

論文 水分供給条件や膨張作用の有無がひび割れ自己治癒効果に与える影響

平野 勝彦^{*1}・細田 暁^{*2}・石渡 大嗣^{*3}・山田 啓介^{*4}

要旨：水粉体比 W/P=45～60%のコンクリートに貫通ひび割れを与え、実構造物に想定される水分供給条件，膨張作用の有無に着目してひび割れの自己治癒機能を調べた。過去の研究では膨張作用のあるコンクリートのみで自己治癒機能が確認されていたが，本研究にて膨張作用のない場合でも自己治癒機能を十分発揮することを示した。また，新水和物の析出のみで自己治癒させる場合には，硬化体組織が比較的粗である方が，治癒性能が高い可能性を示した。

キーワード：膨張材，消石灰，養生，ひび割れ，自己治癒機能，漏水試験

1. はじめに

膨張材を添加した水粉体比 25～45%の膨張作用のあるコンクリートについては，ひび割れ発生後にひび割れ部に外部からの水分が供給される場合に，ひび割れ近傍のコンクリートの追加膨張またはひび割れ部に析出物が析出することによる自己治癒機能が報告されている¹⁾。

これまでの筆者らの研究においてひび割れ自己治癒が報告されているコンクリートは硬化過程に膨張するものであり，膨張作用がひび割れ自己治癒に必要項目であるかどうかの検討は行われていない。また，水粉体比 45%以上の領域におけるコンクリートの自己治癒機能やひび割れ発生後の水分供給条件が自己治癒機能に及ぼす影響について検討を行ったデータは存在しない。

そこで本研究では，水粉体比 W/P を従来の研究より汎用的な 50%と設定する。混和材として膨張作用のある膨張材と膨張作用の無い消石灰を用いる。円柱試験体に割裂引張による貫通ひび割れを与え，ひび割れ幅を保持したままひび割れ後の自己治癒を観察する。実構造物の置かれる環境を考慮して水中養生・湿布養生・乾湿

繰返し養生と水分供給条件を変化させる。また，施工時における材料分離を想定して水粉体比の大きいものや，温度履歴を与えたものも含める。

自己治癒性状の評価において，ひび割れの治癒状況をマイクロスコープで観察する。さらに，地下構造物の漏水を想定して 11kPa の水圧を閉塞後のひび割れ部に作用させ，その水密性状についての確認を行う。

2. 実験概要

2.1 供試体の作製方法と養生条件

本実験に使用した材料を表 - 1 に，配合を表 - 2 に，供試体打設後の養生条件を表 - 3 に示す。使用セメントは普通ポルトランドセメント，膨張材はエトリンナイト・石灰複合系膨張材(高

表 - 1 使用材料

材料名	種類および物性
セメント	C:普通ポルトランドセメント(密度 = 3.15)
混和材	E1:膨張材(エトリンナイト・石灰複合系[高性能型]) (密度 = 3.08)
	E2:消石灰(密度 = 2.24)
細骨材	S:山砂(密度 = 2.65)
粗骨材	G:砕石2005(密度 = 2.66)
混和剤	AE減水剤(変性リグニンスルホン化合物)
その他	J:炭酸水素ナトリウム(密度 = 2.16)
	L:炭酸リチウム(密度 = 2.11)

*1 横浜国立大学大学院 工学府 社会空間システム学専攻 (正会員)

*2 横浜国立大学大学院 環境情報研究院 助教授 博(工) (正会員)

*3 横浜国立大学 工学部 建設学科

*4 東日本旅客鉄道(株) 研究開発センター フロンティアサービス研究所 工修 (正会員)

表 - 2 コンクリートの配合

No.	セメント種類	水粉体比	水	セメント	混和材		細骨材	粗骨材	AE減水剤	NaHCO ₃	Li ₂ CO ₃
		W/P	W	C	E1	E2	S	G	A	J	L
		(%)	(kg/m ³)								
1	N	45	169	366	0	14	805	981	3.66	1.098	0
2		50	169	318	20	0	827	974	3.38	0	0.839
3			169	324	0	14	827	974	3.38	0	0.839
4			160	300	20	0	811	1030	2.56	0	0.839
5		60	160	246	20	0	868	1018	2.13	0	0.839
6			160	252	0	14	868	1018	2.13	0	0.839

表 - 3 供試体打設後の養生条件

条件	材齢 (日)					
	0	2	7	14	67	74 147
A(配合2,3,5,6)	封緘	湿布	ひび割れ導入れ	水中		/
B(配合2,3)				湿布		
C(配合2,3)				乾湿繰返し		
D(配合2,3)	封緘	湿布	ひび割れ導入れ	水中		/
E(配合2,3)				湿布		
F(配合2,3)				乾湿繰返し		
G(配合1)				水中		
H(配合4)				水中		
温度履歴						

性能型)を用いた。自己治癒には水和物析出が必要である。析出する主な水和物は炭酸カルシウムであると考えており、カルシウムイオンと炭酸イオンの供給元が必要である。各配合にはそれぞれの供給元が存在するよう工夫を施した。配合1の供試体については少量の混和材料(炭酸イオンの供給元)として炭酸水素ナトリウムを、配合2~6の供試体については炭酸リチウムを添加した。

配合1については、水粉体比 W/P が 45%で膨張作用のない消石灰添加のコンクリートでの自己治癒機能を確認することを目的としている。

膨張作用のあるコンクリートは、ひび割れ抵抗性の向上というメリットはあるが、添加量によっては過膨張による品質の低下という懸念も存在する。膨張コンクリートは拘束の有無で性状が大きく異なるので、自己治癒の試験方法も工夫する必要が生じる。膨張作用が自己治癒に必要な項目かどうかを検証することは重要な着目点と考えている。

配合2,3は、より汎用的な配合とするために水粉体比 W/P を 50%と設定し、混和材料として炭酸リチウムを用いた。炭酸水素ナトリウムを用いた場合、コンクリート中のアルカリ量が増

加し、ASR等の耐久性に影響を及ぼす可能性がある。炭酸リチウムを用いた場合は、ASRに関する懸念が低減される。さらに、炭酸リチウムを用いた場合の自己治癒機能は確認されていない。これらが、配合2と3の決定理由である。

配合4については、地下構造物の壁面(幅100cm)を想定して奥行き方向約50cmの地点で受ける温度履歴(最高温度:56)を材齢14日まで数値解析で求めたものを与えた。

配合5,6は、施工時に材料分離が生じたコンクリートを想定したものである。

供試体として、100mm×h200mmの円柱供試体を打設した。養生条件A~Cについては材齢7日、養生条件D~Hについては材齢14日で半分に切断して100mm×h100mmの円柱供試体を作製した。

養生条件A~Gの供試体は材齢2日までフィルムによって封緘状態で型枠中に存置し、外部への水分逸脱ならびに外部からの水分侵入が生じない状態とした。養生条件Hの供試体は打設直後から材齢14日までフィルムによって封緘状態でプリキ製型枠中に存置し、温度履歴を与えた。温度履歴の詳細を図-1に示す。脱型後は養生条件A~Cが材齢7日、養生条件D~Gが材齢

14 日のひび割れ導入時まで湿布養生した。ひび割れ導入後は表 - 3 に示すように配合 1 については養生条件 G のみ, 配合 2, 3 については養生条件 A ~ F の水中・湿布(常に湿潤環境である地下構造物を想定)・乾湿繰返し(高架橋床版の環境条件を想定)と養生条件を変化させ, 配合 4 は養生条件 H, 配合 5, 6 は養生条件 A のみの養生を行い, ひび割れ導入日から 60 日間または 133 日間その養生を継続した。

乾湿繰返し養生は, 高架橋床版の環境条件を想定しており, ひび割れ導入日から 3 日気中, 1 日水中というサイクルを 60 日間継続した。

2.2 試験方法

(1) ひび割れ閉塞確認試験

表 - 3 に示す養生条件 A ~ C の供試体は材齢 7 日での切断後, 養生条件 D ~ G の供試体は材齢 14 日での切断後にひび割れを導入した。ひび割れは割裂で導入し, 写真 - 1 に示すように鋼製のホースバンドによりひび割れ幅を保持した。ひび割れを発生させる際に, ひび割れ幅が大きくなることに注意を払い, 貫通ひび割れが発生した時点で載荷をやめ, ひび割れ幅が 0.2 ~ 0.3mm 程度となるようにホースバンドで調整した。

ホースバンドでひび割れ幅を保持した後, 各円柱供試体の上面(切断面ではない面)について 3 点ずつひび割れ測定点を設けた。観察はマイクロスコープ(50 倍)で行い, ひび割れ導入後の材齢 0 日, 14 日, 28 日, 60 日の 4 材齢で実施した。また, 配合 2, 3 については埋め込みゲージにより, コンクリートの膨張ひずみを計測した。

(2) 加圧漏水試験

配合 1 ~ 3 の全ての養生条件について, 配合 1 はひび割れ導入から 147 日後に, 配合 2 および 3 はひび割れ導入から 60 日後の時点で加圧漏水試験を行った。供試体には貫通ひび割れが生じているので, 供試体の上面(切断面ではない面)が水圧を受ける面として設置し, 側面をシリコンゴムにより防水処置を施した。供試体と常時満水のパイプ管内の水面との高さの差を 1.1m に



写真 - 1 供試体ひび割れ幅保持状況

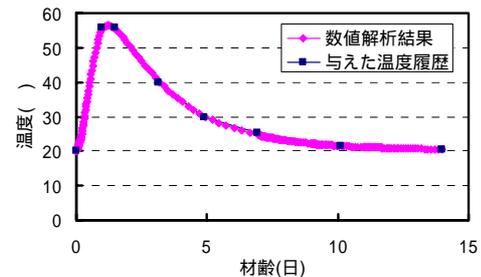


図 - 1 温度履歴の詳細

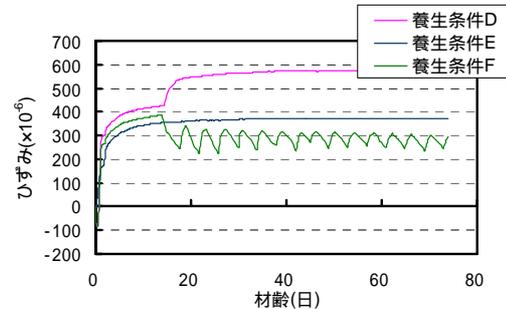


図 - 2 配合 2 のコンクリート軸方向のひずみ

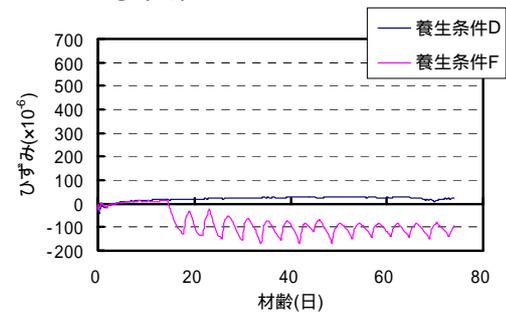


図 - 3 配合 3 のコンクリート軸方向のひずみ

保ち, 水頭差を利用して, 常に供試体の上面に 11 kPa の静水圧が加わった状態で供試体底面から漏水した水量を電子天秤によって 5 分ごとに 60 分間計測を行った。

3. 実験結果

3.1 ひび割れ閉塞性状

配合 2, 3 の供試体の膨張率を図 - 2, 図 - 3

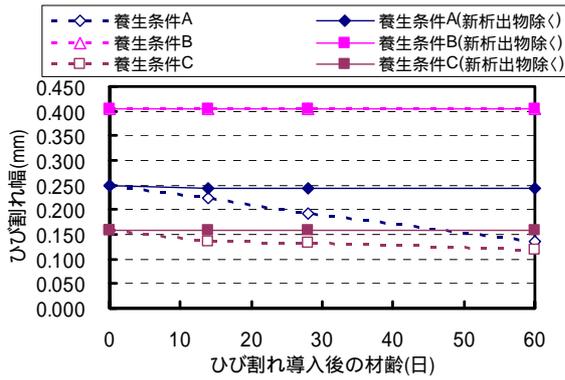


図 - 4 ひび割れ幅の経時変化(ひび割れ導入 7 日・配合 2)

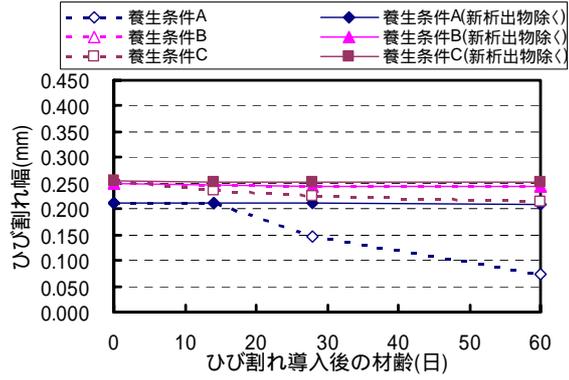


図 - 5 ひび割れ幅の経時変化(ひび割れ導入 7 日・配合 3)

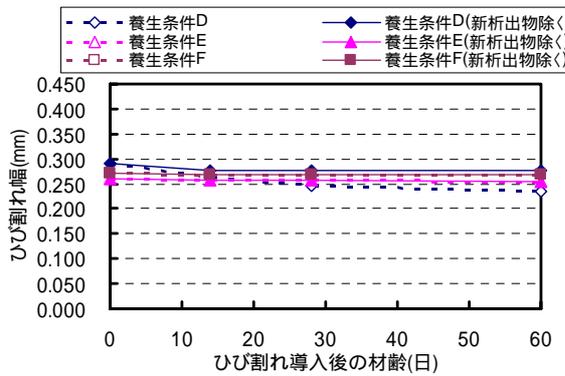


図 - 6 ひび割れ幅の経時変化(ひび割れ導入 14 日・配合 2)

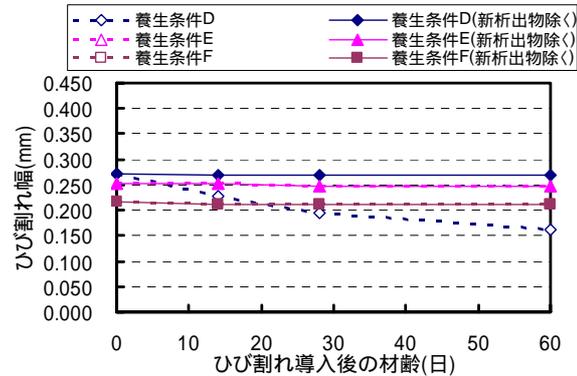


図 - 7 ひび割れ幅の経時変化(ひび割れ導入 14 日・配合 3)

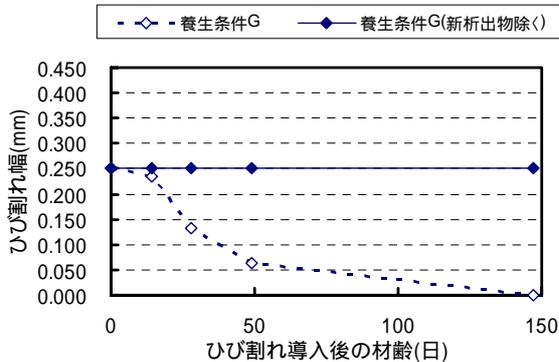


図 - 8 ひび割れ幅の経時変化(ひび割れ導入 14 日・配合 1)

に示す。膨張率を計測した供試体は養生条件 D ~ F と同様の養生を行った。膨張材添加の供試体について、材齢 14 日で水中養生した供試体は材齢 14 日以降も湿布養生を継続した供試体の膨張ひずみと比較して、約 30% 程度膨張ひずみが大きくなった。消石灰添加の供試体については膨張ひずみが生じないことから、消石灰を添加し

ても膨張作用がないことが確認された。

ひび割れ導入後のひび割れ幅の経時変化を配合・ひび割れ導入日ごとに図 - 4 ~ 8 にそれぞれ示す。点線はコンクリートの追加膨張および新水和析出物を含んだひび割れ幅の経時変化であり、実線はひび割れ近傍の追加膨張のみによるひび割れ幅の経時変化である。いずれの供試体も過去の研究で見られた追加膨張によるひび割れ幅の減少¹⁾はなく、ひび割れ幅の減少は新析出物の析出のみであることが分かった。ひび割れ導入 7 日の配合 2 と 3 を比較すると、両者共に湿布養生した供試体には新水和物の析出によるひび割れ幅の減少はなく、乾湿繰返し養生と水中養生した供試体には新水和物の析出によりひび割れ幅が減少している。その減少率は水中養生が最も大きく、配合 2 と 3 では配合 3 の方がひび割れ幅の減少率が大きいことが分かる。ひび割れ導入 14 日のシリーズは、配合 2, 3 共にひび割れ導入 7 日のシリーズと同様の傾向を得

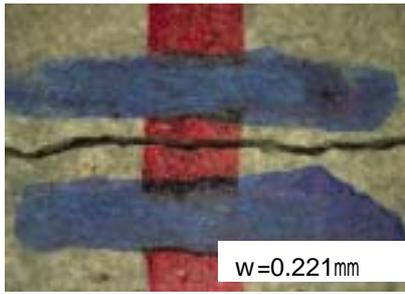


写真 - 2 配合 4 養生条件 H ひび割れ導入後
0 日



写真 - 3 配合 4 養生条件 H ひび割れ導入後
28 日

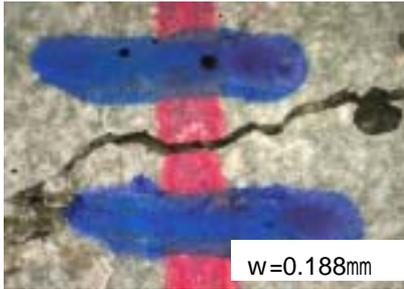


写真 - 4 配合 5 養生条件 A ひび割れ導入後
0 日

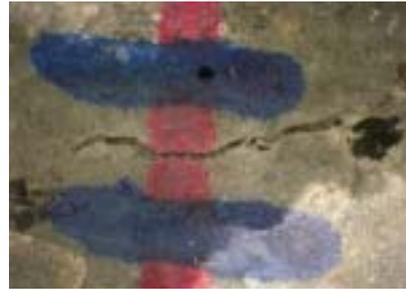


写真 - 5 配合 5 養生条件 A ひび割れ導入後
28 日

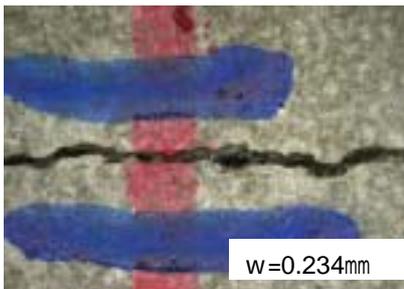


写真 - 6 配合 6 養生条件 A ひび割れ導入
後 0 日



写真 - 7 配合 6 養生条件 A ひび割れ導入後
28 日

られたが、新析出物の析出によるひび割れ幅の減少量はどの養生においても小さく、ひび割れ導入 7 日シリーズほど顕著な違いは確認できなかった。

以上の結果より、供試体が湿潤な環境におかれるだけでは新水和物は析出せず、ひび割れ部に液状の水分が供給されることで新析出物が析出し、新析出物の析出量はひび割れ部に供給される液状の水分の量に左右されることを確認した。また、消石灰を添加したコンクリートは混和材料として重曹と炭酸リチウムのどちらを用いた場合でも自己治癒機能を確認できたことから、膨張作用が無い場合でも自己治癒機能(ひび割れ幅の低減)は十分に発現することが確認できた。しかし、ひび割れの治癒効果(ひび割れ幅

の減少量)は十分ではなく、今後の改良が必要である。

写真 - 2~7 に配合 4~6 のひび割れ導入後のひび割れの状況とひび割れ導入後 28 日のひび割れ状況を示す。配合 4, 5 の供試体はひび割れ導入後 28 日の段階でひび割れが閉塞した。配合 1~3 のコンクリートよりも優れた治癒性能を示した。過去の研究では、水粉体比を小さくすることにより、未反応の粉体を意図的に残すことによって発現する追加膨張が主たる治癒機構であった¹⁾。本研究で見られている治癒は、析出物による治癒であり、水粉体比が大きい場合や、高温履歴を受ける場合のように、硬化体組織が比較的粗である方が、治癒性能が高いことを示唆している。これらの知見は今後の研究に活用

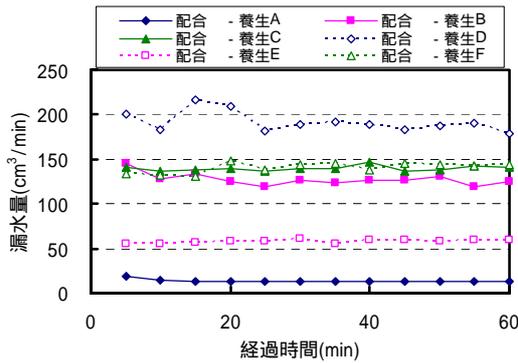


図 - 9 単位時間当たりの漏水量の経時変化(配合 2)

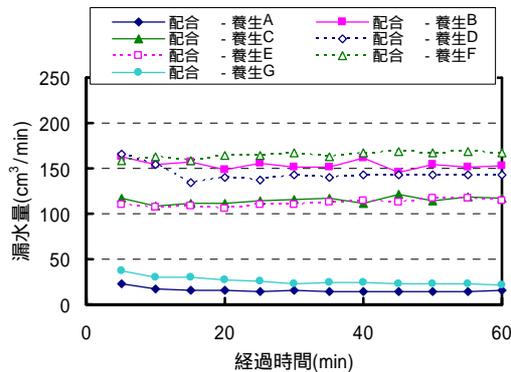


図 - 10 単位当たりの漏水量の経時変化(配合 1・3)

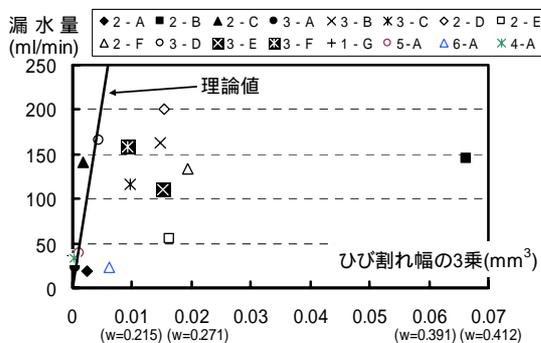


図 - 11 治癒後のひび割れ幅の 3 乗と漏水量の関係

していく。

3.2 漏水量の経時変化

加圧漏水試験の単位時間当たりの漏水量の経時変化を図 - 9, 10 に、治癒後のひび割れ幅の 3 乗と漏水量の関係を図 - 11 にそれぞれ示す。理論的には、流量が定常な状態での漏水量とひび割れ幅の 3 乗の関係には比例関係がある²⁾。図 - 11 には、鉄筋との付着によるひび割れ形状の変化の影響を考慮しない場合の理論式による値も

示した。ひび割れ幅の最も大きかったものを除くと、ばらつきは大きいものの、実験値は理論値の近傍に位置していると言える。ひび割れ幅の減少率の大きかった配合 1, 配合 2(養生条件 A), 配合 3(養生条件 A)の供試体の漏水量は $50\text{cm}^3/\text{min}$ 以下の値となった。目視による表面ひび割れ幅と、漏水量の間にはある程度の正の相関がある結果となった。

4. まとめ

本研究で得られた知見は以下の通りである。

- (1) 粉体比 $W/P=50\%$ の膨張コンクリートは追加膨張によるひび割れ幅の減少はなく、ひび割れ幅の減少は新析出物の析出のみであった。
- (2) 消石灰添加のコンクリートは膨張作用がなく、膨張作用がない場合でも自己治癒機能が確認された。
- (3) 新水和物の析出はひび割れ部に液状の水分が供給されることで析出し、ひび割れ部に供給される水分が多いほど析出量が多い。
- (4) 温度履歴を受けた水粉体比 $W/P = 50\%$ と $W/P = 60\%$ の膨張コンクリートという実構造物の置かれる状況を想定した場合でも、ひび割れ導入後 28 日の段階でひび割れが閉塞し、硬化体組織が比較的粗である方が、治癒性能が高い可能性を示した。
- (5) マイクロスコープによる観察によるひび割れ幅と、漏水試験の流量の間には、ある程度の正の相関が見られた。

謝辞：本研究の一部は、NEDO の助成金（研究代表者：岸 利治助教授（東京大学生産技術研究所）により実施しました。

参考文献

- 1) 下村哲雄, 細田 暁, 岸 利治: 低水粉体比コンクリートのひび割れ自己治癒性能, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.2, pp.661-666, 2001
- 2) Carola Edvardsen: Water Permeability and Autogenous Healing of Cracks in Concrete, ACI Material Journal, pp.448-454, July-August, 1999