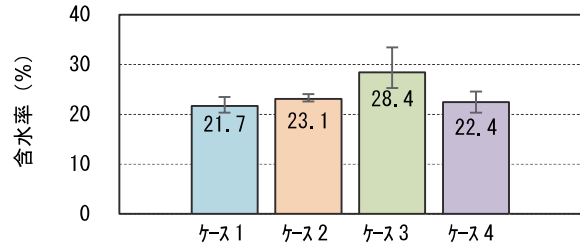


図-8 回収粗粒土壌の含水率

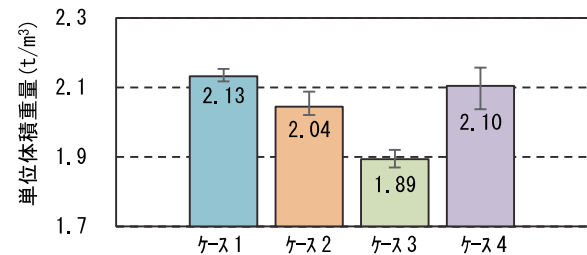


図-9 回収粗粒土壌の単位体積重量

【謝辞】

本研究の遂行に際し、実証事業推進にあたって環境省、JESCOの関係者各位ならびに国立研究開発法人国立環境研究所汚染廃棄物管理研究室の遠藤和人室長に指導を頂いた。ここに記して感謝の意を表す。

【参考文献】

- 1) 環境省、「中間貯蔵施設の整備の現状 2020年4月7日」、中間貯蔵施設情報サイト、<http://josen.env.go.jp/chukanchozou/about/>
- 2) 環境省、「減容・再生利用技術実証の現状と今後の予定—大熊分級技術実証事業—」、中間貯蔵除去土壌等の減容・再生利用技術開発戦略検討会(第11回)、2019
- 3) 伊藤健一、「放射性Csの土壌粒度別分布傾向と分級による減容化への取り組み」、粘土科学、Vol.54、No.1、pp.36-42、2015
- 4) 東 貴宏、宮田貴光、星野由雅、森下浩史、「新素材・高吸水性ポリマーを用いた授業実践」、教育実践総合センター紀要、10、pp.205-210、2011
- 5) ㈱奥村組、「膨潤抑制剤添加処理により除去土壌の再利用を効率化する技術」、平成31年度除去土壌等の減容等技術実証事業報告書 付録2: web用報告書、pp7-1-7-12、中間貯蔵・環境安全事業(株)ホームページ、http://www.jesconet.co.jp/interim/information/PDF/h31-app2_webrep.pdf

硫黄添加によるアルカリ性土壌の中性化実験

— 製鋼スラグで地盤改良された表層の植栽基盤への検討 —

Neutralization Experiment of Alkaline Soil by Sulfur Addition

- Investigation of the Surface Layer of Soil Improved by Steelmaking Slag for Basement of Planting -

白石祐彰* 奥野隆司**

要 旨

軟弱な地盤に対する地盤改良の化学的処理工法のひとつに製鋼スラグを原料とする改良材を土と混合する工法がある。しかし、製鋼スラグ製品が含有する石灰の影響で土壌の pH が 10~12 (アルカリ性) に上昇するため、植栽基盤には適さない。そのため、アルカリ性土壌を場外搬出し、良質客土を搬入して植栽基盤にすることが多いが、アルカリ性土壌に市販の資材を混合して中性に近づけることができれば、植栽基盤となり得る。そこで、土地区画整理事業において腐植土層を軟弱地盤改良用製鋼スラグにより混合改良したアルカリ性土壌 (pH11 程度) を用いて、硫黄添加による中性化実験およびコマツナ栽培試験を実施した結果、自然降雨および直射日光の条件下で硫黄酸化細菌の働きにより pH が低下することが確認できた。また、硫黄の添加量は、上記の製鋼スラグ混合土壌 1kg に対し 12g~24g が適量であることが分かった。

キーワード：製鋼スラグ、アルカリ性土壌、中性化、植栽基盤、硫黄酸化細菌

1. まえがき

地盤の強さが、計画している構造物を支えるだけの耐力がなく、建物に悪影響 (主に沈下) を及ぼすような軟弱な地盤に対しては、地盤改良が行われる。地盤改良では、施工実績や使用材料が製品化され、入手しやすいということから、化学的処理工法である固結工法が多用されている。固結工法のひとつにセメント・石灰系の材料を改良材として土と混合する工法があるが、近年、製鋼スラグを原料とする改良材が開発された。製鋼スラグとは、高炉で製造された溶銑やスクラップから、韌性、加工性のある鋼にする製鋼工程で生成される溶融スラグを冷却・固化し、所定の粒度に加工調整した碎石状の土工用材料である。

固化材の原料を製鋼スラグに変えることにより、以下のような利点がある。

- i. 材料費が安価となるので、経済性の向上が図れる
- ii. 粒度改善効果が得られるため、早期強度発現が可能となり、施工性の向上が図れる
- iii. 施工時の発塵が殆どなくなるので、防塵対策が不要となり、作業環境が向上する

しかし、製鋼スラグ製品は、含有する石灰の影響で土壌の pH が 10~12 (アルカリ性) に上昇し、植物に生育

障害を生じさせる。植物生育への影響を防止するためには、街路樹や緑地帯などの土地の利用状況に応じて、植物の根の深さを目安に掘削して、アルカリ性土壌を場外搬出 (最終処分場で産業廃棄物として処理) し、その後黒土などの良質土を購入して敷ならす作業が必要になる。しかし、アルカリ性土壌を中性 (pH で 8 以下) に近づけることができれば、運搬・処分・資材購入にかかる費用を削減でき、安価な地盤改良工法となる。

そこで、土地区画整理事業において、腐植土層 (田んぼ跡のため稲根等有機物を含む軟弱土) を軟弱地盤改良用製鋼スラグにより混合改良したアルカリ性土壌を入手し、これを中和矯正することで植栽基盤として成立させるための試験を実施したので報告する。

2. アルカリ土壌中性化実験

2.1 市販の資材による実験

市販されているアルカリ土壌中和剤 (4 種類) を添加混合することによる土壌 pH 低下の効果について調べた。

a. 実験方法

軟弱地盤改良用製鋼スラグにより改良されたアルカリ性土壌は、バックホーによる混合攪拌であったためスラグの塊が存在していたので、土壌をモルタルミキサーで

* 技術研究所環境研究グループ ** 投資開発事業本部不動産開発部

攪拌し、スラグの塊を粉砕してから使用した。土壌の pH は 11.2 であった。

ワグネルポット（作物栽培試験用の容器：φ240mm 高さ 294mm）にアルカリ性土壌と中和剤を入れ、攪拌機で 1 週間に 1 回攪拌した（写真-1、2）。なお、対照として、中和剤を添加しない実験ケースを設けた（表-1）。ワグネルポットを屋外に置き、土壌 pH をおよそ 2 週間に 1 回測定した。



写真-1 攪拌機

写真-2 攪拌状況

表-1 実験ケース

試料名	資材(中和剤)	添加量
なし①		-
なし②	なし(pH11.2)	-
Dr.pH汚泥用	ドクターペーパー汚泥用	122kg/m ³
アルカリメイトL	アルカリメイト	30L/m ³
アルカリメイトH		60L/m ³
硫黄L	試薬用硫黄粉末	0.75kg/m ³
硫黄H		1.5kg/m ³
硫酸マグネシウムL	硫酸マグネシウム	0.04kg/kg
硫酸マグネシウムH		0.08kg/kg

b. 実験結果

経過日数にともなう pH の変化を図-1 に示す。実験開始からおおよそ 50 日後、pH 減少効果があった中和剤は、ドクターペーパー汚泥用、試薬用硫黄粉末、硫酸マグネシウムであった。試験結果から資材コストを勘案し、アルカリ土壌中和剤として工業用の微粉硫黄（大型のローラーミル粉砕機により粉砕・分級した、粉末状の硫黄）を選択した。

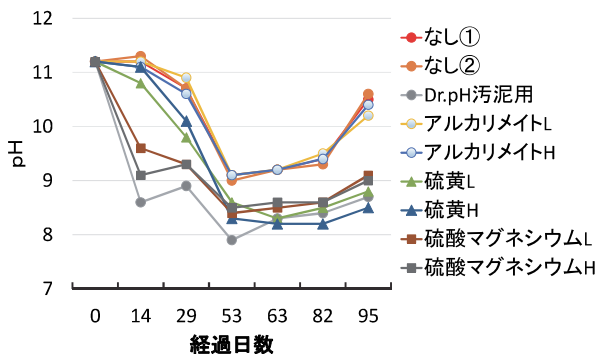
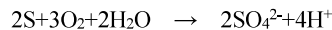


図-1 経過日数にともなう pH の変化

2.2 硫黄添加に関する室内実験

アルカリ性土壌に硫黄を添加すると、土着の硫黄酸化細菌によって以下の反応が行われ、酸が発生することで、土壌 pH が低下する。硫黄酸化細菌は土壌や底質中に普遍的に存在する。



硫黄酸化細菌の細胞内には、硫黄を消化（代謝）する様々な酵素が存在し、硫黄をエネルギー源として利用する。

アルカリ性土壌に硫黄を添加し、常温に静置して室内実験を行い、土壌 pH の低下状況を経過観察した。

a. 実験方法

軟弱地盤改良用製鋼スラグ混合土壌と微粉硫黄をモルタルミキサーで混合攪拌し、デイスボカップ（ポリプロピレン製）300mL 容器に 500g 詰めた。底にはφ3mm 排水孔を開けた。微粉硫黄の添加量を表-2 に示す。デイスボカップに詰めた土壌は、低濃度、中濃度、高濃度それぞれ 7 個ずつで用意した。恒温・恒湿室（20℃、60%）にデイスボカップを静置し、1 週～10 日に 1 回、50～100mL を散水した。なお、実験期間中に土壌の攪拌は行わなかった。土壌 pH は、デイスボカップの土壌を全量取出し、均一化して計測した。

b. 実験結果

経過日数にともなう pH の変化を図-2 に示す。実験開始の pH は 11.2 であった。実験開始からおおよそ 130 日後に、高濃度の実験ケースでは pH が 8 以下となり、実験開始からおおよそ 250 日後に中濃度の実験ケースで pH が 8 以下となった。

2.3 屋外実験

室内実験により、アルカリ性土壌に硫黄を添加すると、

表-2 微粉硫黄の添加量

名称	土壌1kgに対する添加量
低濃度	8g
中濃度	16g
高濃度	24g

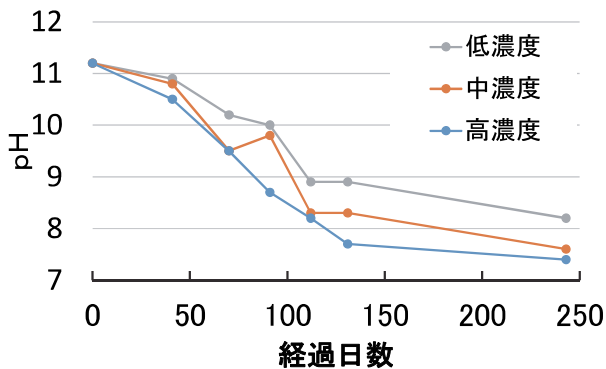


図-2 経過日数にともなう pH の変化

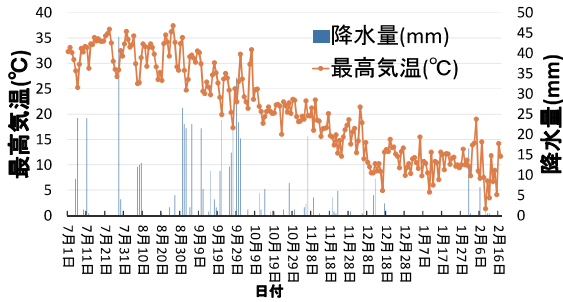


図-3 つくば市の最高気温と降水量の推移

土壌 pH が低下することを確認できたことから、直射日光および自然降雨の条件下で同様の効果を発揮することを確認するため、屋外実験を実施した。

a. 実験方法

土壌を2軸パドルミキサーで攪拌し、スラグの塊を粉碎してから使用した。土壌の pH は 11.0 であった。

80cm×80cm×深さ40cmの木製の容器を製作し、底には排水目的にφ9mmの穴を49個開けた。容器の下層10cmはアルカリ性土壌105kg敷設した。

土壌と微粉硫黄を2軸パドルミキサーで混合攪拌した後、容器に土壌315kgを詰めて上層30cmを形成した。微粉硫黄の添加量を表-3に示す。土壌を詰めた容器は屋根のない屋外に静置した(2018年6月29日)。静置状況を写真-3に示す。容器に詰められた土壌の表層は直射日光の影響があったと考えられる。実験を実施したつくば市の実験期間中の最高気温と降水量の推移を図-3に示す。

土壌 pH 計測のため、検土杖(けんどじょう)を用いて深さ0~25cmの土壌を採取した。検土杖は、主に表層地質調査などに用いられる道具で、ハンドルを回転させながら土壌に差し込み、削り取られた土壌が先端の円形筒状の溝(採土部)に収まり、引き抜くと採土される(写真-4、5)。

ケース	土壌1kgに対する添加量
L1	12g
L2	
M1	24g
M2	
H1	36g
H2	



写真-3 試験開始の状況



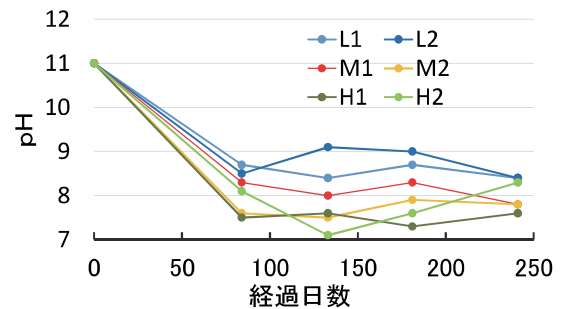
写真-4 検土杖

写真-5 採土部

b. 実験結果

経過日数にともなう pH の変化を図-4に示す。実験開始からおよそ80日後に、実験ケース M1、M2、H1、H2 では pH が 8 前後となり、その後も pH が 8 前後で推移した。この結果、人為的に散水を行わなくても、自然降雨だけで硫酸化細菌が働き、硫黄から酸を生成することで、土壌 pH が低下することが分かった。

図-4 経過日数にともなう pH の変化



c. 土壌の膨張

試験開始から3か月程度経過した頃に、土壌が膨張した。すべての実験ケースで天端から土壌が隆起し、いくつかの実験ケースでは木製の容器の木枠が押し広げられた(写真-6、7)。膨張した土壌について、3D計測ソリューションにより体積計測を実施した。計測結果を図-5に示す。実験開始時に容器に詰めた土壌の体積(256L)と膨張した土壌の体積から、土壌の膨張率を算出した結果、膨張率は6%~18%であった。土壌の膨張率と土壌1kgに対する硫黄添加量との関係を図-6に示す。図より、膨張率は概ね添加量に比例していた。

製鋼スラグには、遊離石灰の水和反応による膨張特性があり、道路用路盤材として使用する前にはエージング処理(遊離石灰の膨張を事前に進行させることで、製鋼スラグの膨張を抑制)がされている。膨張率は、JIS A 5015-2013により1.5%以下に定められている。

土壌の膨張率の原因について調査した範囲では、製鋼スラグの成分と硫黄からエトリンガイト(3CaO・Al₂O₃・3CaSO₄・32H₂O)が生成し、その際の体積膨張によるものと推察される^{1,2)}。



写真-6 天端からの土壌の隆起



写真-7 木枠が押し上げられた状況

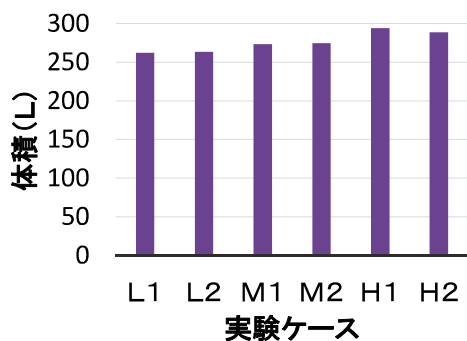


図-5 膨潤した土壌の体積

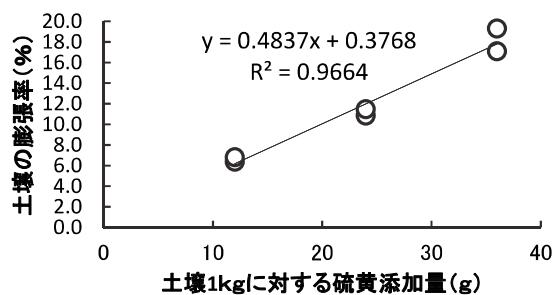


図-6 土壌の膨張率と硫黄添加量との関係

2.4 土壌膨張の再現実験

今夏の実験では、木製（木材を組み立てて作成した）の容器を用いたため、土壌の膨張によって木枠が押し上げられた。そこで、堅固な容器（材質：ハイインパクトスチロール樹脂）であるワグネルポット（約 15.4L）を用いたときに天端から土壌が隆起する様子を観察するための実験を行った。

a. 実験方法

土壌を2軸パドルミキサーで攪拌し、スラグの塊を粉砕してから使用した。土壌のpHは11.7であった。

土壌と微粉硫黄を2軸パドルミキサーで混合攪拌した後、ワグネルポットに土壌 18.3 kg を詰めた。微粉硫黄の添加量を表-4に示す。土壌を詰めた容器は屋根のない屋外に静置し（2019年6月12日）、土壌の膨張は目視により観察した。

b. 実験結果

実験開始から51日後（2019年8月2日）の試験体の状況を写真-8に示す。WM および WH で土壌の膨張が認められた。天端から隆起した土壌の高さを画像処理から概算し、天端から隆起した土壌の体積Vについて、球を一つの平面で切り取った空間図形（球欠）として、下式により算出し、さらにワグネルポットの容量（約 15.4L）に対する膨張率を求めた（表-5）。

$$V = 16 \pi h (3c^2 + h^2)$$

ここで、 h ：天端から隆起した土壌の高さ

c ：ワグネルポットの円筒の半径（128mm）

実験開始から103日後（2019年9月23日）の試験体のpHを表-6に示す。

2.5 圃場試験

土壌の膨張がワグネルポットを用いた実験でも確認できた。ポット試験は、一定条件で試験を行うので再現性がある点で意義はあるが、ポットは小面積で側面も外気に触れているために温度条件は圃場の場合と大いに異なる³⁾。そこで、実地盤での施工に少しでも近づけるために圃場に1.4m×1.4m×深さ0.4mの区画を掘削し、そこに製鋼スラグ混合土壌に硫黄を添加した土壌を入れ整地した。木枠とポットという小規模かつ限定された条件下で確認された膨張にくらべ、時間経過により地面からどの程度隆起するかを長期的に観察する圃場試験を実施することで、実環境で再現されるのかを確認する。微粉硫黄の添加量を表-7に示す。圃場試験を数年継続し、観察を続ける予定である。

3. ポリプロピレン鉢を用いたコマツナ栽培試験

製鋼スラグは、鉍さいけい酸質肥料、副産石灰肥料、鉍さいりん酸肥料、特殊肥料の原料として用いられている⁴⁾。したがって、軟弱地盤改良用製鋼スラグは植物に害を与えないと考えられるが、コマツナを栽培することで確認した。

表-4 微粉硫黄の添加量

試験体名	土壌1kgに対する添加量
WG-1, 2, 3	0g
WL-1, 2, 3	6g
WM-1, 2, 3	12g
WH-1, 2, 3	18g



写真-8 実験開始から51日後の試験体の状況
 左上：WG-1、2、3 右上：WL-1、2、3
 左下：WM-1、2、3 右下：WH-1、2、3

表-5 天端から隆起した土壌の高さと体積と膨張率

	高さ(mm)			体積(L)			膨張率(%)		
	-1	-2	-3	-1	-2	-3	-1	-2	-3
WL	20.5	18.3	18.3	0.52	0.47	0.47	3.4	3.1	3.1
WM	33.8	34.8	34.8	0.89	0.92	0.92	5.8	6.0	6.0
WH	30.7	34.6	34.6	0.81	0.91	0.91	5.3	5.9	5.9

表-6 実験開始から103日後の試験体のpH

	-1	-2	-3
WG	10.4	10.5	10.5
WL	7.9	7.7	7.8
WM	7.2	7.2	7.3
WH	7.2	7.0	6.5

表-7 圃場試験における微粉硫黄の添加量

	土壌1kgに対する添加量
区画A	0g
区画B	12g

3.1 試験方法

a. 供試土壌

2.3 屋外実験において天端から隆起した土壌を鋤取り、供試土壌として用いた。対照として、硫黄を添加していない製鋼スラグ混合土壌を用いた（試験ケース：N）。栽培試験開始時のpHを表-8に示す。土地区画整理事業から入手した製鋼スラグ混合土壌は、テント倉庫内に盛られて2年弱の間、保管されていたため、空気中の二酸化炭素により中性化が進み試験ケースNのpHは8.4まで低下していた。天端から隆起した土壌は、太陽からの日射で加熱されやすく、硫黄酸化細菌の働きが活発になり、検土杖を用いて採取した深さ0~25cmの土壌よりもpHが低くなっていたと推察された。

b. 栽培試験の手順

- ① 土壌2.5kgと化成肥7.5gを混合攪拌した
- ② ポリプロピレン鉢に土壌を詰めた
- ③ コマツナ40粒を播種した（2019年4月16日）

- ④ 適宜散水し、病害虫対策として農薬散布を行った
- ⑤ 間引いて、4個体残して栽培した
- ⑥ 植生調査を実施した（2019年6月25日）

3.2 試験結果

H1およびH2は出芽したが、初期生育が不良で、すべて枯死した。pHが低すぎたことが原因と考えられ、製鋼スラグ混合土壌1kgに対し硫黄添加量が36gでは多すぎたことが分かった。

植生調査を実施したときの試験ケースN、L、MのpHを表-9に示す。試験ケースMのpHが試験開始時よりも上昇しているが、これは製鋼スラグ混合土壌に含まれる石灰によって、試験期間中にH⁺イオンが減少し、Ca²⁺イオンが増加したことによると推察される⁹⁾。

植生調査として採取したコマツナの葉数、地上部の高さ、地上部重量、地下部重量、地上部乾燥重量、地下部乾燥重量を測定した。4個体の平均を図-7~12に示す。Hを除くすべての試験体において葉数に差はほとんどなかった。しかし、地上部の高さ、地上部重量、地下部重量、地上部乾燥重量、地下部乾燥重量はM > L > Nの順であった。これらの結果により、硫黄添加量は、製鋼スラグ混合土壌1kgに対し12g~24gが適量であることが分かった。また、軟弱地盤改良用製鋼スラグは植物に害を与えないことが確認できた。

表-8 試験開始時のpH 表-9 植生調査実施時のpH

ケース	鉢1	鉢2	鉢3	ケース	鉢1	鉢2	鉢3
N	8.4	8.4	8.3	N	8.8	8.8	8.7
L1	7.6	7.6	7.7	L1	7.9	8	8.1
L2	7.7	7.6	7.7	L2	8.2	7.8	8.0
M1	4.7	4.9	5.2	M1	7.0	7.1	7.3
M2	5.6	5.3	5.2	M2	7.6	7.3	7.2
H1	3.7	3.9	3.7				
H2	3.9	3.9	3.9				

4. 土壌中の硫黄酸化細菌の同定と定量

試験に用いた腐植土層に土着の硫黄酸化細菌が存在することを明らかにし、硫黄添加に順応して硫黄酸化細菌が増殖・活性化していることを定量的に把握するために、分子生物学的解析手法を用いた。近年の分子生物学的手法の急速な進歩により、細菌DNAの塩基配列の決定が容易になった。DNAの塩基にはアデニン(A)・チミン(T)・グアニン(G)・シトシン(C)の4種類あり、この並び方を塩基配列という。

PCR (Polymerase Chain Reaction: ポリメラーゼ連鎖反応) は非常に有効な遺伝子増幅法で、その開発により微量のDNAが増幅・解析できるようになった。リアルタイムPCRは、増幅していく過程をリアルタイムでモニタリングすることができ、迅速性と定量性に優れた分析を行うことが可能である。

また、次世代シーケンサー (DNA) の塩基配列を読

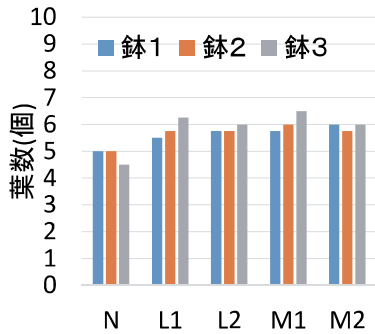


図-7 葉数の測定結果

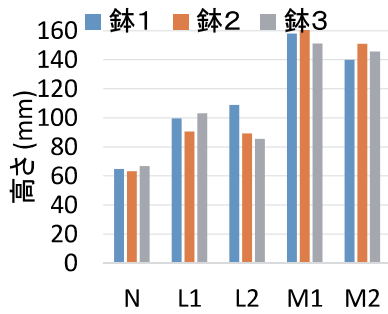


図-8 地上部の高さの測定結果

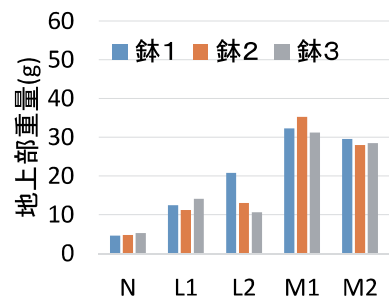


図-9 地上部重量の測定結果

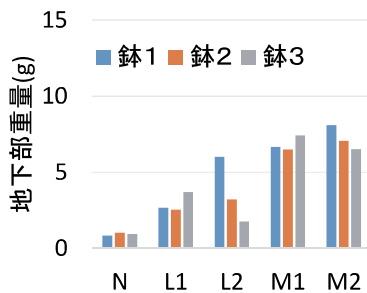


図-10 地下部重量の測定結果

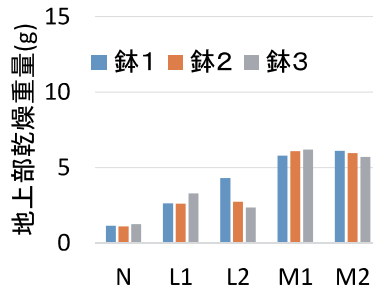


図-11 地上部乾燥重量の測定結果

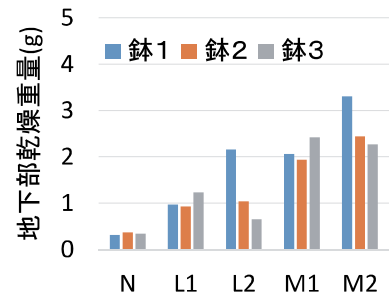


図-12 地下部乾燥重量の測定結果

甲

み取る装置)を使用した細菌の全塩基配列(全ゲノム)解析から細菌の特定領域の塩基配列を決定し、既存データベースの登録配列との一致率を比較することにより、同定を行うことができる。

表-10 微粉硫黄の添加量

試験体名	混合土壌1kgに対する硫黄の添加量
WN	0 g
WL	6 g
WM	12 g
WH	18 g

表-11 試験開始時および開始から3か月後のpH

試験体名	試験開始時	開始から3か月後
WN		10.5
WL	11.7	7.7
WM		7.3
WH		6.5

4.1 分析方法

a. 供試土壌

軟弱地盤改良用製鋼スラグ混合土壌と微粉硫黄を2軸パドルミキサーで混合攪拌し、ワグネルポット(体積14L)容器に約18.3kg詰めた。微粉硫黄の添加量を表-10に示す。試験体は、技術研究所(茨城県つくば市)の屋外に静置した(2019年6月13日)。試験開始時および開始から3か月後(9月23日)のpHを表-11に示す。

b. 細菌叢解析

土壌からDNAを抽出して精製し、表-12に示すプライマー(DNAの合成・複製に必要な試薬)を用いたリアルタイムPCRを実施し、土壌試料中のバクテリア、硫黄酸化細菌の定量を行った。*Thiobacillus*属細菌は、最も代表的な硫黄酸化細菌である⁹⁾。また、硫黄酸化細菌を含む細菌属について同定するために、次世代シーク

表-12 リアルタイムPCRに使用したプライマー

プライマー名	配列	標的遺伝子	標的細菌
Bac1055YF	ATGGYTGTCGTCAGCT		
Bac1392R	ACGGGCGGTGTGTAC	16SrRNA遺伝子	バクテリア
Bac1115Probe	CAACGAGCGCAACCC		
soxB-710F	ATCGGYCAGGCYTTYCCSTA	soxB遺伝子	硫黄酸化細菌
soxB-1184R+	MAVGWGCCGTTGAARTTGC		(<i>Thiobacillus</i> 属細菌を含む)
BONE663cF	AGGGGGGTRGAATTCCA	16SrRNA遺伝子	<i>Thiobacillus</i> 属細菌
THIO840R	TCGTTACTAAGGGATTTTAC		(硫黄酸化細菌)

エンス解析を行った。

4.2 分析結果

リアルタイム PCR による各細菌種の定量結果を表-13 に示す。バクテリアの検出数は、試料 WM≒WH>WL>WN の順で多かった。一方で硫黄酸化細菌は、*Thiobacillus* 属細菌も *Thiobacillus* 属細菌を含む硫黄酸化細菌も試料 WH>WM>WL>WN の順で検出数が多かった。硫黄の添加量が多くなるにともない、バクテリアおよび硫黄酸化細菌が増加した。とくに *Thiobacillus* 属細菌については、WL は WN の約 10 倍、WH と WM は WN の約 100 倍と著しい増加が認められた。

次世代シーケンス解析によって同定された硫黄酸化細菌は、*Paracoccus* 属、*Sulfuriferula* 属、*Thermithiobacillus* 属、*Thiobacillus* 属、*Thiomonas* 属、*Thiovirga* 属、*Bosea* 属、*Dyella* 属、*Mesorhizobium* 属であった。試料における各硫黄酸化細菌属の検出割合を表-14 に示す。*Thiobacillus* 属に次いで、*Sulfuriferula* 属が優占していることが分かった。

5. まとめ

土地区画整理事業において、腐植土層を軟弱地盤改良用製鋼スラグにより混合改良したアルカリ性土壌を用いた硫黄添加による中性化実験およびポリプロピレン鉢を用いたコマツナ栽培試験の実施により、以下のことが分かった。

- i. 軟弱地盤改良用製鋼スラグにて改良されたアルカリ性土壌に硫黄を添加し混合すると、その後攪拌しなくても自然降雨および直射日光の条件下で硫黄酸化細菌の働きにより pH は低下する
- ii. 製鋼スラグ混合土壌 1kg に対し、硫黄の添加量は

12g~24g が適量である

また、分子生物学的解析手法を用いて、以下のことが分かった。

- iii. リアルタイム PCR による各細菌種の定量結果において、腐植土壌には土着の硫黄酸化細菌が存在し、硫黄の添加量が多くなるにともない、硫黄酸化細菌が増加した
- iv. 次世代シーケンス解析によって、最も代表的な硫黄酸化細菌である *Thiobacillus* 属に次いで、*Sulfuriferula* 属が優占していることが分かった

6. あとがき

製鋼スラグで改良されたアルカリ性土壌は、市販の微粉硫黄を適量添加することで中和矯正でき、コマツナの生育も確認できた。一方で、エトリンタイトの生成による土壌の膨張が見られた。

今後は圃場実験を通して、土壌膨張の課題解決を図りたいと考えている。

【謝辞】

本研究では、東京農工大学農学部 土壌学研究室 田中治夫准教授に技術指導をいただいた。ここに記して感謝の意を表す。

【参考文献】

- 1) 山田幹雄、佐野博昭、稲澤知洋、小木曾晴信、「石灰質の安定材を添加した酸性硫酸塩土における強度増分とエトリンタイト生成量との関係」、材料、Vol.67、No.1、pp. 67-70、2018
- 2) 野澤里渚子、斎藤 豪、佐藤賢之介、佐伯竜彦、「乾燥条件および温度履歴がエトリンタイト結晶中の水分状態に及ぼす影響」、セメント・コンクリート論文集、Vol.70、No.1、pp. 2-8、2016
- 3) 高橋英一、「長期圃場試験の意義」、化学と生物、Vol.13、No.12、pp. 787-796、1975
- 4) 伊藤公夫、「製鋼スラグの肥料用途」、新日鉄住金技報、No.399、pp. 132-138、2014
- 5) 梅津芳生、「硫酸酸性水の石灰石による析出セッコウ」、石膏と石灰、No. 234、pp. 299-305、1991
- 6) 山田常雄、前川文夫、江上不二夫、八杉竜一、小関治男、古谷雅樹、日高敏隆、「岩波 生物学辞典 第2版」、p.41、1977

表-13 各細菌種の定量結果

試料名	硫黄酸化細菌		
	バクテリア	<i>Thiobacillus</i> 属細菌を含む全体	<i>Thiobacillus</i> 属細菌
	[copies/g]	[copies/g]	[copies/g]
WN	3.9 × 10 ⁷	2.0 × 10 ⁶	1.8 × 10 ⁵
WL	6.6 × 10 ⁷	6.7 × 10 ⁶	2.6 × 10 ⁶
WM	1.1 × 10 ⁸	2.4 × 10 ⁷	1.5 × 10 ⁷
WH	9.6 × 10 ⁷	5.1 × 10 ⁷	2.8 × 10 ⁷

表-14 各硫黄酸化細菌属の検出割合 (%)

属名	WN	WL	WM	WH
<i>Paracoccus</i> 属	0.02	0.04	0	0
<i>Sulfuriferula</i> 属	0.01	0.20	4.55	14.28
<i>Thermithiobacillus</i> 属	0	0.22	0.23	0.12
<i>Thiobacillus</i> 属	0.04	2.01	7.27	13.54
<i>Thiomonas</i> 属	0	0	0.84	3.14
<i>Thiovirga</i> 属	0	0	0.01	0.01
<i>Bosea</i> 属	0.07	0	0.08	0
<i>Dyella</i> 属	0	5.21	0	0.47
<i>Mesorhizobium</i> 属	0.14	0.09	0.09	0.07

特定領域を対象とした アクティブ・ノイズ・コントロールにおける 機器配置の選定方法

Method of Determining Optimal Arrangement of Active Noise Control Equipment for Predefined Spaces

金澤朗蘭*

要 旨

工場等では作業者の労働環境を向上させるため、機械から発生する騒音の低減が求められる。中でも低い周波数で音圧が卓越する音は、作業者に不快感を与える可能性が高い。対処法として、音源を囲う等の対策が一般的であるが、目視管理が必要な場合には対策に苦慮している。そのため、当社ではこれまでアクティブ・ノイズ・コントロールによる対策の実用化を行っている。しかし、作業場の制約や筐体等により、制御用スピーカを必ずしも最適な配置にできないことが想定されるため、事前に効果を評価するための手法を検討した。この手法により効果的な機器配置を選定して機械騒音の対策にANCを適用した結果、領域内の平均音圧を想定通り低減できることを確認した。

キーワード：アクティブ・ノイズ・コントロール、工場、作業環境

1. まえがき

工場内には様々な騒音が存在しており、作業者の労働環境を向上するためには騒音対策が必要となる場合がある。中でも回転部をもつ機械の騒音は低い周波数帯域で音圧が卓越することが多く、作業者にとって不快な音となる場合が多い。また、工場では機械の目視管理が必要な場合もあり、目視管理できる状況で、作業場所の音圧を低減することが求められる。このため、遮音壁等で騒音源（機械）を全て囲うといった一般的な騒音対策を適用できず、全作業員の周囲に衝立等を設けることもできない。さらに、ビニルカーテン等による騒音対策は目視管理が可能であるが、中～高音域の騒音に効果が期待できるものの、低音域については十分な効果が得られない。

このような状況では、視界を遮らずに騒音を低減できる方法として、低音域に対して大きな効果が得られるアクティブ・ノイズ・コントロール（Active Noise Control、以下ANCと記す）が有効である。ANCによって作業者が常時居る領域（以下、特定領域と記す）の騒音を低減するには、機械から発生する騒音の変化などの影響を受けにくい制御方法が求められる。また、ANCを適用する際にはスピーカなどの機器配置が重要となるが、作業上の制約や筐等により、必ずしも最適な配置にできない

場合がある。これまで、音場の変化の影響を受けにくく、安定性の高い制御方法を適用したANCを提案し、特定領域における効果を確認した^{1) 2) 3)}。続いて、特定領域におけるANCの効果を事前に評価する効果指標⁴⁾を提案した。効果指標により特定領域における聴感上の効果を事前に把握することで、効果の得られる機器配置の順位やANC適用の可否を判断できる。本稿では、効果指標の概要と、この効果指標を用いて機器配置を選定したANCの適用事例について述べる。

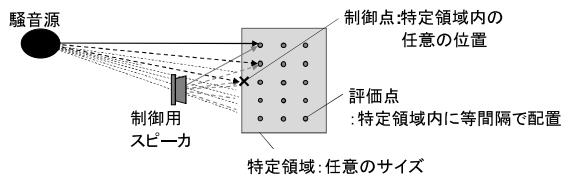
2. 効果指標

2.1 機器配置の決定方法

これまで筆者らは、工場など最適な位置にスピーカを配置できない状況下において機器配置を決定するため、特定領域におけるANCの効果を予測する方法を提案してきた。提案の方法により機器配置に応じた特定領域でのANCの効果は予測できるものの、聴感上の効果を評価する基準がないため、機器配置の選定が難しい場合があった。そこで、予測結果をもとにした効果指標（EI: Effect Index）を提案し、機器配置による効果を評価できるようにした。

ANCは、制御点において騒音が最も低減するが、振

*技術研究所環境研究グループ



各評価点における効果 = (騒音のみの音圧レベル) - (制御後の音圧レベル)

$$\text{効果指標} = \frac{\text{特定領域の平均効果}}{\text{目標値(音圧レベル)}}$$

図-1 効果指標の概念

幅と位相のズレの大きさによっては完全には打ち消されないものの、ある程度騒音が低減する領域が制御点の周囲に存在する。そこで、対象とする特定領域内の複数の評価点において、騒音と制御音の振幅比と位相差から低減効果を推定し、領域内の平均と目標値との比を機器配置決定の指標とする。ただし、個々の作業場所によって異なる暗騒音の影響は考慮しないため、効果指標は実際の効果そのものとは異なることに留意する。

効果指標の概念を図-1に示す。特定領域内で等間隔に設けた評価点において、騒音の音圧実効値と、騒音と制御音の和の音圧実効値の比を効果とし、特定領域における効果の平均値と目標値の比を効果指標とした。効果指標=1のとき目標を達成するが、達成できないときには制御用スピーカの位置や数を変更し、機器配置を選定する。

なお、効果の予測計算では暗騒音を考慮せず、波面の干渉のみを計算するため、効果が極大となるなど現実的ではない値となる場合がある。そこで効果指標の値は対象領域全体の効果を代表する値として平均値を採用した。さらに、最小値を併記することで増幅の有無を判断する。

効果指標による機器配置の決定方法のフローを図-2に示す。iは騒音源の位置、騒音の低減領域、制御用スピーカ位置、制御用マイク位置、制御点などの配置パターン番号であり、n個の配置の中から最適な配置を選定する。制御用スピーカ位置は、作業状況に応じた配置可能な位置とすることで、影響の大きな卓越周波数の騒音を合理的に低減することができる。

効果指標と効果の目安を示したカテゴリーを表-1に示す。4章で詳しく述べるが、一般的には5dBのレベル差で概ね音の大きさの違いを区別することができることとされていることから、より明確に違いがわかる値として目標値を10dBと定義した。効果指標が0.5を超える場合、特定領域内において効果を感じると考えられる。

なお、実際の工場では複数の騒音源に対し複数の制御用スピーカを使用する場合があるが、本稿では1騒音源1制御用スピーカの配置の決定方法について検討した。

2.2 振幅比と位相差に着目した効果予測と効果指標

効果指標を求める際の機器配置と、直接音および床面

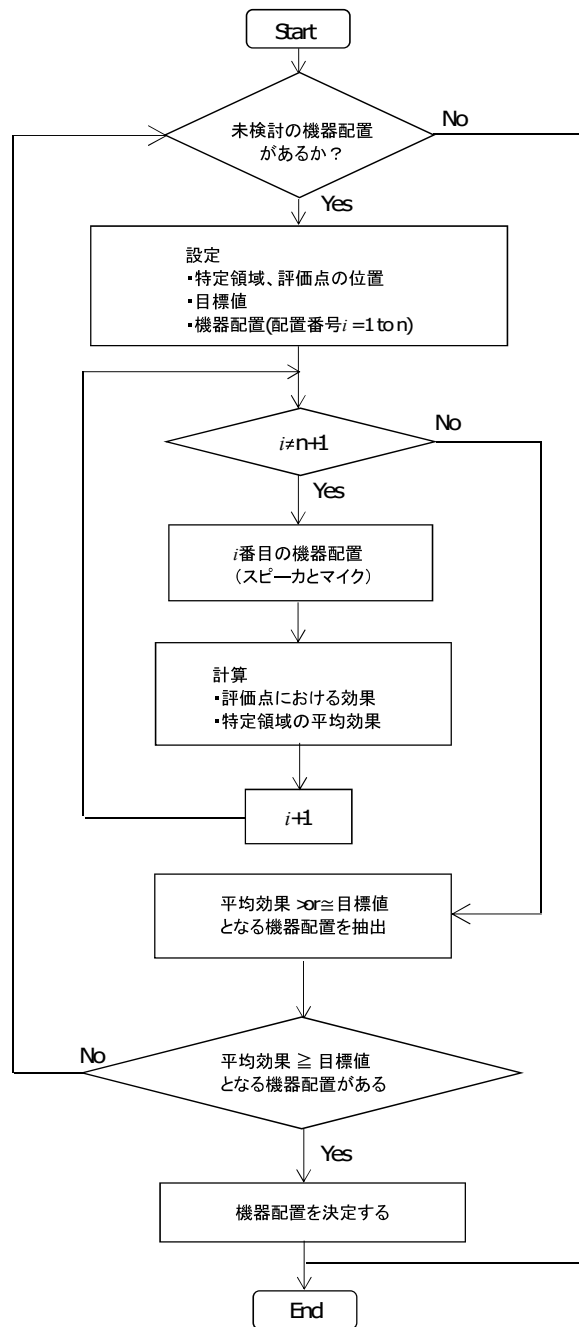


図-2 機器配置の決定フロー

表-1 効果指標と効果の目安

効果指標 EI: 効果の平均値/目標値		特定領域における効果
効果の最小値/目標値 > 0	good EI ≥ 1	明確に効果を感じられる
	fair 1 > EI ≥ 0.5	効果を感じられる
	poor 0.5 > EI	あまり効果を感じられない

反射に係る機器の位置関係を図-3に示す。工場のように空間が大きく、上面や壁面からの反射の影響が少ない状況を想定した。なお、実際の工場では機器からの反射等による複雑な定在波音場も存在するが、本検討では作業場所の環境向上を目標としており、騒音源が近く、床

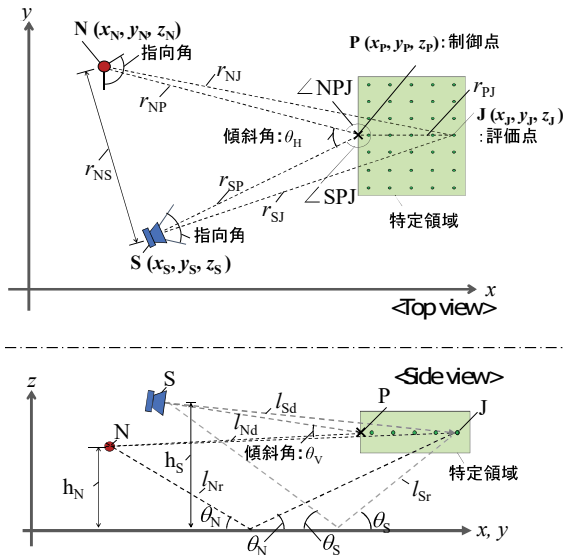


図-3 機器配置と、直接音および床面反射に係る機器の位置関係
評価点: 35 点 (一例)

面反射以外の反射音の影響が小さい場合を想定した。床面からの反射の影響は次節において述べる。なお以降において、騒音源または制御用スピーカの指向性を示す角度を指向角、騒音源からの騒音の伝搬方向に対する制御用スピーカの向きを示す角度を傾斜角と定義した。図-3において、N は騒音源、S は制御用スピーカ、P は制御点である。特定領域において、N、S、および P は任意の位置に配置できる。特定領域における平均的な効果を把握するため、評価点 J は特定領域内に等間隔に配置する。制御点位置 P において、騒音源からの騒音と制御用スピーカからの制御音を同振幅、逆位相とすることから、評価点 J における騒音と制御音の振幅比、および位相差を予測し、各評価点における制御の効果 (制御の有無による音圧レベル差) を式(1)により評価する⁴⁾。

$$E_{J_{SPL}} \approx 91 - 20 \log_{10} \left\{ \Lambda (1 + A_J^2 + 2A_J \cos \Delta\phi_J)^{1/2} / p_0 \right\} \quad (1)$$

ここで、 Λ は単位振幅の正弦波の実効値=0.707、 p_0 は基準の音圧 (2×10^{-5} [Pa])、 $E_{J_{SPL}}$ は各評価点 J における効果[dB]、 A_J は各評価点 J における騒音と制御音の振幅比、 $\Delta\phi_J$ は各評価点 J における騒音と制御音の位相差を示す。

評価点の点数を N_J とし、特定領域における効果指標 EI を、

$$EI = \left(\frac{1}{N_J} \sum_{k=1}^{N_J} E_{J_{SPL,k}} \right) / V_T \quad (2)$$

とする。ここで V_T は効果の目標値=10dB であり、 $V_T = 10$ となる。式(1)を用いて各評価点における効果を求めた後、式(2)に示す効果指標を算出することで、目標以上の効果が得られる機器配置を決定できる。なお、スピーカの指向性を示す指向角は、実際に使用する機器の

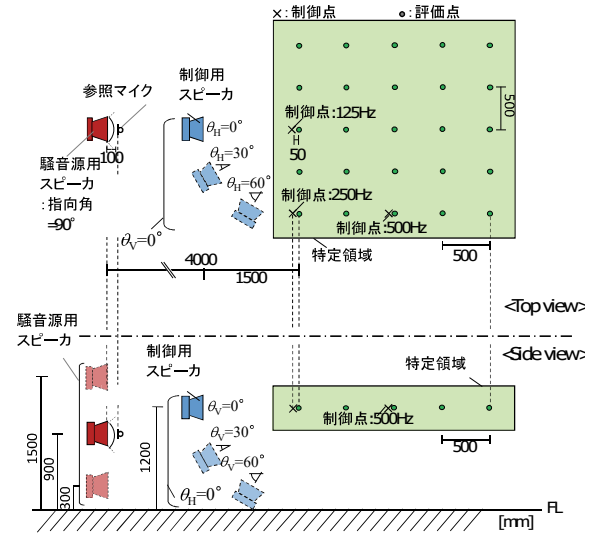


図-4 実験状況
評価点: 25 点, 500 mm 間隔

仕様に応じ、-6 dB までの範囲と定義した。

2.3 床面反射の影響

床面反射に係る機器の位置関係を図-3に示す。各評価点における効果 $E_{J_{SPL}}$ は、床面反射の影響を受ける。そこで、想定する空間において最も影響の大きな一次床面反射の影響を考慮し、振幅比 A_J に補正係数をかけ、位相差 $\Delta\phi_J$ に補正値を加えることで、式(1)を床面反射の影響を考慮した式(3)に書き換えた。なお、以降の検討では、効果を安全側に評価するため最も影響する場合を想定し、床面の反射係数を 1 とした。

$$E_{J_{SPL,F}} = 20 \log_{10} \frac{c_N / \sqrt{c_N^2 + c_S^2 \cdot A_J^2 + 2c_N c_S A_J \cos(\Delta\phi_J - \phi_{c_S} + \phi_{c_N})}}{p_0} \quad (3)$$

ここで、 c_N および c_S は騒音源および制御用スピーカの床面反射に係る振幅の補正係数、 ϕ_{c_N} および ϕ_{c_S} は床面反射に係る位相差の補正値である。式(3)における振幅比の補正係数および位相差の補正値は、機器の位置関係から導出する⁴⁾。

3. 実験による効果指標の評価

提案方法の妥当性を検証するため、実験室において制御による騒音の低減効果を計測し、効果指標と比較した。実験状況を図-4、写真-1に示す。実験室 (無響室) の床面は板張りし、床面反射が起こる状況とした。騒音源用スピーカ 1 台、制御用スピーカ 1 台とし、2000 mm x 2000 mm の広さをもつ特定領域に 500 mm ピッチで評価点を設けた。制御点は特定領域内とし、空間の影響を排除するため音源の周波数によって異なる位置とした (図-4 参照)。騒音源用スピーカの高さは 900 mm と



写真-1 実験状況

表-2 実験および効果指標の算出条件

制御用スピーカの指向角 [°]	90
騒音源用スピーカと制御点の距離 [mm]	4000
騒音源の周波数 [Hz]	125, 250, 500
傾斜角 [°] 水平: θ_H 、鉛直: θ_V	(θ_H, θ_V) : (0, 0), (30, 0), (60, 0), (0, 30), (0, 60)

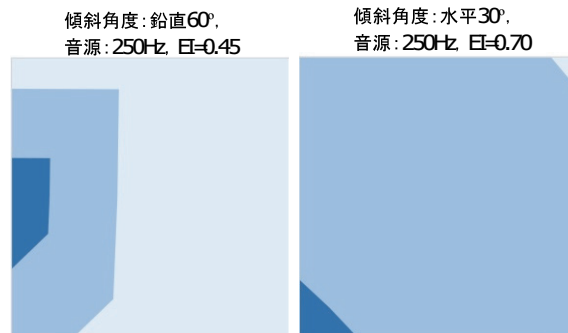
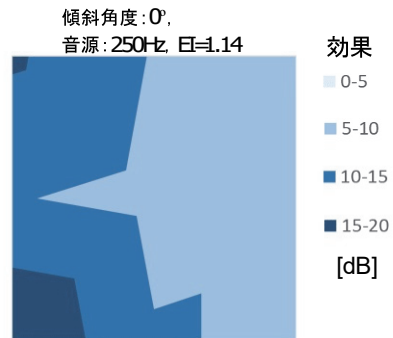


図-6 効果指標と効果の分布例

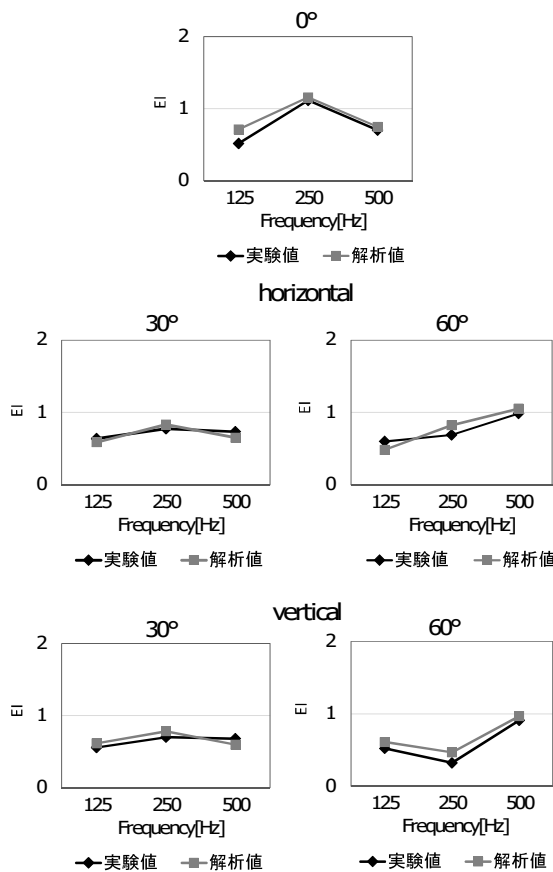


図-5 実験および解析による効果指標

した。制御用スピーカは、特定領域の境界点（音源の周波数が 125Hz のときの制御点と同等の位置）から 1000 mm の位置とし、制御スピーカの高さは、 θ_V が 0° の場合は 1200 mm、 θ_V が 30° および 60° の場合は、それぞれ 700

mm、300 mm とした。特定領域の高さは 1200 mm を中心として 800 mm～1400 mm とした。また、実験条件および効果指標の算出条件を表-2 に示す。制御用スピーカの指向角は 90° 、傾斜角（スピーカの向き、水平： θ_H 、鉛直： θ_V ）は $(\theta_H, \theta_V) = (0^\circ, 0^\circ), (0^\circ, 30^\circ), (0^\circ, 60^\circ), (30^\circ, 0^\circ), (60^\circ, 0^\circ)$ の 5 ケースとした。それぞれのケースにおいて、制御の有無における評価点での音圧を測定し、式(3)および式(2)を用いて効果指標を求めた。なお、目標値 V_T は 10 dB とした。

実験および解析による効果指標の比較を図-5 に示す。図より、解析による効果指標は概ね実験と同等の値が得られた。拡散音場を想定した一般的な ANC の予測方法⁵⁾では、検討した空間のように波長よりも大きな領域における効果を表現できないが、実際の空間の多くは拡散音場ではないため、効果が期待できる場合がある。本提案のように騒音および制御音の伝搬方向を考慮すると、実際の空間で確認できるように、波長よりも大きな領域における効果を表現することができる。

また、効果指標と特定領域における効果の分布の一例を図-6 に示す。効果指標が 1.14 の場合、10dB を超える効果が得られる範囲も広く、領域内のどの位置においても 5dB 以上の効果が得られ、明確に効果を感じると考えられる。また、効果指標が 0.7 の場合では、領域内で概ね 5 dB 以上の効果が得られ、効果を感じると考えられるものの、効果指標が 0.45 の場合では領域内の効果は概ね 5 dB 未満であり、効果を感じにくいと考えられる。以上より、効果指標と特定領域内の効果の分布は表-1 に示したカテゴリーとほぼ一致することを確認した。

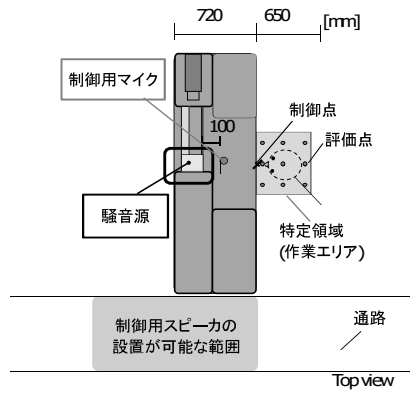


図-7 削孔機と作業領域（特定領域）

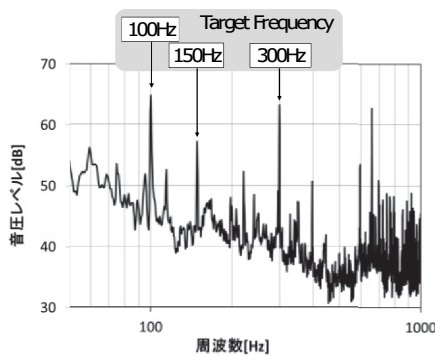
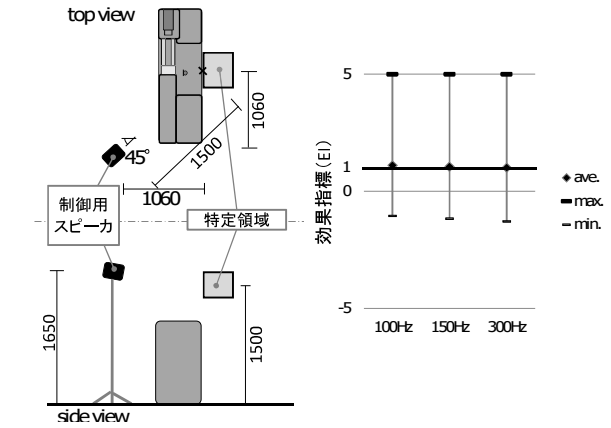
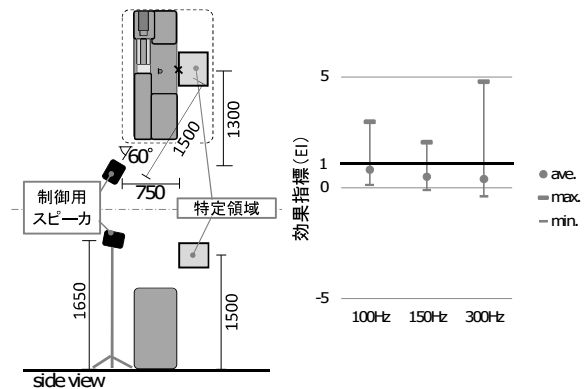


図-8 削孔機音の周波数特性



(a) Case 1



(b) Case 2

図-9 特定領域における効果指標

以上の実験および解析から、125～500 Hz、0～60°（水平、鉛直）の範囲において、提案した方法により想定通りに効果が得られる機器配置を決定できることを確認した。

4. 実機への適用

4.1 適用条件の検討

音源である対象機械および作業領域を図-7に示す。対象機械は削孔機であり、作業時には材料の削り音とともに、削孔機の回転に伴う低周波音が発生する環境である。削孔機の正面が作業領域であり、制御の特定領域はこの作業領域の範囲となる。また、図-7に示す通路が、制御用スピーカの設置が可能な範囲である。

事前の計測結果を図-8に示す。騒音源である回転軸の前方 100 mm の位置で音圧を計測した。100 Hz、150 Hz、300 Hz で音圧が卓越しており、概ね 60 dB 以上であった。これらの卓越周波数が聴感に与える影響が大きいと判断し、低減の対象とした。

4.2 配置の決定

提案した方法により、騒音源と制御用スピーカおよび評価点の位置から制御用スピーカの配置を検討した。それぞれの条件を図-9、表-3に示す。制御用スピーカの指向角、制御用スピーカから制御点までの距離、対象

表-3 計算条件

	case1	case2
制御用スピーカの指向角		90°
制御用スピーカから制御点までの距離 [mm]		1500
対象周波数 [Hz]	100, 150, 300	
制御用スピーカの傾斜角	45°	60°
α	2.4:100Hz, 1.8:150Hz, 1.3:300Hz	
位相差	-1.4rad:100Hz, -1.5rad:150Hz, -1.4rad:300Hz	

周波数、制御用スピーカの傾斜角、および騒音源の音の強さに対する制御用スピーカの音の強さを表す係数 α を、表-3に示す値とした。制御用スピーカの指向角や制御点までの距離は等しいが、制御点となす傾斜角は、Case1の方が騒音の伝搬方向に近い角度である。

計算で求めた効果指標を図-9に示す。目標値は 10 dB として効果指標を求めた。効果指標の算出後、併せて効果の最大値および最小値を目標値で割った値も記し、効果の最大値が5を超える場合は5とした。このことは、音圧レベルでの最大効果の予測値が 50 dB を超えることを意味しており、現実的な値とはいえない。これは 2.3 節で述べたように、効果の予測では波面の干渉のみを予測値の計算に使用したためと考えられる。

Case 1 での効果指標は全ての周波数で1以上となったものの、最小効果は全ての周波数でマイナスとなった。

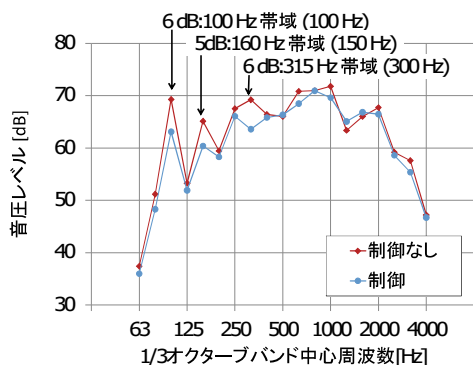


図-10 制御点における低減効果

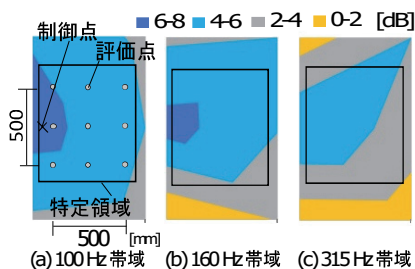


図-11 特定領域における制御効果
評価点:9点, 250 mm 間隔

Case 2 では、100 Hz で 0.81、150 Hz で 0.50、300 Hz で 0.39 となり、全ての周波数で 1 未満となったが、最小効果は 300 Hz を除いて 0 以上となった。このため、制御用スピーカの配置は、300 Hz では効果を感じにくいものの、その他の周波数で概ね効果を感じられる、Case 2 の配置に決定した。

4.3 適用効果

フィードフォワード型の制御方法（直列型）^{1) 2)} を適用し、制御用スピーカを Case 2 の配置として特定領域における効果を確認した。なお、制御の対象は事前計測で確認した 100 Hz、150 Hz、300 Hz の卓越周波数とした。評価点は、作業領域内（500 mm×500 mm）に 250 mm ピッチで等間隔に配置し、高さは 1500 mm とした。計測結果は 30 秒間の平均値であり、ヒトの耳が等比的に周波数特性を感じることから、1/3 オクターブ分析結果を示した。

図-7 に示した作業領域内の制御点における、各卓越周波数の音圧の低減効果を図-10 に示す。制御の有無により、対象の卓越周波数を含む帯域において 100 Hz 帯域では約 6 dB、160 Hz 帯域では約 5 dB、315 Hz 帯域では約 6 dB、それぞれ低減することを確認した。また、評価点とその周囲における制御効果（制御の有無による差）を図-11 に示す。それぞれの周波数帯域の領域における効果の平均値は、100 Hz 帯域で 5.5 dB、160 Hz 帯域で 4.7 dB、315 Hz 帯域で 3.5 dB となり、表-1 に示したカテゴリーと概ね一致した。また、図-9 に示した効

果指標との差は 0.3 ポイント程度であった。

なお、特定領域の効果は周波数が低くなるほど大きく、5 dB 以上となる範囲も広くなることが確認できた。さらに、周波数が高くなるほど制御用スピーカの傾斜角の影響が大きく現れることが図-11 から確認できる。

5. まとめ

ANC により特定領域の音圧を低減することを目的として、合理的な機器配置の選定方法を提案した。提案した効果指標を用いた方法により、機器配置による領域での効果を簡易に評価できることを確認した。また、効果の検証のため、工場の制約条件を考慮した機器配置を事前に検討し、実際の工場機械の騒音対策に適用した。その結果、事前に検討した機器配置によって、対象とする卓越周波数の音圧を想定通り低減できることを確認した。したがって、効果指標を 0.5 以上とする機器配置を選定することで、目視管理が可能な状態で、作業者のいる特定領域の音圧を低減でき、作業環境の改善に寄与できると考えられる。

今後の課題としては、機器配置の選定方法における、効果指標の精度向上や、複数の騒音源・制御用スピーカを使用した際の配置の検討方法および制御方法が挙げられ、引き続き取り組んでいく予定である。

【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、Vol.82、No.732、pp.97-103、2017.2
- 2) L. Kanazawa, K. Mizutani, "Reduction of construction machinery noise in multiple dominant frequencies using feedforward type active control", Internoise2018, Chicago, 2018.8.26-29
- 3) 金澤朗蘭、「特定領域を対象としたアクティブ消音の制御方法」、奥村組技術研究年報、No.45、pp.103-108、2019.9
- 4) 金澤朗蘭、水谷孝一、「機器配置を考慮したフィードフォワード型能動制御による特定領域の騒音低減」、騒音制御、Vol.44、No.2、pp.1-9、2020.4
- 5) Nakashima, T. and Ise, S., "A theoretical study of the discretization of the boundary surface in the boundary surface control principle", Acoustical Science and Technology, 27, 4, pp.199-205, 2006.