

論文 リチウム塩を含有する HPFRCC に関する基礎的検討

上田 隆雄*1・稲岡 和彦*2・宮崎 裕之*3・水口 裕之*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、金属材料のような引張じん性が実現可能な複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材料 (HPFRCC) が開発されているが、その特性を生かした適用方法が検討課題となっている。そこで本研究では、ASR により劣化した構造物の表面保護材料として HPFRCC を適用する状況を想定し、ASR による膨張の抑制効果が期待できるリチウム塩を含有する HPFRCC の可能性について基礎的検討を実施した。この結果、リチウム塩の添加によって HPFRCC の強度低下が認められたが、W/B が 45% の場合にはリチウム塩を添加した場合においても比較的大きな曲げじん性が得られた。

キーワード: HPFRCC, PVA 繊維, 炭酸リチウム, 曲げ試験, 両引試験, ひび割れ分散性

1. はじめに

複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材料 (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、ひび割れ発生後も応力の低下が無いみかけのひずみ硬化特性や、多数の微細ひび割れが分散するマルチブルクラック特性が特徴として挙げられている^{1), 2)}。これにより、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。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、その実用化に向けた検討が国内外において積極的に進められてきた¹⁾。また、本材料は吹付け施工が可能であるため、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有望視されている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。そこで、仮に HPFRCC を ASR により劣化が進行している構造物の表面保護材として適用した状況を想定すると、HPFRCC 表面保護層がコンクリートの ASR による膨張を拘束するとともに、ひび割れが発生した場合でも微細化することでひび割れ幅を抑制し、コンクリート表面からの水分等の供給を抑制できる可能性がある。さらに、既往の検討により、ASR によるコンクリート膨張を抑制する効果が確認されている³⁾リチウム塩を HPFRCC からコンクリートに供給することができれば、物理的効果に

加えて化学的にも ASR 抑制が可能となる。

以上により本研究では、ASR 膨張抑制効果が期待できるリチウム塩を含有する HPFRCC の可能性を検討することを目的として、異なる配合の HPFRCC について、圧縮試験、曲げ試験、および、両引試験を実施した。

2. 実験概要

2.1 HPFRCC の配合条件

本実験で用いた HPFRCC の示方配合を表-1に、用いた PVA 繊維の基本諸元と物性値を表-2に示す。これらの配合条件は著者らによる既往の検討⁴⁾を参考にして決定した。水結合材比 (W/B) は 45% を基準とし、より高強度の 37% との 2 レベルを設定した。著者らの既往の検討⁴⁾では、W/B として 45% と 30% を採用したが、30% の HPFRCC はマトリックス強度が大きすぎてひび割れ時に繊維が破断することでひび割れ分散性やじん性が低下する傾向を示したことから、今回の検討では、高強度側の W/B として 37% を採用した。なお、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。繊維体積率 (V_f) は、1.5% とした。S/C は HPFRCC については 0.5 で一定とし、比較用の普通モルタルについては 2.5 とした。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: 3270 cm²/g), フライアッシュは JIS A 6201 で規定された II 種フライアッシュ (密度: 2.31 g/cm³, 比表面積: 4330 cm²/g, SiO₂: 62.7 %, 強熱減量: 2.1 %) を用い、細骨材は HPFRCC 用には 7 号珪砂 (密度: 2.59 g/cm³) を、普通モルタル用には徳島県那賀川産川砂 (表乾密度: 2.61 g/cm³, F.M.: 2.79) を用いた。また、HPFRCC は、セルロース系の増粘剤を単位水量の 0.28%, ポリカ

*1 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准教授 工博 (正会員)

*2 (株)新井組 工修 (正会員)

*3 (株)穴吹工務店

*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教授 工博 (正会員)

表-1 HPCRCCの示方配合

モルタル 種類	W/C (%)	S/C	配合 記号	単位量 (kg/m ³)							
				C	W	S	FA	Li ₂ CO ₃	繊維	増粘剤	SP
普通	45	2.5	N45	464	261	1160	116	0	—	—	—
普通(Li含有)	45	2.5	N45Li	464	261	1151	116	9.28	—	—	—
HPCRCC	37	0.5	H37	817	378	409	204	0	19.5	1.06	2.04
	45	0.5	H45	750	422	375	188	0	19.5	1.18	0.94
HPCRCC (Li含有)	37	0.5	H37Li	817	378	399	204	9.28	19.5	1.06	2.04
	45	0.5	H45Li	750	422	366	188	9.28	19.5	1.18	0.94

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0.2% (W/B=37%の場合) 添加した。

化学的ASR抑制効果付与の試みとして、各配合についてリチウム塩を添加したものを用意した。リチウム塩としてはLi₂CO₃の粉末を用い、セメント質量の2%を細骨材代替で混入した。Kawamuraらは⁹⁾反応性骨材を含有するモルタルに対して、LiOHとLi₂CO₃の添加量を変化させたときの膨張抑制効果を検討した結果、Li₂CO₃であればセメント質量の1.5%以上の添加で効果があることを報告している。本研究の場合は、反応性骨材を含有するコンクリートやモルタルに直接練込む場合とは異なるが、Kawamuraらの検討結果を参考にして混入量の選定を行った。なお、3.以降で示す実験結果の凡例は、表-1に示した配合記号を用いる。

2.2 供試体の作製および養生

HPCRCCの練混ぜ方法は以下の通りとし、練混ぜには30リットルモルタルミキサーを用いた。

- (1) 水とSP剤および増粘剤を混ぜた溶液中にあらかじめ繊維を浸しておく。
- (2) セメントと珪砂を投入し1分間空練りする。
- (3) (1)で作成した繊維入り溶液を投入し、さらに3分間練り混ぜる。
- (4) 羽に付着した繊維等を掻き落とし、さらに2分間練り混ぜる。
- (5) Li₂CO₃の粉末を投入して、さらに1分間練り混ぜる。

練混ぜ終了後に、テーブルフロー値と空気量の測定を行い、型枠にモルタルを流し込んだ。

作製した供試体は、圧縮試験用にφ100×200mmの円柱、曲げ試験用に100×100×400mmの角柱、両引試験用に50×50×560mmの角柱の正方形断面中心に異型鉄筋D13SD295Aを1本配したものとした。なお、曲げ試験用供試体は、長手方向中心位置に深さ30mm、幅3mmの切欠きを入れたものと、入れないものの2種類を用意した。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日間の水中養生を行った後に、各種試験を実施した。

表-2 PVA繊維の諸元と物性値

繊維 種類	長さ (mm)	直径 (μm)	引張強度 (N/mm ²)	弾性係数 (N/mm ²)
PVA	12	40	1600	4.0×10 ⁴

表-3 フレッシュ性状と28日強度一覧

配合 記号	テーブル フロー (mm)	空気量 (%)	28日強度 (N/mm ²)
N45	188	2.0	56
N45Li	131 (-30%)	1.0	35 (-37%)
H37	171	8.0	57
H37Li	118 (-31%)	4.0	44 (-23%)
H45	207	11.0	34
H45Li	145 (-30%)	7.0	28 (-18%)

注) テーブルフロー値および28日強度値の後のカッコ内はLi₂CO₃無添加の場合を100%とした減少率を示す。

2.3 載荷試験

載荷試験はすべて2000kN容量の万能試験機を用いて行った。圧縮試験では、圧縮荷重の他に縦ひずみと横ひずみを測定した。切欠きの無い供試体を用いた曲げ試験は、3等分点載荷とし、荷重とスパン中央変位を測定した。切欠きの有る供試体を用いた曲げ試験は、中央1点集中載荷とし、荷重とスパン中央変位を測定した。両引試験は鉄筋の引張荷重とともにπ型ゲージによりひび割れ幅を測定した。π型ゲージは、基長50mm、容量2mmのゲージを合計10個連続でコンクリート長手方向に設置した。

3. フレッシュ性状および圧縮試験

普通モルタルおよび各種HPCRCCのフレッシュ時における試験結果と材齢28日における圧縮強度の一覧を表-3に示す。なお、各種HPCRCC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-3によると、普通モルタルN45と比較して、H37

は若干小さなフロー値となっているものの、H45はN45よりも大きなフロー値が得られている。HPFRCCは多量の短繊維を均一分散させるために粘性を大きくする必要があり、ペースト割合が大きい上に増粘剤を添加している。これに対して、テーブルフロー値は普通モルタルと同程度の値が得られていることから、今回作製したHPFRCCは粘性と流動性を両立させていると言える。Li₂CO₃を混入した配合については、無混入の場合に比べてフロー値が低下している。一般にコンクリートやモルタルにNaOHやKOHといった水酸化アルカリを添加した場合、セメントの凝結促進により流動性が低下すると共に、水和反応を阻害することが指摘されている⁶⁾。この点を考慮して本実験ではLiOHを用いず、Li₂CO₃を粉体の形で練混ぜの最終段階で混入する方法を採用したが、練混ぜ終了直後から経時的にモルタルがこぼり、流動性が低下した。これは、混入したLi₂CO₃がモルタル中で一部溶解し、水酸化アルカリであるLiOHに変化したものと推察される。表-3に示したように、テーブルフロー値の低下率は、普通モルタルの場合、HPFRCCの場合ともに約30%となっており、配合条件による影響は見られなかった。

今回の普通モルタルはAE剤を用いていないこともあり空気量は1~2%となっているが、HPFRCCは総じて大きな空気量を示している。著者らの既往の検討⁴⁾においても、HPFRCCの空気量の値が10%を超えており、強度低下の一因となっていると考えられた。空気量が大きくなる原因として、繊維の分散性を確保するために添加した増粘剤の影響で練混ぜ時に内包する空気が極度に抜けにくくなったことが考えられたため、既往の検討では単位水量に対して0.35%の増粘剤を添加したのに対して、本実験では、0.28%に調整したが、結果的には空気量の値はほぼ同程度であった。これに対して、Li₂CO₃を添加した配合については、無添加の場合と比較して空気量が大きく低下した。これは、前述したようにLi₂CO₃を添加することにより、セメントの凝結促進とモルタルの粘性低下が発生し、モルタルに内包される空気量が減少したものと考えられる。

表-3によりLi₂CO₃無添加の各種HPFRCCの28日圧縮強度をN45の結果と比較すると、W/Bが37%のHPFRCCであるH37の圧縮強度がW/Bが45%の普通モルタルであるN45の圧縮強度と同程度となり、W/Bが等しいH45はN45よりも小さい値を示している。Li₂CO₃無添加のHPFRCCはいずれも空気量が大きかったことから、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可能性がある。また、繊維の混入により圧縮強度が低下するとの報告²⁾もあることから、繊維の混入がモルタルマトリックスの圧縮耐力を低下させた可

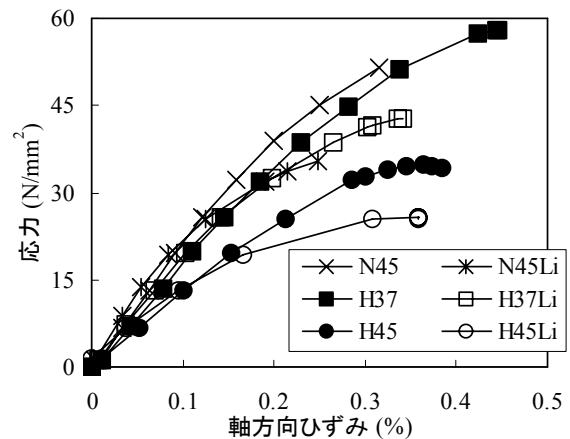


図-1 圧縮試験における応力-軸方向ひずみ曲線

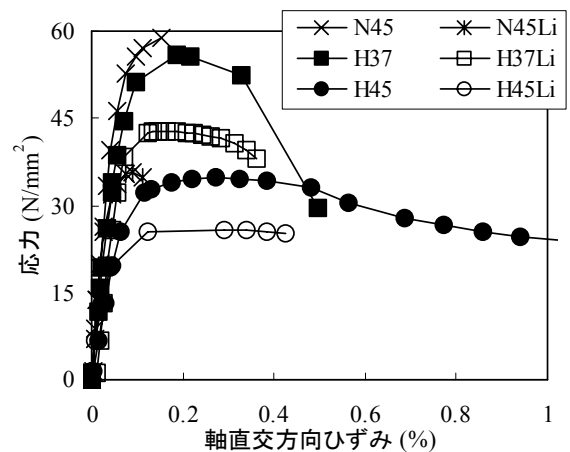


図-2 圧縮試験における
応力-軸直交方向ひずみ曲線

能性もある。また、Li₂CO₃の添加により無添加と比較して圧縮強度が低下している。これは、前述したアルカリ添加に伴う凝結促進と水和反応の阻害に起因していると考えられる。ただし、HPFRCCの各配合は普通モルタルと比較して強度の低下程度が小さくなっていることから、短繊維の混入による補強効果が発揮された可能性がある。既往の検討では、HPFRCCのマトリックス強度は引張じん性とトレードオフの関係にあることが指摘されており⁷⁾、ひび割れ分散性やじん性を向上させる観点からは、大きすぎない強度が求められることも考慮して今後の検討を進める必要がある。

圧縮試験時の圧縮応力と軸方向ひずみの関係を図-1に、軸直交方向ひずみとの関係を図-2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-1によると、応力-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N45とH37はほぼ同程度の傾きで立ち上がっていることがわかる。

表-4 曲げ試験における最大荷重一覧

配合記号	切欠き無し (kN)	切欠き有り (kN)
N45	9.8	4.0
N45Li	13.0	3.9
H37	33.2	12.4
H37Li	24.9	8.7
H45	24.8	7.9
H45Li	22.6	5.5

ただし、N45と比較してH37の方が終局時における軸方向ひずみが大きくなっている。今回のひずみ測定は通常のコンクリート用ひずみゲージを用いて行っており、コンクリートの破壊により測定不能となるまでデータを取っているが、N45よりもH37の方が粘り強く、じん性の大きな破壊形態となったために、比較的大きなひずみまで記録されたものと考えられる。なお、 Li_2CO_3 を添加した場合は、圧縮強度は小さくなるが、静弾性係数への影響は比較的小さいと言える。

図-2によると、普通モルタルであるN45およびN45Liは0.2%未満の引張ひずみが軸直交方向に発生した時点で供試体が破壊しているのに対して、HPFRCCはW/Bに関わらず0.4%程度以上まで引張ひずみが大きくなっており、もっともひずみが大きくなっているH45については、1%以上の引張ひずみが測定されている。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、ピーク後の圧縮応力が緩やかに低下する破壊挙動を示したものと考えられる。また、W/Bが37%の場合は45%の場合と比較して、モルタルマトリックスが高強度となるため、短繊維が引抜けずに破断しやすい状況となっていることから、H37はH45ほど大きなじん性が得られなかったものと考えられる。

4. 曲げ試験

普通モルタルおよび各種HPFRCCを用いて実施した曲げ試験で得られた最大荷重の一覧を表-4に、切欠き無し供試体の荷重-中央変位曲線を図-3に、切欠き有り供試体の荷重-中央変位曲線を図-4に示す。なお、図-3および図-4においてN45およびN45Liの曲線を示すと分かりにくいので、破壊の最終点のみをそれぞれ◇および☆印で示した。

4.1 普通モルタルとHPFRCCとの比較

普通モルタルN45およびN45Liは切欠きの有無にかかわらず、曲げひび割れが発生した時点で脆性的に破壊した。これに対して、今回作成したHPFRCC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

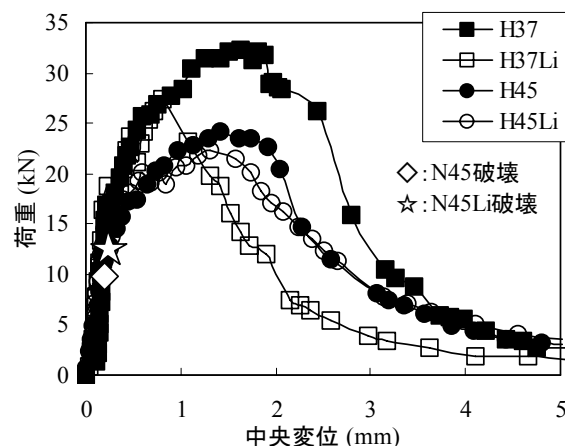


図-3 曲げ試験における荷重-中央変位曲線 (切欠き無し供試体)

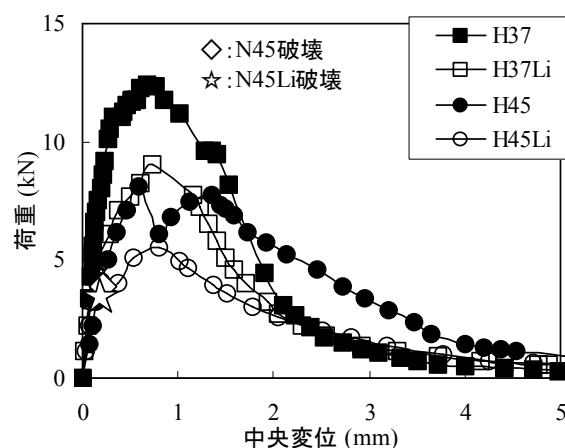


図-4 曲げ試験における荷重-中央変位曲線 (切欠き有り供試体)

わみ硬化性を示した。これにより、表-4に示したようにHPFRCC供試体の最大荷重は普通モルタルN45の場合よりも顕著に増加している。また、図-3および図-4に示したように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。表-3で示したように、W/Bが45%のHPFRCCであるH45の圧縮強度は同じW/Bの普通モルタルであるN45の場合よりも大幅に低下していたが、曲げ強度や曲げじん性は大幅に改善している。これは、同一W/Bで考えると、本実験で作製したHPFRCCは空気量が大きく、モルタルマトリックスが脆弱化したために、圧縮荷を受けた場合には比較的早期に破壊が進行するが、曲げ荷を受けた場合には、引張応力に対する抵抗性能が強度やじん性の支配要因となるため、モルタルマトリックスの強度が小さくても、短繊維による曲げひび割れ架橋効果が発揮されれば大きな曲げ強度や曲げじん性が得られたものと考えられる。このような傾向は、図-3に示した切欠

きの無い場合の方が、**図-4**に示した切欠きのある場合よりも大きいですが、これは、切欠きの無い場合の方が HPRCC の持つひび割れの分散によるじん性の向上効果が大きくなるためである。切欠きのある供試体は、局所化された欠陥である切欠きからのひび割れ進展を観察するために作製したが、H45 の曲線に見られるように、ひび割れの進展により一度低下した荷重が、短繊維の引張抵抗により再度上昇するような場合も見られた。

4.2 HPRCC の配合条件の影響

曲げじん性向上効果は配合条件によって異なり、**図-3**においては H45 の曲げじん性は H37 よりも小さくなっている。HPRCC が大きな曲げじん性を得るためには、曲げ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。著者らの既往の検討⁴⁾では、W/B が 30% の場合に、PVA 繊維の引張強度に対してモルタルマトリックスの強度が大きすぎたために、ひび割れを跨いだ PVA 繊維がモルタルマトリックスから引抜けずに破断したことで W/B が 45% の場合に比べて曲げじん性が小さくなった。本検討では W/B が 37% の配合を選定したが、この場合にはモルタルマトリックスの強度が大きすぎずに、曲げじん性の向上につながったものと考えられる。ただし、**図-3**、**図-4**ともに、最大荷重後の荷重降下域においては、H37 よりも H45 の方が変位の増加に対して緩やかに荷重が低下していく傾向が認められることから、H37 は部分的に短繊維の破断が生じているものと推察される。

図-3によると、W/B が 37% の場合には、 Li_2CO_3 を添加することにより、無添加の場合よりも曲げ強度および曲げじん性が低下しており、この傾向は圧縮強度の場合と同様である。これに対して、W/B が 45% の場合には、 Li_2CO_3 を添加することによる影響がほとんど見られない。このことの本メカニズムは明確ではないが、リチウム塩の添加により、モルタルマトリックスの強度が低下したとしても、配合条件を適切に選定すれば、ある程度の曲げじん性は得られることを示しているものと考えられる。ただし、**図-4**に示されるように、ひび割れが局所化すると、じん性の低下は避けられないため、ひび割れの分散が大きな曲げじん性を得るための前提条件であるといえる。

5. 両引試験

普通モルタルおよび各種 HPRCC で作製した供試体を用いて実施した両引試験で供試体に発生したひび割れ状況の例を**写真-1**に、荷重試験終了後におけるひび割れ本数とひび割れ幅の分布状況を**図-5**に、荷重- π 型最大変位量曲線を**図-6**に、荷重- π 型平均変位量曲



写真-1 両引試験供試体に発生したひび割れ状況の例 (写真上: N45, 写真下: H45)

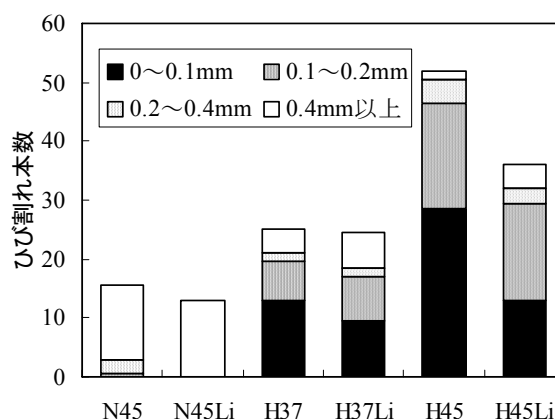


図-5 両引試験供試体に発生したひび割れ本数とひび割れ幅の分布状況

線を**図-7**に示す。なお、両引試験における荷重は、鉄筋降伏後、万能試験機のクロスヘッドストローク値が 30 mm に達する時点まで実施し、**図-5**に示したひび割れ本数およびひび割れ幅は、荷重終了後に除荷した状態で目視により計測した。ひび割れ幅は、コンクリート表面の鉄筋直上位置における値とし、ひび割れ本数は、供試体のコンクリート 1 面あたりの平均値を**図-5**に示した。**図-6**に示した π 型最大変位量とは、供試体に貼り付けた 10 個の π 型ゲージの変位量の内、ある荷重レベルにおいて測定された最大値とする。また、**図-7**に示した π 型平均変位量とは、10 個の π 型ゲージの内、ひび割れを跨いだ π 型ゲージに関してある荷重レベルにおいて測定された変位量の平均値とする。なお、 π 型ゲージによる測定は、どれか一つのゲージの測定値が 2 mm に達した時点まで行うものとした。

荷重終了後の普通モルタルと HPRCC のひび割れ状況は**写真-1**に示すように明らかに異なり、HPRCC は

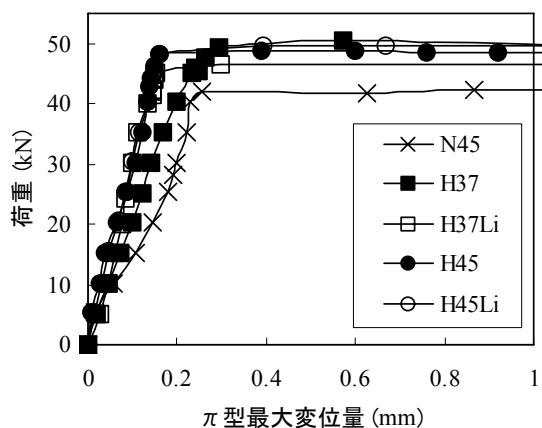


図-6 両引試験における荷重- π 型最大変位量曲線

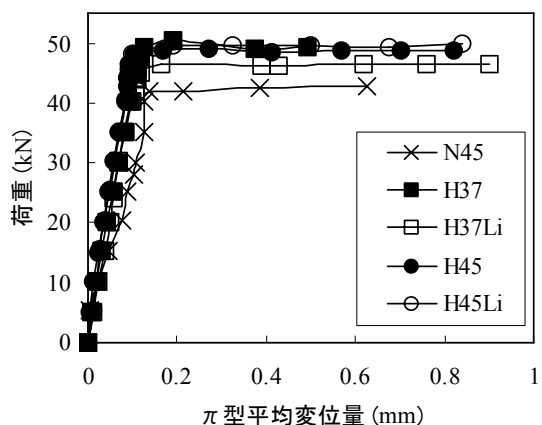


図-7 両引試験における荷重- π 型平均変位量曲線

普通モルタルよりも微細なひび割れが多数発生していた。図-5に示したように、普通モルタルのひび割れ幅はほとんどが0.4 mm以上の幅を持つ局所ひび割れであり、本数もLi₂CO₃添加の有無によらず15本程度と少ない。また、ひび割れ間隔はほぼ一定であった。これに対して、HPFRCCは幅が0.4 mm以上の局所ひび割れが2~5本程度と少ないのに対して、0.2 mm以下の微細ひび割れが20~50本程度発生している。曲げ試験では、H37の方がH45より大きなじん性が得られたが、両引試験における微細ひび割れの本数は、H45が最も多くなっている。これは、両引試験は曲げ試験と異なり、一軸の純引張がHPFRCC全体に作用することから、ひび割れが分散しやすかったことが原因と考えられる。なお、Li₂CO₃を添加したHPFRCCの内、W/Bが45%のH45Liはひび割れ分散性が顕著に低下した。

図-6より、鉄筋が降伏するまでの荷重に対する π 型最大変位量はN45が最も大きいことがわかる。各種HPFRCCは微細なひび割れが多数発生することで、変位の局所化を防いでいると言える。また、図-7によると、

π 型平均変位量はN45が最も小さな値で終了している。この平均変位量は、10個の π 型ゲージの内、どれか一つが2 mmに達するまで求めていることから、N45は平均的な変位量が小さい内に、どこかのひび割れが急速に開いたことがわかる。一方、各種HPFRCCは荷重初期段階からひび割れ幅を抑制し、鉄筋降伏後もひび割れが供試体全体に様に発生することで、各ひび割れの幅が急速に開くことを防いだと言える。また、各種HPFRCCはN45よりも大きな降伏荷重を示しており、一軸の引張りに対してHPFRCCによる補強効果が確認できる。

6. まとめ

本研究結果をまとめると次のようになる。

- (1) Li₂CO₃の添加によって普通モルタルおよびHPFRCCの流動性が低下した。
- (2) W/Bが37%のHPFRCCはW/Bが45%の場合より大きな曲げ強度が得られたが、比較的急な荷重低下が見られた。
- (3) 切欠きの無い供試体の曲げ荷重試験の結果、W/Bが37%のHPFRCCはLi₂CO₃の添加によって曲げ強度とじん性の低下が見られたが、W/Bが45%の場合には、Li₂CO₃の添加による曲げ挙動の変化は小さかった。
- (4) 両引試験の結果、HPFRCCは微細ひび割れの分散によりひび割れ幅が抑制された。このような傾向はW/Bが45%の場合に顕著であったが、Li₂CO₃の添加によってひび割れの分散性は低下した。

参考文献

- 1) JCI:高靱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) MacCoy, W. J. and Caldwell, A. G.: New Approach to Inhibiting Alkali-Aggregate Expansion, Journal of ACI, Vol. 22, pp.693-706, 1951.
- 4) 稲岡和彦, 上田隆雄, 水口裕之:配合条件が高じん性セメント複合材料の基礎的物性に与える影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, pp. 287-292, 2006.7
- 5) Kawamura, M. and Fuwa, D.: Effects of Lithium Salts on ASR Gel Composition and Expansion of Mortars, Cement and Concrete Research, Vol. 33, pp. 913-919, 2003.
- 6) 中部セメントコンクリート研究会:コンクリート構造物のアルカリ骨材反応, 理工学社, 1990.11
- 7) 国枝稔, Ahmed Kamal, 中村光, Eugen Bruhwiler:超高強度ひずみ硬化型セメント系材料の開発, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.1, pp. 315-320, 2007.7