

論文 HPFRCC 薄肉部材の静的ならびに衝撃破壊性状

中島 隆^{*1}・松島 雄平^{*2}・YUN Hyun Do^{*3}・六郷 恵哲^{*4}

要旨: 衝撃吸収部材としての利用を想定した薄肉部材を HPFRCC および普通コンクリート(NC)により作製し、静的ならびに衝撃破壊性状について検討した。HPFRCC はり供試体では、鉄筋を併用することで、NC 供試体と比較して、薄い断面でも、高い耐荷力および変形性能や復元性能が確認できた。HPFRCC 板供試体では、繊維の架橋効果により NC 供試体よりも、衝撃試験後のひび割れ幅が抑制された。補強材や表面の凹凸加工との組み合わせにより、さらにひび割れ幅の抑制が可能であった。HPFRCC により作製したブロック供試体では、大変形時のひび割れ抑制が可能であった。

キーワード: HPFRCC, 薄肉部材, 静的載荷, 衝撃載荷, 復元性能

1. はじめに

わが国は、山岳部や沿岸部に隣接する国道や一般道が多く、これらの道路には、数多くの覆道や落石防護柵が設置されている。この覆道や落石防護柵は、落石物や雪崩等から道路を保護することが目的であるため、大きな耐荷力およびエネルギー吸収性能が必要である。一般的に覆道や落石防護柵の建設材料としては、コンクリート部材や鋼材などが使用され、また構造形式も様々である。

複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材料¹⁾ (以下 HPFRCC) は、疑似ひずみ硬化特性および複数微細ひび割れ特性を有する材料であり、耐久性に優れ、また非常に韌性に富んだ材料である。そのため、衝撃吸収部材を作製する際、普通コンクリートよりも、薄い断面で、高い変形性能や復元性能を有する部材が作製可能であると考えられる。また繊維の架橋効果により、衝撃時の剥離等の破壊を防ぐ効果も期待できる。筆者らは、免震支承で支持された橋梁の桁が大地震時に大変位する場合に、局所破壊して桁の変位を吸収できる変形吸収部材を無筋の HPFRCC を用いて開発している²⁾。

本研究では、HPFRCC に普通鉄筋を併用することで、変形性能および復元性能を高めた衝撃吸収部材を提案することを目的としている。耐荷力、変形性能および復元性能を向上させた衝撃吸収部材を、HPFRCC を用いて作製し、載荷試験を行い、静的ならびに衝撃性能について検討した。

2. 実験概要

2.1 試験概要

本研究では、セメント系部材の変形性能、復元性能およ

び耐衝撃性能について、はり供試体、板供試体およびブロック供試体の 3 種類の供試体を作製して検討を行った。3 種類の載荷試験の関係を図-1 に示す。はり供試体の載荷試験の結果をもとに、その他の載荷試験に用いる部材厚を決めた。セメント系材料としては、HPFRCC および普通コンクリート (以下 NC) の 2 種類の材料を使用した。

はり供試体は、材料、部材厚さや使用する鉄筋径の違いが、静的変形性能および復元性能に与える影響を評価するものである。また、板供試体は、材料、補強材料の違いや表面加工の有無が、供試体表面の衝撃破壊性状に与える影響を評価するものである。ブロック供試体は、セメント系部材に発泡スチロール (以下 EPS)²⁾ や鉄筋を併用することで、大変形後の復元性能を増加させることのために作製したものである。

2.2 材料特性

本研究で使用した NC と HPFRCC の配合と圧縮強度を表

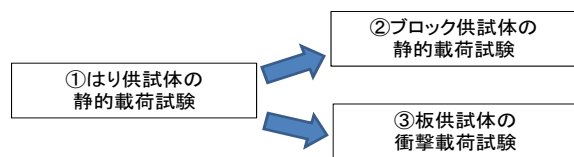


図-1 載荷試験の関係図

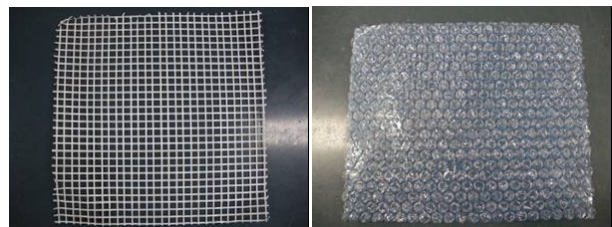


写真-1 PE製繊維ネット

写真-2 凹凸シート

*1 岐阜大学大学院 工学研究科 社会基盤工学専攻 (正会員)

*2 岐阜大学 工学部 社会基盤工学科 (正会員)

*3 大韓民国 忠南大学 建築工学教授 工博 (正会員)

*4 岐阜大学 工学部 社会基盤工学科教授 工博 (正会員)

表-1 示方配合と圧縮強度

材料	W/C (%)	単用量(kg/m ³)										圧縮強度 (N/mm ²)	材齢 (日)
		水	セメント	膨張材	細骨材	粗骨材	珪砂	高性能 AE減水剤	AE減水剤	増粘剤	PE短繊維		
HPFRCC	32	380	1188	76	-	-	395	37.9	-	0.9	14.6	86.6	14
NC	55	180	327	-	810	920	-	-	1.02	-	-	41.8	

表-2 はり供試体水準

	使用材料	部材厚さ (mm)	補強材			
			普通鉄筋 D10	普通鉄筋 D13	繊維ネット	なし
はり供試体	NC	30	BN30-D10	BN30-D13		
		50	BN50-D10	BN50-D13	BN50-NET	BN50-
		100	BN100-D10	BN100-D13		
	HPFRCC	30	BH30-D10	BH30-D13		
		50	BH50-D10	BH50-D13	BH50-NET	BH50-
		100	BH100-D10	BH100-D13		

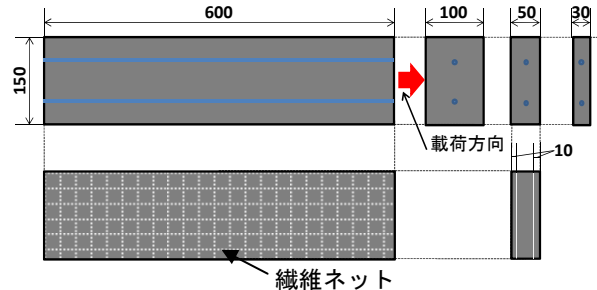


図-2 はり供試体形状 単位 [mm]

表-3 ブロック供試体水準

	使用材料	補強材	
		なし	普通鉄筋
ブロック供試体	NC	Block-NC	Block-NC-S
	HPFRCC	Block-HP	Block-HP-S

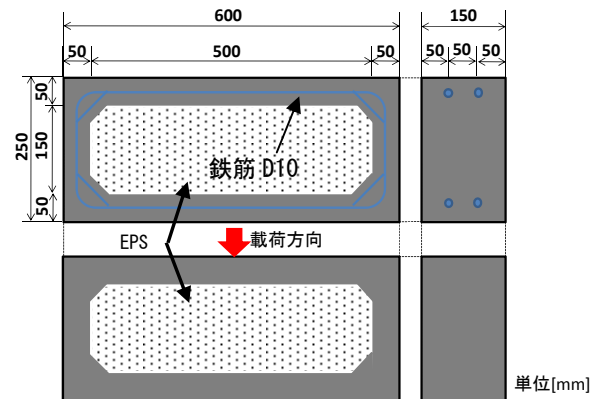


図-3 ブロック供試体形状

表-4 板供試体水準

	使用材料	補強材と表面加工						
		なし	表面加工	鉄筋 D10				繊維ネット
				(6本)	(4本)	(6本) + 表面加工	(4本) + 表面加工	
板供試体	NC	SN-	SN-凹凸	SN-6	SN-4			
	HPFRCC	SH-	SH-凹凸	SH-6	SH-4	SH-6+凹凸	SH-4+凹凸	SH-NET

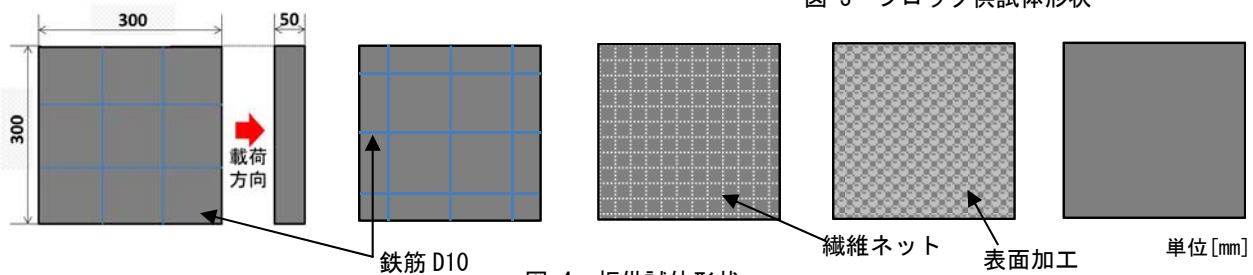


図-4 板供試体形状

-1に示す。セメントには、早強ポルトランドセメントを使用した。HPFRCCには、収縮低減のため膨張材をセメント量の6%混入し、繊維の混入率は体積率で1.5%とした。補強材料として使用したポリエチレン(PE)短繊維ネットおよび表面に凹凸を加工するために使用した凹凸シートを写真-1、写真-2に示す。PE製繊維ネットは10mmピッチの格子状であり、強度は幅50mmあたりで2.7kNである。また凹凸シートには、一般的な梱包用のシート(直径5mm程度の突起が100cm²四方に96個配置してあるもの)を使用した。

養生方法は、すべての供試体において湿布養生として、試験材齢は1~3週間とした。

2.3 供試体形状

(a) はり供試体

はり供試体の形状と供試体水準を図-2および表-2に示す。はり供試体の寸法は、縦150mm、横600mmとして、

厚さを30mm、50mm、100mmの3水準とした。はり供試体の補強として、鉄筋D10およびD13を断面高さの中央に配置した。繊維ネットは、はり供試体上面および下面からそれぞれ10mmの位置に配置した。

(b) ブロック供試体

ブロック供試体の形状と供試体水準を図-3および表-3に示す。ブロック供試体の寸法は、縦150mm、横600mm、高さ250mm、厚さ100mmとした。外寸が、縦150mm、横500mm、高さ150mmのEPSを、両面テープを用いて鋼製型枠に固定した。コンクリートは、紙面に垂直な方向から打設した。図-3に示すように、鉄筋(D10)は、型枠底面から50mmと100mmの位置で、供試体厚さのほぼ中央位置するように設置した。

(c) 板供試体

板供試体の形状と供試体水準を図-4および表-4に示す。

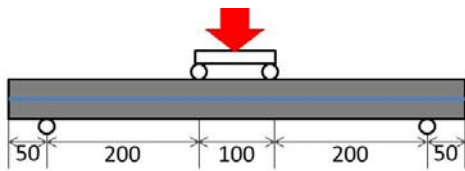


図-5 静的載荷試験

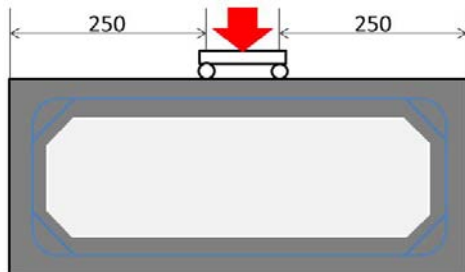


図-6 ブロック供試体静的体載荷試験

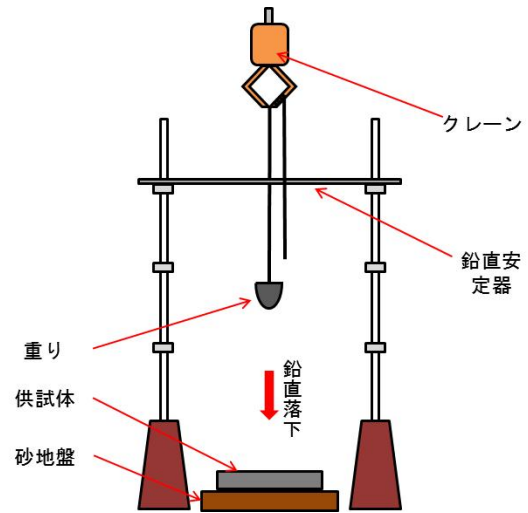


図-7 板供試体衝撃載荷試験

板供試体の寸法は、縦 300mm、横 300mm、厚さ 50mm とした。板供試体に使用する補強材は、鉄筋 D10 および繊維ネットの 2 種類とした。鉄筋の平面的な配置の影響を確認するため、図-4 に示すように、4 本あるいは 6 本の鉄筋を 100mm 間隔で断面高さの中央に配置した。繊維ネットは、板供試体上面および下面からそれぞれ 10mm の場所に配置した。板供試体の型枠底面に 300mm×300mm に切断した凹凸シートを貼り付け、コンクリートを打設し、供試体表面に凹凸を加工した。

2.4 実験方法

(1) 静的載荷試験

はり供試体およびブロック供試体には、静的載荷試験を行った。図-5、図-6 に示すように、載荷方法は 2 点載荷とし、荷重をロードセル、載荷供試体の変位を高感度変位計により計測して、変形性能を評価した。載荷試験時において、所定の荷重もしくは変位に達するごとに、除荷して残留ひずみを計測した。残留ひずみから、供試体の復元率を算出した。復元率の算出式を式 (1) に示す。

$$\delta_d = \frac{(\delta_1 - \delta_0)}{\delta_1} \times 100 \quad (1)$$

ここで、 δ_d は供試体の復元率(%), δ_0 は残留変位 (mm), δ_1 は除荷前の変位(mm)である。

各供試体に発生したひび割れは、目視により観察するとともにデジタルカメラを使用して撮影した。

(2) 衝撃載荷試験

図-7 に示すように、板供試体の衝撃載荷試験は、表乾状態の砂(高さ 100mm)の上に板供試体を設置し、重さ 5.6kg あるいは 10.3kg の鉄製重錘を所定の高さから落下させる方法で行った。砂は、足で踏み固め、衝撃試験終了後に、毎回表面を均して高さを一定とした。

5.6kg の重りを使用した試験においては、初期の落下高さを 100mm とした。その後、100mm ずつ落下高さを上げた。また各落下高さにおいて、衝撃を与える回数は、ひび割れが発生するまでは 1 回ずつとし、ひび割れ発生後においては、落下回数を 2 回ずつとした。一方、10.3kg の重りを使用した試験においては、初期落下高さを 200mm とし、その後、200mm ずつ落下高さを上げた。各落下高さにおいて、衝撃を与える回数は 1 回のみとした。各板状供試体における試験終了条件は、落下高さが 1000mm もしくは、ひび割れ幅が 0.2mm を超えた時点とした。

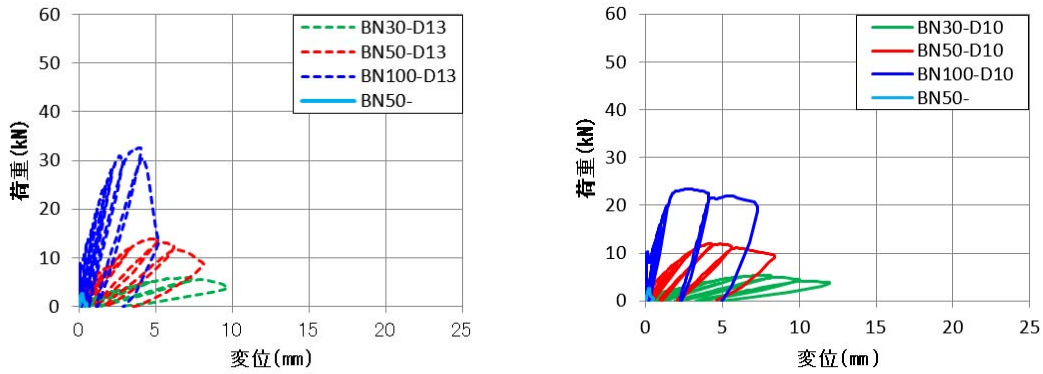
衝撃を受ける面とその反対側の面において、定点のひび割れ幅および最大のひび割れ幅の観測をデジタルカメラとマイクロスコープにより行った。

3. 実験結果

3.1 はり供試体の静的載荷試験

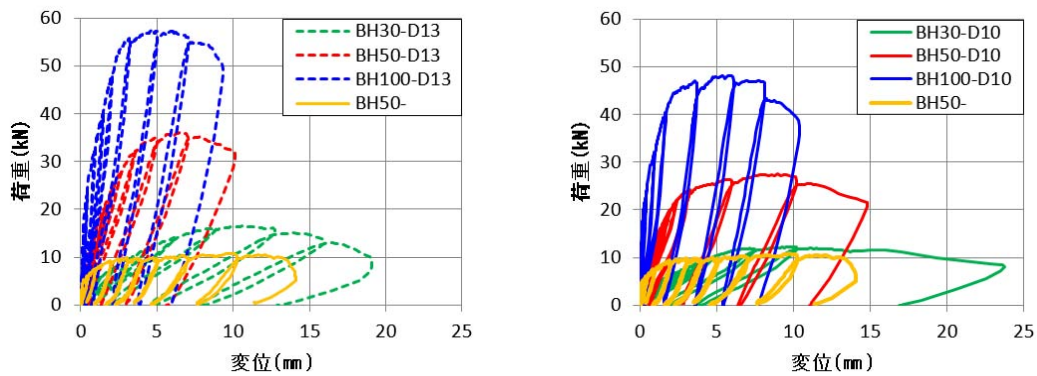
はり供試体における荷重-変位曲線を図-8 および図-9 に示す。HPFRCC により作製したはり供試体は、同寸法の NC 供試体よりも、耐荷力および変位が大きい値を示した。NC により作製した BN50-供試体は、2.5kN で破壊した。一方、鉄筋を配置せず HPFRCC により作製した BH50-供試体の耐荷力は 10kN 程度、変形性能は 14mm 程度となり、NC と D10 を用いた BN50-D10 供試体に比べ、同程度の耐荷力とより大きな変形性能を示した。この理由として、HPFRCC は材料強度が高く、また繊維の架橋効果によるひずみ硬化が、耐荷力および変形性能に影響したものと考えられる。

各はり供試体の復元率と変位の関係を図-10 に示す。HPFRCC および NC のいずれにおいても、部材の厚さが小さいほど、復元率が高くなる傾向を示した。これは、部材の厚さが小さくなると、大変形しても部材の上縁ならびに下縁のひずみが小さく、弾性的な挙動を示す部分の割合が



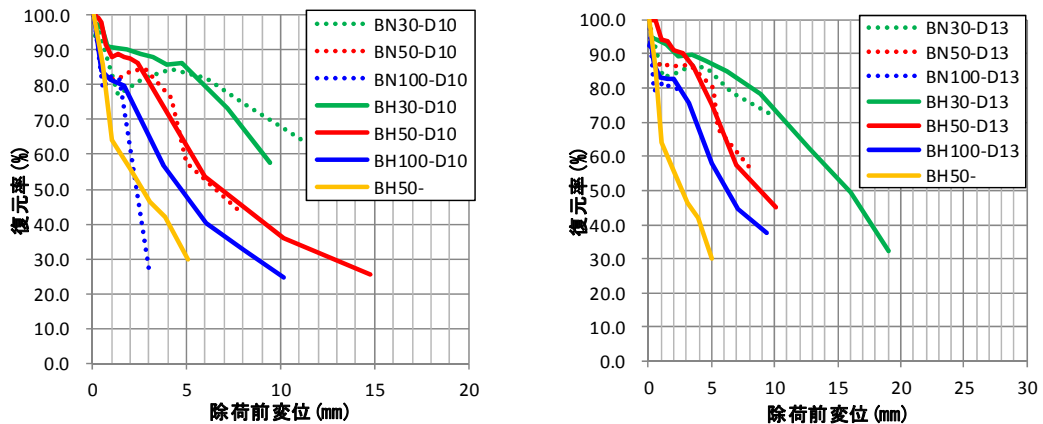
D13を使用した供試体 D10を使用した供試体

図-8 荷重-変位曲線 (NC 供試体)



D13を使用した供試体 D10を使用した供試体

図-9 荷重-変位曲線 (HPRC 供試体)



D10を使用した供試体 D13を使用した供試体

図-10 はり供試体の復元率

多く、復元率が高くなるためと考えられる。鉄筋を用いない BH50-供試体は、鉄筋を用いた BN50-D10 と同程度の耐荷力を示したが、鉄筋を用いた NC 供試体の方が復元率は高くなった。HPRC により作製したはり供試体は、鉄筋を用いない場合においても、NC と比較して、大きな変形性能が期待できる。さらに、HPRC と鉄筋と併用することで、復元性能を高めた部材が作製可能である。

3.2 ブロック供試体の静的荷重試験

ブロック供試体の荷重-変位関係図-11 に示す。いずれのブロック供試体においても、鉄筋を用いることで、鉄筋

を用いない場合よりも、最大荷重は高い値を示した。Block-NC 供試体では、初期ひび割れ発生後、荷重が低下し変位が増加した。一方、HPRC により作製した Block-HP 供試体では、ひび割れ発生後も荷重が低下することなく、鉄筋を用いた Block-NC-S 供試体と同程度の耐荷力を示した。Block-NC 供試体および Block-HP 供試体における載荷時のひび割れ状況を写真-3 に示す。Block-HP 供試体は、Block-NC 供試体と異なり、大変形レベルで、ひび割れの幅が小さく、かつ複数発生していた。

ブロック供試体における変位と復元率の関係を図-12 に

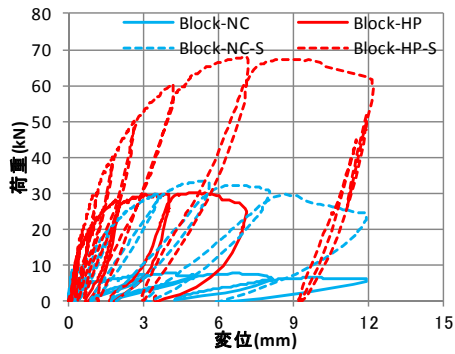


図-11 ブロック供試体の荷重-変位関係

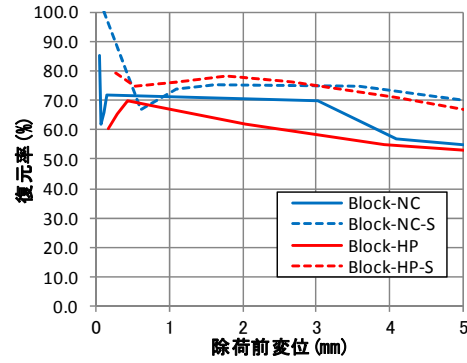


図-12 ブロック供試体の復元率

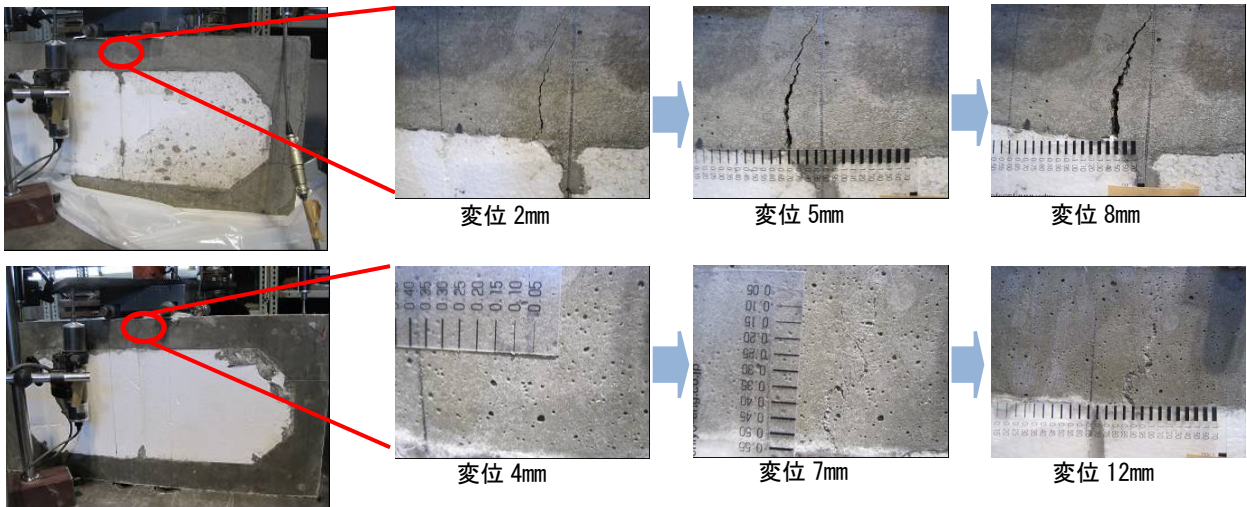


写真-3 ブロック供試体のひび割れ状況 (上: Block-NC 下: Block-HP)

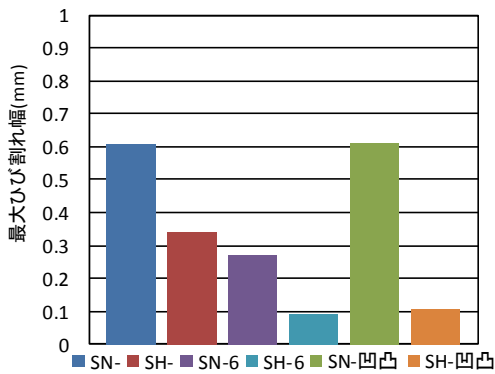


図-13 板供試体の最大ひび割れ幅 (5.6kg)

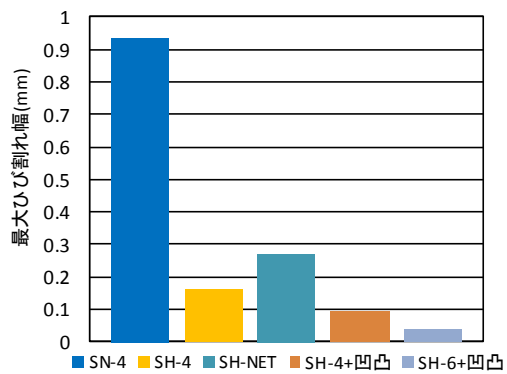


図-14 板供試体の最大ひび割れ幅 (10.3kg)

示す。鉄筋を用いた Block-NC-S および Block-HP-S 供試体では、鉄筋を用いない Block-NC, Block-HP 供試体と比較して、復元率は大きい値を示した。いずれのブロック供試体においても、復元率は 50~70%と高い値を示したが、この理由として、発泡スチロールがバネ状に寄与したと考えられる²⁾。ブロック供試体の性能については、荷重-変位曲線の形状、復元性能、ひび割れ幅等をもとに、目的に応じて評価する必要があると考える。

3.3 板供試体の衝撃載荷試験

板供試体における衝撃試験後の最大ひび割れ幅のグラフを図-13、図-14に示す。5.6kgの重りを用いた実験で、SN-供試体の最大ひび割れ幅は0.6mm程度であったが、SH-供試体の最大ひび割れ幅は、0.3mm程度であり、SN-供試体の半分の値であった。これは、HPFRCCにより作製した供試体は、繊維の架橋効果が、ひび割れ開口の抑制に寄与したと考えられる。また、SN-6 供試体の最大ひび割れ幅は、0.3mm以下であり、鉄筋を用いることで衝撃試験後の最大



写真-4 SN-凹凸供試体の表面



写真-5 SH-凹凸供試体の表面

ひび割れ幅が小さくなる傾向を確認した。HPFRCCにより作製した供試体にも、同様の傾向が確認できた。表面加工したSN-凹凸供試体では、SN-供試体と比較して、最大ひび割れ幅に差は確認できなかった。しかし、SH-凹凸供試体においては、SH-供試体と比較して、最大ひび割れ幅は半分以下となり、表面加工の効果を確認した。SN-凹凸供試体およびSH-凹凸供試体における表面の凹凸部分を写真-4、写真-5に示す。衝撃試験を繰り返し行うことで、SN-凹凸供試体の表面の凸部が潰れて無くなったのに対し、SH-凹凸供試体では凸部が残っていた。NCで作製した凹凸部分と比較して、HPFRCCで作製した凹凸部分は、PE短繊維の補強効果により、粘り強く、衝撃を吸収する効果が持続したと考えられる。

10.3kgの重りを用いて実験を行った供試体のグラフより、最大ひび割れ幅はSH-4、SH-4+凹凸、SH-6+凹凸供試体の順に小さくなる傾向を確認した。また、SH-NET供試体は、鉄筋を用いた供試体と比較してひび割れ幅が0.28mmと大きい値を示した。しかし、5.6kgの重りを使用したSH-供試体と比較すると、SH-NET供試体のひび割れ幅が小さいため、繊維ネットによるひび割れ幅の抑制効果はあるものと考えられる。

SN-4供試体の表面部分を写真-6に示す。SN-4供試体では、衝撃試験後において、剥離が発生していることを確認した。HPFRCCにより作製した板供試体においては、微細なひび割れが複数発生したが、SN-4供試体のような衝撃試験後の剥離は見られなかった。

4. おわりに

本研究では、コンクリート部材の静的変形性能、復元性能、および耐衝撃性能について、3種類の供試体を作製して検討を行った。以下の結果が得られた。

- (1) はり供試体において、部材厚さが小さいと、変形性能および復元性能は高くなった。
- (2) HPFRCCと鉄筋を併用することで、その性能はより高く



写真-6 衝撃試験後の剥離

なった。

- (3) HPFRCC板供試体では、NC供試体と比較して、衝撃試験後のひび割れ幅が半分程度まで抑制された。
- (4) 補強材として鉄筋や繊維ネット、表面の凹凸加工を併用することで、さらなるひび割れ幅の抑制が可能であった。
- (5) HPFRCCで作製した表面凹凸部分は、PE短繊維の補強効果により、粘り強く、衝撃を吸収する効果が持続したと考えられる。

謝辞

本研究は、韓国との二国間交流事業として、日本学術振興会からの支援を受けて実地したものである。韓国忠南大学の学生、YANG Hae-Jun氏ならびにJANG Seok-Jun氏には、岐阜大学で実地した実験に協力していただいた。羽田野英明氏（中日本建設コンサルタント株式会社）ならびに松山高広氏（株）安部日鋼工業）には、アドバイスをいただいた。お礼申し上げる次第である。

参考文献

- 1) 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，No.127，pp.1-4，2007.3
- 2) 羽田野英明，山上正遵，阪口裕紀，小林孝一，六郷恵哲；大変形空間創成ブロックを用いた橋梁の地震時桁遊間の確保，土木学会論文集E，Vol.66，No.4，2010.11