

アルカリ骨材反応を有効利用した微膨張型繊維補強モルタルの鉄筋拘束による部材利用と膨張圧によるひび割れ発生の評価

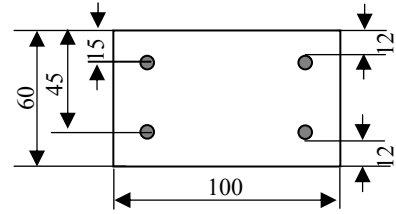
破壊診断工学研究室 恩田 陽介

1. はじめに

セメント系材料には、収縮とそれに伴うひび割れが生じやすい。収縮低減剤や膨張材などが使われているが、長期にわたって収縮させないことは容易ではない。長期にわたって安定して膨張しうる性能をもったセメント系材料が実用化されれば、適用の可能性が広がる。

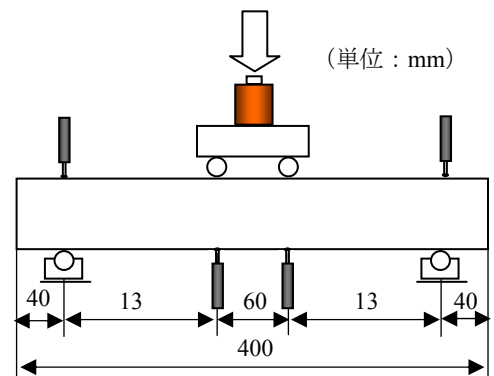
コンクリートの膨張機構には、膨張材の反応により生成した水和物が空隙を形成し体積増加するセメントペーストの膨張の他に、アルカリシリカ反応（以下 ASR という）により生成したアルカリシリカゲルの細孔溶液の吸収によって発生する膨張圧による骨材の膨張が、その一つとして挙げられる。

ASR や膨張材による膨張を組み入れ、長期にわたってゆっくりと膨張したり微量な膨張を維持したりする微膨張型 HPCRCC が提案されている。この修士論文では、適用の例として、この材料に鉄筋を配置した小型の鉄筋補強 HPCRCC（以下 R/HPCRCC という）はりを用いてケミカルプレストレスの導入効果を確認した。さらに、微膨張性 HPCRCC を隙間充填材として利用した際の膨張圧による母材のひび割れ発生への影響について検討した。この概要では前者について述べる。



(単位：mm)

図-1 R/HPCRCC はりの断面



(単位：mm)

図-2 曲げ载荷試験方法

2. 実験概要

(1) 使用材料および配合ならびに養生条件

使用材料を表-1 に示す。細骨材には ASR 反応性骨材に川砂を用い、比較対象には珪砂を用いた。この川砂は、火山群を源流とする河川の上流部で採取されたものである。

実験で用いたポリエチレン繊維混入率 1.25vol% の HPCRCC の配合を表-2 に示す。比較対象のコントロール供試体（以下 Control という）には、細骨材の粒度が反応性骨材と同等となるように 6 号珪砂と 7 号珪砂を質量比 4 : 6 で混合して用いた。

本研究では、HPCRCC における ASR の影響を迅速に確認するため供試体を促進養生に供した。促進養生条件は既往の研究⁴⁾から、練混ぜ時に NaCl を用いて等価アルカリ量を 12kg/m³ とし、60℃ の 1mol/l NaOH 溶液に浸漬することとした。

(2) R/HPCRCC はりの ASR による長さ変化と曲げ载荷試験

R/HPCRCC はりのケミカルプレストレスは、ゲージブラグを埋め込んだ供試体を用いて評価した。供試体ひず

表-1 使用材料

材料	記号	仕様、物性
高強度ポリエチレン繊維	PE	繊維径 12 μ m, 繊維長 12mm, 密度 0.97g/cm ³ , 引張強度 2.6GPa, 弾性係数 88GPa
セメント	C	JIS R 5210 早強ポルトランドセメント, 密度 3.13g/cm ³
石灰石粉	LP	密度 2.71g/cm ³ , 比表面積 3050cm ² /g
細骨材	S6	6号珪砂, 密度 2.63g/cm ³
	S7	7号珪砂, 密度 2.63g/cm ³
	SA	ASR 反応性骨材 (川砂), 600 μ m 以下, 密度 2.60g/cm ³
高性能 AE 減水剤	SPU	ポリカルボン酸エーテル系化合物
増粘剤	HMC	水溶性セルロースエーテル, 粘度グレード 100000mPa \cdot s

表-2 HPCRCC の配合

配合	W/C (%)	W/P (%)	単位量 (kg/m ³)							
			W	Powder		SA (S6+S7)	SPU	HMC	PE	
				C	LP					
HPCRCC PE:1.25% (Control)	50	38	390*	780	234	550 (558)	9.1	1.0	12.1	

*W は SPU を含んだ水溶液の質量を表す

み≒鉄筋ひずみとなるよう、供試体端面からゲージプラグの埋め込み深さ 20mm 以内で鉄筋を直角に折り曲げて定着させ、供試体の中心軸の長さ変化を JIS A 1129-3 (ダイヤルゲージ法) に準拠して物理的に計測した。長さ変化試験は、測定の前 24 時間前に 20℃の恒温室へ 60℃の恒温槽から供試体が入った促進養生容器を移動して供試体温度を平衡させてから計測を行った。

鉄筋には D6 を用いて複鉄筋とし、拘束鋼材比を変化させる場合は圧縮側の鉄筋を省いて単鉄筋とした。この場合、拘束鉄筋比は、複鉄筋のはりで 2.11%、単鉄筋のはりで 1.06%となる。はりの断面を図-2 に示す。使用した鉄筋の降伏強度と引張強度は、それぞれ 332.1N/mm² と 457.8N/mm² であった。はり供試体の内訳と本数を表-3 に示す。

はりの曲げ荷重試験は、図-2 に示すようにスパン 320mm、等曲げ区間長 60mm の対称 2 点荷重とし、荷重をロードセルにより、支点と荷重点の変位を高感度変位計により測定した。圧縮縁には検長 30mm のひずみゲージを貼付し、引張縁には検長 30mm と 60mm のひずみゲージを平行に貼付した。供試体は、材齢 14 日まで湿空養生して 20℃での基長を測定した後、促進養生に供した。ASR 膨張の目標水準を 0.05%、0.1%、0.15%として、断続的に測定した膨張率が 0.05%と 0.1%を超えた時点と、膨張が過大になるのを避けて 0.15%付近に達した時点で促進養生を終えた。その後 20℃湿空環境に供試体を移動し荷重試験まで保存し、同時に試験に供した。荷重試験前に、NaOH 溶液浸漬による飽水状態から保存期間の乾燥収縮による長さ変化を測定し、供試体の膨張率を確認した。

表-3 はり供試体の内訳と本数

用材料	鉄筋補強	養生方法	
		ASR 促進	湿空
ASR-HPFRCC	なし	1	1
ASR-HPFRCC	複鉄筋	4	1
ASR-HPFRCC	単鉄筋	1	1
Control-HPFRCC	複鉄筋	1	1

表-4 R/HPFRCC はり供試体の一覧

記号	使用材料	鉄筋補強	養生/保存期間 (日)		膨張率 (%)	
			ASR 促進	湿空保存	ASR 促進	荷重試験時
ASR-0-1	ASR-HPFRCC	なし	35	9	0.3103	0.2664
ASR-S-1	ASR-HPFRCC	単鉄筋	21	23	0.1550	0.1036
ASR-D-1	ASR-HPFRCC	複鉄筋	14	30	0.0844	0.0353
ASR-D-2	ASR-HPFRCC	複鉄筋	21	23	0.1100	0.0608
ASR-D-3	ASR-HPFRCC	複鉄筋	35	9	0.1442	0.1044
ASR-D-4	ASR-HPFRCC	複鉄筋	21	収縮補償	0.1078	—
Control-D-1	Control-HPFRCC	複鉄筋	35	9	0.0503	0.0131
ASR-0-0	ASR-HPFRCC	なし	0	44	—	-0.0458
ASR-S-0	ASR-HPFRCC	単鉄筋	0	44	—	-0.0392
ASR-D-0	ASR-HPFRCC	複鉄筋	0	44	—	-0.0381
Control-D-0	Control-HPFRCC	複鉄筋	0	44	—	-0.0244

3. 実験結果と考察

(1) R/HPFRCC はりの ASR による長さ変化

実験に供した R/HPFRCC はり供試体の一覧を表-4 に示す。この中で ASR 膨張させたはり供試体の促進養生期間と膨張率の推移を図-3 に示す。拘束条件により膨張率が異なることが確認できる。各はり供試体は、表-4 に示す膨張率の時点で促進養生を終え、その後湿空環境で曲げ荷重試験まで保存した。また ASR-D-4 については、ASR による収縮補償の確認に供した。無筋供試体の ASR-0 の膨張が鉄筋により拘束されることにより R/HPFRCC はりにはケミカルプレストレスが導入される状況を図-4 に示す。土木学会コンクリート委員会アルカリ骨材反応対策小委員会は、ASR 膨張ひずみと拘束鋼材比の関係には、膨張コンクリートの膨張エネルギー一定則を利用した表現が可能であるという考え⁵⁾を示しており、ここでのケミカルプレストレスは、膨張コンクリートを参考にして式(1)で評価した。

$$\sigma_{cp} = p \cdot E_s \cdot \varepsilon_{sp} = p \cdot E_s \cdot \varepsilon_{cp} \quad (1)$$

ここに、 σ_{cp} : 導入されるケミカルプレストレス

ε_{sp} : 鋼材に生じる引張ひずみ

ε_{cp} : R/HPFRCC 膨張ひずみ

E_s : 鋼材のヤング係数

p : 拘束鋼材比 (= A_s/A_c)

(A_c : HPFRCC 断面積, A_s : 鋼材断面積)

膨張コンクリートの単位体積当たりの膨張エネルギー ($U = \sigma_{cp} \cdot \varepsilon_{cp} / 2$) を用いて実験結果を整理すると図-5 のようになる。R/HPFRCC においては、既往の研究⁴⁾で示したように HPFRCC に ASR が生じて一軸引張特性が維持され、また点在する骨材の ASR 膨張が繊維の架橋により安定ひび割れ進展して鉄筋に拘束されることから、膨張材を用いた場合と同様に、ひび割れを考慮することなく膨張エネルギー一定則が成立すると考える。

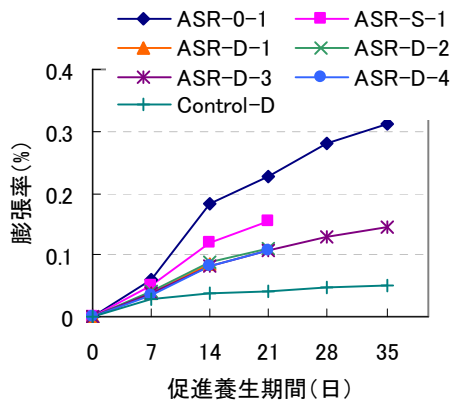


図-3 はり供試体の膨張率の推移

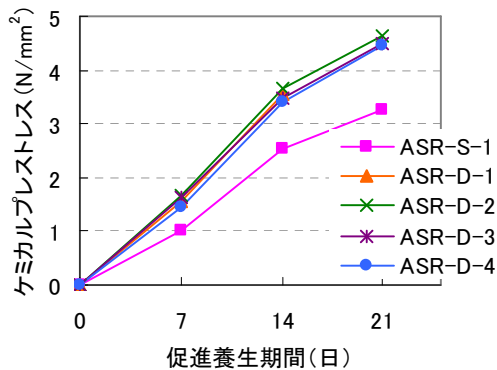


図-4 R/HPFRCC はりへのケミカルプレストレスの導入

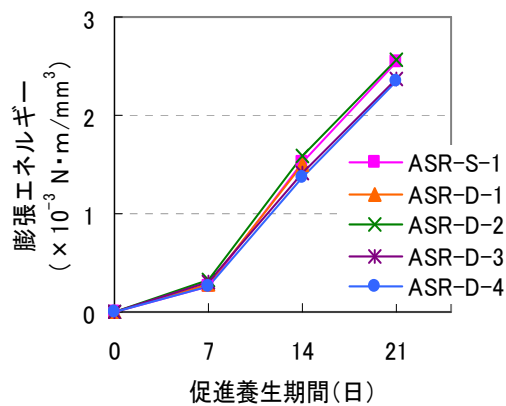


図-5 R/HPFRCC はりの膨張エネルギーの推移

(2) ASR を発生させた R/HPFRCC はりの曲げ載荷試験

曲げ載荷試験は、表-4 に示すはり供試体の内、ASR による収縮補償を確認する ASR-D-4 を除き、材齢 58 日で実施した。はりの膨張水準に応じて ASR 促進養生を終えて湿空環境で保存したことにより、ASR 促進養生後の膨張は乾燥収縮やクリープにより緩和され、載荷試験時のはり供試体の膨張率は表-4 に示す値となった。ASR 促進養生の影響を確認する比較対象として作製し湿空保存した 4 本のはり供試体は、全て乾燥収縮により断面に引張応力が作用する状態で試験に供した。

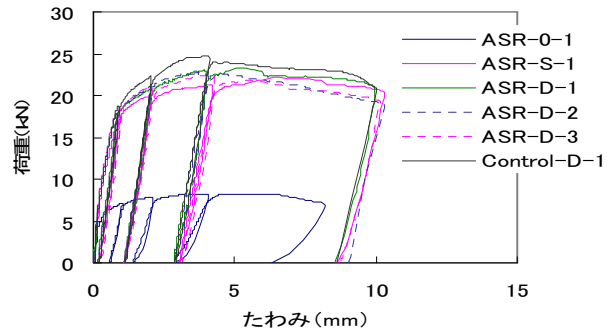


図-6 ASR 促進養生した供試体の荷重－たわみ関係

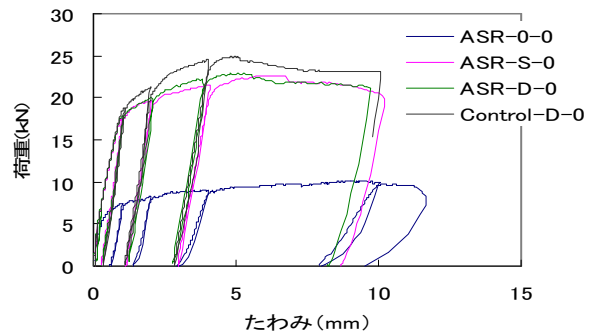


図-7 湿空保存した供試体の荷重－たわみ関係

ASR 促進養生したはり供試体の曲げ載荷試験における荷重－たわみ関係を図-6 に、また湿空保存した供試体の荷重－たわみ関係を図-7 に示す。荷重－たわみ関係の概観からは、鉄筋補強を有するはりにおいては顕著な差異は認められないが、鉄筋補強のない ASR-0-1 と ASR-0-0 では傾向が異なる。これは、既往の研究⁴⁾が示すように、ASR を発生させた HPFRCC は一軸引張試験において終局ひずみが小さくなることから、ASR を発生させた HPFRCC によるはりの曲げ載荷試験においても、鉄筋補強のない ASR 膨張した ASR-0-1 は、図-7 で ASR 膨張してない HPFRCC はり ASR-0-0 に見られるたわみ硬化する区間が小さくなり、軟化が早く始まるものと考えられる。

各はり供試体の曲げ載荷試験結果を表-5 にまとめる。ひび割れ荷重は、引張縁中央に軸方向に平行に貼付した 30mm と 60mm の検長区間の異なるひずみゲージの計測値の差が増大し始める時点とした。

図-8 で ASR によるケミカルプレストレスの効果が確認された ASR-D-1~3 と、ASR 促進養生に供していない ASR-D-0 について、はり供試体の長さ変化から式(1)で評価した載荷試験時のケミカルプレストレスを表-5 に示す。ASR-D-0 では乾燥収縮ひずみを負のケミカルプレストレスとして評価した。このケミカルプレストレスと表-6 に示す曲げ載荷試験結果との関係をまとめると

表-5 曲げ載荷試験結果のまとめ

記号	ひび割れ荷重 (kN)	降伏荷重 (kN)	降伏たわみ (mm)	最大荷重 (kN)
ASR-0-1	3.12	—	—	8.26
ASR-S-1	7.71	17.6	0.913	22.1
ASR-D-1	5.10	17.7	0.808	23.3
ASR-D-2	6.37	17.6	0.786	22.7
ASR-D-3	6.70	17.1	0.704	22.5
Control-D-1	4.74	18.4	0.835	24.8
ASR-0-0	2.21	—	—	10.2
ASR-S-0	2.22	17.2	0.923	22.7
ASR-D-0	2.45	17.7	1.026	22.9
Control-D-0	1.01	18.8	1.058	24.9

表-6 載荷試験時のケミカルプレストレス

はり記号	ケミカルプレストレス (N/mm ²)
ASR-D-0	-1.61
ASR-D-1	1.59
ASR-D-2	3.52
ASR-D-3	4.53

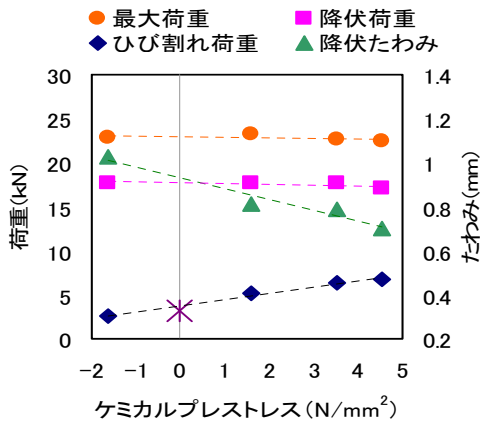


図-8 ケミカルプレストレスと曲げ満に試験結果の関係

図-8 のようになる。図中のアスタリスクは、材料のひび割れ発生荷重として無筋の ASR-0-1 の値を示す。図-8 に示すように R/HPFRCC はりでは、ASR により導入されたケミカルプレストレスに比例して降伏時のたわみが減少し、ひび割れ荷重が増加する効果が確認できる。一方、R/HPFRCC はりの曲げ耐力は、ケミカルプレストレスに関わらずほぼ一定であることを図-8 は示す。

4. まとめ

本研究においては、ASR や膨張材による膨張を組み入れ長期にわたってゆっくりと膨張したり微量な膨張を維持したりする微膨張型 HPFRCC を提案するとともに、適

用の一例として、この材料に鉄筋を配置してケミカルプレストレスの導入を検討した。また膨張によるひび割れの発生に関しても評価を行った。

ここでは鉄筋拘束によりケミカルプレストレスの導入を検討した結果より、得られた知見を以下にまとめる。

- (1) ASR 膨張させた小型の鉄筋補強 HPFRCC はりの長さ変化試験において、膨張コンクリートの膨張エネルギー一定則が成立した。
- (2) ASR 膨張した R/HPFRCC はりにはケミカルプレストレスが導入されており、曲げ載荷試験において、その大きさに比例してひび割れ荷重が大きくなった。

本研究において膨張材や ASR を利用した HPFRCC を微膨張型 HPFRCC として定義した。長期にわたって収縮しにくいこの材料の特徴を生かして、例えば、アンカーボルトの固定、削孔した穴やセパレータコーンの穴埋め、コンクリート中に後から設置される管の背面充填、コンクリート擁壁等の部材の目地部、機械等の据え付け部などへの利用が考えられる。いずれにしても、この材料は少量が薄板状で使うことが望まれる。この材料を活用するためには、膨張速度や最終膨張量の簡便な制御方法を確立するとともに、膨張圧が悪影響を生じない範囲で使うための考え方を確立することが重要である。これらは今後の課題と考える。

参考文献

- 1) 高田浩夫, 高橋祐二, 阪口裕紀, 小林孝一, 六郷恵哲: 膨張材の多量混入による鉄筋補強 HPFRCC はり部材のひび割れ性状の改善, 土木学会論文集 E, Vol. 66, No. 3, pp.337-347, 2010
- 2) 近藤直孝, 萩原宏俊, 坂井悦郎, 大門正機: セメント系膨張材を混和したセメントの水和反応と膨張機構, コンクリート工学年次論文集, Vol.22, No.2, pp.25-30, 2000
- 3) 川村満紀, S.チャタジー: コンクリートの材料科学, 森北出版株式会社, 2002
- 4) 高田浩夫, 田邊幸佑, 浅野幸男, 六郷恵哲: ASR の膨張を有効利用した HPFRCC のひび割れ性状と長さ変化挙動, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, pp.247-252, 2013
- 5) 土木学会: アルカリ骨材反応対策小委員会報告書, コンクリートライブラリー124, 2005