

V-30

主筋及びせん断補強筋に連続繊維補強材を用いたRCはりのせん断耐力

北海道大学工学部 正 員 佐藤 靖彦

北海道大学工学部 正 員 木村 勉

北海道大学工学部 正 員 上田 多門

北海道大学工学部 正 員 角田 與史雄

1. はじめに

主筋及びせん断補強筋に連続繊維補強材を用いたRCはりのせん断破壊は、局部応力を受ける位置で連続繊維補強材が破断することによるせん断破壊と連続繊維補強材が破断しない場合のせん断破壊に分けられる。よって、連続繊維補強コンクリートはりのせん断に対する設計は、上述の2つの破壊形式に対するせん断耐力評価式が見いだされて始めて可能となる。

著者らは、連続繊維補強材が破断せず、はりがせん断圧縮破壊を起こす場合に対し、有限要素解析によるせん断耐荷性状の定性的な把握¹⁾を行うとともに、その結果に基づいたせん断耐力評価式の構築²⁾を行ったが、本論文では、著者らが構築したせん断耐力評価式を簡略化した実用設計式の提案を行う。

2. せん断耐荷モデル

著者らが構築した連続繊維補強コンクリートはりがせん断圧縮破壊を起こす場合に対するせん断耐力評価式は、次式で表される(図1参照)。

$$V = V_{cpz} + V_{web} + V_{str} - V_{com} \quad (1)$$

ここに、 V_{cpz} ：曲げ圧縮域でのコンクリートが受け持つせん断力、 V_{web} ：斜めひび割れ域でのせん断補強筋が受け持つせん断力、 V_{str} ：斜めひび割れ域でのせん断補強筋以外が受け持つせん断力、 V_{com} ：水平領域でのコンクリートが受け持つせん断力。

式(1)における各せん断力は、各領域の平均応力を用い次式により表される(図2参照)。

$$V = bx_e \overline{\tau_{cpz}} + p_w b L_{web} \overline{\sigma_{web}} + b L_{str} \overline{\tau_{str}} - b L_{com} \overline{\sigma_{com}} \quad (2)$$

ここに、 $\overline{\tau_{cpz}}$ ：曲げ圧縮域での平均せん断応力

$$\frac{\overline{\tau_{cpz}}}{f'_c} = 0.65 \sin \alpha \cos \alpha \quad (3)$$

$$\tan \alpha = \left(\frac{a}{d} \right)^{-1} \quad (4)$$

$\overline{\sigma_{web}}$ ：斜めひび割れ域でのせん断補強筋の平均引張応力

$$\overline{\sigma_{web}} = E \overline{\epsilon_{web}} \quad (5)$$

$$\overline{\epsilon_{web}} = 0.0053 \frac{\sqrt{f'_c}}{\sqrt{a/d+1}} e^{\left(-\frac{1000}{p_w E_s} - 0.05 \sqrt{p_w E_w} \right)} \quad (6)$$

$\overline{\tau_{str}}$: 斜めひび割れ域でのせん断補強筋以外が受け持つせん断力による平均せん断応力

$$\frac{\overline{\tau_{str}}}{f_c^{1/3}} = \frac{1.28}{\sqrt{a/d} + 1} \quad (7)$$

$\overline{\sigma'_{com}}$: 水平領域でのコンクリートの平均圧縮応力

$$\frac{\overline{\sigma'_{com}}}{f'_c} = 0.18 \left(\frac{a}{d} \right)^{-1} \quad (8)$$

L_{web} : 斜めひび割れ域の部材軸水平投影長さ

$$L_{web} = h - x_e \quad (9)$$

L_{str} : 斜めひび割れ域の部材軸垂直投影長さ

$$L_{str} = h - x_e \quad (10)$$

L_{com} : 水平領域長さ

$$L_{com} = \frac{a}{h} x_e \quad (a > h) \quad (11)$$

x_e : 曲げ圧縮域深さ

$$\frac{x_e}{x} = \frac{1 - e^{-\frac{a}{d}}}{1 + 3.2^{-0.12(p_w E_w)^{0.4}}} \quad (12)$$

ここで、 x は、はり理論において引張断面を無視して計算した中立軸深さである。

b : 断面幅

p_w : せん断補強筋比

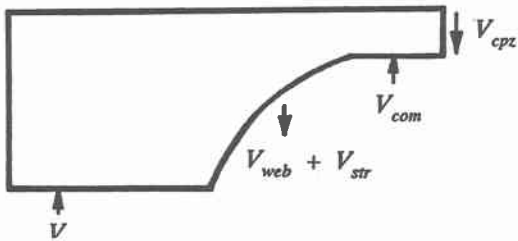


図1 せん断耐力モデル

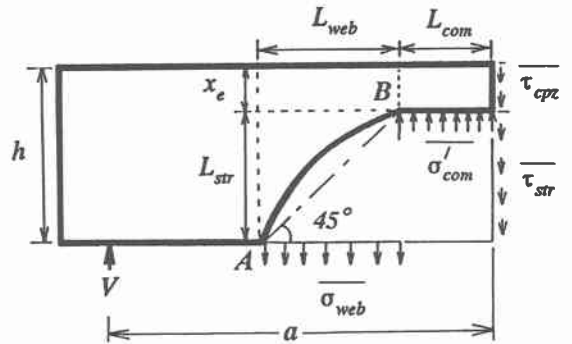


図2 各平均応力の分布

3. 実設用計式の提案

図3は、本予測式により得られたせん断力とせん断スパン比との関係を示すものである。ここでは、せん断スパン比を2.5である場合を基準としている。今、 $V_{cpz}-V_{com}$ をトラス以外が受け持つせん断力を、 $V_{str}+V_{web}$ をトラスが受け持つせん断力を表しているものと考えれば、せん断スパン比が大きくなるにつれ、トラス以外により受け持たれるせん断力が減少し、トラスにより受け持たれるせん断力が増加することが明らかである。よって、せん断スパン比が大きい場合を考えると、 $V_{cpz}-V_{com}$ は無視できるほど小さくなり、式(1)は、次式により表されることとなる。

$$V = V_{str} + V_{web} \quad (13)$$

また、上式は平均応力を用い次式で表される。

$$V = b(h-x_e)\overline{\tau}_{str} + p_w b(h-x_e)\overline{E\varepsilon}_{web} \quad (14)$$

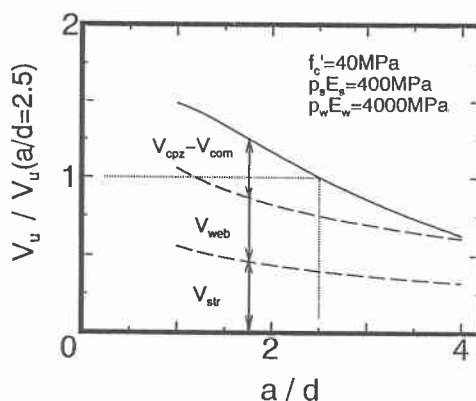


図3 せん断耐力とせん断スパン比との関係

前節で示したせん断耐力評価式は、せん断スパン比が1.5から3.2の範囲において構築されたものであり²⁾、せん断スパン比が大きい場合を基準に設計式を考える場合、せん断スパン比が大きい場合に対する各予測式の適用性を確認する必要がある。

表1は、本研究において有限要素解析³⁾を行った6体のはり供試体の諸元を示す。また、要素分割の一例を図4に示す。ここで、せん断スパン比が4.0より大きなものの解析を行っていないのは、その範囲においてせん断破壊を起こすはりを用意することができなかったことによる。

表2は、有限要素解析及び前節に示した各予測式により得られた曲げ圧縮域深さ及び各平均応力を示す。すべての供試体において、有限要素解析より得られた水平領域での平均圧縮応力は、式(8)より計算される値より20%程度小さい。しかし、式(14)において必要とされる曲げ圧縮域深さ、斜めひび割れ域でのせん断補強筋の平均ひずみ及び斜めひび割れ域での平均せん断応力の解析値と予測値は概ね一致しており、せん断スパン比が4.0程度の場合に対してもそれらの予測式として式(12)、式(7)及び式(6)を用いることができるものと言える。また、せん断スパン比が4.0である解析供試体No.2、No.4及びNo.6において、終局せん断耐力に対する $V_{cpz}-V_{com}$ の占める割合は10%程度と小さいものであった。

実用設計式として式(14)を用いる場合、実際には定義しにくいせん断スパン比の関数でないようにすることが実用的である。ここでは、コンクリート標準示方書⁹⁾に準じ、せん断スパン比a/dを5.6と固定することとする。よって、式(12)、式(7)及び式(6)は、以下のように書き改められる。

$$\overline{\tau}_{str} = 0.38f_c^{1/3} \tag{15}$$

$$\overline{\varepsilon}_{web} = 0.0016\sqrt{f_c}e^{\left(-\frac{1000}{p_sE_s}-0.05\sqrt{p_wE_w}\right)} \tag{16}$$

$$x_e = \frac{x}{1+3.2^{-0.12(p_wE_w)}} \tag{17}$$

表1 解析供試体の諸元

Specimen	a/d	f _c ' (MPa)	p _s E _s (MPa)	p _w E _w (MPa)
No.1	3.6	44	4944	137
No.2	4.0	44	4944	137
No.3	3.6	20	4944	137
No.4	4.0	20	4944	137
No.5	3.6	44	2472	137
No.6	4.0	44	2472	137

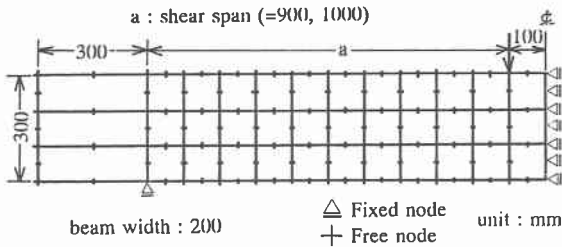


図4 要素分割図

表2 解析結果

Specimen	x _c (cm)		$\overline{\tau}_{cpz}$ (MPa)		$\overline{\tau}_{str}$ (MPa)		$\overline{\varepsilon}_{web}$ (μ)		$\overline{\sigma}_{con}$ (MPa)	
	FEM	Eq.(12)	FEM	Eq.(3)	FEM	Eq.(7)	FEM	Eq.(6)	FEM	Eq.(8)
No.1	8.12	7.80	6.8	7.4	1.7	1.6	6105	5521	1.9	2.2
No.2	8.43	7.90	6.1	6.7	1.4	1.5	5805	5332	1.7	2.0
No.3	8.98	8.49	3.9	3.4	1.1	0.9	4115	3722	0.7	1.0
No.4	9.25	8.60	3.3	3.1	0.7	0.8	4098	3595	0.6	0.9
No.5	6.81	5.79	7.5	7.4	1.6	1.6	4308	4510	2.0	2.2
No.6	6.92	5.90	5.9	6.7	1.6	1.5	4229	4355	1.4	2.0

4. 実用設計式の実験結果との比較

ここで、前節で提示した実設計式の妥当性を検討するために既往の実験結果⁵⁾⁻¹¹⁾との比較を行う。また、前節で示したせん断耐力評価式とともに、以下に示す現行のコンクリート標準示方書⁴⁾のせん断耐力評価式に準拠した結果も併せて示す。

$$V = V_c + V_s \quad (18)$$

ここで、 V_c は、コンクリートが受け持つせん断力で次式で表される。

$$V = 0.2(p_s f_c')^{1/3} d^{-1/4} b d \quad (19)$$

ここで、 p_s ：主筋比(%)、 f_c' ：コンクリートの圧縮強度(MPa)、 d ：有効高さ、 b ：断面幅。ただし、主筋の弾性係数の影響を考慮するため、連続繊維補強材と鉄筋との弾性係数比を主筋比に掛け合わせた値を p_s を用いる。

一方、 V_s は、せん断補強筋が受け持つせん断力で次式で表される。

$$V_s = A_w E_w e_f (\sin \alpha + \cos \alpha) z / s \quad (20)$$

ここで、 A_w ：一組のせん断補強筋の断面積、 E_w ：せん断補強筋の弾性係数、 α ：せん断補強筋と部材軸がなす角度、 z ：圧縮応力の合力の作用位置から引張補強材図心までの距離（ $=d/1.15$ ）、 s ：せん断補強筋の配置間隔、 e_f ：せん断補強筋の終局ひずみ（ $=0.2\%$ ）。なお、せん断補強筋の終局ひずみは、コンクリート標準示方書⁴⁾において規定されているせん断補強筋の上限応力400MPaを、鉄筋の弾性係数(200GPa)で除した値である。

図5は、実験値を2節で示したせん断耐力評価式より求めたせん断力で除した値（以下、せん断耐力比）とせん断スパン比との関係を示す。図6は、前節に示した実用設計式を用いた場合のせん断耐力比とせん断スパン比との関係を、また、図7は、式(18)～(20)を用いて計算した場合のせん断耐力比とせん断スパン比との関係を示す。

2節で示したせん断耐力評価式を用いた場合のせん断耐力比の平均は、1.00（変動係数18.5%）であり、実験値を精度良く予測できている。一方、本節で提示した実用設計式を用いた場合のせん断耐力比の平均は、1.63（変動係数26.4%）であり、全データを安全側に評価できていることが明らかである。また、示方書式に基づいた耐力式を用いた場合のせん断耐力比の平均は1.90（変動係数16.0%）であり、実験値との対応が最も悪い結果となった。なお、せん断スパン比が4.0より大きい場合の比較を行っていないのは、その範囲における実験がなされていない為であるが、今後、せん断スパン比が大きい場合に対する実用設計式の適用性を確認する必要がある。

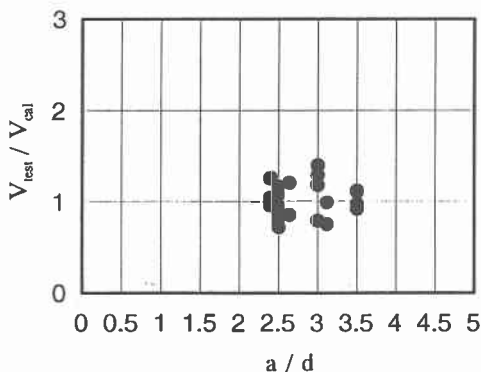


図5 せん断耐力比とせん断スパン比

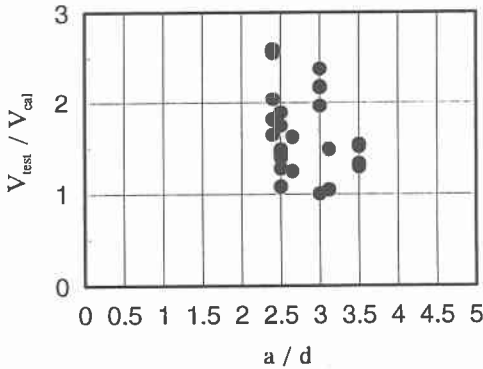


図6 セン断耐力比とせん断スパン比との関係

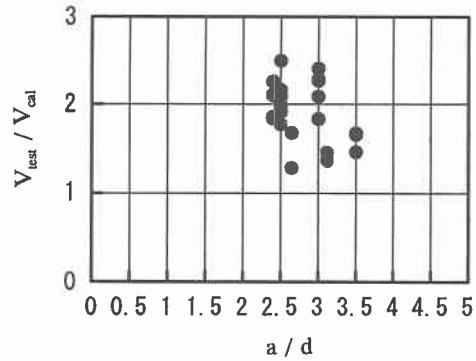


図7 セン断耐力比とせん断スパン比との関係

5. まとめ

本論文において、著者らが構築したせん断耐力評価式においてせん断スパン比が大きい場合を基準として求めた実設計式を提示した。本設計式は、せん断補強筋を有するはりが、補強筋が破断せずにせん断圧縮破壊を起こす場合に對し適用するものである。

参考文献

- 1) 佐藤靖彦・上田多門・角田與史雄：有限要素解析による連続繊維補強コンクリートはりのせん断耐荷性状の定性的評価，土木学会論文集，No.484/V-22，pp.51-60，1994年
- 2) Y. Sato, T. Ueda and Y. Kakuta：Shear Resisting Model of Reinforced and Prestressed Concrete Beams Based on Finite Element Analysis, Proc. of JCI, International Workshop on Shear in Concrete Structures, pp.159-173, 1994
- 3) ナレス パンタラトーン：鉄筋コンクリート梁におけるせん断抵抗機構の有限要素解析（博士論文），1991年
- 4) コンクリート標準示方書（平成3年版），土木学会，1991年
- 5) 佐藤靖彦・和田宜之・上田多門・角田與史雄：有限要素解析によるFRPロッドを用いたRCはりのせん断抵抗機構について，連続繊維補強材のコンクリート構造物への適用に関するシンポジウム講演論文報告集，土木学会，pp.173-180，1992年
- 6) 西園勝秀・佐藤靖彦・高橋義裕・上田多門・角田與史雄：レーザースペックル法による連続繊維補強コンクリートはりのせん断変形挙動の解明，土木学会北海道支部論文報告集，第49号，pp.963-966，1993年
- 7) 金倉正三・丸山久一・清水敬二・中村裕剛：FRPロッドで補強したコンクリートはりのせん断性状，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.15，No.2，pp.887-892，1993年
- 8) 涌井一・鳥取誠一：FRP棒材をらせん状せん断補強筋として用いた場合のせん断補強効果，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.12，No.2，pp.1141-1146，1990年
- 9) 本田努・池田弘・橋田敏之：FRPスターラップで補強したコンクリート部材のせん断特性に関する研究、第45回年次学術講演会講演概要集第5部，pp.342-343，1990年
- 10) 奥村一正・村山八州雄・天野玲子・プシャブジャタム：補強材の材料特性がコンクリート部材の軸引張剛性に与える影響について，連続繊維補強材のコンクリート構造物への適用に関するシンポジウム講演論文報告集，pp.155-158，1992年
- 11) 崔益暢・末光康人・奥村一正・二羽淳一郎：連続繊維補強材を用いたコンクリートはりのせん断耐荷機構，土木学会第49回年次学術講演会第5部，pp.930-931，1994年