

助成番号 2023-2

## 地域特性を考慮したコンクリートひび割れの原因推定方法の提案

愛媛大学大学院理工学研究科 准教授 河合 慶有

### 1. はじめに

愛媛県内では、銅スラグ細骨材とフライアッシュを併用したコンクリートが標準的に使用されており、東予・中予・南予地区において、現地で調達される砕石と混合使用されることが多い。四国は、四国山地を境として、南北に降雨特性が異なる地域であり、骨材産地および降雨特性の違いからひび割れの発生、進展のリスクは大きく影響を受けると考えられる。また、日本コンクリート工学会（JCI）が発刊しているひび割れ指針においては、水掛かりの影響がひび割れの原因推定に考慮されるように改訂されている。ひび割れ指針に付属のひび割れ原因推定ソフトは、ひび割れ幅や発生時期、規則性などの標準調査の結果に基づき、44種類のひび割れ原因に対する要因ごとの重みを一律として線形和により推定結果のリストを表示するソフトとなっている。さらに、2022年度の改訂版<sup>1)</sup>では、環境作用として水掛かりの有無を考慮することで、ひび割れ原因の絞り込みを行うようにモデルを改良している。これらの既存の原因推定モデルに共通した課題は、①ひび割れに影響する要因の重みを一律としている点と、②地域ごとに異なる材料・環境の影響度を考慮していないことであるとの見解に至った。そこで、本研究では、骨材産地（和泉層群）の違いと四国山地を境として降水量の多い南部と少ない北部に分けられる点に着目して、愛媛県内のひび割れ事例調査を通じて、地域特性（骨材・混和材の有無、降雨特性）がコンクリートのひび割れ発生・進展に与える影響度を把握することを目的として、機械学習を用いたひび割れ原因推定モデルに関する研究を行った。

なお、本研究は、一般社団法人四国クリエイト協会「2023年度建設事業に関する技術開発支援制度」による助成を受けて実施したものである。

### 2. 実験的検討と結果・考察

本研究のコンクリートには、普通ポルトランドセメント（密度： $3.16\text{g/cm}^3$ ）を使用した。細骨材の砕砂には、愛媛県西条丹原町関屋産砂岩コンクリート用砕砂（表乾密度： $2.56\text{g/cm}^3$ ，吸水率：1.89%，粗粒率：2.86）を使用した。粗骨材には愛媛県西条丹原町関屋産砕石（表乾密度  $2.62\text{g/cm}^3$ ，吸水率 1.70%）の最大寸法が 15mm のものと、愛媛県西条丹原町関屋産砕石（表乾密度  $2.59\text{g/cm}^3$ ，吸水率 0.93%）の最大寸法が 20mm のものを質量比 1：1 で使用した。JISA 6201 II 種適合品であり、四国電力で生産されている FA（密度： $2.30\text{g/cm}^3$ ）を使用した。また銅スラグ細骨材には、CUS2.5（表乾密度： $3.55\text{g/cm}^3$ ，吸水率：0.76%，粗粒率：2.29）を使用した。表 1 に本研究で作製したコンクリートの配合及び混和剤量を示す。

表1 コンクリートの配合

配合	W/C(%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )						単位量(g/m <sup>3</sup> )		
		水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材G		銅スラグ CUS	フライアッシュ FA	混和剤	
					G1	G2			AE減水剤	AE剤
OPC E	60	175	292	857	473	473	-	-	2917	1750
CUS	60	175	292	848	430	430	124	-	1750	1750
FACUS	60	170	283	732	468	468	170	24	4250	2550

配合は、水結合材比を60%とし、単位水量は175 kg/m<sup>3</sup>を基本とした。スランプ値と空気量の目標値は、それぞれ8cm, 4.0%とした。なお、配合は愛媛県東予地域で標準的に使用されている銅スラグ細骨材を混合使用したCUS配合、およびフライアッシュを混和し銅スラグ細骨材を混合使用したFACUSの2種類を作成した。混和剤には、AE減水剤にフローリックSV10を、AE助剤としてフローリック社製のものを100倍に希釈して使用した。また、本研究では、CUSの混合使用およびFAの混和が水分浸透性状に与える影響を把握するためにJSCE-G 582-2018<sup>2)</sup>に準拠して水分浸透速度係数を算出した。

本実験では、浸漬時間を5時間、24時間、48時間とし各浸漬時間に3体ずつ水分浸透深さの測定を行い、3体の平均値を水分浸透深さとした。また、測定した水分浸透深さから水分浸透速度係数を算出した結果を図1に示す。図よりOPC E, CUS, FACUSの水分浸透速度係数は同程度となり、CUSの混合使用およびFAの混和による水分浸透性状に与える影響は少ないと考えられる。

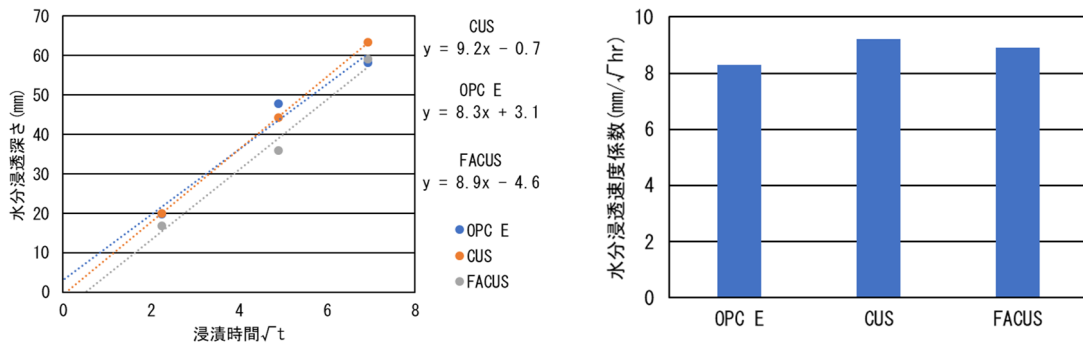


図1 水分浸透深さと水分浸透速度係数の測定結果

### 3. コンクリート構造物の現地調査<sup>3)</sup>

CUSコンクリートを対象とした目視による主な調査結果は以下の通りである。

- ・表層乾燥収縮による微細なひび割れを部分的に確認した。表層コンクリートに浮き等は確認されず硬化コンクリート構造物としては、健全な状態であった。
- ・CUS配合コンクリートが使用されているが、表層の気泡および色合いは、普通コンクリートと変わらない。ただし、コンクリート打設型枠継ぎ目に砂すじが残っている個所は、CUSが露出し黒色を呈している。
- ・表層乾燥収縮による微細なひび割れや、コンクリート打設時の型枠セパレーター跡付近に、打設コンクリート沈降に伴う初期ひび割れを部分的に確認した

・水掛かりと表層コンクリートの劣化について、橋面からの排水が上部桁間を滴り、錆汁を伴っていると見られる遊離石灰が確認された。鉄筋コンクリートの劣化要因にも繋がるため、集排水流末の処置には留意する必要がある



(桁下面状況)

歩道舗装面にひび割れあり  
(左写真直上付近)

図 2 水掛かりによるひび割れの進展

#### 4. 機械学習を用いたひび割れ原因推定モデル

本研究では、ひび割れ原因推定の最初の段階である4つの大分類について、ひび割れ事例調査結果をもとに機械学習を用いることでひび割れ原因推定精度を向上させることを目的として、機械学習プログラムの構築および精度検証を行った。第3章に示したひび割れ事例調査の結果を踏まえて、既存のひび割れ調査結果を含めて機械学習に用いる教師データを整理した。ひび割れ事例調査結果には、構造物の概要およびひび割れの発生状況、標準調査とそれに基づく原因推定が明記されているものを採用した。加えて、特に多くの事例で測定結果が記録されていたひび割れ幅を機械学習の入力パラメータとした。図3に大分類ごとの割合を示す。図より、材料、使用環境の割合が特に高いことが分かる。また、ひび割れの原因として最も多いものは乾燥収縮(A9)、次いで塩化物の浸透による内部鋼材の錆(C8)、温度・湿度の変化(C1)となっている。

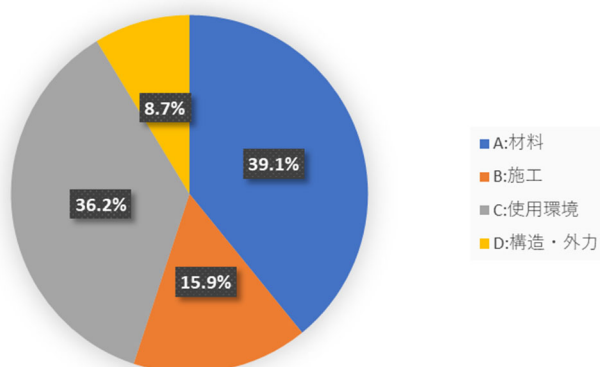


図 3 4分類の割合

本検討では、多クラス分類の機械学習にソフトマックス関数を用いた。入力値  $x_i$  をソフトマックス関数で計算することで出力  $y_i$  を得ることができる。また、1つの出力層に対して全ての入力が結びついているため、各々の出力値に全ての入力値が反映されるという特徴がある。各データにおいて、入力値を  $z=wx+b$  とし、4つのクラスごとに  $y_i$  が確率として出力される。なお、 $w$  は重み係数、 $b$  はバイアスとなっている。本研究において  $x_i$  はひび割れ幅、発生時期、規則性の有無、形態、範囲、 $y_i$  は4種類の大分類である。つまり、特徴量を入力し、ソフトマックス関数を通じて4つの分類のどれに該当する可能性が高いかを評価することができる。

本モデルでは、上記の特徴量に加えて「水掛かりの有無」を考慮し、機械学習によるひび割れ原因推定の精度検証を行った。特に、本研究で主対象とする水掛かりの有無を考慮することの有用性を検討するために水掛かりを考慮する場合としない場合の正解率について比較検討した。図4に結果を示す。いずれのパターンにおいても正解率が上昇または同程度であることが確認できる。以上の検討結果に基づき、ひび割れ原因推定において水掛かりの有無を考慮することは高い精度を確保する上で有用であると言える。

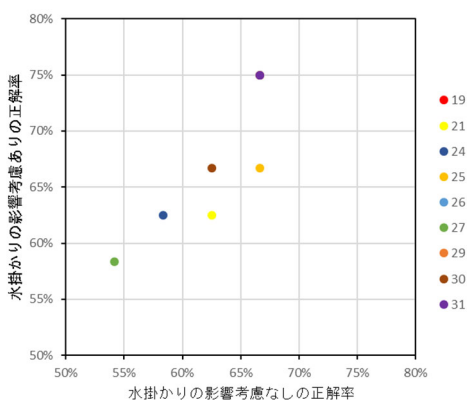


図4 水掛かりの有無による正解率の比較

## 5. 研究成果のまとめ

本研究では、機械学習を用いてコンクリートのひび割れ原因の大分類である材料、施工、使用環境、構造・外力の4分類を行うひび割れ原因推定プログラムを構築し、さらに水掛かりの有無を考慮することでひび割れ原因推定精度が向上することを示した。以上の検討結果から、水掛かりの有無を特徴量として考慮した機械学習を用いて複数のひび割れ原因候補が推定される場合の絞り込み効果などが期待される。

### 参考文献

- 1) 日本コンクリート工学会：コンクリートのひび割れ調査，補修・補強指針-2022-，2022
- 2) JSCE-G 582-2018：短期の水掛かりを受けるコンクリート中の水分浸透速度係数試験方法（案），2018
- 3) 日本コンクリート工学会四国支部研究委員会報告書：材料分離が生じたコンクリート中の鉄筋腐食性状の評価委員会，2023