

論文 短繊維補強された RC 部材の力学的性状

喜多 俊介^{*1}・小室 文也^{*2}・二羽 淳一郎^{*3}

要旨：短繊維補強コンクリートは施工段階におけるコンクリートの剥落防止工法としてトンネル覆工コンクリートや高架橋上部構造へ適用されている。しかし，短繊維補強コンクリートには剥落防止だけでなく，RC 部材のひび割れ抑制効果，せん断耐力向上などの効果が期待されている。本研究では，ビニロン繊維及び鋼繊維で補強された RC 部材の力学性状を調査し，せん断耐力に対する効果を破壊力学特性値により評価することを目的として，せん断補強筋の無い RC はりの 4 点曲げ試験を行った。結果として，破壊力学特性値を基準としてせん断耐力を推定することが可能であることを示した。

キーワード：短繊維補強，ビニロン繊維，鋼繊維，破壊力学特性値，せん断耐力

1. はじめに

高度経済成長期に建設されたコンクリート構造物の劣化が進み，近年，コンクリートの剥落が問題となってきた。短繊維補強コンクリートは施工段階におけるコンクリートの剥落防止工としてトンネル覆工コンクリートや高架橋上部構造へ適用されている。しかし，短繊維補強コンクリートには剥落防止だけではなく，RC 部材に生じるひび割れの抑制効果¹⁾，せん断耐力向上²⁾などの効果も報告されている。

本研究では，短繊維補強された RC 部材の力学性状のうち，静的荷重を受ける際のせん断耐力に与える影響を調査し，破壊力学特性値によりせん断耐力を評価することを目的としている。そこで，補強用短繊維としてビニロン(PVA)繊維及び両端にフック加工を施した鋼繊維に対して繊維混入量をパラメータとし，せん断補強筋のない RC はりの 4 点曲げ試験を行った。

2. 実験概要

2.1 実験パラメータ及び示方配合

表 - 1 に本研究で用いた短繊維の物性を示し，表 - 2 に実験ケースを示す。パラメータは短繊維の種類と混入量であり，全 7 ケースについて

行った。表 - 3 に示方配合を示す。

練混ぜは，PVA 繊維は繊維が吸水性を有するため，事前に吸水率を測定し，24 時間以上吸水させ，練混ぜ直前に脱水し，表乾状態で使用した。鋼繊維は粗骨材と同時にミキサーに投入し，練り混ぜた。PVA 繊維では，ファイバーボールが生じないように，粗骨材を投入後，ミキサー回転中に PVA 繊維を分散させながら投入した。

2.2 破壊力学特性値

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から評価するために，各ケースにおいて，破壊力学特性値を測定した。破壊エネルギーの測定結果及び強度試験結果を表 -

表 - 1 使用した短繊維の物性値

短繊維種類	PVA繊維	鋼繊維
繊維形状	集束タイプ	両端フック加工
繊維度 (dtex)*	1800	—
フィラメント直径 (μm)	16	—
密度 (t/m ³)	1.30	7.85
アスペクト比	63.2	50
カット長 (mm)	24	30
断面寸法 (mm)	φ 0.38	φ 0.6
引張強度 (GPa)	0.88	1.00
弾性係数 (GPa)	29.4	210

1dtex は，糸長 10000mm の糸質量が 1g である

*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 工学部 土木工学科

*3 東京工業大学大学院教授 理工学研究科 土木工学専攻 工博 (正会員)

4 にまとめる。また，各ケースの引張軟化曲線を図 - 1 に示す。ここで， G_F ：破壊エネルギー(N/m)， G_{F0} ：粗骨材最大寸法に依存する破壊エネルギーの基本値(N/m)である。CEB-FIP Model Code90³⁾では破壊エネルギーを，コンクリートの圧縮強度 f'_c と粗骨材の最大寸法の関数として式(1)で与えている。

$$G_F = G_{F0} (f'_c / f_{cmo})^{0.7} \quad (1)$$

つまり， G_{F0} は式(2)で求められる。

$$G_{F0} = G_F (f'_c / f_{cmo})^{-0.7} \quad (2)$$

ここで， $f_{cmo} = 10\text{MPa}$

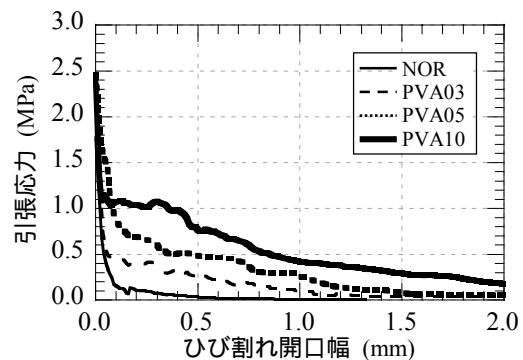
表 - 4 に示される通り，破壊エネルギーは短繊維混入量が増すほどより向上していることが分かる。また，図 - 1 に示される通り，短繊維混入により，ひび割れ間の応力伝達能力が向上し，繊維混入量が増すにつれて，伝達応力が大きくなっている。また，PVA 繊維の引張軟化曲線の形状は，繊維補強の無いものと同様にひび割れ発生後急激に軟化し，その後緩やかに軟化する領域に移行する傾向にあるが，鋼繊維を混入したものでは，ある応力レベルでほぼ一定となり，定常状態となることが確認された。そのため，破壊エネルギーは非常に大きな結果とな

った。

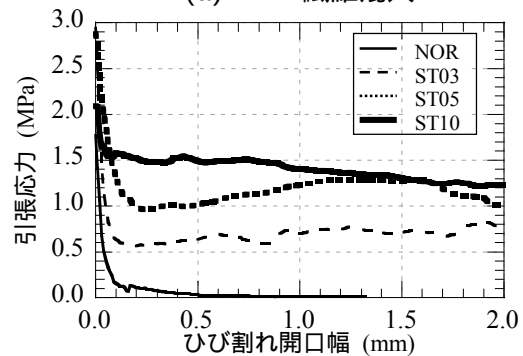
3.RC はりのせん断実験

3.1 試験体概要

短繊維補強された RC はりのせん断耐力を検討するため，載荷試験を行った。また，RC は



(a) PVA 繊維混入



(b) 鋼繊維混入

図 - 1 引張軟化曲線

表 - 2 実験ケース

供試体名	短繊維種類	短繊維混入量 (vol.%)
NOR	-	-
PVA03	PVA	0.3
PVA05		0.5
PVA10		1.0
ST03	鋼繊維	0.3
ST05		0.5
ST10		1.0

表 - 4 強度試験結果及び破壊エネルギー

供試体名	圧縮強度 (MPa)	引張強度 (MPa)	G_F (N/m)	G_{F0} (N/m)
NOR	27.0	3.1	0.097×10^3	0.048×10^3
PVA03	26.3	2.2	0.31×10^3	0.16×10^3
PVA05	32.8	2.5	0.53×10^3	0.22×10^3
PVA10	26.6	2.4	1.05×10^3	0.51×10^3
ST03	33.6	2.9	2.56×10^3	1.09×10^3
ST05	33.0	2.1	3.69×10^3	1.60×10^3
ST10	27.2	3.2	4.54×10^3	2.23×10^3

表 - 3 示方配合

	W/B (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)							
			W	B		S	G^{*2}	高性能 AE 減水剤	助剤	短繊維
				C	P ^{*1}					
NOR	40	55	185	370	93	909	734	1.48	1.48	-
PVA03	40	55	185	370	93	909	734	2.96	2.96	3.9
PVA05	40	55	185	370	93	909	734	4.44	4.44	6.5
PVA10	40	55	185	370	93	909	734	7.40	7.40	13
ST03	40	55	185	370	93	909	734	2.22	2.22	23.4
ST05	40	55	185	370	93	909	734	2.22	2.22	39
ST10	40	55	185	370	93	909	734	2.22	2.22	78

*1 P(石灰石微粉末)は，圧縮強度を普通強度レベルに維持するために使用した。

*2 最大骨材寸法は 13mm とした。

りにおけるひび割れ性状についても検討した。実験ケース及び強度試験結果を表 - 5 に示す。また、基本的な試験体概要を表 - 6 に示し、試験体の概要を図 - 2 に示す。本研究では、RC はりのせん断耐力への短繊維補強の影響を確認するため、せん断破壊先行型で試験体を製作した。試験体には、載荷点直下及び支点外側にのみせん断補強筋を配置し、せん断スパン内には配置しなかった。気中養生後、材齢 7 日~8 日で載荷を行った。軸方向鉄筋にはネジ状異形 PC 鋼棒 ($\phi 22$ SBPD 930, $f_y=1059\text{MPa}$) を用い、定着を確保するため、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により定着した。表 - 6 に示すせん断耐力 V_c は式(3)により算定した⁴⁾。

$$V_c = 0.20 f'_c \left(\frac{d}{1000} \right)^{\frac{1}{4}} p_w^{\frac{1}{3}} \left(0.75 + 1.4 \frac{d}{a} \right) b_w d \quad (3)$$

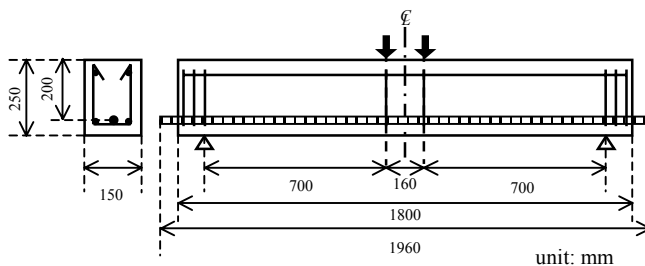


図 - 2 試験体概要図

表 - 5 実験ケース及び強度試験結果

供試体名	圧縮強度 (MPa)	引張強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)
NOR	43.1	3.1	30.3
PVA03	26.3	2.2	24.7
PVA05	32.8	2.5	28.3
PVA10	26.6	2.4	25.0
ST03	33.6	2.9	26.7
ST05	27.2	2.1	24.3
ST10	33.6	3.2	25.4

表 - 6 RC はり試験体の概要

軸方向鉄筋断面積	mm ²	387.1
鉄筋弾性係数	GPa	200
軸方向鉄筋比		1.29 %
せん断スパン長	mm	700
せん断スパン比		3.5
せん断耐力* V_{yd}	kN	34.9
曲げ破壊時の作用せん断力* V_{mu}	kN	67.8
せん断余裕度*	V_{yd}/V_{mu}	0.51

*圧縮強度を $f'_c = 30\text{MPa}$ とした時

ここで、 p_w ：軸方向鉄筋比($=100 A_s / (b_w \cdot d)$)、 b_w ：ウェブ幅、 a ：せん断スパン、 d ：有効高さ。

また、曲げ破壊時の作用せん断耐力は等価応力ブロックを用いて算定した曲げ耐力 M_u をせん断スパン a で除することで求めた。

$$V_{mu} = \frac{M_u}{a} \quad (4)$$

3.2 載荷試験概要

RC はりの載荷実験は図 - 3 に示すような 4 点曲げ試験で行った。支点は可動支点とし、試験体と支点の間にグリスを挟んだ 2 枚のテフロンシートを設置し、支承板での摩擦を除去した。等モーメント区間は 160mm である。載荷位置にローラーを設置し、これに分配桁を配することにより、せん断スパンにせん断力が均等に作用するように配慮した。油圧式 2000kN 万能試験機にて載荷し、荷重をロードセルにより検出しながら静的単調載荷を行った。測定項目は、スパン中央における、試験体たわみ、コンクリートの圧縮縁ひずみ、鉄筋ひずみであり、引張側のスパン中央及び中央より 100mm の点を中心として標点間 100mm の π 型変位計でひび割れ幅を測定した。また、載荷中にひび割れの追跡を行った。

3.3 試験結果

(1) 荷重 - 変位関係

図 - 4 に実験で得られた荷重 - 変位関係を示す。表 - 5 に示すように、今回の実験では圧縮強度にばらつきが生じたため、式(3)の圧縮強度に関係する項である f'_c の^{1/3} で作用せん断力を除

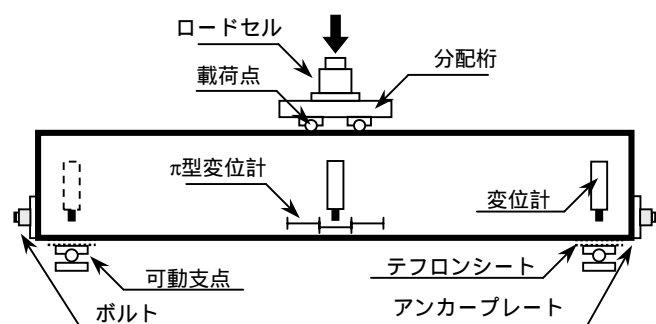


図 - 3 載荷状況

すことによって標準化を行った。試験結果を表 - 7 に示す。ここで $P_{\max}(=2V_{\max})$:最大荷重 (kN) , P_{cr} : 曲げひび割れ発生荷重 (kN) , $\bar{V}$: 標準化されたせん断耐力 $\bar{V}=V_{\max}/f_c^{1/3}$, f_c' : コンクリートの圧縮強度 (MPa) , $\bar{V}_{NOR}$: 繊維補強の無い場合の標準化されたせん断耐力, $V_{\max}$: せん断耐力 (kN) $V_{\max}=P_{\max}/2$, V_{cal} : 示方書式⁵⁾ (式(5))によるせん断耐力計算結果(kN)である。

$$V_{cal}=0.20 f_c^{1/3} \left(\frac{d}{1000} \right)^{-1/4} p_w^{1/3} b_w d \quad (5)$$

破壊形態としては、全てにおいて最大荷重時に斜めひび割れが卓越して進展し、耐力が低下する斜め引張破壊であった。しかし、ポストピーク域においては3通りの挙動を示した。

- 1) 最大荷重後、急激に耐力を失う。
- 2) 最大荷重後、徐々に耐力を失いながら変形が進む。
- 3) 最大荷重後、徐々に耐力を失い、ある点で急激に耐力を失う。

全7ケースをこの3つで分類をすると以下のように分けられる。

- 1) NOR, PVA10, ST05
- 2) PVA03, ST03, ST10
- 3) PVA05

このことと、せん断耐力を比較すると、1)に分類されるケースで、NORを除くと、一般に繊維補強量が多く、補強効果が大きくなる傾向にある。

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)」²⁾に従うと鋼繊維混入量1.0~1.5vol%では、 $V_{\max}/V_{cal}=2.0$ となるとされている。実際には安全側となっているため $V_{\max}/V_{cal} \geq 2.0$ となるはずである。しかし、今回の実験では、ST10の場合で、 $V_{\max}/V_{cal}=1.91$

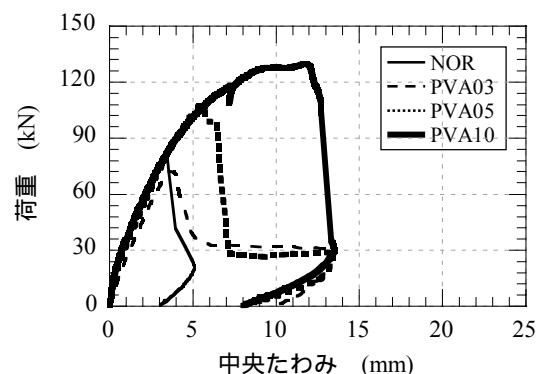
表 - 7 せん断はりの試験結果

	$P_{\max}$	P_{cr}	$\bar{V}$	$\bar{V}/\bar{V}_{NOR}$	$V_{\max}/V_{cal}$
NOR	80.0	18.9	11.4	1.00	1.17
PVA03	72.2	15.4	12.1	1.06	1.33
PVA05	107.5	15.7	16.8	1.47	1.70
PVA10	129.9	16.5	21.8	1.91	2.23
ST03	83.6	22.5	13.0	1.14	1.42
ST05	109.4	16.3	18.2	1.59	1.75
ST10	120.2	18.3	18.6	1.63	1.91

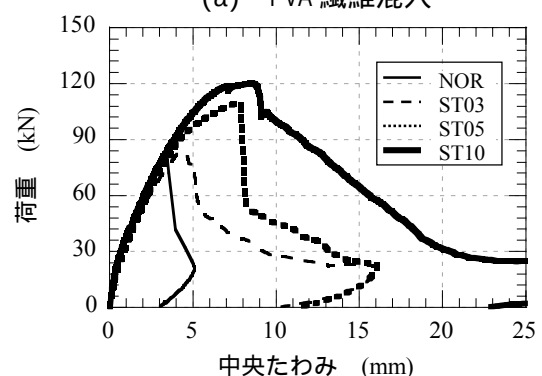
となっており、鋼繊維補強の効果が十分には発揮されなかったように考えられる。

(2) ひび割れ図

図 - 5 に載荷終了後のひび割れ図を示す。これらによると、繊維混入量が増すにつれひび割れの間隔が密になっていることが確認できる。また、繊維混入量が多くなるにつれ、最終的な破壊をもたらす斜めひび割れ(図中の太線)が載荷点に近づいていく傾向にある。また、先ほどの分類2), 分類3)に当たるケースにおいては主鉄筋に沿ったひび割れが顕著に見られた。この段階において、鉄筋とコンクリートの一体化が十分でなくなり、鉄筋コンクリートはりとしてのせん断耐力が低下したことが考えられる。また、分類3)については、分類2)と同様の、ゆっくりとした荷重低下を示し始めたため、主鉄筋との付着が耐力に影響していると考えられるが、その直後、分類1)のような急激な破壊に至ったため、実験結果と斜め引張破壊に起因するせん断耐力には差が無いと判断した。以上より、本



(a) PVA 繊維混入



(b) 鋼繊維混入

図 - 4 荷重 - 変位関係

を式(7)により算出した(図 - 9 中の斜線部面積)。

$$e(w_{\text{dia}}) = \int_0^{w_{\text{dia}}} \sigma_{\text{ct}}(\omega) d\omega \quad (7)$$

(3) 破壊力学特性値による検討

測定した破壊力学特性値からの考察を行う。
ST05 のケースにおいてのみ、図 - 7 に示す位置に π 型変位計を設置し、発生した斜めひび割れ幅を測定した。斜めひび割れ幅は計測値 w と測定位置に発生した斜めひび割れの角度(今回のケースでは $\theta=51^\circ$)を用いて式(6)により算定するものとした。

$$w_{\text{dis}} = w \sin \theta \quad (6)$$

荷重 - 斜めひび割れ幅の関係を図 - 8 に示す。
これにより、最大荷重時の斜めひび割れ幅 w_{dia}
は 0.22 mm であった。

本研究では、この w_{dia} を斜めひび割れの限界値と仮定し、斜めひび割れ幅が w_{dia} となった時に斜め引張破壊するとして、引張軟化曲線より、斜め引張破壊するまでの消費エネルギー $e(w_{dia})$

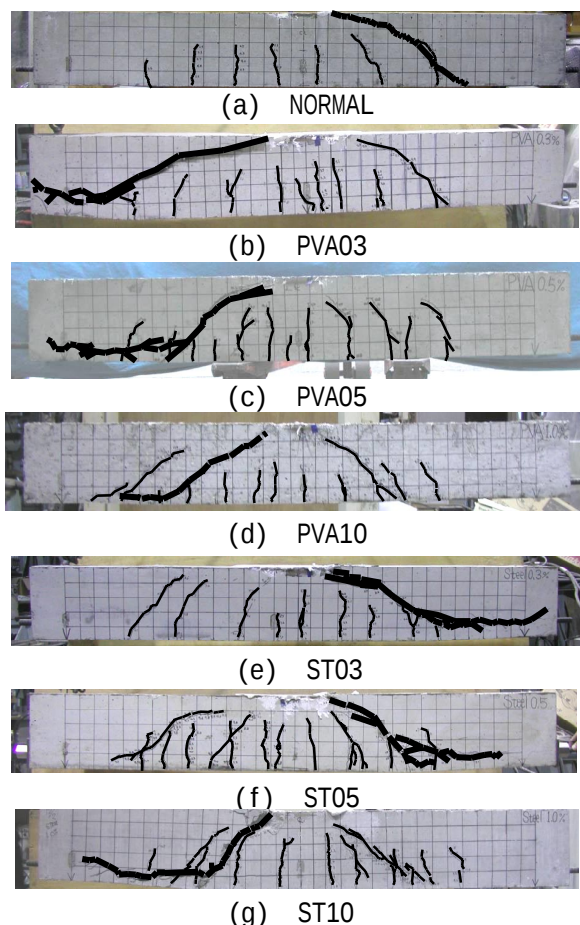


図 - 5 終局時のひび割れ性状

また、式(2)に示した破壊エネルギーの基本値 G_{F0} の算出と同様に、圧縮強度による補正を行って標準化された消費エネルギー $e_0(w_{dia})$ を式(7)により算出し、せん断耐力との関係を調べた。

$$e_0(w_{\text{dia}}) = e(w_{\text{dia}})(f'_c/f_{\text{cmo}})^{-0.7} \quad (8)$$

計算された $e_0(w_{dia})$ と式(3)で得られたせん断耐力と実験値の比を図 - 10 に示す。

3.4 せん断耐力の推定

以上の結果を基に，破壊力学特性値を考慮し

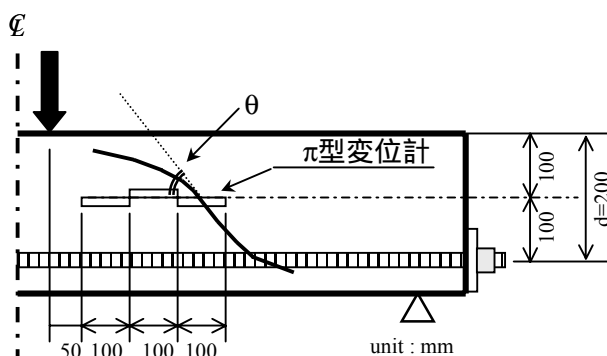


図 - 7 斜めひび割れ幅計測位置

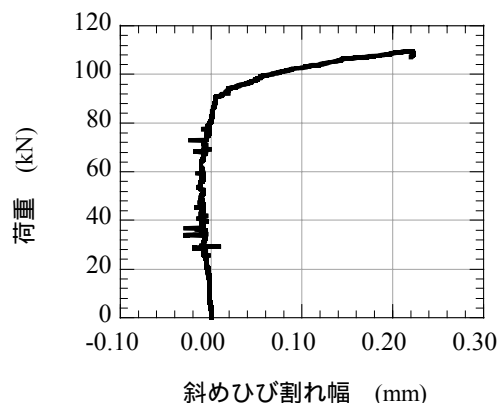
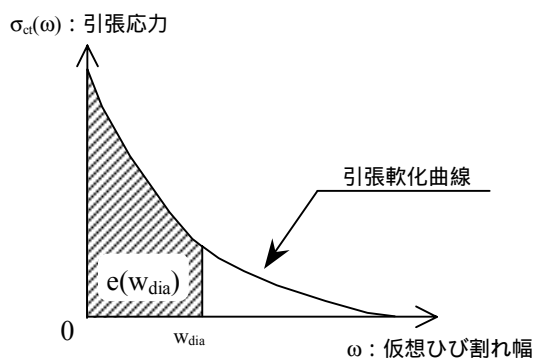


図 - 8 荷重 - 斜めひび割れ幅関係

图 9 $e(w_{\text{dia}})$

たせん断耐力の推定方法を考察する。本研究では、式(3)を基に、新たな係数 λ を導入し、式(9)のようなせん断耐力推定式を考えてみることにする。

$$V_c = 0.20(1+\lambda)f_c^{\frac{1}{3}}\left(\frac{d}{1000}\right)^{\frac{1}{4}}p_w^{\frac{1}{3}}\left(0.75+1.4\frac{d}{a}\right)b_wd \quad (9)$$

ここに、係数 λ は破壊力学特性値に依存する係数である。図 - 10 をもとに近似式として式(10)を λ の推定式とした。

$$\lambda = 7.4 \frac{e_0(w_{dia})}{1000} - 0.23 \quad (10)$$

ただし、 $e_0(w_{dia})$ ：標準化した斜めひび割れ幅の限界値までの消費エネルギー(N/m)， w_{dia} ：斜めひび割れ幅の限界値(=0.22mm)である。ここで、実験において、PVA03、ST03、ST10では、付着による影響によりせん断耐力が低下したと考えられるため、他の4つの試験結果か

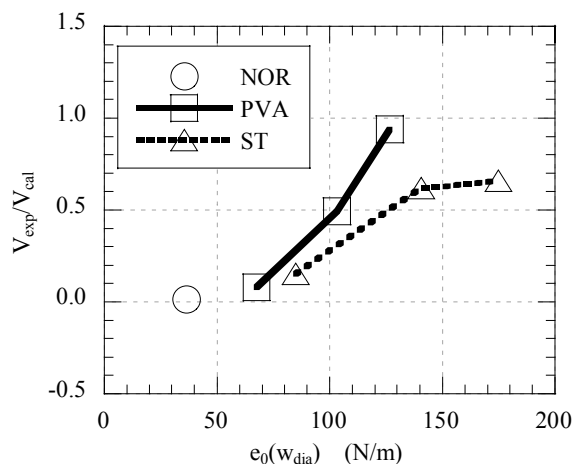


図 - 10 $e_0(w_{dia}) - V_{exp}/V_{cal}$

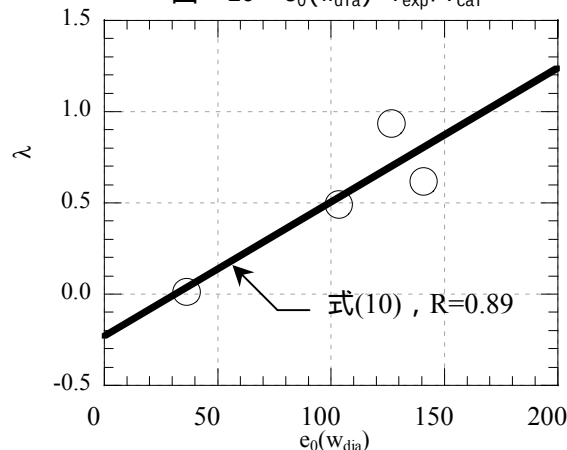


図 - 11 提案式

ら λ の近似式を決定した。この式(10)の相関係数は0.89である(図 - 11)。今回の提案式において、 λ に制限は設けなかった。これは、普通骨材に比べせん断耐力が低下する軽量骨材を用いる場合においても、 λ を負にとることにより破壊力学特性値からせん断耐力を推定できるという可能性を残すためである。

4. まとめ

- 1) せん断補強筋の無い RC はりにおいて、PVA 繊維や鋼繊維を用いた短繊維補強を行うことで、そのせん断耐力が向上することを確認した。
- 2) 短繊維補強された RC はりでは、ひび割れ間隔が小さくなり、斜めひび割れ発生位置は載荷点に近づくことがわかった
- 3) 破壊力学特性値である $e_0(w_{dia})$ に依存する係数 λ を導入した短繊維補強された RC はりのせん断耐力の推定方法を考察した。

最後に、本研究を行うに当たり、短繊維を提供して頂きました、(株)プリヂストン、(株)ユニチカ、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報告集，Vol.20，No.3，pp.1255-1230，1998.6
- 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
- 3) CEB：CEB - FIP Model Code 1990，Bulletin d'Information，No.213/214，pp.437，1993
- 4) 二羽淳一郎，山田一字，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.
- 5) 土木学会：コンクリート標準示方書「構造的な性能照査編」，2002.3