# 論文 短繊維補強された RC はりのせん断耐力に関する研究

## 児玉 亘<sup>\*1</sup>·大寺 一清<sup>\*1</sup>·二羽 淳一郎<sup>\*2</sup>

要旨:現在では,多くの種類のコンクリート補強用短繊維が開発されているが,それぞれの 繊維を使用した RC はりのせん断耐力を適切に評価できる手法は確立されていない。本研究 では,短繊維補強が,RC はりのせん断耐力に与える影響を検討し,破壊力学特性と斜めひ び割れの幅・角度を用いて,せん断耐力推定手法の提案を行った。そして,せん断耐力を妥 当な精度で推定できることを確認した。また,鋼繊維と合成繊維を同時に使用することで, 鋼繊維を単体で使用するよりも,破壊力学特性・せん断耐力が大きくなることを確認した。 キーワード:短繊維補強,鋼繊維,破壊力学特性,せん断耐力,斜めひび割れ

#### 1. はじめに

短繊維補強コンクリートは,コンクリートの 弱点である引張挙動下における破壊力学特性が 改善され,変形性能および靭性に富んだ複合材 料である。現在では,特に,剥落防止を目的と してトンネル覆エコンクリートや高架橋上部構 造に利用されている。しかし,短繊維補強コン クリートの効果は剥落防止だけでなく,RC はり におけるひび割れ発生・進展の抑制効果<sup>1)</sup>や,せ ん断耐力向上効果<sup>2)</sup>などが報告されている。

現在では,多くの種類のコンクリート補強用 短繊維が開発されており,それぞれの繊維を使 用した RC はりのせん断耐力は異なる。しかし, それを適切に評価できる手法はなく,繊維混入 率 1.0~1.5%の鋼繊維補強コンクリートに関し てせん断耐力推定式が提案されている<sup>2)</sup>程度で ある。また,寸法や形状が異なり,新たに開発 される様々な繊維に対し,それぞれせん断耐力 式を設定することは非現実的であり,構造部材 として短繊維補強コンクリートを使用していく ためには,汎用性の高い,せん断耐力推定手法 が必要である。

本研究では,破壊力学的知見に基づき,短繊 維補強された RC はりのせん断耐力推定手法を 提案することを目的として,RC はりのせん断試 験を行った。 2. 実験概要

#### 2.1 実験ケースおよび示方配合

本研究で使用した短繊維の物性値および実験 ケースを表 - 1,表 - 2に示す。使用した短繊 維は鋼繊維およびポリプロプレン繊維(以下 PP 繊維)である。実験では,鋼繊維をコンクリート 体積の 0.5,1.0,1.5,3.0%混入,および鋼繊維 と PP 繊維を 1.5% ずつ混入の計 5 ケースの試験 体を用意した。表 - 3 にコンクリートの示方配 合を示す。示方配合において,短繊維は外割り 計算とした。また,混和剤は,短繊維混入率に 応じて,単位セメント量の 0.3~0.6%添加した。

表 - 1 短繊維の物性値

		-
短繊維種類	鋼繊維	PP繊維
繊維形状	両端フック型	波型
繊維長 (mm)	30	)
断面寸法 (mm)	$f_{0.6}$	1.6×0.6
アスペクト比	50	54.2
密度 (kg/m <sup>3</sup> )	7850	910
引張強度 (MPa)	1000	465
弾性係数 (GPa)	210	15

表-2 実験ケース

試験体名	短繊維種類	繊維混入率(%)
ST05		0.5
ST10	细始	1.0
ST15	<b>亚</b> 则	1.5
ST30		3.0
ST+PP15	鋼繊維+PP繊維	1.5+1.5

\*1 東京工業大学大学院 理工学研究科 土木工学専攻 (正会員)

\*2 東京工業大学大学院 理工学研究科 土木工学専攻 教授 工博 (正会員)

粗骨材の最大寸法	W/C	s/a	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )					
(mm)	(%)	(%)	W	С	S	G	混和剤	短繊維
20	55	50	182	332	884	887	短繊維混入率に応じて変化	外割り計算

表 - 3 示方配合

項目	記号	単位	値		
軸方向鉄筋断面積	$A_s$	$\mathrm{mm}^2$	506.7		
軸方向鉄筋比	$p_w$	%	1.29		
ウェブ幅	$b_w$	mm	100		
せん断スパン長	а	mm	700		
有効高さ	d	mm	200		
せん断スパン有効高さ比	a/d	-	3.5		
せん断耐力*	$V_s$	kN	29.1		
曲げ破壊時の作用せん断力*	$V_b$	kN	99.5		
せん断余裕度	$V_s/V_b$	1	0.29		
* 工统治疗	520MD		て計管		

表 - 4 試験体概要

### 2.2 試験体概要

試験体概要を表 - 4 に,試験体概要図を図 -1 に示す。ここで,式(1)<sup>3)</sup>を用いてせん断耐力V。 を算出した。

$$V_s = 0.20 f_c^{1/3} \left( \frac{d}{1000} \right)^{1/4} p_w^{1/3} \left( 0.75 + 1.4 \frac{d}{a} \right) b_w d \quad (1)$$

せん断破壊先行型となるように,試験体を設 計し,斜め引張破壊が生じるように断面を T 型 とした。また, せん断破壊を試験体片側スパン に限定するため, せん断補強筋(D6 SD295, fwv=325MPa)を試験体の片側に 100mm 間隔で配 置した。軸方向鉄筋には,ネジ状 PC 鋼棒 (D25 SBPD1080, fv=1174MPa)を用い,十分な定着を 確保するために,試験体端部より鉄筋を突出さ せ,ボルトとアンカープレートを設置した。

### 2.3 載荷試験概要

載荷は,油圧式 2000kN 万能試験機を用いて, 図 - 2 に示すように静的 2 点載荷とした。ただ し、斜めひび割れ発生位置を特定するために、 載荷を行い,斜めひび割れ発生位置を特定した 後, 0kN まで除荷を行い, 再び終局に至るまで 載荷を行った。載荷は丸型鋼棒を用いた点載荷 とし,支点は可動支点とした。支圧板と試験体 の間には,2枚のテフロンシートの間にグリース を挟んだ減摩パッドを挿入することで,支点の 水平方向の拘束をなくし,水平反力が生じない ようにした。



測定項目は,荷重,変位(スパン中央および 支点位置), コンクリートの圧縮縁ひずみ(スパ ン中央), 主鉄筋ひずみ(スパン中央), 曲げひ び割れ幅および斜めひび割れ幅である。標点間 100mmの 型変位計を用いて,曲げひび割れ幅 を測定した。斜めひび割れ幅の測定方法を 2.4 示す。

### 2.4 斜めひび割れ幅の測定

本研究では,二軸型亀裂変位計を用いて斜め ひび割れ幅の測定を行った。二軸型亀裂変位計 は,水平方向と垂直方向の変位を計測できる装 置である。以下にその測定方法を示す。

まず,載荷を行い,斜めひび割れ幅発生位置 を特定する。斜めひび割れ発生位置を特定した 後,除荷を行い,二軸型亀裂変位計を斜めひび 割れを跨ぐように設置する。その後,再載荷を 行うことで、斜めひび割れ幅を測定する。除荷 を行った際、斜めひび割れの残留ひび割れ幅は 非常に小さなものであったので,本研究ではこ

れを無視した。また,斜めひび割れは直線的に 進展せず,位置によって角度が異なったため, 斜めひび割れ角度 b は,斜めひび割れが主鉄筋 位置と交わる点と載荷点を直線で結ぶことによ って求めた。図 - 3に示すように,斜めひび割 れ幅の水平方向と垂直方向の測定値(x,y)を ベクトル変換し,斜めひび割れのずれ方向と直 交方向の値(s,t)を求めた。

#### 3. 実験結果

### 3.1 破壊力学特性

RC はりのせん断耐力への短繊維補強の影響 を破壊力学特性値を用いて評価するために,各 試験体において,JCI 基準 JCI-S-001-2003 および JCI-S-002-2003 に準拠した破壊エネルギー測定 試験を行い,破壊エネルギーを算出した。図-4に 繊維混入率と破壊エネルギーの基本値 $G_{F0}$ の関係を示す。式(2),(3)を用いて,破壊エネル ギー $G_F$  および $G_{F0}$ を算出した。

$$G_F = (W_0 + mg\boldsymbol{d}_0) / A_{lig}$$
<sup>(2)</sup>

$$G_{F0} = G_F (f_c' / f_{cmo})^{-0.7}$$
(3)

ここで, $W_0$ :実測された荷重 - 変位曲線下の面 積,mg:両支点間の試験体重量, $d_0$ :終局時の 載荷点変位, $A_{lig}$ :リガメント部の面積, $f_c$ ':コ ンクリートの圧縮強度, $f_{cmo}$ :定数(=10MPa)で ある。

図 - 4に示されるように,鋼繊維のみを混入 した場合、繊維混入率の増加とともに $G_{F0}$ は大き くなった。しかし,鋼繊維混入率が1.0%を超え ると, $G_{F0}$ の増加率は急激に小さくなった。これ は,鋼繊維は強度および曲げ剛性が高いため, スナッビング(snubbing)による応力集中によって マトリクスが脆性的に破砕したことが原因であ ると考えられる<sup>4)</sup>。

それに対して, 合成繊維を混入した ST+PP15 では, ST15 および ST30 よりも*G<sub>F0</sub>*が大きくな り, 高い破壊力学特性を示した。このことから, 合成繊維を混入することにより, スナッビング



表 - 5 載荷試験結果

試験体名	圧縮強度 (MPa)	引張強度 (MPa)	最大荷重 (kN)	破壊 モード
ST05	34.4	2.79	109.9	
ST10	31.2	2.01	125.9	釣み
ST15	31.4	2.03	123.7	示400
ST30	30.0	2.45	126.3	いては、このである。
ST+PP15	36.0	2.45	140.1	₩X 4衣

本文中に示す

によるマトリクスの脆性的な破砕を防ぐことが できると予想される。

#### 3.2 載荷試験結果

(1) 荷重 - 変位関係

表 - 5 に載荷試験結果を,図 - 5 に荷重 - 変 位関係を示す。ST05 を除く4 体は斜め引張破壊 を起こした。図 - 5 (b)に示すように,ST05 で は,約 90kN で荷重が一度低下したが,その後, 再び荷重が上昇した。また,最大荷重以降も急 激な荷重の低下はみられなかった。これは,は りにタイドアーチ的な耐荷機構が形成されたた め,斜め引張破壊で観察されるような最大荷重 以降の急激な荷重低下が発生しなかったものと 考えられる。

ST+PP15 は最大荷重が 140.1kN と最も高く, その上,最大荷重に達した後の急激な荷重低下 がみられず,他の試験体よりも高い靭性を有し ていることが確認できる(図 - 5(f))。それに対 して,ST10,ST15,ST30 はいずれも,最大荷重 が125kN 程度であり,荷重 - 変位関係にもほと んど差はみられず,最大荷重に達した後,荷重 が急激に低下した(図 - 5(c)(d)(e))。せん断試 験においても,破壊エネルギー測定試験の結果 と同様の傾向を示し,鋼繊維混入率が 1.0%を超



えると, せん断耐力はほとんど増加しなかった。 すなわち, 鋼繊維を単体で使用した場合, 混入 率が1.0%を超えると,斜めひび割れ面において, スナッビングによる応力集中が発生し, マトリ クスが脆性的な破砕を示したと考えられる。

(2) ひび割れ性状

図 - 6 に,載荷試験終了後の各試験体のひび 割れ状況を示す。ST05 では,図中に太線で示し た、破壊時に支配的となる斜めひび割れが2本 発生しており,破壊モードが他の試験体と異な ることが確認できる。すなわち,ST05 では,タ イドアーチ的な耐荷機構が形成されたために, 最大荷重に達した後も,荷重を保持し続けたと 考えられる。

耐力が同程度であった ST10, ST15, ST30 で は,ひび割れの角度や分布状況にほとんど差は みられない。それに対して,ST+PP15 には,多 数のひび割れが発生している。すなわち,ひび 割れ性状においても,合成繊維を混入したこと による効果を確認することができる。



図‐6 ひび割れ状況

4. せん断耐力の推定

- 4.1 せん断耐力推定手法の提案
- (1) RC はりの力の釣合

まず,斜め引張破壊時の力の釣合を考える。 図 - 7 に,斜めひび割れが発生したせん断補強 筋のない RC はりをモデル化した図を示す。斜め 引張破壊では,斜めひび割れが支配的であるの で,他に発生しているひび割れを無視し,斜め ひび割れのみが発生していると仮定する。また, 斜めひび割れは,試験体軸方向と角度bをなす 一直線であり,斜めひび割れに沿って,これに 直交する方向に,均等に平均引張応力s,が作用 していると仮定する。ここで,s,は,斜めひび 割れ面における,繊維の架橋効果や骨材のかみ 合わせ等に起因する引張応力である。実際には, 斜めひび割れ面では,直交方向だけでなく,ず れ方向にもかみ合わせや繊維の架橋効果による 応力が発生すると思われる。しかし,実験結果 によれば,ひび割れ面に沿うずれは、直交方向 の開きに比べて小さく,またそのばらつきも大

きかったため,今回のモデル化ではこれを無視し,斜めひび割れ面においては,直交方向にの み引張応力が作用すると仮定した。図-7に示 される力の釣合条件より,式(4)が得られる。

$$V_0 = \boldsymbol{s}_p \cdot \boldsymbol{b}_w \cdot \boldsymbol{L} \cdot \cos \boldsymbol{b} = \frac{\boldsymbol{s}_p \cdot \boldsymbol{b}_w \cdot \boldsymbol{z}}{\tan \boldsymbol{b}}$$
(4)

ここで, $V_0$ :せん断耐力, $b_w$ :ウェブ幅,L: せん断ひび割れ長さ(= $z/\sin b$ ),z:モーメント アーム長(=7/8d)である。

斜めひび割れの角度 b と引張応力s, を決定 すれば,式(4)を用いることによって,斜め引張 破壊時のせん断耐力を求めることができる。ま た,この式は単純な力の釣合から導かれるもの であり,コンクリート種類によらず適用可能で ある。

(2) 斜めひび割れの分布

斜めひび割れ幅は,高さ方向の各位置によっ て異なると考えられる。そのため,斜めひび割 れ幅の分布を調べる必要がある。そこで,1つの 試験体において,2箇所以上で斜めひび割れ幅を 測定することができた ST10,ST15,ST30の斜 めひび割れ幅を用いて,斜めひび割れ幅の分布 の検討を行った。

実験より得られた斜めひび割れ幅の分布を図 - 8に示す。ここで,正規化ひび割れ幅とは, 最大荷重時に,各試験体において測定された斜 めひび割れ幅をその最大値で除した値である。 モーメントアーム長区間の上端の斜めひび割れ 幅は0であると仮定した。そして,各位置にお ける斜めひび割れ幅の平均値を結んだグラフを 作成し,このグラフの直線下の面積と等しくな るように,2直線で近似した斜めひび割れの分布 モデルを仮定した。このモデルで,斜めひび割 れ幅は,試験体上端より150mm(=(3/4)d)の位置 で最大となり,モーメントアーム長区間の上端 および下端においては0になるとする。このよ うに,斜めひび割れ幅の分布モデルを三角形と したのは,計算の簡便さを考慮したためである。

引張軟化曲線を用いると,斜めひび割れ幅お よび引張応力の分布は図-9のようになる。し



たがって,平均引張応力*s*,は式(5)によって求められる(図 - 10)。

$$\boldsymbol{s}_{p} = \frac{1}{w_{u}} \int_{0}^{w_{u}} \boldsymbol{s}(w) dw$$
(5)

ここで,限界ひび割れ幅 w<sub>u</sub> は,試験体上端より, (3/4)*d* の位置における斜めひび割れ幅であり,実 験より得られた値から推定した。 4.2 提案手法の妥当性の検討

表 - 6 に,各試験体における **b**, w<sub>u</sub>, s<sub>p</sub>, 実験より得られたせん断耐力 V<sub>exp</sub>,式(4)より算 出したV<sub>0</sub>および V<sub>exp</sub>/V<sub>0</sub>を示す。3.2 に示すよう に,ST05 では,破壊モードが斜め引張破壊とな らなかったため,以下の検討には用いないこと とした。

表 - 6より,限界ひび割れ幅 $w_u$ は,すべての 試験体において,2mm 程度となった。しかし, $s_p$ は,ST10とST15では1.5MPa 程度であるのに対 し,ST30とST+PP15では1.9MPa 程度となり, 両者に差がみられた。図 - 11 に,各試験体の引 張軟化曲線を示す。ST30の引張軟化曲線は,仮 想ひび割れ幅が1mmを超えると,スナッビング によるマトリクスの破砕が原因と思われるやや 急激な軟化挙動を示すが,軟化開始応力が大き いために, $s_p$ は他のケースよりも大きな値を示 している。また,ST+PP15では,合成繊維の混 入によって,引張軟化曲線の第二勾配において 保持できる軟化応力が大きくなり,その結果, $s_p$ 

せん断耐力については,実験値と計算値の比 が 0.86~1.07 であることから,すべての試験体 において,妥当な精度でせん断耐力を推定でき ているといえる。このことから,本手法を用い ることにより,短繊維補強された RC はりのせん 断耐力を推定できる可能性が示された。

斜め引張破壊時における斜めひび割れの限界 幅 w<sub>u</sub> および角度 b を予測できれば,本手法によって,短繊維補強された RC はりのせん断耐力の 算定が可能になると思われる。

5. まとめ

本研究から得られた知見を以下にまとめる。

- (1) 破壊力学的知見に基づき,短繊維補強された RC はりのせん断耐力の推定手法を提案した。
- (2) 鋼繊維を単体で使用する場合,繊維混入率が 1.0%を超えると破壊力学特性値およびせん 断耐力の増加率は急激に低下する。しかし, 合成繊維と同時に使用することで,単体で使

表 - 6 提案式と試験結果の比較

	ST10	ST15	ST30	ST+PP15
<b>b</b> (度)	24.3	23.2	24.9	22.6
$w_u$ (mm)	2.11	2.09	2.07	2.23
$\boldsymbol{s}_p$ (MPa)	1.52	1.50	1.94	1.86
$V_{exp}$ (kN)	63.0	61.8	63.2	70.1
$V_0$ (kN)	58.9	61.2	73.1	78.2
$V_{exp}/V_0$	1.07	1.01	0.86	0.90



用する場合よりも,破壊力学特性およびせん 断耐力が高くなることが確認された。

謝辞

最後に,本研究を実施するにあたり,短繊維 を提供して頂きました,(株)ブリヂストン,萩原 工業(株),両社に厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 柳 博文,松岡 茂,武田康司,松尾庄二: 鋼繊維補強コンクリートのひび割れ分散効 果に対する実験的研究,コンクリート工学年 次論文集,Vol.20,No.3,pp.1225-1230,1998.6
- 2) 土木学会:鋼繊維補強鉄筋コンクリート柱部 材の設計指針(案),1999.11.
- 二羽淳一郎,山田一宇,横沢和夫,岡村 甫: せん断補強鉄筋を用いないRCはりのせん断 強度式の再評価,土木学会論文集, No.372/V-5, pp.167-176, 1986.8
- 4) 川又 篤,三橋博三,金子佳生,福山 洋: ハイブリッド型繊維補強セメント系複合材 料の靭性能に関する研究,コンクリート工学 年次論文集,Vol.23,No.2,pp.235-240,2001.6