

論文 低水粉体比の膨張コンクリートのひび割れ自己修復機能

下村 哲雄^{*1}・細田 暁^{*2}・岸 利治^{*3}

要旨：低水粉体比膨張コンクリートは、無荷重状態であれば、外部からの水分供給によってひび割れを閉塞する自己修復機能を有することが確認されている。そこで、実構造物を想定した荷重保持状態における自己修復機能を、ひずみ勾配が大きく、等モーメント区間が短い極めて厳しい条件で確認する実験を行った。その結果、厳しい条件であっても水中であれば、追加膨張とひび割れ面での新たな水和物の析出によってひび割れは閉塞することが確認された。

キーワード：膨張コンクリート、低水粉体比、追加膨張、ひび割れ自己修復機能

1. はじめに

膨張コンクリートはプレキャスト製品や乾燥収縮を低減するために用いられている。また、膨張コンクリートのケミカルプレストレスは、部材の構造性能、特にひび割れ抵抗性を著しく改善することも知られている^{1),2)}。しかし、これらの優れた特性を実際の構造物において確実に担保することが必ずしも容易ではないが為に、膨張材は前述の目的に使用されるにとどまっておらず、特殊混和材料の1つに過ぎないとの認識が一般的である。

しかし最近、低水粉体比の膨張コンクリートでは、ひび割れ発生後に水分が供給されることによって追加膨張が発現し、除荷状態であればひび割れが閉塞するという興味深い挙動が報告されている^{3),4)}。このような自己修復性能が存在するとすれば、膨張コンクリートをセンサー機能とアクチュエーター機能を備えたインテリジェント材料として、鉄筋コンクリート構造物の信頼性向上に活用することが考えられる。

ただし、これまでの研究では、液状水供給による無荷重状態でのひび割れ閉塞しか確認されておらず、より厳しい載荷状態での自己修復機能と湿度条件の影響についても検討を加える必

要がある。また、自己修復の機構として、ひび割れの閉塞が部材全体の追加膨張によるのか、あるいは新たな水和生成物の析出によるのかを解明する事も本研究の目的である。

2. 自己修復機能に関する既往の研究

ひび割れ発生後の水分供給によって、低水粉体比の膨張コンクリートが示す追加膨張とひび割れの閉塞は、本研究の前提として重要であるので、簡単に紹介することとする。

2.1 ひび割れ後の追加膨張³⁾

Liuらは、1週間湿潤養生し初期膨張がほぼ定常状態に至った膨張モルタル供試体（中心を鉄筋が貫通）に一軸引張によりひび割れを発生させ、荷重を解放した後に再び水中に戻して、ひび割れ発生後のモルタルの追加膨張を計測する実験を行った。配合を表-1に示す。

その結果、図-1に示すように、普通モルタルと水粉体比40%以上の膨張モルタルは追加膨張を示さなかったのに対して、低水粉体比(28%, 30%)の膨張モルタルは追加膨張を示した。

以上の現象に対して、Liuらは以下のような考察を行っている。低水粉体比配合では、練り混ぜ水が結合材の完全水和に十分ではないため

*1 東京大学大学院 工学系研究科社会基盤工学専攻 (正会員)

*2 東日本旅客鉄道(株) 建設工事部構造技術センター 博(工) (正会員)

*3 東京大学助教授 生産技術研究所 博(工) (正会員)

表-1 Liu の実験の配合

供試体	EP28	EP30	P30	EP40	EP60	P60
W/P(重量比)	28%	30%	30%	40%	60%	60%
E/P(重量比)	10%	5%	0%	10%	5%	0%

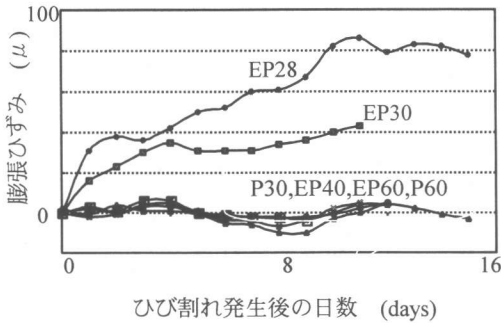


図-1 ひび割れ発生後の追加膨張³⁾

に、未反応部分を残した状態で初期膨張がほぼ定常状態に達し、たとえ水中養生を行ったとしても、一軸方向に十分に拘束された膨張コンクリートでは空隙組織も緻密であるので、外部からの水分供給も容易ではない。しかし、ひび割れ発生後には、ひび割れを通り道として外部からの水分の供給が容易になるために、未反応のまま残存していた膨張材とセメントが共に反応し、結果として低水粉体比の場合のみにおいて追加膨張が発現するものと解釈している。

2.2 乾燥/給水繰り返し下での自己修復⁴⁾

Suttichai らは、RC 供試体に曲げひび割れを発生させ除荷した後に、「1時間水中につけ 23 時間空气中に放置する」養生を繰り返し、ひび割れ幅の変化を3ヶ月にわたり測定した。コンクリートの水粉体比は 30%(重量比)で、膨張材置換率 10%の膨張コンクリートと普通コンクリートについて行っている。

その結果、図-2 に示すように、普通コンクリート(NC)では時間が経ってもひび割れ幅は変化しないが、膨張コンクリート(EC)では時間が経つにつれひび割れ幅は小さくなった。無荷重状態ではあるが、地上構造物であっても降雨によって追加膨張による自己修復機能を発現する

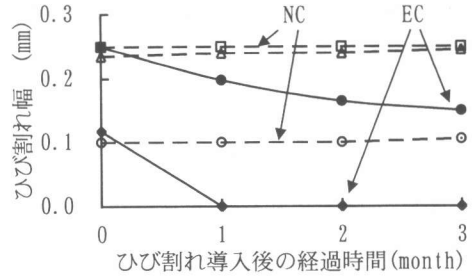


図-2 ひび割れ幅の時間変化⁴⁾

可能性があることが示唆されている。

3. 実験

3.1 実験の目的

本研究の目的は、前述した低水粉体比における膨張コンクリートのひび割れ自己修復機能が、実際の構造物のように荷重のかかっている状態において、有効に作用するのを実験的に検討する事である。ひび割れ発生後の外部からの水分供給条件と自己修復機能の関連を調べる事に重点を置く。また、膨張材の未反応残存量に影響を及ぼすと考えられるひび割れ発生前の環境条件が、自己修復機能に及ぼす影響についても調べる。さらに、自己修復機能の機構を解明する事を試みる。

3.2 実験方法

表-2 に示す 6 個の供試体を作成し、材齢 2 日で脱型、材齢 7 日で曲げひび割れを導入した。使用した材料を表-3 に、コンクリートの配合を表-4 に、供試体のサイズを図-3, 4 に示す。EC は膨張コンクリート、NC は膨張材を添加しないコンクリートを表している。図-3, 4 に示すように PC 鋼棒に引張力を与えることによって膨張コンクリートと普通コンクリートを対にして同時に載荷を行い、バネを用いて長期間等荷重を保持できるようにした。異なるコンクリートに対して同一の荷重、環境条件を与える事を目的としている。それぞれの供試体で、引張側鉄筋中央部のひずみを 1500~1700 μ 程度に

統一するように持続荷重をした。また、鉄筋を降伏させないように注意した。

ひび割れ幅をマイクロスコープ(175倍)で計測し、ひずみゲージを使用してひび割れ近傍のコンクリートひずみの経時変化を測定した。EC-1, NC-1については、ひずみゲージをグリズで上からコーティングし、その上にガムテープを貼り付けたが、コンクリートとの接着面には特に防水処置は施さなかった。EC-2, NC-2, EC-3, NC-3については、上面はグリズとプチルゴムで覆い、ひずみゲージとコンクリートの間には防水のコーティング材を入れた。

表-2 供試体の環境条件

	載荷前の環境条件	載荷後の環境条件
EC-1	湿潤	水中
NC-1		
EC-2	乾燥	湿度 98%
NC-2		
EC-3	湿潤	
NC-3		

表-3 使用した材料

中庸熟ポルトランドセメント	比重:3.21
CSA系膨張材(構造用)	比重:2.90
細骨材	比重:2.52
粗骨材	比重:2.64

表-4 配合

	重量比		単位量 (kg/m ³)							
	W/P	E/P	W	C	E	S	G _S	G _L	SP	
EC	25%	10%	187	673	75	706	357	436	10.5	
NC		0%		748	0					

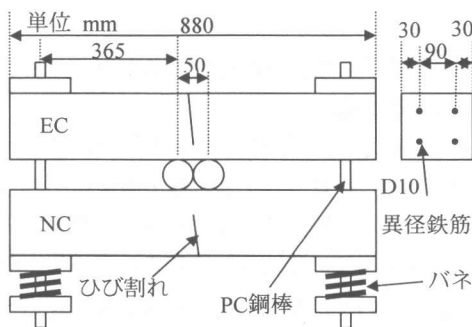


図-3 EC-1, NC-1 載荷図

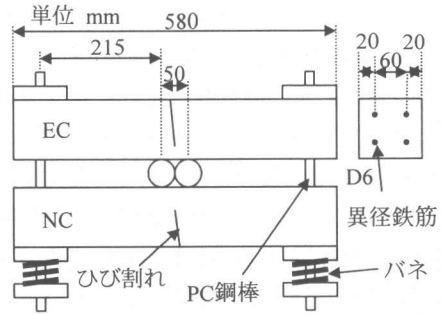


図-4 EC-2, NC-2, EC-3, NC-3 載荷図

4. 荷重下、水中におけるひび割れ自己修復機能

ここでは、EC-1, NC-1 を対に載荷した実験結果について述べる。載荷後に水中に入れる事は地下構造物等の環境条件を想定している。

載荷は一度で行うとクリープ等により多少の荷重が抜けるので、荷重が安定するまで数回に分けて載荷を行い、安定するまでに総じて40時間を要した。この期間は水和反応が進行しないように乾燥状態を保った。PC鋼棒にかかっていた荷重は図-5の通りである。打設後35日程はほぼ一定の荷重を保っている。

載荷前の鉄筋のひずみを図-6に表す。EC-1の初期膨張は1週間で既に定常状態に達し、その値は170 μ 程度である。NC-1の方は自己収縮が入っている。

荷重が安定してから供試体を水中に入れ、測定を開始した。載荷後の鉄筋のひずみ変化を図-7に示す。図-6での最終ひずみと図-7での最初のひずみの差から載荷前後での鉄筋ひずみの増加分を比較すると、ECの方が350 μ 程小さく、膨張コンクリートのひび割れ抵抗性が高いことが分かる。また、水中投入後は、ECは少しずつ追加膨張をしている。NCが少し収縮しているのは、対にしているECの膨張の反動としてNC側が収縮したものと考えられる。

載荷後のひび割れ近傍におけるEC-1のコンクリート軸方向ひずみは図-8の通りである。膨張には、供試体が水中に入ることにより、収

縮が戻った分も含んでいと考えられるが、それも含めて 600~800 μ の膨張が測定された。

ひび割れは EC-1 には 1 本、NC-1 には 4 本入ったが、測定は等モーメント区間に入ったひび割れに絞った。載荷後のひび割れ幅の変化を図-9 に示す。EC-1、NC-1 それぞれの同じひび割れの異なる位置におけるひび割れ幅の変化の様子である。EC-1、NC-1 それぞれの平均ひび割れ幅は線で示した。ひび割れの閉塞過程を写真-1~8 に示す。ひび割れ幅の測定は複数の場所で経時的に行った。NC-1 のひび割れでは閉じた位置と閉じなかった位置があったが、EC-1 のひび割れはほぼ全域にわたって 1 ヶ月で閉じた。

写真で比較的白い部分は新しく析出した部分である。EC-1、NC-1 共にひび割れ面から析出物ができている様子が伺える。しかし、NC-1 に比べて EC-1 の方がひび割れは均等に閉じている。また、図-9 からわかるようにひび割れの閉じるスピードが速い。このことから、膨張コンクリートはひび割れ後の追加膨張によりひび割れを閉じる機構を有すると推定できる。

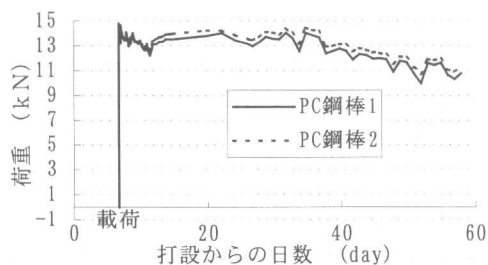


図-5 PC 鋼棒の荷重

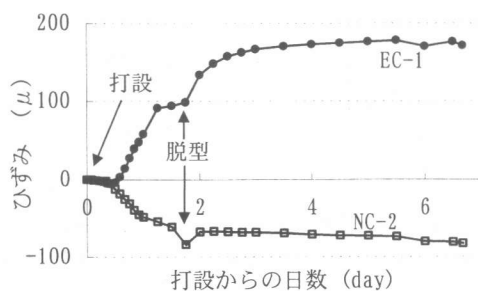


図-6 鉄筋の初期ひずみ

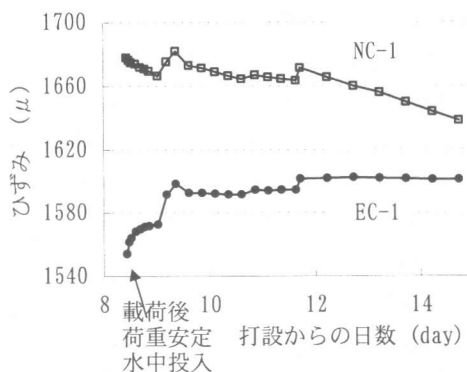


図-7 ひび割れ発生水中投入後の鉄筋ひずみ

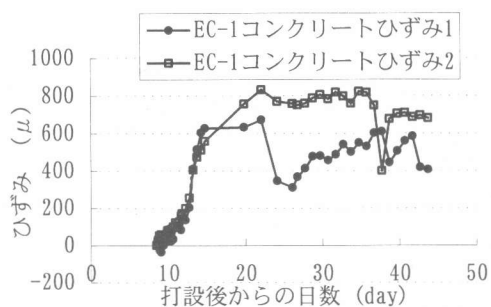


図-8 水中投入後のコンクリートひずみ

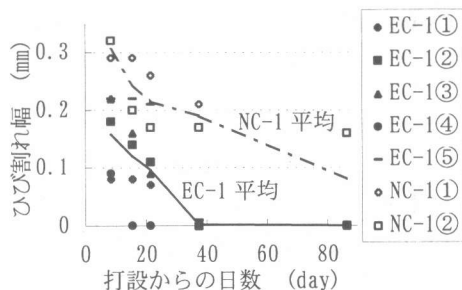


図-9 ひび割れ幅の変化

5. 荷重下、湿度 98%におけるひび割れ自己修復機能

本章では EC-2、NC-2 を対とした供試体と、EC-3、NC-3 を対とした供試体の実験結果について述べる。環境条件は地上構造物において、雨の日等の湿度の高い状況を想定している。構造条件についてはひずみ勾配が大きく、等モーメント区間が小さいため、実際の構造物よりも

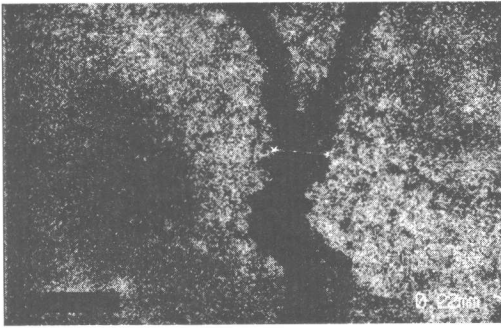


写真-1 EC-1 ひび割れ発生直後

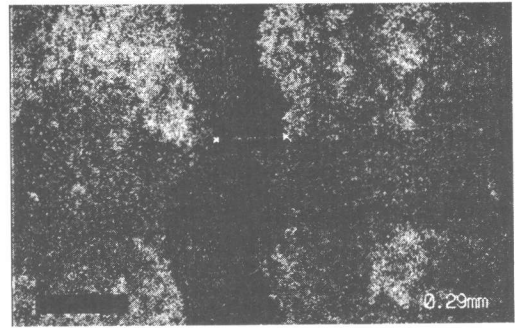


写真-5 NC-1 ひび割れ発生直後

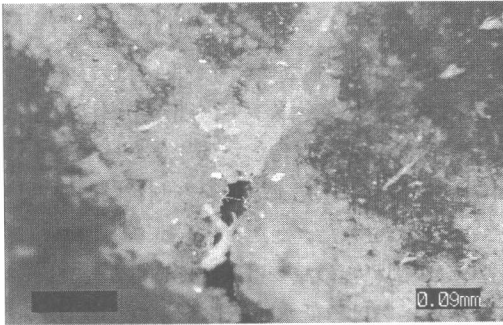


写真-2 EC-1 ひび割れ発生後 13 日目

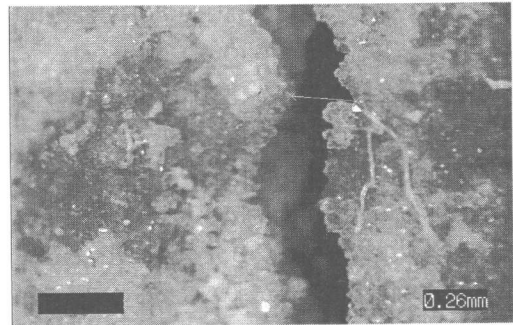


写真-6 NC-1 ひび割れ発生後 13 日目

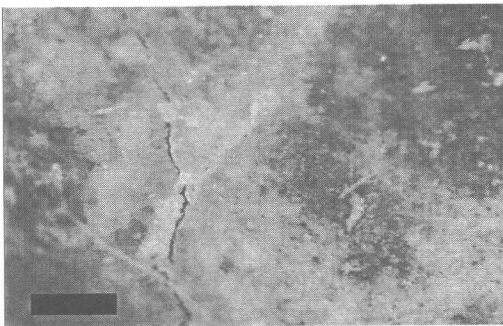


写真-3 EC-2 ひび割れ発生後 29 日目

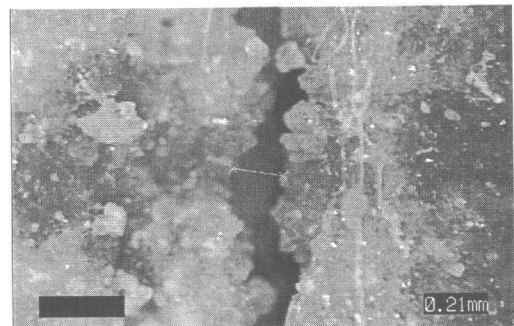


写真-7 NC-1 ひび割れ発生 29 日目

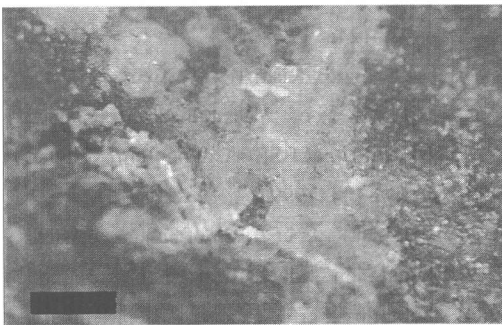


写真-4 ひび割れ発生後 78 日目

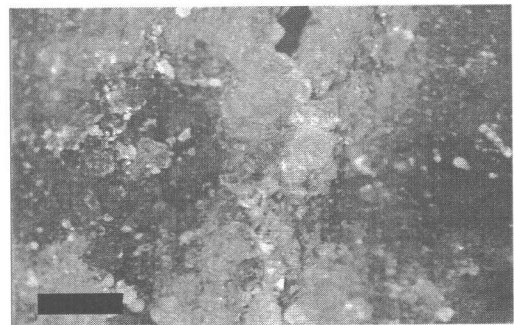


写真-8 NC-1 ひび割れ発生後 78 日目

ひび割れ自己修復機能にとっては厳しい条件である。

PC 鋼棒によって EC-2, NC-2 の対にかけた荷重と, EC-3, NC-3 にかけた荷重はできる限り等しくなるように実験では留意し, その荷重は約 7kN である。載荷後 35 日は一定の荷重を保った。EC-2 には 1 本, NC-2 には 3 本, EC-3 には 2 本, NC-3 には 3 本のひび割れが入った。

載荷前の鉄筋のひずみは図-10 の通りである。EC-2 が最初わずかに膨張するがその後収縮に転じるのに対し, EC-3 では 150 μ の初期膨張を起こしている。

ひび割れ発生後からのひび割れ近傍のコンクリート軸方向ひずみを測定して, 図-11 のデータが得られた。普通コンクリートも膨張しているのは, 水分の供給により収縮が戻ったからと考えられる。この収縮の戻り分を差し引くと, 大まかに追加膨張の効果が求められるので, それも図-11 中に線で表している。載荷後 30 日で EC2-NC2 は 280 μ , EC3-NC3 は 90 μ であり, 追加膨張の効果が認められる。

載荷前において EC-2 は乾燥養生であるのに対し, EC-3 は湿潤養生を施している。EC-2 の方が外部からの水分供給が少ないため, 未反応膨張材が多く残存しており, 追加膨張が強く表れたものと考えられる。

しかし, マイクロスコープで測定したところひび割れ幅に変化はなかった。今後, より実際の構造物に近い構造条件での検討が必要である。

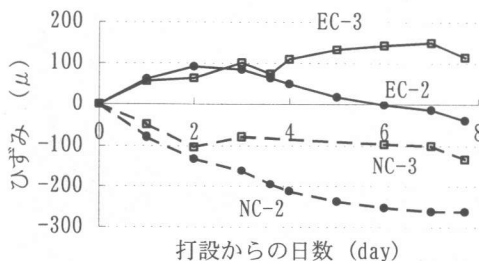


図-10 鉄筋の初期ひずみ

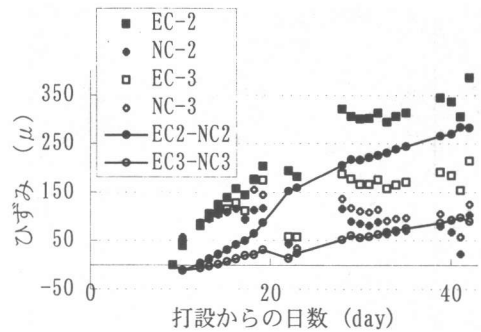


図-11 ひび割れ後のコンクリートひずみ

6. 結論

- (1) 低水粉体比膨張コンクリートでは, ひずみ勾配が大きく, 等モーメント区間が短い極めて厳しい条件で荷重を保持した状態であっても, 水中養生を行うことによってひび割れは閉塞することが確認された。ただし, 湿度 98% においては, ひび割れ幅の減少は確認できなかった。
- (2) 水中における低水粉体比膨張コンクリートのひび割れ閉塞機構には, ひび割れ面に新しい生成物が析出することと部材全体の追加膨張の少なくとも 2 つの要因があることを確認した。

参考文献

- 1) 岡村 甫, 辻 幸和: ケミカルプレストレスを導入したコンクリート部材の力学的特性, 土木学会論文集, 第 225 号, pp.101-108, 1974.5
- 2) 辻 幸和: コンクリートにおけるケミカルプレストレスの利用に関する基礎研究, 土木学会論文集, 第 235 号, pp.111-124, 1975.3
- 3) Liu, L. and Kishi, T.: Effect on Re-expansion of Restrained Expansive Concrete, IABSE Colloquium Phuket pp.139-144, 1999
- 4) Suttichai, K.: Effect of an Expansive Agent on Mechanical Behavior and Durability Performance of RC Members, master thesis, AIT, No.ST-99-1, Apr.1999