論文 短繊維およびせん断補強筋で補強した超軽量はりのせん断特性 に関する実験的研究

合田 寛基*1・日野 伸一*2・尾上 佑介*3・田北 亮平*3

要旨: 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に関する基礎的研究として,同コンクリートを用いた単純合成はりの静的曲げ試験を実施し,長尺ずれ止め長さ,ずれ止め頭部径ならびに短繊維混入によるせん断補強効果について検討した。この結果より,長尺ずれ止めと短繊維を合わせることで理想的なせん断補強が可能となることが示された。また,合成はりのせん断破壊形式は,スターラップをせん断補強筋とするRCはりと異なり,ずれ止め頭部の引抜き作用にともなう超軽量コンクリートの引張破壊によることから,この破壊形式を反映した仮定に基づくせん断耐力評価法の有意性が示された。キーワード: 超軽量コンクリート,短繊維,せん断耐力

1. はじめに

近年,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,施工面での合理的設計が可 能になると期待されている。一方,せん断補強筋 としてのずれ止めの併用は,現場の施工簡略化, 合理化への一方策として検討がなされている。 既往の研究より、せん断補強効果を併用するず れ止めを長尺化した鋼・超軽量コンクリート合 成はりは,設計上の曲げ耐力がせん断耐力以下 の場合でもせん断破壊する場合があることが報 告されている)。これは,同コンクリートの骨材 強度が小さく,ずれ止めの配置間隔によっては, ずれ止め頭部近傍のコンクリートが引張破壊す ることが原因とされている。その改善策として、 引張・せん断強度の向上に有用な短繊維補強に 着目し、同補強を行った超軽量コンクリートの 合成はりへの適用が試みられている。しかしな がら,未だ長尺ずれ止め形状,短繊維種別が合成 はりのせん断特性に与える影響や各せん断補強 の組合せと破壊メカニズムの相関性、ならびに せん断耐力の評価に課題を有している。

そこで本論文では,まず,超軽量コンクリート を用いたRCはりの静的曲げ試験を実施し,ス ターラップと短繊維によるそれぞれのせん断補強効果について検証した。次に,ずれ止め機能とせん断抵抗機能を併せ持つ長尺スタッドを使用した超軽量コンクリート合成はりの静的曲げ試験を実施し,破壊メカニズムの解明,ならびに短繊維とずれ止め形状に着目したせん断補強効果について,既往のせん断耐力算定式の適用性とあわせて検討を行った。

- 2. 短繊維ならびにスターラップによる超軽 量 RC はりのせん断補強効果の検証
- 2.1 目的および試験方法

本章では,せん断補強筋としてスターラップと短繊維を用いた超軽量RCはりの静的曲げ試験を実施し,せん断補強効果の評価と破壊メカニズムについて検証した。なお,本研究では,土木学会,建築学会の軽量コンクリートの定義を基に,人工軽量骨材を使用した比重1.70未満のコンクリートを超軽量コンクリートと定義した。

試験体概要ならびに構造一般図をそれぞれ表 - 1,図-1に示す。試験体は,幅200mm,高 さ300mm(有効高さ253mm),支間長1750mmと し,主鉄筋としてSD345のD19を圧縮側に2本, D22(RC2シリーズのみD19)を引張側に3本配置

- *1 九州工業大学 助手 工学部建設社会工学科 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 九州大学大学院 工学府 都市環境システム工学専攻 (非会員)

表 - 1 試験体概要

繊維種別	スターラップ形状 (鉄筋径, せん断補強鉄筋比)					
小戏小正了王刀丁	無配筋	D13, 1.3%	D6, 0.3%			
	RC1シリーズ	RC2シリーズ	RC3シリーズ			
無補強	RC1-N	RC2-N	RC3-N			
ビニロン	RC1-V	RC2-V	RC3-V			
鋼	RC1-S	RC2-S	RC3-S			

表 - 2	骨材種別	
++ 14 Ful	絶乾密度	24h吸水率

骨材	種別	#С+2 ш7Х [g/cm ³]	[%]
粗骨材	人工軽量	0.87	10.3
細骨材	人工軽量	1.65	10.0

表 - 3 示方配合

Air	W/C	s/a	単位量 [kg/m³]				
[%]	[%]	[%]	W	C	S	G	SP
5.0	50	43	180	360	459	345	3.6

表 - 4 コンクリート材料特性

繊維 種別	密度	圧縮強度	引張強度	f' _c /f' _t	ヤング係数
	$ ho[{ m g/cm}^3]$	$f_c[N/mm^2]$	$f_t'[N/mm^2]$	'c/'t	[N/mm ²]
無補強	1.47	36.3	1.81	20.1	1.36E+04
ピニロン	1.53	37.7	3.31	11.4	1.50E+04
鋼	1.53	31.6	3.78	8.4	1.52E+04

表 - 5 鋼材材料特性

	鋼材	呼び名 または径	規格	降伏強度	ヤング係数			
			<i>N</i> T10	$[N/mm^2]$	$[N/mm^2]$			
	鋼板	-	SS400	271	1.72E+05			
	鉄筋	D19	SD345	367	1.85E+05			
	ずれ止め	φ19	JIS B 1198	324	2.06E+05			

した単純RCはりである。パラメータは,スターラップのせん断補強筋量,短繊維種別である。RC1シリーズはスターラップを配筋せず,RC2シリーズは曲げ破壊を,RC3シリーズはスターラップ降伏後のせん断破壊を想定して,せん断補強筋量を決定した。せん断補強比は,RC2シリーズでは1.3%,RC3シリーズでは0.3%とした。

本章の超軽量コンクリートは,粗骨材,細骨材に膨張岩を原料とした人工軽量骨材を使用した。配合は,比重が1.47,目標スランプが18 ± 2cm,水中養生14日時点の目標圧縮強度が約35N/mm²となるように設計した。短繊維は, 0.60mm, L30mmのインデント型鋼短繊維, 0.66mm, L30mmのストレート型ビニロン短繊維を使用し,体積比で1.0%相当量を混入した。コンクリート

表 - 6 曲げ・せん断耐力照査

	試駁	€値	計算	試験値/	
試験体	破壊形式	最大 荷重 P _{MAX} [kN]	曲げ 耐力 Pu [kN]	せん断 耐力 Pu' [kN]	武 計算値 (破壊形式 を考慮)
RC1-N	せん断	93	276	99	0.94
RC1-V	せん断	157	278	133	1.18
RC1-S	せん断	208	275	146	1.42
RC2-N	曲げ	242	210	533	1.15
RC2-V	曲げ	253	207	562	1.22
RC2-S	曲げ	277	207	573	1.34
RC3-N	せん断	196	278	191	1.03
RC3-V	せん断	298	276	222	1.34
RC3-S	せん断	286	270	233	1.23

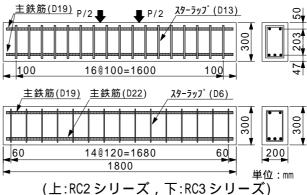


図 - 1 試験体構造一般図

の材料諸元を表 - 2 ,表 - 3 ,表 - 4 ,鋼材の材料諸元を表 - 5 にそれぞれ示す。試験体の養生は,2週間の気中養生とした。載荷方法は,支間中央から150mm支点側への2点線載荷とした。

2.2 結果および考察

(1) 耐力照查

表・6に,試験結果ならびに曲げ,せん断耐力 照査を示す。曲げ耐力計算値は,等価応力ブロック法を用いたRCはり理論に基づき算出した。せん断耐力計算値は,コンクリートとせん断補強筋のそれぞれが負担する耐力の和とした。コンクリートの負担するせん断耐力は,コンクリート標準示方書に準じて算出したが,軽量コンクリートを考慮した低減係数 については同書を引張強度で除した脆度を用い,多様な軽量コンクリートに対してそれぞれの引張特性を反映した低減係数 が得られることから,本研究で

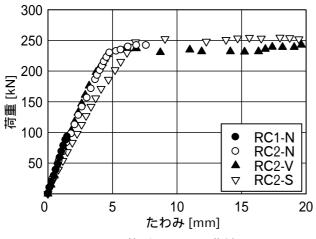


図 - 2 荷重 - たわみ曲線

採用した。また,スターラップ負担分は二羽らの 修正トラス理論に準じて算出した³⁾。

$$=0.84 \cdot / + 0.32$$
 (1)
ここで, : 超軽量コンクリートの脆度の逆数,
、: 普通コンクリートの脆度の逆数とする。

同表より, せん断破壊したRC1-N, RC3-Nは, せん断耐力計算値が概ね試験値と一致したが, 短繊維補強したRC1-V, RC1-S, RC3-V, RC3-S では試験値の1.3 倍以上を示した。これより,式(1)の低減係数 では短繊維補強効果を過小評価していることがわかった。また,曲げ破壊した試験体についても同様に, RC2-N では試験値が曲げ耐力計算値の1.15 倍を示したが, RC2-V, RC2-S では計算値の $1.2 \sim 1.4$ 倍となった。

(2) たわみ性状

図・2に,RC1,RC2シリーズでの荷重とたわみの関係を示す。同図より,スターラップを適切に配筋したRC2-Nは無配筋のRC1-Nと比較して,大幅な荷重の増加がみられ,設計どおり曲げ破壊した。一方,短繊維補強したRC2-V,RC2-Sでは,荷重の増加はRC2-Nと比較して微増であったが,終局たわみが3倍以上と非常に靭性に富んだ挙動を示すことが確認された。

(3) スターラップのひずみ性状

図・3に,RC3シリーズの荷重とスターラップのひずみの関係を示す。同図より,RC3-Nではひび割れ発生荷重に相当する約100kNを超過後にひずみが増加し始めており,スターラップがせん断補強筋として効果的に作用していること

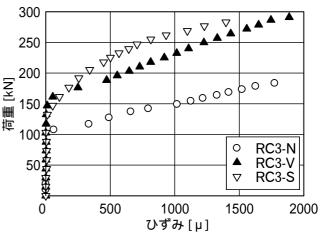


図 - 3 荷重 - ひずみ曲線(スターラップ)

がわかる。またRC3-V,RC3-Sでは,150kN付近までひずみの増加がみられず,またその後の増加勾配が緩やかであった。これより,短繊維補強された超軽量コンクリートの引張強度の増加,ならびに短繊維によるひび割れ発生後のせん断抵抗の存在が,結果としてはりのせん断耐力の向上に寄与したものと考えられる。

以上より,RC はりに短繊維補強を行った場合,曲げ破壊を想定した設計ではその靭性が大幅に向上し,RCはり理論に基づく計算値の1.3倍程度の耐荷力を有していた。また,せん断破壊する場合でも,短繊維補強が引張強度の増加とせん断耐力の負担をすることで,耐荷力の向上が期待できることが示された。いずれの場合も,計算値が試験値に対して若干ながら過小評価となっており,さらに検討を重ねる必要があると考えられる。

3. ずれ止め形状に着目した短繊維補強合成はりのせん断耐力

3.1 目的および試験方法

本章では,長尺ずれ止めである頭付きスタッドの頭部形状ならびに長さを変化させた鋼・超軽量コンクリート合成はりの静的曲げ試験を行い,せん断破壊メカニズムならびに適切なせん断耐力算定法の選定について検証した。

試験体概要ならびに試験体構造一般図を,それぞれを表-7,図-4に示す。試験体は,ずれ止めを配置した底鋼板に超軽量コンクリートを

表 - 7 供試体概要

6±644.1 ₹ □11	ずれ止め形状 (頭部径*ずれ止め長さ)						
繊維種別	L32シリーズ	S32シリーズ	L45シリーズ				
	φ32*H200	φ32*H60	φ 45*H200				
無補強	L32-N	S32-N	L45-N				
ビニロン	L32-V	S32-V	ı				
錙	L32-S	S32-S	-				

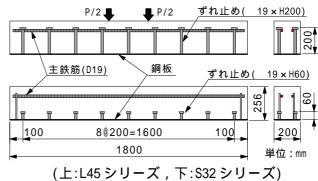


図 - 4 試験体構造一般図

表 - 8 曲げ・せん断耐力照査

	試験値		計算値				試験値/
= 55541		最大	曲げ	せん断耐力 [kN]			計算値
試験体	破壊形式	荷重 P _{MAX}	耐力 Pu	コンク リート	せん断 補強筋	P _C +P _S	(破壊形式 を考慮)
		[kN]	[kN]	Pc	Ps	Pu'	とうぶ/
	せん断	215	203	93	96	189	1.14
L32-N	せん断	216	257	98	83	181	1.19
	せん断	231	257	99	90	189	1.22
L32-V	曲げ	255	204	135	96	231	(1.25)
L32-S	曲げ	273	201	159	87	246	(1.36)
S32-N	せん断	117	256	97	_	-	1.21
S32-V	せん断	239	256	137	_	-	1.74
S32-S	せん断	254	253	151	_	-	1.68
L45-N	せん断	276	257	99	149	248	1.11
L43-IV	せん断	262	257	99	144	243	1.08



ずれ止め径 32mm (通常型)



ずれ止め径 45mm (提案型)

写真 - 1 ずれ止め頭部形状

打設した単純合成はりで,試験体寸法は,前章のRCはりと等価な断面となるように設計した。本試験では,引張鋼材として,SS400(t=6mm)の鋼板を使用したため,試験体高さを256mm(有効高さ253mm)とした。パラメータは,短繊維種別,ずれ止めの長さおよび頭部径である。

主鉄筋は,圧縮域に SD345 の D19 を各 2 本配置した。ずれ止めは, JIS B 1198 規格の 19mm を長尺用 H200mm,短尺用 H60mm に調整し,配置間隔 200mm で各 2 本配置した。ずれ止め頭部径は,通常径 32mmと圧縮域コンクリートへの定着力向上を意図した大型径 45mmの2種類を使用した。ずれ止め頭部形状を写真 - 1 に示す。

3.2 試験結果および考察

(1) 終局耐力

試験結果ならびに曲げ,せん断耐力照査を表 - 8に示す。曲げ耐力,コンクリートの負担するせん断耐力の計算方法は,前章と同様とした。

せん断補強筋の負担するせん断耐力は,立石

らの仮定を用いて算出した⁴⁾。これは,長尺ずれ 止めの降伏前に、ずれ止め頭部近傍のコンク リートにずれ止めの引抜き作用による局所的な 引張力が生じ,水平方向のひび割れをともなっ て破壊する仮定に基づいている。このとき、引張 力が発生しているコンクリート領域を,図-5 に示す水平抵抗領域と定義した。同図中の実線 は,水平抵抗領域を含む破壊面を示す。水平抵抗 領域の始点は,載荷板の端から支点方向に45度 の傾斜角で下ろした直線がずれ止め頭部に達す る位置とした。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。立 石らは,この仮定を普通コンクリート合成床版 の押抜きせん断を対象に提案している。本研究 では,骨材強度の小さい軽量コンクリートを用 いたはりの曲げ作用時にも同様の現象が発生す ると推察し、検証を行った。

せん断破壊した試験体のうち,短繊維補強し

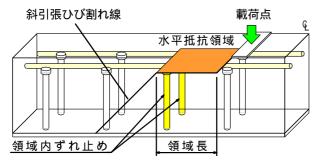


図 - 5 水平抵抗領域概念図

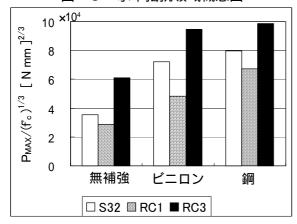


図 - 6 短繊維によるせん断補強効果の比較

ていない L32-N , L45-N , S32-N は , 立石らの仮定通りの破壊形式を示しており , この仮定を用いて算出した表 - 7のせん断耐力計算値と試験値が概ね一致した。これより ,ずれ止めの降伏前にせん断破壊した場合のせん断耐力は , 試験時の破壊形式を基に評価が可能であることが示された。一方で , 短繊維補強した S32-V ならびに S32-S では , 計算値と試験値に差が認められた。この原因として , 前章の RC はりと同様に , コンクリートの負担するせん断耐力計算値が過小評価であったことがあげられる。

せん断補強効果を比較すると,長尺ずれ止めのみの L32-N,短繊維補強のみの S32-V,S32-Sがそれぞれ S32-N の約 2 倍のせん断耐力を有し,それぞれのせん断補強効果はほぼ同じであった。

長尺ずれ止めと短繊維補強を併用したL32-V, L32-Sは曲げ破壊し,両者の適切な補強によりせ ん断耐力が大幅に向上し,普通コンクリート合 成はりと同様に曲げ破壊することが示された。

(2) はり構造と短繊維に着目したせん断補強 効果の比較

前章のせん断破壊したRCはりはスターラップ

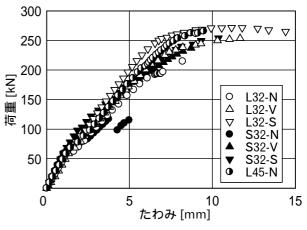


図 - 7 荷重 - たわみ曲線

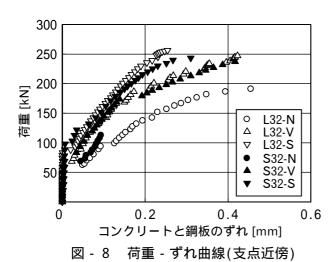
の降伏後に変形が進行し 斜引張ひび割れの発生 したコンクリート境界面でせん断破壊した。一 方 ,合成はりはせん断補強筋であるずれ止めが降 伏する前に本文中に記した水平方向のひび割れが 先行し , 斜引張ひび割れと交差して破壊した。

図・6にせん断破壊した各試験体について,最大荷重Pを圧縮強度の立方根f'c^{1/3}で除した値を示す。f'c^{1/3}で除したのは,各試験体間のコンクリート圧縮強度のばらつきによる影響を考慮するとともに,せん断耐力計算式の係数としての評価を検討するためである。同図より,断面剛性が同じ場合では,引張鋼板の拘束効果によって,合成はりがRCはりよりせん断耐力が大きいことがわかった。また,はりの構造形式によらず,ビニロン・鋼短繊維のせん断補強効果は,ほぼ定量的な荷重増加として現れた。これより,短繊維補強は,はりの構造形式やせん断補強筋種別によらず、定量的にコンクリートの強度特性に依存する低減係数として評価可能であると考えられる。

(3) たわみ性状

図 - 7は ,ずれ止め長さとずれ止め頭部径に着目した荷重とたわみの関係を示す。同図より , L32-V , L32-S は , 最大たわみ量が 40mm 以上と靭性と富んだ挙動を示した。これより ,短繊維とずれ止めの併用によって ,合成はりは高靭性で安定した耐荷特性を有することが示された。

また,ずれ止め頭部面積を約2倍にしたL45-Nは,せん断破壊したものの最大荷重がL32-Nの約1.2倍に増大し,曲げ耐力計算値も上回る終局耐



力であった。以上より,ずれ止め頭部の大型化はせん断耐力を大きく向上させることがわかった。

(4) ずれ性状

図・8に,パイ型変位計により測定した支点 近傍の鋼板・コンクリート間の相対ずれと荷重 の関係を示す。同図より,荷重初期段階では,鋼 板とコンクリートの付着によって,両者のずれ は生じず,曲げ作用によるひび割れ発生荷重に 相当する60~70kNでずれが生じた。また,ずれ 止め長さによるずれ性状の相違は軽微である一 方,繊維無補強の有無によるずれ性状に大きな 差がみられた。このことから,ひび割れ発生後の ずれの抑制に対して,特に短繊維補強が効果的 であることがわかった。

(5) ずれ止めのひずみ性状

図 - 9は,L32-N,L45-Nにおけるずれ止めひずみと荷重の関係を示す。同図より,L32-Nは,350~600 μで終局状態になっているが,頭部径を大型化したL45-Nでは安定して750~800 μまでひずみ量の増加がみられた。以上より,ずれ止めの引張力に抵抗するコンクリート領域が増大していることから,ずれ止め頭部径とせん断補強筋の負担するせん断耐力の相関性が示された。

4. まとめ

試験結果から以下の知見が得られた。

(1) 合成はりにおいて ,長尺ずれ止めによるせん 断補強効果が確認され ,短繊維補強によりコンクリートの引張強度が向上した。また ,は

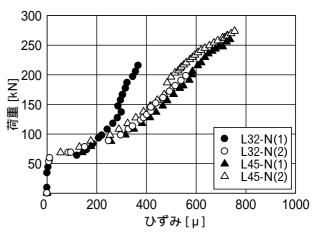


図 - 9 荷重 - ひずみ曲線(ずれ止め)

りは2つのせん断補強の組合わせで,靭性に 富んだ挙動を示し,曲げ破壊へと移行する。

- (2) 短繊維補強はりについて ,等価応力ブロック を用いた曲げ耐力計算値と ,脆度に基づく低 減係数を用いたコンクリートのせん断耐力計 算値は , 試験値に対して過小評価となった。
- (3) 短繊維無補強の合成はりは,ずれ止め頭部の 引抜き作用にともなう超軽量コンクリートの 引張破壊により破壊に至ったことから,ずれ 止めのせん断耐力は,ずれ止めに作用する引 張力とずれ止め周辺のコンクリートに作用す る引張力の関係から評価可能である。

参考文献

- 1) 合田寛基ほか: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,コンクリート工学年次 論文集,No.24-2,pp.1359-1364,2002
- 2) 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
- 3) 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
- 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