論文 膨張材を用いたコンクリートのひび割れ自己治癒効果

山田 啓介^{*1}·細田 暁^{*2}·在田 浩之^{*3}·岸 利治^{*4}

要旨:水粉体比 W/P が 30~50%の領域における膨張コンクリートに一軸引張による貫通ひ び割れを生じさせ,緊張力保持のもとひび割れ部の観察を行い自己治癒機能について確認し た。また,実際の地下構造物を想定し,閉塞したひび割れ部に水圧を作用させ,その水密性 状についての確認を行った。水粉体比が 45%程度のコンクリートにおいても,ひび割れ発生 後に水分供給のある場合はひび割れ治癒機能が作用することがわかった。特に,膨張材と無 機質結晶増殖剤を混入したものは新水和生成物の析出が多く,0.4mm のひび割れを治癒した。 治癒されたひび割れは 100kPa の水圧下でも高い水密性を示した。

キーワード: 膨張コンクリート, ひび割れ, 自己治癒機能, 透水実験

1. はじめに

膨張材を適切に混入した低水粉体比コンクリ ートでは,ひび割れ発生後に外部から水分の供 給があると追加膨張が発現し,また水和生成物 の析出も合わさってひび割れが閉じる自己治癒 機能が確認されている¹⁾。これらの自己治癒機能 が有効に作用すれば,例えば地下構造物の防水 機能が向上し,鉄筋コンクリート構造物の耐久 性の向上に貢献することが期待できる。

しかし,低水粉体比では,製造コストが高く なり温度ひび割れへの対応も必要になる。また, 未反応の膨張材が残存するので,長期性状を確 認せずに遅れ破壊への懸念を払拭することは難 しい。

本研究では、水粉体比 W/P が 30~50%の領域 において、膨張材種類および混入量を変化させ たコンクリートに地下構造物の側壁に発生する ひび割れを模擬して一軸引張による貫通ひび割 れを与える。その後、緊張力を保持したままひ び割れ部の経過観察を行い、水中養生下でのコ ンクリートのひび割れ自己治癒機能を観察する。 ひび割れの閉塞の機構として、膨張コンクリー トの追加膨張と新たな水和生成物(以下、新水 和生成物と記す)の析出を考え,それぞれの寄 与分を定量的に示すことを目指す。

さらに,地下 10m に埋設したボックスカルバ ート等を想定して 100kPa (1.0 気圧)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 ついても確認を行う。

2. 実験の概要

2.1 供試体の製作

本実験に使用した材料を表-1に、配合を表 -2に示す。使用セメントは普通および低熱ポ ルトランドセメントの2種類とした。膨張材は エトリンガイト系膨張材およびエトリンガイ ト・石灰複合系高性能型膨張材を用いた。また、 一部供試体において、混和剤として無機質セメ ント結晶増殖剤を用いた。

表-1 使用材料

材料名	種類および物性					
F . 1	N:普通ポルトランドセメント(密度=3.16)					
セメント	L:低熱ポルトランドセメント(密度=3.22)					
BK7E++	Ex1:エトリンガイト系(密度=2.94)					
服防化	Ex2:エトリンガイト・石灰複合系高性能型(密度=3.10)					
細骨材	S:陸砂(密度=2.66)					
粗骨材	G:砕石2005(密度=2.67)					
旧和刘	高性能AE減水剤(ポリカルボン酸系)					
	AE減水剤(リグニンスルホン酸化合物及びポリオール複合体)					
その他	Z:無機質セメント結晶増殖材					

*1 東日本旅客鉄道(株) JR 東日本研究開発センター 工修 (正会員)
*2 横浜国立大学 大学院環境情報研究院 助教授 博士(工学) (正会員)
*3 東日本旅客鉄道(株) 東京工事事務所
*4 東京大学 生産技術研究所 助教授 博士(工学) (正会員)

No.	セメン ト種類	水粉体 比	膨張材 置換率	水	セメント 膨張材			細骨材	粗骨材	無機質セメント 結晶増殖材
		W/P	E/(C+E)	W	С	Ex1	Ex2	S	G	Z
		(%)		(kg/m ³)						
1			11.1		480	60				
2			9.3		490	50		783	886	
3		L 30 45	7.4 5.6	165	500	40				0
4					510	30		784	887	
5						0	30			
6			45 13.2 170	370	50	0	930	050		
7			13.2	170	320	50	U	039	930	4.0
8	N	50		165	220		<u> </u>	844	995	3.3
9	IN	50		100	550	,	J	846	996	0

表-2 コンクリートの配合

コンクリートはセメントおよび骨材を 2 軸強 制練りミキサに投入し 15 秒間空練りした後,水 ならびに混和剤を投入して 90 秒間練り混ぜた。

膨張コンクリートの性質は, 拘束の有無によ り異なることが知られており²⁾,鉄筋コンクリー ト構造物を想定し, 拘束状態で試験を行うこと とした。供試体寸法は JIS A 6202 付属書 2 の B 法に準じた。拘束棒は呼び名 11 mmの PC 鋼棒 (E=1.94×10²N/mm²)を用い, 全長にわたりね じ切り加工した。

供試体は材齢1日までポリエステルフィルム によって封緘状態で型枠中に存置し,外部から の水分浸入ならびに供試体からの水分散逸が生 じない状態とした。脱型後は材齢7日のひび割 れ導入時まで湿布養生とし,ひび割れ導入後は 標準水中養生とした。養生温度はすべて20℃で 行った。切欠きは,台形の発泡スチロールを型 枠側面にあらかじめ設置し,脱型時に撤去する ことで設けた。

2.2 実験方法

(1) ひび割れ閉塞確認実験

試験体の諸元と載荷方法を図-1に示す。 表-2に示す9供試体について材齢1日で脱型, 湿潤状態での気中養生後,材齢7日にひび割れ を導入した。拘束棒であるPC鋼棒に貼付した鋼 材用ひずみゲージは,貼付位置の全周のねじを 2cmにわたり切削し,供試体中央部の埋込み部 と露出部にそれぞれ2枚貼付した。コンクリー ト用ひずみゲージは,ひび割れ近傍のコンクリ ートひずみを測定するために軸方向に1枚貼付 した。ひずみゲージとコンクリート表面の間に は防水コーティング剤を塗り,ひずみゲージ上 面にはブチルゴムを被せて防水処置を施した。

供試体に貫通ひび割れを導入するために,写 真-1に示すように拘束棒をジャッキにて緊張 した。この際,PC 鋼棒を降伏させないよう注意 を払い,ひび割れ幅が 0.1 mm~0.3 mm程度となる ように緊張した。実構造物にかかる外部拘束等 による引張力が一定であると仮定し,コンクリ ートの配合に関わらず,緊張力は 42.2kN で統一 した。載荷後は緊張力を保持するために緩み防 止用ボンドを塗布しダブルナットにて締付けた。



図-1 試験体の諸元と載荷方法



写真-1 供試体ひび割れ導入状況



ひび割れ導入後,切欠き部を除く2面につい て4点ずつひび割れ測定点を設けた。さらに, ひび割れ測定点近傍に付けた定点間の距離を測 ることにより,ひび割れ閉塞が膨張コンクリー トの追加膨張によるものなのか,新水和生成物 析出によるものなのかについて判別できるよう にした。

測定点はマイクロスコープ(倍率175)で材齢 60日まで観察し,ひび割れ幅およびひび割れ閉 塞状況について確認した。測定材齢はひび割れ 導入日である7日,14日,28日および60日の4 材齢とした。

(2) 加圧透水実験

すべての供試体について, 材齢 60 日の時点で 緊張力を保持したまま図-2に示す加圧透水実 験を行った。供試体には貫通ひび割れが生じて いるので, 切欠き部のある面を側面としてセッ ティングを行い,実験中の漏水防止のため切欠 き部をシーリングおよび発泡シリコーンゴムに より防水処置を施した。

実験は加圧ポンプ,鋼製圧力タンク,水量測 定秤から構成され,加圧ポンプにより鋼製圧力 タンクの水圧計が100kPaになるまで手動ジャッ キにて加圧した。加圧後,120分のあいだ100kPa を保持しながら,供試体底面から透水した水量 を電子秤によって5分ごとに測定した。

3. 実験結果

3.1 ひび割れ閉塞性状

ひび割れ導入前である材齢7日までの埋込み 部のPC鋼棒ひずみを図-3に示す。高性能型膨



張材 Ex2 の標準単位混入量は Ex1 の 2/3 程度で あることを考慮し, Ex2=30kg/m³ を Ex1 換算で 45kg/m³ 相当とみなすと,水粉体比に係わらず, 膨張材置換率が大きいほど膨張ひずみが大きい。

表-3 ひび割れ幅の推移 _{単位[mm]}

Na	材齢7日(ひ)	び割れ導入)	材齢60日		
NO.	型枠面	打設面	型枠面	打設面	
1	0.32	0.18	0.01	0.00	
2	0.24	0.17	0.05	0.05	
3	0.35	0.17	0.18	0.03	
4	0.38	0.25	0.30	0.06	
5	0.32	0.17	0.07	0.01	
6	0.23	0.11	0.00	0.00	
7	0.41	0.08	0.02	0.00	
8	0.55	0.49	0.31	0.47	
9	0.45	0.31	0.40	0.30	

材齢7日における埋込み部のPC鋼棒ひずみは, ひび割れ導入前のケミカルプレストレインを示 している。

すべての供試体において,ひび割れ導入のた めの緊張力は同一とした。緊張前のケミカルプ レストレインの大きい供試体は緊張時のひび割 れ幅が小さくなるため,ひび割れ治癒には有利 な状況となる。

ひび割れ導入後の埋込み部と露出部の PC 鋼 棒ひずみを図-4および図-5に,ひび割れ近 傍におけるコンクリート軸方向ひずみを図-6 にそれぞれ示す。図-4より埋込み部の PC 鋼棒 ひずみは供試体 No.1 のひずみが 7 日から 14 日 のあいだに大きく進展していることが分かる。 他の供試体に比べて供試体 No.1 はひび割れ導入 後においても大きく追加膨張したと推察される。

図-5より露出部の PC 鋼棒ひずみは, 追加膨 張のみられた供試体 No.1 を除いてはひずみの 低下は少なく, PC 鋼棒のリラクセーションによ る荷重抜けは見られるものの, 材齢 60 日までほ ぼ同一の緊張力を保持していたものと推察され る。

図-6より、ひび割れ近傍のコンクリートは、 膨張材を用いていない供試体 No.8、9 を除くい ずれの供試体においても追加膨張を発現してい る。これは埋込み部の PC 鋼棒のひずみの傾向と は必ずしも一致していない。

ひび割れの治癒によるひび割れの幅の変化を 表-3に示す。また、ひび割れ幅の経時変化の うち代表的なものを図-7~11にそれぞれ示 す。実際に生じているひび割れ幅を実線で示し、 コンクリート間の距離を破線で示す。破線と実



線の差分が新水和生成物析出であり,ひび割れ 導入時からの破線の減少量が追加膨張によるも と考えられる。ひび割れ導入時には均等に貫通 ひび割れが生じるように努めたが,荷重偏心に よる曲げが生じ,供試体表裏でひび割れ幅に差 が生じた。

いずれの供試体においても膨張コンクリート の追加膨張によるひび割れ治癒効果は材齢14日 を経過するまでにほぼ終了している。新水和生 成物析出によるひび割れ治癒効果は材齢28日を 経過するまで作用し続けるが、その後の閉塞効 果は少ない。

材齢 7 日にひび割れを導入した場合,単位膨 張材量が 60kg/m³程度であれば,追加膨張による 治癒効果は大きいが,膨張材量がそれよりも減 るとその効果はかなり小さいことが分かった。 膨張材 Ex1 の単位混入量を 30kg/m³ と一般的な 収縮補償量程度の使用量に近づけた場合は,新 水和生成物の析出によるひび割れの治癒効果が 大きい傾向にある。

また,膨張材 Ex1 を 60kg/m³ 混入すると,一 般的なコンクリート構造物に適用するには膨張 量が過大となり,施工管理等が困難になると予 想される。

したがって,一般的な配合のコンクリートの 場合,追加膨張による治癒より,新水和生成物 による治癒に期待するほうが望ましいと考えて いる。

今回のひび割れ部の観察より,No.1 や水粉体 比が45%のNo.6 および7については,ひび割れ がほぼ閉塞していることが確認できた。これら はすべて膨張材を混入した供試体である。特に 供試体No.7のように膨張材と無機質セメント結 晶増殖剤の両方を混入したケースでは,0.3~0.4 mm程度の比較的大きいひび割れ幅であっても新 水和生成物の析出が多く,写真-2~5に示す ようにひび割れが閉塞する結果となった。

本実験では材齢7日のひび割れ導入後に水中 養生を行っているが,材齢14日までの間にひび 割れが閉塞したケースが多く見られた。今回の



写真-2 No.7 材齢7日(ひび割れ導入直後)



写真-3 No.7 材齢14日



写真-4 No.7 材齢 28 日



写真-5 No.7 材齢 60 日

ようにひび割れ発生後に外部から水分の供給が ある場合は,比較的早い段階からひび割れ治癒 機能が働くことが分かった。

なお, Edvardsen の研究³⁾を勘案すると,新水 和生成物は CaCO₃ であると推測できる。

3.2 透水量の経時変化

加圧透水実験の単位時間あたりの透水量の経時変化を図-12に、累計透水量の経時変化を 図-13にそれぞれ示す。供試体 No.8 および 9 についてはひび割れ幅が大きく、100kPa の水圧 を保持することが不可能となったために実験を 中止した。

実験開始から 60 分経過するまでは,透水量に ばらつきが見られたが,その後の 60 分は一定の 値に収束する傾向が見られた。この定常状態に おける値を透水量と見なすと,いずれの供試体 においても透水量は約 50cm³/min 以下となった。

マイクロスコープによる観察より,ひび割れ がほぼ閉塞していることが確認された No.1,6 および7については,透水がほとんど見られな かった。これより,目視によるひび割れ閉塞が 確認できたものについては,加圧透水実験にお いても高い水密性を保持することを確認した。

4. まとめ

本研究で得られた知見は以下の通りである。 (1)拘束した膨張コンクリートに材齢7日で一軸 引張による貫通ひび割れを与え,緊張力を保持 したままひび割れ部の観察を行った。その結果, 水粉体比が45%程度のコンクリートにおいても, ひび割れ発生後に外部から水分の供給がある場 合は,比較的早い段階からひび割れ治癒機能が 作用することが分かった。

(2)膨張材と無機質セメント結晶増殖剤の両方を 混入したケースでは,特に新水和生成物の析出 が多く 0.3~0.4 mm程度のひび割れ幅であっても コンクリートのひび割れが閉塞に至ることが確 認できた。





(3) マイクロスコープによりひび割れの閉塞が 確認できた供試体については,コンクリートの 透水実験をおこなった結果,水圧 100kPa を 120 分にわたり載荷した場合,高い水密性を示した。 謝辞 本実験にご協力頂いた森田俊哉氏,飯塚豊 氏((株)カイエーテクノ),入江正明氏(ジャパ ン・ザイペックス(株)),保利彰宏氏(電気化学 工業(株))の皆様に感謝します。

参考文献

- 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報告集, Vol.23, No.2, pp.661-666, 2001.9
- 1) 膨張コンクリートによる構造物の高機能化/ 高耐久化に関するシンポジウム 委員会報 告書:日本コンクリート工学協会,pp.47-48, 2003.9
- Carola Edvardsen: Water Permeability and Autogenous Healing of Cracks in Concrete, ACI Material Journal, V.96, No.4, Jul./Aug. 1999, pp.448-454