

# 論文 短繊維補強された超軽量コンクリートの鋼・コンクリート合成構造への適用に関する基礎的研究

合田 寛基<sup>\*1</sup>・日野 伸一<sup>\*2</sup>・田村 一美<sup>\*3</sup>・太田 俊昭<sup>\*4</sup>

要旨: せん断補強筋を併用したずれ止めを用いた鋼・超軽量コンクリート合成はりの静的曲げ試験から, 適切なずれ止め配置により既往の設計手法が適用できる一方, せん断補強筋の分担するせん断耐力はトラス理論ではなくコンクリート引張強度とせん断補強筋のひずみに基づく算出手法が有用であることがわかった。また, 鋼, ビニロン短繊維補強した超軽量コンクリートの合成はりへの適用は, 無補強の場合と比較して韌性に富んだ挙動を示し, 破壊モードが曲げ破壊へと移行すること, 既往の曲げ耐力式がほぼ準用できることからその有意性が示された。

キーワード: 超軽量コンクリート, 合成構造, 鋼短繊維, ビニロン短繊維

## 1. はじめに

近年, 港湾地域の浮体構造物や橋梁上部工といったような大型構造物を対象とした超軽量コンクリートの鋼・コンクリート合成構造への適用は, 構造物の断面縮減が可能なことから経済面, 施工面での省力化が図られ, 合理的設計が可能になると考えられる。

せん断補強効果を併用するスタッドを長尺化した鋼・超軽量コンクリート合成構造物の適用に関する既往の研究結果<sup>1)</sup>より, 長尺スタッドをずれ止めとして用いた場合, 設計曲げ耐力が低減係数を乗じた設計せん断耐力を下回っている場合でも, その配置間隔によりせん断破壊する可能性があることが報告されている。使用する骨材種別によっては, 骨材強度が小さく低減係数が過小となることが原因として考えられる。

以上から, 超軽量コンクリートを使用した合成部材に配置されるずれ止めのせん断補強効果および部材のせん断破壊メカニズムを解明するとともに, 超軽量コンクリート材料の引張特性ならびに韌性の改善が不可欠な課題と考えられる。

本研究では, 比重 1.5 ~ 1.7 程度の超軽量コンクリートを用いた鋼合成構造物の開発を目的に,

その基礎研究として本論文は, まず, ずれ止め機能とせん断抵抗機能を併用したスタッド, 異形鉄筋ジベルと超軽量コンクリートを用いた鋼板・コンクリート合成はりの静的曲げ試験を行い, 曲げ, せん断耐力の評価法について検討した。次に, 短繊維補強によって引張強度を普通コンクリートとほぼ同等に改善した超軽量コンクリートを合成はりに適用した場合の力学特性を検証し, 合成構造物への適用性について検討した。

## 2. ずれ止めせん断補強筋を用いた合成はりの耐力照査

### 2.1 目的および試験方法

本章では, ずれ止めの長尺頭付きスタッドまたは通常の異形鉄筋をずれ止めおよびせん断補強筋として併用した鋼・超軽量コンクリート合成はりによる静的曲げ試験を行い, 既往の曲げ, せん断耐力算出手法の適用性について検証した。

供試体一般図を図 - 1 示す。供試体は, スタッドまたは通常の異形鉄筋を切断した異形鉄筋ジベルをそれぞれ配置した底鋼板に超軽量コンクリートを打設した単純合成はりで, 供試体幅 200mm, 高さ 256mm (うち鋼板厚 6mm), 支間長

\*1 九州大学大学院 工学府 都市環境システム工学専攻 工修 (正会員)  
 \*2 九州大学大学院 助教授 工学研究院建設デザイン部門 工博 (正会員)  
 \*3 三菱重工業(株) 技術本部 広島研究所鉄工・土木研究室 工博 (正会員)  
 \*4 九州大学大学院 教授 工学研究院建設デザイン部門 工博 (正会員)



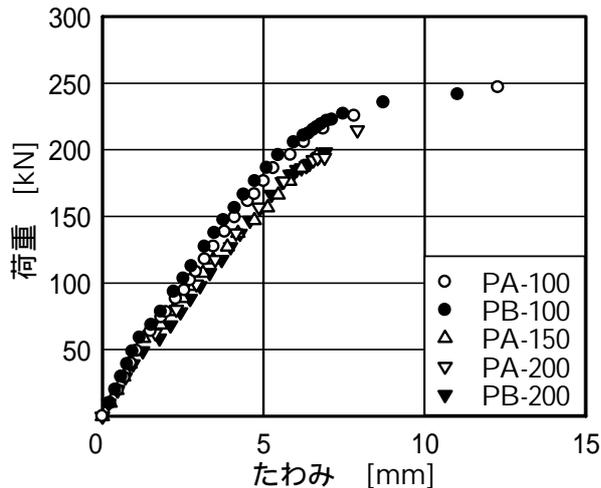


図 - 2 荷重 - たわみ曲線 (正曲げ)

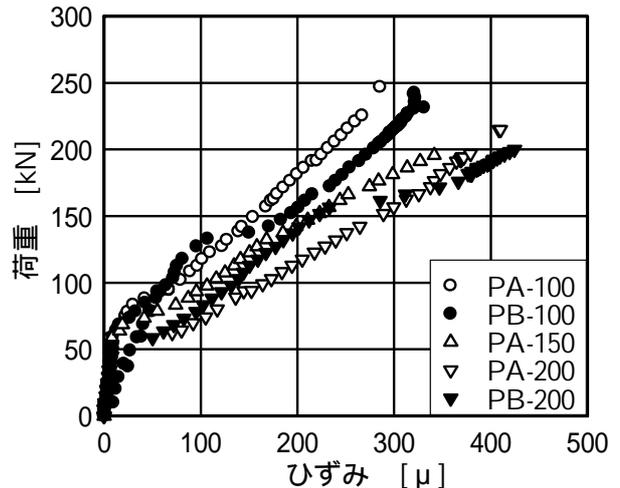


図 - 4 荷重 - ずれ止めひずみ曲線 (正曲げ)

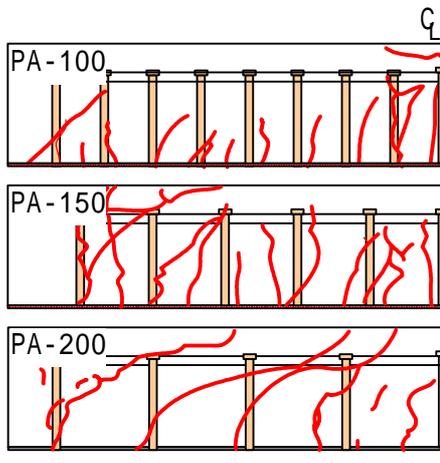


図 - 3 ひび割れ図

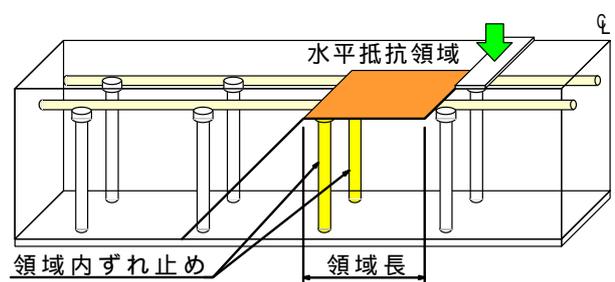


図 - 5 水平抵抗領域概念図

正曲げ時に鋼板下縁の引張応力度が $140\text{N/mm}^2$ に達する荷重 $95\text{kN}$ まで1度載荷,除荷をした後,破壊まで漸増載荷を行った。

## 2.2 結果および考察

### (1) 変形性状

表 - 6 に試験結果,図 - 2 に正曲げ供試体の荷重とたわみの関係を示す.同図より,せん断補強筋が密に配置されたPA-100およびPB-100は,靱性に富んだ挙動を示し曲げ破壊した.一方,PA-150,PA-200ならびにPB-200は,ひび割れ発生後の曲げ剛性の低下が大きく,いずれも図 - 3 に示すひび割れ性状のとおり,底鋼板に溶接したずれ止め材の基部位置より曲げひび割れが先行し,載荷点付近ならびにせん断スパン内に生じた斜引張りひび割れが,ずれ止め頭部近傍に生じた水平ひび割れとつながり,せん断破壊した.負曲げ供試体は,コンクリート下縁に鋼板による拘束

がないことからひび割れの発生,進行がより速く,いずれもせん断破壊した。

図 - 4 は,各供試体の荷重とずれ止めのひずみの関係を示しており,同図よりせん断破壊した供試体ではスタッドおよび異形鉄筋ジベルが降伏していないことがわかった。

### (2) 曲げ,せん断耐力照査

曲げ破壊した供試体は,等価応力ブロック法によるRC断面の曲げ破壊モーメント式に基づいた計算値に対して,1.2程度の安全率を有し,適切にずれ止め配置した場合,その適用の妥当性が確認された。

せん断耐力は,コンクリートならびにせん断補強筋の負担するせん断耐力の和で表される.前者は通常,二羽ら<sup>2)</sup>のせん断耐力算定式に軽量コンクリートの低減係数0.7を乗じるが,この低減係数は軽量コンクリートの材料特性に依存せず,適正な評価が困難と考えられる.そこで,式(1)に示す前田ら<sup>3)</sup>の低減係数を用いて,コンクリートの負担するせん断耐力を算出した。

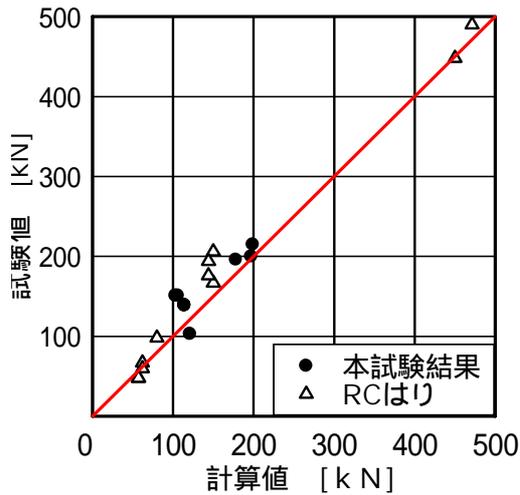


図 - 6 試験値とせん断耐力

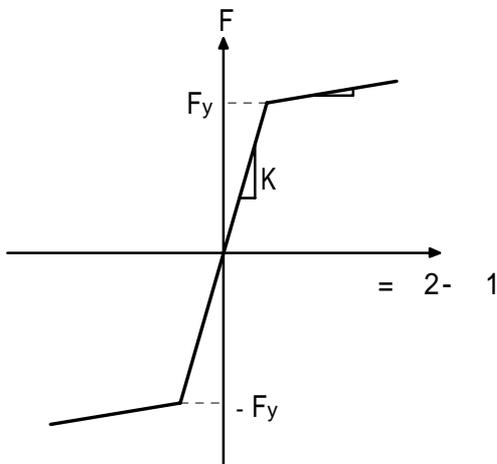


図 - 7 水平バネの構成則

$$= 0.84 \cdot \frac{1}{N} + 0.32 \quad (1)$$

ここで、 $\frac{1}{N}$  : 超軽量コンクリートの脆度の逆数、 $N$  : 普通コンクリートの脆度の逆数とする。

また、後者のせん断補強筋負担分はせん断破壊した供試体のずれ止めがいずれも降伏しなかったことから、ずれ止めのせん断補強効果を立石ら<sup>4)</sup>が提案したコンクリートの水平抵抗領域の耐力とみなし、その算出を行った。図 - 5に水平抵抗領域の概念図を示す。図中の実線は水平抵抗領域を含む破壊面を示し、水平抵抗領域の始点は、荷重板の端から支点方向に45°でおろした直線がずれ止め頭部に達した位置とし、領域長は破壊時における領域内ずれ止めの引張力の総和と水平抵抗領域のコンクリートの引張耐力が一致する長さとした。

図 - 6は、各供試体のせん断耐力における試験値と計算値の関係を示す。表中には、せん断補強

表 - 7 コンクリートの材料特性

コンクリート種別	圧縮強度 [N/mm <sup>2</sup> ]	引張強度 [N/mm <sup>2</sup> ]	ヤング係数 [ $\times 10^4$ N/mm <sup>2</sup> ]
無補強	34~39	1.6~2.5	1.4~1.5
鋼	30~33	3.4~3.8	1.3~1.5
ビニロン	32~38	2.7~3.2	1.4~1.7

表 - 8 供試体種別

荷重方向	繊維種別	ずれ止め間隔 [mm]	
		100	200
正	無補強	PA-100	PA-200
	鋼	-	PS-200
	ビニロン	-	PV-200
負	無補強	MA-100	MA-200
	鋼	MS-100	MS-200
	ビニロン	MV-100	MV-200

表 - 9 短繊維概要

繊維種別	断面径 [mm]	繊維長 [mm]	比重	引張強度 [N/mm <sup>2</sup> ]
鋼	φ0.60	30	7.85	$1.00 \times 10^3$
ビニロン	φ0.66	30	1.30	$0.90 \times 10^3$

筋を用いないRCはりの試験結果<sup>5)</sup>も添記した。同図より、試験値と計算値は概ね良好な一致を示した。以上より、せん断補強筋が降伏しない場合には、コンクリートのせん断耐力の低減係数として脆度に依存する低減係数  $\frac{1}{N}$  を、せん断補強筋のせん断耐力として水平抵抗領域を考慮したせん断耐力算出法の妥当性が確認された。

### 3. 短繊維補強した超軽量コンクリートを用いた合成はりの力学特性

#### 3.1 目的および試験方法

本章では、短繊維補強により表 - 7に示す材料特性を有する超軽量コンクリートを用いた合成はりの静的曲げ試験を行い、その力学特性について検証した。なお、圧縮、引張強度はそれぞれ JIS A 1108, 1113に準じて算出した。

表 - 8, 表 - 9に供試体種別ならびに短繊維概要を示す。本試験では、全供試体に頭付きスタッドを用いた。また、短繊維は鋼短繊維が 0.6mmL30mmのインデント型、ビニロン短繊維

表 - 10 水平バネの構成則

	バネ定数 K [N/mm]	限界 せん断耐力 F <sub>y</sub> [N]	降伏後 バネ定数 κ [N/mm]
水平バネ	4.48 × 10 <sup>5</sup>	1.04 × 10 <sup>5</sup>	4.48 × 10 <sup>3</sup>

表 - 11 試験結果

供試体 種別	試験値 P <sub>E</sub>	曲げ耐力 計算値 P <sub>B</sub>	P <sub>E</sub> /P <sub>B</sub>	破壊 形式
	[kN]	[kN]		
PA-100	247	204	1.21	曲げ
PA-200	215	203	-	せん断
PS-200	273	199	1.37	曲げ
PV-200	255	204	1.25	曲げ
MA-100	151	241	-	せん断
MS-100	216	241	0.90	曲げ
MV-100	212	241	0.88	曲げ
MA-200	103	241	-	せん断
MS-200	209	240	0.87	曲げ
MV-200	203	241	0.84	曲げ

が 0.66mmL30mmのストレート型を使用し、いずれも体積比で1.0%相当量を混入した。供試体概要ならびに試験方法は前章の静的曲げ試験と同様である。

### 3.2 数値解析

試験結果をシミュレートするために、汎用ソフトMARCを用いて2次元弾塑性FEM解析を行った。解析モデルは1/2対称モデルとし、はりの軸方向に88分割、断面高さ方向に27分割とした。鋼板、コンクリートは4節点平面応力要素、スタッドおよび軸方向鉄筋は、2節点はり要素を用いた。鋼材、コンクリートの応力-ひずみ関係は、材料試験結果に基づき、引張軟化係数は普通コンクリートではヤング係数の1/10と仮定し、短繊維補強した場合は普通コンクリートとの引張強度比を乗じて設定した。また、コンクリートと鋼板間の付着は、柔なずれ止めとしてジョイント要素を挿入した。表-10、図-7にジョイント要素に用いた水平バネの構成則を示す。なお、鉛直バネは肌離れ現象を無視し剛結とした。

### 3.3 結果および考察

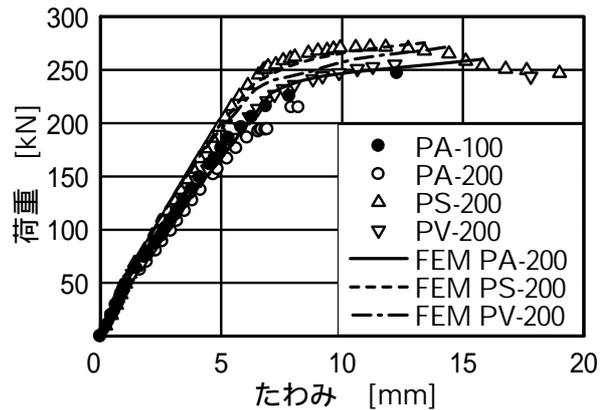


図 - 8 荷重 - たわみ曲線 (正曲げ)

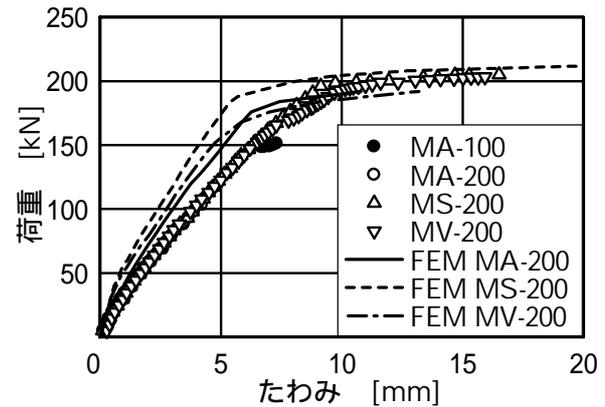


図 - 9 荷重 - たわみ曲線 (負曲げ)

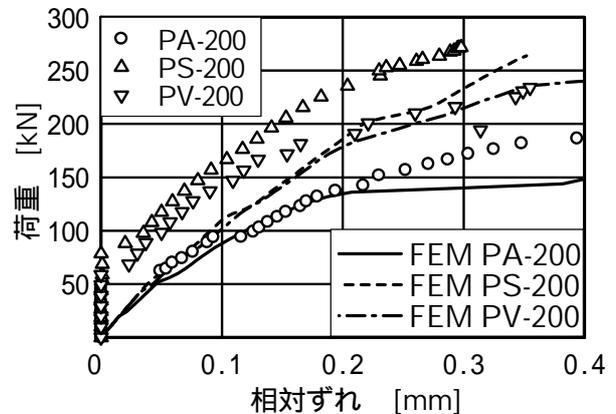
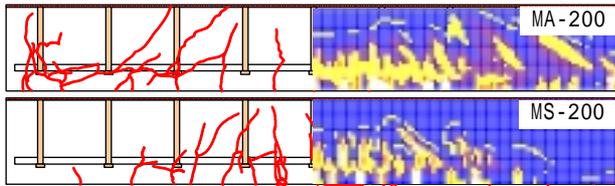


図 - 10 荷重 - 相対ずれ曲線 (支点近傍)

表-11に試験結果の一覧を、また図-8、図-9に正曲げ負曲げ供試体の荷重とたわみの関係を示す。図-8より、荷重初期段階はいずれの試験体もほぼ同様の曲げ剛性を有するが、曲げひび割れ発生以後、短繊維補強したPS-200、PV-200は短繊維が引張力を伝達することから、曲げ剛性の低下が少なく極めて靱性に富んだ挙動を示し、曲げ破壊することがわかった。また、短繊維補強効果を比較すると、PS-200はPV-200より7%程度最大荷重が大きく、短繊維の引張強度を反



(a) 試験結果 (b) FEM 解析結果

図 - 11 ひび割れ図

映する結果が得られた。図 - 9の負曲げ供試体も同様に結果が得られたが、ずれ止め基部近傍でコンクリートのひび割れにともなう接合面の合成の低下が生じ、鋼板の局部座屈によって耐力が低下したことから、試験値が計算値の0.8～0.9とやや危険側の結果となった。

図 - 10は、正曲げ供試体の支点近傍でのコンクリートと鋼板の相対ずれを示す。同図より、短繊維補強した方がずれ量が小さく、特に鋼短繊維補強によってずれおよびひび割れの抑制効果が顕著にみられることがわかった。

図 - 11に、MA-200およびMS-200のひび割れ状況を示す。同図より、鋼短繊維によって補強されたMA-200は、MS-200で斜引張りひび割れが多数発生したせん断スパン内で補強効果を示していることがわかる。この傾向は、ピニロン短繊維でも同様であることが確認された。ひび割れ幅は、概ね短繊維の引抜き作用によって増大し、終局状態で破断した短繊維はほとんどみられなかった。また、FEM解析は、短繊維補強によるひび割れ性状の違いを再現できており、試験結果を比較的精度良く解析できている。

以上、鋼、ピニロン短繊維補強によって合成はりのせん断耐力が向上し、曲げ降伏後における部材のエネルギー吸収の改善効果がみられ、靱性に富んだ挙動を示すことがわかった。最大荷重では、無補強と比較して鋼短繊維が約30%、ピニロン短繊維が約20%の耐力増加を示し、普通コンクリートを用いた合成はりとはほぼ同等の力学特性を保有していることがわかった。

#### 4. まとめ

試験結果から以下のことが得られた。

(1) 引張、せん断強度の小さい超軽量コンクリー

トをせん断補強筋を併用しただれ止めを有する合成はりに適用した場合、適切なずれ止め間隔により既往の設計手法が適用可能だが、配置間隔が有効高さの1/2を超過し、過大になるとせん断補強筋の降伏前にせん断補強筋近傍のコンクリートが引張破壊し、せん断破壊を引き起こす場合があることがわかった。

- (2) コンクリートの分担するせん断耐力は脆度係数の逆数と正の相関関係を示し、せん断補強筋の分担分はそのコンクリートの引張強度と水平抵抗領域の積として算出可能である。
- (3) 短繊維補強した超軽量コンクリート合成はりは靱性に優れ、曲げ破壊へと破壊モードが移行し、力学特性の改善効果が確認された。
- (4) 曲げ耐力は、正曲げでは試験値が既存の曲げ耐力算定式に対して安全側評価となったが、負曲げではずれ止め基部近傍でコンクリートの割裂にともなう合成低下が生じ、鋼板の局部座屈によって耐力が低下したことから、試験値が計算値の0.8～0.9とやや危険側の結果となった。

#### 参考文献

- 1) 日野伸一ほか：超軽量コンクリートを用いた鋼・コンクリート合成構造の開発，土木構造・材料論文集，Vol.16，2000.12
- 2) 二羽淳一郎ほか：せん断補強筋を用いないRC梁のせん断強度式の再評価，土木学会論文集，Vol.372，V-5，pp.167-176，1986
- 3) 前田拓郎ほか：高品質軽量骨材を用いたRCはりのせん断特性，コンクリート工学年次論文集，Vol.23，No.3，pp.913-918，2001
- 4) 立石晶洋ほか：スタッドジベルの高さが合成版の押抜きせん断破壊に与える影響，土木学会第56回年次学術講演会講演概要集，CS2-014，pp.108-109，2001
- 5) 舟川勲ほか：せん断補強筋を有しない大型RCはりのせん断破壊性状，土木学会第51回年次学術講演会講演概要集，V-402，pp.804-805，1996.9