論文 HPFRCC による ASR 膨張抑制効果に関する検討

甲把 浩基*1·上田 隆雄*2·大西 史哲*3·塚越 雅幸*4

要旨:セメントモルタルに高性能有機短繊維を混入することで、高い引張じん性が実現できる複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材料(HPFRCC)を ASR で劣化したコンクリート構造物の表面保護材料として利用することが検討されている。本研究では、HPFRCC を反応性骨材含有コンクリートの表面に保護材料として接着させた場合の ASR 膨張抑制効果について検討した。なお、ASR 膨張抑制効果が期待できるリチウム塩として硝酸リチウム(LiNO₃)を含有する HPFRCC も併せて検討を行った。この結果、LiNO₃を含有する HPFRCC はシラン系含浸材と同程度の高い ASR 膨張抑制効果が確認された。

キーワード: HPFRCC, PVA 繊維, PE 繊維, 硝酸リチウム, ASR 膨張抑制効果

1. はじめに

HPFRCC は、セメントモルタルにポリエチレン(PE) 繊維やビニロン(PVA)繊維などの高性能有機短繊維を 混入することで、引張・曲げ応力下においてひび割れ幅 を抑制できるとともに、金属材料並みの大きなじん性が 実現できる新しい材料である¹⁾。HPFRCC は従来のコン クリートが持つ脆性的な特性を大幅に改善できること から、コンクリート構造物の構造性能や耐久性能の向上 が可能な新しい材料として注目されており、また、吹付 け施工も可能であることから、表面保護材や断面修復材 など、高性能なセメント系補修材としての利用が検討され、実構造物への適用も報告されている²⁾。

一方で、アルカリシリカ反応(ASR)によるコンクリート構造物の劣化事例が数多く報告され、コンクリート中の鉄筋が破断する深刻な事例も見つかっているにも関わらず、現状では有効な対策が確立されていない³⁾。そこで、著者らは HPFRCC を ASR により劣化が進行しているコンクリート構造物の表面保護材として適用する状況を想定し、ASR によるコンクリート膨張の抑制効果が確認されている⁴⁾リチウム塩を含有した HPFRCC の可能性について検討を行ってきた^{5),6)}。

これまでの検討 $^{5)}$ 6 では,リチウム塩として炭酸リチウム(Li_2CO_3),水酸化リチウム(LiOH),硝酸リチウム(LiNO_3)を添加した HPFRCC についてフレッシュ性状および硬化後の力学的特性を確認した。この結果,リチウム塩種類としては, LiNO_3 を添加した場合に HPFRCC として良好な流動性や曲げじん性が得られることが明らかになった。また,短繊維種類によって,HPFRCC として高い性能を発揮する W/B などの配合条件が異なることも明らかになった。ただし,このような HPFRCC を実際に表面保護材料として適用した場合の ASR 膨張抑

制効果やひび割れ挙動については、課題として残されていた。

そこで本研究では、これまでの検討結果を踏まえて HPFRCC の配合条件について改善を試みるとともに、これらの HPFRCC を表面保護材として接着した反応性骨材含有コンクリートの膨張挙動を検討することとした。 リチウム塩として LiNO3 を従来の添加量より増加させた HPFRCC を試みるとともに、各種 HPFRCC を接着した供試体の膨張挙動を、ASR 抑制手法として実績の多いシラン系含浸材を塗布した場合と比較検討することとした。

2. 実験概要

2.1 コンクリート及び HPFRCC の配合と使用材料

本実験で用いた反応性骨材含有コンクリートの配合を表-1に、HPFRCCの配合を表-2に示す。また、HPFRCCに混入した PE 繊維および PVA 繊維の基本諸元と物性値を表-3に示す。

表-1に示すように、反応性骨材含有コンクリートは、W/Cを55%とし、反応性骨材を用いるとともに、アルカリを添加した。初期混入 R_2O 量は、厳しい劣化促進環境を想定して $10.0~kg/m^3$ となるようにNaOHで調整し、練混ぜ水に溶解した形でコンクリートに混入した。

セメントは普通ポルトランドセメント (密度: 3.16 g/cm³, 比表面積: 3280 cm²/g, $R_2O:0.56\%$) を用いた。非反応性細骨材 S1 は,徳島県阿波市市場町砕砂 (表乾密度: 2.57 g/cm³, F.M.: 2.79),反応性細骨材 S2 は,北海道産安山岩砕砂 (表乾密度 2.56 g/cm³, アルカリ濃度減少量 Rc: 135 mmol/l,溶解シリカ量 Sc: 778 mmol/l)を用い,S1: S2 は3: 7 でペシマム混合した。非反応性粗骨材 G1 は,徳島県板野町大坂砕石 (表乾密度 2.57 g/cm³, Gmax: 15 mm) 反応性粗骨材 G2 は,北海道産安山岩砕

- *1 徳島大学大学院 知的力学システム工学専攻建設創造システム工学コース (学生会員)
- *2 徳島大学大学院 ソシオテクノサイエンス研究部エコシステムデザイン部門教授 工博 (正会員)
- *3 (株)建設技術研究所 (非会員)
- *4 徳島大学大学院 ソシオテクノサイエンス研究部エコシステムデザイン部門助教 工博 (正会員)

表-1 コンクリートの配合

W/C(%)	s/a(%)	単位量 (kg/m³)								
		С	W	S1	S2	G1	G2	NaOH	減水剤	AE 剤
55	48	324	174	248	606	268	653	10.5	1.5	0.02

表-2 HPFRCC の示方配合

繊維種 配合名 W/B S/C					単位量 (kg/m³)						
類	阳口泊	(%)	3/C	C	W	S	FA	LiNO ₃	繊維	増粘剤	SP 剤
	PE37	37	0.5	817	378	409	205	-	15	1.13	2.55
PE	PE45	45	0.5	750	422	375	188	1	15	1.27	0.94
	PE45Li	45	0.5	750	360	375	188	61.6	15	1.27	0.94
PVA	PVA45	45	0.5	750	422	375	188	-	19.5	1.27	2.04

石 (表乾密度 2.68 g/cm³, Gmax: 15 mm) を用い、細骨材同様 G1: G2 は3: 7 でペシマム混合した。なお、AE 減水剤を 1.5 kg/m^3 、AE 助剤を 0.02 kg/m^3 添加した。このコンクリートの封緘養生後材齢 28 日圧縮強度は 26.0 N/mm^2 であった。

HPFRCC の配合条件は著者らによる既往の検討 5)を参 考にして決定した。HPFRCC の混入繊維として、PE 繊 維と PVA 繊維を使用し、繊維体積率 (Vf) は 1.5%で一 定とした。水結合材比 (W/B) は 45%を基準レベルとし, 表-2 に示したように繊維の引張強度が大きい PE 繊維に ついてはマトリックス強度の大きい37%の場合を加えた 2 水準とした。ここで結合材とはセメントとフライアッ シュ (結合材全質量の 20%置換混入) を合わせたものと する。セメントは普通ボルトランドセメント(密度: $3.16g/cm^3$, 比表面積: $3280cm^2/g$), フライアッシュは JIS A 6201 で規定されたフライアッシュ II 種 (密度: 2.28 g/cm³, 比表面積: 3510cm²/g) を用い, 細骨材は HPFRCC 用には7号珪砂(密度: 2.59 g/cm³) を用いた。また、セ ルロース系の増粘剤を単位水量の0.3%,ポリカルボン酸 系高性能 AE 減水剤 (SP 剤) を単位粉体量の 0.1% (W/B=45%の場合) または 0.25% (W/B=37%の場合) 添 加した。

著者らの既往の検討 ⁶⁾では、W/B が 45%の PVA 繊維混入 HPFRCC に LiNO₃をセメント質量の 5%添加した。この際に PVA 繊維よりも PE 繊維を用いた場合の方が大きなひび割れ分散性を示したことから、今回の検討では、ひび割れ幅抑制が期待できる PE 繊維混入 HPFRCC に LiNO₃を添加することとした。また、添加割合もセメント質量の 8.2%まで増加させた。なお、この水準は、既往の検討 ⁶⁾で LiOHをセメント質量の 5%添加した場合と同等の Li 濃度を確保するために必要な LiNO₃添加量として算出した。LiNO₃ は紛体物質であるが、溶解度が高いため、練混ぜ水に溶解することで HPFRCC に添加した。

表-3 繊維の物性

⟨±⟨⊬1€¥5	長さ	直径	引張強度	弾性係数	
繊維種類	(mm)	(µm)	(N/mm^2)	(N/mm^2)	
PE	12	12	2580	7.3×10 ⁴	
PVA	12	40	1600	4.0×10 ⁴	

2.2 供試体の作製および養生

た後に, 各種試験を実施した。

HPFRCC の練混ぜ方法は過去の検討 6 と同様の方法とし、練混ぜには 30 リットル容量モルタルミキサーを用いた。練混ぜ終了後に、モルタルフロー値(JIS R 5201)と空気量の測定を行い、型枠にモルタルを流し込んだ。作製した HPFRCC 供試体は、圧縮試験用に 6 $^{100}\times200$ mm の円柱、曲げ試験用に $^{100}\times400$ mm の角柱とした。同一要因の供試体は 3 体ずつ作製した。打設日翌日に脱型し、 20 Cの恒温室で 28 日間の封緘養生を行っ

一方, HPFRCC を接着する反応性骨材含有コンクリー ト供試体は、80×80×400 mm の角柱とし、各要因 5 本 ずつ作製したが、その内2本は、ASR によるコンクリー ト膨張を測定するため、50 mm の埋め込み式ひずみ計を 供試体中央部分に埋設した。コンクリート打設時に打設 面に硬化遅延剤を散布し、3時間後に表層のペースト部 分を除去することで, 打設表面の骨材の凹凸部分を露出 させた。すべての供試体は打設日翌日に脱型し、20℃恒 温室で 28 日間の封緘養生を行った後に、表面保護材と して HPFRCC を接着させた。HPFRCC の打設は縦打ちで 角柱コンクリートの4側面に巻き立てるように接着させ た。なお, 打設面以外の型枠面コンクリートについては, HPFRCC 打設前に表面がざらつく程度までワイヤーブラ シによる目荒しを行った。HPFRCC層の厚さは10 mmと したため、HPFRCC 接着後の角柱供試体は 100×100× 400 mm の寸法となった(図-1 参照)。これらの供試体は、 HPFRCC 打設後, さらに 2 週間の封緘養生を行った。

HPFRCC を接着しないコンクリート供試体,および,シラン系含浸材(シラン・シロキサン系高性能浸透性吸水防止材)を塗布するコンクリート供試体については,100×100×400 mm の角柱供試体とし,シラン系含浸材を塗布する供試体は,コンクリートの打設後4週間の封緘養生を行った後に,含浸材の塗布を行った。

2.3 各種試験

HPFRCC 供試体の載荷試験はすべて 2000 kN 容量の万能試験機を用いて行った。圧縮試験(JIS A 1108)では,圧縮荷重の他に縦ひずみと横ひずみを測定した。曲げ試験は JIS A 1106 に準じた 3 等分点載荷で実施し,荷重とスパン中央変位を測定するとともに,側面の曲げスパン付近における水平変位を測定した。スパン中央変位は容量 2 mm,精度 0.001 mm の変位計,水平変位は容量 2 mm,精度 0.001 mm の π 型ゲージを供試体の下縁から 20 mmの位置に,3 個連続(スパン中央に 1 個と,その左右に 1 個ずつ)して貼付けることにより測定した。

HPFRCC 接着供試体は、各要因 5 体の供試体中、2 体に対して建研式接着強度試験機を用い、JIS A 1171 に準じて HPFRCC 層の接着強度を測定した。測定点は、各供試体のコンクリート打設面、および、型枠面それぞれについて、3 点ずつとした。残りの3 体については、HPFRCC 無接着供試体、および、シラン系含浸材塗布供試体とともに、コンタクトゲージ用の真鍮チップを貼付け後に促進 ASR 環境(40°C、95 %R.H.)に保管しながら、コンタクトゲージと埋め込み式ひずみ計によって供試体膨張率を経時的に測定した。なお、膨張率測定前日には供試体を20°Cの恒温室に移動し、測定を行った。

3. HPFRCC の物性

3.1 フレッシュ性状

各種 HPFRCC のフレッシュ時におけるモルタルフロー値と空気量および材齢 28 日における圧縮強度の一覧を表-4 に示す。なお、各種 HPFRCC の練上がり状態を観察した結果、いずれの配合においても繊維は良好に分散しており、大きなダマなどは見られなかった。

表-4によるとPVA繊維を混入したHPFRCCよりもPE 繊維を混入したHPFRCCの方が小さなフロー値を示している。これは、表-2に示したように、PE繊維の方がPVA繊維よりも径が小さく、同一繊維体積率では混入本数が多くなることから、練混ぜ水の拘束効果が大きかったためと考えられる。また、空気量に関しても、PVA繊維を混入した場合よりもPE繊維を混入した場合の方が大きな空気量を示している。これも、PVA繊維に比べてPE繊維の方がHPFRCCへの混入本数が多くなり、空気を内包しやすくなったことが考えられる。著者らによる既往の検討50においても、特にPE繊維を用いたHPFRCC

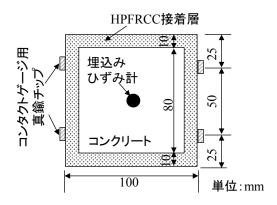


図-1 表面保護供試体の断面図

表-4 HPFRCC のフレッシュ性状および 28 日強度

	配合名	モルタル	空気量	圧縮強度		
	配合治	フロー値 (mm)	(%)	(N/mm^2)		
-	PE37	152	13.0	39.2		
-	PE45	PE45 168		22.1		
	PE45Li	160 (-4.8%)	17.5	19.5 (-11.8%)		
•	PVA45	214	8.0	37.5		
-	PE45Li	160 (-4.8%)		19.5 (-11.89		

注)カッコ内の値はリチウム塩無添加の場合を 100%とした減少率を示す。

において、大きな空気量を示し、このことが硬化後の物性にも影響しているものと考えられたため、本検討では、練混ぜ時における空気泡の巻き込みを緩和させるため、増粘剤添加量を0.02%低下させ、SP剤も空気連行性の小さいものに変更したが、空気量の低減効果は小さかった。今後は、消泡剤を併用することでPVA繊維と同程度までの空気量低減が可能か検討を進める予定である。

LiNO $_3$ を添加した PE45Li と無添加の PE45 を比較すると、フロー値の低下は 4.8%となっており、リチウム塩添加による流動性の大幅な低下は見られなかった。従来の検討 $^{5)}$ からも、 Li_2CO_3 や LiOH と比較して LiNO $_3$ は添加による HPFRCC の流動性への影響が小さいリチウム塩と言える。今回の検討では、 LiNO_3 の添加量を大幅に増加させたが、ASR 抑制効果向上の観点から、今後さらに添加量を増加させることも検討する予定である。

3.2 圧縮試験

表-4によると、同じ W/B で比較すると、PE 繊維よりも PVA 繊維を用いた HPFRCC の方が大きな圧縮強度を示しており、PE 繊維を用いた W/B が 37%の HPFRCC である PE37の圧縮強度は、PVA 繊維を用いた W/B が 45%の PVA45と同程度の値となっている。表-4に示したように、PE 繊維を用いた配合では、空気量が大きくなっており、HPFRCC 内の空隙が欠陥となって比較的早期に破壊が進行したものと推定される。

また、LiNO3を添加した PE45Li は無添加の PE45 の圧

縮強度から 12%程度低下している。既往の検討 4)においても,リチウム塩を添加することで HPFRCC モルタルフロー値が低下する場合には,強度が低下しており,本検討でも同様の傾向が見られた。ただし,強度低下の程度は比較的小さく,W/C 等の配合条件の微修正によって補正可能なレベルであると考えられる。

圧縮試験時の圧縮応力と軸方向ひずみの関係を図-2に、軸直交方向ひずみとの関係を図-3に示す。なお、これ以降のグラフでは、各配合供試体の代表例のデータを示すこととする。図-2によると、応力一ひずみ曲線の初期における傾きで表される静弾性係数は、圧縮強度に依存しており、圧縮強度が同程度である PE37 と PVA45、または、PE45と PE45Liの曲線はほぼ重なっている。ただし、PE37 よりも PVA45、PE45 より PE45Li の方がやや大きな傾きで立ち上がっている部分が見られ、このような静弾性係数の違いは表-4に示した空気量の違いも一因となっているものと推定される。

図-3 によると、PE45Li 以外の配合について、最大応 力後に緩やかに圧縮応力が低下しながら軸直交ひずみ が大きくなる挙動を示している。これは、HPFRCCに混 入した短繊維が軸方向圧縮に伴って発生する軸直交方 向の引張応力に抵抗することで, ひび割れの急激な進展 に伴う脆性的な破壊を防いでいるためである。これに対 して、PE45Li は最大荷重後ひずみが大きくなることなく 荷重が低下している。PE45Li は最も圧縮強度の低い HPFRCC であるため、他の HPFRCC よりも圧縮荷重によ るマトリックス部分の破壊程度が大きくなり、引張じん 性が小さくなったものと考えられる。著者らの既往の検 討 4)では、最も圧縮強度の大きい PE37 の場合でも応力低 下勾配は比較的緩やかであったが、本検討では、PVA45 よりも脆性的な荷重低下曲線を示している。これは、今 回の検討では、PE37の空気量が過去の検討 5)よりも 3% 低下していることが一因と推定される。

3.3 曲げ試験

各種 HPFRCC 供試体に関して、曲げ試験で得られた荷重ー中央変位曲線を図-4 に示す。今回作成した供試体は、すべて曲げひび割れ発生後も荷重と中央変位が増加するたわみ硬化性を示した。また、最大荷重後の荷重低下も緩やかであり大きな曲げじん性が得られていることがわかる。ここで、曲げじん性の大きさを評価する指標として、図-4 に示した荷重ー中央変位曲線と横軸で囲まれた部分の面積を曲げじん性エネルギーと定義した。曲げじん性エネルギーの算出結果を図-5 に示す。

図-4 および図-5 によると、圧縮強度が同程度の PE37 と PVA45 を比較すると、PE37 の方がピーク後の荷重低下が比較的緩やかで大きな曲げじん性が得られている。このような緩やかな荷重低下を実現するためには、曲げ

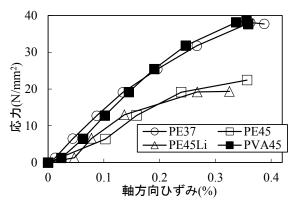


図-2 圧縮試験における応力-軸方向ひずみ曲線

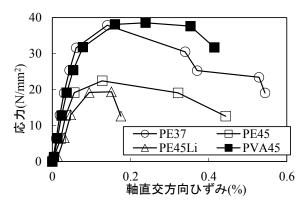


図-3 圧縮試験における応力-軸直交方向ひずみ曲線

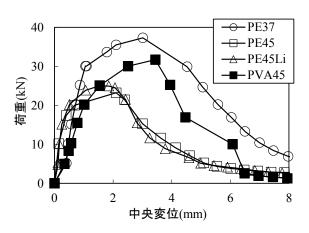


図-4 曲げ荷重-中央変位曲線

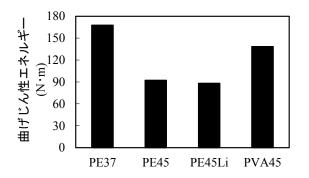


図-5 曲げじん性エネルギー

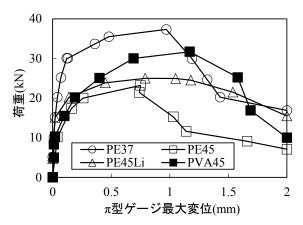


図-6 曲げ荷重-π型ゲージ最大変位曲線

ひび割れを跨いだ短繊維がモルタルマトリックスから 徐々に引抜けつつ、ひび割れの進展に抵抗する架橋効果 が発揮される必要がある。本実験で作製した PE 繊維の HPFRCC は空気量が大きく、モルタルマトリックス強度 が小さいために、圧縮載荷については比較的早期に破壊 が進行するが、曲げ載荷時においては、短繊維による曲 げひび割れ架橋効果が発揮されやすかったものと考え られる。これに対して、PVA 繊維を用いた場合には、マ トリックス強度が大きい上に、繊維の引張強度も PE 繊 維よりも小さいため、繊維の破断が容易に発生したこと がじん性低下につながったものと思われる。リチウム塩 添加の影響については LiNO3 を添加した PE45Li は無添 加の PE45 と同程度の曲げじん性を確保している。

曲げ荷重と供試体側面に貼付けたπ型ゲージ3個の中 の最大変位の関係を図-6に示す。これによると、最大荷 重に達するまでの同一荷重レベルに対する π型ゲージ 最大変位量は PE 繊維を用いた場合の方が PVA 繊維を用 いた場合よりも抑制されている。これにより PE 繊維を 用いた HPFRCC の方が微細なひび割れが分散すること で,変位の局所化を防いだものと考えられる。また, LiNO₃を添加した PE45Li は PE45 よりも同じπ型ゲージ 最大変位に対する荷重の低下程度は小さく, ひび割れが 発生した後も PE 繊維が引張力を負担することでひび割 れの進展と曲げ荷重の低下を防いでいることが分かる。 LiNO, の添加による空気量の低減がこのようなひび割れ 挙動の変化につながったものと推定される。

4. 表面保護供試体

4.1 HPFRCC 表面保護層の接着強度

表面保護供試体に関して、HPFRCC表面保護層と母材 コンクリートとの接着強度試験結果を図-7に示す。図よ り、HPFRCC の配合によらず、一般的な接着強度の目安 $^{7)}$ である 1.0 N/mm^2 を上回る強度が得られている。

特に打設面は、表面のペースト除去による骨材面露出

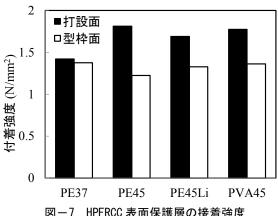


図-7 HPFRCC表面保護層の接着強度

を行ったため、全体的に大きな接着強度を示しており、 破壊形態も、母材コンクリートの破壊が大半であったこ とから、HPFRCC層と母材コンクリートの一体性は十分 確保されていたと言える。これに対して、型枠面は、ワ イヤーブラシでコンクリート表面の目荒しを行ったが, 打設面ほどの凹凸はなかったことから、接着強度はやや 低下し、破壊形態も HPFRCC 層と母材コンクリートとの 界面で剥離する場合も見られた。これより,表面保護層 の一体性を確保するために、表面保護材施工前の母材コ ンクリート表面の前処理が重要であると言える。

4.2 表面保護供試体の膨張挙動

促進 ASR 環境に保管した表面保護供試体の膨張率経 時変化を図-8 および図-9 に示す。図-8 は、供試体表面 でコンタクトゲージにより測定した値であり、図-9は埋 め込み式ひずみ計により測定した値である。また、凡例 のSはシラン系含浸材を塗布した場合,NはHPFRCCで 表面保護を行っていない無接着供試体を示す。

図-8 と図-9 は若干異なる傾向を示しており、図-8 の コンクリート表面における膨張では、PE37, PE45, PVA45 の HPFRCC 接着供試体の膨張率と無接着供試体 N の膨 張率はほぼ同程度であり、リチウムを添加した PE45Li およびシラン系含浸材塗布のSは膨張が抑制されている。 一方で、図-9のコンクリート中における膨張では、無接 着供試体 N の膨張率が最も大きく, その他の表面保護供 試体は膨張を抑制しているが、特に PE45Li の接着供試 体の膨張抑制効果が大きくなっている。外部からの水分 供給の影響を受けやすいコンタクトゲージ法による測 定結果で全体的に値が大きくなった可能性があり、厳密 な評価は難しいが、現時点では、LiNO、を添加した HPFRCC で表面保護を行うことで、シラン系含浸材を塗 布した場合と同程度の膨張抑制効果が期待できそうで ある。今後さらに膨張が大きくなり、無接着供試体と HPFRCC接着供試体のひび割れ状況に大きな差が生じる と, リチウム塩無添加 HPFRCC で表面保護した場合でも 膨張抑制効果が生じる可能性があるものと考えられる。

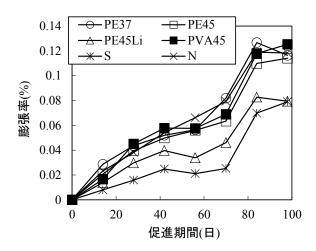


図-8 促進 ASR による膨張率経時変化 (コンタクトゲージ)

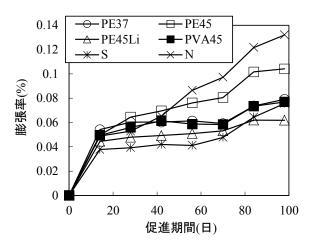


図-9 促進 ASR による膨張率経時変化 (埋め込み式ひずみ計)

4.3 表面保護供試体のひび割れ状況

促進ASR環境に100日間保管した表面保護供試体のひび割れ状況を図-10に示す。ここには、無接着供試体 N と PE37, PE45, PVA45による接着供試体を示しており、PE45Li の接着供試体とシラン系含浸材塗布供試体はひび割れが見られなかったため、示していない。

図-10 によると、N と PE37、PE45 のひび割れ状況は似ており、若干の微細なひび割れが見られる程度である。これに対して、PVA45 の接着供試体は、ひび割れ幅は0.05 mm 程度であるものの、比較的明確な亀甲状のひび割れが見られる。図-8 に示したように、これらの供試体の膨張率が同程度だとすると、図-6 に示したように、PVA45は PE 繊維を用いた HPFRCC よりもひび割れ幅抑制性能が低いことが原因でこのような違いが発生したものと考えられる。この点についても今後さらに長期的測定を行い確認する予定である。

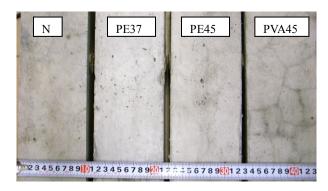


図-10 促進 ASR による膨張率経時変化

6. まとめ

本研究結果をまとめると次のようになる。

- (1) リチウム塩として $LiNO_3$ をセメント質量の8.2%添加した PE 繊維 HPFRCC の流動性と強度は、無添加の場合よりも若干低下した。
- (2) PE 繊維を用いた HPFRCC は PVA 繊維を用いた場合 よりも空気量が増加し、圧縮強度が低下したが、同 程度の圧縮強度を有する PVA 繊維 HPFRCC と比較す ると、大きな曲げじん性とひび割れ幅抑制効果が得 られた。
- (3) ASR 膨張コンクリートの表面保護材として LiNO $_3$ を 添加した HPFRCC である PE45Li を接着した結果、シラン系含浸材を塗布した場合と同程度の膨張抑制効果が得られた。

参考文献

- 1) JCI: 高靭性セメント複合材料の性能評価と構造利用, 研究委員会報告書 (II), 2004.5
- 2) 土木学会:複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材料設計・施工指針(案),コンクリートライブラリー127号,2007.3
- 3) 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 号, 2005.8
- W. J. MacCoy and A. G. Caldwell: New Approach to Inhibiting Alkali-Aggregate Expansion, Journal of ACI, Vol. 22, pp.693-706, 1951.
- 5) 上田隆雄,稲岡和彦,宮崎裕之,水口裕之:リチウム塩を含有する HPFRCC に関する基礎的検討,コンクリート工学年次論文集,Vol.30, No.1, pp.285-290,2008
- 6) 亀田貴文,上田隆雄,前田宗雄,水口裕之:含有するリチウム塩の種類が HPFRCC の諸特性に与える 影響,コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.1, pp.361-366, 2009
- 7) 土木学会:表面保護工法設計施工指針(案) コンク リートライブラリー119 号, 2005.4