

# 下水道管路内水位のモニタリング技術の開発

## Development of Internal Water Level Monitoring Technologies for Sewerage Pipelines

南雲裕樹\* 山口 治\*

### 要 旨

下水道管路の維持管理は、管路内水位をリアルタイムにモニタリングすることが有効であるが導入実績は少ない。これまでにモニタリング技術の普及に向けて、実際に運用中の管路で水位モニタリングを試行してきた結果、測定機器と通信の電力消費量の削減、設置・撤去の時間短縮などの課題が挙げられた。そこで、今回モニタリングの要素技術であるセンサ、通信、設置撤去方法の検討を行い、改善の可能性を得た。

キーワード：下水道管路、維持管理、水位モニタリング、効率化、包括的民間委託

### 1. まえがき

我が国の下水道は、今日において人々の生活を支える重要なインフラとなっている。高度経済成長期以降、全国で急激に下水道整備が行われ、現在では管路の整備延長が約49万kmとなり、下水道利用人口を総人口で除した下水道処理人口普及率は約91%となっている。そのうち、布設後50年を経過した管路は、令和2年度末で約2.5万km、全体の5.1%を占めており、10年後に8.2万km、20年後に19万kmと増加する(図-1)。老朽管は下水道本来の役割・機能を果たせないうえ、道路陥没の発生など、他のインフラに影響を及ぼす可能性がある。

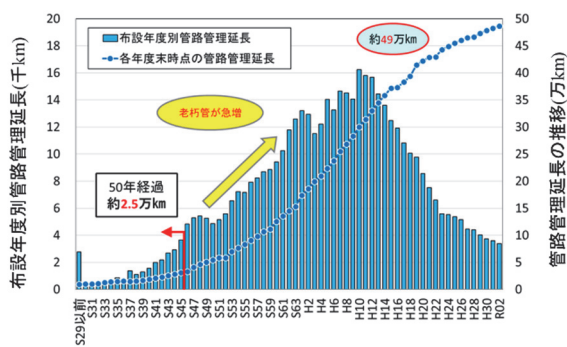


図-1 下水道管路の年度別布設延長<sup>1)</sup>

一方、下水道を管理する多くの自治体では、人口減少に伴う下水道使用料の減少による維持管理予算の縮小と、労働人口の減少による維持管理技術者の不足が問題となっている。そのためこれらの有効な解決策の一つとして、官民連携事業が様々な分野で進められている。その

うち、下水道管路の維持管理では、これまでも包括的民間委託の導入件数が増加しているが、近年の下水道PPP/PFI 検討会への参画団体数の増加などから、今後も増加すると予想されている<sup>2)</sup>。

包括的民間委託の導入効果として、民間企業による一元的管理やノウハウ・新技術などの導入により、効率的な維持管理が実現し、従来の事後保全維持管理から予防保全維持管理への転換が期待できる。

しかし、包括的民間委託の実施のためには、対象インフラの資産価値評価(デューデリジェンス)が必要となるが、地中に埋設されている管路の点検に多くの時間と費用がかかるため、十分に行われていない。また、近年は気候変動の影響により局所的な集中豪雨の発生回数が増加<sup>3)</sup>している(図-2)。これにより、計画最大流量を超える雨水が下水道管路に短時間で流入することで生じる内水氾濫が増加している。そのため、維持管理や防災の観点から、管路内の水位などの情報をモニタリングできる体制や技術が求められている。

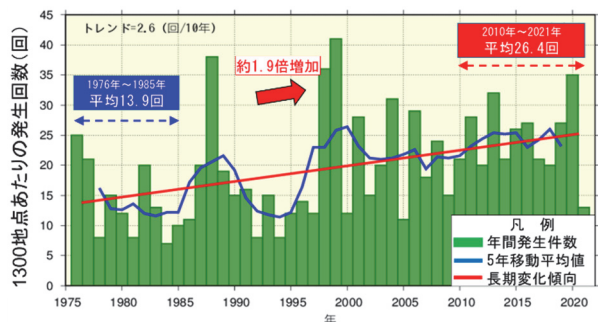


図-2 1時間の降水量80mm以上の年間発生回数<sup>3)</sup>

\* 東日本支社リニューアル技術部

## 2. 下水道管路の水位情報把握の現状

国土交通省は、雨水出水に起因する大規模な内水氾濫を防止するため、2015 年に水防法を改正し、「雨水出水に係る水位情報の通知および周知について」を定めた。この中で、下水道水位に関して、警戒水位に達した旨を速報性のある伝達手段により情報発信することが記載されており、リアルタイムで水位を把握する重要性が増している。

一方、筆者らが実際に下水道管路の維持管理を行う各自治体に対して、内水氾濫の防止と発生時の対応に関するヒアリングを行ったところ、下記の課題が挙げられた。

- i. 内水氾濫の予測精度の向上、効果的な対策の立案
- ii. 下水道管路の流下能力の健全性評価
- iii. 不明水の有無および浸入位置の特定

上記項目の実施には、下水道管路内の水位モニタリングが有用であり、これまでも一部の区間や時期を限定して実施されているとの回答を得た。しかし、従来の測定方法は、水位センサを管路底部に取り付けて、1 ヶ月から半年程度の測定を行ったうえで、機器を回収して事務所で解析を行う手法であった。このためリアルタイムの状況把握ができず、迅速な内水氾濫の状況分析や対応の立案には適していなかった。

## 3. 既往技術の調査、選定、検証

### 3.1 既往技術の調査

現在では、下水道管路内の水位モニタリングをリアルタイムで行うことができる技術が複数存在し、実際に運用されている。そこで既往技術のうち有力な 2 つの技術について検討した(表-1)。

「SkyManhole<sup>®</sup>」<sup>5)</sup>は、LPWA (Low Power Wide Area) 通信を用い、中継器・ゲートウェイを介して管路内情報を常時監視するシステムである。常時計測と長期計測が可能なオンラインによるリアルタイム観測と、巡回時などに管路内情報を収集するオフライン観測が可能である。

「マンホールアンテナ」<sup>6)</sup>は、スマートフォンなどに用いられる LTE 通信を用いて、中継器などを用いずに管路内情報をリアルタイムに観測する機能を有している。

### 3.2 既往技術の選定

既往技術の効果の検証および問題点の抽出を目的として、現在供用中の下水道管路で試行した。選定した技術は、地上での機器取付の制約を考慮し、通信中継器の設置が不要な「マンホールアンテナ」(以下、「選定技術」)とした。

選定技術で使用する LTE 通信は、スマートフォンなどに用いられているためにインフラが整備されており、場所を選ばずに使用できる。また、マンホール内部から蓋を開けずに常時クラウドサーバにデータを転送できる。計測・通信の電源は、マンホール蓋の裏に取り付けたバッテリーを使用し、測定頻度に応じて 2 ヶ月から 4 年程度までの計測が可能である。このため、設置した現地に行かずに PC・携帯端末から場所と時間を問わず管路内部のリアルタイム情報や過去の情報を確認できる。運用に際しては、下水道管路の管理対象エリアに数多く配置することで、面的な管理が実現できる。

### 3.3 選定技術の検証

選定技術を実際に供用している下水道管路に設置して試行した。対象地区に、首都圏の中核市を選定し、主要駅周辺エリア内で過去に内水氾濫が発生した雨水管路の 4 点に設置した(図-3)。



図-3 マンホールアンテナ設置箇所

測定地点は、雨水管路の合流点となるマンホールとし、内部にアンテナとセンサを取り付けて、水位の時間変化と水位から計算した流下能力の確認を行った。水位計測と計測データ通信は、実施間隔が短いと消費電力が増大するため、当検証では水位計測データを 1 分間隔で取得し、10 分間(10 回分)をまとめて 1 回でクラウドに発信する仕様とした。計測期間は 2021 年 7 月から 2022 年 1 月までのおよそ 200 日である。

表-1 リアルタイム水位モニタリング技術の検討

比較項目 検討技術	技術仕様	設置機器	通信方法	検証箇所 適合性
(株)NJS SkyManhole <sup>®</sup>	・管路内リアルタイムモニタリング ・オフライン観測 ・浸水シミュレーション機能(AI)	①専用マンホール蓋と通信機器 ②計測センサー ③中継器とゲートウェイ	LPWA通信機器+中継器 +ゲートウェイ	△
(株)明電舎 マンホールアンテナ	・管路内リアルタイムモニタリング ・水位予測機能	①専用マンホール蓋と通信機器 ②計測センサー	LTE通信 (中継器不要)	○

検証の結果、計測期間中に局所的な集中豪雨で内水氾濫が発生したが、いずれも水位変化がリアルタイムに確認できた。また、図-4および表-2に示すとおり、局所的な集中豪雨発生時には、一時的ではあるが、管路流下能力の100%を超える水位が観測されるなど、管路内部の状況も知ることができた。これらの情報をもとに、流下能力の不足する区間や路線に対して、モニタリング結果が管路整備の計画に活用できることが分かった。

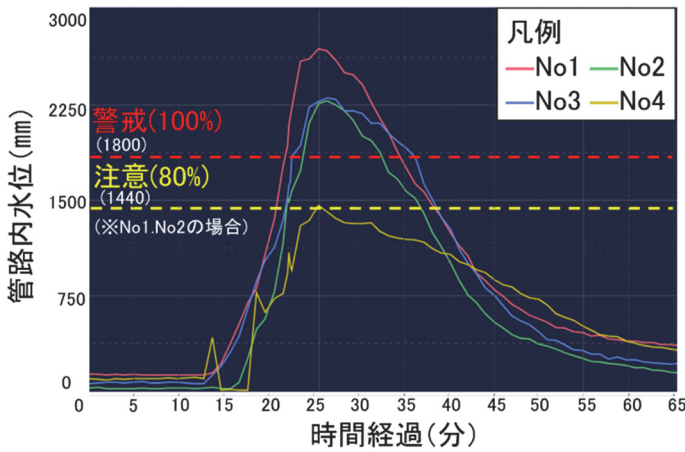


図-4 管路内水位の観測結果

表-2 管路の内寸と最大水位・流下能力の関係

	管路内寸(函幅×高さ mm)	最大水位(mm)	流下能力超過率
No1	□1800×1800	2690	149%
No2	□1800×1800	2250	125%
No3	□2700×2160	2270	105%
No4	□2700×2160	1450	67%

### 3.4 選定技術の問題点

以上の選定技術の検証により、水位リアルタイムモニタリングの有用性を確認できた。一方で、運用に際して、以下の問題点が明らかとなった。

- i. 内水氾濫の把握に必要な計測および通信周期の場合、水位計および通信機器の電力消費が大きく、電源交換の期間が短くなる
- ii. 水位計の設置撤去に時間が掛かり、道路占用時間が長くなる

## 4. 補完技術の開発

### 4.1 新たな水位モニタリングシステムの構築

選定技術を含めた既往技術は、これまで機器が高価なため広範囲に多数の機器を設置できなかった。そのため、実施例では雨水管合流部や内水氾濫の予測地域に数カ所設置するなど、場所と数量を限定し計測を行っていた。そこで、前述の選定技術の問題点の解決および未設置箇所を補完する廉価な開発技術の双方を活用した新たな水位モニタリングシステムの構築を目指すこととした。

### 4.2 要素技術の検討

前述の問題点 i、ii の解決策として、選定技術を構成する3つの要素技術である、a. センサ技術、b. 通信技術、c. 水位計センサの固定治具に着目し、省電力化と低コスト化の検討を行った。

#### a. センサ技術

水位センサの電力消費低減と低コスト化を同時に実現する技術として、ヘテロコア光ファイバ<sup>7)</sup>を用いた水位計(以下、「光ファイバ水位計」)の適用検討を行った。

ヘテロコア光ファイバのセンサは、コア径の異なる部分を意図的に設けて、伝搬光が漏れいする度合を感知することで変状を計測する。このセンサを用いた光ファイバ水位計は、センサ内にヘテロコア部分を設置し、水圧が作用して変形する際の変動(曲率)を感知し水位を計測する機構である(図-5)。一般的な水位測定で用いる通電式の棒状水位計との比較を表-3に示す。

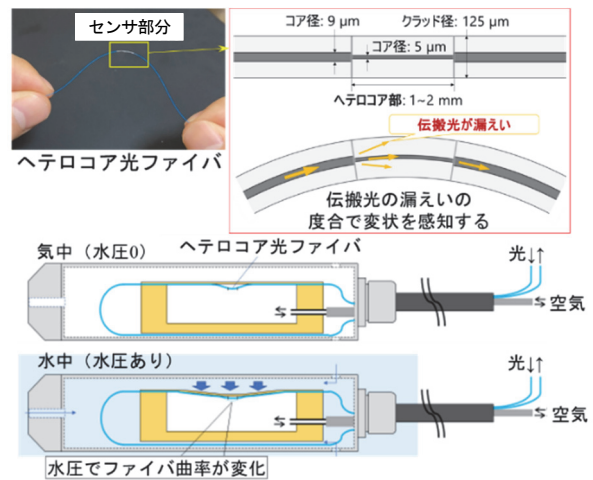


図-5 ヘテロコア光ファイバ水位計概念図<sup>7)</sup>

表-3 棒状水位計と光ファイバ水位計の性能比較

比較項目	機器名称	棒状水位計	光ファイバ水位計
消費電力	【大】	4W	【小】 0.5W
	比較	○	◎ (従来比:1/8)
形状自由度	【低】	ペン型	【高】 フリー
	比較	△	○
耐久性	耐雷性	【無】 雷等で破壊	【高】 影響なし
	比較	×	○
耐腐食性	【低】	金属線	【有】 ガラス線
	比較	△	○
生産体制		汎用品	受注生産
費用	比較	1.0(標準)	1.3

消費電力は、棒状水位計が4Wのところ、光ファイバ水位計は0.5Wであり、消費電力が1/8に抑えられることで、長期使用が可能となる。

形状は、棒状水位計は一般的にペン型であるが、光ファイバ水位計は自由度が高く、低水位でも正確に測定できるなど、対象に適した変更が可能である。

耐久性については、通電式の棒状水位計に対して、光ファイバはセンサ部分での通電を必要としないガラス製であり、耐雷性が高く、硫化水素などの化学的浸食を受けないことから、長期耐久性を有する。

センサの調達費用は、汎用製品で価格が安定している棒状水位計に対して、光ファイバ水位計は、現段階で少量生産のために 1.3 倍となった。しかし、今後は需要の増加に伴い、安定的な生産・供給体制を確立することで、低コスト化が見込める。

b. 通信技術

選定技術で使用している LTE 通信は、通信の範囲と速度が速い反面、長期間使用による費用が高く、消費電力が大きい。そこで、通信装置の電力消費量低減と低コスト化を目的として、LPWA の一種である LoRa 通信 (LoRa : Long Range) の適用を検討した。LTE 通信と LoRa 通信の比較を表-4 に、LoRa 通信を用いた下水道内部からのデータ取得イメージを図-6 に示す。

表-4 通信規格の比較

通信名称 比較項目	LTE通信	LoRa通信
通信範囲 比較	【広】 ほぼ制約なし ○	【狭】 半径100m程度 △
通信速度 比較	【速】 max150Mbps ○	【遅】 max250kbps △ (LTE比:1/600)
消費電力 比較	【大】 1.5mWh/回 △	【小】 0.03mWh/回 ◎ (LTE比:1/50)
通信費 比較	【有】 月額使用料 △	【無】 初期費用のみ ○

LoRa 通信は、消費電力が小さく安価に利用できる反面、通信可能な範囲が LTE 通信に比べて狭いうえ、鉄製のマンホール蓋を介したデータ通信ができない可能性があった。そのため、実際のマンホール内部に装置を設置して通信とデータ転送の試験を行った。

試験では、運用時の効率を考慮してデータ収集を点検車で行うことを想定し、自動車の一般運行速度での取得が可能か検証した (図-7)。

試験手順としては、マンホール内に水位計と送信機を取り付けてマンホール蓋を閉じた状態で、受信機を搭載した点検車が近傍および直上を通過した時のデータ取得の可否を調査した。送信機は、受信機を感知する信号を 20 秒間隔で発信し、受信機が存在を感知した時に水位情報を発信する設定とした。試験の結果、マンホール位置から約 100m の位置で水位情報が取得できた。

上記の結果から、受信機を搭載した点検車が 50km/h で走行した場合、送信機の待機状態間隔を 14.4 秒以下に設定することで、走行中に水位情報を取得できることを確認した (図-8)。これにより、道路占有やマンホール蓋の開閉をせずに迅速なデータ取得が可能な方法を構築できた。しかし、実際には周囲の建物や通信環境の相違、

渋滞時の車両による影響などを受けることから、様々な環境における通信距離や送受信間隔の検証が必要である。

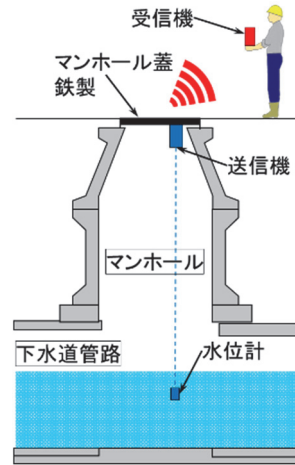


図-6 データ取得イメージ 図-7 データ取得試験状況

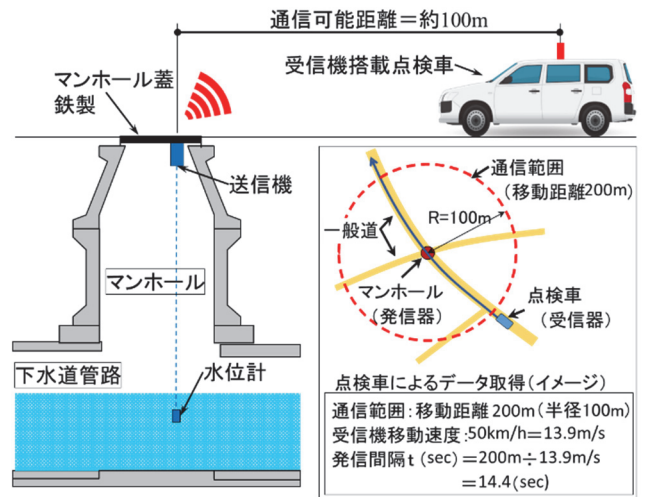


図-8 点検車によるデータ取得試験結果

c. 水位計センサの固定治具

これまでは、水位計センサを取り付ける際にマンホールの壁面にハンマードリルで削孔し、アンカーボルトで固定する方法 (以下、「従来手法」) であったため、設置に 1 時間程度を要していた。しかし、設置撤去を行うには道路占有が必要となるため、地上交通への影響を考慮し、迅速な取り付け・取り外しが求められる。

また、一般的には、棒状の水位計を高さ方向 (上下) に配置して水位を測定するが、管の内部の常時水位はごく浅く、棒状水位計では低水位の計測が困難であった。そこで、形状変更可能な光ファイバ水位計を使用し、取り付け・取り外しが迅速で容易な固定治具の検討を行った。検討にあたり、以下の点を考慮した。

- i. 固定治具設置のアンカーレス化
- ii. 固定治具と水位計の一体化
- iii. 流下阻害の回避

検討の結果、マンホールから流下する管路（下流側）の接合部にはめ込むことができる形状を採用し、管底部に光ファイバ水位計を取り付け、流下能力を確保する形状（以下、「はめ込み式治具」）を考案した（図-9）。



図-9 水位計センサの固定治具

はめ込み式治具は、腐食耐性を有する厚さ 0.3mm のステンレスシートを主材料とした。光ファイバ水位計の形状を薄板型とし、管底部から 10cm 程度偏芯させた位置に設置することで、流下物の堆積を回避した。ケーブルはステンレスシートに沿わせてコーキングをした。

はめ込み式治具の固定方法は、ステンレスシートを管径調整治具で周方向に拡張させて固定し、L 字金物を下流側管口に掛けて流下を防止した。アンカーで固定する従来手法と、はめ込み式治具の比較を表-5に示す。

表-5 水位センサ固定方法の比較

選定技術 比較項目	従来手法 (アンカー固定)	はめ込み式治具
設置時間	【長】1h/箇所	【短】0.25h/箇所
比較	△	○ (従来比:1/4)
作業性	【普通】工具必要	【容易】工具不要
比較	△	○
撤去後補修	【要】アンカー穴埋め	【不要】
比較	△	○
汎用性	【高】対象径依存無	【中】対象径に適した規格化
比較	○	△

試作した固定治具を実際の管路に取り付けたところ、1基あたり15分程度の設置時間となり、従来手法と比べて1/4の作業時間であった。また、アンカーによる固定が不要となるため、作業性が容易で、撤去後の補修が不

要となった。加えて、薄板形状にした光ファイバ水位計が管底部にあるため、低水位においても正確な測定が可能となった。今後は、センサ部分の保護形状、管路の径や形状に応じた規格化など、更なる改良が必要である。

### 4.3 補完技術の考察

これまで、新たな水位モニタリングシステムの構築に向けて、補完技術の開発に取り組んできた。現状の費用は、選定技術と比較し、光ファイバ水位計単体では高価となるが、LoRa 通信の使用による通信費の削減、はめ込み式治具の使用による作業時間の短縮（人件費の削減効果）が見込め、総合的に低コスト化が見込める結果となった。

消費電力は、光ファイバ水位計と LoRa 通信の技術を組み合わせることで、選定技術と比較し、大幅に低減された水位モニタリング技術の確立が見込める。消費電力が抑えられたことで、長期使用の実現や、通信回数の増加が可能となる。一方で、供給電力の小型化や、太陽光などの自然環境を利用した環境発電など代替電力の活用も考えられる。

新たな水位モニタリングシステムは、以下のように運用される。既往技術は、確実な通信によるリアルタイム計測が可能な点を活かし、面的な傾向をリアルタイムに把握するメイン機器として主要な箇所配置する。これにより、局所的豪雨時および豪雨直後の迅速な対応が可能となる。補完技術は、安価で数多く設置できる点を活かし、平面的な欠損部分を補完するバックアップ機器として、メイン機器の間に配置する。データは必要に応じて現地でマンホール蓋を開けずに取得する仕組みとし、記録の解析を行うことで、局所的豪雨の実態把握、対策の立案、整備計画の作成などを行うための資料とする。このように、新たなモニタリングシステムでは、メイン機器とバックアップ機器の双方の情報を活用することで、維持管理品質の向上と業務の効率化、コストの抑制を実現できると考える（図-10）。

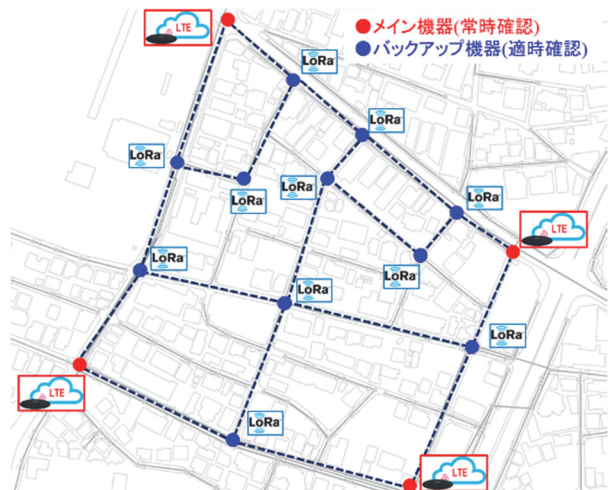


図-10 既往技術と補完技術の運用イメージ

## 5. 環境発電の活用に向けて

### 5.1 電力供給方法の検討

前章では、複数の要素技術を組み合わせることで、消費電力の低減が実現し、環境発電の適用可能性に触れた。環境発電の方法としては、主に太陽光発電、振動発電、水力発電、熱電発電が挙げられる。下水管路の水位モニタリングにおいて、環境発電で得られる電力を活用できれば、電池交換不要で長期間の使用が実現し、メンテナンスの省力化が可能となる。今回は、環境発電のうち、適用可能な技術として、熱電発電について検討した。

### 5.2 熱電発電技術の概要

熱電発電は、物体の温度差によって電位差が生じるゼーベック効果を用いて発電する方法である。ゼーベック効果活用例は、近年の半導体技術の進歩と自然エネルギーへの転換機運などにより増加傾向にある。

ここでは、供用中の下水道管路やマンホール内部での熱電発電の適用を考える。熱源は、季節により温度変動がある蓋を含むマンホール本体上部付近と、年間を通して安定した温度が想定されるマンホール内部<sup>8)</sup>とする(図-11)。

夏季は、外気温の上昇やマンホール蓋の直射による熱により、マンホール内部との温度差が生じる。冬季は、外気温の低下や降雪・凍結などにより、マンホール内部が暖かい状態となって温度差が生じる。この温度差がある状況において、ゼーベック効果により、高温側で電子が生成され、低温側に移動することで電流が発生する。

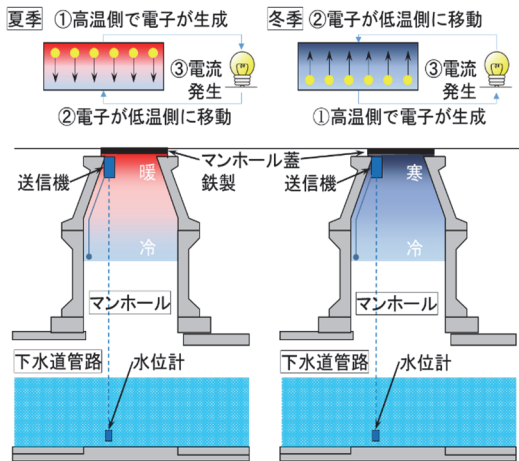


図-11 マンホール内部での熱電発電概念図

### 5.3 消費電力と発電電力の検討

要素技術で検証した光ファイバ水位計と LoRa 通信を掛け合わせた補完技術において、水位モニタリングに必要な電力を推算した。推算条件として、通信待機状態間隔は、通信技術で検討した 14.4 秒以下を満足する 10 秒間隔、計測および通信間隔は、実運用の範囲を想定し 10 分間隔とした。その結果、1 時間稼働に消費する電力は、通信待機状態で 1.8mWh、計測で 0.8mWh、通信で

0.18mWh となり、合計で 3mWh 程度が必要となることが分かった。

熱電発電の機構としてペルチェセルを使用し、3mWh の電力を発電する条件について検討した。ペルチェセルとは、サーモジュールと呼ばれる熱電素子で、半導体を 2 枚のセラミック基板で挟み、両面の温度差によって、電流を発生させることができる小型薄板状の電子デバイスである。大きさ 3cm 角の標準的なペルチェセルの特性<sup>9)</sup>より、ペルチェセルの両面に約 6°C の温度差が 1 時間継続することで、3mWh を発電する試算結果となる。

熱電発電を活用した水位モニタリングは、寒暖期であれば稼働に必要な電力を確保できることが想定され、課題として中間期の稼働方法など、検討する項目は複数あるが、運用可能と考える。

## 6. あとがき

下水道管内の水位モニタリングの既往技術調査および検証を行った結果、維持管理や防災の観点では有効な技術であった反面、配置できる場所に制約があることが明らかになった。解決策として、既往技術の間に配置する補完技術と合わせて活用する新たなモニタリングシステムの可能性を示すことができた。

今後は、補完技術に採用する要素技術の実フィールドでの検証と、熱電発電を用いた電力供給に関する実現可能性の検証を通じて、モニタリングシステムの確立に向けて開発を進めたい。

### 【参考文献】

- 1) 国土交通省、「下水道の維持管理」、[https://www.mlit.go.jp/mizukokudo/sewage/crd\\_sewage\\_tk\\_000135.html](https://www.mlit.go.jp/mizukokudo/sewage/crd_sewage_tk_000135.html)
- 2) 国土交通省、「下水道における新たな PPP/PFI 事業の促進に向けた検討会」、[https://www.mlit.go.jp/mizukokudo/sewage/mizukokudo\\_sewage\\_tk\\_000382.html](https://www.mlit.go.jp/mizukokudo/sewage/mizukokudo_sewage_tk_000382.html)
- 3) 気象庁、「大雨や猛暑日など(極端減少)のこれまでの変化」、[https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/extreme/extreme\\_p.html](https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/extreme/extreme_p.html)
- 4) 国土交通省、「水防法などの一部を改正する法律の一部施行などについて」、[https://www.mlit.go.jp/river/suibou/pdf/suibouhou\\_kaisei\\_sekou\\_20150719.pdf](https://www.mlit.go.jp/river/suibou/pdf/suibouhou_kaisei_sekou_20150719.pdf)
- 5) 株式会社 NJS、「SkyManhole<sup>®</sup>」、[https://www.meidensha.co.jp/products/ict/prod\\_05/prod\\_05\\_01/index.html](https://www.meidensha.co.jp/products/ict/prod_05/prod_05_01/index.html)
- 6) 株式会社明電舎、「マンホールアンテナ」、[https://www.meidensha.co.jp/products/ict/prod\\_05/prod\\_05\\_01/index.html](https://www.meidensha.co.jp/products/ict/prod_05/prod_05_01/index.html)
- 7) 渡辺一弘、松原茂明、久保田謙、「OTDR を用いたヘテロコア型光ファイバセンサ」、計測自動制御学会論文集 35(1)、32-37、1999、
- 8) 国土交通省、「下水熱利用の推進に向けて」、[https://www.mlit.go.jp/mizukokudo/sewage/mizukokudo\\_sewage\\_tk\\_000458.html](https://www.mlit.go.jp/mizukokudo/sewage/mizukokudo_sewage_tk_000458.html)
- 9) リニアテクノロジー(株)、「ペルチェセルの標準特性」、<https://www.analog.com/media/jp/technical-documentation/data-sheets/j3108fc.pdf>

# データ利活用型 ICT 土工管理システムの開発

## ー土砂トレーサビリティ管理システムー

### Development of Earthworks Management System for Acquiring and Utilizing ICT DATA

#### - Soil Traceability Management System -

高尾篤志\* 宮田岩往\* 藤本情志\*\* 外木場康将\*\*\*

#### 要 旨

土取場のバックホウに設置したビーコンおよび土運搬のダンプトラックに搭載したセンサにより、「どこの土」を「どの場所」に盛土したのかを記録可能なシステムを開発した。このシステムは、センサデータと ICT 土工の締固め管理システムのデータについて土砂トレーサビリティアプリケーションを使用し、関連付けることで、3 次元土工管理図を自動作成する。これにより、従来職員が手作業で行う必要があった盛土場所の記録管理の必要がなくなり、トレーサビリティ管理の省力化および人員削減が図れる。作成される 3 次元土工管理図には、施工日や土質情報等の属性情報が自動的に付与されるため、将来の施工履歴の確認等に利用することが可能である。

キーワード：センサ、盛土、トレーサビリティ、ICT 土工、データ利活用

#### 1. まえがき

国土交通省が推進する i-Construction の施策によって建設現場において ICT (Information and Communication Technology) の全面的な活用が進められている。この取り組みにより、UAV (Unmanned Aerial Vehicle) や ICT 建設機械、IoT (Internet of Things) センサ等の導入が進み、施工や施工管理等の現場作業の省力化・効率化の面では、一定の効果が得られている<sup>1)</sup>。

一方で、UAV や ICT 建設機械等の導入により、建設現場において、従来の施工管理情報に加え、ICT 建設機械の 3 次元設計データ等の導入時に必要なデータや ICT 活用後に取得される多種多様なデータを扱うことが必要となった。それらのデータ処理には専門の知識が必要であり、場合によっては膨大なデータが取得されるため、データの処理等に多くの時間を要し負担となっている。そのため、UAV や ICT 建設機械等の様々な ICT を活用する近年の土工事においては、導入された ICT 機器により取得されるデータの活用が十分にできていない。

また、土工事の管理項目である工事進捗管理、品質管理 (転圧管理、材料管理)、出来形管理、土量管理についてのデータは個別に管理されているため、効率的にデータを活用することが難しい。そのため、データを集約し一元的に管理するプラットフォームの構築と、プ

ラットフォームを利用したデータ連携および利活用によるさらなる効率化が求められている。さらに、近年の土工事、特に盛土工事においては大規模で多くの種類の発生土を扱う工事が増え、品質確保のためには工事進捗管理および材料管理が重要になっている。

そこで、これらの土工事における課題解決のため、奥村組、西松建設、および戸田建設は、3 社共同研究により、データ利活用型 ICT 土工管理システム (以下、「本システム」) を開発した。本システムは、ICT 土工において取得されるデータをクラウド上の共有プラットフォームに集約することで、データの処理および管理を効率化し、工事進捗管理や品質管理等の土工事の管理項目におけるデータの利活用を推進するものである。これにより、プラットフォーム上のデータを現場事務所や本支社等の関係者が共有し、関係者間で連携して、出来形・出来高 (土量) 管理および品質管理等に利活用する。

本システムは、データ共有プラットフォーム<sup>2)</sup>、転圧施工履歴データによる土量算出<sup>3)</sup>、および土砂トレーサビリティ管理システム<sup>4)</sup>の 3 つのシステムにより構成されている。本稿では、ICT 土工管理システムの全体概要と、当社が主として取り組んだ土砂トレーサビリティ管理システムの詳細について述べる。

\* ICT 統括センターイノベーション部 \*\* ICT 統括センターシステム部 \*\*\* 東日本支社土木技術部

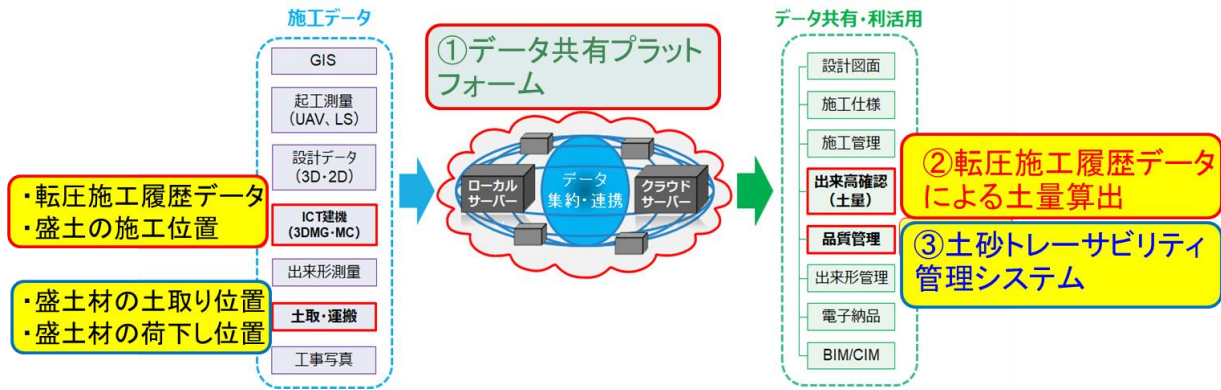


図-1 データ利活用型 ICT 土工管理システム概要図

## 2. データ利活用型 ICT 土工管理システム

### 2.1 データ利活用型 ICT 土工管理システムの概要

本システムは、ICT 土工において取得される施工データをデータ共有プラットフォームにアップロードしてデータ処理を行い、共有化を図り、各管理項目のデータを効率的に利活用するものである。図-1に、本システム全体の概要を示す。今回、データの利活用の対象として、盛土工事における出来高管理、品質管理に着目した。対象とする施工データは、図-1に示すように、ICT 土工において行われる 3 次元起工測量、ICT 建設機械による施工、3 次元出来形測量の各段階において取得される 3 次元起工測量データ、3 次元設計データ、3 次元施工履歴データ、3 次元出来形測量データに加え、IoT センサによって取得する盛土材の土取り位置および荷下ろし位置のデータである。以下に、本システムを構成する 3 つのシステムのうち、データ共有プラットフォームおよび転圧施工履歴データによる土量算出の特長について述べる。なお、土砂トレーサビリティ管理システムについては、次章以降で述べる。

### 2.2 データ共有プラットフォーム

従来、ICT 土工で得られるデータは、専用のソフトウェアを使用して現場事務所等のパソコン上にデータを保存し、データの利活用を行っていた。これらのデータをクラウド上へアップロードすることで、誰でもどこからでもデータを閲覧し利活用可能とする。

データ共有プラットフォームとして、3 次元データが扱えるクラウドサービス「CIMPHONY Plus (福井コンピュータ社)」を利用した。GNSS (Global Navigation Satellite System) を利用した締固め管理システムにより取得した転圧施工履歴データ等は、クラウドサービスのデータ样式に応じた変換処理をした後、CIMPHONY Plus へアップロードを行う (図-2)。この一連の作業をソフトウェアにより自動化し、定期的にアップロード動作を実施する。現場職員はクラウドサービスを利用し



図-2 データ共有プラットフォームのイメージ

て、すぐにデータを閲覧・利活用できる。また、GNSS を利用した締固め管理システム内に含まれる設計形状のメッシュデータやローラーの軌跡データ等を、共通フォーマットの点群テキストデータとして取り扱うことで、複数社の転圧施工履歴データを同じように取り込むことができ、汎用性も高い。

### 2.3 転圧施工履歴データによる土量算出

盛土の品質管理方法の一つに「TS (Total Station) ・GNSS による盛土の締固め管理システム」<sup>5)</sup>を用いた方法があり、TS や GNSS により取得される締固め機械の平面位置 (x 座標、y 座標) データを用いて締固め機械の転圧回数の管理 (面的な管理) が行われている。このシステムでは、転圧回数のほかに転圧施工履歴データとして、締固め機械の施工位置の 3 次元位置データを取得しており、この 3 次元位置データを用いることで転圧箇所

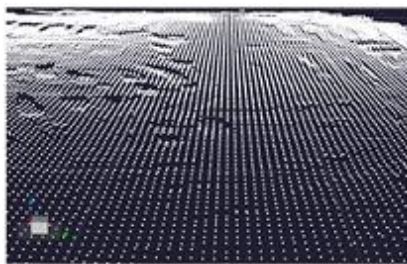


転圧施工履歴データから作成したサーフェスデータを使用し、設計形状もしくは前回の転圧施工履歴データと比較することで、土量算出が可能である。転圧施工履歴データを用いた土量算出フローを図-3に示す。転圧施工履歴データを活用することで、TS、UAV やレーザースキャナ等による定期的な測量をせずに容易に転圧後の盛土量を算出できる。また、転圧施工履歴データには UAV 測量等で生ずる周辺の不要な地形データが含まれないため、土量算出における点群処理が簡素化される。さらに、メッシュ化 (0.25m×0.25m または 0.5m×0.5m) されたデータであり、データ容量が軽量で扱いやすいことも特長である。

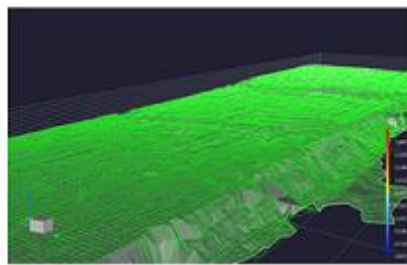
一方、転圧施工履歴データを用いた算出土量は、3 次



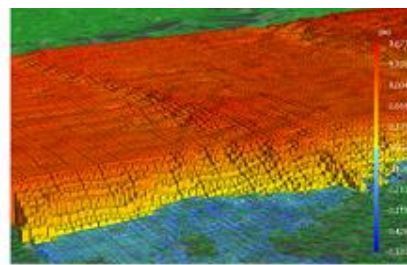
締固め管理システム



転圧施工履歴データ (3次元点群)



転圧施工履歴データ (サーフェス)



土量算出

図-3 土量算出フロー

元出来形測量で一般的に使用される TLS (Terrestrial Laser Scanner) 測量の精度と比較して誤差 10%程度であることが確認されており、盛土の出来高数量確認や進捗管理に十分適用できると考えられる。また、土量算出の作業時間は、TLS 測量と比較して 90%以上短縮でき、従来の測量方法と比較して大幅な省力化が期待できる。

### 3. 土砂トレーサビリティ管理システム

#### 3.1 システム概要

土砂トレーサビリティ管理システムは、「どの土」「どの場所」に盛土したかを自動で記録可能なシステムである (図-4)。土砂を運搬するダンプトラックのセンシングにより、どの土取場から施工箇所の盛土場に運搬したかを記録する。センサのデータを、ICT 土工の盛土工事において導入される締固め管理システムのデータと関連付けることで、盛土材のトレーサビリティデータとなる 3 次元土工管理図を自動作成する。3 次元土工管理図では、物体の形状を立方体のような空間格子の集合によって表現するボクセルモデルを使用し、盛土形状を表す。モデルを構成する各ボクセルは土質情報によって色分けされており、属性情報として施工日や転圧管理データ等を保持している。

土砂トレーサビリティ管理システムは、ダンプトラックのセンシングを行うダンプアップ検知センサ、土砂運搬のダンプの記録を保管および情報共有するセンサデータプラットフォーム、センサデータプラットフォームに保管されているダンプアップのセンサデータと締固め管理システムより出力される転圧施工履歴データの関連付けを実施する土砂トレーサビリティ管理アプリケーションによって構成されている。システムを構成する各項目については、以下に詳細を述べる。

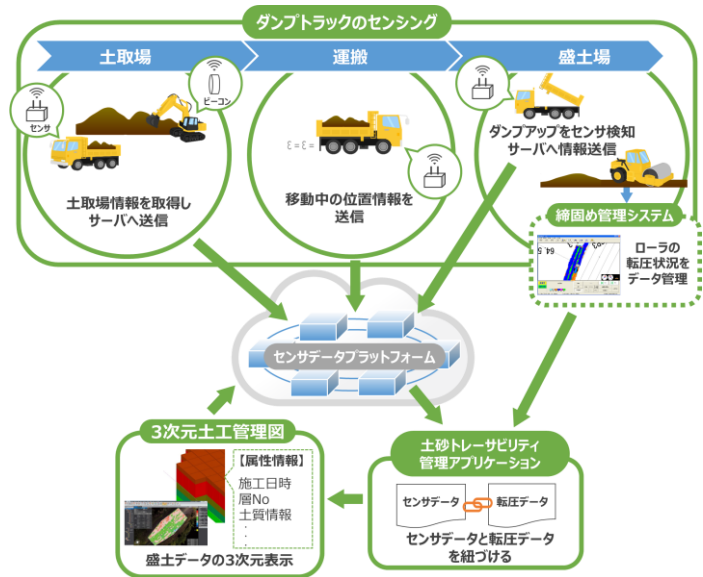
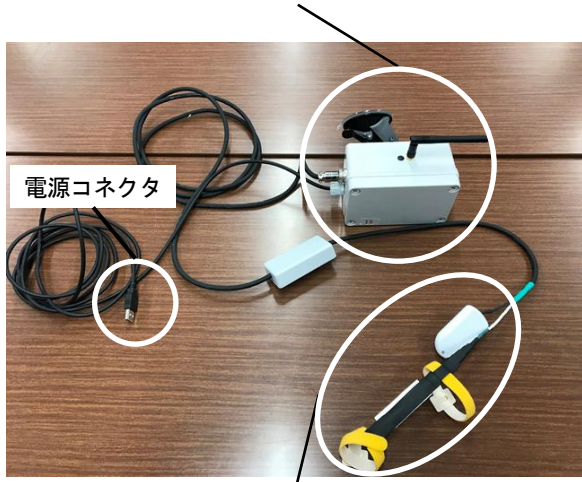


図-4 土砂トレーサビリティ管理システム全体図

### 3.2 ダンプアップ検知センサ

土砂運搬のダンプトラックに、触圧および加速度センサ、GNSS、ビーコン受信機、および LTE 通信機により構成されたダンプアップ検知センサ（写真－1）を設置した。ダンプトラックのダンプアップレバーに、触圧センサと加速度センサを取付け（写真－2）、運転手が荷台の土砂を下ろす際のダンプアップレバーの操作を検知

センサ本体  
（GNSS 受信機、LTE 通信機、ビーコン受信機）

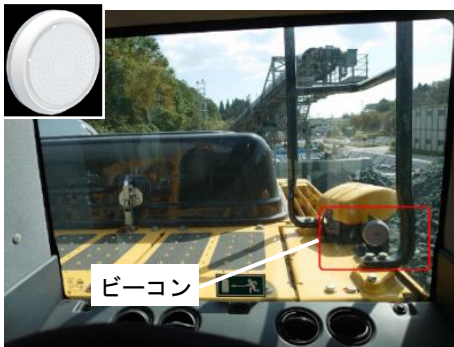


ダンプアップ検知部（触圧センサ、加速度センサ）

写真－1 ダンプアップ検知センサ



写真－2 取付状況



写真－3 ビーコン取付状況

する。ダンプアップ時にボタンを押下しダンプアップを記録する方式の場合、スイッチの押し忘れにより、記録漏れが発生する。そこで今回は、ダンプアップの際に必ず発生するレバーの操作を触圧センサおよび加速度センサにより検出する方式を採用する。

土取場の識別にはビーコンを土砂の積込みバックホウに設置する（写真－3）ことで対応する。土取場の判別を位置情報のみで行うと、土取場とする箇所の座標の範囲を別途設定する必要があるため、ビーコンを使用し、土取場所の判別を行っている。センサを搭載したダンプトラックがビーコンを設置した積込みバックホウに接近するとビーコンの電波を受信し、受信したビーコンの識別信号とその時の時刻・位置情報を LTE 通信によりサーバに送信する（以下、積込みデータ）。積込みデータに含まれるビーコンの識別子より、どの土取場において積み込んだかの判定を実施する。運搬時も GNSS により位置情報を取得し、30 秒に 1 回サーバにデータを送信する。通信が行えない場所を走行する場合は、データを内部のメモリに記憶し、通信が回復したタイミングでサーバに送信し、データの損失を防いでいる。盛土場においては、ダンプアップの操作を検知した際に、ダンプアップ有の識別子・荷下ろし位置情報・時刻（以下、荷下ろしデータ）をサーバに送信する。

### 3.3 センサデータプラットフォーム

センサデータプラットフォームでは、ダンプアップ検知センサよりサーバに送信された積込みデータおよび荷下ろしデータの可視化を行う。センサデータプラットフォーム上においては、指定した任意の日付または期間における土砂運搬のダンプトラックの走行経路、積込み位置および荷下ろし位置の地図上へのプロットデータを確認できる。図－5 に、センサデータプラットフォームに運行経路をプロットした画面を示す。センサデータプラットフォームはクラウド上で稼働しているため、スマートデバイスを使用することで、どこからでもデータを確認することができる。

### 3.4 土砂トレーサビリティ管理アプリケーション

土砂トレーサビリティ管理アプリケーション（以下、「管理アプリケーション」）では、まずマスターデータ（以下、「土取場データ」）を設定する。土取場データとは、盛土工に伴って実施する盛土の土質試験等の情報を基に、土取場において、どの時期にどのような土質の土の積込みを行っていたかを登録したデータである。土取場データの例を表－1 に示す。土取場データには、土取場の積込みバックホウに設置したビーコンの ID（terminal\_tag）に対して、start\_date 欄および end\_data 欄に指定された期間において、対応する soil\_type 欄に入力された土質を反映する。管理アプリケーション上で指定した日時の積込みデータと荷下ろしデータをクラウドからダウンロードし、土取場データおよび転圧管理

データと結合することで、荷下ろし位置における積み込み時の土質情報（以下、荷下ろし情報）を判別する。土質情報を結合した転圧管理データは3次元のデータとして出力される。出力されたデータを3次元CADソフトウェアに取込むことで、土質ごとに色分けされた3次元土工管理図を確認できる。今回、3次元土工管理図を構築するボクセルモデルは、ダンブ一台当たりの運搬土量および転圧の層厚から、5m×5m×0.3mのサイズとした。

盛土施工の場合、荷下ろし位置から周辺に敷均して施工する場合があります。土砂は荷下ろし位置から周辺に分散して盛土されることが起こり得る。そのため、荷下ろし情報については、荷下ろし位置から隣接ボクセルの重心までの距離に応じて距離の逆数による重みづけを行い、隣接ボクセルに重みを付けた土質情報を振り分ける（図-6）。重みづけの振り分け計算後、ボクセル内で土質ごとの投入割合を計算し、最大となる土質をそのボクセルの代表土質として属性情報を持たせる（図-7）。一方、荷下ろし位置から敷均しにより盛土を行う場合に、ボクセル内に荷下ろし情報がない場合も考えられる。締固め管理システムに、転圧施工管理データが存在しかつ荷下ろし情報がないボクセルが存在する場合は、隣接ボクセルの土質情報を参照し、ボクセルの着色を行う。

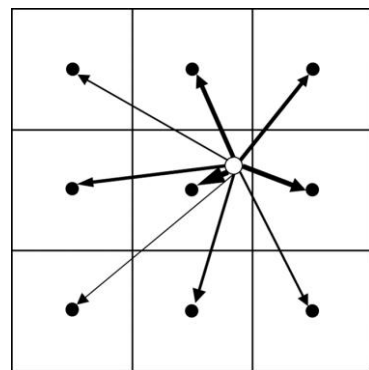
ボクセルの色情報については、各ボクセルの代表土質に対応した色となるが、ボクセルに割り当てられた土質の割合を属性情報として格納しているため、3次元土工管理図のボクセルを選択することで、土質の割合を確認できる（図-8）。

#### 4. 現場検証

土砂トレーサビリティ管理システムについて、施工現場（写真-4）での検証を実施した。検証した現場は約14haの造成現場であり、その中の200m×300mの範囲の施工に対して締固め管理システム（写真-5）を設置したローラーを使用し、検証を行った。まず、転圧施工履歴データとダンブトラック10台に設置したダンブ

表-1 土取場データ例

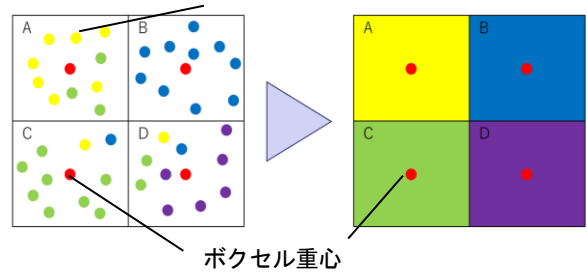
terminal_tag	start_date	end_date	soil_type
BLE1	20220101	20220131	砂
BLE1	20220201	20220330	粘土
BLE2	20220101	20220330	砂



○：荷下ろし位置 ●：ボクセル重心

図-6 荷下ろし情報の重み付けイメージ

振り分けられた土質情報



ボクセル重心

図-7 土質情報割り当てイメージ

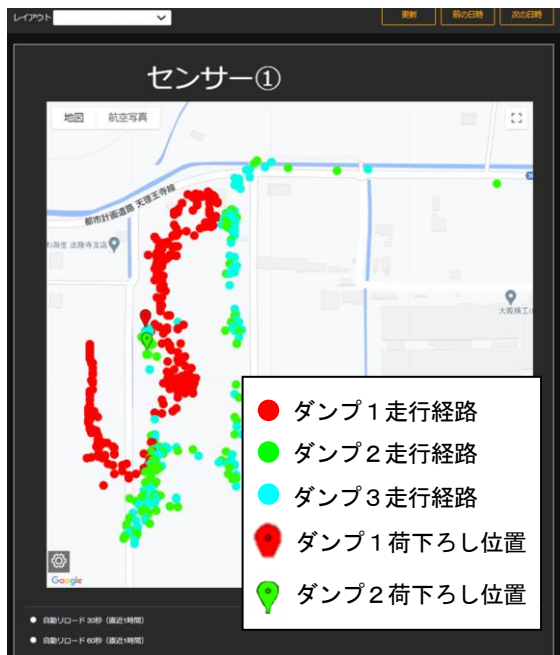


図-5 センサデータプラットフォーム

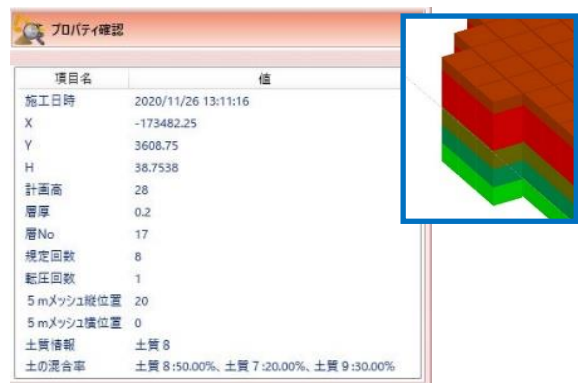


図-8 属性情報の確認



写真-4 施工現場全景



写真-5 締固め管理システム

アップ検知センサのデータを結合し、3次元土工管理図の作成を実施した。今回の施工では、場内で改良した土砂の場内運搬と、場外から搬入しそのまま盛土する2つのパターンがあり、場内と場外の各1箇所土取場を設定した。土取場の判別を行うため、改良土の積込みに使用するバックホウにビーコンを設置し、場内運搬の判別を行った。場外から搬入する土砂については、1箇所の土取場からの搬入であったため、搬入車両が入場する現場ゲートにビーコンの設置を行った。

設置したセンサにより荷下ろし位置を特定し、管理アプリケーションを使用して荷下ろし情報の3次元データを自動的に作成した。作成した3次元データを3次元CADソフトウェアに取り込み、土質情報ごとに着色されたボクセルモデルの形式でデータを出力し、土質情報の可視化ができていたことを確認した(図-9)。さらに、可視化した3次元モデル上において属性情報として荷下ろし情報を確認することができた。

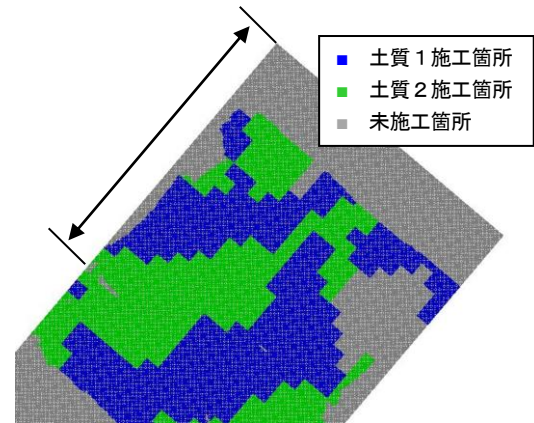


図-9 3次元土工管理図

課題としては、ダンプアップ検知センサの検出精度がまだ十分ではなく、検出漏れがある点も挙げられる。そのため、今後は開発したシステムを現場展開し、検知精度の向上を進め、より精度の高い盛土のトレーサビリティを確保できるように改良を進めていきたい。

## 5. まとめ

ICT 土工において取得されるデータの利活用により施工管理の効率化を図るため、土砂トレーサビリティ管理システムの開発を行った。開発した土砂トレーサビリティシステムを現場に適用し、検証を実施した。主な結論を以下に示す。

- i. 土砂トレーサビリティ管理アプリケーションを使用し、ダンプアップのデータと転圧施工履歴データと結合した3次元土工管理図により盛土の土質情報を確認できた。
- ii. システムにより土工管理図の作成に必要な土質情報および盛土位置の情報を自動的に記録した。これにより従来、盛土材のトレーサビリティ確認用の土工管理図の作成のために、施工箇所に常駐し、帳票に記録する記録員の配置が不要となる。そのため、盛土工において、記録員分の1人/日程度の人員削減の効果が期待できる。
- iii. データ整理や入力等の手間を増やすことなく、将来の施工履歴の確認等に利用することが可能なトレーサビリティデータの作成が確認できた。

## 【参考文献】

- 1) 国土交通省、「ICT 施工の普及拡大に向けた取組」、第13回 ICT 導入協議会資料、2021
- 2) 佐藤靖彦、吉野 修、本木章平、宮田岩往、「データ利活用型 ICT 土工管理システムの開発(その1) -システム概要とデータ共有プラットフォーム-」、土木学会第76回年次学術講演会、VI-195、2021
- 3) 本木章平、坂崎信夫、羽田正沖、田中 勉、宮田岩往、「データ利活用型 ICT 土工管理システムの開発(その2) -転圧施工履歴データによる土量算出手法-」、土木学会第76回年次学術講演会、VI-196、2021
- 4) 高尾篤志、宮田岩往、藤本情志、本木章平、田口毅、「データ利活用型 ICT 土工管理システムの開発(その3) -土砂トレーサビリティ管理システム-」、土木学会第76回年次学術講演会、VI-197、2021
- 5) 国土交通省、「TS・GNSSを用いた盛土の締固め管理要領」、2020

# 災害廃棄物の選別処理に関する基礎的研究

## －土砂混合廃棄物のふるい選別機による選別の特性－

### Basic Research on the Separation and Treatment of Disaster Waste

#### - Segregation Characteristics of Soil Mixed Wastes due to Sieving Machine Mechanism -

清水祐也\* 羽瀨博臣\* 今井亮介\* 塩入潤一郎\*\*

#### 要 旨

近い将来、東南海地震等の大規模な地震と津波による災害が発生する可能性があるとして報告されている。この災害では膨大な災害廃棄物が発生すると予想されており、これらの再資源化率の向上が課題となっている。様々な廃棄物と土砂が渾然一体となった土砂混合廃棄物の発生は不可避であり、資材としての再資源化を実現するためには、これらの効率的な選別が求められる。

本研究では、選別機械の特性が混合廃棄物の選別特性を決定しうる可能性に着目し、模擬的に作製した土砂を含む災害廃棄物を、実際の選別処理現場で使用されている振動ふるい機や 3 種類の回転ふるい機を用いて選別する実験を行い、選別特性について評価した。その結果、振動ふるい機と回転ふるい機の選別機構の違いや回転ふるい機のスクリーン部の構造の違いにより選別効率が異なること等が明らかとなった。

キーワード：災害廃棄物、土砂混合廃棄物、ふるい選別機、選別特性、再資源化

#### 1. はじめに

令和 2 年 7 月豪雨や令和元年の台風 15 号、19 号等、近年豪雨による災害が繰り返し発生している。また、日本は大規模地震の発生リスクが高い地域であり、1995 年 1 月の阪神・淡路大震災や 2011 年 3 月の東日本大震災といった地震災害も繰り返し発生している。これらの災害に伴い、多量の災害廃棄物が生じる。それらの処理について災害発生度に重要性が認識されてきている。

被災現場において解体・除去により発生した災害廃棄物は、まず各自治体が設置する一次仮置場へと運搬される。一次仮置場では、重機や手作業での粗選別が行われ、選別されたものが一時的に保管される。さらに、必要に応じて二次仮置場へと運搬され、破碎機や選別機械を用いた高度な選別処理が行われた後、最終処分場または再資源化処理施設へと運搬される(図-1)。

一般的に災害廃棄物の最終処分には、平時に一般廃棄物を受け入れている処分場のうち、受入容量に余裕のある施設に搬入されるが、多量の災害廃棄物を受け入れるための埋め立て容量確保は困難であると予想される。そのため、効率的かつ高精度な選別を行うことで、再資源化率を向上させ、最終処分量を最小限とすることが必要となる<sup>1),2)</sup>。

本研究は、災害廃棄物の選別機械の特性と異物混入量等の選別処理されたもの(以下、選別物)の品質との関係(選別特性)を定量的に明らかにすることで、安定した選別物の品質を確保することを目的として進めている。

災害廃棄物のうち処理に最も時間と高度な技術が必要とする土砂分を含んだ災害廃棄物(以下、土砂混合廃棄物)がある。本研究では、この土砂混合廃棄物を模擬的に作製(以下、模擬災害廃棄物)し、処理システムの主要な構成要素である「ふるい選別」の選別処理試験を行った。なお、試験においては、実際の選別処理現場で使用されている「振動ふるい機」および「回転ふるい機」と同様の選別機械を用いた。

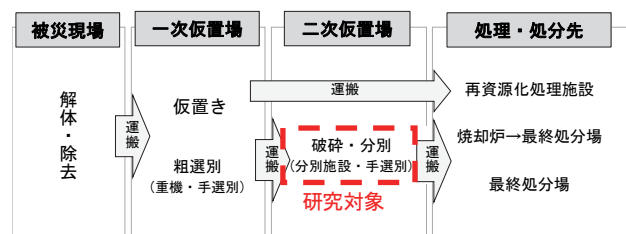


図-1 災害廃棄物の処理フロー

\* 土木本部土木部環境技術室 \*\* 西日本支社関西土木第 2 部

2. 試験に使用する材料および機器

2.1 模擬災害廃棄物

模擬災害廃棄物は、津波災害で発生する災害廃棄物を一次仮置場で粗選別して得られる可燃系廃棄物を含む混合物を想定して作製した。

土砂分には、真砂土と岡山県で採取されている笠岡粘土を混合したものを使用し、これに再資源化処理施設で破碎された長径が 100mm 以下の細長い木片を混合し、実験用試料とした。

高井ら<sup>3)</sup>によると、東日本大震災で岩手県の災害廃棄物処理二次仮置場が設置された 7 地区のうち、陸前高田を除く 6 地区では分別土砂の細粒分含有率はおおよそ 10%~40%の間に分布していることから、模擬災害廃棄物の細粒分含有率は、10%と 40%の 2 通りとした。なお、使用した真砂土には 6%の細粒分が含まれているため、混合する粘土材料は、上記 6%を引いた数量とした。木片の混合割合は、東日本大震災の選別処理によって確認された可燃系廃棄物を含む混合物中の可燃物の割合を参考に、重量比を土砂：可燃物 = 9：1 とした。また、廃棄物の含水比を 10%と 20%に調整し、廃棄物の性状の違いによる選別への影響について確認した。真砂土と笠岡粘土、木片の写真を写真-1 に示す。

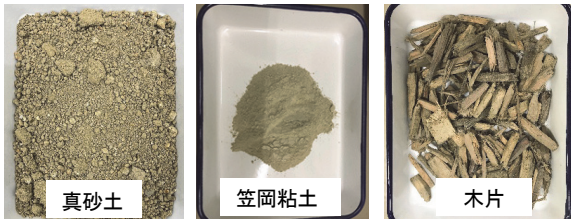


写真-1 使用材料

2.2 ふるい選別機

3 種類の回転ふるい機と 1 種類の振動ふるい機を用いて試験を行った。各選別機について以下に示す。

a. TEREX 製 TTS620T (回転ふるい機 A : 写真-2)

スクリーンは目開き 20 mm のパンチングメタルで、直径 2.0m、長さ 5.5m である。また、スクリーン軸が水平に設置されており、らせん状に取り付けられたプレートによって廃棄物が排出口に向けて送られる構造となっているため、装置の通過時間が一定に保たれる特徴がある。また、ふるいの回転速度を調整することで、投入から排出までの廃棄物の通過時間調整が可能である。

b. FORCEBEL 製 (回転ふるい機 B : 写真-3)

スクリーンは目開き 20mm のパンチングメタルで、直径 1.5m、長さ 6.5m である。また、スクリーンの軸方向にプレートが装着されており、廃棄物が掻き揚げられる高さが高くなることで、落下した時に廃棄物がほぐれやすいという特徴がある。回転速度は一定で、ふるいの傾斜と回転で廃棄物が排出口に向けて送られる構造となっている。

c. TrommALL 社 5800Tr

(回転ふるい機 C : 写真-4)

スクリーンの交換が可能であり、今回の試験では目開き 20mm のスクリーンを使用した。また、ふるい目の構造が、他 2 つの機械とは異なり、鋼織網となっている。スクリーンの直径は、回転ふるい機 B と同じ 1.5 m で、長さは最も短い 3.7 m である。また、回転ふるい機 B 同様にスクリーンの軸方向にプレートが装着されており、回転速度の変更が可能である。



写真-2 TEREX 製 TTS620T (回転ふるい機 A)

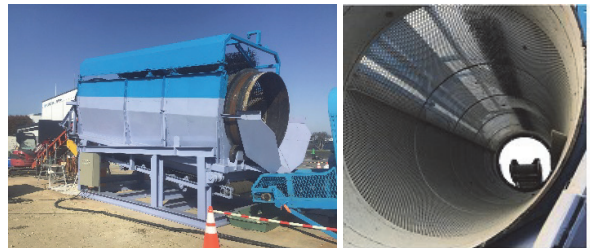


写真-3 FORCEBEL 製 (回転ふるい機 B)



写真-4 TrommALL 社 5800Tr (回転ふるい機 C)



写真-5 コマツ製 BM545S (振動ふるい機)

表-1 回転ふるい機の比較

分類	メーカー	スクリーン				特徴
		長さ	直径	目開き	種類	
A	TEREX	5.5 m	2.0 m	20 mm	パンチングメタル	らせん状にプレート 回転速度可変
B	FORCEBEL	6.5 m	1.5 m	20 mm	パンチングメタル	軸方向にプレート
C	TrommALL	3.7 m	1.5 m	20 mm	鋼織網	軸方向にプレート スクリーン交換可 回転速度可変

d. コマツ製 BM545S (振動ふるい機：写真-5)

スクリーンは、上段の振動グリズリホップと下段の織網スクリーンの2段で構成されている。上段のスクリーンの間隔は 80~120mm であり、下段のスクリーンは交換が可能で、今回はふるい目 20mm のスクリーンを使用した。また、スクリーンの傾斜を 3~30 度で変更することが可能である。



写真-6 模擬災害廃棄物作製状況

3. 試験方法

以下の手順で模擬災害廃棄物を作製し、選別処理試験を実施した。各試験ケースの条件について、表-2に示す。なお、回転ふるい機 A および C の一部のケースでは、スクリーン回転速度を3段階（高速、中速、低速）に、振動ふるい機の一部のケースでは、スクリーン角度を 5 度、10 度、15 度の3段階に設定して試験を行った。



写真-7 模擬災害廃棄物投入状況

- ① 各種材料を試験ケース毎に湿潤重量を測定し、大型土のうに入れ、シートで覆った状態で保管
- ② 各種材料の含水比を混合直前に JGS 0122-2020 に準拠して測定し、含水比調整に必要な添加水量を算出
- ③ 材料を鋼製のベッセルに投入し、散水しながらバックホウを用いて混合 (写真-6)
- ④ バックホウを用いて可能な限り一定となるようにベルトコンベアを通してふるい機へ投入 (写真-7)
- ⑤ 組成評価のために、ふるい目の通過物と残留物をそれぞれ 2.0 kg 程度採取
- ⑥ ふるい通過物と残留物の全重量を測定
- ⑦ ⑤の試料を 110±5℃で 24 時間以上の炉乾燥を行い、乾燥重量を測定
- ⑧ ⑦の試料と水を容器に投入
- ⑨ 水面に浮いた木片の付着物を手作業で除去
- ⑩ 水面に浮いた木片を回収し、110±5℃で 24 時間以上の炉乾燥を行い、乾燥重量を測定
- ⑪ ⑦の乾燥重量から⑩の木片乾燥重量を減じて、ふるい通過物と残留物中の土砂の乾燥重量を算出
- ⑫ ⑥のふるい通過物と残留物の重量比と、⑩・⑪のふるい通過物と残留物それぞれの木片と土砂の乾燥重量比から、通過物中の木片と土砂および残留物中の木片と土砂の割合を算出

表-2 各試験ケースの条件

ケース番号	材料混合割合(乾燥重量比)			細粒分含有率(%)	含水比(%)	機種	ふるい目(mm)	スクリーン回転速度・角度変化			
	真砂土	粘土	木片								
1	8.6	0.4	1.0	10	10	回転A	20	なし			
2					20				あり		
3				40	10			回転B		20	なし
4					20						
5	8.6	0.4		10	10	回転C	20		なし		
6				20							
7	5.7	3.3		40	10			回転C		20	あり
8				20							
9	8.6	0.4		10	10	振動	20		なし		
10				20							
11	5.7	3.3		40	10			振動		20	あり
12				20							
13	8.6	0.4	10	10	振動	20	なし				
14			20								
15	5.7	3.3	40	10				振動	20	あり	
16			20								

4. 試験結果

4.1 回転ふるい機と振動ふるい機の選別特性の比較

回転ふるい機 C (ケース 9~12) と振動ふるい機 (ケース 13~16) による選別試験の結果を、ふるい機の通過物や残留物中の土砂や木片の割合に着目して比較した。試験結果を図-3に示す。なお、回転ふるい機 C のケース 11 と 12 は、中速の回転速度の結果を示し、振動ふるい機のケースでは、スクリーン角度は 5 度の結果を示す。

a. 細粒分含有率と含水比がともに低い場合

細粒分含有率が 10%、含水比が 10%ととも低いケース 9 と 13 を比較する。

回転ふるい機 (ケース 9) では、ふるい機に投入した木片のうち、87% (=全体に対する通過木片割合 8.7% ÷ 模擬災害廃棄物全体の木片割合 10% × 100) が通過しており、通過物中の木片割合は、分別土の再利用という視点からは選別効果は得られなかった。一方で、ふるい

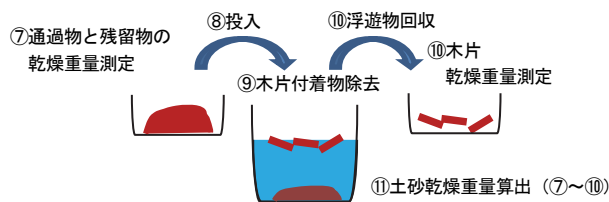


図-2 手順⑦~⑪作業のイメージ

機に投入した土砂のうち、約 0.1% (=全体に対する残留土砂割合 0.1%÷模擬災害廃棄物全体の土砂割合 90%×100) がふるい上に残留した結果であり、木片の再利用という視点では、効果が得られたと考える。ただし、全体の最終処分量を削減することを目的と考えた場合、割合の多い土砂分の選別泥土に重点を置く必要があるため、破砕で細長くなった木片等を含む災害廃棄物に対しては、回転ふるい機での選別は不向きであると考えられる。

振動ふるい機(ケース 13)では、ふるい機に投入した土砂のうち、約 9.2%がふるい上に残留した。一方で、ふるい機に投入した木片のうち、49%が通過しており、回転ふるい機に比べて通過した木片は少なく、土砂分の選別精度は、回転ふるい機よりも高い結果が得られた。これは、回転ふるい機に比べ、振動ふるい機の方が、木片がスクリーンに対して垂直となる機会が少ないためと考えられる。

b. 細粒分含有率が低く、含水比が高い場合

細粒分含有率が 10%と低く、含水比が 20%と高いケース 10、14 を比較する。

回転ふるい機では、細粒分含有率と含水比がともに低いケース 9 と同様に、ふるい機に投入した木片のうち、78%が通過する結果であった。一方で、振動ふるい機では、ふるい通過物が減少し、ふるい機に投入した模擬災害廃棄物の 76.8%がふるい上に残留する結果となった。これは模擬災害廃棄物が塊状化し、振動ふるい機ではふるい目を通過できる大きさまでほぐすことができなかったためと考えられる。

c. 細粒分含有率が高く、含水比が低い場合

細粒分含有率が 40%と高く、含水比が 10%と低いケース 11、15 を比較する。

回転ふるい機では、細粒分含有率と含水比が低いケース 9 と同様に、ふるい機に投入した木片のうち、77%が通過する結果であった。

振動ふるい機においても、細粒分含有率と含水比がともに低いケース 13 と同様に、ふるい上に残留する土砂分は回転ふるい機に比べて多くなるが、ふるい機に投入した木片のうち、38%が残留しており、回転ふるい機よりも 39 ポイント少ない結果であった。これは、細粒分含有率と含水比がともに低いケースと同様の原因によるものと考えられる。

4.2 回転ふるい機のスクリーン構造の影響

回転ふるい機 A を用いて回転速度を高速とした時の試験ケース 2~4 と、回転ふるい機 B を用いた試験ケース 6~8、回転ふるい機 C を用いて回転速度を高速とした時の試験ケース 10~12 の通過物と残留物の割合に着目し、結果を比較する。試験結果を図-4 に示す。

a. 細粒分含有率と含水比のどちらかが高い場合

細粒分含有率が 10%と低く、含水比が 20%と高い

ケース 2、6、10 の試験結果、および細粒分含有率が 40%と高く、含水比が 10%と低いケース 3、7、11 の試験結果を比較する。

いずれの試験ケースにおいても、ふるい残留物の割合が模擬災害廃棄物の木片混合割合である 10%よりも小さいことから、木片がスクリーンを通過したことが分かる。回転ふるい機 A を使用したケース 2、3 に比べ、回転ふるい機 B、C を使用したケース 6、7、10、11 の方が、通過物割合が多い。これは、回転ふるい機 B、C のスクリーンの軸方向に取り付けられたプレートが模擬災害廃棄物を掻き揚げて落下させる動作によって、細長い木片がスクリーンに対して垂直となる機会が、回転ふるい機 A に比べて多くなるためと考えられる。

b. 細粒分含有率と含水比がともに高い場合

細粒分含有率が 40%で含水比が 20%とともに高いケース 4、8、12 では、回転ふるい機 B で最も通過物が多く、次いで回転ふるい機 A、回転ふるい機 C の順に通過物量が減少している。回転ふるい機 A と B では、スクリーンに取り付けられたプレートの構造が異なり、回転ふるい機 B は塊状化した模擬災害廃棄物を掻き揚げて落下させるので、塊がほぐれやすかったためと考えられる。一方で、回転ふるい機 B と同様に軸方向にプレートが取り付けられている回転ふるい機 C で通過物量が少なくなった原因については、スクリーンの網目の違いによる可能性が考えられる。回転ふるい機 A と B のスクリーンはパンチングメタルである。これに対し、回転ふるい機 C は鋼織網であり、スクリーンに凹凸と

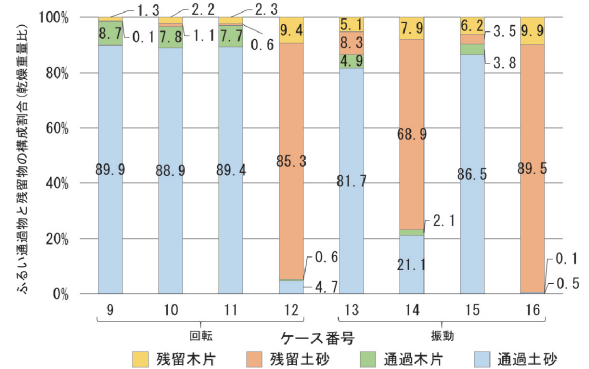


図-3 回転ふるい機と振動ふるい機の特長比較

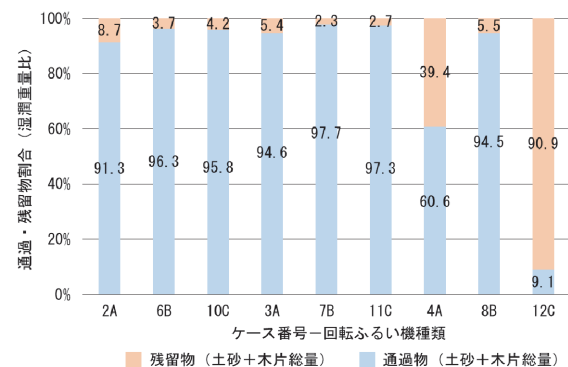


図-4 回転ふるい機のスクリーン構造の影響



針金が重なる点が存在する。そのため、木片や土砂成分がスクリーンに付着し、目詰まりを引き起こしたのではないかと推定される。

c. ふるい通過物中の木片サイズの違い

回転ふるい機 A のケース 2~4 と、回転ふるい機 B のケース 6~8、回転ふるい機 C の 10、12 のふるい通過物中の木片の大きさを比較する。測定結果を図-5に示す。

スクリーンにらせん状のプレートが取り付けられた回転ふるい機 A に比べ、軸方向にプレートの付いている回転ふるい機 B や C の方が、長径の長い木片の割合が多い結果であった。これは、模擬災害廃棄物が軸方向に取り付けられたプレートにより掻き上げられ落下するときに、スクリーンに対して垂直となる機会が多いためと考えられる。また、回転ふるい機 B と C を比較すると、回転ふるい機 C の方が長径の長い木片が多い結果であった。これは、凹凸のないパンチングメタルの回転ふるい機 B に比べ、凹凸のある鋼織網の方が、スクリーンの軸方向に対して木片が傾きやすいことが原因と考えられる。

4.3 回転ふるいの回転速度の影響

回転速度を変更できる回転ふるい機 A のケース 3、4 と回転ふるい機 C のケース 11、12 について、通過物と残留物の割合および通過物中の木片の大きさに着目し、結果を比較する。試験結果を図-6に示す。

a. 細粒分含有率が高く、含水比が低い場合

細粒分含有率が 40% と高く、含水比が 10% と低いケース 3、11 のスクリーン回転速度を変えた試験の結果を比較する。

上記の2ケースでは、回転速度が異なる場合であっても、通過・残留物の割合の差は 1% 程度であり、有意な差は確認できなかった。これは、模擬災害廃棄物が団粒化することなく、通過しやすい性状であったため、回転速度の変化による影響を受けなかったと考えられる。

b. 細粒分含有率と含水比がともに高い場合

細粒分含有率が 40% で含水比が 20% とともに高いケース 4、12 の回転速度を変えた試験の結果を比較する。

ケース 4 では、回転速度が中速の時に最も通過量が多い結果となっている。回転速度の増加により塊状の模擬災害廃棄物がほぐれやすくなることで、低速よりも中速の方が通過物量の割合が増加したと考えられる。しかし、さらに高速になると、塊状の模擬災害廃棄物がほぐれやすくなる効果よりも、ふるい機の通過時間が短くなる影響が大きくなり、中速よりも高速の方が通過物量の割合が減少した可能性があるかと推定される。

一方で、ケース 12 では、回転速度の増加に伴い、通過物割合がわずかに増加した。これは、鋼織網で軸方向にプレートが取り付けられたスクリーンの場合、回転速度の増加による塊状となった模擬災害廃棄物をほぐす効果の影響が、ふるい機の通過時間短縮による影響よりも

大きい等々の理由が考えられる。

上述の回転ふるい機のスクリーン回転速度と選別特性との関係については不明な点が多いため、引き続き検証が必要と考える。

4.4 振動ふるい機のスクリーン角度の影響

振動ふるい機のスクリーン角度を変更したケース 15、16 について、通過物と残留物の割合に着目し、結果を比較する。試験結果を図-7に示す。

a. 細粒分含有率が高く、含水比が低い場合

細粒分含有率が 40% と高く、含水比が 10% と低いケース 15 では、スクリーン角度の大きい方が、わずかではあるが、ふるい残留物量が多い結果が得られた。これは、傾斜が緩やかな方がふるい上に留まる時間が長くなるためと考えられる。

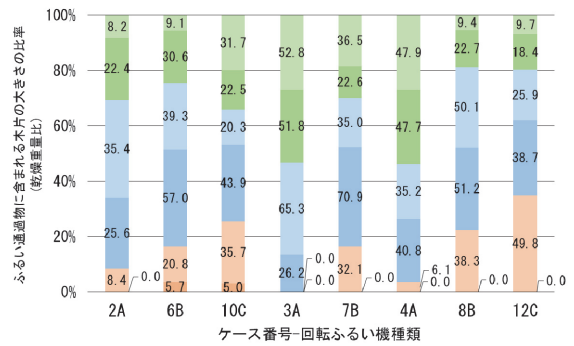


図-5 ふるい通過物中の木片の大きさの違い

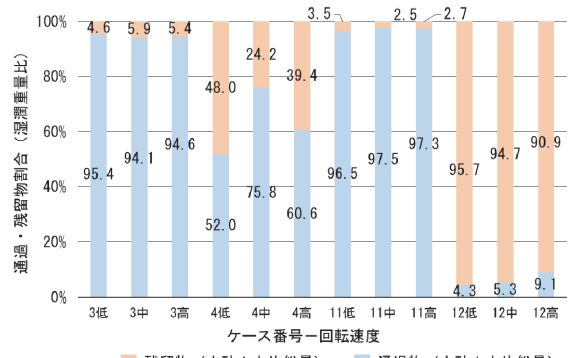


図-6 回転ふるい機のスクリーン回転速度の影響

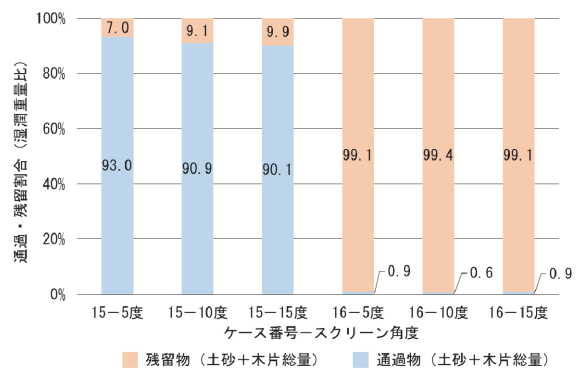


図-7 振動ふるい機のスクリーン角度による影響

#### b. 細粒分含有率と含水比がともに高い場合

細粒分含有率が 40%と含水比が 20%とともに高いケース 16 では、いずれのスクリーン角度でも、ほぼ全ての試料がふるい上に残留し、スクリーン角度による影響を確認することができなかった。

### 5. 考察

#### 5.1 振動ふるい機と回転ふるい機の比較

振動ふるい機よりも回転ふるい機の方が、塊状となった土砂混合廃棄物をほぐしやすいため、細粒分含有率が低ければ、含水比が高い土砂混合廃棄物の選別に有効であると言える。ただし、今回の試験で使用したような破砕機で処理した細長い木片のようなものを混入する場合は、通過中に土砂以外の成分が混入する割合が多くなることから、必要に応じて風力選別等を組み合わせることが有力と考える。

細粒分含有率と含水比がともに低い場合であれば、振動ふるいでも十分に選別可能であり、そのような場合は、比較的安価で数多く流通している振動ふるい機を用いることが可能と考えられる。

細粒分含有率と含水比がともに高い場合では、土砂混合廃棄物が塊状となり、いずれのふるい選別機であっても選別が困難である。そのため、塊状となる土砂混合廃棄物が処理対象となる場合には、選別処理前の改質処理等が必要と推定される。

#### 5.2 回転ふるい機のスクリーン構造の影響

細粒分含有率や含水比が低く、塊状化しにくい災害廃棄物に対しては、スクリーンの構造による大きな影響はなかった。

細粒分含有率と含水比がともに高く、塊状化しやすい災害廃棄物を対象とした場合、ふるい目がパンチングメタルで軸方向にプレートが取り付けられた回転ふるい機が最も通過物量が多い結果が得られた。ただし、らせん状のプレートが取り付けられたものと比べ、大きな木片が通過していることから、細長い木片等を含む災害廃棄物を選別する際には注意が必要である。

また、パンチングメタルに比べて鋼織網のスクリーンは、ふるい目が目詰まりしやすいと考えられる。ただし、鋼織網のスクリーンは網目の交換が現場で容易に行える。そのため、災害廃棄物の性状が変化する現場では、改質処理等の前処理と組み合わせることで、幅広い廃棄物に対して有効である。

#### 5.3 回転ふるい機の回転速度の影響

細粒分含有率や含水比がともに低い災害廃棄物の場合、回転ふるい機の回転速度による選別特性への影響は少ない。一方で、細粒分含有率と含水比がともに高く、塊状化しやすい災害廃棄物を対象とした場合は、回転速度の影響を受ける可能性があるため、選別処理現場では試験

施工を行い、スクリーン回転速度を設定することが望ましい。

#### 5.4 振動ふるい機のスクリーン角度の影響

振動ふるい機のスクリーン角度を変えて行った試験では、含水比の低いケースでは、スクリーン角度の大きい方が、わずかではあるがふるい残留物量が多い結果となった。災害廃棄物の性状によっては、大きな影響を受ける可能性があるため、災害廃棄物の選別処理現場では、試験的に選別を行い、スクリーン角度を設定することが望ましい。

### 6. おわりに

本研究では、土砂混合廃棄物を選別する際に一般的に使用されている「ふるい選別機」を対象に、機械の種類や回転ふるい機のスクリーンの回転速度、振動ふるい機のスクリーンの角度の違いが選別特性に与える影響について評価した。その結果、選別対象となる災害廃棄物の性状と効果的に使用するふるい選別機の種類や設定に関する知見を得ることができた。今後は、災害廃棄物の性状と選別特性との関係や改質処理などの効果を効率よく確認できるような室内試験の方法を考案し、より多くのデータ収集が行えるようにする予定である。

#### 【謝辞】

本研究は、名古屋大学の中野正樹教授を代表とする環境研究総合推進費 JPMEEF20201004 の助成を受けた研究課題と連携して進めている。また、実験の実施に際し、京都大学の勝見武教授や高井敦史准教授、石田啓彦氏、平岡寛星氏にはご尽力いただいた。記して謝意を表する。

#### 【参考文献】

- 1) 西川貴則、日比野直彦、森地 茂、「災害廃棄物等の処理に関する課題とその対応」、土木学会論文集 D3 (土木計画学)、Vol. 72、No.5、I\_103-I\_110、2016
- 2) 平山修久、河田恵沼、「広域災害時における災害廃棄物処理の広域連携方策に関する研究」、土木学会論文集 G、Vol.63、No.2、pp.112-119、2007
- 3) 高井敦史、川島光博、勝見 武、乾 徹、岩下信一、大河原正文、「東日本大震災で発生した岩手県の災害廃棄物分別土砂の品質とその変化」、土木学会論文集 C (地圏工学)、Vol.72、No.3、pp.252-264、2016

# 免震建物に適用する過大变位抑制用 性能可変オイルダンパーの開発

—500kN 級ダンパーの性能確認—

## Passive Variable Orifice Damper to Control Excessive Displacement of Seismically Isolated Buildings

- Performance of Damper with 500 kN Class Maximum Damping Force -

小山慶樹\* 山上 聡\* 舟木秀尊\*

### 要 旨

長周期地震時に、建物の一次固有周期が長い超高層建物や免震建物では過大な変位が生じる可能性があり、特に免震建物では上部構造の擁壁衝突が懸念されている。しかし、擁壁衝突を回避するために、免震層の水平剛性や減衰性能を増加させると、中・大地震時に上部構造の応答加速度が大きくなり、免震性能が損なわれてしまう。そこで、免震性能を損ねないように、減衰力を変化させることで免震層の変位をパッシブに制御する性能可変オイルダンパーを開発した。最大減衰力が 500kN 級のダンパーを試作して、その減衰性能を実験により確認した。また、性能可変オイルダンパーを免震建物に適用した場合の耐震性能を検討し、中・大地震時には免震性能が損なわれることなく、長周期地震時の変位抑制効果があることを確認した。

キーワード：免震構造、オイルダンパー、性能可変、変位制御、パッシブ制御、長周期地震動

### 1. まえがき

1995 年の兵庫県南部地震以降、地震観測網が充実し、様々な場所で多くの地震が観測されるようになった。2003 年 9 月の十勝沖地震では、震源から約 250 キロ離れた苫小牧で発生したスロッシングによる石油タンク火災<sup>1)</sup>を契機に長周期地震動が注目された。また、2011 年 3 月の東北地方太平洋沖地震では、複数の震源領域における連動型地震となり、国内観測史上最大のマグニチュードを記録し、首都圏や大阪湾岸の超高層建築物でも大きな揺れを観測した。これらを受け、2016 年 6 月に国土交通省から、「超高層建築物等における南海トラフ沿いの巨大地震による長周期地震動対策について」<sup>2)</sup>が通知され、それまでの設計基準を超えたエネルギーを有する地震動に対して構造物の安全性検討が必要になった。

巨大地震時において、既存の免震建物では図-1に示すような水平クリアランス以上の過大变位による上部構造の擁壁衝突が危惧され、近年、衝突時の建物挙動に関する研究が行われている<sup>例えは 3)</sup>。擁壁衝突を回避するためには、免震層に水平剛性や減衰性能を増加する対策があるが、上部構造が負担する地震力や応答加速度が

増加して、免震性能が低減される。そのため、中・大地震時には免震性能を維持しつつ、巨大地震時に免震層の過大变位を抑制する耐震性能が求められている。

これに対して、井上、五十子らは、免震層の変位に応じてパッシブにオイルダンパーの減衰力を変化させる性能可変オイルダンパー（以下、VOD）を用いた免震構造を提案し、戸建免震住宅を対象にその適用効果を示している<sup>例えは 4), 5)</sup>。本報では、ビル物の免震建物を対象とした、最大減衰力が 500kN 級の VOD を開発・製作して、減衰性能を確認する。さらに、VOD の適用効果を解析的検討から確認する。

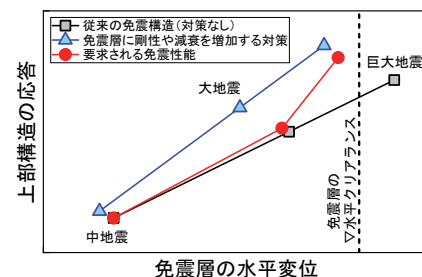


図-1 免震層の水平変位と上部構造の応答

\* 技術本部技術研究所建築研究グループ

## 2. VODの減衰性能

### 2.1 VODの作動原理

VODの外観を図-2に、機構模式図を図-3に示す。本ダンパーの特徴は、ユニフロー式のオイルダンパーの外部に、オイルが充填された小型シリンダが設置されている点である。ガイドロッドの端部とその両側の小型シリンダとの間隔を設定クリアランス  $L_s$  と称し、設計者が任意に定めることができる。 $L_s$  以上の変位がダンパーに生じると、ピストンロッドの変位に追従したガイドロッドが小型シリンダを作動させて、ばね座を押し込み、自動的に減衰力が増加する。地震終了後は、圧縮された調圧ばねにより小型シリンダが自動で徐々に戻され、性能変化前の減衰性能に戻る。

圧縮時と引張時における VOD の作動原理を図-4に示す。圧縮時には、チェック弁1は閉じており、A室内の作動油が直接C室に流出することはなく、チェック弁2を介してA室からB室へ流出する。これに伴い、B室内の作動油が押し出され、減衰バルブとオリフィスを介してC室へ流出する。引張時には、チェック弁2が閉じているので、作動油がB室からA室へ流出することはない。B室内の作動油は減衰バルブとオリフィスを介してC室へ流出し、作動油は圧縮時と同じ方向に流れる。

### 2.2 減衰力のモデル化

ある時刻  $t$  までの免震層の最大水平変位  $\delta_{\max}(t)$  が設定クリアランス  $L_s$  未満の場合、オイルダンパーの減衰力  $F_d(t)$  は次式から求める。

$$\left. \begin{aligned} &|V(t)| < V_r \text{ の場合} \\ &F_d(t) = C_1 \times V(t) \\ &|V(t)| \geq V_r \text{ の場合} \\ &F_d(t) = \text{sign}(V(t)) \times \{ F_r + C_2 \times (|V(t)| - V_r) \} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

ここで、 $V(t)$ : ある時刻のピストンロッドの速度

$F_d(t)$ : 減衰力

$F_{dd}$ : 切片減衰力

$F_{d\max}$ : 最大減衰力

$C_1$ : 性能変化前の一次減衰係数

$C_2$ : 性能変化前の二次減衰係数

$(= (F_{d\max} - F_{dd}) / 150)$

$F_r$ : 性能変化前のリリーフ減衰力

$(= C_1 \{ F_{dd} / (C_1 - C_2) \})$

$V_r$ : 性能変化前のリリーフ速度

$(= F_{dd} / (C_1 - C_2))$

免震層の最大水平変位  $\delta_{\max}(t)$  が設定クリアランス  $L_s$  以上の場合、オイルダンパーの減衰力  $F_d(t)$  は、小型シリンダの作動距離  $X_c$  に応じて無段階で、かつ、パッシブに変化する。性能変化後でかつ、第一折れ点の減衰力  $F_{r1}$  が最大リリーフ減衰力  $F_{r\max}$  未満の場合の減衰力  $F_d(t)$  は、次式から求める。

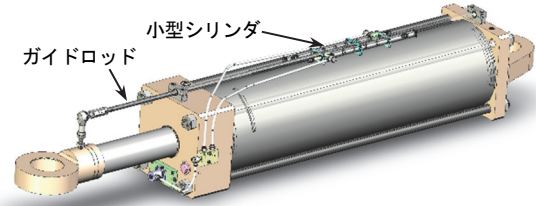


図-2 VODの外観

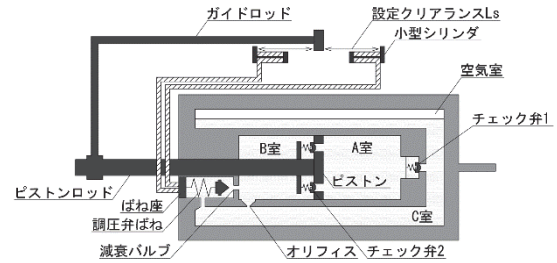
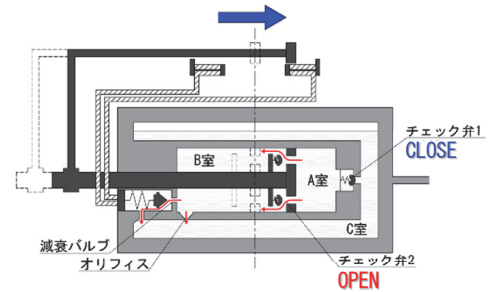
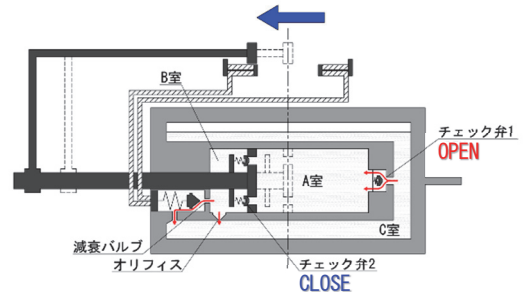


図-3 VODの機構模式図



(a) 圧縮時



(b) 引張時

図-4 VODの作動原理

$$\left. \begin{aligned} &|V(t)| < V_{r1} \text{ の場合} \\ &F_d(t) = {}_v C_1 \times V(t) \\ &V_{r1} \leq |V(t)| < V_{r2} \text{ の場合} \\ &F_d(t) = \text{sign}(V(t)) \times \{ F_{r1} + {}_v C_1 (|V(t)| - V_{r1}) \} \\ &|V(t)| \geq V_{r2} \text{ の場合} \\ &F_d(t) = \text{sign}(V(t)) \times \\ &\quad \{ F_{r1} + {}_v C_2 (V_{r2} - V_{r1}) + {}_v C_3 (|V(t)| - V_{r2}) \} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

ここで、 ${}_v C_1$ : 性能変化後の一次減衰係数

${}_v C_2$ : 性能変化後の二次減衰係数 ( $= C_1$ )

${}_v C_3$ : 性能変化後の三次減衰係数 ( $= C_2$ )

$F_{r1}$ : 第一折れ点荷重

$(= \alpha \times K_{sp} \times X_c \times \zeta, \text{ ただし、} F_{r\max} \text{ 未満})$

$F_{r2}$ : 第二折れ点荷重 ( $=F_{r1} + vC_2(V_{r2} - V_{r1})$ )  
 $F_{rmax}$ : 最大リリーフ荷重  
 $(= \min\left(\alpha \times K_{sp} \times X_{cmax} \times \zeta, \frac{vC_1 \times F_{dd}}{vC_1 - vC_3}\right))$   
 $V_{r1}$ : 第一折れ点速度 ( $=F_{r1} / vC_1$ )  
 $V_{r2}$ : 第二折れ点速度  
 $(= \{F_{dd} - (1 - vC_2 / vC_1)F_{r1}\} / (vC_2 - vC_3))$   
 $\alpha = A_c / A_{sp} \times A_p / A_r$   
 $A_c$ : 小型シリンダ断面積、 $A_{sp}$ : ばね座面積  
 $A_p$ : ピストン面積、 $A_r$ : 減衰バルブ面積  
 $K_{sp}$ : 調圧弁ばね剛性  
 $X_c$ : 小型シリンダの作動距離 ( $=\delta_{max}(t) - L_s$ )  
 $X_{cmax}$ : 小型シリンダの最大作動距離  
 $\zeta$ : 低減倍率

次に、免震層の最大水平変位  $\delta_{max}(t)$  が設定クリアランス  $L_s$  以上で、かつ第一折れ点のリリーフ減衰力  $F_{r1}$  が最大リリーフ減衰力  $F_{rmax}$  の場合の減衰力  $F_d(t)$  は、次式から求める。

$$\left. \begin{aligned}
 &|V(t)| < V_{r1} \text{ の場合} \\
 &F_d = vC_1 \times V(t) \\
 &|V(t)| \geq V_{r1} \text{ の場合} \\
 &F_d = \text{sign}(V(t)) \times \{F_{r1} + vC_3(|V(t)| - V_{r1})\}
 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

以上のことより、性能変化前の(1)式はバイリニア型、性能変化後の(2)式、(3)式は小型シリンダの作動距離  $X_c$  に応じて減衰力が増加し、トリリニア型からバイリニア型の減衰性能となる。なお、過度な減衰力を発揮しないようにリリーフ荷重を設け、最大減衰力は性能変化前と同じとしている。図-5に、VODの速度と減衰力の関係を示す。

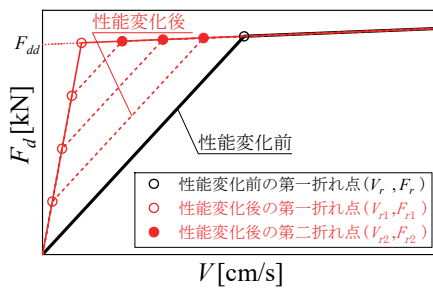


図-5 速度-減衰力関係

### 3. 試作機の性能確認

#### 3.1 実験概要

試作した 500kN 級の VOD の減衰性能を確認するため、加振機による正弦波加振実験を行った。実験状況を写真-1に、試験機概要を図-6に示す。ここで、加振機1台の最大速度が 50cm/s、最大ストロークが±300mm であることから、静圧継手を介して2台の加振機を直列に連結し、最大速度 100cm/s、最大ストローク±600mm まで行えるように計画した。加振波は、表-1に示した最大変位、最大速度をパラメータとし、定常3波に加え、前後に1波のテーパを設けた正弦波とした。加振波の一例を図-7に示す。VOD の設定クリアランス  $L_s$  は、次章で対象とした免震建物の巨大地震時免震層最大変位が水平クリアランス以下となるように予備検討し、15cm とした。計測項目は、ダンパーおよび小型シリンダの変位、減衰力とした。サンプリング周波数は 1024Hz とし、小型シリンダが作動してから減衰力が変化するまでの時間遅れを評価できるように配慮した。

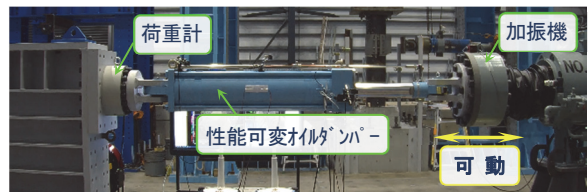
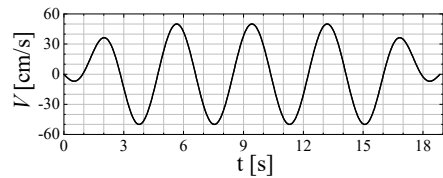


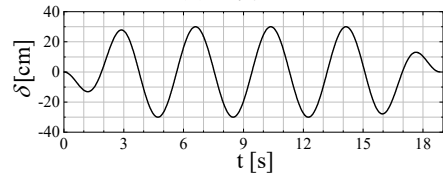
写真-1 実験状況

表-1 加振波のパラメータ一覧

最大変位 $\delta_{max}$ [cm]	10、20、25、30、35
最大速度 $V_{max}$ [cm/s]	1、3、5、10、20、30、50、75



(a) 速度波形



(b) 変位波形

図-7 加振波の一例 ( $\delta_{max} = 30\text{cm}$ ,  $V_{max} = 50\text{cm/s}$ )

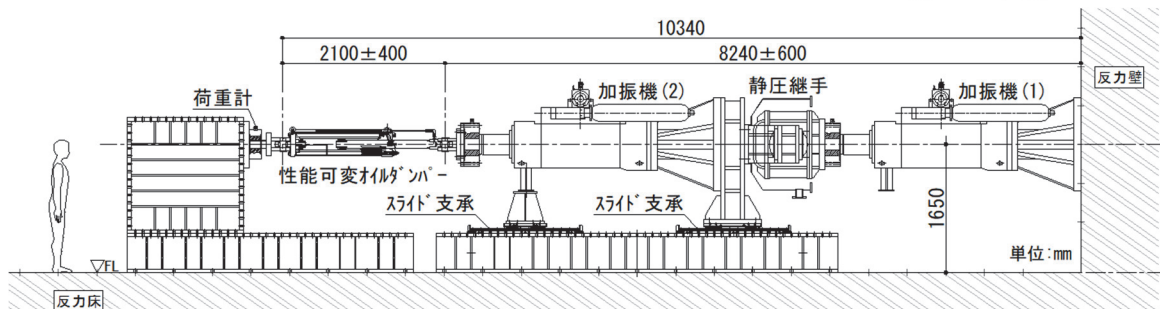


図-6 試験機概要

### 3.2 実験結果

減衰力と変位の関係を図-8に示す。ダンパー変位が  $L_s$  ( $=15\text{cm}$ ) 以上になると減衰力が増加しており、いずれの場合も安定した挙動を示している。また、図-8 (b), (c)より、最大変位が大きくなるにつれ、最大減衰力が増加しており、ダンパーの減衰性能が変化していることが確認できる。(d)~(f)より、最大速度が大きくなるに従い、リリース荷重時以上の速度となるため、最大減衰力が概ね同程度となっている。なお、小型シリンダが作動してから減衰力が増加するまでの時間は、ばらつきがあるものの概ね 0.05 秒であり、大きな時間遅れは生じていないことを確認した。定常3波目の引張・圧縮時の最大速度と最大減衰力の関係を図-9に示す。ここで、ダンパーが引張時の減衰力を+側、圧縮時を-側として表示している。切片減衰力  $F_{dd}$  を 430kN、最大減衰力  $F_{dmax}$  を 500kN、 $\alpha \cdot K_{sp} \cdot \zeta$  は 24.18kN/cm として、実験結果を非線形最小二乗法<sup>6),7)</sup>により近似し、VODのパラメータを評価した。性能変化前の一次減衰係数  $C_1$

は概ね  $11.9\text{kN}\cdot\text{s}/\text{cm}$ 、二次減衰係数  $C_2$  は  $0.4\text{kN}\cdot\text{s}/\text{cm}$ 、性能変化後の一次減衰係数  $C_1$  は  $59.5\text{kN}\cdot\text{s}/\text{cm}$  と評価することができ、性能変化前の  $C_1$  に比べ概ね 5 倍の一次減衰係数となり、小型シリンダの作動距離  $X_c$  に応じて減衰力が増加していることが確認できた。

## 4. 解析によるVODの免震性能確認

### 4.1 解析モデル

免震層の水平クリアランスが 40cm の既存免震建物に、3.2 節で評価した  $L_s$  15cm の VOD を設けた場合を想定し、解析的検討から VOD の適用効果を確認する。対象建物は、一次固有周期が概ね 3.6 秒の 6 階建て基礎免震構造である。免震層には、天然ゴム系積層ゴム支承と一次粘性係数が  $12.5\text{kN}\cdot\text{s}/\text{cm}$ 、リリース荷重 400kN、二次粘性係数  $0.85\text{kN}\cdot\text{s}/\text{cm}$  のパイリニア型のオイルダンパー（以下、OD）が建物の主軸方向に対して 2 基ずつ設けられている。OD を 2 基設けた場合（現状）を Case1、1

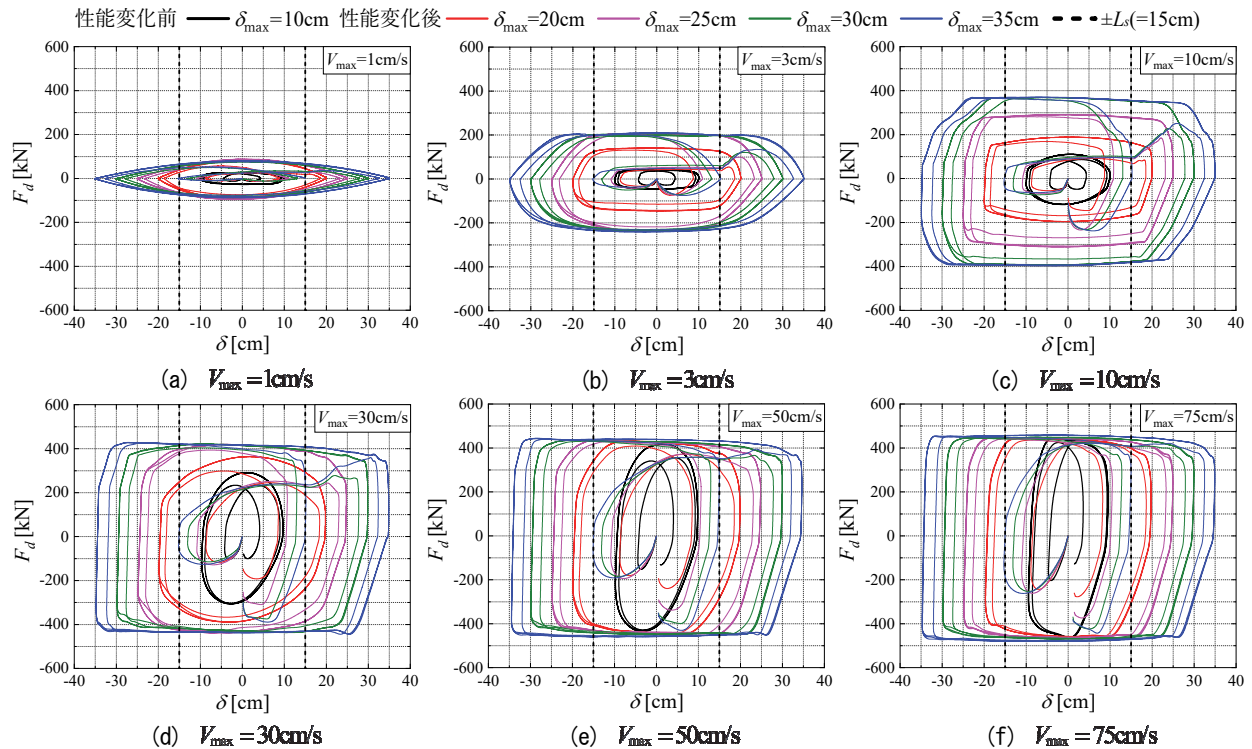


図-8 減衰力-変位関係

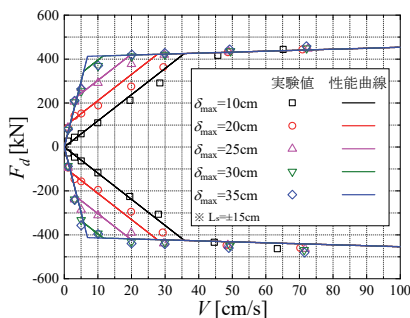


図-9 速度-減衰力関係

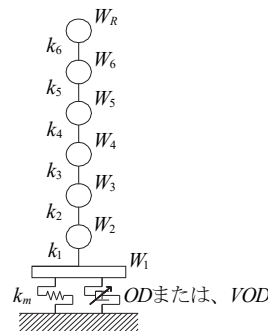


図-10 解析モデル

表-2 各層の重量と水平剛性

層	$W_i$ [kN]	$k_i$ [kN/cm]
R	4180	—
6	3946	1435
5	2615	1592
4	2691	1689
3	2649	1764
2	2380	1879
1	4330	2315
m	—	78

基増設して3基とした場合を Case2、**図-9**で評価した減衰性能を有するVODを2基設けた場合を Case3 とし、最大応答値を比較した。解析モデルは、**図-10**に示す質点系せん断モデルとした。**表-2**に、各層の重量および水平剛性を示す。免震層より上層の減衰は初期剛性比例型とし、一次固有円振動数に対して等価減衰定数を2%とした。免震層の内部粘性減衰はないものとし、天然ゴム系積層ゴム支承の復元力とOD、または、VODの減衰力のみを考慮した。**図-11**に、1基あたりのOD、およびVODの速度と減衰力の関係を示す。

検討用入力地震動は、位相特性が異なる稀に発生する地震（以下、L1）を6波、極めて稀に発生する地震（以下、L2）を6波、および工学的基盤において中京地域の

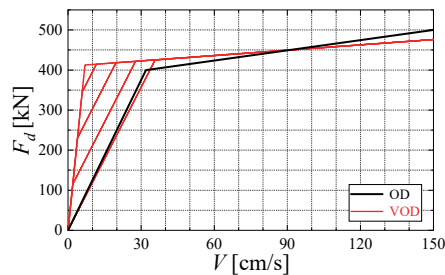


図-11 ダンパー1基あたりの速度-減衰力の関係

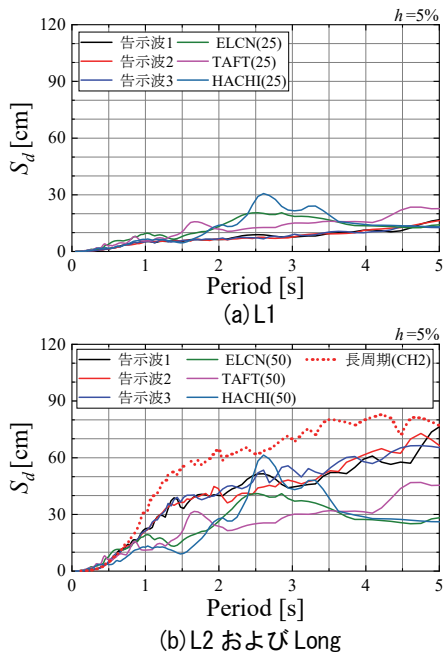


図-12 入力地震動の変位応答スペクトル (h=5%)

表-3 入力地震動の最大値

	最大加速度[cm/s <sup>2</sup> ]			最大速度[cm/s]		
	L1	L2	Long	L1	L2	Long
告示波1	91	293	—	12	52	—
告示波2	89	331	—	16	58	—
告示波3	97	270	—	12	57	—
ELCN	254	508	—	25	50	—
TAFT	248	497	—	25	50	—
HACHI	167	334	—	25	50	—
CH2	—	—	249	—	—	29

CH2 エリア<sup>2)</sup>を想定し、建設地の地盤増幅を考慮した長周期地震動（以下、Long）を1波の計13波とした。検討用入力地震動の変位応答スペクトルを**図-12**に、最大入力加速度、最大速度を**表-3**に示す。

#### 4.2 解析結果

免震層の最大水平変位  $\delta_{1max}$  を**表-4**に示す。また、L1 および L2 時における6波全ての各層に生じた応答加速度、層せん断力係数、層間変形角の最大値を**図-13**~**15**に示す。なお、ここでは擁壁衝突を考慮した解析を行っていないので、擁壁がない場合の最大応答値であることに注意されたい。Long 時における  $\delta_{1max}$  は、OD を2基設けた Case1 では43.5cm となり、水平クリアランス以上の変位が生じ、上部構造が擁壁に衝突する。

これに対し、OD を3基設けた Case2 では水平クリアランス以下の31.7cm となり、擁壁衝突を回避した。しかし、**図-13**~**15**に示した最大応答値は、L1、L2 時ともに Case1 に対して最大で25%、平均で15%程度増加し、免震層の最大水平変位を小さくできるが、上部構造の最大応答値が大きくなり、免震性能が低下していることが分かる。

表-4 免震層の最大水平変位  $\delta_{1max}$

		Case1 (OD×2)	Case2 (OD×3)	Case3 (VOD×2)
$\delta_{1max}$ [cm]	L1	8.8	6.9	9.0
	L2	28.9	21.5	26.3
	Long	43.5	31.7	37.6

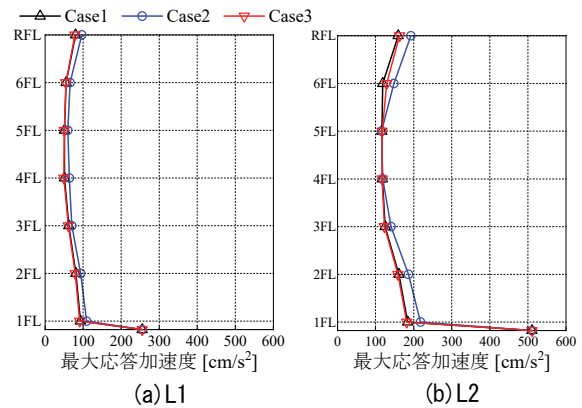


図-13 最大応答加速度

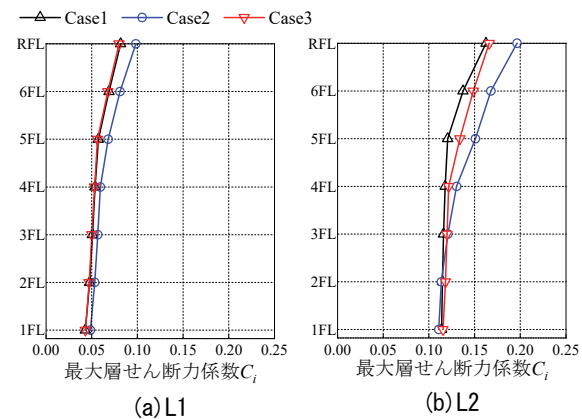


図-14 最大層せん断力係数

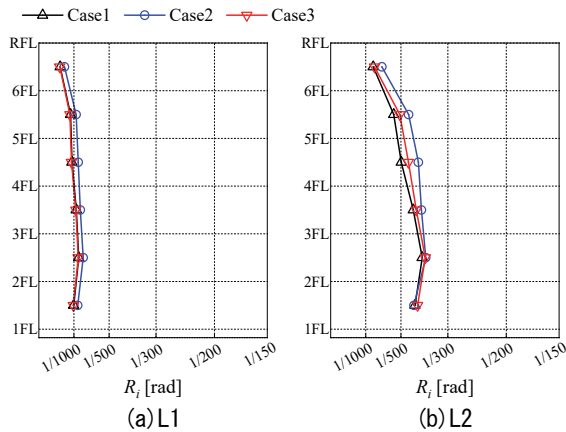


図-15 最大層間変形角

次に、VOD を 2 基設けた Case3 では Long 時の  $\delta_{1max}$  が 37.6cm となり、Case1 に比べて概ね 15% 低減することで擁壁衝突を回避し、変位抑制効果があることが確認できた。また、図-13~15 に示した最大応答値は、L1 時に免震層の最大変位が  $L_s$  未満であったため、概ね Case1 と同程度となった。L2 時は  $L_s$  以上の変位が免震層に生じ、Case1 に対して最大で 10% 程度大きくなる層があるものの、概ね 5% 以下の増加に留まり、同程度の応答値とすることができた。

## 5. まとめ

免震建物に適用可能な最大減衰力 500kN 級の VOD を開発し、減衰力がダンパー変位に応じて変化することを実験により確認した。また、建物に VOD を用いた場合の免震効果を解析的に検討し、対象建物においてはダンパー基数を増加することなく、中地震（稀に発生する地震）や大地震（極めて稀に発生する地震）時の免震性能を損なわず、かつ、長周期地震時の変位抑制効果があることを確認した。

今後は、複数基のダンパーを製作して製造ばらつきなどを確認し、実建物への適用に向けた検討を進める予定である。

## 【謝辞】

(国) 東北大学、(有) シズメテックと (株) 奥村組の共同研究の成果の一部である。東北大学の井上範夫名誉教授、五十子幸樹教授、および、シズメテックの鎮目武治氏、鎮目真喜子氏に感謝を示す。

## 【参考文献】

- 1) 座間信作、「2003 年十勝沖地震にみる石油タンク被害の特徴と対策」、物理探査 第 59 巻第 4 号、pp.353-362、2006
- 2) 国土交通省住宅局建築指導課、「超高層建築物等における南海トラフ沿いの巨大地震による長周期地震動への対策について」、国住指第 1111 号他、2016.6
- 3) 犬伏徹志、荏本孝久、「免震建物の擁壁衝突時における擁壁部水平抵抗簡易評価法の 1 質点系への縮約」、日本建築学会構造系論文集、第 86 巻、第 783 号、pp.717-726、2021.5
- 4) 根本真孝、渡辺真司、池永昌容、五十子幸樹、井上範夫、「最適設計手法を用いた性能可変オイルダンパー付き免震住宅の設計、その 1、その 2」、日本建築学会大会学術講演梗概集、B-2、pp.355-358、2010.9
- 5) 根本真孝、五十子幸樹、池永昌容、井上範夫、「戸建住宅における性能可変オイルダンパーを用いた免震システムの設計法」、日本建築学会構造系論文集、Vol.76、No.660、pp.291-299、2011.2
- 6) Levenberg, K., "A Method for the Solution of Certain Problems in Least Squares", Quart. Appl. Math. Vol.2, pp.164-168, 1944
- 7) Marquardt, D., "An Algorithm for Least-Squares Estimation of Nonlinear Parameters," SIAM J. Appl. Math. Vol.11, pp.431-441, 1963



# 端部 RC 造・中央部 S 造で構成される複合構造梁の開発

## － その 2 靱性能の向上と損傷の抑制 －

### Hybrid Beams Consisting of H-Shaped Steel and Reinforced Concrete Ends

#### - Part 2 : Improved toughness performance and damage suppression -

山上 聡\* 岸本 剛\* 小山慶樹\* 岡 靖弘\*\*

反町 敦\*\* 船津昌史\*\*\* 上田 遼\*\*\*

#### 要 旨

梁の両端部を RC 造、中央部を 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。既報においては、まず基礎梁を対象に S 造の梁（S 梁）を RC 造の梁（RC 梁）に S 梁せいの 2 倍埋め込んだハイブリッド梁の構造実験を行い、変形性能や終局強度の算定方法を確認した。今回は、建物の機能性や階高確保の点から基礎梁よりも RC 梁の断面形状を小さくすることが望まれる一般階の梁への適用範囲の拡大を目指し、構造性能を明らかにするための構造実験を行った。その結果、有効せん断補強筋比を 0.007 以上、せん断応力度レベルを 0.12 以下とすることで十分な変形性能を確保できることが確認された。これにより、ハイブリッド梁を一般階に適用できることとなった。

キーワード：ハイブリッド梁、損傷抑制、有効せん断補強筋比、せん断応力度レベル

#### 1. まえがき

近年、大型の物流倉庫などの建築物には、大スパン化、軽量化のため梁を S 造とし、柱を RC 造とする混合構造が用いられることが多い。しかし、S 造の梁を RC 造の柱に貫通させるため、柱梁接合部の収まりが複雑となり、施工の合理化が課題となっている。そこで、筆者らは、**図-1**に示すような柱と梁端を RC 造（以下、「RC 梁」）にして梁中央を S 造（以下、「S 梁」）とする複合構造梁（以下、「ハイブリッド梁」）の開発を目指した。まずは、S 梁に比べ RC 梁の断面形状の大きさの制約が少ない基礎梁を対象とし、構造実験によりせん断余裕度と靱性能の関係や終局強度の算定方法などを明らかにしたり。その際の S 梁に対する RC 梁のせいと幅の比は、試設計よりそれぞれ 1.6 倍、3.2 倍とした。

一方、ハイブリッド梁を一般階の梁に適用する際、建物の機能性や階高確保の制約等の点から RC 梁の断面を可能な限り小さくすることが望まれるが、変形性能を確保する設計条件や RC 梁の損傷制御の方法は明らかになっていない。そこで、今回、一般階の梁を対象に、S 梁に対する RC 梁の梁せいを 1.3 倍、梁幅を 2.5 倍とした場合の、変形性能の確保に必要な条件を明らかにする

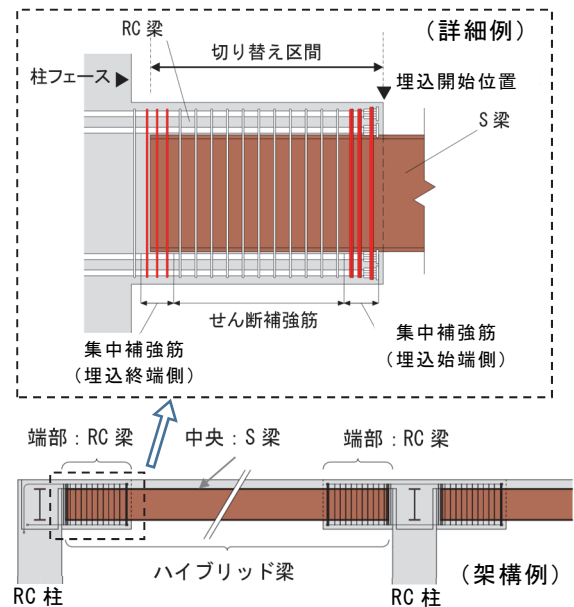


図-1 ハイブリッド梁構法の概要

ため、RC 梁のせん断余裕度、有効せん断補強筋比、およびせん断応力度レベルを要因として構造実験を行った。

\*技術本部技術研究所建築研究グループ \*\*東日本支社建築設計部 \*\*\*西日本支社建築設計部

表-1 試験体一覧

シリーズ	試験体	RC梁区間							S梁 <sup>※1</sup> 区間			せん断余裕度	せん断応力度レベル $\tau_u / F_c$			
		断面 $b \times D_c$ (mm)	RC区間長さ $L_{rc}$ (mm)	S梁埋込長さ <sup>※2</sup> $b_l$ (mm)	$F_c$ (N/mm <sup>2</sup> )	主筋 <sup>※3</sup>	せん断補強筋 <sup>※4</sup>	$p_{we}$	集中補強筋 <sup>※4</sup>					断面	S区間長さ $L_s$ (mm)	
									形状	埋込始端側 <sup>※5</sup>	埋込終端側					
I	No.7	650×800	1075	1000 (2.0)	36	8/2-D19	4-S8@60	0.008	C	3組 6-S8	4組 4-S8	BH-500×200 ×9×16	1350	1.55	0.092	
	No.9									5組 4-S10	5組 4-S8			1.67	0.094	
II	No.10	650×670				6/2-D19 (SD490)	30	4-S8@75	0.011	D	4組 4-S10			4組 4-S8	1.64	0.088
	No.11														1.00	0.125
	No.12														0.99	0.129
III	No.13	500×670			6/2-D19 (SD490)	24	6/2-D16	4-D6@50	0.010	D	3組 4-S10	3組 4-S8		H-500×200 ×10×16	0.76	0.181
	No.14														1.21	0.122
	No.15														1.22	0.106
	No.16														1.21	0.095
	No.17														1.22	0.091
	No.18		1.50	0.078												
	No.19		450×670	7/4-D19									4-S8@200		0.005	4組 4-S10

- ※1 S梁の材質は、SN490Bとする。
- ※2 ()内は、S梁せいに対するS梁埋込長さの比を示す。
- ※3 RC梁主筋の材質は、特記なき限りSD390とする。
- ※4 せん断補強筋、集中補強筋の材質は、No.14のみSD345,その他はKSS785とする。
- ※5 埋込始端側は、溶接閉鎖型とし、非貫通タイプ機械式定着具上にも配筋する。

2. 実験概要

2.1 試験体概要

既報の No.1~8 (実験シリーズ I) の実験結果を踏まえて、ハイブリッド梁を一般階に適用することを目的とした実験シリーズ II および III を計画した。試験体一覧を表-1に、試験体形状を図-2に、材料試験結果を表-2に示す。実建物を想定したハイブリッド梁は、内法長さ 11000mm、RC 梁断面 1300×1600~850×1000mm、RC 部長さ 2150mm、鉄骨部断面 H-1000×300~H-700×300、S 梁埋込長さは S 梁せいの 2 倍程度である。試験体は、これを 1/2~2/3 に縮小したモデルで、破壊形式は、RC 梁の曲げ降伏が先行する 10 体 (No.9~18) と、せん断破壊が先行する 1 体 (No.19) の計 11 体とした。

実験シリーズ II の No.9~No.13 では、S 梁の断面寸法と材種、鉄骨梁せいに対する S 梁埋込長さの比 (2.0)、埋込始端側の集中補強筋を共通とした。埋込始端側の集中補強筋は、外周部・中子筋ともに溶接閉鎖型とし、RC 梁内での増幅を考慮したせん断力を補う量とした。また、RC 梁の断面寸法、梁主筋の材種、コンクリート強度を実験因子とし、No.11 を基準試験体とした。

実験シリーズ III の No.14~19 では、シリーズ II の変形性能を改善するために、せん断余裕度 1.0 以上 (No.19 を除く) を確保する計画とした。ここで、せん断余裕度は、曲げ終局耐力に対するせん断終局耐力の比であり、せん断終局耐力は RC 梁内でのこ作用によるせん断力の増幅<sup>2)</sup>を考慮して低減している。また、No.11 の変形性能を改善した No.15 を基準試験体として、RC 梁のせん断応力度レベルに着目するとともに、有効せん断補強

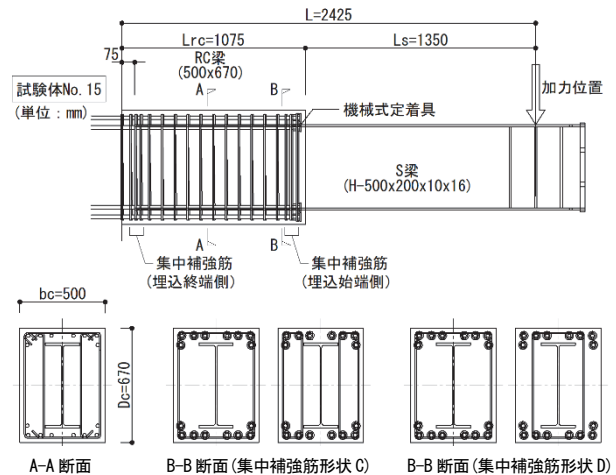


図-2 試験体形状

表-2 材料試験結果

(a) 鉄筋・鉄骨				(b) コンクリート		
呼び名	試験体	$\sigma_y$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\epsilon_y \times 10^{-6}$	試験体	$c\sigma_B$ (N/mm <sup>2</sup> )	$E_c$ (N/mm <sup>2</sup> )
D6	No.14	477.1*	2648	No.7	40.0	31260
	No.14	457.5	2456	No.9	42.2	31000
D19	No.7	452.0	2430	No.10	42.7	31100
	No.9~11	436.0	2130	No.11	40.8	31500
	No.15~19	421.6	2363	No.12	38.8	29300
	No.12,13	540.0	2630	No.13	26.7	24700
	No.7	1037.0	5410	No.14	23.6	28320
S8	No.9~13	928.0	4530	No.15	36.8	33000
	No.14~19	1066.4*	5767	No.16	39.1	32160
	No.9~13	998.0	4870	No.17	41.7	32220
S10	No.14~19	1025.6*	5387	No.18	55.4	36720
	No.7	381.0	1840	No.19	44.9	32460
PL9	No.9~13	395.0	1930			
	No.14~19	380.9	1880			
PL10	No.7	371.0	1770			
	No.9~13	340.0	1660			
	No.14~19	368.7	1930			

\*は0.2%オフセットひずみによる

筋比、コンクリート強度を実験因子とした。ここで、せん断応力度レベル（以下、「 $\tau_u/F_c$ 」）は、RC 梁の断面に生じる平均せん断応力度（RC 梁内での増幅を考慮したせん断力を RC 梁の有効断面積（ $b \times j$ ）で除した値）をコンクリートの設計基準強度で除した値である。また、有効せん断補強筋比（以下、「 $p_{we}$ 」）は、靱性保証型指針<sup>3)</sup>に示されており、梁幅は根巻き柱脚の設計<sup>4)</sup>を参考に RC 梁断面から鉄骨の梁幅分を除外している。

## 2.2 加力方法

加力装置を図-3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より、片持ち梁形式で加力した。その際、加力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。加力パターンを図-4に示す。部材角  $R=40 \times 10^{-3} \text{rad}$  まで漸増し、その後は破壊状況により最大  $R=100 \times 10^{-3} \text{rad}$  まで片押しで加力した。加力方向は、梁の上端が引張となる方向を正加力とした。

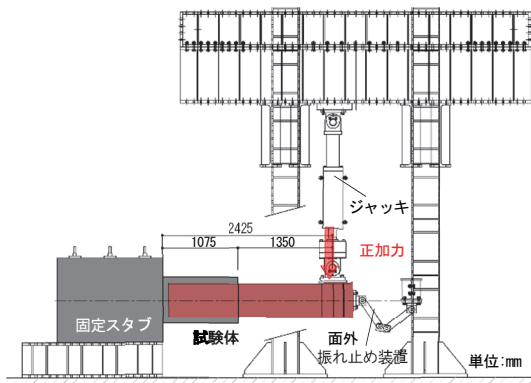


図-3 加力装置

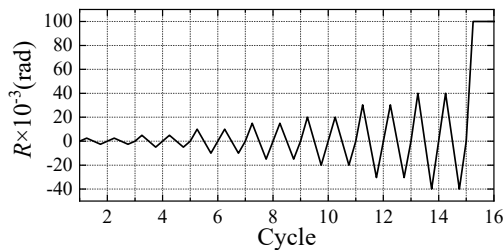


図-4 加力パターン

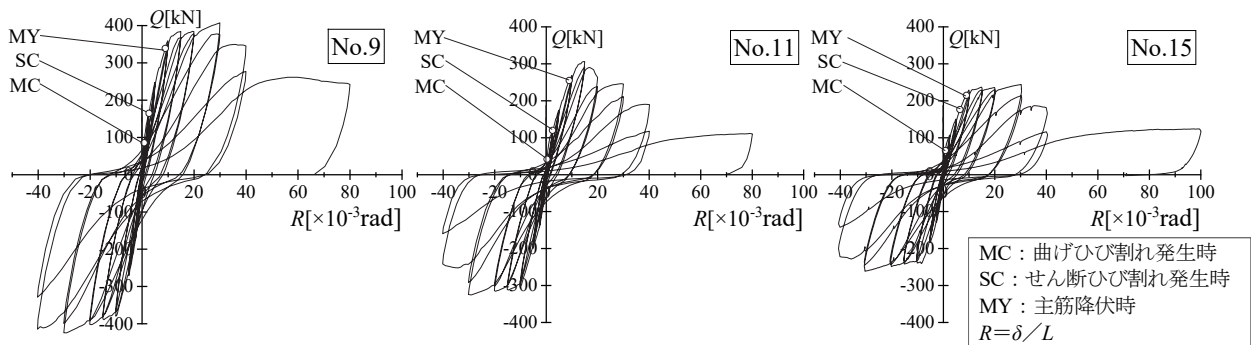


図-5 荷重部材角関係例

## 3. 実験結果および検討

### 3.1 荷重一部材角関係および破壊性状

試験体の荷重部材角関係の一例を図-5に示す。図中には、曲げひび割れとせん断ひび割れの発生時、および主筋降伏時を併せて示している。No.11、15はNo.9に比べ梁せいが小さくなっていること、No.15はさらに梁主筋量が少ないことから、それぞれの RC 梁の曲げ耐力は異なっている。また、RC 断面が基礎梁相当の No.9 は  $R=30 \times 10^{-3} \text{rad}$  で荷重が低下したのに対し、RC 断面を一般階相当にした No.11 は主筋降伏後  $R=16 \times 10^{-3} \text{rad}$  で早期に荷重低下を示した。詳しくは後述するが、これは  $\tau_u/F_c$  が大きいことが原因と考えられ、これを一定値以下に抑えることで、No.15 のように一般階相当の RC 断面においても  $R=30 \times 10^{-3} \text{rad}$  まで荷重を維持できた。

### 3.2 実験因子の影響

各因子による包絡線の比較を図-6に、ひび割れ状況を写真-1に示す。各因子を比較した結果、以下のことがわかった。

#### a. 埋込始端側の集中補強筋量

埋込始端側の集中補強筋量の影響を調べるために、No.7、9を比較して図-6(a)に示す。No.7(3組 6S8)は主筋降伏後  $R=20 \times 10^{-3} \text{rad}$  で荷重低下が見られたが、No.9(5組 4S10)の荷重低下は  $R=30 \times 10^{-3} \text{rad}$  であり、埋込始端側の集中補強筋量は、RC 梁内での増幅を考慮したせん断力を補う量とすることで変形性能が改善した。

#### b. RC 断面の大きさ

RC 断面の大きさの影響を調べるために、No.9、10、11を比較して図-6(b)に示す。No.10(650×670mm)とNo.9(650×800mm)を比較すると、RC 梁せいの違いによる曲げ耐力の差はあるものの、S 梁のかぶり厚さの違いによる荷重低下への影響は見られなかった。一方、No.11(500×670mm)では、 $R=9.0 \times 10^{-3} \text{rad}$  の主筋降伏後に最大荷重を迎え、早期に荷重が低下した。これは、RC 断面を狭めたことでせん断余裕度が下がり、せん断応力度レベルが上がった影響と考えられる。

#### c. RC 梁主筋の材種とコンクリート強度

RC 梁主筋の材種とコンクリート強度の影響を調べるために、No.11、12、13を比較して図-6(c)に示す。

No.11 (SD390) と No.12 (SD490) を比較すると、主筋の材種の違いによる包絡線への影響は見られなかった。また、No.12 (SD490, Fc36) と No.13 (SD490, Fc30) の比較では、最大荷重を迎えた  $R=15 \times 10^{-3} \text{rad}$  までは有意な差は見られなかったが、それ以降で No.13 が荷重低下を示した。これは、コンクリート強度を低くしたことで、せん断余裕度が下がり、せん断応力度レベルが上がったことが影響していると考えられる。

d. せん断応力度レベル ( $\tau_u/F_c$ )

$\tau_u/F_c$  の影響を調べるために、No.14, 15, 18 を比較して図-6 (d) に示す。ここでは、各試験体の曲げ強度が異なるため、図中縦軸は各試験体の RC 梁の曲げ強度時のせん断力 ( $\tau_c Q_{mu}$ ) で除した値で基準化している。

No.14 (0.122) は、 $R=8.2 \times 10^{-3} \text{rad}$  で曲げ降伏後、側面に埋込始端側から斜めに伸びるせん断ひび割れが進展し (写真-1 (a))、 $R=20 \times 10^{-3} \text{rad}$  で荷重が低下した。No.15 (0.106) は、 $R=9.1 \times 10^{-3} \text{rad}$  で曲げ降伏後、側面の埋込終端側の曲げひび割れが進展したが (写真-1 (b))、 $R=30 \times 10^{-3} \text{rad}$  から No.14 と同様に埋込始端側からのせん断ひび割れが進展し、荷重が低下した。No.18

(0.078) は、 $R=7.4 \times 10^{-3} \text{rad}$  で曲げ降伏後、側面の埋込終端側の曲げひび割れが進展し、 $R=40 \times 10^{-3} \text{rad}$  から荷重が低下しており、せん断応力度レベルを抑えることで曲げ破壊型の傾向が強くなり、靱性能が向上する効果が見られた。

e. 有効せん断補強筋比 ( $p_{we}$ )

$p_{we}$  の影響を調べるために、No.15, 16, 17 を比較して図-6 (e) に示す。No.15 (0.011) は、 $R=30 \times 10^{-3} \text{rad}$  で荷重低下した。No.16 (0.007)、No.17 (0.006) は  $R=9.0 \times 10^{-3} \text{rad}$  で曲げ降伏後、側面に埋込始端側から斜めに伸びるせん断ひび割れが進展し (写真-1 (c))、 $R=15 \times 10^{-3} \text{rad}$  で荷重低下しており、せん断余裕度が 1.2、 $\tau_u/F_c$  が 0.095 程度でも変形性能が低くなった。

4. 耐力評価と変形性能

4.1 RC 梁の曲げ強度およびせん断強度

a. 終局曲げ強度の評価

RC 梁の終局曲げ強度 ( $\tau_c M_u$ )、および終局曲げ強度時のせん断力 ( $\tau_c Q_{mu}$ ) は、文献(6)に準拠した次の式(1)、

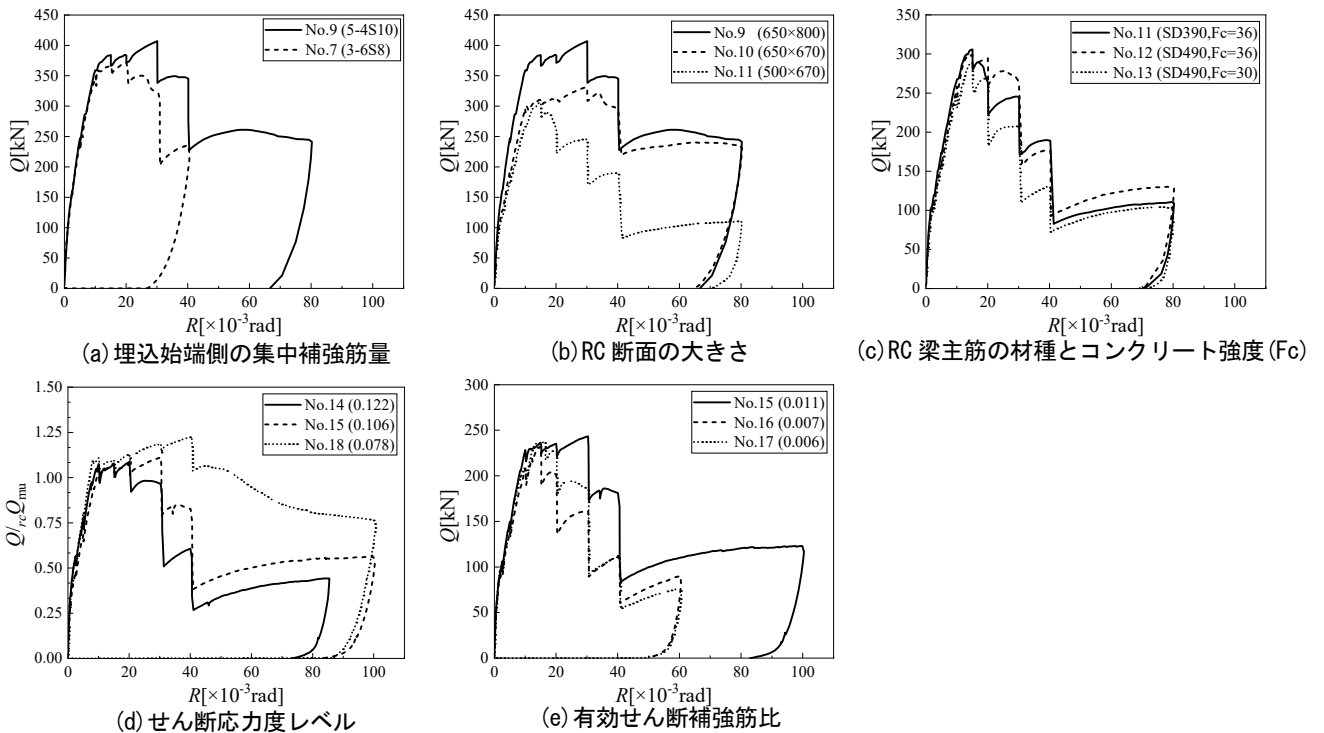


図-6 包絡線の比較

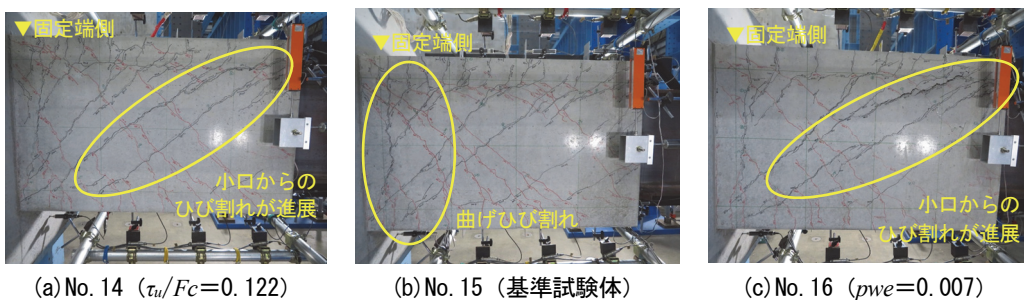


写真-1 試験体のひび割れ状況例 ( $R=20 \times 10^{-3} \text{rad}$ )

(2)により求められる。

$${}_{rc}M_u = 0.9 \cdot m a_t \cdot m \sigma_y \cdot {}_{rc}d \quad (1)$$

$${}_{rc}Q_{mu} = {}_{rc}M_u / L \quad (2)$$

ここで、 $m a_t$ :引張鉄筋断面積(mm<sup>2</sup>)、 $m \sigma_y$ :引張鉄筋降伏強度(N/mm<sup>2</sup>)、 ${}_{rc}d$ :RC 梁の有効せい(mm)、 $L$ :梁の長さ(mm)

b. 終局せん断強度の評価

RC 梁の終局せん断強度 ( ${}_{rc}V_u$ ) には鉄骨幅を除いた幅が応力伝達に有効であると考え、文献 3) の終局せん断強度式において、全幅から鉄骨フランジ幅を引いたものを RC 梁の有効幅として式(3)で評価する。また、ハイブリッド梁のせん断強度 ( ${}_{rc}Q_{su}$ ) は、RC 梁内でのせん断力の増幅を考慮し式(4)で評価する。このとき鉄骨に作用する支圧力は三角形分布になると仮定し、てこ作用の反力位置を求めた。

$${}_{rc}V_u = \min({}_{rc}V_{u1}, {}_{rc}V_{u2}, {}_{rc}V_{u3}) \quad (3)$$

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

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

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

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

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

$${}_{rc}Q_{su} = {}_{rc}V_u \times \frac{4_b l}{6_s l - b_l} \quad (4)$$

ここで、 ${}_{rc}j_e$ :トラス機構に関する断面の有効せい(mm)、 ${}_{rc}b_e$ :トラス機構に関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/mm<sup>2</sup>)、 $p_{we}$ :有効せん断補強筋比、 $\mu$ :トラス機構の角度を表す係数、 $R_p$ :終局限界状態での塑性回転角(rad)で曲げ降伏先行型の場合 0.015、せん断破壊型の場合 0 とした、 $l_s$ ,  $l_b$ :部材長さ(mm)で表-1による、他の記号は文献 3) を参照。

4.2 実験値と計算値の比較と変形性能

各試験体の計算値と実験結果を表-3に示す。表中のせん断余裕度とは、式(4)によるハイブリッド梁のせん断強度 ( ${}_{rc}Q_{su}$ ) を式(2)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。 ${}_{rc}Q_{su}$  の算定の際、せん断破壊型を目標とした No.19 を除き、塑性回転角  $R_p$  を 0.015rad としている。耐力余裕度とは、 $Q_{max}$  を  ${}_{rc}Q_{mu}$  で除し無次元化した値 ( $Q_{max} / {}_{rc}Q_{mu}$ ) を示す。限界変形角は、2 サイクル目の荷重が急落した時点、または荷重が 80%以下となった時点での変形角とし、優れた変形性能が要求される部材種別 FA の限界変形角 1/40 (25×10<sup>-3</sup>rad) 以上<sup>5)</sup>を目標変形角とした。

せん断余裕度と耐力余裕度の関係を図-7に示す。同

表-3 計算値と実験結果

試験体	計算値			実験結果		最大耐力時変形角 ×10 <sup>-3</sup> (rad)	限界変形角 $R_u$ ×10 <sup>-3</sup> (rad)
	${}_{rc}Q_{mu}$ (kN)	${}_{rc}Q_{su}$ (kN)	せん断 余裕度 ${}_{rc}Q_{su} / {}_{rc}Q_{mu}$	$Q_{max}$ (kN)	耐力 余裕度 $Q_{max} / {}_{rc}Q_{mu}$		
No.9	344	573	1.67	407	1.18	30	40
No.10	284	464	1.64	331	1.17	30	40
No.11	284	285	1.00	306	1.08	15	30
No.12	279	276	0.99	299	1.07	15	30
No.13	279	213	0.76	289	1.03	15	20
No.14	165	199	1.21	179	1.09	20	30
No.15	219	267	1.22	243	1.11	30	30
No.16	219	265	1.21	232	1.06	15	20
No.17	219	267	1.22	238	1.09	15	20
No.18	219	330	1.50	269	1.22	40	57
No.19	298	269	0.90	254	0.85	15	15

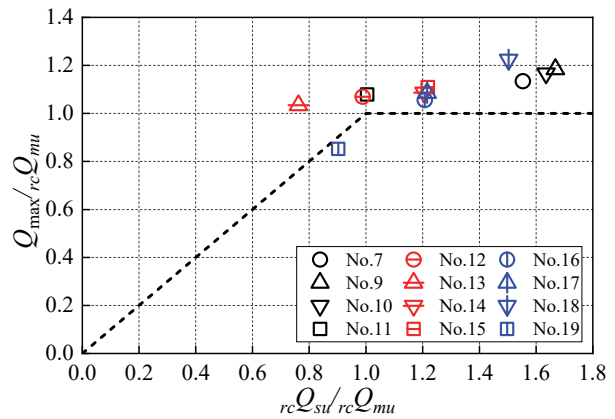
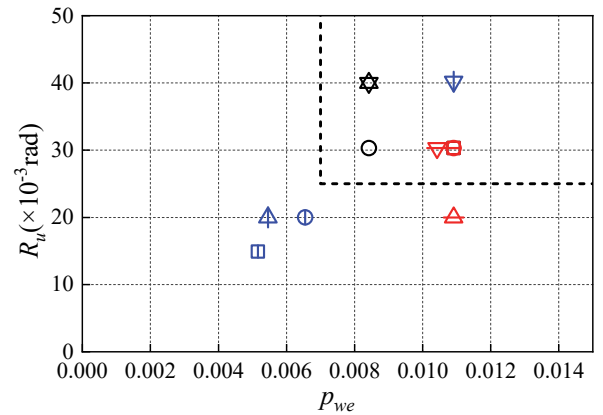
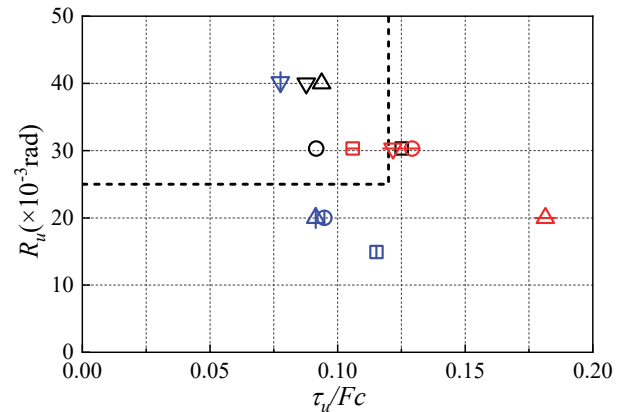


図-7 せん断余裕度と耐力余裕度



(a) 有効せん断補強筋比と限界変形角



(b) tu/Fc と限界変形角

図-8 実験因子と限界変形角の関係

図中の破線は、 $Q_{max}$  と計算値 ( $rcQ_{mu}$  または  $rcQ_{su}$ ) が等しい値であることを示す。せん断余裕度が 1 以上では、実験値は曲げ強度に対する計算値以上であった。また、各試験体の限界変形角、最大変形角を比較すると、ハイブリッド梁の有効せん断補強筋比とせん断応力度レベルが、変形性能に及ぼす影響が大きいことがわかった。

有効せん断補強筋比 ( $p_{we}$ ) と限界変形角の関係を図-8 (a) に示す。 $p_{we}$  が高いほど限界変形角が大きい傾向が見られ、コンクリート強度が低く、 $\tau u/Fc$  が高かった No.13 を除き、 $p_{we}=0.007$  以上で目標性能が満たされている。

せん断応力度レベル ( $\tau u/Fc$ ) と限界変形角の関係を図-8 (b) に示す。 $\tau u/Fc$  が低いほど限界変形角が大きい傾向が見られ、 $p_{we}$  が 0.007 以下の試験体を除き、 $\tau u/Fc=0.12$  以下で目標性能が満たされている。

以上のことから、目標性能を確保するには、埋込始端側の集中補強筋は、部材に作用するせん断力と曲げモーメントの伝達時にアーチ機構が負担するせん断力を補う量とし、せん断余裕度を 1.0 以上、 $p_{we}$  を 0.007 以上、 $\tau u/Fc$  を 0.12 以下とする必要があると考えられる。

## 5. まとめ

構造実験を行い、変形性能の確保や損傷制御の方法について以下のことが確認でき、ハイブリッド梁の一般階への適用が可能となった。

- i. 一般階を想定した RC 梁断面において、せん断応力度レベルを 0.12 以下、有効せん断補強筋比を 0.007 以上とすることで、 $R=25 \times 10^{-3} \text{rad}$  以上の変形性能を確保できる
- ii. 終局せん断強度の算定において、塑性回転角  $R_p=0.015$  を考慮するとともに、せん断余裕度を 1.0 以上とすることで、耐力余裕度は 1.05 以上となり、計算値は実験値を安全に評価する

## 6. あとがき

S 梁の端部を RC 梁とするハイブリッド梁に関して、S 梁の埋込長さを S 梁せいの 2 倍とした場合の構造性能を実験により明らかにし、「奥村式ハイブリッド梁構法」として日本建築総合試験所の建築技術性能証明を取得した。こ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) 岸本 剛、山上 聡、小山慶樹、端部 RC 造・中央部 S 造で構成される複合構造梁の開発、奥村組技術研究年報、No.46、2020.9
- 2) 鋼コンクリート構造接合部の応力伝達と抵抗機構、日本建築学会、2011

- 3) 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、日本建築学会、1999
- 4) 鋼構造接合部設計指針」、日本建築学会、2021.2
- 5) 鉄筋コンクリート構造保有水平耐力計算規準・同解説、日本建築学会、2021.2
- 6) 2020 年版 建築物の構造関係技術基準解説書、建築行政情報センター

# 既存 RC 造有孔梁鋼板補強工法の開発

## －せん断性能に関する実験的検証－

### Steel Plate Reinforcement of Openings in RC Beams

#### - An Experimental Study on Shear Performance -

赤星博仁\* 服部晃三\*\* 大田周平\*\*\* 平松一夫\*\*\*\*

#### 要 旨

わが国の建設分野においては大量に存在する建築ストックの活用が課題となっており、既存建築物の用途変更など、顧客の様々な要求に柔軟に対応できる構工法が求められている。それに対応する技術として鋼板補強工法を開発した。既存鉄筋コンクリート造建築物の用途変更に伴う改修工事の際に梁部材に新たに設けた開孔の周囲を補強することで、せん断性能を向上できる。また、せん断耐力の評価式を考案し、その妥当性を構造実験により確認することで、開孔を設ける前の梁部材と同等以上のせん断性能を付与できる技術を確認した。本工法は、新設開孔の周囲に鋼板を固定する工法であることから、従来工法<sup>1)</sup>に比べて簡便な施工で効率よくせん断性能の向上が可能である。

キーワード：耐震改修工事、耐震補強、鉄筋コンクリート造、有孔梁、貫通孔、せん断

#### 1. まえがき

近年、脱炭素社会の実現に向けた取り組みが進む中、わが国の建設分野においては大量に存在する建築ストックの活用が課題となっている。そのため、我々建設業として取り組むべき課題の一つは顧客の多様な要求に柔軟に対応できる技術の開発である。そこで、これに対応する技術として鋼板補強工法を開発した。

本工法は、既存の鉄筋コンクリート（以下、RC と称する）造建築物の用途変更に伴う改修工事の際に梁部材に新たに設けた開孔の周囲に適用することで、開孔を設ける前の既存 RC 梁と同等以上のせん断性能を付与できる。そのため、新設設備配管等により天井高を狭めることがなく、プラン変更にも柔軟に対応できる。

本報では、簡便な施工で効率よく構造性能が向上できる開孔補強工法を考案し、構造実験によりそのせん断性能を確認すると共に、その抵抗機構の評価方法を検証した内容について報告する。

本工法により補強された有孔梁の孔周囲せん断耐力 ( $Q_{suR}$ ) の設計式として、(1) 式を提案する。開孔の周囲において、既存 RC 部が負担するせん断力を RC 規準における修正広沢式 ( $Q_{su0}$ )<sup>2)-3)</sup> である (2) 式で評価し、それに補強によるせん断耐力の増分（以下、補強効果と称する）を加えた累加強度で孔周囲せん断耐力を評価することとした。

$$Q_{suR} = Q_{su0} + Q_R \quad (1)$$

$Q_{su0}$  : 無補強有孔梁の孔周囲のせん断耐力 (N)  
 $Q_R$  : 補強によるせん断耐力の増分 (N)

$$Q_{su0} = \left\{ \frac{0.092k_u k_p (\sigma_B + 18)}{M/(Qd) + 0.12} \left( 1 - 1.61 \frac{H}{D} \right) + 0.85 \sqrt{p_s \cdot \sigma_{sy}} \right\} bj \quad (2)$$

$$p_s = \sum a_s / (b \cdot c) \quad (3)$$

$k_u$  : 有効せいによる係数  
 $k_p$  : 引張鉄筋比による係数  
 $\sigma_B$  : コンクリートの圧縮強度 (N/mm<sup>2</sup>)  
 $M/(Qd)$  : せん断スパン比  
 $H/D$  : 梁せいに対する開孔直径の比で、開孔比と称する  
 $p_s$  : 孔周囲補強筋比  
 $\sigma_{sy}$  : 孔周囲補強筋の規格降伏点 (N/mm<sup>2</sup>)  
 $b$  : 梁幅 (mm)

#### 2. 補強部材の抵抗機構と設計式の提案

##### 2.1 基本事項

鋼板補強工法の概要を図-1に示す。本工法に用いる補強部材は、鋼板、それを固定するアンカーボルトおよびエポキシ樹脂で構成される。

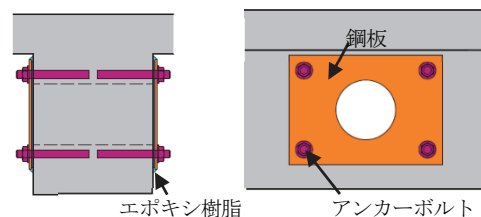


図-1 鋼板補強工法の概要

\* 技術本部技術研究所建築研究グループ \*\* 建築本部 \*\*\* 西日本支社建築設計部  
 \*\*\*\* 東日本支社建築設計部

$j$  : 梁の応力中心間距離 (mm)  
 $\Sigma a_s$  : 有効な範囲内に配置されるあばら筋の全断面積 (mm<sup>2</sup>)  
 $c$  : 孔周囲補強筋の有効な範囲 (mm) (図-2)

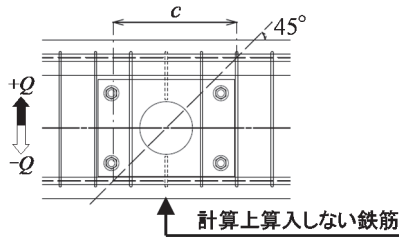


図-2 孔周囲補強筋の有効な範囲

2.2 補強部材のせん断抵抗機構

梁部材にせん断力が作用した場合に、鋼板はアンカーボルトおよびエポキシ樹脂で梁部材に接合されることから、コンクリートと鋼板は一体となって抵抗する。ここで、アンカーボルト周囲の鋼板接合面における応力伝達が支配的であると仮定すると、鋼板に作用する応力は鋼板の対角線方向に引張応力が、もう一方の対角線方向に圧縮応力が生じ、開孔付近はその際を湾曲するように流れる。この鋼板に作用する応力方向を考慮して評価式を提案する。

鋼板補強におけるせん断抵抗の概念図を図-3に示す。ここでは片面の鋼板およびその接合面のせん断抵抗を示しており、補強によるせん断耐力の増分( $Q_R$ )は両面の鋼板が負担する孔周囲せん断力として(4)式により評価する。次に、鋼板が接合面せん断耐力に対して十分強固な場合、開孔上下各部の鋼板に伝達されるせん断力( $Q_p$ )と1接合面あたりの接合面せん断耐力( $q_j$ )の関係式は(5)式による。なお、1接合面の範囲は、前述の鋼板に作用する応力方向を考慮して設定した。

$$Q_R = 4Q_p \tag{4}$$

$$Q_p = q_j \cdot \sin \phi \tag{5}$$

$\phi$  : 梁材軸方向と接合面のせん断方向のなす角度 (図-3)

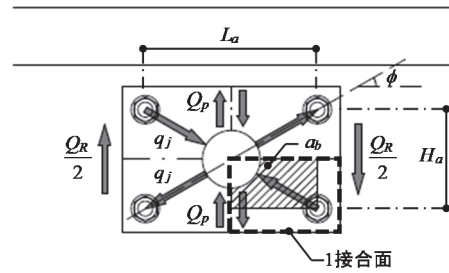


図-3 鋼板補強におけるせん断抵抗の概念

3. 構造実験による性能確認

3.1 実験概要

本工法により補強された RC 梁の孔周囲のせん断強度の確認および前章に示した抵抗機構 (図-3) の妥当性確認を目的として構造実験を行った。

試験体の諸元を表-1に示す。試験体の部材寸法は全て同一で、有孔梁の無補強試験体 1 体と、開孔直径( $H$ )および孔周囲補強筋比( $p_s$ )の異なる補強試験体 7 体とした。補強部材の因子としては、類似工法の実験結果<sup>4)~7)</sup>からせん断性能に寄与すると想定されるアンカーボルト径( $a$ )および鋼板接着接合面積( $ab$ )とした。なお、エポキシ樹脂の圧縮強度および引張強度はコンクリートに比べ十分大きい材料を選定した。試験体形状と配筋の一例は図-4に示す通りである。

加力装置の概要を図-5に示す。試験体の上下支持部

表-1 試験体諸元

試験体	コンクリート強度	補強鋼板 (SS400)		アンカーボルト (SS400)		一般部あばら筋 (SD295A)		孔周囲補強筋 (SD295A)
	$\sigma_B$ (N/mm <sup>2</sup> )	寸法 (mm)	板厚 (mm)	本数・呼び径	$\sigma_{ny}$ (N/mm <sup>2</sup> )	配筋	$p_w$ (%)	$p_s$ (%)
#21/3N	25.3							
#21/3a	26.7	274×420	4.5	4-M6 [打込み式]	342	2-D6@100	0.21	0.12
#21/3	23.0			4-M20 [ $L_a=7d_a$ ]				
#21/3A	22.5			4-M22 [貫通ボルト]				
#15/3	17.1							
#21/4	23.0	220×310	3.2	4-M16 [ $L_a=7d_a$ ]	307	4-D6@45	0.94	0.6
#21/4B	22.9	274×386	4.5	4-M20 [ $L_a=7d_a$ ]				
#21/4P	23.2							

【試験体の呼び名の説明】 # "F<sub>c</sub>" / "D/H" "因子記号" [ 例: #21/4B F<sub>c</sub>=21N/mm<sup>2</sup>, H/D=1/4, B: 接着面積大 ]

(因子記号) N: 無補強, a: アンカー径小, A: 貫通アンカー, B: 接着面積大, P: 筋筋比大

\* 因子記号がないものを、基準試験体として扱う。

【一般部配筋】 主筋: 5-D19(SD490,  $p_f=1.19\%$ )、端部あばら筋(#21/4P以外): 4-D6@50(SD295A,  $p_w=0.85\%$ )、端部あばら筋(#21/4P): 4-D6@35(SD295A,  $p_w=1.21\%$ )

【部材寸法】  $L=1350\text{mm}$ ,  $b \times D=300 \times 450\text{mm}$

【記号】  $L$ : 内法スパン長さ,  $b$ : 梁幅,  $D$ : 梁せい,  $H$ : 開孔直径,  $F_c$ : コンクリートの目標圧縮強度、

$\sigma_B$ : 材料試験によるコンクリートの圧縮強度、

$\sigma_{ny}$ : 材料試験によるアンカーボルトの引張降伏強度(0.2%オフセット法により算出)、

$L_a$ : アンカーボルトの有効埋め込み長,  $d_a$ : アンカーボルトの呼び径,  $p_w$ : あばら筋比,  $p_s$ : 孔周囲補強筋比

【試験体スケール】  $S=1/2.5$



を建研式加力装置に固定し、押し型油圧ジャッキを用い試験体に逆対称変形が生ずるよう水平方向に加力した。

荷重履歴は、部材変形角  $R = \pm 1.25 \times 10^{-3} \text{rad}$  で1サイクル、 $R = \pm (2.5, 5, 7.5, 10) \times 10^{-3} \text{rad}$  でそれぞれ2サイクル後、 $R = +30 \times 10^{-3} \text{rad}$  までの一方向荷重を原則とした。なお、試験体の損傷状況を考慮し、試験体#21/4Pのみ  $R = \pm 15 \times 10^{-3} \text{rad}$  を2サイクル追加した。

計測項目は、上記加力装置の荷重重であるせん断力と部材変形角に加え、主要部の鉄筋ひずみ、鋼板ひずみおよび各部せん断変形角とした(図-6)。せん断変形角については孔周囲と梁端の範囲に区分し、その範囲内にある対角に設置した変位計により算出した。

### 3.2 実験結果

#### a. 梁部材としての破壊性状

各種ひび割れ等の主な発生現象を併記した全試験体のせん断力と部材変形角の関係を図-7に示す。破壊性状の概況としては#21/4Pのみが梁端の曲げ破壊であり、その他は孔周囲のせん断破壊であった。なお、#21/4Pは①最大耐力時にあばら筋は降伏ひずみに達しておらず梁端主筋が降伏ひずみに達していたこと、②最大耐力以降の耐力低下が小さかったこと等の理由から曲げ破壊と判定した。ただし、最大耐力直後の負荷荷及び同変形角の2サイクル目の正荷重では孔周囲補強筋が降伏ひずみに達していたことから、最大耐力をせん断破壊時の耐力として評価できると判断した。

試験体の耐力一覧を表-2に示す。構造実験による最大耐力(実験値)の他、各試験体の材料試験等に基づくデータから算出した計算値、設計値および推測値を示している。なお、無孔梁せん断耐力は開孔を設ける前の状態を想定して大野・荒川 min 式( $Q_{su}$ )により算出した。

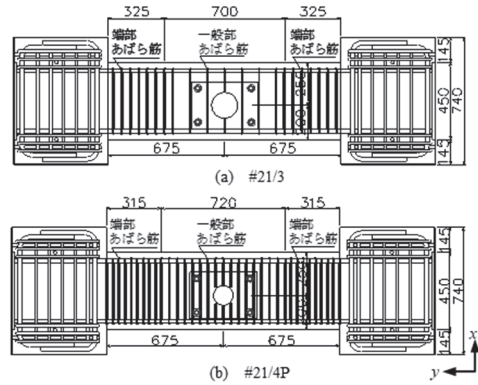


図-4 試験体形状と配筋の一例

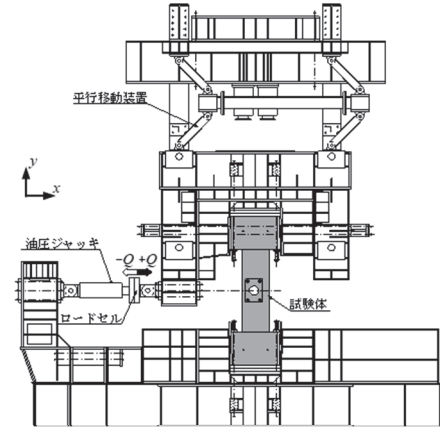


図-5 加力装置の概要

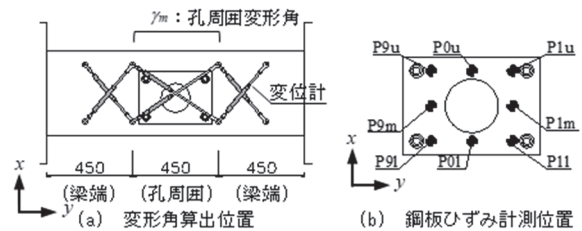
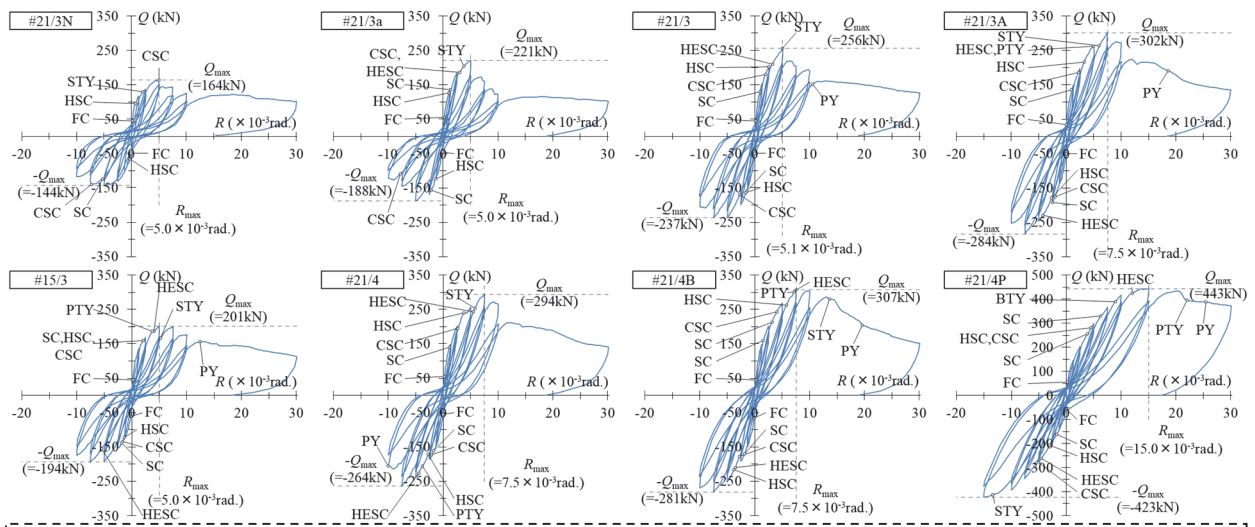


図-6 変形角および鋼板ひずみ計測の概要



**【記号】**

$Q_{max}$  : 最大耐力、 $R_{max}$  : 最大耐力時の部材変形角

**【主な発生現象】**

FC : 一般部の曲げひび割れ、SC : 一般部のせん断ひび割れ、HSC : 開孔部のひび割れ、CSC : 開孔上下部のせん断ひび割れ、HESC : アンカー近傍のせん断ひび割れ、BTY : 主筋の降伏、STY : あばら筋の降伏、PTY : 補強鋼板開孔際の降伏、PY : 補強鋼板の降伏

図-7 せん断力と部材変形角の関係

#21/3Nおよび#21/3a以外の試験体は無孔梁せん断耐力( $Q_{su}$ )を上回るように計画した試験体である。その内、#15/3を除く試験体の最大耐力( $Q_{max}$ )は $Q_{su}$ を上回り、梁せいに対する開孔直径の比(以下、開孔比( $H/D$ )と称する)が1/4の試験体はその傾向が顕著であった。

表-2 試験体の耐力一覧

試験体	無孔梁		有孔梁		最大耐力		補強による耐力増分	
	(計算値)	(計算値)	(実験値)	(設計値)	(推測値)	(設計値)	(推測値)	(設計値)
	$Q_{su}$	$Q_{su0}$	$Q_{max}$	$Q_{suR}$	$Q_{ex,R}$	$Q_R$		
#21/3N	231.7	133.6	163.5	-	-	-		
#21/3a	236.3	135.7	220.7	140.9	54.7	5.2		
#21/3	223.3	129.5	255.6	195.8	97.2	66.3		
#21/3A	221.7	128.7	301.6	210.3	144.1	81.5		
#15/3	204.0	120.5	201.5	163.0	54.0	42.5		
#21/4	223.3	147.5	294.4	218.1	113.9	70.6		
#21/4B	223.0	147.3	307.5	218.2	127.2	70.9		
#21/4P	322.4	230.9	443.3	341.5	160.7	110.6		

\*  $Q_{su}$ : 大野・荒川 min 式,  $Q_{su0}$ : 修正広沢式(2)式による],  $Q_{max}$ : 加力実験による最大耐力,  $Q_{suR}$ : 補強された有孔梁の孔周囲せん断耐力(設計式) [(1)式による],  $Q_{ex,R}$ : 補強によるせん断耐力の増分の実験に基づく推測値[(6)式による],  $Q_R$ : 補強によるせん断耐力の増分(設計式) [(4)式による]

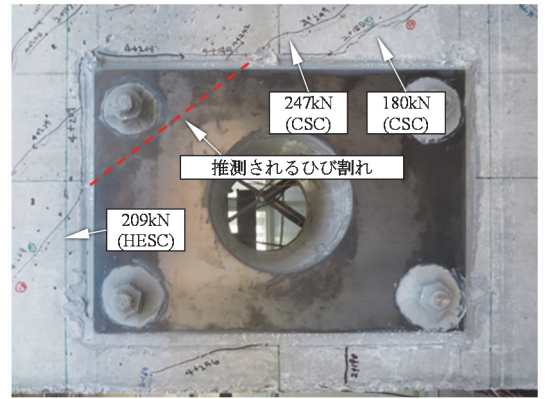
b. 補強部材としての破壊性状

試験体の損傷状況の一例を写真-1に、正加力時における鋼板の主ひずみ分布を図-8に示す。ここで、鋼板ひずみは写真-1の梁側面に対して裏側の梁側面に貼り付けた鋼板を計測したことから、写真-1と比較しやすいように図-8はx軸を対称に反転させて明記した。図-8に示すように、鋼板はCSCのような開孔周囲の斜めひび割れに対して抵抗するため、主ひずみはA点からA'点に開孔を湾曲するように流れ、このA-A'間の接合面で鋼板とRCは相互に応力伝達される。ここで、アンカーボルト(A,A'点)より鋼板の角側の主ひずみはほぼゼロと推測できる。これを踏まえ図-8に着目すると、比較的RC部の損傷が少ない $R=+2.5 \times 10^3 \text{ rad}$ 時では、a点の主ひずみはb点に比べ小さい。一方、 $Q_{max}$ 時である $R=+5 \times 10^3 \text{ rad}$ 時では、a点の主ひずみはb点と同等の値を示している。ここで、任意の区間(ここではb点とa点、もしくはa点とA点)における主ひずみの差分はその間の接合面に作用するせん断応力に相関があるから、 $Q_{max}$ 時には全接合面に対するアンカーボルト近傍(a-A間)接合面における応力伝達の割合が $R=+2.5 \times 10^3 \text{ rad}$ 時に比べ、増大したといえる。

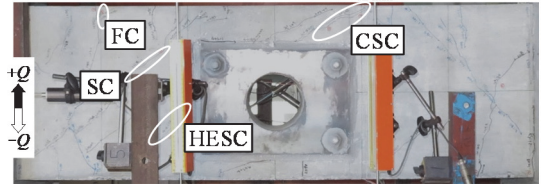
また、HESCの発生とほぼ同タイミングに、HESCの延長線上に近い点(ここではa点)の主ひずみが顕著に増大する傾向を確認したことから、このHESCは鋼板直下にも連続する「アンカー近傍のせん断ひび割れ」(写真-1中の破線)であると推測した。

さらに、4.3節で後述するようにHESCは $Q_{max}$ 時の80%以上に達した時点で発生していることから、HESCの発生およびアンカーボルト近傍接合面における応力伝達の増大が $Q_{max}$ に大きく関与していると推測される。

したがって、補強効果を高めるためには接合面の損傷を防止するアンカーボルトの定着力が重要と考えられる。



【 $R=+5 \times 10^3 \text{ rad}$ 時】( $Q_{max}$ 時)※鋼板周囲詳細



【 $R=+5 \times 10^3 \text{ rad}$ 時】( $Q_{max}$ 時)

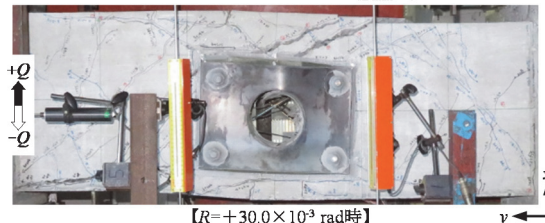
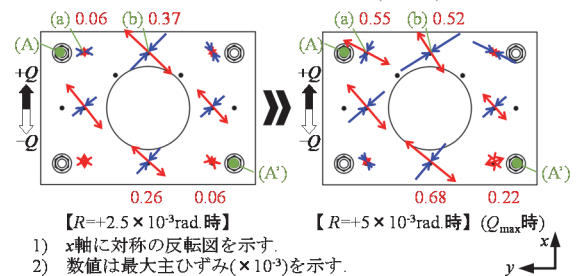


写真-1 損傷状況 (#21/3)



1) x軸に対称の反転図を示す。  
2) 数値は最大主ひずみ(×10<sup>3</sup>)を示す。

図-8 正加力時における鋼板主ひずみ分布(#21/3)

4. 構造性能の評価

4.1 補強効果

本工法の補強効果を評価するにあたり、実験結果に基づく最大耐力時における補強効果の推測値( $Q_{ex,R}$ )を(6)式として設定した。なお、本式の $\alpha_{su0}=1.22$ は試験体#21/3Nの実験結果に基づく値であり、既往文献<sup>2), 8), 9)</sup>による修正広沢式における計算値に対する実験値の比(以下、余裕度と称する)の平均値とほぼ同等であることを確認している。

$$Q_{ex,R} = Q_{max} - \alpha_{su0} \cdot Q_{su0} \tag{6}$$

$\alpha_{su0}$ : 修正広沢式の計算値に対する実験値の比で、ここでは1.22とする。

ここで、鋼板のせん断伝達概念(図-3)の妥当性を確認するために、最大耐力時における鋼板に伝達される相当せん断力に対する補強効果の推測値( $Q_{ex,R}$ )の関係

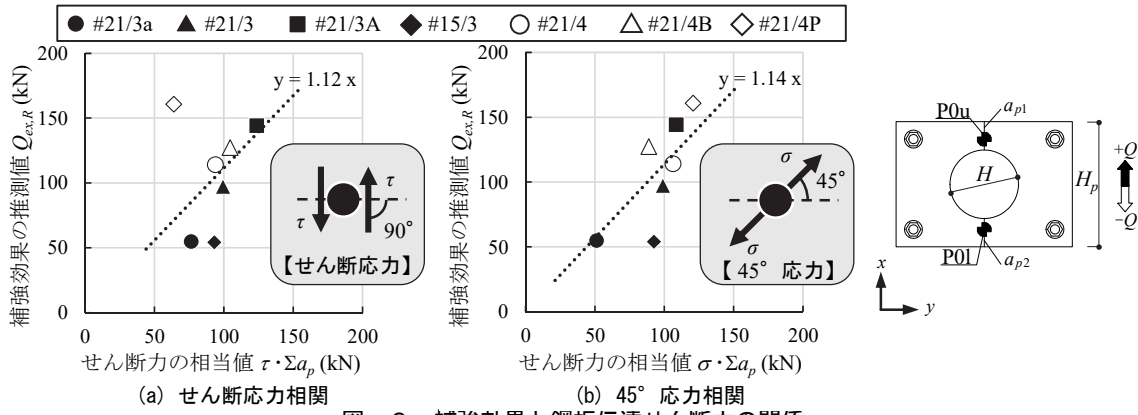


図-9 補強効果と鋼板伝達せん断力の関係

を図-9に示す。ここで、せん断応力、45° 応力、鋼板断面積は以下の(7)~(9)式により算出した。図-9(a)の点線で示した回帰直線から最も離れた位置にある#21/4Pは唯一の曲げ破壊が先行した試験体であり、他の試験体に比べ全体的に梁材の損傷が進展している。こうした損傷に伴う局部的な力の流れの変動により、鋼板に伝達すべき圧縮応力がコンクリート側へ伝達されることで最大耐力直前には鋼板の圧縮応力が低下したためと考える。この推測を踏まえ、圧縮応力を無視し、梁材軸に対して45°方向の引張応力((8)式)により相当せん断力を評価したものが図-9(b)である。この回帰直線と#21/4Pは乖離しておらず、全体の相関性がより高くなっている。#15/3については、貧調合コンクリートを使用して製作した試験体の特性上、他試験体に比べ、鉛直方向の強度のばらつきが大きく、かつ上端筋の付着割裂破壊が進行していた。このことから、無補強時孔梁のせん断耐力((6)式による第2項)を実際より大きく評価してしまった結果、 $Q_{ex,R}$ を小さく評価したと推測される。

$$\tau = \frac{\tau(P0u) + \tau(P0l)}{2} \quad (7)$$

$$\sigma = \frac{\sigma(P0u) + \sigma(P0l)}{2} \quad (8)$$

$$\Sigma a_p = n_p \cdot t_p (H_p - H) \quad (9)$$

- $\tau$  : 鋼板のせん断応力 (N/mm<sup>2</sup>)
- $\sigma$  : 鋼板の梁材軸に対する45°方向応力 (N/mm<sup>2</sup>)
- $\Sigma a_p$  : 開孔芯にある梁材軸直交方向の鋼板断面積(mm<sup>2</sup>)
- $n_p$  : 鋼板の枚数で、2とする。
- $t_p$  : 鋼板の厚さ (mm)
- $H_p$  : 鋼板の高さ (mm)
- $H$  : 開孔直径 (mm)

よって、各試験体でばらつきはあるものの、 $Q_{ex,R}$ と $\sigma \Sigma a_p$ は概ね良好な比例関係を示している。

## 4.2 接合面せん断耐力

1 接合面あたりの接合面せん断耐力( $q_j$ )を(10)~(12)式に示す。

$$q_j = \beta_H \cdot \min(q_{j1}, q_{j2}) \quad (10)$$

$$q_{j1} = 0.7\sigma_{ay} \cdot a_a \quad (11)$$

$$q_{j2} = 0.08\sigma_B \cdot a_b + 0.5\sigma_{ay} \cdot a_a \quad (12)$$

- $\beta_H$  : 開孔比に応じた低減係数で、 $H/D=1/3$ では0.6、 $H/D=1/4$ では1とする。
- $\sigma_{ay}$  : アンカーの降伏強度 (N/mm<sup>2</sup>)
- $\sigma_B$  : コンクリートの圧縮強度 (N/mm<sup>2</sup>)
- $a_a$  : アンカー1本あたりの公称断面積 (mm<sup>2</sup>)
- $a_b$  : 1接合面あたりの鋼板の有効接着面積(mm<sup>2</sup>) (図-3)

3.2節b項で述べたように最大耐力時にはアンカー周囲の接合面が主として抵抗すること、さらには#21/4と#21/4Bの最大耐力に大きな差異がないことを踏まえると、補強効果の設計式に寄与する鋼板接着面積の項に対して上限規定を設けることが妥当と考える。そこで、接着面積が十分に確保できる場合を(11)式で、接着面積が十分でない場合を(12)式で評価した。なお、 $q_j$ は既往式<sup>10)~12)</sup>を参考にした。また、有効接着面積をアンカー芯よりも内側に設定した理由については、最大耐力時において鋼板縁端部の接着接合界面にひび割れが生じていたことを考慮したためである。開孔比に応じた低減係数( $\beta_H$ )を設けた経緯については4.3節に後述する。

## 4.3 開孔比に応じた設計式の補正

開孔比が1/3の試験体の最大耐力が実験当初に想定していた耐力を下回る傾向を確認したことから、開孔比による影響を検討した。

開孔比( $H/D$ )による影響を検討するにあたり、梁端のせん断変形および曲げ変形成分を除外した孔周囲せん断変形成分のみを考慮し、孔周囲変形角( $\gamma_m$ )を横軸とし、最大耐力に対する所定時せん断力の比( $Q/Q_{max}$ )を縦軸とした各ひび割れ発生事象の推移を図-10に示す。

既往の文献<sup>13)</sup>では「孔縁には応力集中が起こり、材軸と45°方向の斜め亀裂が早期に発生し、この亀裂は孔径が大きくなる程に早期に発生する」と報告されている。この内容と同様な事象を本構造実験でも確認しており、 $H/D=1/3$ の試験体の方が $H/D=1/4$ よりも小さい $\gamma_m$ 下で各所のひび割れが発生することを確認している(図-10)。特にHESCは各試験体に共通して $Q_{max}$ 時の80%以上に達した時点で発生しており、接合面の最大耐力に影響すると推測される。このことはHESCを $H/D$ 毎に区分して比較すれば明らかであり、こうしたアンカーボルト定着部の損傷度合を考慮して開孔比に応じた低減係数( $\beta_H$ )

を設けることとした。

#### 4.4 設計式の安全性

せん断耐力の設計値に対する実験値の関係を図-11に、せん断耐力の比較を表-3に示す。 $Q_{max}/Q_{suR}$ は、試験体#21/3N（有孔梁無補強）が1.22であるのに対し、補強を施した全試験体の平均値では1.37、中央値で1.35、最小値で1.24となり、全補強試験体において修正広沢式の余裕度の平均値を上回る安全性の高い設計式であることを確認した。なお、 $Q_{max}/Q_{su}$ では中央値で1.32となり、構造実験は概ね想定通りの結果であった。最小値が1を下回っているが、設計上では $\beta_H$ を設けることで十分安全側の評価となる。

#### 5. まとめ

既存 RC 造の建築物に適用する有孔梁の鋼板補強工法を考案し、構造実験によりせん断耐力の評価式の妥当性を確認した。これにより、開孔を設ける前の梁部材と同等以上のせん断性能を付与できる技術を確立した。本工法は、新たに設けられた開孔の周囲に鋼板を固定する工法であることから、従来工法に比べて簡便な施工で効率よく、せん断性能の向上が可能である。

#### 6. あとがき

本技術については、(一財)日本建築総合試験所より建築技術性能証明を取得している。現状では耐震改修工事の範疇でしか実用できないが、将来的には様々な課題を解決して適用範囲の拡大を目指したい。

#### 【参考文献】

- 1) 中村洋行、浅野芳伸他、「定着金物を用いた連続繊維シートによる RC 構造物補強工法の開発：その 1 工法の概要」、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.473-474、2007
- 2) (一社)日本建築学会、「鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説」、2018
- 3) 広沢雅也、清水 泰、「鉄筋コンクリート造有孔ばりのせん断強度と靱性」、建築雑誌、3月号、1979
- 4) 洪市克彦、増田安彦、「既存鉄筋コンクリート造躯体の新設貫通孔に対する補強技術」、大林組技術研究所報、No. 81、2017
- 5) 白井和喜、勝俣英雄他、「既存鉄筋コンクリート梁の新設貫通孔補強に関する実験的研究」、コンクリート工学年次論文集、Vol.27、No. 2、2005
- 6) 津司優子、東端泰夫他、「既存鉄筋コンクリート梁の鉄板貼付による開口補強法の実験的研究」、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.478-481、1995
- 7) 中澤敏樹、「既存鉄筋コンクリート梁の開孔補強法に

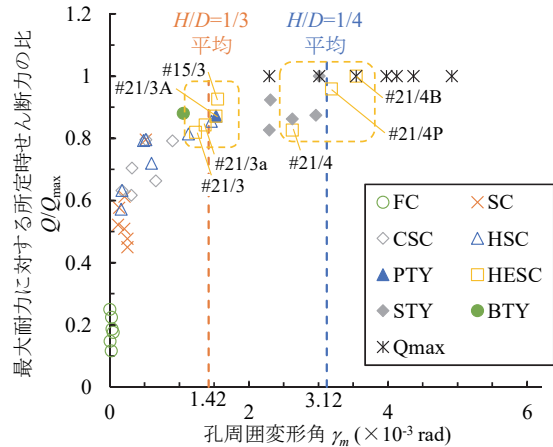


図-10 孔周囲変形角におけるひび割れの推移

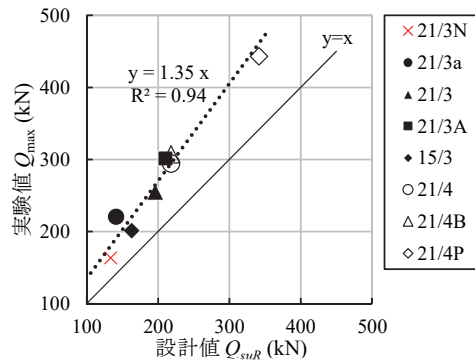


図-11 せん断耐力の設計値に対する実験値の関係

表-3 せん断耐力の比較

	補強試験体 (全 7 体)	
	$Q_{max}/Q_{suR}$	$Q_{max}/Q_{su}$
最大値	1.57	1.38
最小値	1.24	0.93
平均値	1.37	1.21
中央値	1.35	1.32
変動係数	7.4%	14.6%

- 8) 日本建築センター、「ビルディングレター1993 年 10月号」、1993
- 9) 落合 等、北山和宏、「せん断破壊する RC 梁および有孔梁のせん断性能評価に関する研究」、コンクリート工学年次論文集、Vol. 34、No. 2、2012
- 10) (一財)日本建築防災協会、「既存鉄筋コンクリート造建築物の耐震改修設計指針・同解説」、2017
- 11) (社)プレハブ建築協会、「プレキャスト建築技術集成 第1編 プレキャスト建築総論」、2003
- 12) 小宮敏明、益尾 潔、「鉄骨増設ブレース補強用の接着接合部および間接接合部の終局耐力」、コンクリート工学年次論文集、Vol. 22、No. 3、2000
- 13) 松下清夫、上村克郎、「鉄筋コンクリート有孔ばりに関する研究：その 6・円孔をもつ鉄筋軽量コンクリート有孔ばりの小形試験体実験」、日本建築学会論文報告集、第 66 号、1960

# コンクリート直床仕上げの施工管理手法に関する 実験的検討

－ 押え作業がコンクリートの表層品質に及ぼす影響－

## Study of Construction Management Methods for Direct Floor Finish on Concrete Slabs

- Effects of floor finishing Works on concrete surface quality -

伊藤 淳\* 河野政典\*\* 赤星博仁\* 門井大祐\*\*\*

### 要 旨

直床仕上げの施工管理手法について検討するため、報告<sup>1)</sup>ではコンクリート表層の硬化状態と押え作業の関連性について分析し、貫入試験の抵抗値が 2.0N/mm<sup>2</sup>に達した時点を機械式ごてによる押え作業の開始とする施工管理手法を提案した。本報は、コンクリートの品質向上を実現する施工方法を確立するため、押え作業がコンクリート表層の品質に及ぼす影響について試験施工を実施した。

その結果、機械式ごてを使用することでコンクリート表層の硬さ値が大きくなる傾向を確認するとともに、機械式ごてを使用した押え作業の回数を増加させることで、透気係数が  $0.1 \times 10^{-16} \text{m}^2$  以下となり、良好な床部材に仕上がることを確認した。

キーワード：コンクリート、直床仕上げ、ブリーディング、貫入抵抗値、硬さ試験、透気試験

### 1. まえがき

昨今のインターネットによる通信販売市場の急成長に伴い、物流施設のニーズが高まっており、大型物流施設が多数建設されている。物流施設の床の仕上げは、コンクリートの直床仕上げの場合が多く、コンクリートのひび割れ防止や平坦性確保などの高い品質管理が必要となる。また、物流倉庫としての商品価値を高めるため、コンクリート表面の美観性を求められる場合もある。

コンクリートの直床仕上げ施工の手順一例と押え作業に用いる機器を図-1に示す。直床仕上げの押え作業は、機械式ごてトロウエルに円盤を取付けた「円盤押え」を実施し、次にトロウエルの円盤を外し、こてによる「羽根押え」を複数回実施する。また、求められる床の仕上がりに対し、人力によるフレスノ仕上げ、別の機械式ごてモスキートの「羽根押え」による最終仕上げを実施する。機械式ごての導入により、押え作業の省人化・省力化、コンクリート表面の仕上げ精度および、品質の向上が図られている<sup>2)4)</sup>。また、コンクリート表面の美観性として、鏡面仕上げのような光沢が求められる場合は、金ごてによる押え磨き回数を多くする。一方で、過度な押えによって、コンクリート表層が剥離する事例が報告

されている。この剥離は、コンクリート表層の硬化状態および、ブリーディングの発生時期が大きく影響していると考えられている<sup>5)6)</sup>。

これまで、直床仕上げによる表層剥離の発生を防止するため、作業員が打込み後のフレッシュコンクリートの状態（いわゆる締め具合）を経験的に見極めながら仕



図-1 コンクリートの直床仕上げ施工の手順一例と押え作業に用いる機器

\*技術本部技術研究所建築研究グループ \*\*技術本部技術研究所企画・管理グループ \*\*\*東日本支社建築工務部

上げ作業を進めていた。一方、筆者らは、仕上げ作業のタイミングが剥離現象に影響を及ぼすと考え、ブリーディングやコンクリート表層の硬化状態と押え作業の関連性について分析し、直床仕上げの施工管理手法<sup>1)</sup>を検討してきた。

本報では、コンクリートの品質向上を実現する施工方法を確立するため、既報<sup>1)</sup>の管理手法に沿い、押え作業がコンクリートの表層品質に及ぼす影響について、試験施工の検証結果を報告する。

## 2. 押え作業の調査およびフレッシュ性状の調査

### 2.1 調査対象

コンクリートの基本仕様と試験条件を表-1に、コンクリートの調合を表-2に示す。調査は7現場の生コン21工場についてコンクリートのフレッシュ性状の試験を実施した。呼び強度は30、36であり、セメントは全て普通ポルトランドセメントである。なお、今回の調査は、現場打設された床部材のコンクリートを対象とし、床部材の厚さは180~200mmである。

### 2.2 試験項目および方法

フレッシュ性状の試験項目および方法を表-3に示す。ブリーディング試験は、JCI-S-015-2018を参考に、ブリーディング量は採取したブリーディングによる水量とし、コンクリートの表面をコテで均した直後から、60分経過するまで10分ごとに表面に浸み出した水を採取し、その後、ブリーディングが認められなくなるまで、30分ごとに水を採取した。また、コンクリート試料の高さは、表-1に示す床部材の厚さと同一とした。

JIS A 1147のコンクリートの凝結時間試験方法に規定される貫入試験は、コンクリートからふるい分けしたモルタルに、貫入針の針頭を25mm貫入させる。ここでは、既報<sup>1)</sup>と同様に現場打設された床部材のコンクリートを直接評価することとし、貫入針の針頭と粗骨材との接触防止のため、針頭の貫入深さを5mmとした。貫入試験は、押え作業の開始前に床部材と供試体で実施した。

供試体測定用の試験器具を写真-1に示す。供試体では測定面積に限られるため、試料を容器に採取した後、コンクリート表層の粗骨材を剣山で押して強制的に沈下させ、安定的な測定値が得られるように測定面積を確保した。なお、供試体表面を床部材と同一条件とするため、供試体にはふたをせず静置した。貫入抵抗値は、コンクリート表面から5秒間で5mm貫入したときに要した力を装置から読み取り、(1)式により算出した。

$$\frac{\text{貫入に要した力(N)}}{\text{貫入針の断面積(mm}^2\text{)}} = \text{貫入抵抗値(N/mm}^2\text{)} \quad (1)$$

表-1 コンクリートの基本仕様と試験条件

No.	呼び強度	スランブ(cm)	床部材の厚さ(mm)	外気温(°C)
1	30	18	180	20
2	30	18	200	19
3	30	18	200	27
4~7	30	15	200	20
8~14	36	15	180	28
15~19	36	15	200	28
20,21	36	15	200	24

表-2 コンクリートの調合

No.	W/B (%)	s/a (%)	単体量(kg/m <sup>3</sup> )				Ad (kg/m <sup>3</sup> )	
			W	B		S		G
				C	混和材			
1	47.0	45.9	175	372	-	788	936	3.34 <sup>*3</sup>
2	47.1	43.1	174	369	-	741	998	3.69 <sup>*3</sup>
3	47.0	46.1	165	352	-	823	988	3.34 <sup>*3</sup>
4	49.0	45.9	168	323	20 <sup>*1</sup>	793	954	3.43 <sup>*3</sup>
5	49.0	46.0	168	323	20 <sup>*1</sup>	796	960	3.43 <sup>*3</sup>
6	49.0	44.9	171	329	20 <sup>*1</sup>	805	991	3.49 <sup>*3</sup>
7	49.0	45.4	169	325	20 <sup>*1</sup>	783	971	3.45 <sup>*3</sup>
8	43.7	45.9	168	385	-	796	976	3.66 <sup>*3</sup>
9	44.0	44.9	163	371	-	794	1001	3.67 <sup>*3</sup>
10	42.7	45.5	165	386	-	799	983	4.25 <sup>*3</sup>
11	44.0	43.8	164	373	-	779	1021	4.10 <sup>*3</sup>
12	43.0	44.3	168	391	-	775	997	4.11 <sup>*3</sup>
13	44.3	44.6	165	373	-	786	1004	4.10 <sup>*3</sup>
14	43.3	45.6	166	384	-	791	973	3.45 <sup>*3</sup>
15	44.2	45.8	165	373	-	809	983	3.73 <sup>*3</sup>
16	45.3	44.8	165	364	-	791	1004	3.65 <sup>*3</sup>
17	45.5	44.1	164	360	-	786	1021	3.61 <sup>*3</sup>
18	45.0	45.3	168	373	-	799	988	3.55 <sup>*3</sup>
19	45.2	46.2	168	372	-	806	979	3.16 <sup>*3</sup>
20	52.5	45.2	171	326	-	805	1053	3.26 <sup>*4</sup>
21	46.4	47.0	175	337	40 <sup>*2</sup>	861	1031	3.37 <sup>*4</sup>

水結合材比(W/B)、細骨材率(s/a)、結合材(B)、セメント(C)、細骨材(S)、粗骨材(G)、化学混和剤(Ad)

\*1: 膨張材、\*2: フライアッシュ、\*3: 高性能 AE 減水剤、\*4: AE 減水剤

表-3 フレッシュ性状の試験項目および方法

試験項目	試験方法
ブリーディング試験	<ul style="list-style-type: none"> <li>JCI-S-015-2018を参考に、φ150のブリキ管を使用し、試料の高さ(厚さ)は床部材の厚さに合わせた</li> <li>ブリーディング採取時を除き、蓋をして静置した</li> </ul>
貫入試験	<ul style="list-style-type: none"> <li>JIS A 1147に規定されるプロクター貫入試験器を用いて、針頭5mmを5秒間で貫入させる</li> <li>測定は塩ビ管(φ200×300mm)を使用した供試体と床部材で、貫入試験は押え作業の開始前に実施した</li> </ul>

### 2.3 作業工程とフレッシュ性状の関係

ブリーディング量、および貫入抵抗値の時間変化の一例を図-2に、床部材と供試体の貫入抵抗値の関係を、既報<sup>9)</sup>のデータも合わせて図-3に示す。

コンクリート表層の不具合<sup>5, 6)</sup>はブリーディングが大きく影響していると考えられている。既報<sup>9)</sup>の報告では、ブリーディングが終了した後、押え作業を実施することでコンクリート表層の不具合が生じないことを確認した。

ブリーディングの終了のタイミングとしては、貫入抵抗値が1.5 N/mm<sup>2</sup>に達すれば、ブリーディングは図-2より、ほぼ終了していることを確認できた。

床部材と供試体の貫入抵抗値は、図-3より、±20%程度のばらつきがあるものの、グラフ上の一対一のラインを中心に分布した。実施工時の管理値は貫入抵抗値のばらつきを考慮し、貫入抵抗値を2.0 N/mm<sup>2</sup>とすることで押え作業を安全側の管理値とすることができる。床部材で、貫入試験が実施できない場合は、打込み箇所と同一のコンクリートで製作した供試体を用いる方法が有効な管理方法になると考えられる。

## 3. コンクリート表層の品質に関する調査

### 3.1 調査対象

コンクリートの調査は表-2の No.1、No.2、No.3、No.8の4調査とし、呼び強度30、36を使用した。

コンクリートの基本仕様と押え作業方法の施工手順を表-4に示し、押え作業の施工手順の一例を写真-2に示す。

押え作業の前工程では、機械式ごてのトロウエルを使用し、押え方法A-3、A-4、D-2は最終仕上げにモスキートを、押え方法C-1はフレスノを使用した。また、押え方法A-1の押え作業は、前工程および最終仕上げ職人による金ごてによる手作業とした。

押え方法については、作業員の経験を参考に、使用する機械および押え回数を選定した。機械式ごてを使用した4回目以上の押え作業は、トロウエルではコンクリート表層を傷つけてしまう可能性があることからモスキートを使用した。また、鏡面仕様は、床部材の仕上がりに光沢を求められる場合に実施する押え作業を参考に、押え方法A-3、A-4、D-2の施工手順を選択し、その他の機械式ごてを使用した押え方法は一般仕様とした。なお、押え方法A-1は物流倉庫の床の仕上げで実施しないことから仕様なしとした。

押え作業は、直床仕上げの管理方法<sup>9)</sup>に沿い、貫入抵抗値が2.0 N/mm<sup>2</sup>以上となったことを確認した後、羽根押え作業を実施した。

### 3.2 試験項目および方法

表層品質の試験項目および方法を表-5に示す。コンクリート表層品質は材齢4週に実施し、硬さ試験の硬さ



塩ビ管容器 表層の粗骨材を洗下させる剣山

写真-1 供試体測定用の試験器具

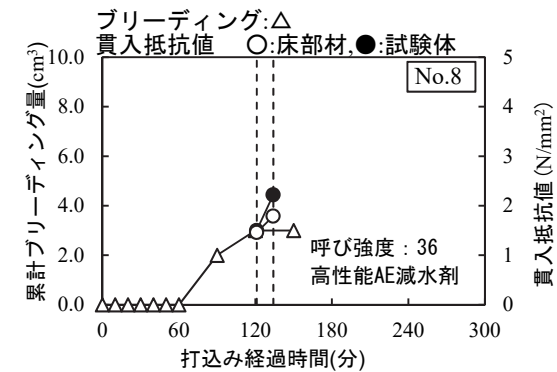
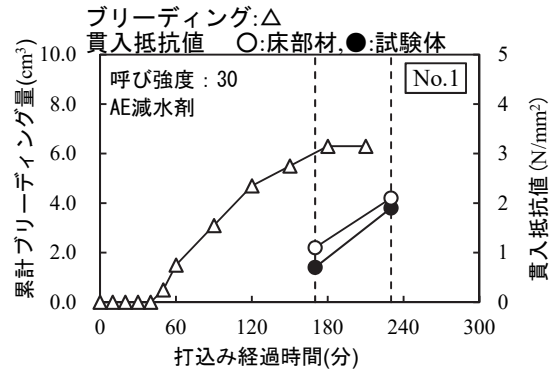


図-2 ブリーディング量、および貫入抵抗値の時間変化の一例

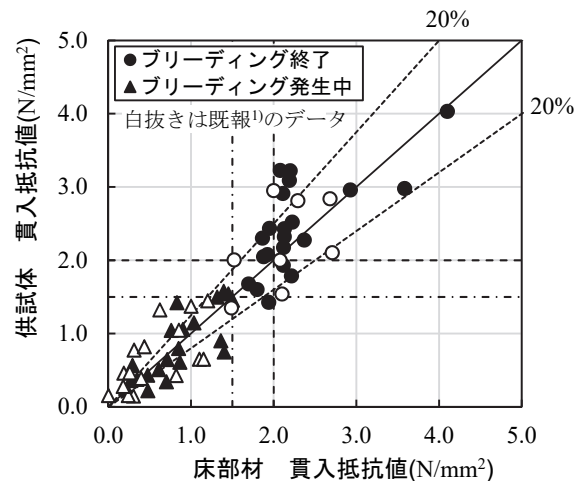


図-3 床部材と供試体の貫入抵抗値の関係

値および Torrent 法に準拠した透気試験より得られた透気係数で評価した。なお、透気試験の測定前に、電気抵抗式の水分計によって含水率を測定した。

硬さ試験は、金属材料やセラミックなどで JIS 規格化されている硬度を測定する試験であり、試験法として押し込み試験法と動的試験法がある。ロックウェル硬さやビッカース硬さに代表される押し込み試験法では、試験片に圧子押し付け、圧痕の深さや面積から硬さを求める。一方、動的試験法のショア硬さ試験では、ハンマーなどを試験面に衝突させ、その時の反発力や角度から硬さを求める。

本調査では、既存の床部材を傷つけない方法である動的試験法のエコーチップ試験を採用し、試験方法は非破壊試験<sup>7</sup>や圧縮強度推定試験方法<sup>8</sup>を参考にした。エコーチップ試験の硬さ値は、衝突させた時の反発速度と打撃速度から求められる硬さ値(HL)とした。

硬さ試験および透気試験の試験面の寸法と測定位置を図-4に示す。表層品質の試験は100×100mmを1面とし、硬さ値の計測を20mm間隔で25点測定した。透気試験は中心位置で2回測定した。

硬さ試験および透気試験の試験回数を表-6に示す。試験面数は、押え方法 A-1、A-2、A-3、A-4 は3面、5面、6面、8面、B-1 および C-1 は各15面、D-1、D-2 は9面、11面とした。各試験の測定数は、押え方法 A-1 を例にとると、試験面を3面実施したため、硬さ試験は1面あたり25点測定の合計75点、透気試験は1面あたり2回測定の合計6回測定した。

3.3 コンクリート表層の硬さ値

床部材の硬さ値の度数分布の一例を図-5に、床部材の硬さ値および透気係数の標準偏差と変動係数を表-7に示す。

図-5には100×100mmの1面に対し、硬さ試験を25点測定した際の硬さ値の度数分布の一例を示した。

エコーチップ試験器による硬さ値の階級は10ごととし、下一桁が0から9までを同一の階級として示した。硬さ値は平均の±20%の範囲を外れる値<sup>7)</sup>については除外し、平均値、標準偏差、変動係数を求めた。

表-7の硬さ値および透気係数については、硬さ試験および透気試験の測定したデータを基に標準偏差と変動係数を求めた。

職人による金ごて押え作業 A-1 の硬さ値は平均値356HLであり、機械式ごてを使用したすべての押え方法より小さい値となった。また、押え方法 A-1 の硬さ値の変動係数は11.6%であり、機械式ごてを使用した押え方法よりばらつきが大きく、硬さ値の除外数は機械式ごてを使用する押え方法より多かった。

鏡面仕様の呼び強度30の押え方法 A-3 および呼び強度36の押え方法 D-2 は押え回数の増加に伴い、一般仕様の押え方法 A-2 の硬さ値に比べて押え方法 A-3 は

表-4 コンクリートの仕様と押え作業の施工手順

No.	呼び強度	押え方法	仕上げの仕様 <sup>*)</sup>	押え作業の施工手順		押え回数
				前工程	最終仕上げ	
1	30	A-1	-	金ごて①+②	→③金ごて	3回
		A-2	一般	羽根①+②	→③トロウエル	3回
		A-3	鏡面	羽根①+②+③	→④モスキート	4回
		A-4	鏡面	羽根①+②+③	→④+⑤モスキート	5回
2	30	B-1	一般	羽根①+②	→③トロウエル	3回
3	30	C-1	一般	羽根①+②	→③フレスノ	3回
8	36	D-1	一般	羽根①+②	→③トロウエル	3回
		D-2	鏡面	羽根①+②+③	→④+⑤モスキート	5回

\*1: No.はコンクリートの調合(表-1)  
 \*2: 仕上げの仕様は光沢が求められる場合に実施される押え方法を「鏡面」、その他の機械式ごてを使用した押え方法を「一般」とし、職人の金ごてによる手押え方法は「-」とした

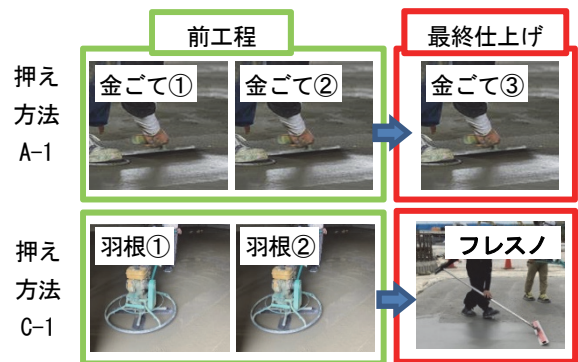


写真-2 押え作業の施工手順の一例

表-5 表層品質の試験項目および方法

試験項目	試験方法
硬さ試験 (硬さ値)	エコーチップ試験: 測定位置は100×100mmを1面とし、測定点を縦5点×横5点の計25点測定した。
透気試験 (透気係数)	Torrent 法に準拠した透気試験機を用い、測定は100×100mmの中心を2回実施した。また、測定前に含水率を電気抵抗式の水分計によって測定した。

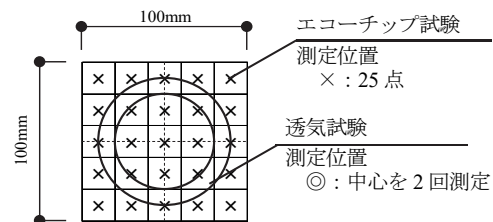


図-4 硬さ試験および透気試験の試験面の寸法と測定位置

表-6 硬さ試験および透気試験の試験回数

押え方法	A-1	A-2	A-3	A-4	B-1	C-1	D-1	D-2
試験面数	3	5	6	8	15	15	9	11
硬さ試験の測定数	75点	125点	150点	200点	375点	375点	225点	275点
透気試験測定数	6回	10回	12回	16回	30回	30回	18回	22回



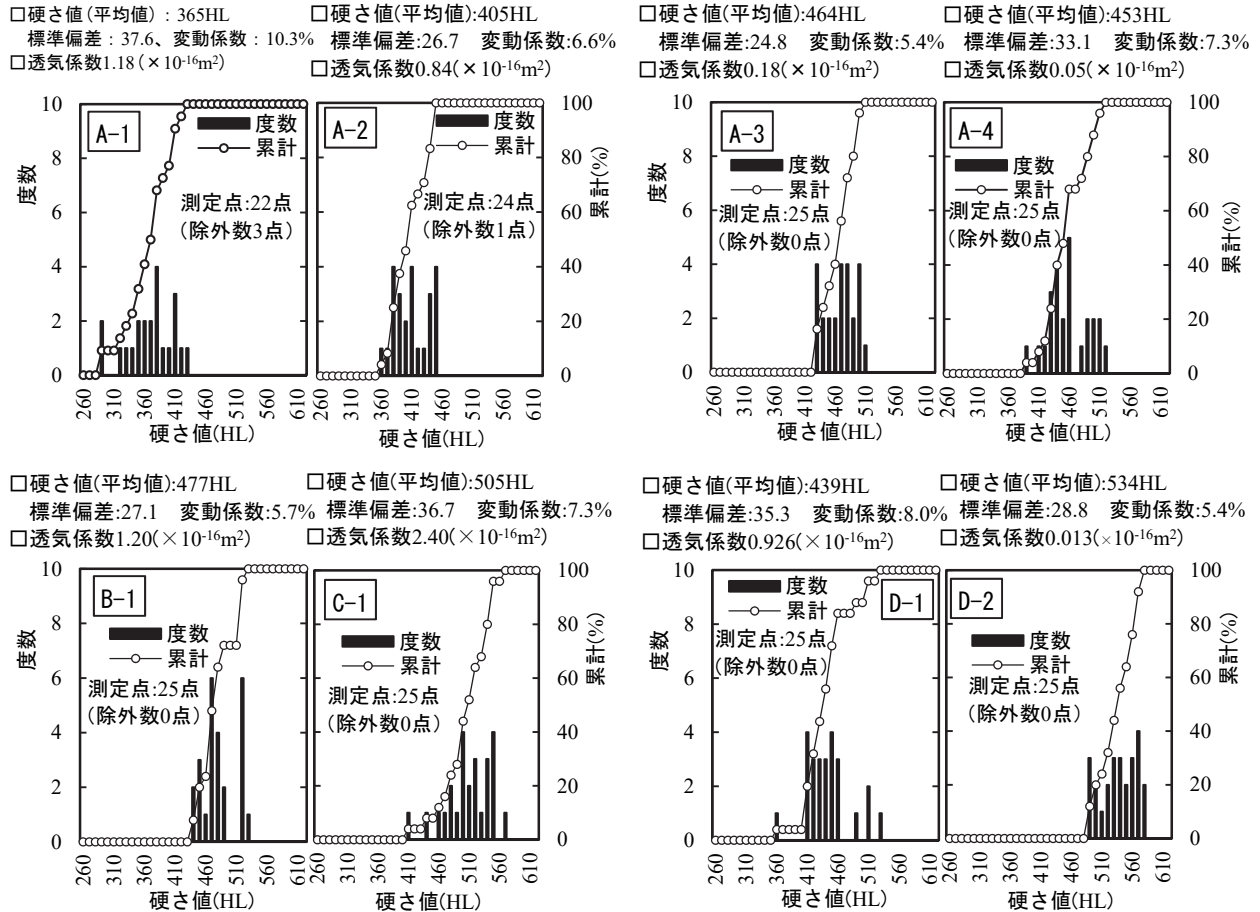


図-5 床部材の硬さ値の度数分布の一例

表-7 硬さ値および透気係数の標準偏差と変動係数

押え方法	A-1	A-2	A-3	A-4	B-1	C-1	D-1	D-2	
床の仕上げ仕様	-	一般	鏡面	鏡面	一般	一般	一般	鏡面	
試験面数*	3	5	6	8	15	15	9	11	
硬さ値 (HL)	測定数	75	125	150	200	375	375	225	275
	除外数	10	9	2	1	0	2	2	1
	平均値	356	405	464	461	477	506	437	530
	標準偏差	41.3	28.0	29.7	42.0	28.0	29.9	28.8	33.3
	変動係数	11.6	6.9	6.4	9.1	5.9	5.9	6.6	6.3
透気係数 ( $\times 10^{-16}m^2$ )	測定数	6	10	12	16	30	30	18	22
	平均値	1.24	0.76	0.25	0.04	2.12	2.15	0.70	0.008
	標準偏差	0.04	0.31	0.20	0.02	1.78	0.49	0.26	0.005

\* 試験面数は $100 \times 100mm$ を1面とした面数(図-4)  
(1面あたり硬さ試験を25点、透気試験を2点測定)

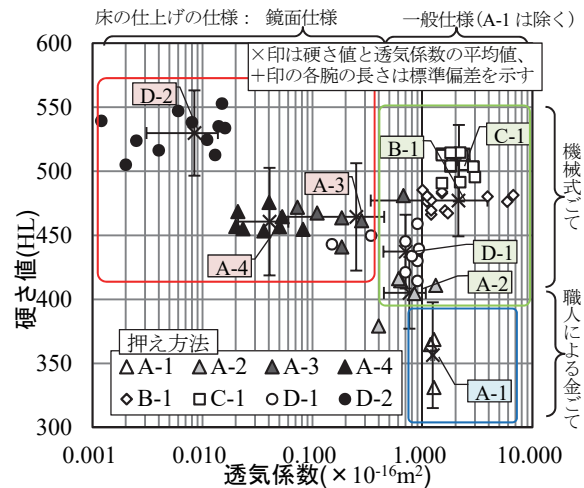


図-6 床部材の透気係数と硬さ値の関係

60HL程度、押え方法D-1の硬さ値に比べて押え方法D-2は100HL程度、それぞれ大きくなった。これらの結果から、床の仕上げを一般仕様から鏡面仕様にする事でコンクリート表層の硬さ値が増加することを確認した。

鏡面仕様の押え回数が4回、5回の押え方法A-3、A-4では、押え回数に増加の伴う硬さ値に大きな差は見られなかった。

### 3.4 透気試験

床部材の透気係数と硬さ値の関係を図-6に示す。各押え方法の試験データは、1面に実施した硬さ試験と透気試験の平均値を示した。また、図中のx印は表-7の各押え方法の硬さ値と透気係数の平均値を、+印の各腕の長さは標準偏差を示す。

鏡面仕様とする押え方法A-3、A-4、D-2の透気係

数は $1.0 \times 10^{-16} \text{m}^2$ を下回る結果となり、一般仕様の押え方法より良好な床部材であることを確認した。また、鏡面仕様の A-3、A-4 では、押え回数を 4 回から 5 回にすることで透気係数が小さくなり、耐久性低下の原因となる有害物質の侵入に対するコンクリートの密実性が高い評価となった。このことから、押え回数の増加によってコンクリート表層の品質が向上することを確認できた。

押え回数を 3 回とした一般仕様および職人による金ごて押え方法 A-1 の透気係数は $1.0 \times 10^{-16} \text{m}^2$ 付近であり、機械式ごての使用回数が少ない場合には、透気係数の向上は確認できなかった。

#### 4. まとめ

今回、既報りの管理方法に沿い、押え作業がコンクリート表層の品質に及ぼす影響について試験施工を実施した。その結果から得られた知見を以下に示す。

- i. 貫入抵抗値が  $2.0 \text{ N/mm}^2$  以上であれば、ブリーディングが終了しており、貫入試験による施工管理が可能なことを再検証できた
- ii. 打込み箇所と同一のコンクリートで製作した供試体による貫入試験で直床仕上げの施工管理が可能である
- iii. 機械式ごてを使用することで硬さ値が大きくなる傾向を確認できた
- iv. 床の仕上がりを一般仕様から鏡面仕様の押え方法にすることで、硬さ値は大きくなる傾向を確認できた
- v. 鏡面仕様の押え作業の透気係数は $1.0 \times 10^{-16} \text{m}^2$ 以下となり、良好な床部材であることを確認できた

#### 5. あとがき

直床仕上げの押え方法に機械式ごてを使用することでコンクリート表層の硬さ値が増加する傾向を確認できた。また、鏡面仕様にすることで高品質な床が提供可能であることを確認した。

今回の調査から得た硬さ値と透気係数の関係を示すデータ数は十分とはいえないが、コンクリートの品質向上を実現する施工方法を確立する見通しは得られた。今後は、「直床仕上げの施工管理」の施工手順の標準化を図るべく、技術資料の収集を継続し、技術の確立に努める予定である。

#### 【参考文献】

- 1) 伊藤 淳、河野政典、赤星博仁、門井大祐、「直床仕上げの施工管理手法に関する実験的検討」、奥村組技術研究年報、pp.85-90、2019.9
- 2) 三上貴正、常深安朗、坂井映二、「床コンクリートの表面強度に及ぼすごて仕上げ方法の影響」、日本建築学会構造系論文集、第 531 号、pp.15-20、2000.5
- 3) 三上貴正、早野博幸、小野英哲、「機械ごてによるコンクリート直床仕上げ床の施工条件判定のためのコンクリート性状の測定方法に関する研究」日本建築学会構造系論文集、第 465 号、pp.11-18、1994.11
- 4) 三上貴正、荒川琢也、小野英哲、「コンクリート直床仕上げ床の仕上がり及びごての仕様およびコンクリート性状の影響の考察」、日本建築学会構造系論文集、第 453 号、pp.27-37、1993.11
- 5) 葛城浩三、「コンクリート床版の表面はく離」、セメント・コンクリート、No.237、pp.23-27、1966.11
- 6) 五十嵐賢次など、「コンクリートスラブの表面剥離に関する実験」、コンクリート工学年次論文集、Vol.39、No.1、pp.1429-1434、2017
- 7) 日本建築学会、「コンクリート強度推定のための非破壊試験方法のマニュアル」、丸善、pp.10-28、1983.2
- 8) 野中 英、湯浅 昇、三谷和裕、金森誠治、「エコーチップを用いたコンクリートの圧縮強度推定試験方法の提案」、日本建築学会技術報告集、第 23 巻、第 54 号、pp.397-402、2017.6

# 温度変化が粘土からの重金属溶出機構に及ぼす影響

## Effects of Temperature Change on the Mechanism of Heavy Metal Leaching from Clay

小河篤史\* 目黒 緑\*\* 白石祐彰\*\* 長 千佳\* 大塚義一\*\*\*

### 要 旨

本研究では、地盤温度の変化が土中からの重金属類の溶出特性に与える影響を確認するため、自然的原因で重金属溶出量の高い粘土に対して、温度条件を変化させて拡散溶出試験を行った。その結果、実験温度が高いほど拡散溶出が促進されるが、溶出機構は温度によって変化しないことが示された。本研究の成果から、地中熱利用技術の導入等に起因して地中の温度変化が予想される場合には、その影響を考慮して安全性を事前に評価し、許容し得る温度変化を明確にすることの重要性が示された。

キーワード：粘土、温度、拡散溶出、重金属

### 1. はじめに

近年、脱炭素社会の実現に向けて再生可能エネルギーの活用促進が図られており、地盤分野に関わりが深いものとして地中熱の利活用が挙げられる。一般的に地下 10m 以深の温度は季節を問わず一定とされており、この安定的な地中熱を建物の空調に利用する地中熱ヒートポンプシステム（Ground Source Heat Pump Systems：GSHPs）がよく知られている。例えば、地中熱利用で先行する欧州では、基礎杭に熱交換機能を付与したエナジーパイルを用いて GSHPs を構成し、空港の空調として利用した事例がある<sup>1)</sup>。我が国でも、大阪市で大規模な帯水層蓄熱の実証事業が進められており、今後の普及展開が期待されている<sup>2)</sup>。このように、地中熱活用が世界的な拡がりを見せつつある一方で、地中の温度変化に起因する地盤変状、有害物質の溶出増大および微生物環境の変化等が引き起こされる可能性が指摘されている<sup>3,4,5)</sup>。また、国内には自然的原因で有害な重金属を多く含む地盤が点在していることが知られており<sup>6,7,8)</sup>、無秩序に地盤温度を高めることは重金属等による健康被害のリスクを高めることに繋がりがかねない。例えば齊藤ら<sup>9)</sup>は、深度 50m までの原位置熱負荷試験を実施し、地下水温度と砒素やほう素の濃度に相関がみられることを確認しているが、帯水層の温度変化が重金属類の溶出特性に及ぼす影響に関する研究はあまりなされていないのが現状である。そこで本研究では、自然由来の重金属等含有粘土に対して温度条件を変化させた溶出試験を実施することで、溶出特性の温度依存性を追及した。

### 2. 使用材料と実験方法

#### 2.1 使用材料

本研究では、大阪地域の代表的な沖積粘土である Ma13 層を用いて供試体を作製した。Ma13 層は大阪平野の西部に広く分布しており、自然由来の砒素、ふっ素、ほう素等を含むことが知られている。大阪市内には土壤汚染対策法により自然由来特例区域の指定を受けている土地が点在しているが、この指定のほとんどは当該 Ma13 層に起因するとされている。当該地層は、大阪駅近郊の再開発事業にもなって掘削機会が増加しており、発生土は汚染土壌として場外の洗浄施設やセメント工場等で処理されて資源として再利用されている。使用材料の基礎物性を表-1に、環境省告示第 18 号に基づく溶出試験および底質調査法に基づく全含有量試験の結果を表-2に示す。

表-1 使用材料の基礎物性

試験項目	試験結果	試験方法
土粒子密度 (g/cm <sup>3</sup> )	2.634	JGS0111
礫分 2~75 mm (%)	0	JGS0131
砂分 0.075~2 mm (%)	3.5	〃
シルト分 5~75 μm (%)	75.0	〃
粘土分 5 μm 未満 (%)	21.5	〃
最大粒径 (mm)	2	〃
自然含水比 (%)	40.5	JGS0121
液性限界 (%)	43.0	JGS0141
塑性限界 (%)	28.8	〃
塑性指数	14.2	〃
地盤材料の分類名	シルト(低液性限界)	JGS0051

\* 土木本部土木部環境技術室 \*\* 技術本部技術研究所知的財産管理室

\*\*\* 技術本部技術研究所環境研究グループ \*\*\*\* 技術本部技術戦略部

表－2 使用材料の溶出試験、全含有量試験の結果

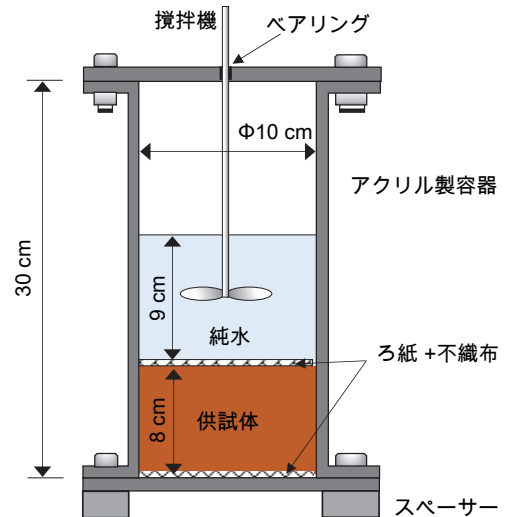
物質名	溶出量 (mg/L)	全含有量 (mg/kg)
Na	190	17000
K	23	12000
Ca	20	7100
Mg	20	6800
B	0.60	49
F	0.81	400
As	0.005	8.9
Pb	<0.0001	20

2.2 実験方法

本研究では、US EPA Method 1315 Compacted Granular Leach Test (CGLT) <sup>10)</sup>を参考に、圧密粘土に対して連続バッチ型の拡散溶出試験を実施した。水中の物質濃度を測定する方法としては、抽出溶液を交換しない単一バッチ型の試験が用いられている。一方、連続バッチ型とは間欠的に抽出溶液の更新を行う試験を指しており、バッチ型でありながら濃度の経時変化をとらえることができるため長期的な溶出挙動を予測し得るといった特徴を有する。本研究では、圧密粘土に対して異なる温度条件下で試験を行うことで、温度の違いに起因する溶出量の増減と溶出メカニズムを確認した。

供試体作製は、全て試験温度（10、20、35、50℃）に調整した室内にて実施した。まず、試料から貝殻等の異物を除去するため、適宜純水を加えて 2mm の篩で裏漉しした。次に、含水比 55%に調整した試料を試験温度に制御された室内で 24 時間以上静置して馴染ませた後、1000g を分取して直径 10cm、高さ 30cm の円筒形セルに投入した。このとき、供試体内への空気混入を少なくするため試料を 3 回に分けて投入し、木槌で振動を与えて高さが 8.0cm になるように充填した。その後、乾燥密度の異なる供試体を得るために圧密圧力を 30、100、300kPa の 3 パターンとし両面排水条件で圧密し、ルート t 法で一次圧密の完了を確認して試験に供した。

試験装置の概要を図－1 に示す。US EPA Method 1315 では、供試体上部の溶媒体積と供試体表面積の比が 9±1mL/cm<sup>2</sup> を維持することとされているため、本試験では供試体上部に予め試験温度に調整した純水を注水して 9 cm の水位を与えると同時に、試験中に溶媒内で濃度差が生じないように 20rpm で緩速撹拌を行った。このとき、溶媒の初期水位をアクリル容器に明示し、試験中に水位変動を確認することで蒸発の有無を把握したが、水位変動はみられなかった。また、溶媒中の溶出成分の濃度を供試体内部の濃度に対して十分に低く維持するため、試験開始から 1、2、4、8、16、32 日後に溶媒を全量入れ替えており、回収した溶媒を分析して各物質の濃度を測定した。なお、本実験の分析検液は、環告 18 号あるいは底質調査法に準拠して作成し、有害物質や Na、K、Ca、Mg のイオン類を含めた定量分析は JIS K 0102 に準拠して実施した。



図－1 試験装置の概要

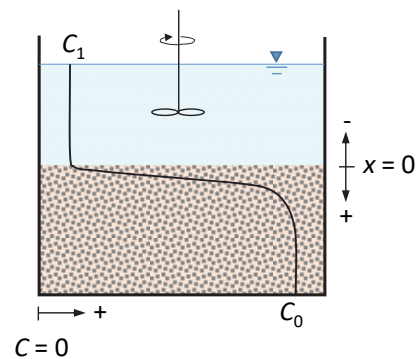
3. 溶出機構の判定方法

帯水層中の土壌から地下水への物質移動は、土壌に含まれる物質が、①土粒子表面への拡散浸出（内部拡散）、②土粒子表面から間隙水への放出、③間隙水内の移流分散拡散を経ることによる。本研究で採用した CGLT は、③のうちの間隙水内の拡散に着目して、供試体上部に設定したバルク水への拡散現象として一次元モデルで評価する。供試体上部に蒸留水を加えると、間隙水および蒸留水のそれぞれに存在する物質の濃度差によって濃度勾配が生じ、供試体から蒸留水への拡散移動が生じる。これを模式的に表したものが図－2 である。

供試体のある断面におけるある物質の単位時間単位面積当たりの移動量すなわちフラックスはフィックの第一法則から式(1)で表される。

$$J = -nD_e \frac{dC}{dx} \tag{1}$$

ここで、 $J$  はフラックス、 $n$  は間隙率、 $D_e$  は有効拡散係数、 $C$  は濃度、 $x$  は粘土層表面から距離（土槽内部側を正）である。いま、物質移動により間隙水の濃度は



図－2 試験装置の概要

徐々に変化するため、次式が成り立つ。

$$\frac{dC}{dt} = \frac{dJ}{dx} \quad (2)$$

したがって、

$$\frac{dC}{dt} = -nD_e \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (3)$$

いま、バルク水の濃度をゼロとし、初期間隙水濃度を  $C_0$  とおき、ある深さ以上では初期間隙水濃度のまま保たれると仮定する。すなわち、

$$t = 0, x > 0; C = C_0$$

$$t \geq 0, x = 0; C = 0$$

$$t > 0, x = \infty; C = C_0$$

これを解くと、

$$\frac{C}{C_0} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^\zeta \exp(-\zeta^2) d\zeta \quad (4)$$

ここで、

$$\zeta = \frac{x}{2\sqrt{nD_e t}} \quad (5)$$

なお、実験中のバルク水の濃度は、供試体からの物質移動によって時間経過にともない上昇する。そこで、濃度をゼロとみなせるようにするために、実験では所定の時間が経過したら溶媒を全量蒸留水に交換する。以上より、供試体表面からバルク水へのフラックス（溶出フラックスという） $J$  の時間変化として式(6)が、その積分形である時間  $t_{i-1}$  から  $t_i$  の間の溶出量を  $q_i$  として式(7)がそれぞれ得られる。

$$J = C_0 \sqrt{\frac{nD_e}{\pi t}} \quad (6)$$

$$q_i = 2C_0 \sqrt{\frac{nD_e}{\pi}} (\sqrt{t_i} - \sqrt{t_{i-1}}) \quad (7)$$

ここで、式(6)の両辺対数をとると式(8)になる。すなわち、 $\log t$  と  $\log J_i$  の関係として勾配-0.5 の直線が得られた場合は、拡散律速と判定することができる。

$$\log J = -\frac{1}{2} \log t + C \quad (8)$$

一方、拡散溶出試験の各分画において溶媒中の濃度が毎回ほぼ一定となる場合、すなわち飽和濃度に達して溶出が停止する場合は、フラックスは経過時間にのみ依存する。このとき、溶媒を入れ替えるタイミングを 1、2、4、8 日のように累乗型とした場合、 $\log t$  と  $\log J_i$  の関係として勾配-1.0 の直線が得られる。また、溶解が律速となる場合は、フラックスは時間に比例するため常に一定となり、勾配 0 のグラフが描かれる。さらに、各溶出形態において物質が枯渇して溶出が停止する場合は、枯渇した時点で勾配に変化がみられる。上記の溶出機構判定方法は肴倉ら<sup>11, 12)</sup>によって詳述されており、その概念は図-3 のようになる。

本実験では各分画のバルク水中の濃度を測定し、単位面積あたりの溶出量  $q_i$  を式(9)によって算出した。

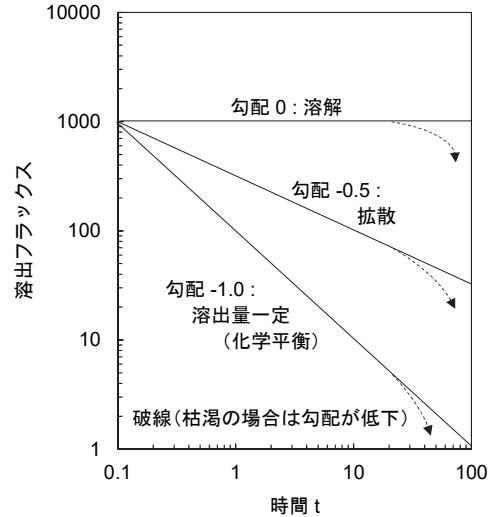


図-3 溶出機構と勾配の関係

$$q_i = \frac{C_i V}{A} \quad (9)$$

ここで、 $C_i$ ：各分画のバルク水濃度、 $V$ ：バルク水体積、 $A$ ：カラムの断面積である。このとき累積溶出量  $M_i$  は式(10)のように表される。

$$M_i = \sum_{n=1}^i q_n \quad (10)$$

また、溶出フラックスの実測値は式(11)から算出できる。

$$J_i = \frac{q_i}{t_i - t_{i-1}} \quad (11)$$

このとき、式(11)に式(6)および式(7)を代入すると、式(12)を得ることができる。この式は、物質移動が拡散律速であるときの、ある分画におけるフラックスに対応する時刻を表している。

$$\bar{t}_i = \left( \frac{\sqrt{t_i} + \sqrt{t_{i-1}}}{2} \right)^2 \quad (12)$$

本研究では、これによって  $\log \bar{t}$  を求め  $\log J_i$  との関係から溶出機構を判定した。拡散律速の判断は、各分画の溶出フラックスとの関係を両対数グラフにプロットし、その決定係数が 0.95 以上且つ直線近似線の勾配が-0.35 から-0.65 の範囲にある場合としている<sup>13)</sup>。なお、本研究では、試験開始から 1、2、4、8、16、32 日後に溶媒の入れ替えを行ったため、各分画の  $t_i$  および拡散律速が成立する場合の理論上の溶出量の濃度比は、それぞれ式(12)、式(7)から表-3のように計算できる。

表-3 各分画の浸漬期間と濃度比

分画	浸漬始期-終期 (day)	$\bar{t}$ (day)	理論上の濃度比 $q_i/q_1$
1	0-1	0.3	1.00
2	1-2	1.5	0.41
3	2-4	2.9	0.59
4	4-8	5.8	0.83
5	8-16	11.7	1.17
6	16-32	23.3	1.66

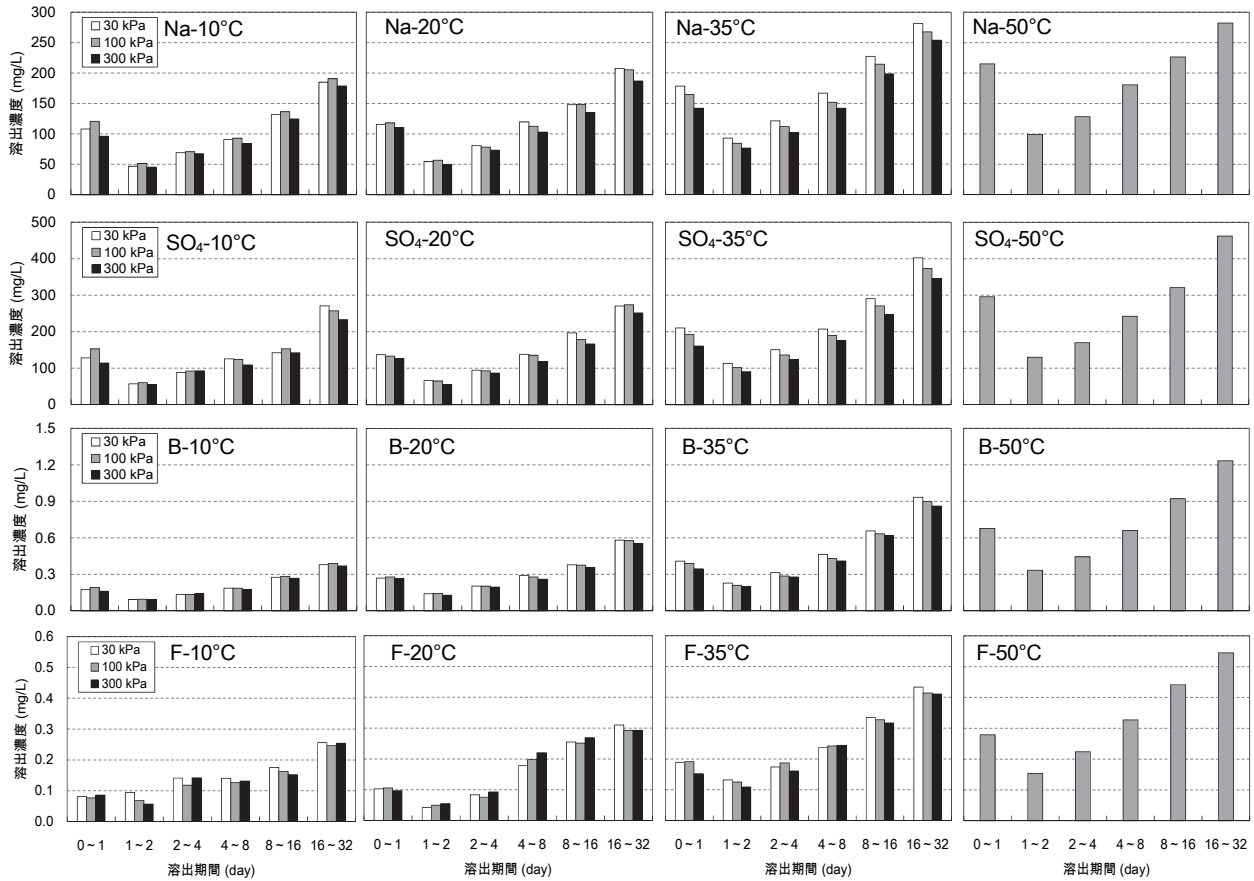


図-4 各分画の溶出濃度

4. 実験結果と考察

4.1 溶出量および溶出機構に及ぼす温度の影響

図-4に代表的な陽イオンとしてナトリウム: Na、同陰イオンとして硫酸イオン: SO<sub>4</sub>、有害物質としてほう素: Bおよびふっ素: Fの溶出量を示した。なお、試料の数量の都合上、50°C条件での圧密圧力は100kPaのみとした。いずれの結果も、第1分画から第2分画にかけて溶出濃度が低下し、その後は最終分画まで階段状に溶出濃度が増大した。これは、拡散が律速となる場合の典型的なパターンであり、表-3に示した理論上の濃度比とよく一致している。ここでは、低温条件に比べて高温条件において溶出期間と温度条件が同じ場合には圧密圧力が大きいほど、すなわち供試体密度が高いほど溶出濃度が小さくなる傾向がみられた。これは、乾燥密度が増大することで供試体の間隙率が減少した結果、物質が間隙内を直線的に移動することができなくなり、表層に到達するまでの移動距離が増大したためと考えられる。

図-5は間隙水からバルク水への溶出フラックスと時間の関係である。ここでの溶出フラックスは、各温度条件において圧密圧力100kPaの供試体で実施した拡散溶出試験の結果から分画毎に算出している。また、それらの近似直線の勾配から溶出機構を判定した結果を各図下部に表で示した。本試験では、経過時間が長くなるほど

各物質の溶出フラックスは一律に低下し、本試験の範囲ではおおよそ1オーダーの変化がみられた。これは、経過時間が長くなるにつれて上部バルク水に近い供試体上部から間隙水の濃度が低下し、間隙水と供試体上部バルク水の濃度勾配が小さくなるためと考えられる。また、経過時間が同じであれば温度が高いほど溶出フラックスは大きくなる傾向にあったが、ほう素とふっ素以外の物質では10°Cと20°Cではグラフはほぼ同一線上に重なっており顕著な差はみられなかった。一方、いずれの物質においても50°Cのグラフの勾配が他の温度条件と比較するとわずかに急になる傾向がみられた。この傾向は、特に試験後半ほど顕著であるため、50°C条件では浸漬時間を長くした場合、粘土に含まれる可溶成分が試験の経過とともに溶媒側に移行した結果、試験後期では可溶成分が枯渇しつつあったため、濃度勾配が小さくなったことが要因として推測される。また、特に微量成分では溶媒を交換せずに浸漬期間を長くとした場合、溶媒と供試体間隙水の濃度差が小さくなって移行速度が低下した可能性も否定できない。本試験では、図-5の各プロットの近似直線を求め、その勾配が-0.35~-0.65の範囲にある場合に内部拡散が律速と判定した。ここで、カリウムの20°C条件の第1分画のプロットは特異値の可能性があるので除外している。その結果、全ての物質で、いずれの温度条件においても内部拡散が律速と判定

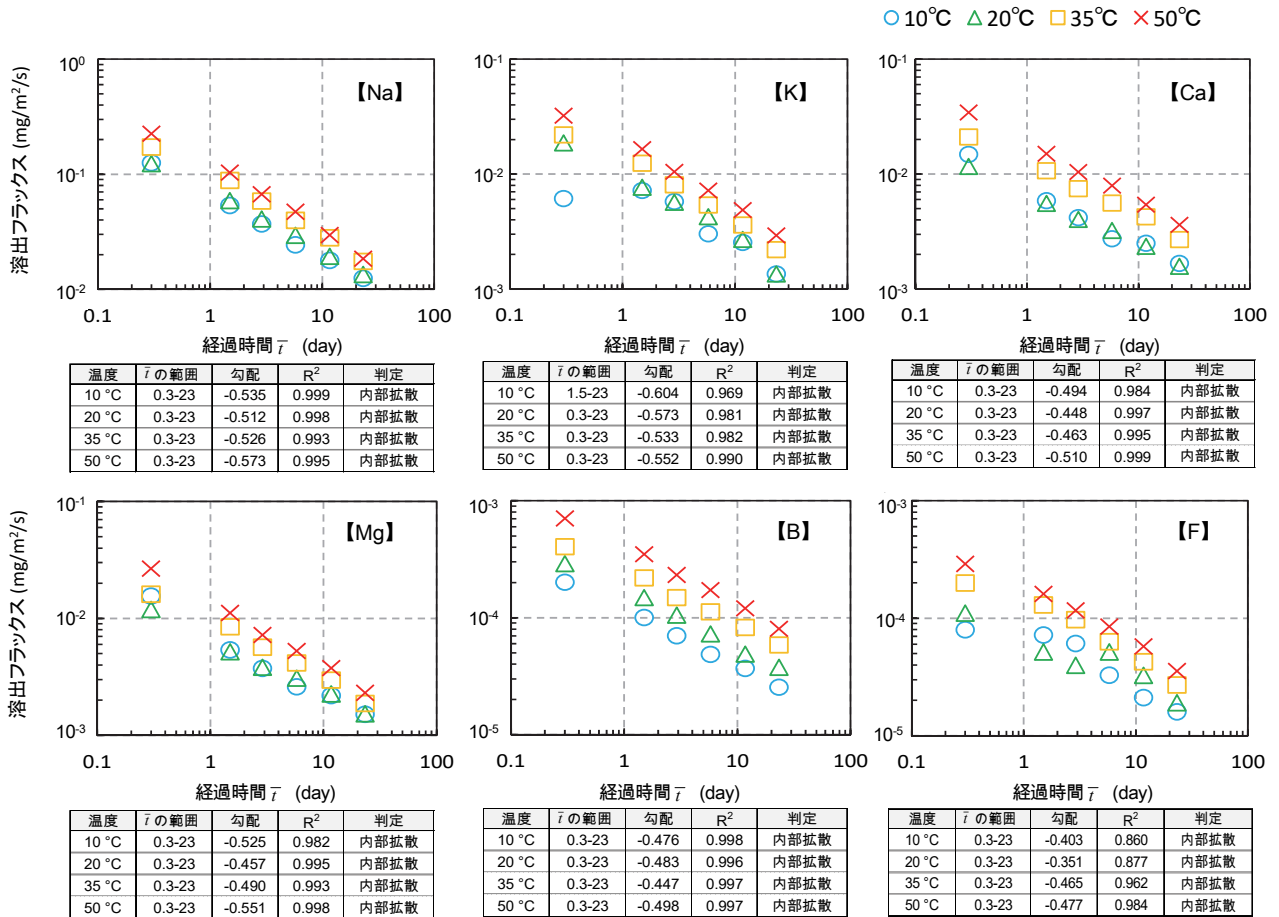


図-5 溶出フラックスと経過時間の関係

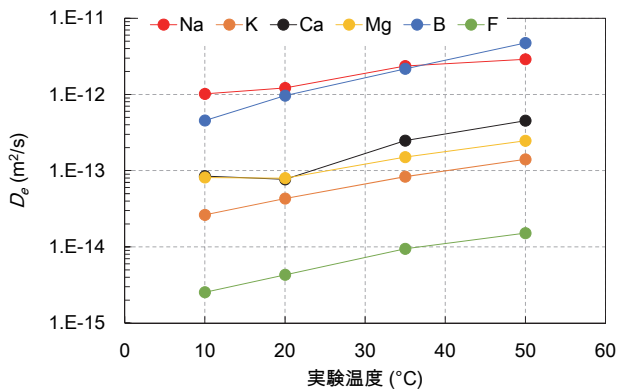


図-6 実験温度と有効拡散係数の関係

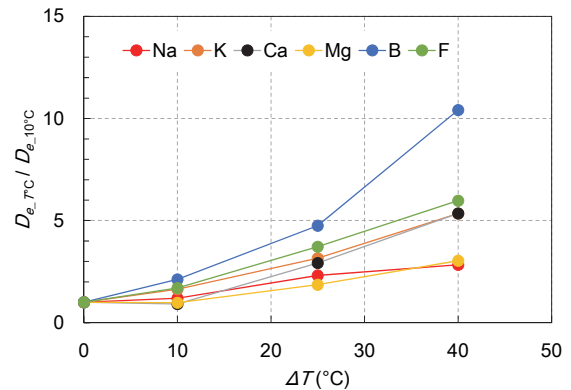


図-7 温度変化と有効拡散係数変化率の関係

された。このことは、温度変化が生じた場合でもその溶出機構は変化しないことを示しており、今回の試料に対しては溶出機構に温度依存性がないことが明らかとなった。ただし、これはあくまでも単一試料に対する結果であり、物性の異なる土壌に対して一般化されたものではない点に留意する必要がある。

#### 4.2 拡散係数に及ぼす温度の影響

ここでは、実験で得られた溶出フラックス、初期濃度および間隙率から式(6)によって有効拡散係数:  $D_e$  を算出した結果を図-6に示す。なお、グラフのプロットは、

各温度の圧密圧力 100kPa の条件で 6 つの分画毎に有効拡散係数を算出し、それらの対数平均をとって代表値とした。図-6に示されるように、いずれの物質でも拡散係数は昇温ともなって増加傾向がみられた。図-7は、温度変化と有効拡散係数の変化率の関係を示している。ここで、有効拡散係数変化率は、任意温度の有効拡散係数を 10°C のそれで除したものである。有効拡散係数は、温度上昇が 10°C の場合に 1~2 倍、25°C では 2~5 倍、40°C では 3~10 倍程度となった。この温度依存性には物質毎に違いがみられ、土壌汚染対策法で有害物質に指

定されているほう素やふっ素で増加率が大きくなった。この結果は、温度上昇によって汚染物質の溶出が助長されることを示しているが、地中熱利用で先行する欧州では、GSHPs の利用に際し地中温度の変化を 2~3°C 程度に抑えるよう規制が設けられている等<sup>14)</sup>、温度変化を適切な範囲で制御することで安全性を担保し得ることも合わせて示している。本研究の結果、物質によって温度の影響が異なる理由として、それらの存在形態が異なるためと推察されるが、現時点では明らかにできていない。今後、逐次抽出法等によって物質毎の存在形態を確認し、考察を深める必要がある。

## 5. 結論

本研究では、自然由来の重金属含有粘土に対して供試体の初期乾燥密度および実験温度を変化させて拡散溶出試験を実施した結果、次のことが明らかになった。

- i. 実験温度が高くなるほど供試体からバルク水への溶出フラックスが増大し、バルク水中の物質濃度が高くなる
- ii. 本実験の温度範囲においては、実験温度が変化しても溶出機構への影響は確認されなかった
- iii. 拡散係数には温度依存性があり、昇温にともなって上昇傾向がみられるが、この増加率は物質によって異なる

### 【謝辞】

実験結果の取りまとめにあたり、京都大学大学院地球環境学堂の勝見武教授、高井敦史准教授ならびに国立環境研究所資源循環領域試験評価・適正管理研究室の肴倉宏史室長からご指導をいただいた。また、拡散溶出試験の遂行にあたり、奥村組技術研究所の萩原進氏にご尽力いただいた。ここに記して謝意を表する。

### 【参考文献】

- 1) Pahud, D., Hubbuch, M.: Measures thermal performances of the energy pile system of the dock midfield at Zürich airport, Proceedings European Geothermal Congress, 2007
- 2) 大阪府域における地盤環境に配慮した地下水の有効利用に関する検討会議、「大阪府における地盤環境に配慮した地下水の有効利用に関する検討報告書」、2019
- 3) 環境省水・大気環境局、「地中熱利用にあたってのガイドライン（改訂版）」、pp.37-71, 2015
- 4) 斎藤健志、小松登志子、「地中熱ヒートポンプが地下環境に与える影響 —持続的利用に向けて—」、地下水学会誌、Vol.56、No.1、pp.15-25、2014
- 5) Bonte, M., Stuyfzand, P.J., Hulsmann, A., Van Beelen, P.: Underground thermal energy storage: Environmental risks and policy developments in the Netherlands and European Union, Ecology and Society, Vol.16, No.1, 22, 2011
- 6) 須藤孝一、米田 剛、小川泰正、山田亮一、井上千弘、土屋範芳、「竜の口層の堆積岩における重金属類の溶出挙動および形態変化に及ぼす風化の影響」、応用地質、Vol.51、No.4、pp.181-190、2010
- 7) 高橋 良、原 惇子、駒井 武、八幡正弘、遠藤祐司、「幌別硫黄鉱山地域における砒素や重金属を溶出させる熱水変質岩の地質学的特徴」、応用地質、Vol.50、No.4、pp.228-237、2009
- 8) 伊藤浩子、勝見 武、「土壤汚染対策法に基づく調査結果から見た西大阪地域における自然由来重金属等の土壤溶出量の特徴」、地盤工学ジャーナル、Vol.15、No.1、pp.119-130、2020
- 9) 斎藤健志、濱本昌一郎、竹村貴人、小松登志子、「地下熱環境攪乱が地下水質に及ぼす影響評価に向けた原位置長期熱負荷試験」、第 13 回環境地盤工学シンポジウム発表論文集、pp.29-32、2019
- 10) United States Environmental Protection Agency Method 1315: Mass transfer rates of constituents in monolithic or compacted granular materials using a semi-dynamic tank leaching procedure, [https://www.epa.gov/sites/default/files/2017-10/documents/method\\_1315\\_-\\_final\\_8-3-17.pdf](https://www.epa.gov/sites/default/files/2017-10/documents/method_1315_-_final_8-3-17.pdf), 2022 年 3 月 11 日閲覧
- 11) 肴倉宏史、崎田省吾、遠藤和人、貴田晶子、大迫政浩、「連続バッチ型溶出試験における再生材からの成分溶出挙動の解析」、第 7 回環境地盤工学シンポジウム論文集、pp.163-168、2007
- 12) 肴倉宏史、水谷 聡、田崎智宏、貴田晶子、大迫政浩、酒井伸一、「利用形態に応じた拡散溶出試験による廃棄物溶融スラグの長期溶出量評価」、廃棄物学会論文誌、Vol.14、No.4、pp.200-209、2003
- 13) 大迫政浩、貴田晶子、遠藤和人、酒井伸一、嘉門雅史、肴倉宏史、「再生建材の循環利用過程における長期的な環境影響評価のための促進試験系の開発及び標準化に関する研究」、平成 17 年度環境保全研究成果集 CD-ROM、pp.48-1-48-2、2005
- 14) Haehnlein, S., Bayer, P., Blum, P.: International legal status of the use of shallow geothermal energy, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol.14, No.9, pp. 2611-2625, 2010



# 残餌由来のアンモニア処理に寄与する細菌に関する 基礎的研究

## Basic Research on Bacteria Contributing to the Disposal of Ammonia Generated by Residual Feed

白石祐彰\* 大谷 明\*\* 小河篤史\*\*\* 黒瀬英俊\*\* 羽瀨博臣\*\*\*

### 要 旨

水産物の閉鎖循環式陸上養殖では、飼育水中の有害なアンモニアを処理しなければならない。このアンモニアの除去には、生物学的廃水処理が行われることが多いものの、この処理プロセスを担っている微生物の挙動や群集構造についての具体的な解析はほとんど行われていない。そこで本研究では、水槽への酸素供給にナノバブル装置を用いて、微細な気泡が常時水中に存在する環境下における、残餌由来のアンモニア態窒素濃度の減少に寄与する細菌叢を調べるため、水槽の水のろ過残渣から細菌の DNA を抽出して、次世代シーケンサーを用いた DNA の塩基配列解析を実施し、優占していた菌種の特特定を試みた。その結果、アンモニア態窒素の大部分は、好気性細菌によりアミノ酸を合成するための同化に利用されたと推察された。また、水槽の水から培養したバチルス属細菌と酵母菌の特性から適性が見込まれる分離株を特定した。

キーワード：閉鎖循環式陸上養殖、アンモニア態窒素、ナノバブル装置、同化、好気性細菌

### 1. まえがき

沿岸漁業による水揚げ量は年々減少している一方、養殖による魚類生産が年々増えてきている。魚類養殖には、海面を利用する海面養殖と陸上で実施する陸上養殖がある。

陸上養殖は、飼育するための大規模な水槽やろ過システムの設置が必要であることから、大きな初期投資が必要となること、生物ろ過を行うための大量のろ材の洗浄に労力を要することなどの欠点がある。しかし、陸上で作業ができて運営が容易となる点、天候や赤潮等の外的要因を排除できる点など、海面養殖の問題点を解決できるといった大きな長所がある。

従来の閉鎖循環式陸上養殖システムは、魚から排出される糞や鱗等を飼育水から取り出すための物理濾過槽、魚にとって有害なアンモニアを微生物を利用して毒性の低い硝酸に変換する（硝化作用）ための生物濾過槽、蓄積する窒素成分を除去するための脱窒槽、飼育水槽中のタンパク質等を除去するための泡沫処理装置等、多くの装置を適宜接続することで、陸上での海水魚の飼育を可能としてきた<sup>1)</sup>。

飼育水への酸素供給は、一般的にはエアープンプで空

気の圧力を高め、エアーストーンで水中に空気を送り込む方式が使われている。一方、筆者らは、閉鎖循環式陸上養殖システムに、エアープンプの代わりに、ナノバブル装置の適用を検討している。ナノバブルは、直径が数十ナノ～数百ナノ（nm）程度の微細な気泡で、水中で数週間から数ヶ月程度の寿命を持つことが知られている<sup>2)</sup>。ナノバブルでの酸素供給により、水中の溶存酸素濃度を効率的に上げることで、水質の改善および水産生物の品質の向上を期待している。

閉鎖循環式陸上養殖の水浄化では、水中に浮遊あるいは沈殿している有機懸濁物の除去と、水に溶解している毒性の強いアンモニア態窒素の除去が重要となる。残餌は時間が経つと細菌により分解され、アンモニア態窒素が溶出する。給餌した餌に含まれる窒素の35%以上が、アンモニア態窒素となって飼育水中に溶出すると試算されている<sup>3)</sup>。

本研究では、閉鎖型陸上養殖の水浄化において課題となる残餌由来のアンモニア処理に関しての基礎研究として、まずはナノバブルの微細な気泡が常時水中に存在する環境下におけるアンモニア処理に寄与する細菌叢の時間的変化の把握、そして、アンモニア処理に寄与する細菌の培養に関する実験を行った。

\*技術本部技術研究所環境研究グループ \*\*投資開発事業本部新事業開発部

\*\*\*土木本部土木部環境技術室

2. 細菌叢把握のための分子生物学的手法の適用

水圏の窒素循環を表す模式図を図-1に示す<sup>4)</sup>。NH<sub>4</sub><sup>+</sup>（アンモニア）から有機態N（窒素）へ変換する同化、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>から N<sub>2</sub>（窒素ガス）へ変換するアナモックス、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>から NO<sub>2</sub><sup>-</sup>（亜硝酸）を経て NO<sub>3</sub><sup>-</sup>（硝酸）へ変換する硝化作用のいずれか、または同時に行われることで、飼育水中のアンモニア態窒素が除去される。

従来、生物学的廃水処理プロセスにおいては、反応槽をブラックボックスとして扱い、処理を行っている微生物の挙動や群集構造については具体的な解析がほとんど行われておらず、廃水の入力・出力操作などにより運転条件を決定していた<sup>5)</sup>。微生物の検出方法として、ある栄養素を含んだ寒天培地にサンプルを塗布し、そこに生育したコロニーの数で、対象とするサンプルに生息する微生物の数を推定する方法（培養法）が広く採用されてきた。しかし、培養可能な微生物は、実際に環境や廃水処理装置内に存在する微生物のせいぜい10%程度といわれており、残りの90%以上の微生物は、生きているが培養できないことになる。したがって、培養可能な微生物だけを対象とした研究では、廃水処理装置の性能（処理水質）と微生物の関係を正しく把握することは不可能である<sup>6)</sup>。

しかし近年、分子生物学的手法の環境微生物学研究への導入により、培養することなく細菌群集を解析できる方法が開発され、従来の培養法では検出できない細菌種が自然界には多く存在することが報告されている<sup>7)</sup>。また、1990年代より構築されてきた細菌の16Sリボゾーム（16S r）RNA 遺伝子の塩基配列のデータベースを有効に利用した手法が、微生物の迅速、かつ正確な分類同定に有効であることが証明された<sup>8)</sup>。16S rRNA 遺伝子を利用する長所としては、

- i. 生命の維持に欠くことのできない必須遺伝子であるため、すべての細菌が有している

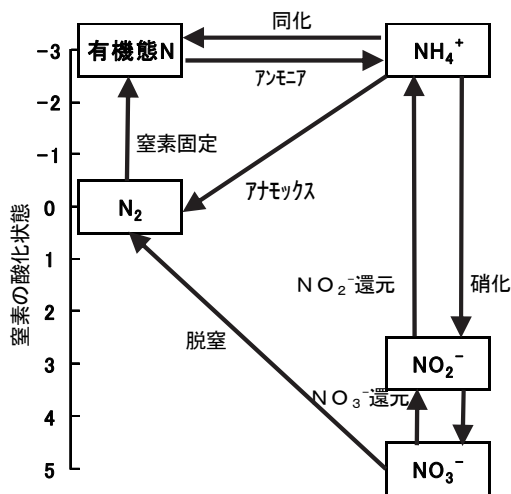


図-1 水圏の窒素循環を表す模式図

- ii. 塩基配列中に共通する領域が比較的多く、系統間で比較することが可能である

- iii. データベースが充実している

ことなどがあげられる<sup>9)</sup>。

そこで、水槽中の細菌を網羅的に解析することで、飼育水中の残餌由来によるアンモニア態窒素が、同化、アナモックス、硝化のいずれの作用により減少したのかを推定することができる考えた。

3. 水槽中のアンモニア態窒素の動態に関する実験

3.1 目的

残餌からアンモニア態窒素が溶出する挙動、および水槽中でナノバブル装置を運転しているときにアンモニア態窒素濃度がどのような変化を示すかを調べるための実験を行った。

3.2 実験方法

500L 水槽（外径：1,170mm、高さ：760mm）の底に、セラミック製の多孔質担体（粒サイズ：15×15mm、微生物定着有効面積 400m<sup>2</sup>/L）12.5 kg を敷き、トラフグを飼育している水槽の、種々雑多な細菌が存在していると考えられる逆洗水（ろ過方向とは逆に水を流すことにより、汚れをろ材から剥離させた水）を入れた。水槽の底に敷いた多孔質担体を写真-1に、トラフグを飼育している水槽を写真-2に、逆洗水を入れた水槽を写真-3に示す。水槽中でナノバブル装置（エアータンク吐出量：2～5L/min）を運転し、残餌に似せた泥状にした餌を 10g 投入した。



写真-1 水槽の底に敷いた多孔質担体



写真-2 トラフグを飼育している水槽

餌の主原料は、魚粉、オキアミミール、エビミールで、動物質性原料76%である。主成分を表-1に示す。アンモニア態窒素濃度は、ポータブル吸光光度計を用いてサリチル酸法で測定した。

飼育水のアンモニア態窒素濃度が 0.5mg/L を下回った段階で、泥状にした餌 10g または 30g を投入する実験を 50 日間実施した。

### 3.3 実験結果

餌を投入した翌日にはアンモニア態窒素濃度は上昇するが、その後細菌の働きで低下することを確認した。水槽中のアンモニア態窒素の経日変化と水槽への餌の投入時期を図-2に示す。

500L 水槽の底にあった多孔質担体には細菌が定着していることから、水槽から取り出し、風乾した。

## 4. アンモニア処理に寄与する細菌に関する実験

### 4.1 目的

微細な気泡が常時水中に存在する環境下において、水槽中の細菌を網羅的に解析することで、飼育水中の残餌由来によるアンモニア態窒素が同化、アナモックス、硝化のいずれの作用により減少したのかを推定するための実験を行った。

### 4.2 実験方法

2000L 水槽（外径：1950 mm、高さ：900 mm）の底に、セラミック製の多孔質担体 37.5kg を敷き、その上に3章の実験で細菌が定着した 12.5 kg の多孔質担体を敷いた（写真-4）。人工海水 2000L を入れ、ナノバブル装置（エアータ出力量：10~15L/min）を運転した（写真-5）。フグなどの飼育水と同様に、このときの人工海水の塩分濃度は1%とした。泥状にした餌を37.8g投入し、アンモニア態窒素濃度を測定した。餌を投入した直後にアンモニア態窒素濃度は上昇するが、数日後には減少した（図-3）。実験開始から6週を過ぎたころから目詰まりによりナノバブル装置のエアータ出力量が減少したが、アンモニア態窒素濃度の上昇および減少の挙動は、図-2と同様の傾向を示した。アンモニア態窒素濃度が0.2mg/Lを下回った段階で、餌を100gまたは200g投入し、実験開始から2週後、6週後および10週後に採水した。

採水した試料をメンブレンフィルター（ポアサイズ：0.22 μm）でろ過して試料中の細菌を捕集し、DNAを抽出した。DNAの16S rRNA領域をPCRで増幅し、次世代シーケンサーを用いて塩基配列解析を行い、得られた配列を既知の16S rRNA遺伝子のデータベース（SILVA database, SSU\_v132）と比較することで、菌種の推定を行った。次に、リアルタイムPCR法による細菌数測定を実施した。最近縁種は、相同性検索プログラムを用いて同定した。

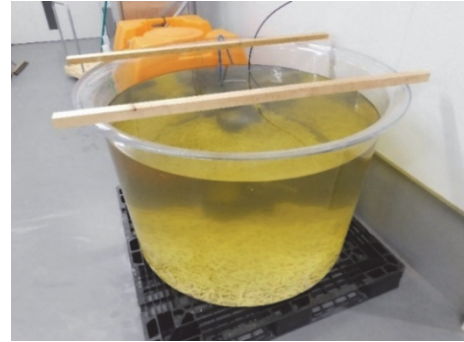


写真-3 逆洗水を入れた水槽

表-1 餌の主成分

成分	割合
粗蛋白質	52.0%以上
粗脂肪	8.0%以上
粗灰分	16.0%以下
カルシウム	2.0%以上
粗繊維	2.0%以下
りん	1.5%以上

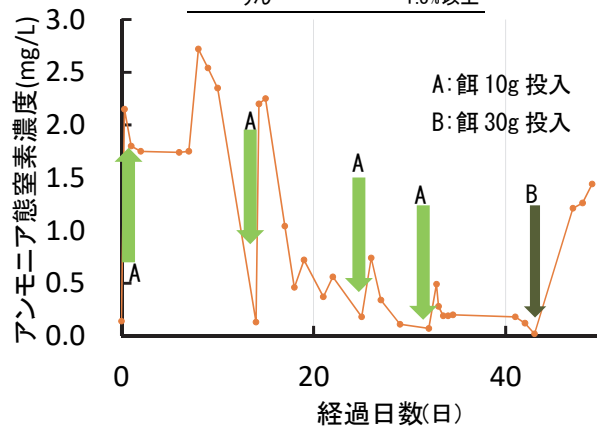


図-2 アンモニア態窒素の経日変化と餌の投入時期



写真-4 新品の上に敷いた細菌が定着した多孔質担体

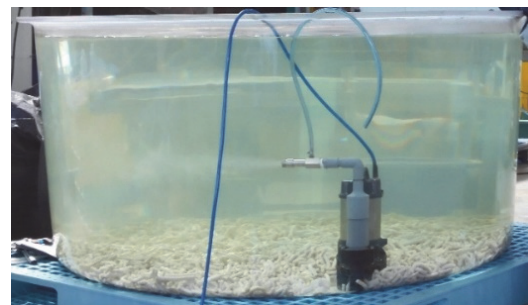


写真-5 水槽中の人工海水とナノバブル装置

### 4.3 実験結果および考察

2 週後、6 週後および 10 週後の各試料において、存在割合が 1%以上であった属レベル（一部、科レベル）の細菌とその存在割合を図-4 に示す。2 週後試料では 21 種類、6 週後試料では 19 種類、10 週後試料では 18 種類の細菌が存在割合 1%以上であったが、すべての試料で存在していたのは、*Roseivirga* 属、*Muricauda* 属、*Sphingobacteriales* 属、*Magnetospira* 属、*Thalassobaculum* 属、*Pseudohongiella* 属、*Planctomycetes* 門の 7 種類であった。図-4 から、時間経過にもない細菌叢の組成が変化したことが分かる。代表的な硝化細菌である *Nitrosospira* 属、*Nitrosomonas* 属、*Nitrosococcus* 属、*Nitrosovibrio* 属、*Nitrobacter* 属、*Nitrococcus* 属、*Nitrospina* 属、*Nitrotoga* 属が存在しなかったことから、硝化によるアンモニア態窒素の減少がなかったと推定された。また、*Planctomycetes* 門が存在したことから、アナモックスによってアンモニア態窒素が減少した可能性が示された。しかし、*Planctomycetes* 門の存在割合は全体の 5%にも満たなかったことから、大部分のアンモニア態窒素の減少は同化により行われたと推定した。

リアルタイム PCR による定量結果から存在量 (copies/mL) を算出した。10 週後試料で存在量が大きかった細菌を表-2 に示す。これらの細菌は、酸素要求性および炭素利用性から、化学合成従属栄養細菌と推定された。化学合成従属栄養細菌は、アンモニア態窒素をアミノ酸合成のための同化に利用する。

以上の結果から、2000L 水槽にエアータンが 10~15L/min のナノバブル装置を 1 台設置するという条件下において、水槽中のアンモニア態窒素は、それを同化する細菌により主に処理されることが推察された。

## 5. *Bacillus* (バチルス) 属と酵母菌の分離株の特定

### 5.1 分離培養の目的

バチルス属細菌および酵母菌は化学合成従属栄養細菌なので、アンモニア態窒素を同化することが期待できる。自然界に存在する数多くの種類のバチルス属細菌の中には、高濃度の有機物を短時間で分解できる、廃水処理の

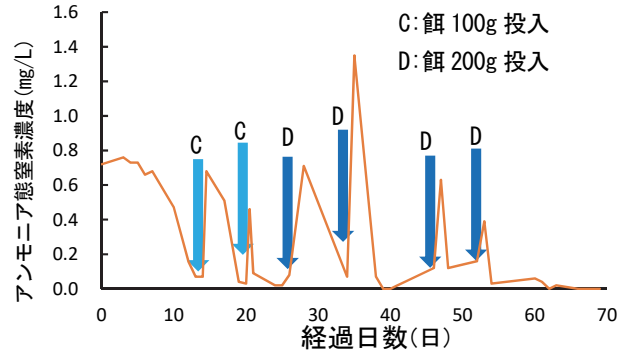


図-3 アンモニア態窒素の経日変化と餌の投入時期

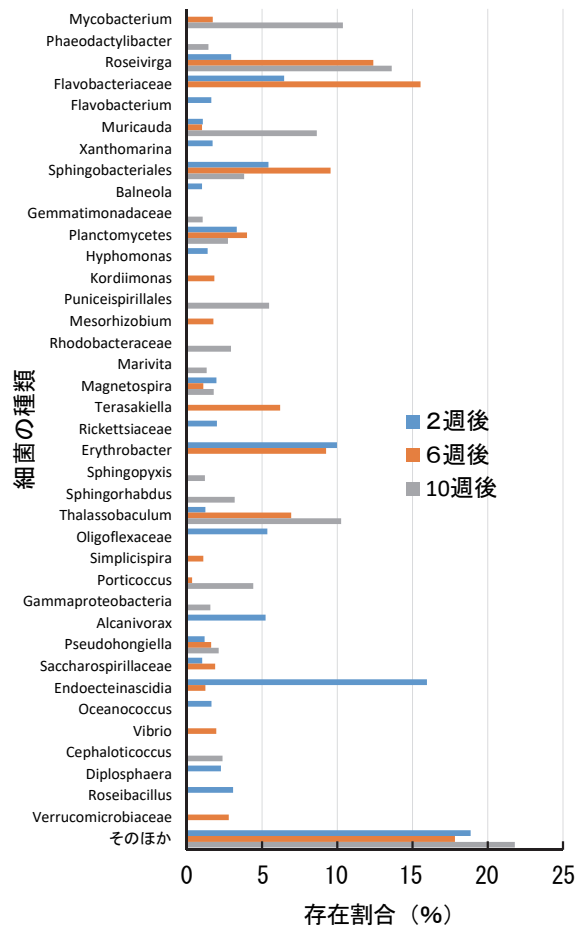


図-4 各試料における細菌の存在割合

表-2 10 週後試料で存在量が大きかった細菌

最近縁種	存在量 (copies/mL)	酸素要求性	至適NaCl濃度	炭素利用性
<i>Roseivirga seohaensis</i> subsp. aequiponti strain D-25	$8.7 \times 10^5$	偏性好気性	9%未満	カザミノ酸、ペプトン、トリプトン
<i>Thalassobaculum fulvum</i> strain HSF7	$6.6 \times 10^5$	好気性	0-10%	糖類
<i>Muricauda zhangzhouensis</i> strain 12C25	$5.5 \times 10^5$	偏性好気性	2%	主に糖・有機酸
<i>Mycolicibacterium litoralei</i> NIIDNTM18	$5.2 \times 10^5$	好気性	5%未満	LB 培地、TSA 培地、ソートン培地で増殖
<i>Limimanicola hongkongensis</i> strain UST950701-009P	$3.5 \times 10^5$	偏性好気性	2-14%	炭水化物

浄化能力が高いバチルス属細菌が存在する<sup>10)</sup>。バチルス属細菌は、枯草・稲ワラ・落ち葉・堆肥・塵や淡水・海水など自然界に広く分布している。この菌は、酸素を好む好気性細菌で、10°C～65°Cの温度、弱酸性 (pH4) ～弱アルカリ性 (pH9) の環境でも活動することができる。

一方、酵母菌を用いた廃水処理技術の研究が、欧米や新興国などにおいて盛んとなっており、対象となる廃水の種類の幅が広がっている<sup>11)</sup>。酵母菌は、土壌、海水・淡水、高等植物の果実・花・茎・葉の表面、広葉樹幹の傷口より溢出する樹液中、高等動物の体の内外ならびに排泄物などに存在し、繁殖する。

微細な気泡が常時水中に存在する環境下の飼育水へ、バチルス属細菌および酵母菌を投入することによりアンモニア態窒素を同化したいと考え、4章の実験で用いた2000L水槽の水 (試料水) からバチルス細菌と酵母菌の分離培養を試み、培養した菌種の特徴から適性が見込まれる分離株を特定した。また、分離株の DNA 塩基配列から菌種の同定を図った。

5.2 培養方法および結果

a. バチルス属細菌

試料水を 65°C、30 分間加温して急冷後、段階希釈した。原液および各段階希釈液 0.1mL を、それぞれ NaCl 3.5%添加標準寒天平板培地に塗抹して、30°Cで 3～5 日間培養した。

b. 酵母菌

試料水をバチルス属細菌と同様の方法で段階希釈した後、原液および各段階希釈液 0.1mL を、それぞれクロラムフェニコール 100ppm および NaCl 3.5%添加 PDA 平板培地に塗抹し、25°Cで 3～5 日間培養した。

検出されたコロニー (菌の塊) のうち、外観の異なるコロニーを、バチルス属細菌は 3 種類、酵母菌は 2 種類それぞれ選択した。それらを分離培養した結果を表-3 に示す。

5.3 DNA 塩基配列による菌種の同定

分離株を純粋培養した後、バチルス属細菌は 16S rDNA (16S rRNA 遺伝子) の上流部 5'端から約 500bp の塩基配列を、酵母菌は rRNA をコードする (特定のタンパク質を作るための情報を持つ) 遺伝子の部分塩基配列 (LSU rRNA 遺伝子の D2 領域) を、それぞれ DNA シーケンサーにより決定した。得られた塩基配列をもと

に、国際塩基配列データベース (DDBJ ほか) などで検索、照合し、分離株について相同率 (塩基配列の類似度) の高い菌種を表-4 のように同定した。酵母菌の場合、絶対的ではないが、塩基配列の相同率 99%以上が同定の目安とされている<sup>7)</sup>。ただし、相同値が何%以上であれば同種と同定し、何%以下なら新種なのかという問いに対して明確な回答はない<sup>12)</sup>。

バチルス属細菌の特徴を表-5 に、酵母菌の特徴を表-6 に示す。

5.4 分離株の特定

分離株 A～E のうち、分離株 C は通性嫌気性で、分離株 D は硝酸塩窒化性がなかった。通性嫌気性菌の中には、酸素存在下でも発酵しさせず、増殖や活動が抑えられるものもあるので分離株 C は除外した。また、飼育水槽内では硝酸が存在するので、硝酸塩窒化性を有する方が望ましい。そのため、*Cytobacillus horneckiae* (分離株 A)、*Cytobacillus solani* (分離株 B) および *Sampaiozyma vanillica* (分離株 E) を飼育水槽への投入株として選択した。

表-3 分離培養結果

対象	分離株	菌数/mL	外観
バチルス属細菌	A	4.5 × 10 <sup>2</sup>	淡茶色、中コロニー
	B	1.4 × 10 <sup>2</sup>	淡茶色、小コロニー
	C	1 × 10 <sup>1</sup>	暗黄色、中コロニー
酵母菌	D	1 × 10 <sup>1</sup>	ピンク色、小コロニー
	E	1 × 10 <sup>1</sup>	灰白色、小コロニー

表-4 各分離株の同定試験結果

分離株	菌種	相同率 (%)
A	<i>Cytobacillus horneckiae</i>	96.9
B	<i>Cytobacillus solani</i>	98.0
C	<i>Sutcliffiella horikoshii</i>	99.0
D	<i>Cystobasidium minutum</i>	99.4
E	<i>Sampaiozyma vanillica</i>	99.6

表-5 バチルス属細菌の特徴

分離株	酸素要求性	至適生育温度	生育温度	至適生育pH	NaCl濃度	コロニー	備考
A	好気性	30°C	5～50°C	7.0	10%	黄色味を帯びている	一般に空気中、土壌などから分離
B	好気性	35°C	20～45°C	9.0	0～10%	薄いオレンジ色	一般に土壌から分離
C	通性嫌気性	—	10～40°C	8.0	8～9%	小さくクリームホワイト色	一般に土壌から分離

表-6 酵母菌の特徴

分離株	硝酸塩窒化性	コロニー	備考
D	なし	ピンク色のバター状およびスムーズ型	自然界に広く分布し、空中、海水、深海、淡水、植物、動物などから分離
E	あり	クリーム色のムコイド状	一般に汚水、葉面から分離

## 6. まとめ

微細な気泡が常時水中に存在する環境下において、残餌がある水槽内で細菌叢にどのような変化が起こるのかを調べるために、水槽中の細菌を網羅的に解析した。その結果、2000L水槽にエアータンが10~15L/minのナノバブル装置を1台設置した条件下において、アンモニア態窒素の一部はアナモックスによって処理されているが、大部分はアミノ酸を合成するための同化に利用されることが推察された。

また、2000L水槽の試料水から、アンモニア態窒素を同化することが期待できる2種類のバチルス属細菌と1種類の酵母菌を分離培養できた。

## 7. あとがき

現在、当社では閉鎖型陸上養殖の事業化に向け20000L水槽を2基設置し(写真-6)、硬骨魚類(トラフグ)を400匹ずつ飼育している。本実験での2000L水槽中の有機懸濁物は泥状の餌だけであったが、20000L水槽では、さらに糞や鱗、体表粘液などが加わる。今後は、エアータンに代わり、ナノバブル装置を適用して、トラフグを飼育している水槽中の細菌について網羅的な解析を経時的に実施し、環境要因の違いによるアンモニア処理に寄与する細菌の優占種とその生理生態を比較してデータを蓄積することで、微細な気泡が常時水中に存在する効果について検証したいと考えている。

また、分離培養したバチルス属細菌および酵母菌は、-80℃で保管しており、ナノバブル装置を運転してトラフグを飼育する水槽に投与する実験を計画している。



写真-6 実験棟内にある2基の20000L水槽

## 【参考文献】

- 1) 大脇博樹、山本純弘、岡本 昭、黒川由美、「海水魚の閉鎖循環型大規模陸上飼育システムの構築」、長崎県工業技術センター研究報告、Vol.40、pp.52-55、2011
- 2) 柘植秀樹、「マイクロ/ナノバブルの基礎」、日本マリンエンジニアリング学会誌、Vol.46、No.6、pp.4-10、2011
- 3) 山本義久、「水産増養殖での閉鎖循環飼育システムの展開」、日本海水学会誌、Vol.69、No.4、pp.225-237、2015
- 4) 濱崎恒二、木暮一啓、「水圏微生物の基礎」、恒星社厚生閣、p.187、2015
- 5) 常田 聡、平田 彰、稲森悠平、「耐塩性を有する硝化・脱窒細菌の獲得と産業廃水処理への適用」、公益財団法人 ソルト・サイエンス研究財団 研究報告書、pp.161-169、2005
- 6) 赤司 昭、「分子生物学的手法を用いた水処理装置の微生物診断技術」、神鋼パンテック技報、Vol.45、No.2、pp.10-15、2001
- 7) 杉田治男、坂元美智子、来間明子、土谷知弓、「キンギョ養魚池の底泥中における優占細菌群集」、水産増殖、Vol.65、No.3、pp.255-257、2017
- 8) 渡辺幸一、「腸内フローラの分子生物学的解析法の応用と課題」、腸内細菌学雑誌、Vol.21、No.3、pp.199-208、2007
- 9) 後藤慶一、「DNA 塩基配列を用いたカビ・酵母の同定」、モダンメディア、Vol.55、No.9、2009
- 10) 田口和之、佐藤匡則、花井洋輔、「バチルス菌による新排水処理ソリューション」、富士電機技報、Vol.90、No.1、pp.47-51、2017
- 11) 渡部貴志、家藤治幸、「酵母を用いた排水処理法による効率的なリン除去の検討」、日本醸造協会誌、Vol.106、No.5、pp.280-286、2011
- 12) 浜田 盛之、鈴木 健一朗、「何から始めよう 微生物の同定 細菌・アーキア編」生物工学会誌、Vol.89、No.12、pp.744-747、2011

# 生物多様性保全に資する研究施設の整備

## ー水生生物研究ヤードとしてのビオトープの設計・施工ー

### Development of research facilities for biodiversity conservation

#### - Design and construction of biotope for research on aquatic organisms -

長 千佳\* 稲留康一\*\* 富山陽子\*\*\* 浅野博光\*\*\*\*

#### 要 旨

建設工事により自然環境が失われることがあるが、その対応策の一つとして、建設予定地に生息する在来種や動植物を代替地に移すことにより、生物多様性の保全を図る「代償ミティゲーション」という手法がある。2021年2月から8月にかけて、「代償ミティゲーションの実践」および「ビオトープ等の生物多様性に配慮した空間に関する総合的な提案や技術の蓄積」を目的として、当社の技術研究所内にビオトープを整備した。本報では、代償ミティゲーションなどの生物多様性の保全のうち、水生生物を対象とした研究の場として整備したビオトープについて、設計・施工、およびそこでの取り組みについて報告する。

キーワード：生物多様性、ビオトープ、絶滅危惧種、水草、ミティゲーション

#### 1. まえがき

持続可能な開発目標（SDGs）には、生態系に関するゴールとして、ゴール 14「海の豊かさを守ろう」、ゴール 15「陸の豊かさを守ろう」の2つが設定されている。SDGs の各ゴールには複数のターゲットが設定されているが、2011 年から 2020 年までに各国が生物多様性保全のために取り組む項目を掲げた「愛知目標」から引用されたものも多く、生物多様性の保全は SDGs の達成にも深くかかわっている。

さらに、自然保護区が日本の国土全体に占める割合について、現在は陸域で 20.5%、海域で 13.3%であるが、絶滅の危機に瀕している動植物の保護や生物多様性の保全のため、2030 年までに陸域、海域ともにそれぞれ 30%以上とする方針<sup>1)</sup>が、2021 年 8 月に環境省から示された。この方針では、自然保護区の拡大とともに、生物多様性の保全に貢献する場所として、企業の所有する山林や緑地などを認定する制度（OECM）を試行的に導入するとしており<sup>2)</sup>、企業において今後、生物多様性の保全に係る対応が求められる機会はさらに増えてくると予想される。

建設工事においては、環境アセスメントの対象となる大規模な工事の場合には、事前に十分な調査が行われ、その結果を基に、生物多様性への影響を最低限にするた

めの保全措置（ミティゲーション）が取られている。

ミティゲーション（mitigation）とは、「開発による自然環境への影響を何らかの具体的な措置によって緩和すること」を意味しており、人間活動によるマイナスの環境影響を緩和するための保全行為を指す。

ミティゲーションは、表-1に示す5つのレベルに分けられる。優先順位は「①回避」が最も高く、「⑤代償」が最も低い。建設工事におけるミティゲーション措置は、様々な検討が行われ、複数の方法がとられる。哺乳類、鳥類、爬虫類等の動物に対しては、例えばアンダーパスやオーバブリッジなどの移動経路の確保といった「①回避」や「②最小化」の方法が採用される。一方で、移動性の低い植物は、「⑤代償」が選択されるケースが多い。具体的には、工事範囲内に移植地を設置し、希少動植物を移植・移動させる方法が選択される。

表-1 ミティゲーションの概念に含まれる措置

①	回避	特定の行為あるいはその一部を行わないことにより、影響全体を回避する
②	最小化	行為とその実施において、程度と規模を制限することにより、影響を最小化する
③	修正	影響を受けた環境を修復、回復、または改善することにより、影響を矯正する
④	軽減 ／除去	保護・保全活動を行うことにより、事業期間中の影響を軽減・除去する
⑤	代償	代償の資源や環境で置き換え、あるいはこれらを提供することにより、影響を代償する

\* 土木本部土木部環境技術室 \*\* 技術本部技術戦略部 \*\*\* 技術本部技術研究所企画・管理グループ  
\*\*\*\* 西日本支社建築設計部

図-1に、植物の移植に関する調査・実験の項目と手法を示す。移植に際しては、保全の対象とする種だけではなく生物間相互作用を考慮した生態系全体の保全が重要であるとされているが、保全対象種的生活史や生育環境、移植地の選定方法などの必要な知見が得られることは少なく、生育環境の整備方法などの技術的手法が確立されていることもほとんどない。そのうえ、生育地や生育個体が限られているため、移植の経験がほとんどないにも関わらず、移植の失敗が許されないといった困難な問題がある<sup>3)</sup>。

これらの問題の解決には、既存文献、専門家へのヒアリングに加えて、現地調査や実験などの調査研究により、対象種の生態学的特性を把握することが非常に重要となる。ここで言う生態学的特性とは、種的生活史や繁殖特性などの生態学的・生理学的特性、気候、地形・地質、土壌、水質、植生等の対象種の生息・生育に適正な環境を指す<sup>4)</sup>。

このように、建設工事において、希少植物の代償ミティゲーションを合理的な手法で実施し、地域の生態系を保全することで社会に貢献していくためには、対象種の生態学的特性を把握するための調査研究を実践し、調査・実験の項目と手順に関するノウハウを蓄積しておくことが望まれる。

そこで、希少植物（水生植物、湿地性植物などの水草）に対する代償ミティゲーションの実践の場として、2021年2月から8月にかけて、茨城県つくば市にある当社の技術研究所敷地の一部にビオトープ（以下、「対象地」）を整備した（写真-1）。本論文では、その整備構想・設計などの計画と、施工について報告する。

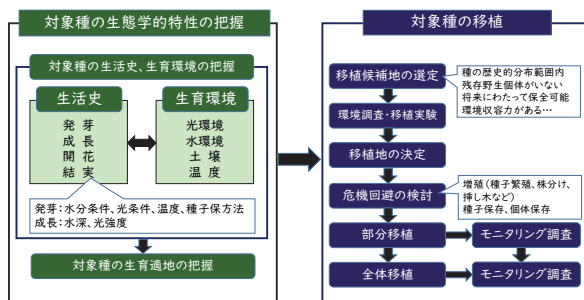


図-1 移植に関する調査・実験の項目と手法<sup>3)</sup>を加工



写真-1 ビオトープ全景（整備直後）

## 2. 周辺地域の自然環境とその保全に向けた取り組み

### 2.1 周辺地域の自然環境

対象地がある茨城県つくば市には、筑波山や古くから残る里地里山などの豊かな自然環境がある。また、つくば市域の大部分は、筑波・稲敷台地と呼ばれる標高 20～30mの関東ローム層に覆われた平坦な地形であり、南北に小貝川、桜川、谷田川、西谷田川などの河川が流れている。

対象地をメッシュ平年値（気象庁 2014）に基づいて評価すると、暖かさの指数<sup>5)</sup>が109°C・月、寒さの指数<sup>5)</sup>が-4°C・月であり、植生はシイ、カシ等の常緑針葉樹林、気温条件としては暖温帯に相当する。また、夏季降水量は685.2mm、冬季降水量は214.3mm、年間降水量は1228.3mmであり、温暖で潤湿な太平洋型の気候域に属している。

周辺地域の現存植生図から、対象地周辺地域は宅地、工場地帯等の市街地化が進められる中であって、台地上面を中心とした畑地、谷底平野を中心とした水田といった耕作地が広く分布している。そして、その周辺部に残存するクヌギ-コナラ群集、ススキ群団（Ⅶ）等の二次的な自然と一体となって、いわゆる里地里山の生態系が形成されていると考えられる。また、一部の社寺林等では、シラカシ群集、ヤブコウジ-スダジイ群集などの地域の潜在的な植生が残存するほか、河辺等の自然立地には河辺林、湿原植生が分布し、多様な植生がモザイク状に分布している。

### 2.2 希少種の保全とつくば市内の研究機関との連携

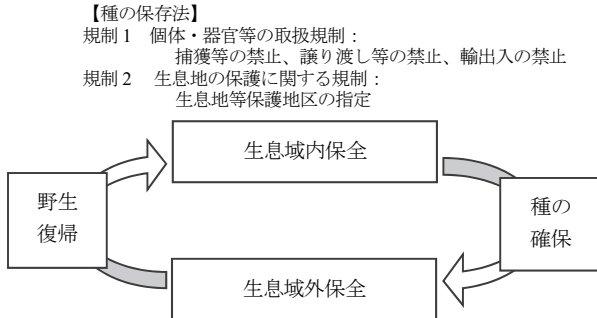
生息・生育する種などを保全するための法律として、「絶滅のおそれのある野生動植物の種の保存に関する法律」（種の保存法）がある。種の保存法では、同法に基づく「希少野生動植物種保存基本方針」に沿って、国内に生息・生育する希少野生生物について、レッドリストに掲載されている絶滅のおそれのある種から国内希少野生動植物種を指定し、捕獲・採取や譲渡等の規制や生息地の保護等を定めている。

図-2に、種の保存法の3つの規制と、絶滅危惧種を保全する手法である生息域内保全と生息域外保全の関係を示す。種を保全し、絶滅を避けようとする行為としては、本来の生息域内で、必要な環境要素やその規模を確保する「生息域内保全」が望まれるが、時間が長期間に渡るため、その間に種が絶滅してしまうリスクがある。そこで、それを補うものとして、生息域外の施設で保護し、増やすことにより絶滅を回避する「生息域外保全」が採用される。生息域外保全は、野生絶滅した場合の保険としての種の保存のほか、科学的知見の集積、緊急避難等の目的がある。

ミティゲーションが開発を行う際に環境への影響を最小限に抑えるための代償となる処置であるのに対し、生



息域外保全は、生息地の外で遺伝資源、野生種、栽培種、種の保全などのあらゆるレベルの生物多様性を保全する手法である。希少植物の生息域外保全の活動は、環境省の保護増殖事業計画に基づいて実施されているほか、近年では、植物園や民間企業が主体となった取り組みも増えてきている。



【種の保存法】

規制3 保護増殖事業の実施：  
保護増殖事業計画の策定と実施

図-2 生息域内保全・生息域外保全と種の保存法の規制の関係

つくば市では、2020年4月に「第3次つくば市環境基本計画」を策定し、重点施策の一つとして、つくば市の生物多様性の保全やその持続可能な利用の戦略的推進に資する「つくば市生物多様性戦略（仮称）」の策定を挙げている<sup>6)</sup>。現在、戦略の検討のため、つくば市は市内の生物多様性の現状把握を行うとともに、茨城県生物多様性センター、博物館、筑波大学などの研究機関との連携、近隣市町村との協力、さらに市民の参加を得ながら策定が進められている。このことから、つくば市内の民間事業者を含む多様な主体が、生物多様性の保全のための取り組みを、今後さらに推進していくことになると思われる。

### 2.3 保全・生育の研究と対象種の選定

つくば市等のそうした積極的な取り組みに参画する形で、当社では、2020年春から、筑波大学、国立科学博物館筑波実験植物園の指導のもと、つくば市内の希少な水草の保全に資する、種の生活史や生育環境を把握するための調査・実験を行っている。

水草には抽水植物や湿地性植物など（図-3）があり、水際に生息する水草が環境を多様にすることから、水と陸が接する「水辺エコトーン」は、生物多様性の保全への貢献度が高い空間であると言われている。多様な空間を生む水草は、日本には亜種・変種を含むと270種が生息しているが、そのうちの43%が環境省版レッドリストに記載されている。日本の植物全体の環境省版レッドリスト掲載種は種の約30%であることと比較すると、水草は絶滅しそうな種が多いと言える<sup>8)</sup>。

水草の消滅は、水際の埋め立て、河川・湖沼などの護岸工事、農薬散布といった人間活動に伴う水質汚濁など

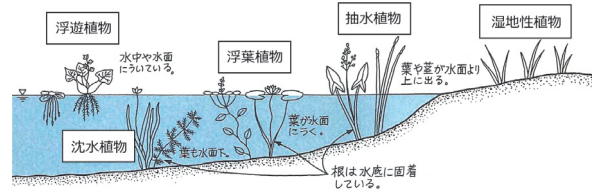


図-3 水草の生活形<sup>7)</sup>

表-2 研究対象とする植物<sup>10)、11)</sup>

和名(学名)	環境省版 RL(2020)	茨城県版 RL(2012)	指定 都道府県数
クロホシクサ ( <i>Eriocaulon parvum</i> Koern.)	絶滅危惧 II類(VU)	絶滅危惧 I B類	30
イトイヌノヒゲ ( <i>Eriocaulon decemflorum</i> Maxim.)	—	絶滅危惧 I B類	13

絶滅危惧 I B 類：絶滅危惧 I A 類程ではないが、近い将来における野生での絶滅の危険性が高いもの

絶滅危惧 II 類：絶滅の危険が増大している種



写真-2 クロホシクサ



写真-3 イトイヌノヒゲ

に起因する。一方で、溜池のような人工水域や、河川周辺で、かつては氾濫原であった新田開発地など、人による維持管理に伴う攪乱が生じることで生育し続けられてきた種は、人間活動の減少によって姿を消している<sup>9)</sup>。

筆者らは、つくば市内の希少な水草のうち、ホシクサ科のクロホシクサ（写真-2）とイトイヌノヒゲ（写真-3）を研究対象とすることとした（表-2）。研究対象としてこれら2種を選定した理由として、レッドリスト掲載種ではあるものの、現状は絶滅の危機に瀕しているレベルではないため、種子の確保や生息地の状況の確認等が可能であることが挙げられる。なお、それぞれの生息地は、いつ開発されるかわからない状態であり、自生地において種がなくなってしまった場合のバックアップの役割も期待できる。また、ホシクサ科の在来種は54種あると言われるが、クロホシクサなどの22種が環境省版レッドリストで絶滅危惧種に指定されており、準絶滅危惧種を含めると半数近くの種が絶滅の危機に瀕している。ここで得られた知見は、近縁種の保全に役立てられると考えている。

### 3. ビオトープの整備計画と設計

#### 3.1 ビオトープ整備の基本方針

整備するビオトープでは、先述のとおり、そこを活用して、代償ミティゲーションの実践および企業緑地などに導入されるビオトープ等の生物多様性に配慮した空間に関して、維持管理までを含めた総合的な提案のためのノウハウや技術の蓄積を目指している。そこで、生物多様性保全への貢献度が極力高い空間を目指し、水際の生物多様性の保全を確保すべく、「水生植物や湿地性植物に焦点を当てた保存・生育のための実験施設」を施設整備の基本方針とした。

2.3 に示した通り、「水辺エコトーン」は、生物多様性の保全への貢献度が高い空間であると言われているが、これは水位変動によって水域となったり陸地となったりと変化に富む場所であることに起因する。そのため、水位の制御が可能な設備を計画した。

#### 3.2 施設設計

設計したビオトープの概要と施設全体を表-3および図-4に示す。ビオトープには、対象となる水生植物や湿地性植物の生育に適した条件を調べるための生育実験池と、対象となる水生植物を生息地に近い条件で生育さ

表-3 整備概要

敷地面積	1,039.83	m <sup>2</sup>	
陸地面積	753.03	m <sup>2</sup>	
水域面積	286.80	m <sup>2</sup>	注：土手頂部ラインを水域とする
水域率	27.58	%	
水域内訳	水源～せせらぎ～用水路	47.90	m <sup>2</sup> せせらぎ橋より上流
	保全実験池	142.43	m <sup>2</sup> せせらぎ橋より下流
	生育実験池 No.1	17.27	m <sup>2</sup>
	生育実験池 No.2	16.96	m <sup>2</sup>
	生育実験池 No.3	15.00	m <sup>2</sup>
	生育実験池 No.4	13.48	m <sup>2</sup>
	生育実験池 No.5	13.21	m <sup>2</sup>
防水仕様	塩ビシート防水	水源、せせらぎ	
	ペントナイトシート防水	せせらぎ～用水路～保全実験池、生育実験池	
	塗膜防水	浮葉実験池、下流槽、ポンプピット、連通槽、浸透樹	

せる保全実験池、浮葉植物の生育・展示の場である浮葉実験池の3種類の池を配置した。

生育実験池は、対象植物の生育を調査・確認するため、複数条件での実験が可能なヤードとした。大きさは法肩で長辺5m、短辺2m程度である。それぞれの池は、水門による流入水量の調整と、排水筒による水位の調整が可能である(図-5)。2.3 に示した研究対象種である



図-4 施設全体

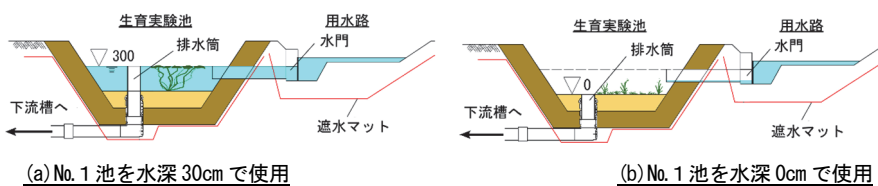


図-5 生育実験池 断面イメージ

クロホシクサとイトイヌノヒゲは、水深が0~10cm程度が生育に適した水深と言われているが、中には水深50cmほどのところで生育しているものもある。生育可能な水深の範囲や、水深と生育の関係を把握できるよう、また、今後、研究対象種を拡大することも想定し、様々な種に対応できるように実験池の水深の設定に配慮した。具体的には、5つの実験池のうち、絶滅危惧種は水深30cm未満の比較的浅い範囲で生息しているものが多いため、水深を0~30cmに可変できる池を3つ設けた。また、深い範囲で生息する植物にも対応できるように、水深を30~60cmおよび60~90cmに可変できる池をそれぞれ1つ設けた。それぞれの池は独立しており、水の流入量や水深を各々設定できるようにした。

保全実験池は、水域面積は約142m<sup>2</sup>、水深は最大で60cmである。ここは、つくば市内の希少植物を対象とした代償ミティゲーションの実践の場であり、多様な生活形の水生植物(図-3)を保全しながら、その生活史や生育環境について調査する実験ヤードである。池の法面は1:2~1:5の複数の勾配で造成し、池内には研究対象種を含む希少な湿地性植物の保全の場として約7m<sup>2</sup>の湿地帯を2箇所設けている。

浮葉実験池は、主に浮葉系の希少植物を生育・展示する場であり、既設のコンクリート水槽に給排水設備を設けたものである。水深は最大で60cmで、連通槽を通して保全実験池と繋がっている。連通槽内には排水筒が設置されており、保全実験池と浮葉実験池の水位を調整できるようにした。

### 3.3 水系システム設計

河川や用水路と接続していないビオトープの場合、使用する水は、自然界の水循環に則して雨水が利用されることが多い<sup>12)</sup>。本ビオトープでは、実験のために、一定の水位を確保する必要があるが、雨水のみの供給では不足することも想定されるため、井戸水を供給源とした循環式水系システムを採用した(図-6)。ただし、井戸水は常時供給とはせず、必要に応じた供給のみとした。具体的には、ポンプピットに設置されたポンプにより下流槽から水源、浮葉実験池、保全実験池に繋がる用水路に水を送る。そのうち、水源に送られた水は、せせらぎと用水路を経由して各生育実験池および保全実験池へと流れる。各生育実験池に流れた水は、池内の排水筒から下流槽へ戻る。また、浮葉実験池及び保全実験池の水は連通槽内の排水筒から下流槽に戻る仕組みとした。

なお、連通槽内の排水筒は生育実験池と同様の仕組みを採用しており、筒の高さを変えることで保全実験池と浮葉実験池の水位も調整できる。また、降雨によりビオトープ内の水量が増加した場合には、ポンプピットに設置した排水ポンプと全実験池のオーバーフロー管により、浸透枿へ排水し、地中に戻す仕組みとなっている。

また、本水系システムは完全循環を基本としているが、

夏場の水温上昇や、蒸発による水量低下の懸念がある。その対応策として、生育実験池には水温センサーと水位センサーを、連通槽には水位センサーを設置し、いずれかのセンサーが設定値を超過した場合に井戸水を供給する方法を採用している。

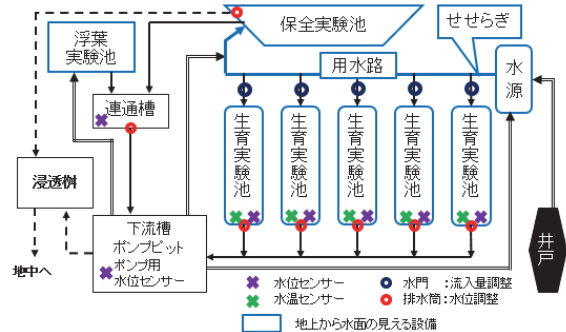


図-6 水系システムの概要

## 4. 施工

工事にあたっては、ドローンによる空中撮影を数回実施し、地上での測量に加え、俯瞰的に池の形状を確認した(写真-4)。



施工前(2020年1月)



施工中(2021年4月)



完成時(2021年9月)

写真-4 実験池の造成過程

生育実験池および保全実験池の法面および底面は、長期的に池の形状を保つため、赤土や消石灰などを混合して叩き固めた三和土（たたき）で成形した。三和土は、日本では古くから民家の土間などに利用されてきた。消石灰による一時的な pH の上昇は、植物に対して悪影響を及ぼす可能性があるため、造成後に定期的に pH 測定を行い、影響がないことを確認している。

一方、ビオトープの遮水構造は、地盤の状況に応じてたたき粘土（地盤が粘土質土壌の場合）やシートなどの資材（地盤が砂質土壌の場合）が使用される<sup>12)</sup>。遮水シートには、ポリエチレンシート、塩ビシート、ゴムシート、ベントナイトシート、ポリエチレンシートにベントナイトが付着したものなどがある。今回、池の形状が複雑であること、排水管の貫通部等、遮水構造上の弱部が複数あること、また、施工性を考慮し、主としてベントナイト系遮水マット（ポルクレイ・マット ST、厚さ 6.4mm 以上、透水係数  $5 \times 10^{-9}$  cm/sec 以下）による遮水構造とした。

## 5. おわりに

建設工事における希少植物の保全に資する研究の場として、約 1,000m<sup>2</sup> のビオトープを整備した。研究対象には、植物の中でも絶滅危惧種の割合が高い「水草」を選定し、実験ヤードとして生育実験池、保全実験池、浮葉実験池の3種類の池を整備した。生育実験池は、個々の種の保全のための場であり、水門や排水筒により水量や水位を調整することが可能である。また、保全実験池は湿地帯を有した様々な種の保全のための場であり、水位調整機能により、変化に富む「水辺エコトーン」の現象を作り出すことが可能である。

今後、この実験ヤードにおいて、クロホシクサとイトイヌノヒゲを対象として、対象種の生態学的特性を把握するための調査研究を実践し、調査・実験の項目と手順に関するノウハウの蓄積により、希少植物の移植による種の保全の確実性を高めていきたい。また、環境教育や生物多様性の保全の啓発の場であるとともに、つくば市近郊の様々な水生植物の保全の場として活用することで、地域の生態系の保全に貢献していきたい。

## 【謝辞】

本施設の整備及び希少植物の保全に関する研究を行うにあたって、筑波大学生命環境学群生命地球科学研究群生命環境系の上條隆志教授並びに、国立科学博物館筑波実験植物園多様性解析・保全グループの田中法生研究主幹に技術指導を頂いた。ここに記して感謝の意を表す。

## 【参考文献】

- 1) 環境省、「30by30 基本コンセプト」、  
[https://www.env.go.jp/council/12nature/%E8%B3%87%E6%96%991%E5%8F%82%E8%80%83\\_30by30%E5%9F%BA%E6%9C%AC%E3%82%B3%E3%83%B3%E3%82%BB%E3%83%97%E3%83%88.pdf](https://www.env.go.jp/council/12nature/%E8%B3%87%E6%96%991%E5%8F%82%E8%80%83_30by30%E5%9F%BA%E6%9C%AC%E3%82%B3%E3%83%B3%E3%82%BB%E3%83%97%E3%83%88.pdf)
- 2) 環境省、「自然環境部会生物多様性国家戦略小委員会（第1回）議事録」、[https://www.env.go.jp/council/12nature/post\\_62.html](https://www.env.go.jp/council/12nature/post_62.html)、2021.11
- 3) 森本幸裕他、「ミティゲーションー自然環境の保全・修復技術ー」、ソフトサイエンス社、pp.114-153、2001
- 4) 環境省自然環境局野生生物課、「絶滅のおそれのある野生動植物種の生息域外保全実施計画作成マニュアル」、<https://www.env.go.jp/nature/yasei/ex-situ/manual.pdf>
- 5) 吉良竜夫、「温量指数による垂直的な気候帯のわかちかたについて」、寒地農学、2：pp.143-173、1948
- 6) つくば市、「生物多様性の保全」、<https://www.city.tsukuba.lg.jp/kurashi/kankyo/doushokubutsu/1015039.html>
- 7) 滋賀県の理科教材研究委員会、滋賀の水草・図解ハンドブック、2016
- 8) 水草保全ネットワーク、「水草の疑問」、成山堂書店、2018
- 9) 角野康郎、「絶滅危惧水草の保全：維持管理の重要性」、ワイルドライフ・フォーラム、16巻、2号、pp.8-9、2012
- 10) 環境省、「環境省レッドリスト2020」、<http://www.env.go.jp/press/files/jp/114457.pdf>
- 11) 茨城県、「茨城県版レッドデータブック（植物編）2012年改訂版」、[https://www.pref.ibaraki.jp/seikatsukan/kyo/shizen/tayousei/redbook/ibaraki\\_redbook.html](https://www.pref.ibaraki.jp/seikatsukan/kyo/shizen/tayousei/redbook/ibaraki_redbook.html)
- 12) 養父志乃夫、「ビオトープづくり実践帳」、誠文堂新光社、p.52、pp.70-73、2010