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⁾。

ー方で、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), の}では, リチウム塩として炭酸リチ ウム (Li₂CO₃), 水酸化リチウム (LiOH), 硝酸リチウム (LiNO₃) 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, LiNO₃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R₂O量は、厳しい劣化促進環境 を想定して10.0 kg/m³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, R₂O: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)

W/C(%)	s/a(%)	単位量 (kg/m ³)								
W/C(/0)	5/a(70)	С	W	S 1	S2	G1	G2	NaOH	減水剤	AE 剤
55	48	324	174	248	606	268	653	10.5	1.5	0.02

表-1 コンクリートの配合

繊維種	町ム々	W/B	S/C	単位量 (kg/m ³)							
類	阳白泊	(%)	5/C	С	W	S	FA	LiNO ₃	繊維	増粘剤	SP 剤
PE	PE37	37	0.5	817	378	409	205	-	15	1.13	2.55
	PE45	45	0.5	750	422	375	188	-	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

表-2 HPFRCCの示方配合

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/m³, AE 助剤を 0.02 kg/m³ 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/mm²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/cm³, 比表面積: 3280cm²/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

雄雄種類	長さ	直径	引張強度	弾性係数	
利以术王个里尖只	(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

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 φ 100×200 mm の円柱, 曲げ試験用に 100×100×400 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℃の恒温室で 28 日間の封緘養生を行っ た後に, 各種試験を実施した。

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 減養生を行った後に,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 25 mm,精度 0.01 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℃,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℃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⁵⁾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

町ムタ	モルタル	空気量	圧縮強度	
陷合治	フロー値 (mm)	(%)	(N/mm^2)	
PE37	152	13.0	39.2	
PE45	168	18.5	22.1	
PE45Li	160 (-4.8%)	17.5	19.5 (-11.8%)	
PVA45	214	8.0	37.5	
			•	

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。

LiNO₃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)、6}からも、Li₂CO₃や LiOH と比較して LiNO₃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、LiNO₃ 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、応力ーひずみ曲線の初 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-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-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





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。 LiNO₃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/mm²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



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、LiNO₃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)



(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。
- リチウム塩としてLiNO₃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 LiNO₃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

- 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
- 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
- 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