

短繊維補強された超軽量コンクリートを用いた鋼合成はりの 曲げせん断性状に関する実験的研究

Flexural and shearing behaviors of composite beams using super lightweight concrete reinforced with short FRP

日野伸一^{*}, 合田寛基^{**}, 田村一美^{***}, 太田俊昭^{****}

Shinichi HINO, Hiroki GODA, Kazumi TAMURA, and Toshiaki OHTA

^{*} 工博 九州大学大学院, 助教授, 工学研究院 (〒812-8581 福岡市東区箱崎 6-10-1)

^{**} 工修 九州大学大学院, 工学府, 博士後期課程 (〒812-8581 福岡市東区箱崎 6-10-1)

^{***} 工博 三菱重工業(株) 技術本部, 広島研究所 (〒730-8642 広島市中区江波沖町 5-1)

^{****} 工博 九州大学大学院, 教授, 工学研究院 (〒812-8581 福岡市東区箱崎 6-10-1)

Super lightweight concrete is expected to be a structural material that enables reduction of dead loads of certain structures, such as a floating pier and bridge deck slabs, and it is considered that super lightweight concrete demonstrates the superior performance for application to steel-concrete composite structures. However, tensile and shearing strengths of super lightweight concrete are usually inferior to those of normal weight concrete, so that the shear failure of structural members could be caused.

This study presents the mechanical properties of super lightweight concrete reinforced with steel or vinylon short fiber. Also, it reports the flexural and shearing behaviors of steel plate-concrete composite beams using super lightweight concrete reinforced with short fibers.

Keywords: super lightweight concrete, steel fiber, vinylon fiber,

composite structure

キーワード: 超軽量コンクリート, 鋼繊維, ビニロン繊維, 合成構造

1. はじめに

近年, 土木構造物の大型化が進む中, 橋梁上部工や港湾地域の浮体構造物では, 死荷重の低減を念頭に置いた超軽量コンクリートを用いた鋼・コンクリート合成構造への関心が高まってきている¹⁾。

土木学会コンクリート標準示方書では, 軽量コンクリートを単位容積質量または密度を普通コンクリートよりも小さくしたものと定義し, 具体的な数値を明記していない。日本建築学会では, 普通細骨材と人工軽量骨材を用いた軽量 1 種コンクリートとして単位容積重量が $1.7 \sim 2.1 \text{ t/m}^3$, 粗・細骨材に人工軽量骨材を用いた軽量 2 種コンクリートとして $1.3 \sim 1.7 \text{ t/m}^3$ といった目安を設けている。現在, 土木分野の材料特性に関する研究では, 九々²⁾が 1.4 t/m^3 以下のコンクリートを超軽量コンクリートとしているが, 構造部材への適用を想定した研究では, PC はりへの適用を想定した前堀ら³⁾の 1.61 t/m^3 , 床版への適用を想定した松井ら⁴⁾の 1.85 t/m^3 といった $1.6 \sim 1.9 \text{ t/m}^3$ 程度の軽量コンクリートが多く用いられている。

本研究では, 前述の構造部材への適用を想定した上で, 超軽量コンクリートを粗・細骨材に原料として膨張岩, 真珠岩, 頁岩などを原料とした人工軽量骨材を用いた比重 1.7 以下のコンクリートと位置づけ, $1.8 \sim 2.1$ のものを軽量コンクリートとし区分する。図-1 は, 人工軽量粗骨材を示す。最近では, 従来の人工軽量骨材と異なる独立空隙型低吸水性の高性能軽量骨材が開発され, 凍結

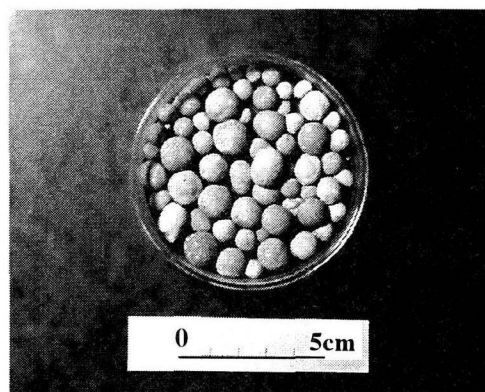


図-1 人工軽量骨材 (粗骨材)

融解抵抗性やポンプ圧送性の改善，高い圧縮強度の保有が実現したことから多分野にわたりその適用が期待されるものである．この超軽量コンクリートを鋼板とともに合成部材に適用することで，浮体構造物では吃水が浅くなり，波力の大きな水域でも十分な係留機構を保有することができる．また，橋梁上部工への適用は下部工のスリム化を可能とし，設計自由度が高くなることから経済面，施工面での省力化が可能となる．

しかしながら，柴田らの研究⁷⁾から，超軽量コンクリートは同一圧縮強度を有する普通コンクリートと比較して引張，せん断強度が50～70%と低いことが検証されている．この原因として，超軽量コンクリートに用いられている人工軽量骨材の骨材強度が小さく，普通コンクリートの破壊メカニズムとされるモルタルと骨材の境界面あるいはモルタル自体が破壊する場合と異なり，骨材自体が破壊する場合があることが考えられる．

現行のコンクリート標準示方書に基づく設計では，軽量コンクリートの引張，せん断耐力の低減係数を普通コンクリートの70%と規定しているが，ヨーロッパでは軽量コンクリートの引張，せん断強度の低下をコンクリートの単位容積重量の関数である低減係数を用いて表現する方法を検討している．国内においても同様に低減係数についての研究が試みられている⁸⁾．

一方で，合成部材のずれ止め機構として多用されているスタッドを長尺化し，同時にせん断補強筋としても機能させることで，現場施工の省力化と同時にさらなる合理的設計が可能になると考えられる．

本研究に先駆けて実施した超軽量コンクリートを用いた合成はりの力学特性に関する実験結果より，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場合があることがわかった．スタッド間隔が同じ普通コンクリートでは曲げ破壊していることから，超軽量コンクリートの引張，せん断強度が小さいという材料特性が原因として考えられている．

そこで本研究は，コンクリートの引張，せん断特性の改善が期待できる鋼短繊維およびビニロン短繊維に着目し，それらで補強された比重1.5程度の超軽量コンクリートの合成構造物への適用を試みるものである．本論文では，先ず施工性を考慮した予備練りを踏まえて鋼，ビニロン両短繊維を混入した超軽量コンクリートの配合決定とその圧縮，引張，曲げ，せん断の諸強度とヤング係数などの材料強度特性について実験的検討を行った．次

に，頭付きスタッドあるいは異形鉄筋ジベルをせん断補強筋として併用した鋼板・コンクリート合成はりの曲げせん断性状および既往の耐力算定法の適用性などについて検証した．

2. 短繊維補強した超軽量コンクリートの材料強度特性

2.1 目的および試験方法

既往の研究⁷⁾⁸⁾から，鋼およびビニロン短繊維を用いることで普通ならびに軽量コンクリートの引張，せん断特性の改善効果がみられることが報告されている．しかしながら，繊維混入率の増加によりコンクリートのワーカビリティが低下することがわかっており，特に超軽量コンクリートの場合はその傾向が顕著であるため，単位水量の増加，石粉や普通骨材との併用など，修正配合が必要である．水量の増加によって，骨材とペーストの分離が生じる危険性が生じ，短繊維混入による単位水量の増量調整と材料分離の抑制は相反する調整課題である．

本研究では，同種別のコンクリートにおいて短繊維の混入率に関わらず単位水量を一定とし，鋼繊維補強コンクリート設計施工指針（案）⁹⁾を基に細骨材率，高性能AE減水剤の混入率調整および増粘剤の添加によって，材料分離がみられずかつ良好なワーカビリティを有する超軽量，軽量コンクリートおよび普通コンクリートを製作した．本章ではこれら3種のコンクリートについて，短繊維混入率をパラメータとした各種強度試験を行い，力学特性および短繊維補強効果について検証した．

本試験で使用したコンクリートは，超軽量コンクリート（以下，SLと呼ぶ），軽量コンクリート（以下，L）および普通コンクリート（以下，N）である．種類は，表-1に示す鋼またはビニロン短繊維をそれぞれ0，0.5，1.0，1.5%（体積比）混入したSLおよびL試験体，0，1.0%混入したN試験体の計17種類である．表-2に試験体の骨材種別を，表-3に短繊維無混入試験体の示方配合例を示す．なお，全試験体に高炉セメントB種（比

表-1 短繊維種別

繊維種別		断面径	繊維長	比重	ヤング係数	引張強度
		mm	mm		N/mm ²	N/mm ²
鋼	インデント	φ0.60	30	7.85	2.10×10 ⁵	1.00×10 ³
ビニロン	直線	φ0.66	30	1.30	3.00×10 ⁴	0.90×10 ³

表-2 骨材種別

種別	比重	粗骨材		細骨材	
		種別	絶乾比重	種別	絶乾比重
SL 軽量2種LC1.6	1.53	人工軽量	0.91	人工軽量	1.60
L 軽量1種LC2.1	1.94	人工軽量	1.32	海砂	2.54
N —	2.41	碎石	2.89	海砂	2.54

表-3 示方配合例

	Slump [cm]	Air [%]	W/C [%]	s/a [%]	単位量 [kg/m ³]			
					W	C	S	G
SL	12±1	5.0	48.0	43.0	195	406	427	322
L	12±1	5.0	48.0	43.0	175	365	727	631
N	12±1	5.0	53.0	52.0	175	330	894	931

表-4 各種強度試験結果

コンクリート	繊維	混入率	圧縮強度		引張強度		曲げ強度		せん断強度		脆度係数		ヤング係数	
		体積比 (%)	N/mm ²		N/mm ²		N/mm ²		N/mm ²		圧縮/引張		kN/mm ²	
N	なし	0.0	39.9	(1.00)	3.28	(1.00)	4.93	(1.00)	5.19	(1.00)	12.2	(1.00)	34.6	(1.00)
	鋼	1.0	38.1	(0.95)	3.71	(1.13)	6.25	(1.27)	8.66	(1.67)	10.3	(0.84)	30.4	(0.88)
	ビニロン	1.0	40.3	(1.01)	3.59	(1.09)	6.09	(1.24)	5.23	(1.01)	11.2	(0.92)	34.8	(1.01)
L	なし	0.0	42.6	(1.07)	3.13	(0.95)	3.87	(0.78)	3.08	(0.59)	13.6	(1.11)	19.5	(0.56)
	鋼	0.5	47.1	(1.18)	3.83	(1.17)	5.07	(1.03)	4.63	(0.89)	12.3	(1.01)	20.5	(0.59)
		1.0	44.1	(1.11)	4.52	(1.38)	6.50	(1.32)	5.24	(1.01)	9.8	(0.80)	21.0	(0.61)
		1.5	47.3	(1.19)	5.50	(1.68)	9.64	(1.96)	7.78	(1.50)	8.6	(0.70)	25.3	(0.73)
	ビニロン	0.5	45.5	(1.14)	3.13	(0.95)	4.05	(0.82)	4.31	(0.83)	14.5	(1.19)	19.4	(0.56)
		1.0	45.6	(1.14)	4.02	(1.23)	5.99	(1.22)	4.52	(0.87)	11.3	(0.93)	21.3	(0.62)
		1.5	38.4	(0.96)	4.41	(1.34)	7.82	(1.59)	5.16	(0.99)	8.7	(0.71)	21.3	(0.62)
SL	なし	0.0	39.1	(0.98)	2.74	(0.83)	4.06	(0.82)	2.91	(0.56)	13.7	(1.12)	15.8	(0.46)
	鋼	0.5	42.8	(1.07)	4.40	(1.34)	4.08	(0.83)	4.37	(0.84)	9.7	(0.80)	16.5	(0.48)
		1.0	45.3	(1.14)	4.47	(1.36)	5.50	(1.12)	5.14	(0.99)	10.1	(0.83)	18.3	(0.53)
		1.5	41.8	(1.05)	5.09	(1.55)	7.52	(1.53)	6.11	(1.18)	8.2	(0.67)	-	-
	ビニロン	0.5	41.9	(1.05)	3.49	(1.06)	4.17	(0.85)	3.68	(0.71)	12.0	(0.98)	16.3	(0.47)
		1.0	42.5	(1.07)	3.94	(1.20)	5.64	(1.14)	4.81	(0.93)	10.8	(0.88)	16.0	(0.46)
		1.5	43.7	(1.10)	4.80	(1.46)	7.18	(1.46)	4.37	(0.84)	9.1	(0.75)	16.4	(0.47)

※ 括弧内は N に対する比を表す

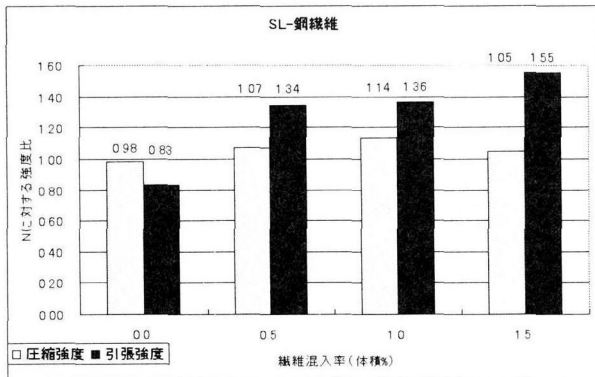


図-1 鋼繊維補強コンクリートの圧縮、引張強度

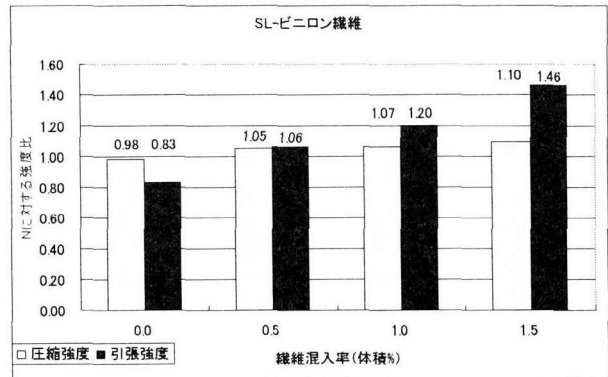


図-2 ビニロン繊維補強コンクリートの圧縮、引張強度

重 3.04) および増粘剤を用いている。また、施工性に配慮した統一条件として、スランブを $12 \pm 1\text{cm}$ 、28 日圧縮強度を約 40N/mm^2 になるように配合設計した。SL は絶乾配合で、L、N は表乾配合とした。

コンクリートの混練は、容量 50 リットルの平型強制混練ミキサを使用し、まず骨材およびセメントの空練りを行い、水を投入して混練した後、短繊維を 2 度に分けて添加し混練を行った。試験体は、水中養生（水温 20°C ）を行った $\phi 100 \times H200\text{mm}$ の円柱試験体および $B100 \times H100 \times L400\text{mm}$ の角柱試験体を用いた。試験は、圧縮強度、引張強度、曲げ強度およびせん断強度の 4 項目でそれぞれ、JIS A1108、A1113、A1106 および繊維補強コンクリートのせん断強度試験方法⁹⁾ に準じて行い、各試験体とも 28 日養生時の 3 体の平均値を用いた。

2.2 試験結果および考察

表-4 に各強度試験結果を示す。表中の各試験結果の

隣に記した括弧は普通コンクリート (N) 無補強の強度に対する比を示している。また、図-1、図-2 は、それぞれ SL に鋼、ビニロン短繊維を混入した場合の圧縮強度 (左) および引張強度 (右) の短繊維無混入の N に対する比を表す。これらより、圧縮強度は短繊維混入率による大きな変化はみられず、いずれの試験体も 40N/mm^2 前後であった。引張強度は、短繊維無混入時は 2.74N/mm^2 であったのが、鋼短繊維では 1.0% につき、N との比が 50% 程度増加し、1.36 倍を示した。ビニロン短繊維の場合も同様に 1.0% につき 40% 程度増加し、1.20 倍という顕著な強度増加が確認され、短繊維補強が有効であることが示された。L でも同様の効果がみられ、特に鋼短繊維を混入した場合の強度増加が最も大きかった。一方で、1.5% の一部の試験体ではコンクリート充填不良のため、圧縮強度の低下傾向がみられた。圧縮強度を引張強度で除した脆度は、短繊維の混入による引張強度の増加によって N と同等以上の数値を示した。また、ヤング係数は、短繊維の影響をほとんど受けておらず、最大でも 10% 程

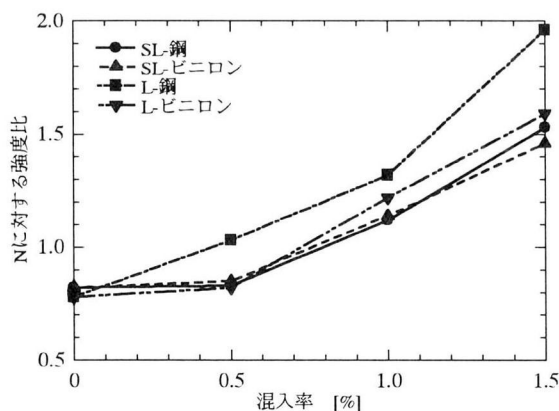


図-3 混入率と強度比との関係（曲げ強度）

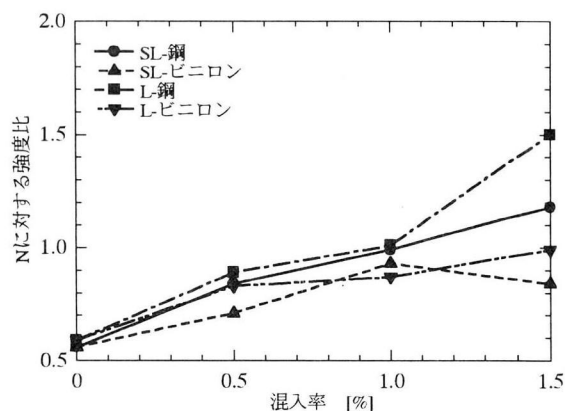


図-4 混入率と強度比との関係（せん断強度）

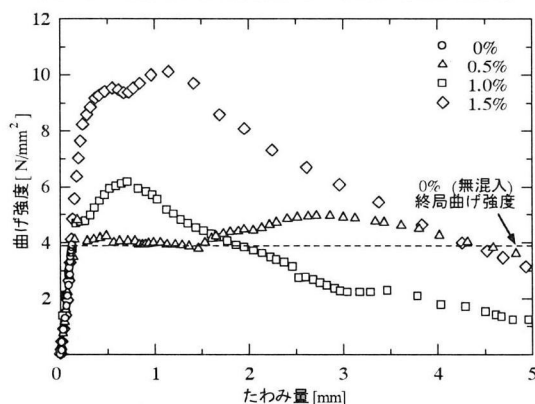


図-5 L-鋼短繊維の曲げ試験結果

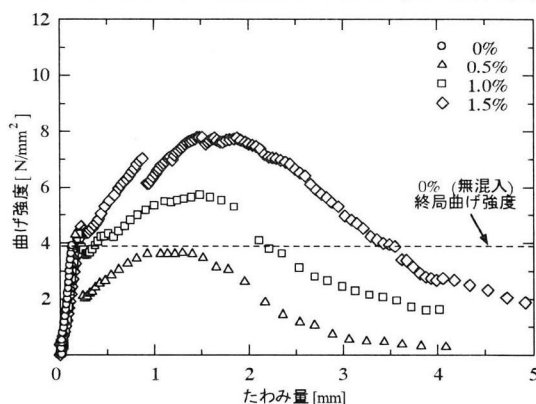


図-6 L-ビニロン短繊維の曲げ試験結果

度の増加であった。

図-3、図-4は、それぞれ曲げ、せん断強度の繊維混入率とNにおける強度との関係を示す。これより、曲げ強度において、SLに1.0%程度混入した場合、鋼、ビニロン両繊維で40%程度強度が増加し、Lでは、鋼繊維で50%以上、ビニロン繊維も45%の強度増加がみられ、いずれもNの強度を上回ることがわかった。せん断強度では、1.0%程度の混入につき、SLでは無混入時の1.5倍の強度増加がみられNの0.9倍前後となっている。一方、Lでは両繊維でNとほぼ同等の値を示し、顕著な強度増加が確認された。

図-5、図-6は、それぞれLに鋼、ビニロン短繊維を混入した場合の曲げ強度試験時の荷重-たわみ曲線を示す。これより、短繊維無混入はひび割れが発生すると同時にスパン中央断面で破断し、最大曲げ強度が 3.87N/mm^2 、たわみ量が 0.13mm であったのに対して、短繊維を混入した試験体はひび割れ発生後に一時的にわずかな荷重の低下がみられるが、その後再び増加し、大きな変形能を呈して最大荷重に達する現象がみられた。鋼、ビニロンのいずれの短繊維も強度のみならず、部材としての靱性の向上に対する補強効果を有することが確認されたが、特にNと比較して鋼短繊維が混入率1.0%につきビニロン短繊維よりも10～15%前後補強効果が大いことがわかった。SLとLでは、混入率1.0%につき、補強効果はほぼ同等かLが10%程度大いことがわかった。

以上から、超軽量コンクリート、軽量コンクリートへ

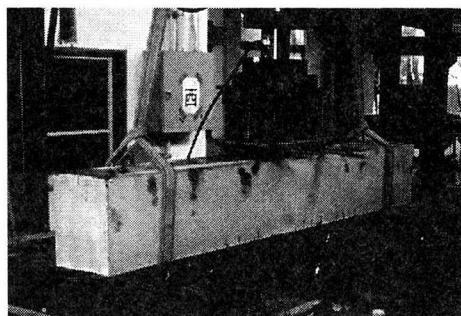


写真-2 試験状況

の1.0%程度の混入では、鋼繊維の方がビニロン繊維よりも、軽量コンクリートの方が超軽量コンクリートよりも10%程度補強効果が大きく、いずれも普通コンクリートと同等以上の材料特性に改善されることが示され、構造物材への適用は十分可能であると考えられる。

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曲げせん断性状

3.1 目的および試験方法

本章では、前章の材料試験の結果を踏まえ、短繊維補強された超軽量コンクリートを用いた鋼・コンクリート合成はりの曲げせん断性状を、短繊維補強効果およびずれ止めせん断補強筋としての長尺スタッドや異形鉄筋ジ

ペルの補強効果とともに検証するため、模型はり試験体を製作し、静的曲げ試験を行った。写真-2 に試験状況を示す。

本試験体は、合成挙動およびずれ止め特性の検証が簡易に実行できる構造にするため、長尺スタッドあるいは異形鉄筋ジベルを配置した鋼板にコンクリートを打設した単純合成はりを用いた。また、実構造物として想定している橋梁床版の張出し部や浮体構造物の隅角部などを考慮し、主鉄筋を増加させた負曲げ用試験体も用意した。

試験に使用した超軽量コンクリートの示方配合を表-5 に示す。パラメータは、短繊維種別およびスタッド間隔、ずれ止め種別である。試験体概要を表-6 に示す。各試験体の呼称記号として、スタッド間隔100mmを10、200mmを20と表記し、正曲げをT、負曲げをCとした。また、無補強はN、鋼、ビニロン短繊維補強したものはそれぞれS、Vとし、異形鉄筋ジベルは最後にaを添記

した。超軽量コンクリートの比重は1.45~1.55、圧縮強度は水中養生14日時点で35N/mm²を目標値とした。鋼材の物性値を表-7 に示す。試験体寸法は、正・負曲げ試験体ともに支間長1750mm、幅200mm、高さ256mm(鋼板厚6mm)とした。使用した主鉄筋は、正曲げ試験体がD19 (SD345)、負曲げ試験体がD25 (SD345)である。図-7 に、試験体構造一般図を示す。スタッドは、ピッチ100mmの試験体ではφ16H200mmを、ピッチ200mmの試験体ではφ19H200mmを支間方向に2列配置した。また、異形鉄筋ジベルとしてD16 (SD295)を使用した。

試験体の製作手順は、容量50リットルの強制混練ミキサーを用いて前章の材料試験と同様にコンクリートを3バッチ計150リットル混練し、最後に練りパン内で全てのコンクリートを練返した後、試験体に打設した。全試験体の目標スランプは施工性を考慮して18±2cmとし、充填中に骨材とペーストの分離等の施工不良が生じていな

表-5 示方配合

種類	混入率 (体積率) [%]	目標 スランプ [cm]	Air [%]	W/C [%]	s/a [%]	単位量 [kg/m ³]						単位容積 重量 [kg/m ³]
						W	C	S	G	Fib	SP	
10T-N 20T-N 10C-N 20C-N	1.0	18±2	5.0	52	43	200	385	429	323	-	3.85	1470
10T-S 20T-S 10C-S 20C-S	1.0	18±2	5.0	52	53	200	387	529	267	130	5.80	1490
10T-V 20T-V 10C-V 20C-V	1.0	18±2	5.0	52	53	200	388	529	267	785	5.80	1476

表-6 試験体概要

	繊維種	頭付きスタッド		異形鉄筋ジベル	
		100	200	100	200
正	無補強	10T-N	20T-N	10T-Na	20T-Na
	鋼	-	20T-S	-	-
	ビニロン	-	20T-V	-	-
負	無補強	10C-N	20C-N	10C-Na	20C-Na
	鋼	10C-S	20C-S	-	-
	ビニロン	10C-V	20C-V	-	-

表-7 鋼材の物性値

鋼材	降伏点応力度 [N/mm ²]	引張強度 [N/mm ²]	ヤング係数 [×10 ⁵ N/mm ²]
鋼板	271.3	410.3	1.72
鉄筋	D25	431.2	633.9
	D19	367.3	569.3
	D13	329.3	461.6

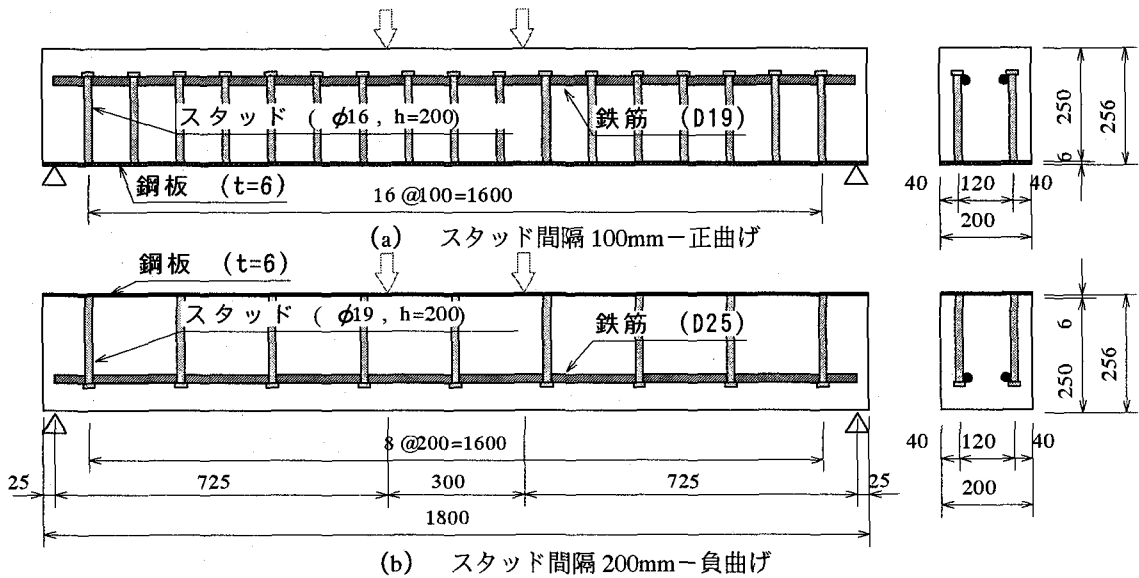


図-7 試験体構造一般図

表-8 コンクリート引張側の材料定数

	ヤング係数 E [N/mm ²]	引張強度 f_t [N/mm ²]	終局ひずみ ϵ_0 [μ]
N	1.58×10^4	2.74	1839
S	1.83×10^4	4.47	3000
V	1.60×10^4	3.94	2644

表-9 水平バネ定数

	バネ定数 K_1 [N/mm]	限界せん断耐力 F_{1y} [N]	降伏後バネ定数 κ_1 [N/mm]
水平バネ	4.48×10^5	1.04×10^5	4.48×10^3

いかを目視によって確認した。

試験体は実構造物を想定して気中養生とし、養生 16 日目に試験を行った。

載荷方法は、支間中央から 150mm 支点側での 2 点線載荷とし、鋼板下縁の引張応力度が許容引張応力度に相当する 140N/mm^2 に達する荷重 95kN まで 1 度載荷、除荷を繰返した後、破壊まで漸増載荷を行った。

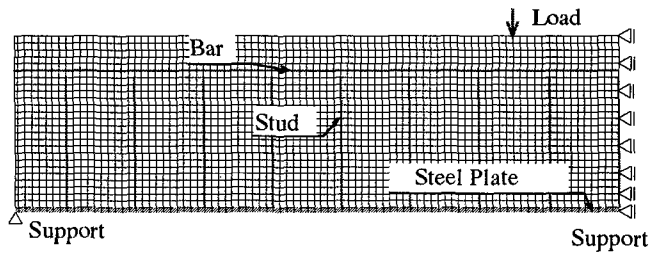


図-8 解析モデル
(正曲げ、スタッド間隔 200mm)

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。解析モデルを図-8 に示す。試験体の対称性から解析モデルは 1/2 対称モデルとし、橋軸方向に 88 分割、鉛直方向に 27 分割とした。鋼板およびコンクリートは 4 節点平面応力要素、スタッドおよび主鉄筋は 2 節点はり要素を用いた。鋼材、コンクリートの応力-ひずみ曲線は、材料試験結果に基づき設定した。表-8、図-9 に、コンクリートの引張側の構成則を示す。なお、ずれ止め機構であるスタッドが柔なずれ止めであることを考慮し、近似要素としてコンクリートと鋼板間に付着を仮定したジョイント要素を挿入した。また、表-9、図-10 に、ジョイント要素に用いた水平バネの構成則を示す¹⁰⁾。鉛直方向に関しては圧縮、引張ともに剛とし、肌離れ現象を無視したモデルとした。

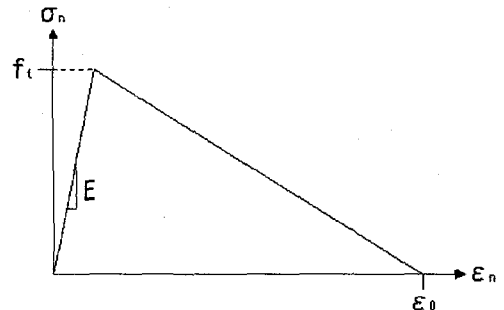


図-9 コンクリートの引張側の構成則

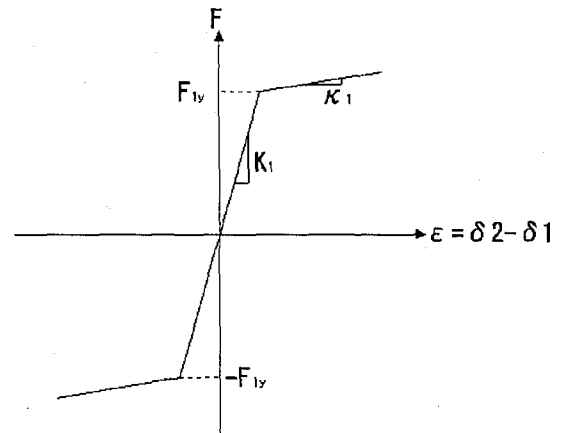


図-10 水平バネ定数

3.3 結果および考察

(1) 曲げ性状

図-11、図-12 に、スタッド間隔の 200mm 正曲げ、負曲げ試験体の荷重-たわみ曲線を示す。

図-11 より、正曲げの荷重初期段階では、短繊維補強種別、ずれ止め種別に関係なくいずれの試験体もほぼ同様の曲げ剛性を示していることがわかる。高荷重域で挙動に差が現れ、無補強の 20T-N が支点部付近から生じたひび割れがコンクリート上縁に達した時にせん断引張破壊したのに対し、短繊維補強した 20T-S、20T-V およびスタッド間隔 100mm の全てのはりは曲げ破壊した。特に、短繊維補強した 20T-S および 20T-V は、曲げ破壊した 10T-N と比較しても極めて靱性に富んだ挙動を示し、引張鋼板の降伏後、載荷点付近のコンクリートが圧壊し終局に至った。

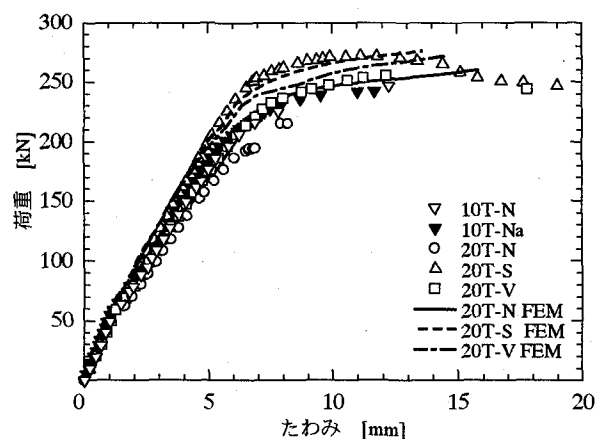


図-11 荷重-たわみ曲線 (正曲げ)

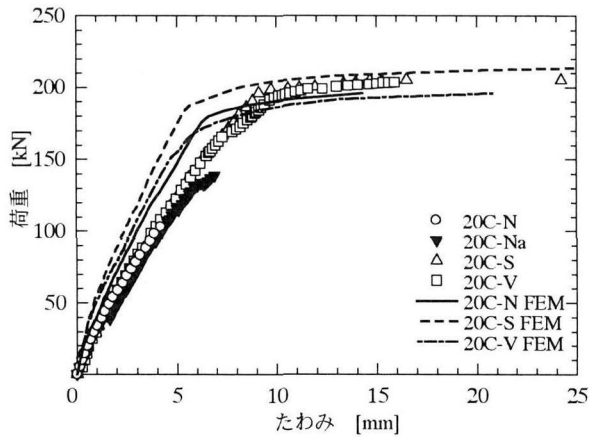


図-12 荷重－たわみ曲線（負曲げ 200mm）

図-12 に示す負曲げでは、正曲げ同様に試験体間の曲げ剛性にほとんど差はみられず、鋼、ビニロン短繊維補強によって靱性に優れたたわみ性状を有することが確認された。スタッド間隔が 100mm の試験体も同様の結果を示した。

また、頭付きスタッドと異形鉄筋ジベルの違いによるたわみ性状の差もほとんどみられなかったことから、異形鉄筋ジベルが頭付きスタッドと同等のずれ止め性能を有していることがわかった。

以上より、正曲げ、負曲げのいずれの場合においても、鋼、ビニロン短繊維によってコンクリートの引張、せん断強度が増加し、はりのせん断耐力が向上するだけでなく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していることがわかる。最大荷重では、鋼繊維が約 30%、ビニロン繊維が 20% の耐力増加を示しており、これらの結果は前述の材料試験結果の引張、せん断強度の改善効果を反映した結果といえる。

図-13 は、正曲げでの荷重と鋼板－コンクリート間の相対ずれを示している。同図より、短繊維補強した方がずれ量が小さく、特に鋼繊維補強によって鋼板－コンクリート間のずれおよびひび割れの抑制がみられることがわかった。また、試験体では付着の影響で短繊維補強コンクリートのずれの発生が高荷重域にずれ込んでいるものの、FEM モデルは安全側でほぼ同じ傾きを再現していることがわかる。

図-14 はスタッド間隔 200mm の正曲げ試験体におけるコンクリート上縁、鋼板下縁の荷重とひずみの関係を示す。同図より、20T-N は鋼板が降伏する前に破壊に至り、せん断破壊していることがわかる。20T-S、20T-V は鋼板降伏前後でコンクリートのひずみが 3500 μ を超過し圧壊したことを裏付けられる結果を示した。いずれの結果も FEM 解析とほぼ一致しており精度良く解析できたと考えられる。

(2) ひび割れ性状

図-15 に、曲げ試験および FEM 解析によるひび割れ

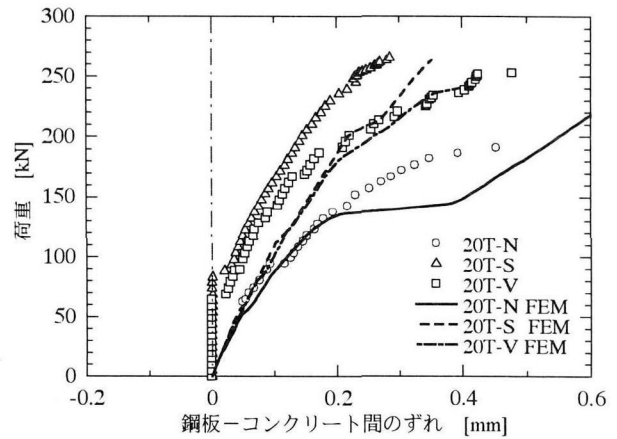


図-13 荷重と相対ずれの関係（支点近傍）

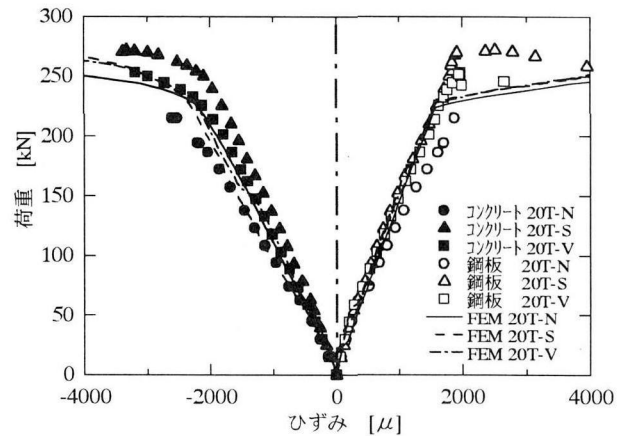
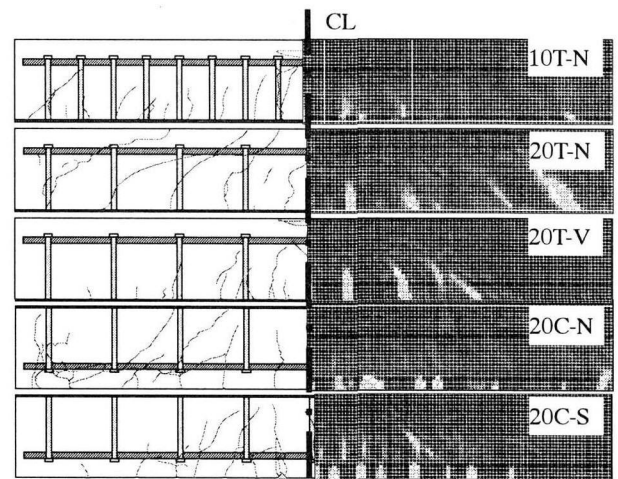


図-14 コンクリート上縁、鋼板下縁の荷重－ひずみの関係



(a) 試験結果 (b) FEM 解析結果

図-15 ひび割れ性状

状況を示す。同図より、正曲げの試験体を比較すると、スタッド間隔が 100mm の密な配置の 10T-N はスタッドに沿ってひび割れが分散しており、スタッドがせん断補強として十分に機能していることがわかる。一方、スタッド間隔が 200mm の 20T-N ではひび割れの分散性も劣り、斜引張りひび割れが発生し、スタッドによるせん断補強が十分でないことを示している。しかしながら、同構

表-10 はり試験体の終局耐力

試験体	① 比重 ρ	② 脆度 f_c/f_t $1/\xi$	③ 試験値 P_E [kN]	④ 曲げ耐力 P_B [kN]	⑤ P_E/P_B	⑥せん断耐力			⑦ $P_E/(P_C+P_S)$	⑧ 破壊 形式
						コンクリート P_C	スタッド P_S	P_C+P_S		
						[kN]	[kN]	[kN]		
※N10T	2.30	10.0	265	200	1.33	154	434	588	(0.45 ↑)	曲げ
10T-N	1.44	18.0	247	204	1.21	108	610	718	(0.34 ↑)	曲げ
10T-Na	1.43	18.0	242	203	1.19	108	610	718	(0.34 ↑)	曲げ
20T-N	1.45	19.4	215	203	-	103	434	537	0.40	せん断
20T-Na	1.45	18.0	200	203	-	108	434	542	0.37	せん断
20T-S	1.53	8.4	273	199	1.37	174	434	608	(0.45 ↑)	曲げ
20T-V	1.53	12.0	255	204	1.25	137	434	571	(0.45 ↑)	曲げ
※UL20T	1.26	16.0	197	203	-	115	434	549	0.36	せん断
※N10C	2.30	10.0	266	240	1.11	120	344	464	(0.57 ↑)	曲げ
10C-N	1.44	19.2	151	241	-	81	482	563	0.27	せん断
10C-Na	1.46	17.7	151	241	-	84	482	566	0.27	せん断
10C-S	1.49	9.5	216	241	0.90	125	482	607	(0.36 ↑)	曲げ
10C-V	1.47	11.7	212	241	0.88	108	482	590	(0.36 ↑)	曲げ
20C-N	1.48	19.4	103	241	-	80	344	424	0.24	せん断
20C-Na	1.43	18.0	139	241	-	84	344	428	0.32	せん断
20C-S	1.52	8.4	209	240	0.87	136	344	480	(0.44 ↑)	曲げ
20C-V	1.47	12.0	203	241	0.84	106	344	450	(0.45 ↑)	曲げ
※UL20C	1.26	16.0	215	241	-	89	344	433	0.50	せん断

※参照：参考文献¹⁰⁾

造でもビニロン短繊維によって補強された 20T-V は、20T-N で斜引張りひ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、鋼短繊維でも同様であることが確認された。また、FEM 解析は、スタッド配置および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、試験結果を精度良く解析できている。なお、曲げひび割れの分散性については、短繊維補強によりやや改善はみられるものの長尺スタッドや異形鉄筋ジベルの配置量を増加させる程の顕著な効果は認められない。

(3) 曲げ耐力

試験体の曲げ耐力は、コンクリート示方書や道路橋示方書に規定される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を準用して算出した。

表-10 に、破壊性状、試験時の最大荷重 P_E 、曲げ耐力計算値 P_B 、その比 P_E/P_B を示す。これより、正曲げのスタッド間隔 100mm の 10T-N およびスタッド間隔 200mm の 20T-S、20T-V はいずれも P_E/P_B が 1.0 以上を示し、安全側にあることがわかった。無補強の 20T-N がせん断破壊していることから、スタッド間隔が広い場合でも短繊維補強によってコンクリートの靱性が向上し、10T-N 以上に耐力が増加することがわかった。鋼繊維の方が、ビニロン繊維よりも 10% 以上大きい耐力を示し、前章の材料特性を反映していることが確認された。一方、負曲げ試験では、普通コンクリートを用いた N10C¹⁰⁾ が P_E/P_B で 1.0 以上を示した以外は、短繊維補強した超軽量コンク

リートを用いた 10C-S、10C-V、20C-S、20C-V のいずれも 1.0 を下回った。これは、スタッド基部付近のコンクリートの破壊にともない鋼板との合成度が低下し、さらに鋼板の局部座屈が生じたことが曲げ耐力低下の原因としてあげられる。しかしながら、短繊維補強により、10C-N や 20C-N と比較して約 40% の破壊荷重の増加がみられ、せん断破壊を回避したことは注目すべきものと思われる。

以上より、圧縮鋼板の局部座屈したケースを除けば、既存の RC 曲げ耐力式は、短繊維補強した超軽量コンクリート曲げ部材の耐力評価式としても十分適用可能と考えられる。

(4) せん断耐力

表-10 に、コンクリートのせん断耐力 P_C および止め補強筋のせん断耐力 P_S とその和を示す。

軽量コンクリートを用いた場合のコンクリートのせん断耐力 P_C の低減係数は、コンクリート標準示方書で一律、普通コンクリートの 0.7 と規定されているが、舟橋らはコンクリートの比重に依存する低減係数 η_T を式(1)のとおりに提案している⁹⁾。しかし、式(1)を低減係数とした場合、超軽量、軽量コンクリートのように比重の小さいコンクリートのせん断耐力式として有用であるが、本研究のように短繊維補強したコンクリートの補強効果をせん断耐力に反映できない。すなわち、コンクリートのせん断耐力の算定において、 η_T を用いた場合、骨材強度の違いや短繊維補強効果を反映することが困難なため、骨

材強度の小さい軽量骨材を使用した場合に算定値が過大になる危険性、あるいは本試験のように短繊維を混入した場合の算出では逆に過小評価されることが考えられる。

そこで本研究では P_c は引張、せん断特性に密接に関係している脆度係数を変数に持つ式(2)¹¹⁾を低減係数として採用し、一般的に用いられる二羽ら¹²⁾のせん断耐力算定式に低減係数 η'_T を乗じて荷重換算した式(3)により算出した。

$$\eta_T = (\rho / 2300)^{1/2} \quad (1)$$

$$\eta'_T = 0.84\eta_\xi + 0.32, \quad \eta_\xi = \xi / \xi_N \quad (2)$$

$$P_c = 2\eta'_T \cdot 0.20(0.75 + 1.4d/a)f_c^{1/3}(1000/d)^{1/4}p_w^{1/3}b_w d \quad (3)$$

ここに、 η_T 、 η'_T ：低減係数、 ξ ：軽量コンクリートの引張強度比 f_t/f'_c 、 ξ_N ：普通コンクリートの引張強度比 f_t/f'_c 、 P_c ：コンクリートの負担するせん断耐力 (N)、 a ：はりのせん断スパン長 (mm)、 d ：はりの有効高さ (mm)、 f'_c ：コンクリートの圧縮強度 (N/mm²)、 f_t ：コンクリートの引張強度、 p_w ：主鉄筋 (%)、 b_w ：はりの幅 (mm)

また、せん断補強筋としてのスタッドのせん断耐力 P_s は、通常のせん断補強筋の耐力算定式が、コンクリートの圧縮強度や引張強度といった材料特性に依存しないことから、コンクリートの材料特性の違いを無視し、スタッドあるいは異形鉄筋ジベルをせん断補強筋として算出した。

表より、正・負曲げのいずれのケースにおいても同一せん断補強筋量の短繊維補強コンクリートでは、コンクリートのせん断耐力増加により、せん断破壊を回避して曲げ破壊となったこと、またせん断破壊した短繊維無補強の超軽量コンクリートの場合でも、スタッドの配置間隔を 200mm から 100mm に短縮してせん断補強筋量を増加させることにより、合成はりのせん断耐力が向上していることが明確に認められる。

図-16 に、スタッドの配置間隔 200mm の全試験体について、脆度係数の逆数と試験値 P_E の関係を示す。同図中には、曲げ破壊した試験体についても白抜きマークで示しており、実際にはこれ以上のせん断耐力を有すると推測される。同図より、コンクリートの圧縮強度や正・負曲げによる鉄筋量、補強に用いた短繊維の種別が異なるものを含んでいるものの、はりのせん断耐力は脆度の逆数を表す引張強度比に対して正の相関を示しており、前掲の低減係数 η'_T 導入の妥当性を示唆していることがわかる。

以上より、繊維の種別を問わず、超軽量コンクリートに短繊維を混入して脆度係数を改善することと、ずれ止め併用の長尺スタッドを密に配置することにより、本合成部材のせん断耐力の向上効果が期待できることが明らかにされた。

しかし、表-10 中の耐力比からもわかるように、本実験ではスタッドや異形鉄筋ジベルの配置間隔がせん断補

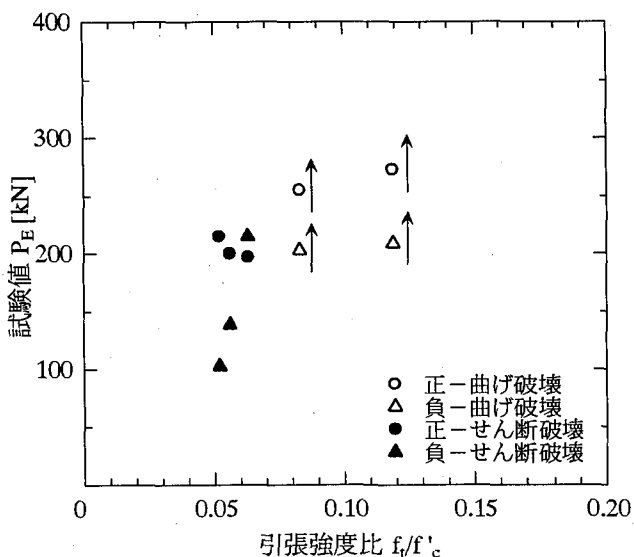


図-16 $P_E - f_t/f'_c$ の関係

強筋としては過大であったことや、通常 RC 部材のスタッドのような閉断面ではなく、先端部がフレキシブルな定着状態になっていること等から、せん断補強筋としてのスタッドの分担せん断耐力は試験値と比較して過大評価となった。したがって、スタッドや異形鉄筋ジベルをせん断補強筋として併用した場合のせん断耐力の定量的評価については、さらに検討を重ねる必要がある。

4. まとめ

本研究では、超軽量コンクリートを用いた鋼・コンクリート合成構造部材への適用を図るため、最初にその短所とされるコンクリートの引張、せん断強度特性を改善可能な鋼、ビニロン短繊維に着目し、材料特性について検証を行った。次に、短繊維補強した超軽量コンクリートを用いて、合成はりを製作し、曲げせん断性状に対する短繊維補強効果について考察するとともに、ずれ止めとして配置される長尺スタッドおよび異形鉄筋ジベルのせん断補強筋としての効果についても検討を行った。試験結果から以下のことが得られた。

材料試験から、

- (1) 圧縮、引張強度試験から同一圧縮強度を有する普通コンクリートと比較して、短繊維無補強の超軽量・軽量コンクリートは引張強度で 10~20%低下するが、鋼、ビニロン短繊維を 1.0%程度混入することで 1.2~1.4 倍に増加し、脆度係数も普通コンクリートと同等以上に改善された。補強効果としては、特に鋼短繊維の補強効果が大きいことがわかった。
- (2) 曲げ強度試験から、超軽量・軽量コンクリートは短繊維補強によって曲げ強度が増加し、普通コンクリートと比較すると無混入時は 0.8 倍程度であったが、混入率 1.0% で 1.1~1.3 倍となり、部材の曲げ降伏後のエネルギー吸収の改善効果がみられ、靱性に優れた挙動を示した。

- (3) セン断強度試験から、混入率 1.0% で普通コンクリートとほぼ同等のせん断強度を有することがわかった。
 - (4) 単位水量を増加させずに、高性能 AE 減水剤および増粘剤によって、良好なワーカビリティを有する超軽量コンクリートが製作できた一方で、1.5% 以上の短繊維の混入は場合によっては充填不良を起こす可能性があり、用途や現場条件を熟慮した上で最適な配合を決定する必要がある。
- 合成はりの曲げ試験から、
- (5) 鋼、ビニロン短繊維を 1.0% 程度混入することで、破壊荷重は正曲げで 20~30%、負曲げでは 50% 以上の増加がみられ、せん断破壊を回避し、靱性に富んだ曲げ挙動を示すことが確認された。
 - (6) 短繊維補強した超軽量コンクリートの曲げ耐力は、正曲げでは試験値が既存の RC 曲げ耐力算定式による計算値に対して 10~30% の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。
 - (7) 合成はりのせん断耐力と脆度係数の逆数には、正の相関関係があることが確認された。
 - (8) コンクリートのせん断耐力の算出方法として、脆度に依存する低減係数を用いることで、コンクリートの比重と短繊維補強の有無による両者の影響を明確に反映することができた。
 - (9) 長尺スタッドおよび異形鉄筋ジベルのせん断補強筋としての効果は、その配置間隔が過大であったことや、スターラップと異なるずれ止め先端のフレキシブルな構造上の違いから計算値よりも小さくなった。

謝辞

本研究に際し、太平洋セメント(株)、神鋼建材工業(株)、(株)クラレならびにサンフロー(株)より材料提供等、多大のご協力を戴きました。また試験の実施に際し、九州大学大学院の山口浩平氏、尾上佑介氏ならびに田北亮平氏よりご助言・ご協力を戴きました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 日本コンクリート工学協会, 高性能軽量コンクリート研究委員会報告書, 2000 年 8 月
- 2) 九々正武ほか, 超軽量骨材を使用した軽量コンクリートの物性, 軽量コンクリートの性能の多様化と利用の拡大に関するシンポジウム論文集, pp.5-pp.10, 2000 年 8 月
- 3) 前堀伸平ほか, 高性能軽量骨材を用いた大型 PC はりのせん断耐荷性状, 軽量コンクリートの性能の多様化と利用の拡大に関するシンポジウム論文集, pp.95-pp.100, 2000 年 8 月
- 4) 松井繁之ほか, 人工軽量骨材の道路橋床版への適用を目指した疲労耐久性に関する研究, 軽量コンクリートの性能の多様化と利用の拡大に関するシンポジウム論文集, pp.119-pp.126, 2000 年 8 月
- 5) 柴田辰正ほか, 超軽量骨材を使用したコンクリートの破壊性状に関する考察, コンクリート工学年次論文報告集 Vol.20, No.2, pp.49-pp.54, 1998 年
- 6) 舟橋政司ほか, 高性能軽量コンクリートを用いた RC 梁のせん断耐力, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.3, pp.919-pp.924, 2001 年
- 7) 中村裕ほか, 鋼繊維補強軽量コンクリートの力学的特性に関する基礎的研究, セメント・コンクリート論文集 No.51, pp.736-pp.741, 1997 年
- 8) 金久保利之ほか, ビニロン繊維補強軽量コンクリートの基礎物性, 軽量コンクリートの性能の多様化と利用の拡大に関するシンポジウム論文集, pp.35-pp.40, 2000 年 8 月
- 9) 土木学会, 鋼繊維補強コンクリート設計施工指針(案), 1983 年 3 月
- 10) 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, 第 16 号, 2000 年 12 月
- 11) 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-pp.918, 2001 年
- 12) 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, 372 号/V-5, pp.167-pp.176, 1986 年 8 月

(2001 年 9 月 14 日受付)