

## 論文 高靱性セメント複合材料を用いた低鉄筋はりの曲げ破壊性状

Ahmed Kamal<sup>\*1</sup>・国枝 稔<sup>\*2</sup>・上田 尚史<sup>\*3</sup>・中村 光<sup>\*4</sup>

**要旨**：ひずみ硬化型高靱性セメント系複合材料（SHCC）を鉄筋等で補強する適用事例が提案される中、SHCCが引張力を分担できるメリットを活かし、鉄筋量を減らした部材での利用が期待される。本研究では、引張強度が約3MPa、終局時ひずみが約1%のSHCCを用い、鉄筋比が0.08~0.8%程度のはりを対象とし、曲げ破壊を確認するとともに、SHCCの最小鉄筋比について考察する。最大荷重および変形能の観点から、0.13%~0.2%程度の補強材を配置することで、安定した曲げ破壊性状が得られることが明らかとなった。

**キーワード**：ひずみ硬化型セメント系材料, SHCC, 低鉄筋比, 曲げ破壊, 最小鉄筋比

## 1. はじめに

曲げを受ける鉄筋コンクリートはり（以下、RCはり）における補強筋量は、耐荷力および変形性能を含めて、RCはりの破壊挙動を制御するための最も重要な項目の一つである。例えば、普通コンクリートに関しては、様々な鉄筋比における曲げ破壊性状が実験的に確認されており<sup>1-3)</sup>、土木学会コンクリート標準示方書構造性能照査編においても、曲げを受ける部材に関して、構造細目として0.2%以上の補強筋量を確保することを原則としている。

引張力を受けると微細な複数ひび割れを生じ、かつ擬似ひずみ効果挙動を呈するひずみ硬化型セメント系複合材料（Strain Hardening Cementitious Composites, 以下、SHCC）について、性能評価手法、構造利用の可能性に関する様々な検討が行われている。それ自身で、引張力を負担し、かつ数パーセントの引張ひずみを生じるため、鉄筋等の補強材を併用しない適用事例も数多くあるが、一方で補強材を併用した適用の可能性も模索されている。SHCCが引張力を分担できるメリットを活かし、より補強材量が少ない部材での構造利用が期待される。しか

し、曲げを受けるSHCC部材に対して、特に、鉄筋量が少ない場合の破壊性状、および安定した破壊のための最小補強筋量については明らかにされていない。ここでは、鉄筋比の小さいSHCCはりの曲げ破壊挙動の確認、および鉄筋で補強されたSHCCはりに関する最小鉄筋比について考察する。

## 2. 実験概要

## 2.1 使用材料

使用したSHCCは、閑田らによって使用されているEngineered Cementitious Composites(ECC)とし、水セメント比46%で、PVA繊維を体積比で2.0%混入した配合である<sup>4)</sup>。表-1に、使用したSHCCの配合を示す。

材齢50日での圧縮強度は49.9MPa、弾性係数は18.6GPaであった。また、試験区間の断面が30mm×30mmのダンベル型供試体による引張試験結果を図-1に示す。引張強度および引張強度時のひずみは、それぞれ3.5MPaと0.5%~1%（検長：100mm）の範囲内であった。

## 2.2 供試体の種類

曲げ試験には、鉄筋比の異なる6種類の寸法の

\*1 名古屋大学 大学院工学研究科社会基盤工学専攻（正会員）

\*2 名古屋大学 大学院工学研究科社会基盤工学専攻助教授 博士(工学)（正会員）

\*3 名古屋大学 大学院工学研究科社会基盤工学専攻研究員 修士(工学)（正会員）

\*4 名古屋大学 大学院工学研究科社会基盤工学専攻教授 博士(工学)（正会員）

表－1 使用した SHCC の配合<sup>4)</sup>

水結合材比 W/B	単位水量 (kg/m <sup>3</sup> )	砂結合材比 S/B	収縮低減材 (kg/m <sup>3</sup> )	繊維混入量 (%)	目標空気量 (%)
0.46	364	0.64	15	2.0	10

表－2 供試体概要

供試体幅 (mm)	50	100	200	300	400	500
供試体高さ (mm)	180					
供試体長さ (mm)	1700					
鉄筋の種類と本数	D10, 1本					
鉄筋比 (%)	0.81	0.40	0.20	0.13	0.10	0.08
供試体数 (体)	無筋:2 有筋:2	無筋:2 有筋:2	無筋:2 有筋:2	無筋:2 有筋:2	無筋:2 有筋:2	無筋:2 有筋:2

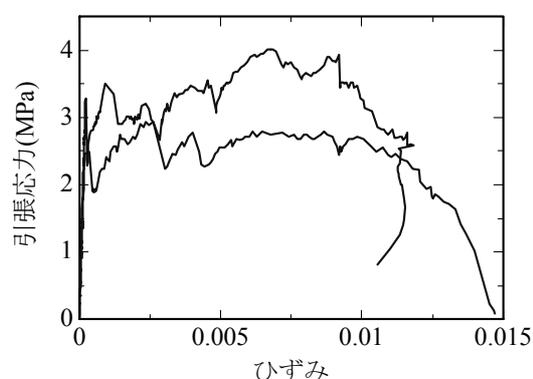
はり供試体を用いた。表－2に、供試体寸法、鉄筋比、供試体数の一覧を示す。供試体の高さおよび長さを、それぞれ180mm（有効高さ150mm）および1700mmの一定とした。供試体の断面積を変化させるため、表－2に示すように、供試体幅のみ、6種類に変化させた。各ケースに関して4体の試験を行い、2体は有筋、2体は無筋とした（以下、それぞれ有筋供試体、無筋供試体）。有筋供試体は、D10鉄筋（SD295A）で補強した。使用した鉄筋の降伏強度および引張強度は、それぞれ360MPaおよび510MPa、弾性係数は200GPaである。なお、モーメントスパン内の鉄筋に、50mm間隔で計11枚のひずみゲージ（ゲージ長2mm）を貼付した（図－3参照）。

載荷試験は、材齢42日～44日の間に実施した。支間長1500mmの三等分点曲げ載荷とし、載荷点の変位と荷重を測定した。有筋供試体の計測は、載荷点の変位が50mmを超えた時点で終了した。

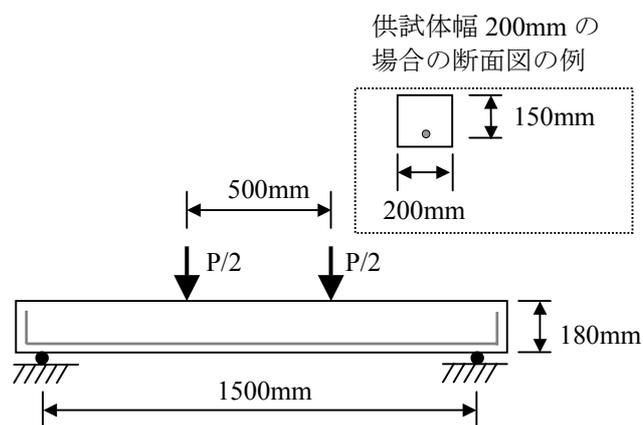
### 3. 実験結果

#### 3.1 無筋供試体

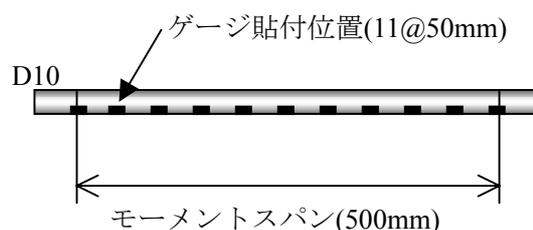
無筋供試体の荷重－載荷点変位の関係を図－4に、初期ひび割れ発生応力および曲げ強度を表－3に示す。すべての供試体において、ひずみ硬化挙動および多数の微細ひび割れが確認さ



図－1 使用した SHCC の応力－ひずみ曲線



図－2 載荷試験概要



図－3 鉄筋ひずみ計測位置

表-3 無筋供試体の初期ひび割れ発生応力および曲げ強度

供試体幅	50	100	200	300	400	500
初期ひび割れ発生応力 (MPa)	4.2	4.0	4.3	4.6	4.4	4.8
曲げ強度 (MPa)	8.0	7.2	8.2	8.7	6.9	7.4

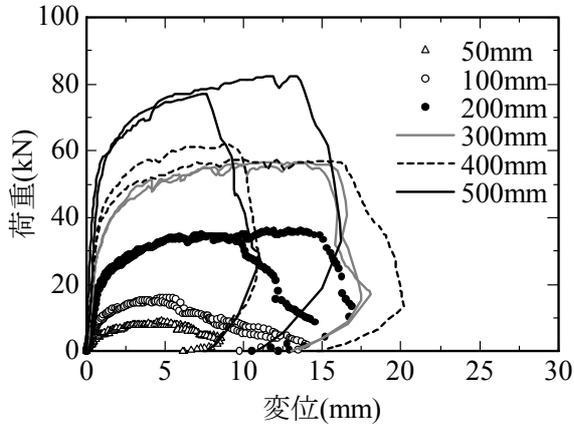


図-4 無筋供試体の荷重-変位曲線

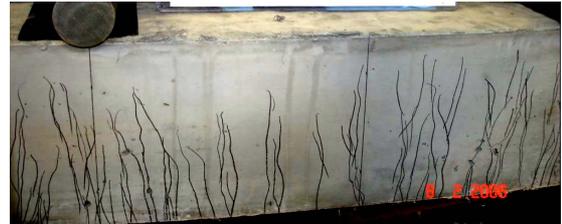


写真-1 無筋供試体のひび割れ性状 (幅 100mm)

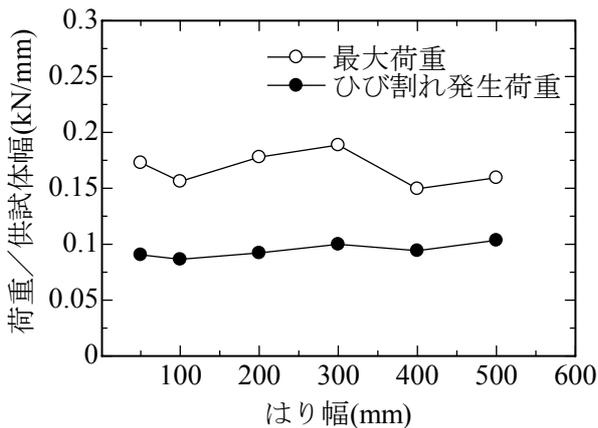


図-5 無筋供試体の正規化荷重

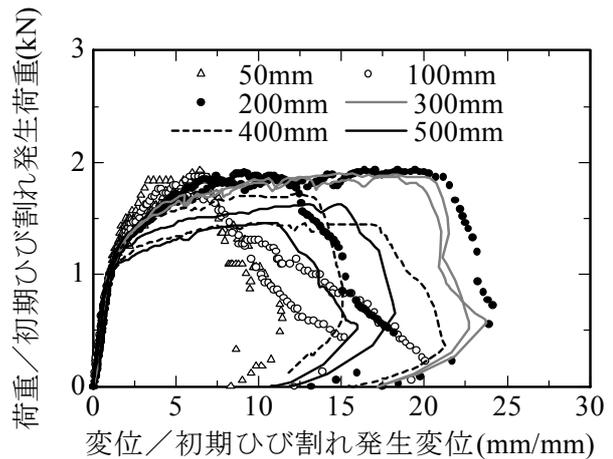


図-6 無筋供試体の正規化荷重-変位関係

れた (写真-1 参照)。

図-5に、各供試体の幅によって正規化した初期ひび割れおよび最大荷重の結果を示す。初期ひび割れ発生荷重と最大荷重に関して、供試体の幅に対する強度の寸法効果は、本研究においては明確ではなかった。図-6に、初期ひび割れ発生荷重およびその時の変位で正規化した荷重-変位関係を示す。これによると、供試体幅 50mm から 300mm までの供試体では、ひび割れ発生荷重の 2 倍程度までひずみ硬化がみられるのに対し、供試体幅 400mm および 500mm では、1.5 倍程度までとなっており、ひび割れ発生

荷重と最大荷重の関係においては、供試体寸法の強度に対する影響がわずかにみられる結果であった。

最大荷重時の変位に関しては、供試体幅 50mm および 100mm の場合の値が、5mm 程度であり、その他のケースに比べてやや小さく、写真-2 に示すように、供試体内に発生したひび割れも、局所化していることが確認された。この点についての詳細な考察は、次章にて行う。

### 3.2 有筋供試体

有筋供試体の荷重-変位関係を図-7に示す。有筋供試体の幅が比較的大きい場合には、最大荷重

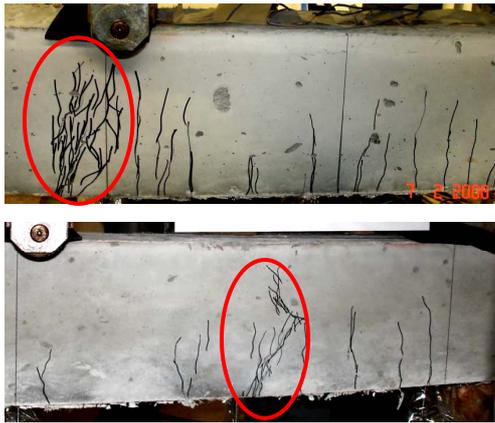


写真-2 ひび割れ図 (上: 幅 100mm, 下: 幅 50mm)

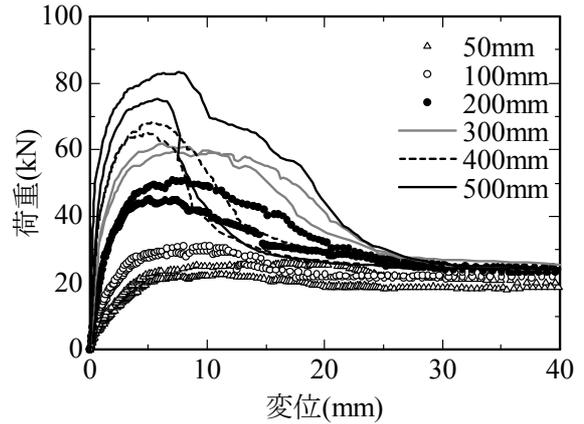


図-7 有筋供試体の荷重-変位曲線

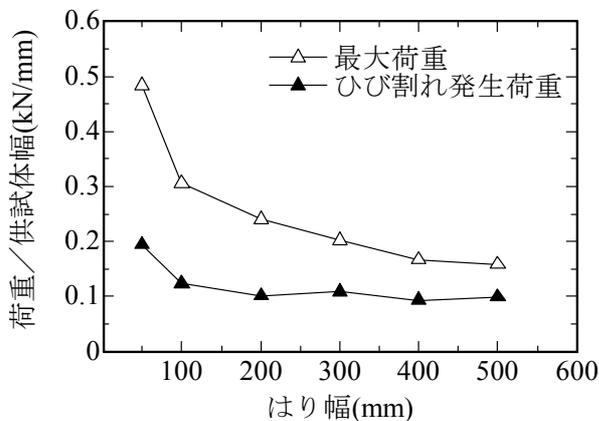


図-8 有筋供試体の正規化荷重

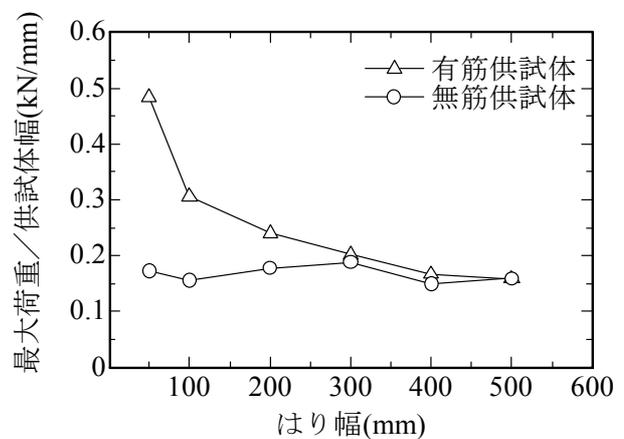


図-9 正規化した最大荷重の比較

以降に、急激な荷重の低下が生じる供試体も確認された。さらに、供試体幅 500mm の場合、供試体 2 体のうちの 1 体は、載荷試験の途中 (変位約 50mm) で鉄筋が破断した。有筋供試体の場合においても、多数の微細ひび割れが確認できた。図-8 に、供試体の幅によって正規化した初期ひび割れ発生荷重および最大荷重を示す。供試体幅が小さくなるほど、正規化した最大荷重および初期ひび割れ発生荷重が増加し、補強筋の効果が確認できる。

#### 4. 曲げが作用する SHCC はりの最小鉄筋比に関する考察

##### 4.1 荷重の観点

図-9 は、有筋および無筋供試体の正規化最大荷重の比較を示すものである。鉄筋比が比較

的小さい場合 (幅 300mm : 0.13%, 幅 400mm : 0.10%, 幅 500mm : 0.08%), 鉄筋の有無によるはり供試体の耐荷力の相違は 10%以内であった。耐荷力に関しては、有筋供試体の最大荷重を無筋供試体の最大荷重よりも明らかに大きくする必要がある場合、本実験の範囲内では、鉄筋比を 0.13%よりも大きくする必要がある。

図-10 に、最大荷重およびその時の変位で各荷重-変位曲線を正規化したものを示す。これによると、最大荷重を呈した後、SHCC のひび割れが局所化することで、引張応力の負担分が減少し、鉄筋量に依存した荷重レベルで変形が進行していく。その際の荷重の大きさは、鉄筋比 0.2% (幅 200mm) で最大荷重時の 50%, 鉄筋比 0.08% (幅 500mm) で 30%程度まで低下する。例えば、最大荷重以降も 50%までの耐力低下を

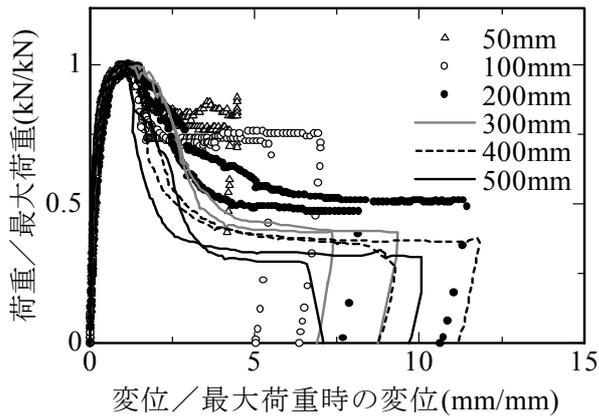


図-10 正規化した荷重-変位曲線 (有筋供試体)

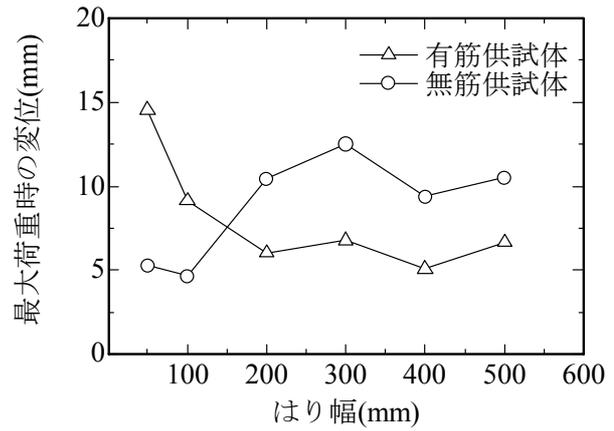
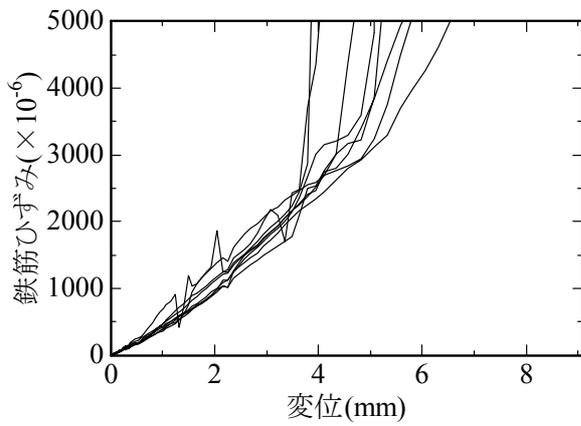
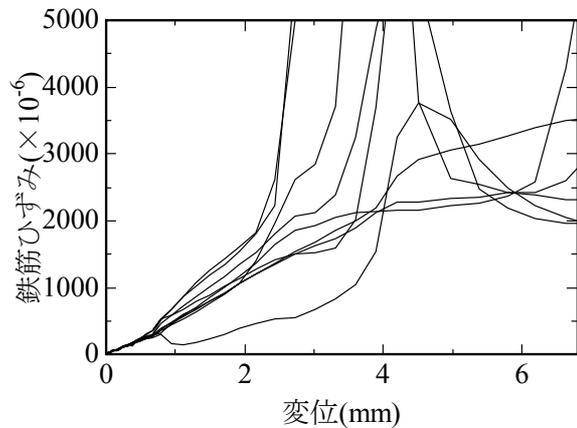


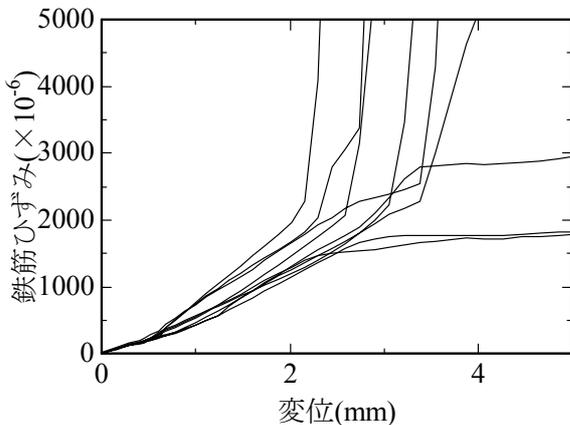
図-11 最大荷重時の変位の比較



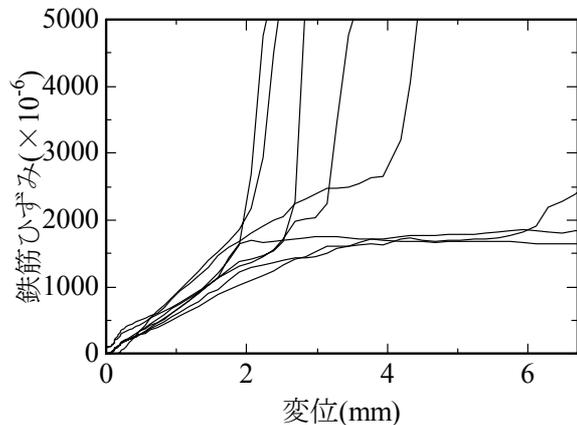
(a) 供試体幅 100mm(鉄筋比 : 0.4%)



(b) 供試体幅 300mm(鉄筋比 : 0.13%)



(c) 供試体幅 400mm(鉄筋比 : 0.1%)



(d) 供試体幅 500mm(鉄筋比 : 0.08%)

図-12 鉄筋ひずみの計測結果

安定した破壊と想定した場合、鉄筋比を 0.2% よりも大きくする必要がある。

#### 4.2 変形能の観点

終局時の変形性能に関して、最大荷重における有筋供試体の変位を無筋供試体と比較した結果を図-11 に示す。最大荷重における鉄筋供試

体の変位は、供試体の幅が大きいほど、すなわち鉄筋比が小さいほど減少した。本実験の範囲内では、無筋の変形性能と同様の変形性能を得るためには、鉄筋比が 0.2% (幅 : 200 mm) を上回っている必要がある。ひび割れ部の鉄筋が降伏するプロセスにおいて、複数あるひび割れ部

のうちの 1 箇所の鉄筋が降伏すると仮定する。鉄筋比が小さい場合には、ひび割れをまたぐ鉄筋のひずみが大きくなり、SHCC のひび割れ幅の開口を加速すると思われる。一方、その他の部分の鉄筋は SHCC により十分に補強されているため、先に降伏した部分の変形がますます大きくなるとともに、SHCC のひび割れ幅も増大し、局部破壊が生じるというメカニズムが考えられる。なお、鉄筋量が小さいほど、この現象が顕在化したものと思われる。このようなメカニズムに関しては、従来の鋼繊維補強コンクリートはり（繊維長 30mm、繊維混入量 2%）においても、繊維の混入によって、破壊の局所化が生じやすくなる可能性が指摘されている<sup>5)</sup>。

図-12 に、鉄筋に貼付したひずみゲージのうち、載荷点直下にて計測した 2 点を除く計 9 点の結果について、鉄筋ひずみと載荷点変位の関係として示す。なお、これらの図では、各供試体の最大荷重時の変位を横軸の最大値として示している。供試体幅 100mm および 300mm の場合には、モーメントスパン内の鉄筋ひずみは急激に増加し、ほぼすべてのゲージ位置にて鉄筋が降伏していることを示しているが、最大荷重時の変位が小さかった供試体幅 400mm および 500mm の場合には、一部に降伏していない箇所が認められた。

## 5. 結論

引張強度が約 3MPa、終局時ひずみが約 1%の SHCC を用いた低鉄筋はりの曲げ試験により得られた知見を以下にまとめる。

- (1) 無筋供試体の初期ひび割れ発生荷重と最大荷重に関して、供試体の幅の寸法がこれらの強度に及ぼす影響は確認されなかった。
- (2) 鉄筋比が小さい SHCC はりでは、最大荷重以降、荷重が急激に低下する傾向にあった。
- (3) 鉄筋比が比較的小さい場合 (0.13%, 0.10%, 0.08%), 鉄筋の有無によるはり供試体の耐荷力の相違は 10%以内である。耐荷力に関して、

有筋供試体の最大荷重を無筋供試体のそれよりも大きくする必要がある場合、本研究では鉄筋比を 0.13%より大きくする必要がある。

- (4) 有筋供試体について、最大荷重時に生じる変位は、鉄筋比が小さいほど減少した。最大荷重時に生じる変位について、無筋供試体と同程度の値を得るためには、鉄筋比を 0.2%より大きくする必要がある。

## 謝辞

本実験は、土木学会「複数微細ひび割れ型繊維セメント複合材料の指針作成小委員会（六郷恵哲委員長）」から支援いただいた。また、鹿島建設 関田徹志氏および港湾空港技術研究所 岩波光保氏に多大なるご協力をいただいた。ここに記して謝意を表す。

## 参考文献

- 1) 島弘, 二羽淳一郎, 岡村甫: 曲げを受ける低鉄筋比はりにおける脆性破壊の防止に関する検討, 土木学会論文集, 378/V-6, pp.231-237, 1987
- 2) 池田尚治, 山口隆裕, 後藤康之: 鉄筋比の小さい鉄筋コンクリートはりの曲げ挙動に関する研究, コンクリート工学論文集, Vol.1, No.1, pp.51-59, 1990
- 3) 瀬古繁喜, 内田裕市, 六郷恵哲, 小柳洽: 鉄筋比が小さい RC はりの曲げ破壊性状, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.13, No.2, pp.255-258, 1991
- 4) 関田徹志ほか: 曲げ試験を用いた高靱性複合材料 ECC の引張力学性能管理に関する実験的検討, 鹿島技術研究所年報, 第 52 号, pp.131-132, 2004
- 5) Uchida, Y. and Ozawa, M.: Tension Stiffening Effect in RC Beams with Steel Fiber, Modeling of Inelastic Behavior of RC Structures under Seismic Loads, Committee Report, ASCE, pp.521-535, 2001