

論文 微生物代謝を活用したコンクリートの基礎的物性の把握

林 俊斉*1・齋藤 淳*2・河合 慶有*3・西田 孝弘*4

要旨: 本研究では、微生物代謝を活用した高機能コンクリートの開発に向けて、納豆菌および栄養源を含む培養液をコンクリートに投入した場合にコンクリートの基礎的物性に及ぼす影響およびひび割れの閉塞効果について検証を行った。その結果、培養液をコンクリートに投入してもフレッシュ性状への影響は軽微で化学混和剤で十分に調整することができるとともに、ひび割れを早期に閉塞する効果があることがわかった。また、練混ぜ水に対する培養液の置換率が0%~20%までは、硬化後のコンクリートの乾燥収縮ひずみ、中性化深さおよび凍結に対する耐久性指数に影響がないことを把握した。

キーワード: 微生物代謝, 納豆菌, 乾燥収縮ひずみ, 凍結融解, 中性化, ひび割れ閉塞

1. はじめに

メンテナンスフリーな材料を目指して、「自己修復材料」なる新材料が各分野で検討されている。自己修復の技術は、実現すればメンテナンス等にかかるコストの削減を可能にする。このことは政府が2013年に掲げた「日本再興戦略」にも示され、自己修復材料等の新材料は、2030年には世界市場規模が30兆円になるとされている¹⁾。

さらに、「バイオ戦略2020」²⁾においては、バイオテクノロジーや再生可能な生物資源等を利活用し、持続的で再生可能性のある循環型の経済社会であるバイオエコノミー社会を実現することを目指し、その実現にはバイオものづくり関連の市場拡大が必要とされている。2018年の市場規模32.5兆円に対し、2030年の市場規模目標は53.3兆円とされている。

著者らは酸素が鋼材の腐食速度に及ぼす影響を勘案し、コンクリート内部の酸素を積極的に低下させることにより、カソード反応を抑制する材料の開発を進めてきた。その結果、内部の鋼材の腐食を抑制し、ひび割れを自己治癒し得る方法として、好気性微生物の代謝活動を活用した高機能コンクリートの開発を進めている³⁾。

本研究では、好気性微生物である納豆菌をその栄養源となる各種培地とともにコンクリートに投入した場合に、コンクリートのフレッシュ性状および硬化性状に与える影響、さらにそのひび割れ閉塞効果を検証した。

2. 実験概要

2.1 使用材料

表-1に使用材料を示す。本研究では、納豆菌(miyagino)を培養し実験に用いた。培地は、事前検討にて納豆菌の生育に適するとされたS7培地、S7培地よりも安価で調達が容易なLB培地の2種類とした。また、長期的に微

生物の栄養源となり得ることを期待した生分解性プラスチックPLAを使用した。

2.2 納豆菌の培養方法

著者らの既往の研究³⁾を参照し、前培養としてLB培地(ペプトン, 酵母抽出液, NaCl) 20mLを分取した試験管に納豆菌の原液(0.8mL)を植菌し、表面をラップで覆い24時間以上振とう培養した。本培養は、S7培地もしくはLB培地を使用した。培地成分を蒸留水に溶解させ1000mLにメスアップした。その後、それぞれの培地500mLに前培養液1mLを植菌した。植菌後、エアポンプに接続したチューブを挿入し、エアレーションを24時間行った。なお、培養は20°Cの恒温室で実施した

表-1 使用材料

材料名称	略号	備考
水	W	つくば市水道水
セメント	N	普通ポルトランドセメント 密度 3.16g/cm ³
	BB	高炉セメントB種 密度 3.04g/cm ³
細骨材	S	静岡県掛川産山砂 密度 2.57g/cm ³
粗骨材	G	茨城県桜川産碎石 密度 2.64g/cm ³
混和剤	AD1	AE減水剤
	AD2	AE剤
	AD3	消泡剤
微生物	NA	納豆菌 miyagino
栄養源	S7	S7培地 グルコース, MOPS等
	LB	LB培地 ペプトン, 酵母エキス等
	PLA	生分解性プラスチック ポリ乳酸

*1 株式会社 安藤・間 技術研究所構造・材料研究部主任研究員 博士(工学) (正会員)

*2 株式会社 安藤・間 技術研究所研究開発推進部担当課長 博士(工学) (正会員)

*3 愛媛大学大学院 理工学研究科理工学専攻准教授 Ph.D. (正会員)

*4 静岡理科大学 理工学部土木工学科教授 博士(工学) (正会員)

表-2 コンクリート配合

配合	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)						添加量 (W×%)		添加量 (kg/m ³)	スランプ (cm)	空気量 (%)	温度 (°C)	
			W	N	S	G	AD1	AD2	AD3	S7					LB
OPC	55	43.5	165	300	779	1038	3.00	0.006	0	0	0	0	10.5	4.3	20.2
S7							2.40	0.006	0.012	40	0	0	11.5	4.6	19.7
LB							2.40	0.006	0.036	0	5	0	11.0	4.7	19.6
LBPLA							2.40	0.006	0.036	0	5	5	11.0	4.9	19.6

3. ひび割れ閉塞効果に関する実験

3.1 コンクリート配合

表-2 にコンクリート配合を示す。水セメント比 W/C=55%, s/a=43.5%の一般的なコンクリート OPC をベース配合とし、微生物と栄養源を含む培養液（写真-1）を添加した配合を3種類とした。納豆菌 NA の培養に S7 培地を使用した S7, LB 培地を使用した LB, さらに、後者に PLA を加えた LBPLA である。なお、S7 および LB の中に NA は含まれている。

3.2 通水試験

(1) 試験体概要

コンクリートのひび割れ閉塞を確認するための通水試験はモルタルの試験体で実施している既往の文献⁴⁾を参考にした。コンクリート試験体は、プラモールドの高さ 100mm まで打込み、48 時間後に脱型し、材齢 28 日まで標準水中養生とした。その後、20°C、60%RH 環境下で7日間気中養生し、気中養生中に載荷試験装置を用いて割裂ひび割れを導入した。ひび割れ幅は下面で測定した。割裂した供試体はプラモールドに戻し、供試体との隙間をシーリング材で被覆し、通水試験に用いた（写真-2）。なお、割裂により導入するひび割れ幅および通水量は、ケース間で同一とすることは困難であるため、ケース毎に4体の試験体で得られたひび割れ幅で検証を行った。

(2) 試験の手順と頻度

通水実験では、20°Cの環境に24時間以上静置した水道水を用いた。図-1 に示すようにプラモールドの上側 100mm の範囲に水を溜め、通水実験を実施した。ひび割れを通じて流れ出た水量を測定した。また、使用する水は水道水 700mL とし、本実験では10分間に通水した量を記録した。前述した気中養生終了後材齢 35 日を通水試験の初期値とし、その後祝祭日を除き、毎週試験を実施した。期間中はモールドごと水中養生とした。

3.3 実験結果と考察

(1) フレッシュ性状および圧縮強度

表-2 にフレッシュ性状を示す。OPC と比較して、培養液を添加した3配合ではスランプおよび空気量はともに大きくなる傾向を示した。特に LB は S7 よりも空気量が大きくなりやすく、PLA によるフレッシュ性状への影



写真-1 培養液 (LB 培地の例)

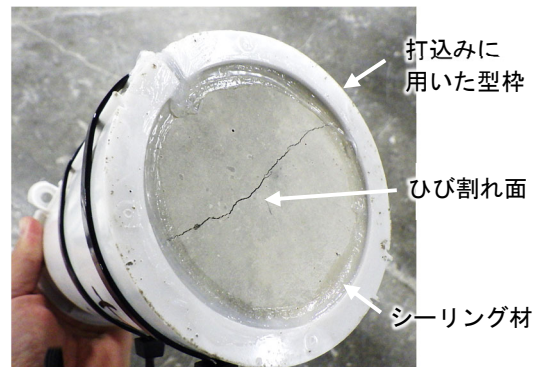


写真-2 通水試験に用いる供試体の概要

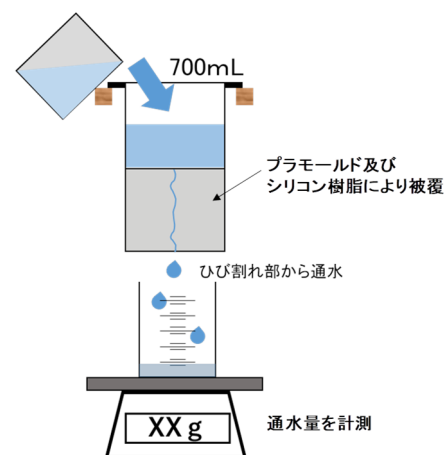


図-1 通水試験方法の概要

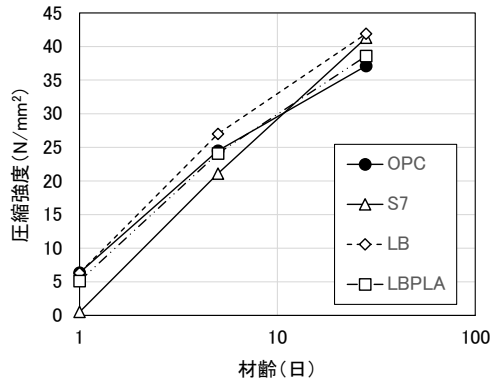


図-2 圧縮強度

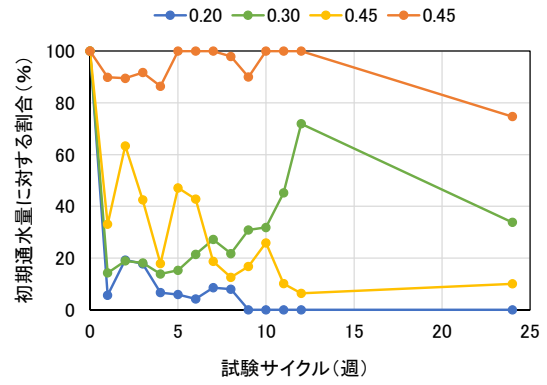
響は軽微であった。培養液の添加による空気量の増大は、炭酸ガス等微生物の発酵代謝物の影響によるものと考えられる。なお、スランプおよび空気量は化学混和剤の添加量で十分に調整可能であることがわかった。

図-2 に圧縮強度試験結果を示す。S7 は $\sigma 1$ において 0.52N/mm^2 と強度発現が遅い傾向を示したが、LB および LBPLA では OPC と遜色ない結果であった。 $\sigma 28$ ではばらつきはあるものの、いずれの配合も OPC と同等以上の結果となった。S7 における強度発現の遅延は、LB では確認できないことから、S7 培地に含まれるいずれかの成分が影響していると考えられる。例えば、S7 培地にはグルコース（糖類）が1%含まれる。一方、LB 培地にはペプトンが1%含まれる。ペプトンの約7%が炭水化物であり、仮に全炭水化物が糖類とした場合、LB 培地に含まれる糖類は最大0.07%である。したがって、培地に含まれる糖類の量が LB 培地よりも S7 培地の方が10倍以上多く、糖類がセメントの水和反応を阻害し、コンクリート初期の強度発現に影響していることが想定される。したがって、コンクリートへの適用を前提とする場合には、微生物の栄養源として S7 培地よりも LB 培地の方が適していると考えられる。

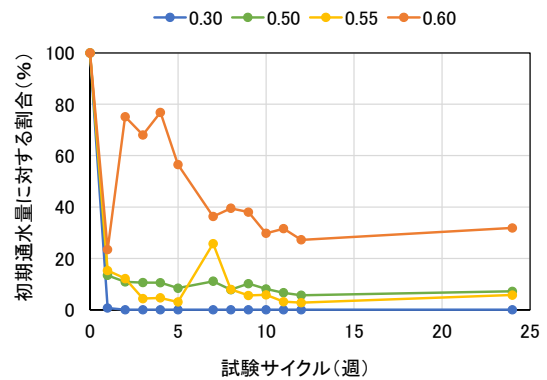
(2) ひび割れ閉塞効果

図-3 に通水試験結果を示す。図の凡例は、各試験体に導入したひび割れ幅を示している。縦軸は試験サイクル0週の通水量（初期通水量）を100%とした場合の各試験サイクルにおける通水量の割合を示している。なお、100%を超えた場合は100%にプロットした。

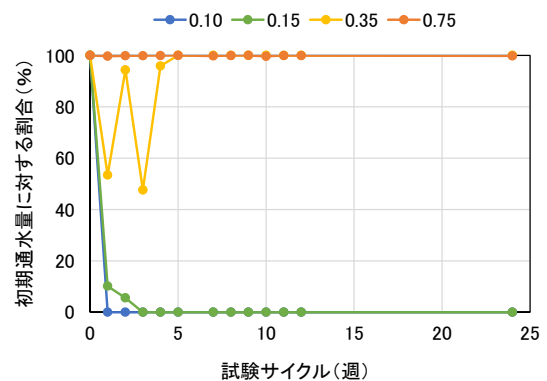
OPC（図-3(a)）では、ひび割れ幅0.20mmの場合に試験サイクル9週で閉塞した。一方、0.30mm以上のひび割れ幅では通水量の低下が見られたケースもあったが、試験サイクル24週においても閉塞しなかった。また、ひび割れ幅0.45mmの2ケースでは全く異なる傾向を示した。これは、表面のひび割れ幅が同じでも導入したひび割れは内部も含めてばらつきを有しており、得られた結果はばらつきの範囲内と考えている。ここでは、OPCで



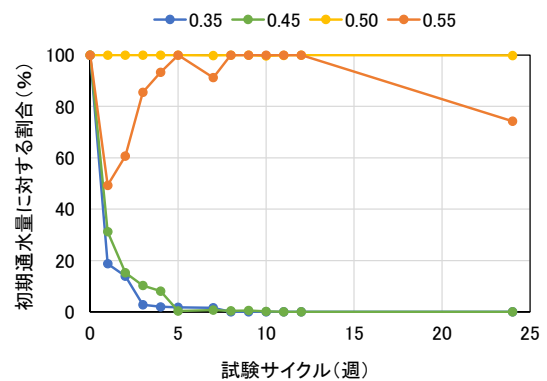
(a) OPC



(b) S7



(c) LB



(d) LBPLA

図-3 通水試験結果

あってもひび割れ幅が 0.2mm 以下と小さければ、コンクリート内部の環境あるいは養生環境などの条件が整えば、コンクリート中の未水和のセメントが反応して、ひび割れを閉塞する可能性があることを示唆している。

S7 (図-3(b)) では、ひび割れ幅 0.30mm の場合に試験サイクル 1 週で通水量が初期の 0.6% にまで大きく減少し、その翌週には完全に閉塞した。一方、ひび割れ幅 0.50mm~0.60mm では、初期通水量に対して 10%未満まで低下したものの、完全に閉塞することはなかった。

LB(図-3(c)) では、ひび割れ幅 0.10mm および 0.15mm の場合に試験サイクル 1 週および 3 週で閉塞した。0.35mm を超えるひび割れ幅で閉塞しなかった。

LBPLA (図-3(d)) では、ひび割れ幅 0.35mm および 0.45mm の場合に試験サイクル 5 週で 2%未満となり、試験サイクル 8 週以降に完全に閉塞した。

図-4 はひび割れ幅と初期通水量との関係を示している。通水試験終了時、閉塞したケースは黒塗り、初期通水量に対して 10%未満まで減少したケースを黄塗りとした。納豆菌を混入した 3 ケースでは、ひび割れ幅 0.5mm 前後まで閉塞ないしは通水量の低下がみられる。

以上より、納豆菌を混入した S7, LB, LBPLA のケー

スでは、OPC よりひび割れ幅が大きい場合においても、早期にひび割れを修復する効果があることがわかった。通水量のばらつきは、析出物が固着するまでの不安定さが招くものと推察しており、全体的な傾向として通水量が収束するか否かの区別は可能と考えている。

通水試験前後の試験体底面の状況を図-5 に示した。納豆菌を混入したケースでは、ひび割れ部に白い析出物(炭酸カルシウム)が顕著に発生していることがわかる。なお、試験サイクル 1 週目から通水量が大きく低下しているものの、試験体表面の観察では析出物を確

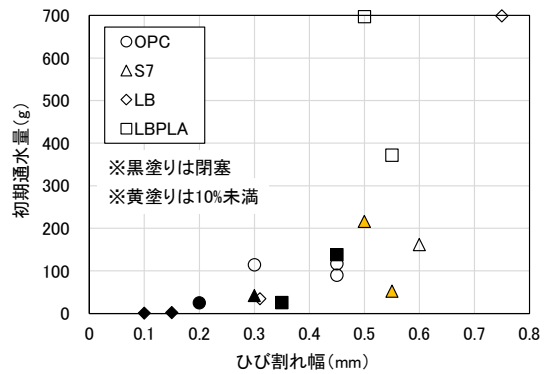


図-4 ひび割れ幅と初期通水量

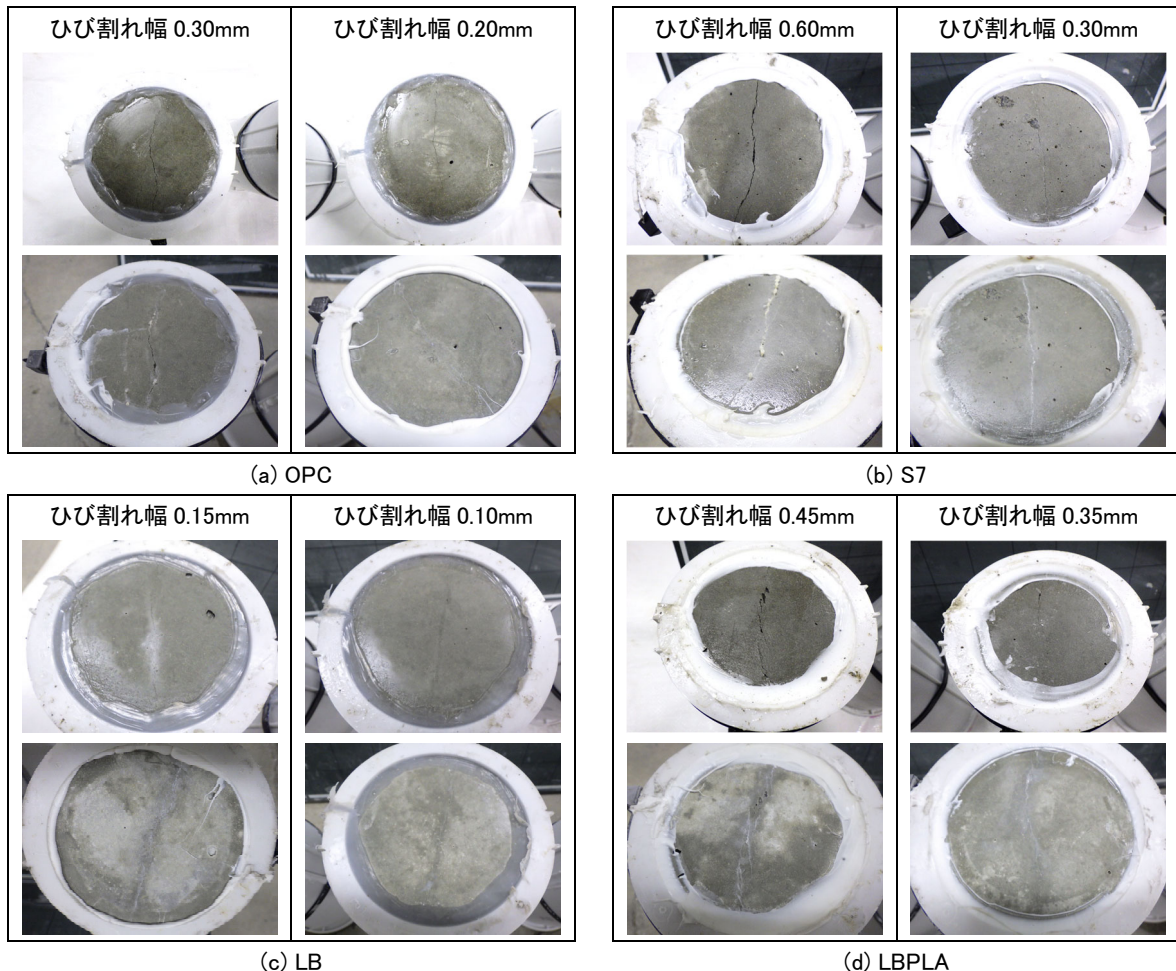


図-5 通水試験前後の試験体底面の状況 (上段: 試験前, 下段: 試験後)

表-3 コンクリート配合

配合	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)								スランブ (cm)	空気量 (%)	温度 (°C)
			W	BB	S	G	AD1	AD2	AD3	LB			
LB0	55	43.5	168	305	771	1024	3.05	0.009	0	0	13.7	4.0	20.6
LB5			160	291	784	1043	2.91	0.009	0.017	8.4	12.0	5.0	20.5
LB10			160	291	784	1043	2.91	0.009	0.029	16.0	11.5	4.7	20.4
LB20			160	291	784	1043	2.91	0.009	0.041	32.0	12.0	5.7	21.0
LB50			156	284	792	1053	2.84	0.009	0.119	78.0	11.5	4.7	21.0
LB70			156	284	792	1053	2.84	0.009	0.165	109.2	14.0	4.1	21.0

認できないケースもあった。これは、試験体内部で析出していたことが想定される。今後は、コンクリート内部の状況についても把握していきたいと考えている。

4. 硬化コンクリートの基本性能を確認する実験

4.1 コンクリート配合

表-3 にコンクリート配合を示す。土木分野で一般的に使用されるようになった高炉セメントB種の配合について、水セメント比 W/C=55%, s/a=43.5%の一般的なコンクリートLB0をベース配合とした。納豆菌の栄養源には、3章の検証結果よりLB培地を採用した。納豆菌を含む培養液が硬化コンクリートの基本性能に及ぼす影響を確認するため、練混ぜ水の一部を培養液に置き換え、その置換率を5%, 10%, 20%, 50%, 70%とする配合をそれぞれ、LB5, LB10, LB20, LB50, LB70とした。配合は、目標スランブ 12±2.5cm, 目標空気量 4.5±1.5%を満足するように、単位水量および化学混和剤を調整し、通常の配合調整を施した。

4.2 試験項目

試験項目は、圧縮強度試験、長さ変化試験、促進中性化試験、凍結融解試験を実施した。長さ変化試験は、JIS A 1129による方法との相関性が確認されている乾燥収縮ひずみの簡易試験法^{5~7)}を採用した。使用する供試体はひずみゲージを埋設したΦ100×200mmの円柱供試体である。その他の試験は、JIS規格に準拠して実施し、凍結融解試験は30サイクルごとの測定とした。

4.3 実験結果と考察

(1) フレッシュ性状および圧縮強度

培養液の添加率が大きくなるとスランブおよび空気量が增大する傾向であった。LB0と比較して、LB5, LB10, LB20では化学混和剤を、LB50, LB70では単位水量に加え化学混和剤を調整した。いずれのケースにおいても通常の配合調整で十分調整可能であることがわかった。

図-6に圧縮強度を示す。LB0, LB5, LB10, LB20は同等の結果となった。置換率が大きいLB50, LB70では、圧縮強度が大きくなった。これはスランブ調整のために

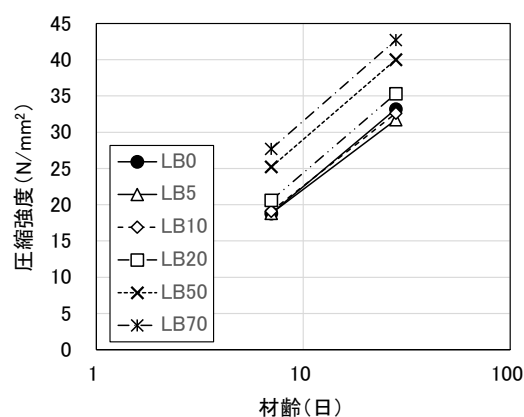


図-6 圧縮強度

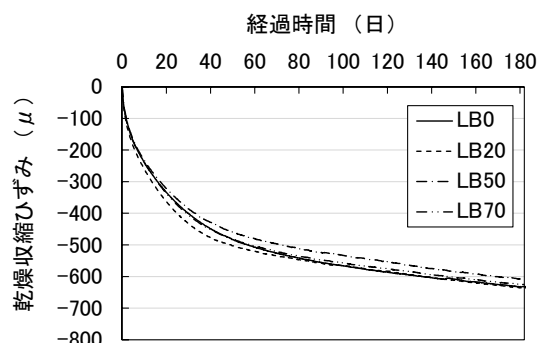


図-7 乾燥収縮ひずみ

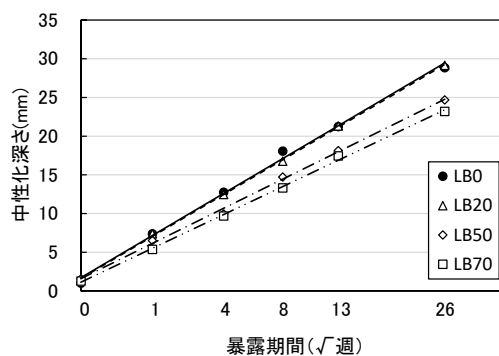


図-8 中性化深さ

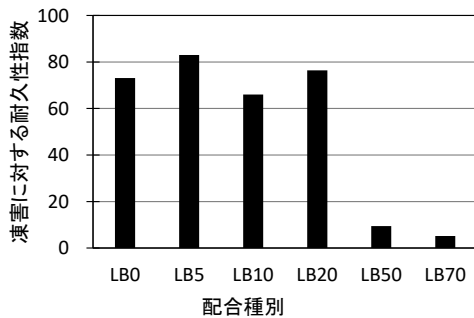


図-9 凍害に対する耐久性指数

単位水量を減じたことで余剰水が減り、空気量調整のために消泡剤の使用量が多くなっていることから、エントラップトエアを消失させたためと考えられる。いずれにしても所定の空気量にすることで培養液が圧縮強度に与える影響はないことがわかった。

(2) 乾燥収縮ひずみ

図-7に乾燥収縮ひずみを示す。試験材齢182日時点での乾燥収縮ひずみは、LB0：-631 μ 、LB20：-634 μ 、LB50：-609 μ 、LB70：-626 μ であった。いずれの配合においても乾燥収縮ひずみに大差なく、培養液がコンクリートの収縮特性に与える影響は軽微であることがわかった。

(3) 中性化

図-8に中性化深さを示す。ベース配合のLB0から培養液置換率20%のLB20までは中性化深さは同等であった。一方、高置換となるLB50、LB70では中性化深さが小さくなる傾向を示した。これは、4.3(1)節で述べた通り、単位水量および消泡剤による配合調整の影響によるものと考えられる。いずれにしても培養液がコンクリートの中性化深さに与える悪影響はないことがわかった。

(4) 凍結融解

図-9に凍害に対する耐久性指数を示す。ベース配合のLB0から培養液置換率20%のLB20までは耐凍害性に影響はないことがわかった。一方、高置換となるLB50、LB70では60サイクルの測定時に相対動弾性係数が60%を下回る結果となった。前述した通り、高置換配合LB50、LB70では圧縮強度および中性化に改善がみられ、適切な空気量であることから、一般的には耐凍害性があることを想定したが、それに反した結果となった。この原因については、一般的な傾向ではないため、別途詳細な調査が必要であると考えている。

以上の結果より、コンクリートに培養液を投入する場合は、練混ぜ水に対する培養液の置換率を20%以下とすることが望ましい。

5. おわりに

本研究の結果、以下の知見を得た。

- (1) 練混ぜ水の一部を培養液で置換してコンクリートに投入した場合、フレッシュ性状への影響は軽微で化学混和剤による調整が可能な上、ひび割れを早期に閉塞する効果を把握できた。
- (2) S7 培地は LB 培地よりも糖類が多いことから若材齢時の圧縮強度が小さく、コンクリートの脱型工程に影響することが想定される。そのため、コンクリートへの適用には LB 培地が適している。
- (3) LB 培地を練混ぜ水に高置換しても、所定のフレッシュ性状とすることで、圧縮強度、乾燥収縮ひずみ、中性化深さに影響がないことがわかった。一方、耐凍害性を考慮すると、練混ぜ水に対する培養液の置換率は20%を上限とすることが望ましい。

参考文献

- 1) 日本再興戦略－JAPAN is BACK－（2013年）、戦略市場創造プラン（ロードマップ）：<https://www.kantei.go.jp/jp/singi/keizaisaisei/kettei.html#saikou2013>（閲覧日：2024年1月5日）
- 2) バイオ戦略2020（市場領域施策確定版）説明資料：<https://www8.cao.go.jp/cstp/bio/index.html>（閲覧日：2024年1月5日）
- 3) Keiyu Kawaai, Takahiro Nishida, Atsushi Saito, Toshinori Hayashi, Application of bio-based materials to crack and patch repair methods in concrete, Construction and Building Materials, Vol.340, No.7, 127718, 2022.7
- 4) 川崎浩長, 大橋英紀, Henk JONKERS, Sanjay PAREEK: 微生物を利用した自己治癒コンクリートの最適な調合に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.43, No.1, 2021
- 5) 浦川和也, 野中英, 三谷和裕, 井戸康浩, 木村仁治, 鈴木好幸, 宮野和樹: コンクリートの乾燥収縮ひずみの早期判定方法に関する検討（その1実験概要および埋込み型ひずみ計の選定実験）, 日本建築学会学術講演梗概集 A, pp.61-62, 2013
- 6) 鈴木好幸, 浦川和也, 野中英, 三谷和裕, 井戸康浩, 木村仁治, 宮野和樹: コンクリートの乾燥収縮ひずみの早期判定方法に関する検討（その2水中養生期間や高温環境が乾燥収縮ひずみに与える影響）, 日本建築学会学術講演梗概集 A, pp.63-64, 2013
- 7) 木村仁治, 浦川和也, 野中英, 三谷和裕, 井戸康浩, 鈴木好幸, 宮野和樹: コンクリートの乾燥収縮ひずみの早期判定方法に関する検討（その3レディーミクストコンクリートの乾燥収縮ひずみ測定結果と早期判定法の検討）, 日本建築学会学術講演梗概集 A, pp.65-66, 2013