

令和5年度

国営事業地区等フィールド調査 学生支援事業

当協会では協会設立50周年事業として、優れた技術者の育成・確保の観点から、大学において担当教員の指導の下に国営事業地区等をフィールド調査し卒業論文等を作成する学生に対して、旅費、宿泊費等の諸経費を支援する事業を実施しています。今回、令和5年度事業の支援学生から研究成果の報告がありましたので紹介します。

1 酪農地域における傾斜地からの土壌流亡性評価に関する基礎的検討

帯広畜産大学 畜産学部 畜産科学課程 農業環境工学ユニット 小林 竜也

2 4つの林野・酪農小流域で継続した平水時河川水質の長期変動特性

帯広畜産大学 畜産学部 畜産科学課程 農業環境工学ユニット 藤原 知紀

3 補強材を施した遮水性機能を伴ったフィルダムの小型振動台模型実験

弘前大学大学院 農学生命科学研究科地域環境工学コース 修士1年 水利造構学研究室 高部 侑汰

4 補強材の敷設位置等を変化させた主働モードでのトラップドア模型実験

弘前大学大学院 農学生命科学研究科地域環境工学コース 修士1年 水利造構学研究室 西村 武

5 トンレサップ湖流域への分布型水循環モデルの適用と灌漑施設計画への応用

秋田県立大学 生物資源科学部 アグリビジネス学科 地域環境水文学研究室 工藤かあり

6 八郎湖流域における内水氾濫に適応可能な分布型水循環モデルへの改良

秋田県立大学 生物資源科学部 アグリビジネス学科 地域環境水文学研究室 渡部 雄太

7 塩那台地地区における水文・水環境に関する基礎的研究

宇都宮大学 農学部農業環境工学科水質環境工学研究室 田村 謙貴

8 筑後川下流地区における水利施設保全事業の現状調査

東京大学 農学部 生物・環境工学専修 農地環境工学研究室 梅田 晏

9 印旛沼循環灌漑地区における浸透流入を考慮した水収支と流出過程の分析

東京大学 農学部生物・環境工学専修水利環境工学研究室 岸本 龍人

10 ドローンを用いた水田温度環境および水稻生育測定の有用性

日本大学 生物資源科学部、生物環境工学科、地球環境・資源リモートセンシング研究室 生井澤 廉

11 損傷度の異なるコンクリートを対象としたダブルロジスティック解析によるひび割れ進展段階の同定

新潟大学 農学部農学科 施設機能工学研究室 向井 萌華

12 木津用水における都市化と水管理変化

岐阜大学 自然科学技術研究科生物生産環境科学専攻 環境生態科学領域施設環境工学研究室 大塚健太郎

13 三重県御浜町における低価格土壌水分センサーとLPWAを用いた水管理システムの構築

三重大学大学院 生物資源学研究科 共生環境学専攻 水資源工学研究室 加藤沙耶香

14 移流分散現象に及ぼす物理的・化学的不均質性の影響

神戸大学 農学部食料環境システム学科 施設環境学研究室 岡部 北斗

15 深層学習による石化岩の間隙率推定

神戸大学 農学部食料環境システム学科 施設環境学研究室 寺本 祐大

16 寒冷地におけるけい酸塩系表面含浸材の効果発現の評価

高知大学 農林海洋科学部 農林資源環境科学科 中村愛里紗

1～4の報告は前々号(325号)に掲載しました。5～10の報告は前号(326号)に掲載しました。

損傷度の異なるコンクリートを対象とした ダブルロジスティック解析によるひび割れ進展段階の同定

新潟大学 農学部農学科 施設機能工学研究室 向井 萌華
 指導教員 鈴木 哲也 教授



1. はじめに

コンクリート材料を用いた社会基盤や農業水利施設では、損傷蓄積に伴う耐久性能の低下に対する定量的評価法の開発が技術課題である。圧縮応力場におけるAEエネルギートレンドにダブルロジスティック関数を近似することで、ひび割れ進展段階の同定が可能であることを確認している¹⁾。加えて、ひび割れが顕在化したコンクリート内部のひび割れ面積率と動弾性係数の間における密接な関係を確認している²⁾。既往研究では同一の構造物から採取したコンクリートコアのみを対象とした動弾性係数との比較にとどまっており、損傷度の異なるコンクリートを対象にAEダブルロジスティック解析の適用性を検証する必要がある。

そこで、本研究では、竣工後50年が経過した排水機場排水樋門から採取したコンクリートコアと実験室で打設した配合の異なるコンクリートを対象にX線CT法によるひび割れ空隙指標と圧縮応力場のAEエネルギートレンドに基づくダブルロジスティック解析指標の有用性を検証した。上記のコンクリートに加えてダム内部より採取したコンクリートについて、P波速度の測定を行い、算出された動弾性係数とX線CT指標との関係を考察した。

2. 方法

2.1 供試体概要

圧縮試験には、1971年に供用が開始された、ひび割れが顕在化した新川排水機場排水樋門から採取した損傷コンクリート（以下新川サンプル）、実験室で打設したコンクリート（以下無損傷サンプル）を用いた。超音波速度試験には1979年に供用が開始された内の倉ダムから採取したコンクリート（以下内の倉ダムサンプル）上記サンプルにを加えた。

2.2 X線CT計測

サンプルはX線CT法により内部構造を可視化し粗骨材、空隙、ひび割れに分類した。評価指標には、それぞれの面積率を用いた。

2.3 超音波伝搬速度試験による動弾性係数評価

超音波速度試験は、供試体内部を伝搬する弾性波のP波速度を測定する手法である。P波は内部の不均一性により散乱する。無損傷サンプルおよび新川サンプルの試験の概要図を図1(a)に、内の倉ダムサンプルの試験概要図を図1(b)に示す。得られたP波速度より、動弾性係数を算出した。

2.4 AEダブルロジスティック解析による圧縮応力場のひび割れ挙動の同定

ダブルロジスティック解析は破壊の規模と関連のあるAEエネルギーを指標として評価する。ダブルロジスティック曲線を累積AEエネルギー発生頻度割合 $F_e(U)$ に近似し、パラメータを6つ抽出した。図2にダブルロジスティックパラメータ、式(1)にダブルロジスティック曲線の式を示す。ここで、 m および m' は第一、二変曲点のひずみエネルギー、 r および r' は各変曲点における傾き、 p は第一変曲点が占める $F_e(U)$ の割合、 γ は初期AEエネルギー放出率を示す。Stage 1 ($0 < U \leq m$)はひび割れ安定期、Stage 2 ($m < U \leq m'$)はひび割れの発生から進展段階、Stage 3 ($m' < U$)はひび割れ進展期と考えられる。ひずみエネルギー m および m' において分割した区間のAEパラメータの平均値の差分をそれぞれStage 2-Stage 1、Stage

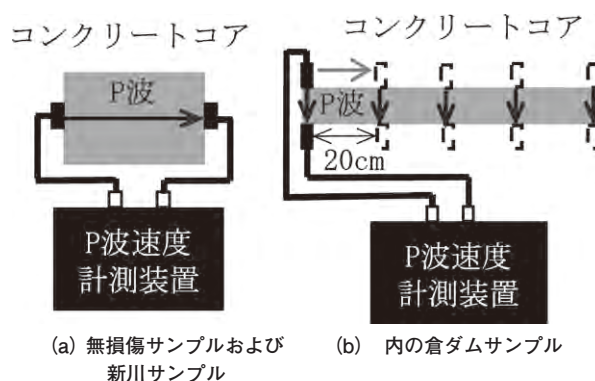


図1 超音波伝搬速度試験概要図

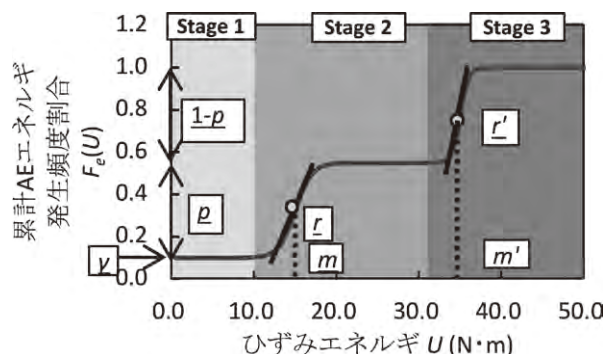


図2 AEダブルロジスティックパラメータ

3-Stage 2としてひび割れ空隙指標との関係より、ダブルロジスティックパラメータとひび割れ進展段階の関係を考察した。

$$F_e(U) = \gamma + (1 - \gamma) \left[\frac{p}{1 + e^{r(m-U)}} + \frac{1-p}{1 + e^{r'(m'-U)}} \right] \quad (1)$$

3. 結果と考察

超音波伝搬速度試験により算出した動弾性係数の平均値は、無損傷サンプルが53.9GPa、内の倉ダムサンプルが46.6GPa、新川サンプルが24.5GPaであった。動弾性係数と空隙とひび割れ面積率の相関係数は、無損傷サンプルが-0.57、内の倉ダムサンプルが0.09、新川サンプルが-0.76であった。内の倉ダムサンプルの相関が最も低く、新川サンプルの相関係数の絶対値が最も高い値を示した。これは、内の倉ダムサンプルが粗骨材面積率が高く、そのばらつきは大きいことからP波速度に対する空隙ひび割れ指標の影響度が低いためであると考えられる。

ダブルロジスティック解析結果を図3に示す。無損傷サンプルでは、変曲点 m , m' 付近で $F_e(U)$ が急激に上昇しているのに対し、新川サンプルでは上昇がなだらかであった。Stage 2-Stage 1 とひび割れ空隙面積率との相関係数は、新川サンプルがピーク周波数、平均周波数において0.83, 0.84であった。一方、周波数指標において、無損傷サンプルでは、0.7以上の正の相関は確認されなかった。既往研究では、ひび割れの発生時に高い周波数が確認され、ひび割れの進展に伴い高い周波数成分が減衰することが確認されている。これらの結果より、無損傷サンプルでは、初期の空隙ひび割れ面積が少ないため、第一変曲点 m 付近で、ひび割れが発生、進展していると考えられる。一方、新川サンプルでは、第一変曲点 m 付近において、存在したひび割れや空隙を起源としてひび割れが進展しており、無損傷サンプルにおけるStage 3の段階にあると考えられる。したがって、ダブルロジスティックパラメータ m は、損傷度によって異なる破壊段階を示すことが示唆された。

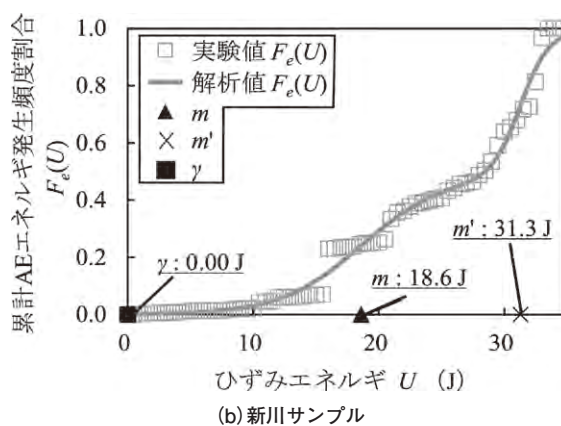
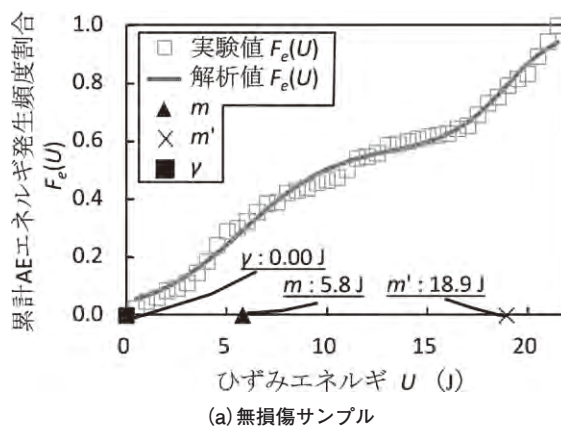


図3 AEダブルロジスティック解析結果

4. おわりに

本研究では、X線CT法と超音波速度試験およびAE計測を伴う圧縮試験を実施した。その結果、ひび割れ空隙指標との関係において、他の内部構造の影響をふまえた検討が必要であることが明らかとなった。また、破壊段階の同定におけるダブルロジスティック解析とAEパラメータ解析の有用性が示唆された。

引用文献

- 1) 柴野一真, 島本由麻, 鈴木哲也 (2023): AEダブルロジスティック解析によるコンクリートコアの損傷度評価に関する実験的研究, 農業農村工学会論文集, 91(1), I_111-I_121
- 2) Morozova, N., Shibano, K., Shimamoto, Y., Tayfur, S., Alver, N., and Suzuki, T. (2022). Visualization and evaluation of concrete damage in-service headworks by X-ray CT and non-destructive inspection methods, *Frontiers in Built Environment*, 8, 947759.

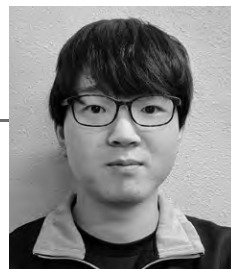
木津用水における都市化と水管理変化

岐阜大学 自然科学技術研究科生物生産環境科学専攻 環境生態科学領域施設環境工学研究室

大塚健太郎

(進学先 岐阜大学大学院連合農学研究科)

指導教員 西村 眞一 教授



1. はじめに

木津用水は、農地と市街地が混在した都市近郊型農業地帯であり、大都市名古屋のベッドタウンとして都市化が著しい地域である。犬山頭首工より最大 $17.66\text{m}^3/\text{s}$ を取水し、木津用水西側の8市3町に及ぶ広大な地域に灌漑している。一方で、東側から入鹿用水の排水河川が複数流入している。このことから、木津用水は用排兼用水路としての機能を有している。

そもそも用排兼用水路とは、用水と排水を同一の水路で受けている形態を指し、通常時は取水のため水位を高く保ちたい一方で、降雨時は排水のため水位を下げつつ、取水のために水位を一定に保つ必要がある。そのため、用排兼用水路の管理にあたっては、ゲート操作によってゲート開度を調整し、シビアな水管理を行う必要がある。用排兼用水路の管理に関わる土地改良区、市町の職員を対象としてワークショップを開催したところ、降雨変化や都市化によって、用排兼用水路における水管理の難化、つまりゲート操作回数が増加しており、水管理の負担が増加していることが指摘された。

そこで、本研究の目的を、用排兼用水路における過去と現在のゲート操作回数の違いを評価し、その要因を検討することとした。



ワークショップでの討論内容

2. 方法

ゲート操作のデータは、木津用水土地改良区の用水管理日誌から入手した。管理日誌は手書きであるため、10年分の日誌をスキャンし、日時とゲート操作とを抽出した。ゲート操作については、ゲート開度を大きくした場合は1、小さくした場合は-1とカウントした。しかし、本研究では最終的に開閉の区別はせず、ゲート開度変更に対して1とカウントした。また、現地調査によって降雨時における実際のゲート操作の様子を確認した。データ期間は、1994年から1998年までを過去のデータ、2017年から2021年までを現在のデータとし、各年の灌漑期(4/1から9/30まで)のみを抽出した。

対象とする施設は荒井堰、二重堀堰、高山堰とした。これらの堰の上流では、入鹿用水の排水河川が横流入しており、ゲート操作によって水管理を行っている。荒井堰は、犬山頭首工から取水した水を新木津用水路、合瀬川、岩倉用水路、五条川の幹線に分水する施設である。本研究では、五条川への排水を担う五条川樋門・五条川転倒堰、合瀬川への排水を担う合瀬川樋門・合瀬川転倒堰、新木津用水を取水する新木津用水元栓を対象とした。二重堀堰は、新木津用水路の中流部に位置しており、下流へは大山川をサイホンで渡って分水している。本研究では、大山川への排水を担う転倒堰、サイホンへの分水を担う分水樋門を対象とした。高山堰は、新木津用水路の最末端に位置しており、高山堰から八田川に排水している。本研究では、八田川への排水を担う仮放流ゲート、制水門を対象とした。

解析では、まずゲート操作総数について、各施設において過去と現在で比較した。次に、降雨強度別のゲート操作回数を求めた。一日あたりのゲート操作回数を求め、一時間雨量の日最大とゲート操作回数を紐づけること

で、降雨強度別のゲート操作回数を求めた。さらに、過去と現在の降雨日数による影響を除外することを目的として、先ほど求めた降雨強度別のゲート操作回数を、降雨日数で除することで、降雨強度別一日あたりのゲート操作回数を求めた。

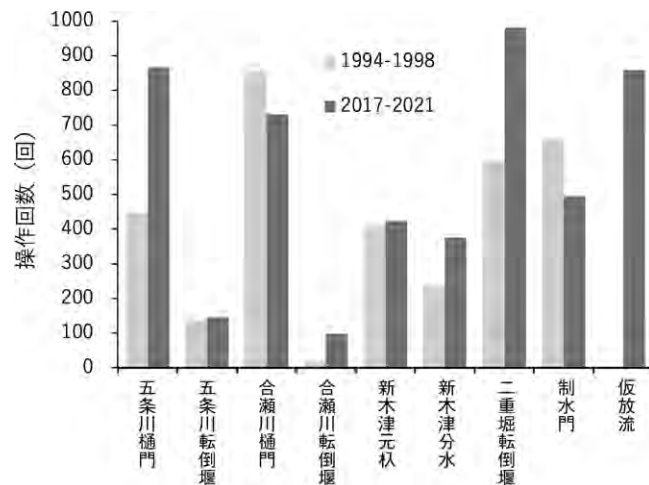
3. 結果・考察

各施設の操作総数について過去と現在で比較したところ、その増減の傾向は様々であった。増減の要因としては、施設の更新や新設、操作手順の変更によるものと考えられる。

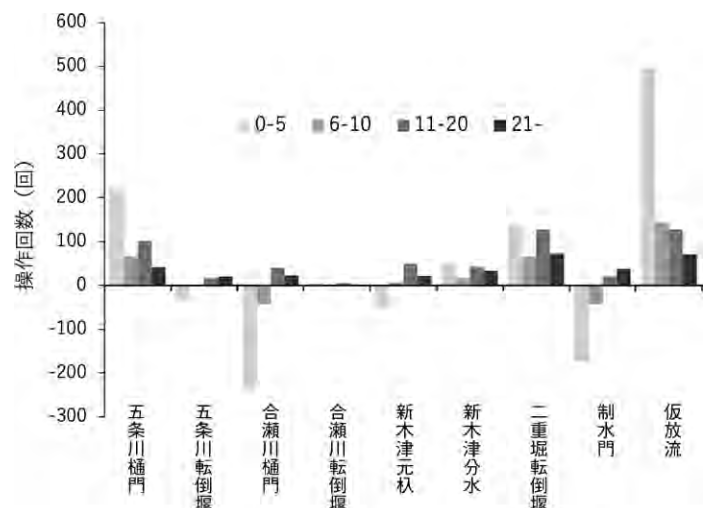
降雨強度別のゲート操作回数比較では、0-5mmの時、複数の施設で操作回数が減少した。これは、1994-1995年は例年より少雨傾向であり、取水目的の操作が多く行われたためであると考えられる。また、11mm以上の時の操作回数増加、特に11-20mmの時の操作回数増加が顕著であった。これは、近年の降雨変化による大雨の頻度増加によって、排水目的の操作が増加したためであると考えられる。

降雨変化による影響を除いた降雨強度別のゲート操作回数比較では、ほとんどの施設で降雨強度が大きくなるほどゲート操作回数が増加する傾向が見られた。つまり、排水目的の操作が増加しており、降雨変化の影響は除外していることから都市化の影響による増加であると考えられる。入鹿用水の受益面積が減少していることから、都市化によって新木津用水に流入する排水河川のピーク流出量が増大し、ゲート操作回数が増加したと考えられる。また、木津用水の受益面積が減少していることから、都市化によって下流に宅地が増加したことで、宅地を湛水させないために排水量をシビアに管理する必要があったため、ゲート操作回数が増加したと考えられる。

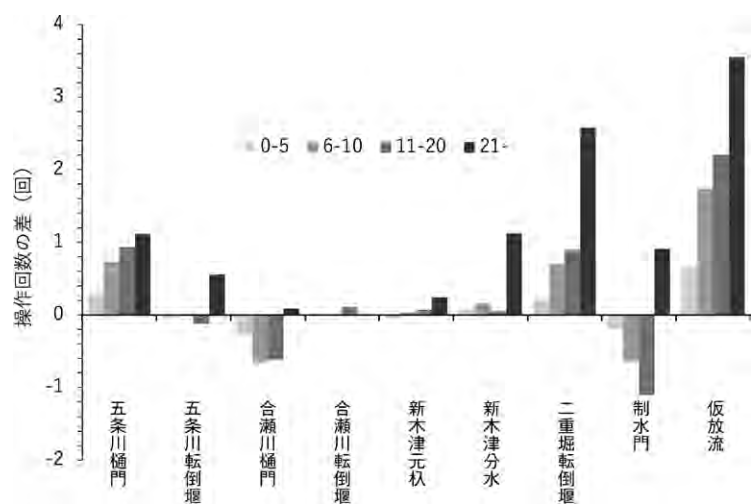
一方で、今回のデータでは、ゲート操作の目的を取水・排水にはっきり区別することができなかった。データ化の段階では、開閉を区別することで開けたら排水、閉めたら取水と定義づける計画であった。しかし、実際の水管理は取水と排水はシームレスに行われており、開閉のみで区別することはできなかった。今後ゲート操作をデータ化する際は、ゲート開度、ゲート操作による水位変化なども併せてデータ化することで、排水操作のみを対象とした解析ができると考えられる。



ゲート操作総数比較



降雨強度別のゲート操作回数比較



降雨変化を除いた降雨強度別のゲート操作回数比較

三重県御浜町における低価格土壤水分センサーとLPWAを用いた水管理システムの構築

三重大学大学院 生物資源学研究所、共生環境学専攻、水資源工学研究室 加藤沙耶香

(就職先 三重県教員高校理科)

指導教員 伊藤 良栄 助教



1. はじめに

三重県東紀州地域では柑橘栽培が盛んで、高品質ミカン栽培のためマルドリ栽培方式が普及してきた。しかし、担い手不足や従事者の高齢化などにより、農産物の生産量、生産額が減少傾向にあり問題となっている。これに対して三重県果樹農業振興計画書(2020)では、ICTを活用し、栽培の高度化及び経営の効率化をすることを指標の1つとしている。

戸上ら(2011)は熊野市のミカン園に農業IoTシステムを導入し一定の成果を上げたが、実用化までには至らなかった。市販の土壤水分センサーは高額で農業者自身が投資するにはハードルが高い。そこで本研究では、1台200円という驚異的に安価なセンサーCapacitive Soil Moisture Sensor V1.2(以下、CSMS)とSigfoxをはじめとする低消費電力で長距離のデータ通信が可能なLPWA(Low Power Wide Area)を用いた土壤水分の遠隔監視システムを作り、三重県御浜町を対象地として想定し、コスト面や測定精度などの面から実用可能性について検討することを目的としている。

2. 作成したシステムの説明とコスト比較

CSMS、ESP32、Sigfoxを繋げた土壤水分モニタリングシステムを試作した(図1)。ESP32はSigfoxとCSMSと接続してロガーとして動作する。電源として電圧3.3VがCSMSに加わると、CSMSは体積含水率に応じた電圧を出力する。ESP32はA/Dポートでその出力値を取得し、バイナリデータに変換してSigfoxにデータ送信の命令を送る。これは、通信規格上Sigfoxが一度に最大12バイトしかデータを送信できない制約を回避するためである。

その後、SigfoxはバイナリデータをLPWA回線経由クラウド上に送る。クラウドに送られたバイナリデータは元の出力値に変換され、IoTデータ可視化サービスであるAmbientのクラウド上に蓄積される。

作成したシステムと、一般的に使われているセンサーTEROS-12とそのロガーZL6のコストを比べたところ、1台設置で約37分の1に収まった。仮に1地点で6台センサーを設置したとすると、約68分の1となり、実用可能となればコスト削減に十分貢献しているといえる。(表1)



図1 作成した水管理システム

表1 作成したセンサーと一般的なセンサーとのコスト比較(円)

	センサー	ロガー	通信	合計(センサー1台)	合計(センサー6台)
CSMS	200	1,250	5,000	6,450	7,450
TEROS-12	54,000	180,000		234,000	504,000

3. システムの実用可能性を検証する実験

作成したシステムの実用可能性を検証するために①システムの試運転②耐久性③測定精度④一般的なセンサーとの比較を調べる必要があると考え、次の実験を行った。

底に排水用の穴があり、高さが同じ10cmの円筒を4つ(A、B、C、D)用意し、鳥取砂丘砂(乾燥密度1.5g/cm³)を詰めた。A~DはそれぞれA:なにも設置しないB:CSMSの機械部分を土から出したもの(CSMS上部)、C:CSMSの機械部分をコーキングガンでコーキングし土中に埋めたもの(CSMS土中)、D:TEROS-12を設置したものとした。4つの円筒を水に浸け飽和状態にし、同時に水から取出し時間を掛けて自然蒸発で風乾するまで20日間ほど放置した。このとき、Aは電子天秤に乗せ1時間毎に質量を計測し、円筒中の体積含水率を計算した。B~Dはそれぞれ30分毎に出力値を記録した。その後、CSMSの出力値をあらかじめ求めた検量式に入れ算出した

体積含水率と、TEROS-12センサーが測定した体積含水率を、質量測定によって求めた体積含水率と比較した。

4. 結果

図2は各センサーの出力値を記録したものである。試作したシステムは、20日間問題なく計測を行うことが出来た(①)。しかし、B:CSMS土中は、13日ごろから値が一度低下し、風乾状態になった18日後も出力値が戻らなかった。おそらく、漏水により破損したと考えられ、耐久性については課題が残ることが分かった(②)。次に、図3はそれぞれのセンサーから求めた体積含水率と、質量測定によって求めた体積含水率を比較したものである。2つの値の平均誤差は0.02、最大誤差は $\theta=0.41$ のときで、0.058であった。カタログ上のTEROS-12の誤差が0.03であることを考慮すると、CSMSの測定精度は通常のセンサーとして遜色ないレベルと考えられる(③)。最後に、TEROS-12との同時測定で能力の比較を行おうと試みたが、TEROS-12での計測結果が質量測定から大きく離れてしまったため、今後やり直す必要がある(④)。

5. 御浜町での計測

2023年6月より、御浜町ではミカン畑3カ所に土壤水分センサー(TEROS-12、TEROS-21)と気象センサー(ATOMS)を設置し、土壤の体積含水量や気象情報を記録している。図4は観測中の3カ所のうちの1カ所の降水量と体積含水率である。圃場では7月10日にマルチシートを敷設し、7月13日16:00~19:00に灌水が行われた。図では灌水時にわずかながら体積含水率が上昇していることが分かる。今後記録を続け、現場における土壤水分センサーの有用性と、今回作成した水管理システムの現場での実用可能性について検討していく。

6. まとめと今後の課題

本研究では、CSMSとLPWAを用いて既製品の38分の1のコストで土壤水分監視システムを作成した。システムは問題無く起動し、CSMSの測定精度は室内実験では既製品と遜色ないが、実用に向けてコーキングなどを工夫し耐久性を向上させる必要があることが分かった。また、三重県御浜町の圃場に設置したTEROS-12は灌水を検知できた。

今後、圃場のデータをさらに蓄積・分析し、土壤水分がミカンの品質にどのように影響するのか調べていくとともに、今回作成した土壤水分観測システムを用いたデバイスを試作し圃場に設置し試運転することで、さらに実用可能性について検討していきたいと考えている。

謝辞

本研究は、一般社団法人土地改良建設協会「2022年度国営事業地区等フィールド調査学生支援事業」による支援を受けました。三重大学生物資源学部農業土木コースの伊藤良栄助教にご指導頂きました。東海農政局土地改良区職員の皆様には、現地調査へのご協力、多数の資料のご提供を頂きました。ここに記して、深謝の意を表します。

参考文献

三重県果樹農業振興計画書(2020)

戸上崇・伊藤良栄・橋本篤・亀岡孝治(2011)、高品質ミカン生産を目的とするセンサーネットワークを利用した圃場環境計測、農業情報研究、20巻3号、p.110-121

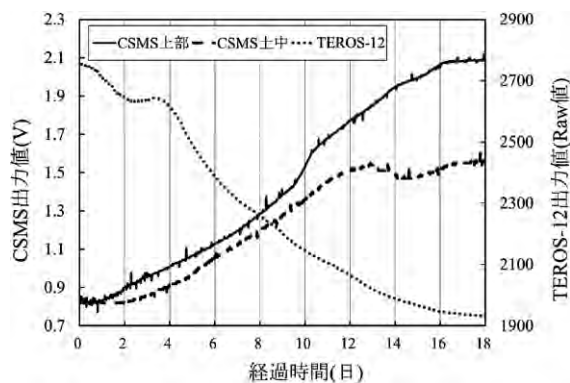


図2 各センサーの出力値

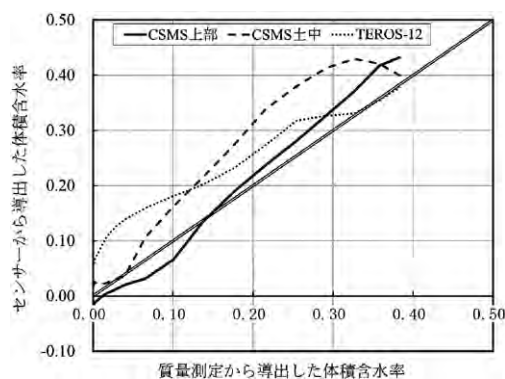


図3 各センサーの体積含水率

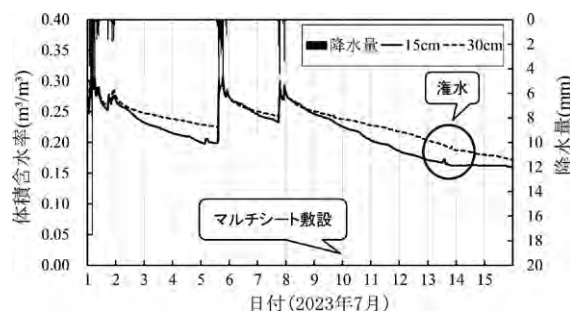


図4 御浜町圃場1の体積含水率

移流分散現象に及ぼす物理的化学的不均質性の影響

神戸大学 農学部食料環境システム学科 施設環境学研究室 岡部 北斗

(進学先 神戸大学大学院)

指導教員 井上 一哉 教授



1. はじめに

奄美群島に属する喜界島では図1や図2のようにサトウキビの生産が活発におこなわれ、農業が盛んである。南西諸島に位置しており、年間降水量は比較的多いものの、島の大部分が多孔質で高透水性な琉球石灰岩で構成されているため、地下浸透の度合いが大きく、地表水に乏しい島である。そこで、農業活動の活性化に向けて、地中に止水壁を造成して地下水を貯水し、農業用水などに利用する地下ダムが供用されている一方で、地下水の良好な水質の維持は大きな課題といえる。

地下水汚染の対策のためには汚染物質の輸送挙動の把握が必要である。地下水中の汚染物質などの溶質は、移流分散現象によりその存在範囲を拡げる。この現象には、透水係数、ミクロ分散長、遅延係数などの不均質因子が影響する。特に、溶質の拡がりの指標となるマクロ分散現象は、不均質透水場における透水係数の空間分布が大きく影響するものの、その関係性は明確に定量化されていない¹⁾。

また、移流分散現象の程度を推定するためには、実地盤における現地トレーサ試験や、実地盤をモデル化した模擬地盤を用いた溶質輸送実験や数値シミュレーションが実施される。現地トレーサ試験は実地盤における溶質の輸送挙動の把握に有効な一方、物理的・経済的制約が多い。そのため、実験環境を制御でき、比較的成本の小さいラボレベルの実験や数値シミュレーションは有益な手段である一方で、3つの不均質性を考慮した上で行われた研究例は乏しいのが現状である¹⁾。

そこで本研究では、帯水層の物理的化学的不均質性が溶質輸送現象に与える影響について評価するため、模擬地盤を作製した溶質輸送実験と実験地盤を想定した数値シミュレーションを実施した。

2. 溶質輸送実験と数値解析

2.1 不均質分布

本研究では、図3に示す幅200cm、高さ80cm、奥行き3cmの装置にて溶質輸送実験を実施した。図3のzone1に図4や図5に示すブロック状に、粒径の異なる珪砂を充填し、物理的不均質因子の1つである透水係数のばらつきを考慮した。珪砂の粒径に応じて第2の物理的不均質因子であるミクロ縦分散長、化学的不均質因子の遅延係数²⁾もばらついている。各ブロックの透水係数、ミクロ縦分散長、遅延係数はそれぞれ定水位透水試験、カラム試験、吸着試験にて計測し、図4に示す数値を得た。図3のzone2はzone1と同じ配置であり、ケース名



図1 喜界島の農業(サトウキビ)



図2 喜界島の上空写真

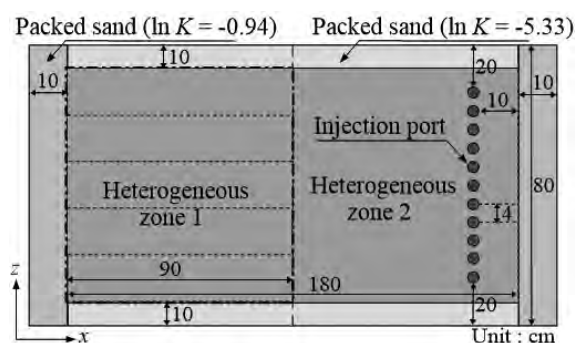


図3 実験装置の概略図

は総ブロック数を参照して、Case20、Case40と称する。両者の透水係数の不均質度 $\sigma_{\ln K}^2$ はともに0.743である。

2.2 実験方法と画像解析

本実験では、装置の左右に接続した定水頭タンクにて動水勾配を0.050に制御して浸透流を形成した。図1に示す11点の注入孔に初期濃度0.2mg/cm³のBrilliant Blue FCF水溶液を1点あたり25cm³注入し、溶質輸送挙動を撮影した。得られたRGB画像のピクセル値から空間モーメント量 M_{ij} とマクロ縦分散長 A_L を

$$M_{ij}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} H(x, z) B(x, z, t) x^i z^j dx dz \quad (1)$$

$$A_L = \frac{M_{20}M_{00} - M_{10}^2}{2\xi_c M_{00}^2} \quad (2)$$

にて求めた。ここに、 t は時間、 H はピクセル面積、 B はR値、 i と j は空間次数、 ξ_c は輸送距離である。実験から得られたRGB画像の例を図6や図7に示す。

2.3 数値解析方法

まず、FEM解析にて浸透流方程式を求解し、流速分布を求めた。次に、ランダムウォーク粒子追跡法(以下、RWPTと記す)にて溶質輸送を再現した。解析過程の粒子の移動経路は式(3)で表される³⁾。

$$\mathbf{X}_p(t + \Delta t) = \mathbf{X}_p(t) + \frac{\mathbf{v} + \nabla \cdot \mathbf{D}}{R} \Delta t + \mathbf{B} \mathbf{E} \sqrt{\Delta t} \quad (3)$$

ここに、 \mathbf{X}_p は時刻 t における粒子の位置ベクトル、 Δt は時間変化量、 \mathbf{v} は流速、 \mathbf{D} は分散係数テンソル、 R は遅延係数、 \mathbf{B} は変位マトリクス、 \mathbf{E} は各成分が平均0、分散1の正規分布に従うベクトルである。空間モーメント S_{ij} とマクロ縦分散長 A_L は、

$$S_{ij} = \frac{1}{m(t)} \sum_{k=1}^{NP_t} \frac{m_p^k X_{p,i}^k(t) X_{p,j}^k(t)}{R(\mathbf{X}_p^k(t))} - X_{G,i}(t) X_{G,j}(t) \quad (4)$$

$$A_L(\xi_G(t)) = \frac{S_{11}(\xi_G(t))}{2\xi_G(t)} \quad (5)$$

にて求めた。ここに、 $X_{p,i}$ は粒子位置成分、 $X_{G,i}$ は粒子群の重心位置、 $m(t)$ と NP_t は時刻 t の粒子総質量と粒子総数を表す。

3. 物理的化的不均質性の効果

2つの実験ケースに対して、マクロ縦分散長の実験結果と数値解析結果を図8に示すと、両者は一致していることがわかる。Case20とCase40の透水係数の不均質度は0.743で等しいものの、Case40はCase20より小さいマクロ縦分散長になる。これは、ブロック幅の縮小は水平方向への溶質伸展の抑制につながるためであり、透水係数の不均質度のみで分散性は決まらないことを意味している。

そこで、ブロックスケールを変更したCase10、80、160についてRWPTにより分散性を計算した。図9に示すように、ブロック幅の縮小に伴ってマクロ縦分散長は低下する傾向にある一方で、Case80と160はほぼ一致する結果が得られた。ブロック幅が縮小しても溶質伸展を際限なく抑制するわけではなく、透水係数の不均質度に応じた漸近値が存在することを表している。この点を明らかにするため、ブロック幅の半分を見かけの相関長 λ と

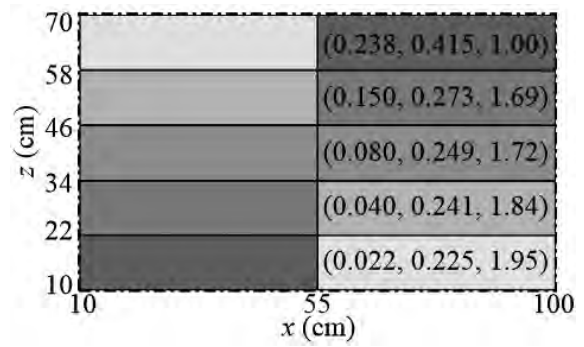


図4 Case20の不均質分布。
カッコ内は透水係数、ミクロ縦分散長、遅延係数を表す。

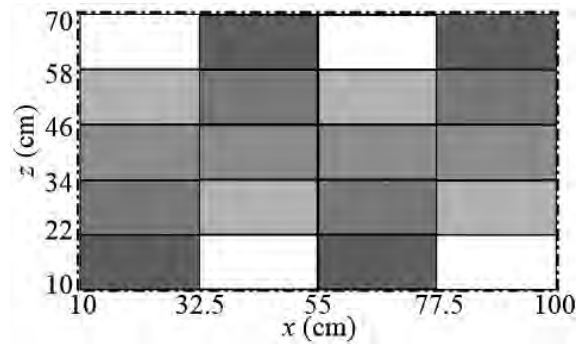


図5 Case40の不均質分布

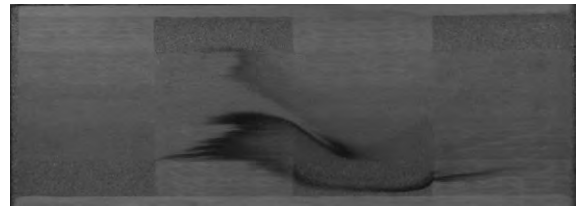


図6 Case20の溶質挙動の一例

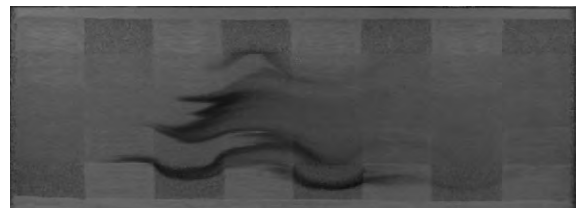


図7 Case40の溶質挙動の一例

定義して、見かけの相関長と最大マクロ縦分散長の関係を図10に示す。図中、ミクロ分散長と遅延係数の不均質性を考慮しない均質場、ならびに、不均質度2.242の透水係数分布に対するRWPTの結果についてもプロットしている。ミクロ分散長と遅延係数の不均質性のマクロ縦分散長への影響は小さく、対照的に透水係数の不均質性はマクロ縦分散長に顕著に影響している。また、見かけの相関長が小さくなるにつれてマクロ縦分散長の値は透水係数の不均質度に応じた固有の値に漸近していくことがわかる。

4. 結論

溶質輸送実験と数値解析を通じて、物理的・化学的不均質性と移流分散現象の関係を定量化した。その結果、ミクロ分散長と遅延係数の不均質性の効果は小さいこと、透水係数の不均質度のみでマクロ縦分散長は決まらないこと、透水係数の不均質度に固有のマクロ縦分散長が存在することを明らかにした。

謝辞

本研究は、一般社団法人土地改良建設協会「2023年度国営事業地区等フィールド調査学生支援事業」による支援を受けました。また、研究を進めるにあたって、農林水産省九州農政局喜界島農業水利事業所の皆様には、ダムサイトでの調査やデータ提供など、様々なご協力をいただきました。ここに記して深謝の意を表します。

参考文献

- 1) Marco, B. and Daniele, P.: Geological entropy and solute transport in heterogeneous porous media, *Water Resources Research*, 53, pp.4691–4708, 2017.
- 2) Flury, M. and Flühler, H.: Tracer characteristics of brilliant blue FCF, *The Soil Science Society of America Journal*, 59, pp.22–27, 1995.
- 3) Fernández-García, D., Illangasekare, T.H. and Rajaram, H.: Difference in the scale-dependence of dispersivity estimated from temporal and spatial moments in chemically and physically heterogeneous porous media, *Advances in Water Resources*, 28(7), pp.745–759, 2005.

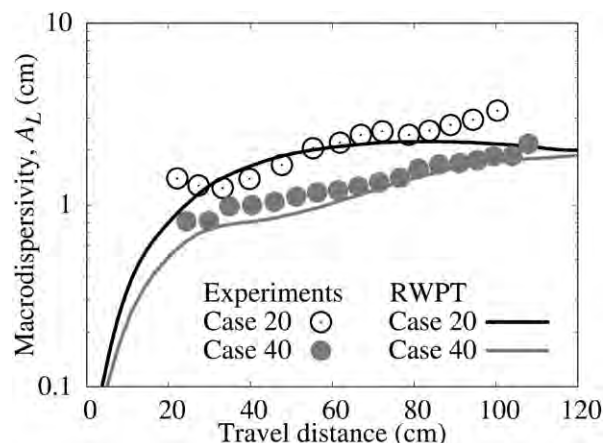


図8 実験値と数値解析結果

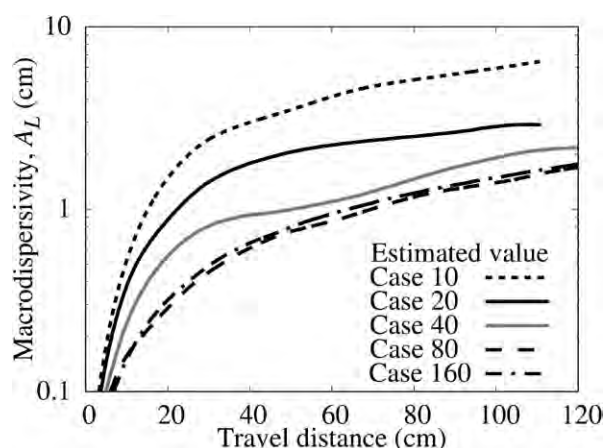


図9 ブロック数ごとの縦分散長比較

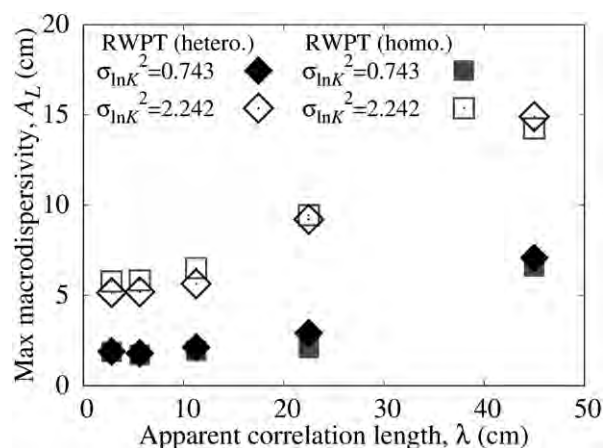


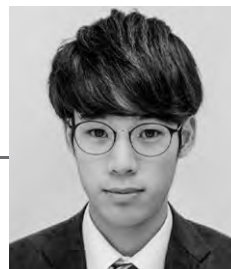
図10 見かけの相関長と分散性の関係

深層学習による石化岩の間隙率推定

神戸大学 農学部食料環境システム学科 施設環境学研究室 寺本 祐大

(進学先 神戸大学大学院)

指導教員 井上 一哉 教授



1. はじめに

南西諸島の一つである喜界島では、地下水位が低いことから、慢性的な水不足に悩まされてきた。現在では、喜界地下ダムが運用され、安定的かつ多様な水利用が可能となり¹⁾、白ゴマ、トマトやマンゴーなどの高収益農業が展開されている。農業において、利用可能な水量を把握することは非常に重要である。地下ダムの貯水量は帯水層を成す石灰岩の間隙率に依存するため、地下ダムの設計、保守運用の際に石灰岩の間隙率を計測することは必要不可欠である。しかしながら、迅速かつ効率的に石灰岩の間隙率を計測する方法は開発されていない。そこで、本研究では、深層学習による間隙率の推定システムを開発した。

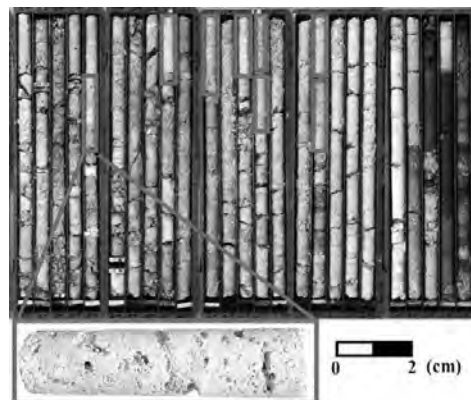


図1 石灰岩のボーリングコア

2. 深層学習

本研究では、喜界島と宮古島の地下ダムサイトにて得られた石灰岩ボーリングコア中の408試料を用いた。コアと試料の一例を図1に示す。重力排水試験²⁾にて計測した試料の間隙率 n を正解値とし、図2に示す畳み込みニューラルネットワーク(以下、CNNと称す)にて石灰岩の間隙率を推定した。CNNでは、多層にわたる中間層を順伝播することで畳み込み演算と入力画像の特徴抽出を達成した後、特徴量ベクトルの内積和を計算して推定間隙率 n_p を得る。その後、逆伝播にて n と n_p の誤差を最小にするように重みを更新してモデルを構築する³⁾。本研究では、推定値と正解値の差について $\pm 3\%$ を許容範囲として正解率を算出し、推定システムの性能指標とした。

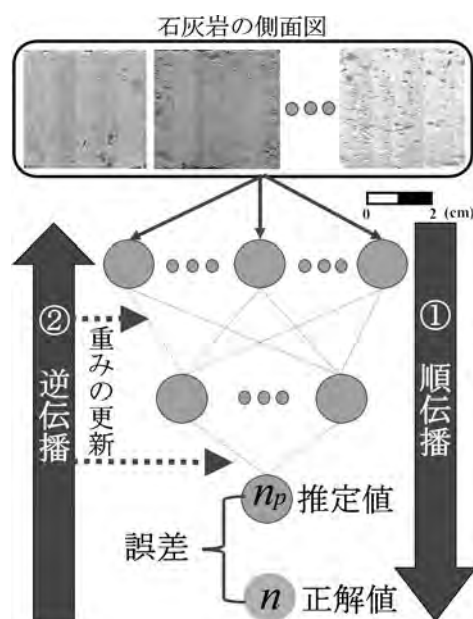


図2 CNNの流れ

3. 石灰岩の表面のみを入力情報とする推定

本研究では石灰岩試料の側面画像を入力値として用いた。側面図は試料を回転台の上に乗せて12方向から撮影した後、各画像にて30度の円周範囲を切り取り、横結合して作成した。画像のみを用いる推定をCase-Iと称し、CNNによる推定値と測定値の関係を図3に示す。 $\pm 3\%$ の範囲に収まらない試料が散見され、表1に示すように相関係数0.494、正解率58.1%である。そこで、システムの精度向上を目的として、試料の表面情報を深く学習させるためにボックスカウント法⁴⁾にて求めたフラクタル次元を入力値に加え、Case-IFとして推定した。推定結果は表1に示すように、相関係数は0.580、正解率は60.1%であり、Case-Iと比較すると相関係数と正解率は少し上昇した。この点は学習情報としてのフラクタル次元の効果を示している。

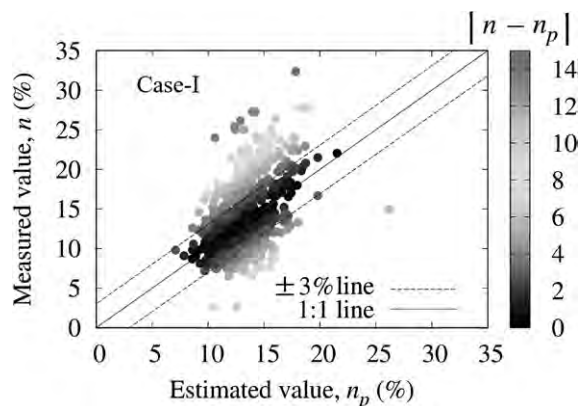


図3 Case-Iの推定結果

4. 密度を入力情報とする推定

試料の表面のみならず、試料全体の特徴を学習に反映させるため、Case-IとCase-IFに試料の乾燥密度を入力情報として追加するケースを試みた。それぞれCase-IDとCase-IFD と称する。表1に示すように、Case-IDは最良の結果になり、図4には推定値と測定値の関係を示す。推定精度の低い部分があるものの、乾燥密度はフラクタル次元よりも精度向上に寄与する情報と言える。

他方、Case-IFDはCase-IDよりも劣る結果となった。この点を考察するため、乾燥密度とフラクタル次元の関係を散布図、ならびに、ヒストグラムとして図5にプロットする。両者の相関は極めて低く、相関の低い2つの情報を同時に入力値とすると推定に直結するパターンを見出しにくくなり、CNNの学習能力を低下させる要因になると推察される。

図4のCase-IDにおいて十分な精度で推定できていない試料を考察すべく、推定誤差の大きい試料とその画像を図6に示す。図には正解値 n と推定値 n_p を併記している。図6(a)~(d)のように、大きな凹みをもつ試料は正解と離れた推定値になる傾向がある。これは学習に用いるサンプル数の少なさに伴う学習不足が要因である。また、図6(e)と(f)のように、表面に凹凸が少ない試料は画像としての特徴がなく、推定しにくい試料と考えられる。したがって、凹みや凹凸の数を定量化して入力値に加えることで精度向上を期待できる。

5. まとめ

本研究では、深層学習による石灰岩の間隙率推定システムを開発した。画像に加えてフラクタル次元や乾燥密度を入力情報として加えると推定精度はある程度向上した。また、入力値同士の相関を考慮することは重要であることを示した。

謝辞

本研究は、一般社団法人土地改良建設協会「2023年度国営事業地区等フィールド調査学生支援事業」による支援を受けました。また、農林水産省九州農政局喜界島農業水利事業所の皆様には、ダムサイトの調査やボーリングコア提供など、様々なご協力をいただきました。ここに記して深謝の意を表します。

参考文献

- 1) 農業農村工学会：農業農村ハンドブック，農業農村工学会，pp.407-415, 2010.
- 2) 後藤誠史：多孔体の測定法と物性，*Gypsum & Lime*, 240, pp.299-307, 1992.
- 3) Hagyeong L. et al., *Communi. Stat. Appli.*, 26(19), pp.1-5, 2019.
- 4) 本田勝也：フラクタル，朝倉書店，pp.42-53, 2002.

表1 各ケースにおける相関係数と正解率の対応

ケース名	相関係数	正解率(%)
Case-I	0.494	58.1
Case-IF	0.580	60.1
Case-ID	0.677	64.7
Case-IFD	0.671	62.3

ケース名においてIは画像，Fはフラクタル，Dは乾燥密度を表す

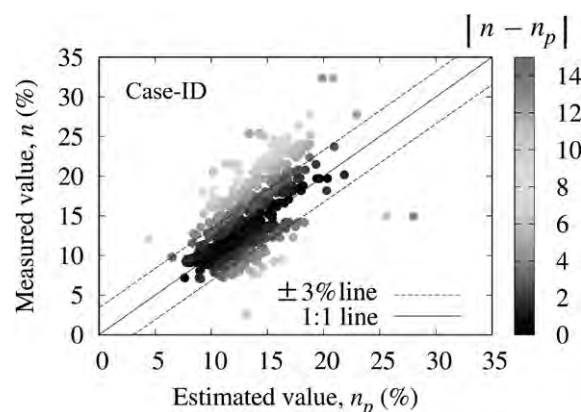


図4 Case-IDの推定結果

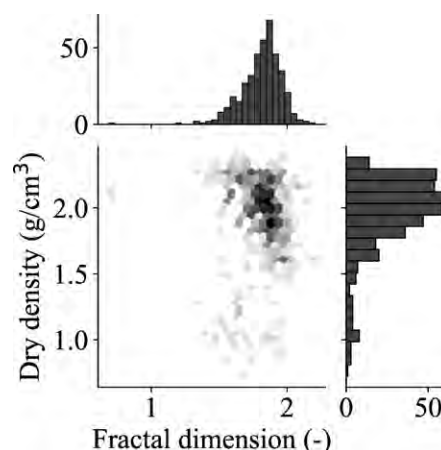


図5 乾燥密度とフラクタル次元の関係

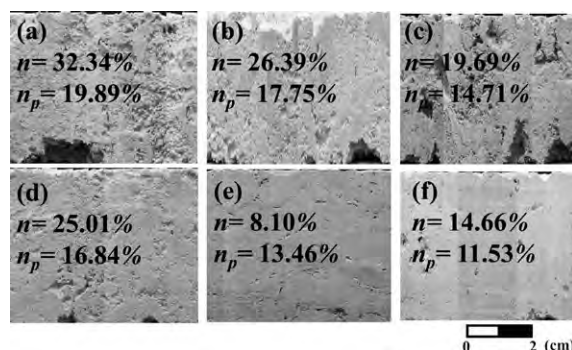


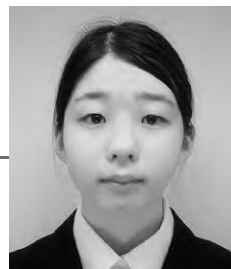
図6 推定誤差の大きい石灰岩に対する推定結果

寒冷地におけるけい酸塩系表面含浸材の効果発現の評価

高知大学 農林海洋科学部 農林資源環境科学科 中村愛里紗

(進学先 高知大学大学院)

指導教員 佐藤 周之 教授



1. はじめに

農業水利施設の補修・補強工事に関するマニュアル【開水路編】において、けい酸塩系表面含浸工法に関する改定がなされたが、施工事例はいまだ少ない。新工法に関する規定の段階的な整備・拡充を図るためには、データの蓄積が不可欠である。

本研究では、無機系表面被覆工法とけい酸塩系表面含浸工法の複合法によって補修された新潟県長岡市の農業用RC開水路の2箇所を対象とした。表層透気試験と簡易透気試験を実施し、寒冷地における複合法の効果発現の調査を行った。

2. 複合法の概要

無機系表面被覆工法とは、PCMなどの無機系表面被覆材により表面を被覆し、劣化因子の侵入抑制、漏水の遮断、通水性の改善を図る工法である。けい酸塩系表面含浸工法とは、C-S-Hゲルの生成により空隙を充填し、劣化因子の侵入抑制による耐久性の回復または向上を図る工法である。これらの工法を組み合わせることにより、ひび割れ幅の拡大抑制とひび割れ部の充填を可能とする。

3. 複合法の施工概要

既設RC開水路に対し、高圧洗浄工を実施した。その後、けい酸塩系表面含浸材を噴霧し、散水養生を行い既設面の表層部の緻密化を図った。その後、不陸調整+3mmの厚さでPCMを用いた無機系表面被覆工法を実施した。最後に、PCMの表層の緻密化を目的として、けい酸塩系表面含浸材の噴霧と散水養生を行った。

本研究で調査を行った新潟県長岡市は凍害を受ける寒冷地であり、開水路は施工から約7年が経過している。

4. 調査方法の概要

本研究では、寒冷地における無機系表面被覆工法とけい酸塩系表面含浸工法の複合法の効果発現を確認するため、再施工前後に表層透気試験と簡易透気試験を実施した。

Table 1 表層透気試験の評価基準

	優	良	一般	劣	極劣
透気係数 kT ($\times 10^{-16} \text{ m}^2$)	0.001 ~ 0.01	0.01 ~ 0.1	0.1 ~ 1	1 ~ 10	10 ~

Table 2 簡易透気試験の評価基準

	優	良	一般	劣	極劣
空気流入量 (mL)	0 ~ 5	5 ~ 15	15 ~ 35	35 ~	

表層透気試験はJSCE-K572「けい酸塩系表面含浸材の設計施工指針(案)」を参考として、ダブルチャンバー方式の透気試験機を用いた。ダブルチャンバー方式の透気試験機には内部チャンバーと外部チャンバーがあり、2つのチャンバーの圧力を等しくコントロールすることで外部から内部への空気の流入を物理的に排除する仕組みを持つ。

簡易透気試験は、透気シリンダー「ACROS」(株式会社マルイ)を用いたシングルチャンバー法で実施した。60秒間シリンダー内の負圧を維持した後、復圧にともないシリンダー内部に流入する空気量を測定する。

今回、表層透気試験の結果はTable 1に示すR.J.Torrentらが提案した基準により評価を行った。簡易透気試験の結果はTable 2に示す渡辺らが示した透気性のグレードのイメージ図を基に設定した基準を基に評価を行った。透気係数 kT ($\times 10^{-16} \text{ m}^2$)と空気流入量はともに、値が小さいほどコンクリート表層の緻密性が高く、物質透過性が小さいことを表す。

本試験では測定位置を開水路の両壁面気中部、吃水部、水中部とし、測定点数は96点とした。

5. 試験結果

表層透気試験の結果について、気中部をFig. 1、吃水部をFig. 2、水中部をFig. 3に示す。また、左岸側気中部

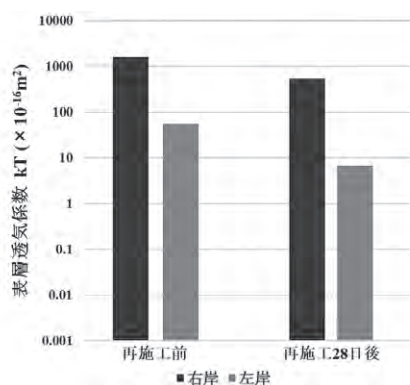


Fig. 1 吃水部における透気係数の変化

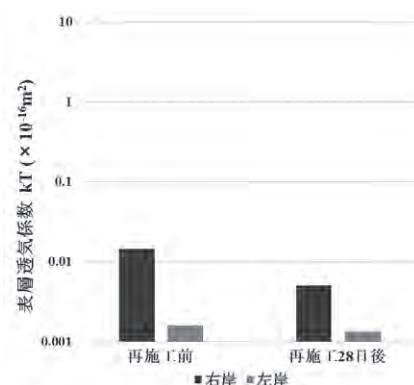


Fig. 2 気中部における透気係数の変化

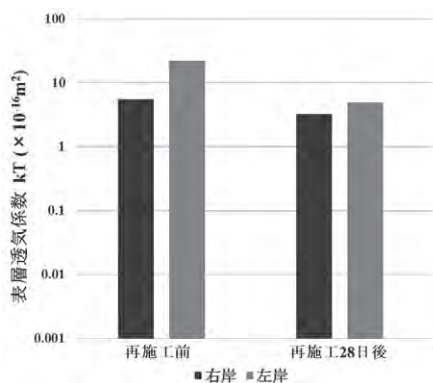


Fig. 3 水中部における透気係数の変化

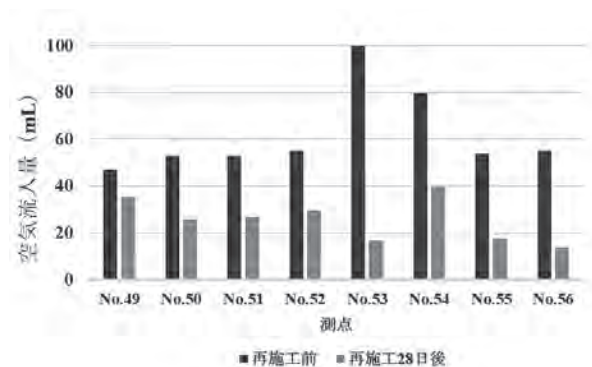


Fig. 4 左岸側気中部における空気流入量の変化

における簡易透気試験の結果をFig. 4に示す。

Fig. 1～4より、含浸材の再施工後、透気係数 kT 、空気流入量はともに減少したことが分かる。複合法のひび割れ幅の拡大抑制とひび割れ部の充填の効果が発揮され、コンクリート表層の緻密性が高まったことが確認された。

本研究において、空気流入量が測定可能であったのは、右岸側気中部の1点を除きすべて左岸側の気中部のみであった。吃水部、水中部は水による摩耗や凍害による劣化により表面粗さが悪化していたため、測定不可であったと考える。また、右岸側壁面は降雪の影響を強く受けるため、凍結融解作用により微細なひび割れが多数発生していたと考えられる。

また、本研究では過去の追跡調査より多い測点を設定した。測点を多く設定することにより、同区画内における測定値のばらつきは大きくなるが、劣化状況を面的に把握することが可能となると考える。

6. おわりに

本研究は、寒冷地における無機系表面被覆工法とけい酸塩系表面含浸工法の複合法の効果発現を表層透気試験と簡易透気試験により調査した。

表層透気試験および簡易透気試験による測定値は、再施工後ともに減少していたことから、複合法のひび割れ幅の拡大抑制とひび割れ部の充填、という効果が発揮されたことが確認された。けい酸塩系表面含浸材は乾燥固形分として残存した場合、継続的に空隙充填の効果を発揮する。今後、追跡調査を行い、けい酸塩系表面含浸材の継続的な効果発現の限界を明確化する必要があると考える。

簡易透気試験は測定面の劣化状況による適用限界の存在が示唆された。測定面の粗度に注目した簡易透気試験の適用限界を明確化する必要があると考える。また、測点を多く設定することにより、劣化状況を面的に把握することが可能となった。劣化の進行予測を容易にすることが期待される。

謝辞

本研究は、土地改良建設協会の支援を受けることで、北陸農政局信濃川左岸流域農業水利事務所から国営信濃川左岸流域土地改良事業の概要や計画進行状況について説明を受け、調査の機会を頂きました。これらの方々の支援と御協力に心から感謝申し上げます。