

論文 超軽量・薄肉プレキャスト部材に関する基礎的研究

萩尾浩也*1・一瀬賢一*2・木村耕三*3

要旨:近年コンクリート構造物のプレキャスト部材は、搬送・揚重・設置を考えると、軽量化が求められている。本研究では、軽量細骨材を用い比重約1.5以下で、ビニロン繊維を混入し曲げ靱性を有した軽量コンクリートの開発を行い、そのコンクリートの基礎的特性を実験的に把握し、曲げ耐力の算出方法を検討した。軽量で高ひび割れ強度を有するプレキャスト部材を実現するために、超軽量コンクリートとプレストレスとの組み合わせを行い、曲げ試験によりその曲げ性能を把握した。この結果、超軽量・薄肉プレキャスト(PCa)部材の製造が可能であることが確認された。

キーワード: 軽量コンクリート, 短繊維, ひび割れ強度, プレキャスト, プレストレス

1. はじめに

コンクリート構造物でのプレキャスト化は、現場での作業の平準化に役立っているものの、現場への搬入、揚重、および配置などの作業性から軽量化が次のステップとして求められている¹⁾。また近年コンクリート自体にも靱性が要求されるようになってきている例もある²⁾。本研究では、その両方の性能を満たすべく軽量骨材を用いコンクリートの比重約1.5以下で、ビニロン繊維を混入し曲げ靱性を有した軽量コンクリートを開発し、その圧縮特性、曲げ特性、および乾燥収縮特性の基礎的特性を調べるとともに、RC梁の曲げ試験を行い、曲げ性状を把握し、曲げ耐力の算定方法を検討した。更に高いひび割れ強度を要求されるような部材にも対応できるように、軽量コンクリートとプレストレスとの組み合わせによる曲げ試験を行い、曲げ性状について検討した。更にビニロン繊維混入コンクリートの曲げひび割れ強度については、混入するビニロン繊維の長さによっては、小さい試験体の方が高くであることが予想されるため、本試験を通じて、曲げひび割れ強度のスケール効果についても検討した。

2. 曲げ試験の概要

2.1 使用材料

使用した材料は、早強ポルトランドセメント、砂、写真-1に示す軽量骨材、写真-2に示す長さ6mmのビニロン繊維である。コンクリートに混入した混和剤は、収縮低減剤、高性能AE剤および増粘材である。軽量骨材は中空微小球のセラミックフィラーを使用した。鉄筋は表-1に示す材料特性のSD345のD13を使用した。緊張材は写真-3に示す軽量、高強度、高耐食性、非磁性の特徴を有するアラミドロッド(以下、AFRPロッドと略す)を用いた。AFRPロッドは、直径12 μ の連続繊維を樹脂で集束させたもので、繊維含有率Vfは約65%である。また外周にはコンクリートとの付着を良くするために、アラミド繊維を螺旋状に巻き付けて表面に凹凸をつけている。AFRPロッドの材料特性を表-1に示す。緊張材としてよく使用される鋼製ストランドではなくAFRPロッドを使用した理由は、比強度が高いこと(補強筋の断面積が小さい)、またカーテンウォールなど雨風にさらされる部材では、仮にひび割れから雨水が侵入しても補強筋が錆びる心配がないという利点(耐食性)を活用するためである。

*1 (株)大林組 技術研究所 建築構造研究室 研究員(工修)

*2 (株)大林組 技術研究所 建築材料研究室 主任研究員(工修)

*3 (株)大林組 技術研究所 建築構造研究室 主席研究員(工博)

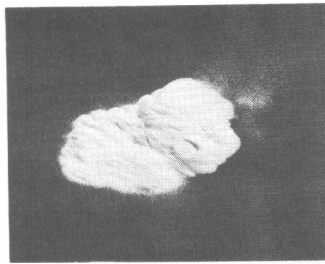


写真-1 軽量骨材

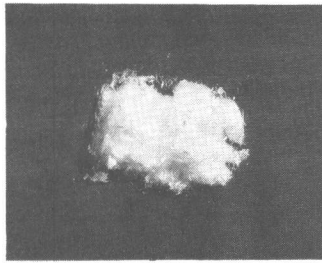


写真-2 ビニロン繊維

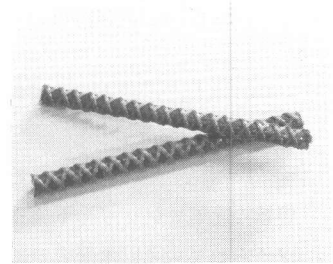


写真-3 AFRP ロッド

表-1 鉄筋とAFRPロッドの材料特性一覧

	公称直径 mm	公称断面積 mm ²	ヤング係数 kN/mm ²	降伏応力 N/mm ²	降伏ひずみ 10 ⁻⁶	引張強度 N/mm ²	単位重量 g/m
鉄筋	13	127	192	339	1820	512	560
AFRPロッド*1	15	178	53.0	—	—	1150	171

*1: カタログ値

2.2 コンクリート

コンクリートの調合は水セメント比を40%とした。曲げ試験時の100φ×200mmのコンクリートの圧縮試験、割裂試験の結果を表-2に示す。本コンクリートの最大耐力時のひずみは、普通コンクリートの最大強度時の約倍の5700×10⁻⁶であった。

2.3 試験体

試験体の形状および一覧を図-1および表-3に示す。試験体は小型試験体と構造試験体の大きく2種類から構成されている。小型試験体の寸法は材料試験によく使われるM16のスパンを基準とし、そのスパンが3倍となるようにM40, M100の大きさを決定した。構造試験体は、リブ付きカーテンウォールのリブ部分を想定した形状とし、主筋をD13とするRC試験体1体とプレストレスを導入した試験体(以下、PS試験体と呼ぶ)が2体である。PS試験体は、プレストレス量を1.5および3.0N/mm²(緊張力が41および90kN)に設定してプレテンションで製作した。パラメータは、試験体長さとしてプレストレスの有無および大きさとした。配筋は小型試験体は無筋とし、D13, AF2およびAF3は主筋または緊張材を断面中央に配したのみでせん断補強筋はない。曲げ試験時のプレストレス量は、導入直前の緊張力(35および72kN)から判断して、1.3および2.6N/mm²とした。コンクリートおよび鉄筋のひずみは図-1に示す位置のストレインゲージによった。

表-2 曲げ試験時のコンクリートの物性

	圧縮強度 N/mm ²	ヤング係数 kN/mm ²	割裂強度 N/mm ²	最大強度時のひずみ
No.1	51.1	13.1	3.5	5780
No.2	51.8	13.3	3.2	5860
No.3	50.0	12.8	3.8	5510
平均	51.0	13.0	3.5	5720

表-3 試験体一覧

	試験体名称	幅 (cm)	せい (cm)	長さ (cm)	PS量 (N/mm ²)	試験方法
小型	M16-1, 2, 3	4	4	16	—	a
	M40-1, 2, 3	10	10	40	—	b
	M100-1, 2, 3	10	10	100	—	c
構造	D13	14	20	220	—	d
	AF2	14	20	220	1.5	d
	AF3	14	21	220	3	d

試験方法は、図-1参照

3. 加力方法

各試験体の加力方法は、図-1に示す通り単純支持による中央一点集中荷重とした。M16, M40およびM100は単調増加とし、他のD13とPS試験体は一方方向漸増繰り返し荷重とした。変形は図-1に示すように加力位置と支持位置を測定した。また、D13とPS試験体は、曲げひび割れ発生後にクラックゲージを取り付け、ひび割れ幅も計測した。

4. 実験結果

4.1 小型試験体

(1) 乾燥収縮率

曲げ試験体の製作時に、採取した試験体(40mm×40mm×160mm)を用いて乾燥収縮率を計測した。乾燥収縮率は、JIS A 1129のモルタル及びコ

コンクリートの長さ変化方法に準じて、コンタクトストレーンゲージによって計測した。その試験結果を図-2に示す。図中には、同じ材料を使用してW/Cのみを45%とした結果も比較のためにあわせて示している。この結果から、本調査によるコンクリートの乾燥収縮率はW/C=45%の約半分、JASS 5³⁾に示されている 9×10^{-4} を十分に満足する結果が得られた。

(2) 曲げ試験結果

小型試験体の曲げ試験は、3章で述べた通り中央一点集中荷重により行った。その結果一覧を表-4に、M40-1,2,3およびM100-1,2,3の荷重と変位の関係を図-3に示す。表-4中のひび割れ時の応力は単純に最大モーメントを断面係数で除したものとし、参考までに最大耐力時と同じ手法での応力を掲載した。図-3中の○印はひび割れ発生した荷重である。これらの図より初期剛性は、M40-3を除き弾性計算による計算値とほぼ近似していた。

このM40-3は、試験の前の段階で加力点のやや支持点寄りに初期ひび割れがあり、剛性が低かったものと推察される。また、初期ひび割れの存在により断面欠損が部分的にあったために、耐力も低かったと推察される。M100-1は初期ひび割れはなかったものの、曲げひび割れが早期に加力点よりやや支持点寄りで発生した。よってその部分は他の断面より相対的に弱かったと思われる。その脆弱部が全体変形に影響を及ぼし、他のM100-2,3と比較すると曲げ靱性が少なかったと考えられる。また比較のために図-3に他の軽量コンクリートの試験結果を記載した。これにより、ビニロン繊維混入軽量コンクリートは繊維が効果的に作用しており、ひび割れの発生が分かりにくく、発生しても普通コンクリートと異なり明確な剛性変化がないこと、更に大きな引張靱性があることが分かった。

4.2 構造試験体

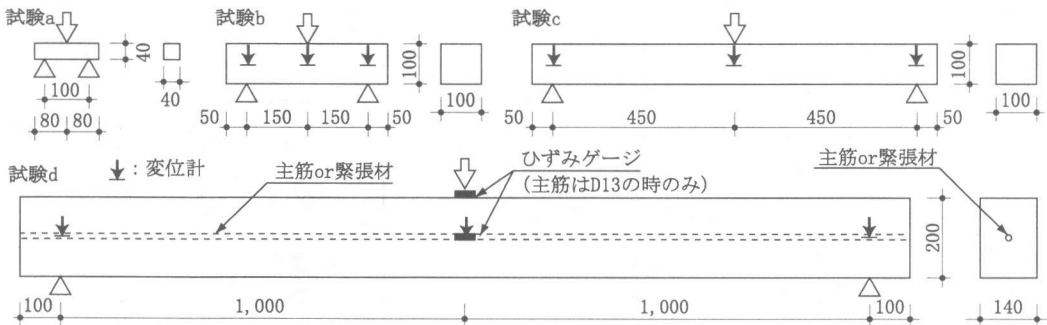


図-1 各試験体の加力図

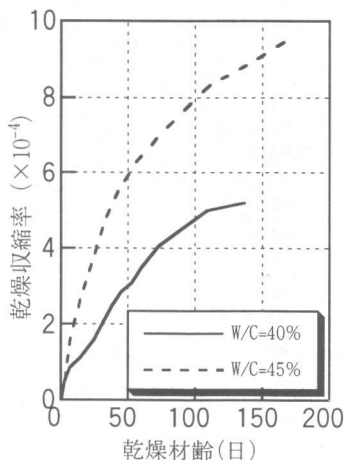


図-2 コンクリートの乾燥収縮率

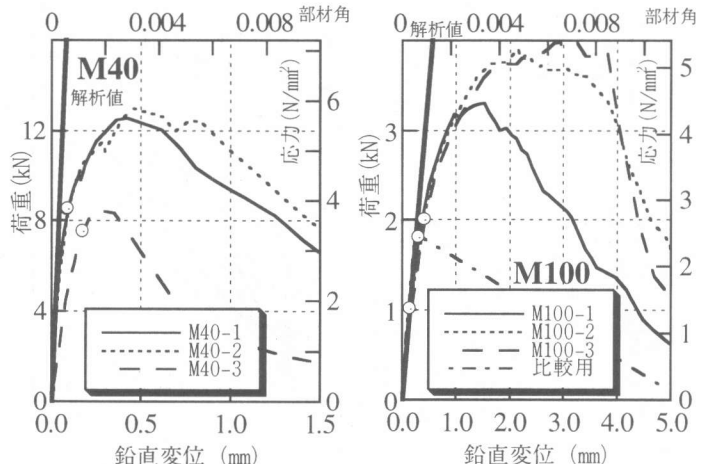


図-3 荷重と変位の関係(M40とM100)

(1) 破壊性状

構造試験体の曲げ試験も、3章で述べた通り中央一点集中荷重により行った。その結果一覧を表-4に、構造試験体のD13、AF2およびAF3の荷重と変位関係および各最終破壊状況を図-4および図-5に示す。図-5中の○および●印はひび割れ発生および主筋の降伏荷重を示している。表-4に示すようにAF2およびAF3試験体の曲げひび割れの発生荷重は、D13試験体よりも、1.1および2.4N/mm²大きい荷重となっており、ほぼ導入したプレストレスの効果を発揮していることが分かった。構造試験体の初期剛性も弾性計算による計算値とほぼ近似しており、プレストレスの有無および大きさに影響されないことが分かった。またD13試験体では、荷重の増加とともにひび割れが進展し、部材角約1/100時にひび割れ幅が大きくなるとともに鉄筋のひずみも大きく増加し、荷重低下を起した。しかしその後は安定した曲げ性状を示した。この荷重の低下は、今まで繊維の性能を有効に発揮して引張力を負担していたコンクリートのひび割れが開くことにより、引張力を解放したために生じたものと考えられる。AF2の破壊性状は、ひび割れ発生後も大きな剛性変化はなく荷重は増加し続け部材角約1/100の時にひび割れが大きく進行すると明らかな剛性変化が生じた。そして緩やかな耐力上昇を続け最終的にコンクリートの圧壊と同時にせん断ひび割れが大きく開口することに

よって破壊した。AF3も同様の傾向にあった。

(2) ひび割れ幅

D13、AF2およびAF3の荷重とひび割れ幅の関係を図-6に示す。PS試験体は、ひび割れ発生後も1/200までは荷重を除荷すると、ほとんどひび割れは閉じ、除荷時には観察では分かりにくい状況になるほどであるが、D13試験体は除荷後もひび割

表-4 曲げ試験結果一覧

	初期剛性		初期ひび割れ		最大耐力		破壊形式
	実験 kN/mm	解析 kN/mm	荷重 kN	応力 N/mm ²	荷重 kN	応力 N/mm ²	
M16-1	—	—	—	—	3.5	8.2	FT
M16-2	—	—	—	—	3.7	8.7	FT
M16-3	—	—	—	—	4.4	10.2	FT
M40-1	150	147	8.0	3.6	12.5	5.6	FT
M40-2	155		8.5	3.8	13.0	5.9	FT
M40-3	90		8.0	3.6	8.5	3.8	FT
M100-1	7.1	6.9	1.8	2.4	3.4	4.6	FT
M100-2	7.0		1.0	1.4	3.8	5.1	FT
M100-3	5.6		2.0	2.7	3.9	5.3	FT
D13	7.2	7.1	4.5	2.4	16.1	8.6	FC
AF2	7.5		6.5	3.5	21.2	11.4	FS
AF3	8.2		9.0	4.8	29.9	16.0	FS

FT: 曲げひび割れが加力点近傍を貫通する破壊

FC: 加力点の圧壊

FS: 加力点の圧壊の進行中に斜め亀裂が圧縮領域を貫通する破壊

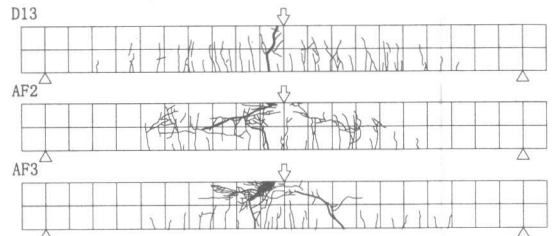


図-4 最終破壊状況図

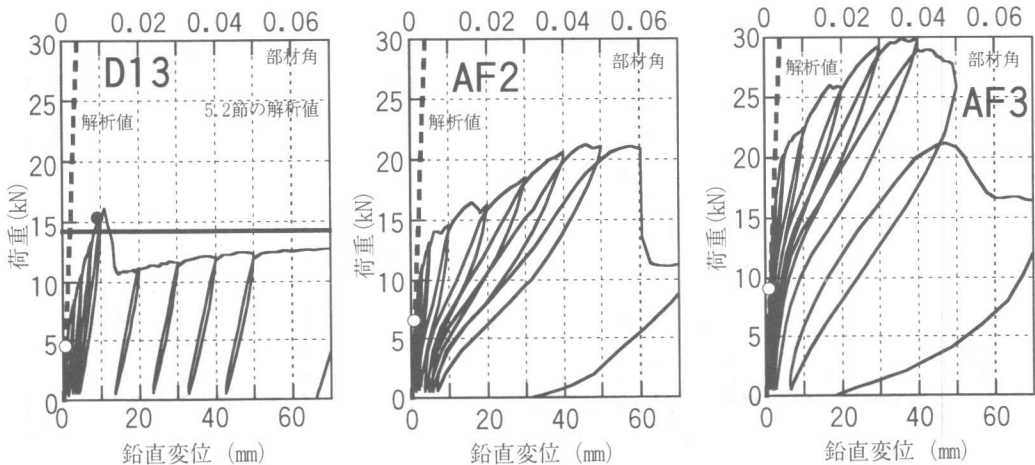


図-5 荷重と変位関係(D13とAF2とAF3)

れが残留しているのが目視で観察された。図-6に示す結果から、プレストレスが導入されていると、除荷時に急激にひび割れが閉じることが分かる。またPS試験体のひび割れ幅は、破壊性状の時に述べたひび割れ幅の進展状況を裏付ける結果となっている。

(3) コンクリートのひずみ

構造試験体のコンクリートのひずみと荷重の関係を図-7に示す。PS試験体の最大耐力時のコンクリートの圧縮ひずみは、表-2に示したコンクリートの終局ひずみとほぼ近似しており、コンクリートの圧壊により、最大耐力が決定されたと考えられる。それに比べ鉄筋の降伏が先行したD13試験体では、最大ひずみが 3000×10^{-6} 程度であり、コンクリート自体にはまだ余裕があったと考えられ

る。

(4) 主筋のひずみ

PS試験体の主筋は表面に異形加工したAFロッドであるため、ひずみゲージによるひずみ計測はできなかった。D13試験体の主筋のひずみと荷重関係を図-8に示す。この図によるとD13試験体の最大耐力時には主筋のひずみが降伏ひずみに達していたと考えられる。

5. 結果の検討

5.1 寸法効果

本試験で行ったひび割れ強度と曲げ強度について、スパンを横軸として図-9に示す。この図によるとM16(長さ16cm)の結果から構造物の評価をするとかかなり大きく評価するので危険側の設計とな

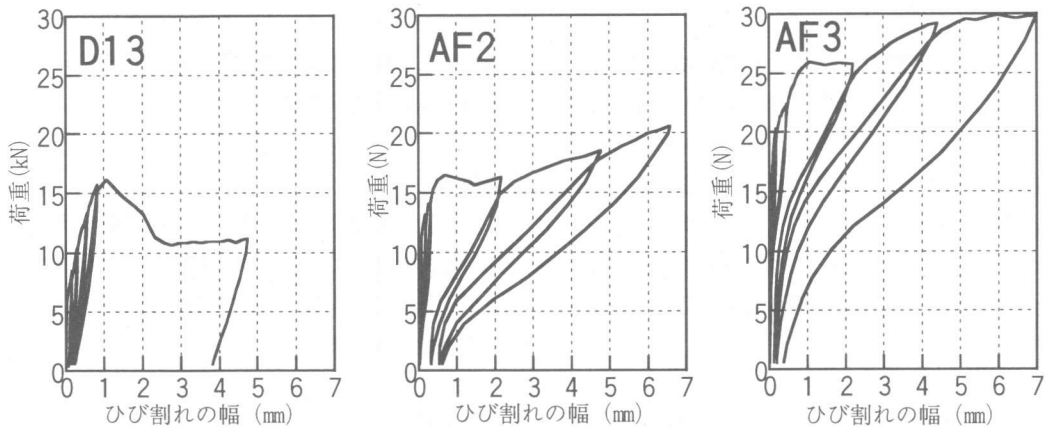


図-6 荷重とひび割れ幅の関係(D13とAF2とAF3)

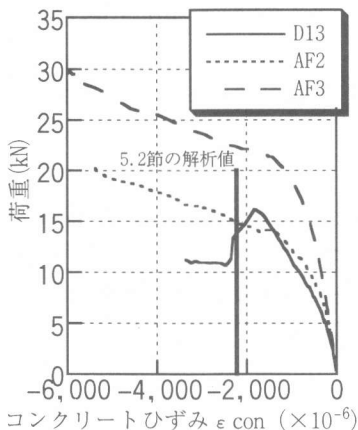


図-7 Pと ϵ_{con} ひずみの関係

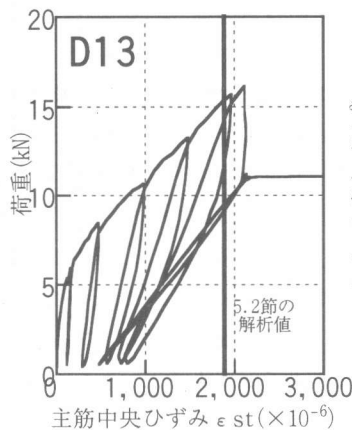


図-8 荷重と ϵ_{st} の関係

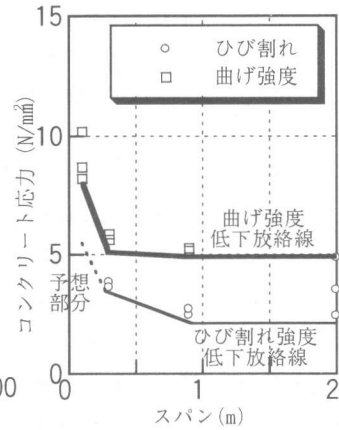


図-9 スパンによる寸法効果

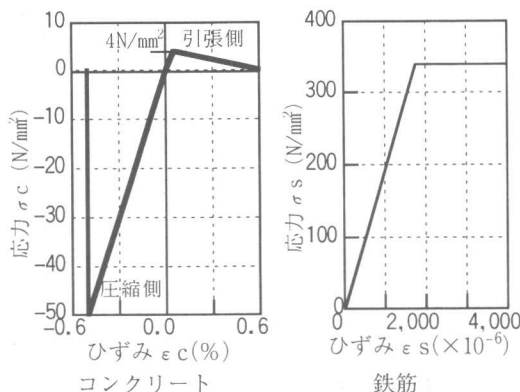


図-10 仮定した応力とひずみの関係

ることが分かる。これは試験体が小さくても繊維長さは変わっていないので、試験体が小さいほど繊維の機能がより効果的になるためと推察される。よって構造物のひび割れ強度および曲げ強度を評価するには、本実験ではM100の大きさが必要であることが分かった。

5.2 軽量鉄筋コンクリートの耐力評価

4.2節で述べたように、軽量コンクリートの最大耐力時にはコンクリートがかなり引張力を負担し、通常のコンクリートよりも大きな耐力が得られた。ここでは手計算でもできるようにラフなコンクリートの引張側の応力とひずみ関係を仮定し、最大耐力の試算を行った。用いた仮定は以下の通りである。

- (a) ひずみは平面保持を仮定する。
- (b) 最大耐力時には、引張側のコンクリートが終局引張ひずみに達している。
- (c) コンクリートおよび鉄筋の応力とひずみの関係は、図-10のように仮定する。

図-10でのコンクリートの引張強度 4N/mm^2 は、曲げ試験の結果より一軸の引張試験の引張強度が小さくなることと、RC規準⁴⁾による圧縮強度からの引張強度の算定式による値を参考に仮定した。上記仮定による最大耐力は、図-5の太実線で示すように 14.3kN となり、実験結果をほぼ近似できた。その時のコンクリートの圧縮ひずみと鉄筋の引張ひずみは、図-7および図-8の太実線で示すように 2220×10^{-6} および 1890×10^{-6} で、実験値の最大耐力時の結果ともほぼ近似した。

6. まとめ

本試験の結果得られた知見は以下の通りである。

- (1) ビニロン繊維混入軽量コンクリートは、普通コンクリートと比較して引張靱性がある。
- (2) ビニロン繊維混入軽量コンクリートのひび割れ強度および曲げ強度には寸法効果があり、実構造物のひび割れおよび曲げ強度を評価する場合には、本試験の範囲では $100 \times 100 \times 1,000\text{mm}$ 以上の試験体を用いて評価する必要がある。
- (3) ビニロン繊維混入軽量コンクリートの曲げ耐力は、コンクリートの引張靱性を適切に評価することにより算定できる。ただし、プレストレスが導入された梁の曲げ耐力は、今後の検討としたい。
- (4) 軽量コンクリートとプレストレスを組み合わせることによって、残留変形が少ないこと、除荷時にはひび割れを閉じさせる効果があることが分かった。これにより、小さな部材断面で、高曲げひび割れ強度および高曲げ強度が実現でき、軽量・薄肉PCaの製造の可能性が確認された。

謝辞

本試験にあたり、帝人株式会社に材料を提供していただきました。また同社の河崎俊史氏および村上荘一氏に多大なる協力を賜りました。ここに深く謝意を表します。

参考文献

- 1) 岡本享久ほか:「高性能軽量コンクリート」, コンクリート工学, Vol. 37, No. 4, pp12~18, 1999年4月
- 2) 松岡茂ほか:「短繊維補強コンクリートの現状について」, コンクリート工学, Vol. 37, No. 4, pp12~18, 1999年4月
- 3) 日本建築学会:「建築工事標準仕様書・同解説 JASS 5 鉄筋コンクリート工事」, p717, 1997年
- 4) 日本建築学会:「鉄筋コンクリート構造計算規準・解説」, p54, 1999年