

論文 鉄筋およびFRP ロッドを補強材としたコンクリートはりのせん断耐荷力の定量的評価

崔 益暢^{*1}・三島徹也^{*2}・鈴木顕彰^{*3}・二羽淳一郎^{*4}

要旨：本研究は、格子モデルを用いた解析により、鉄筋およびFRP ロッドを補強材としたコンクリートはりの斜めひび割れ発生後のせん断耐荷機構の変化を明らかにし、さらにせん断耐荷力の評価式を提案したものである。すなわち、終局時のコンクリート貢献分とせん断補強材貢献分を解析結果に基づいて定量的に評価した。これを曲げおよびせん断補強材に、鉄筋とFRP ロッドを混用した場合に拡張し、さらにこの評価方法の妥当性を実験結果を基に検証した。

キーワード：格子モデル、コンクリート貢献分、せん断補強材貢献分、せん断耐荷力

1. はじめに

FRP ロッドをはり部材の補強材として用いる場合、これを曲げおよびせん断補強材として利用することが考えられる。これに関して現在までに広範な研究が行われ、その結果、FRP ロッドを曲げおよびせん断補強材として用いたコンクリートはりに対して、そのせん断耐荷力を評価する式も提案されている[3,6]。著者らも、格子モデル[1,2]を用いた解析により、曲げおよびせん断補強材にFRP ロッドを用いたコンクリートはりのせん断耐荷機構を明らかにし、せん断耐荷力算定式を提案している[4]。しかしながら、鉄筋とFRP ロッドを曲げおよびせん断補強材として混用したコンクリートはりに関する研究は非常に少ないのが現状である。

本研究は格子モデルを用いた解析により、鉄筋とFRP ロッドを曲げおよびせん断補強材として混用したコンクリートはりの斜めひび割れ発生以後のせん断耐荷機構を定量的に評価し、せん断耐荷力算定式を提案するものである。

2. コンクリートはりのせん断耐荷力

せん断補強筋を有する鉄筋コンクリートはりにおいて、修正トラス理論によるせん断耐荷力の算定式(式(1))は、コンクリート貢献分 V_c とせん断補強筋によるトラス機構の抵抗力 V_s の和として与えられている。

$$V_y = V_c + V_s \quad (1)$$

式(1)でコンクリート貢献分 V_c は、スターラップのない鉄筋コンクリートはりにおけるせん断耐荷力であり、式(2)のように表される[8]。

$$V_c = 0.20 f'_c{}^{1/3} p_w{}^{1/3} d^{1/4} [0.75 + 1.4/(a/d)] b_w d \quad (2)$$

*1 名古屋大学大学院 工学研究科土木工学専攻, 工修(正会員)

*2 前田建設工業技術研究所土木構造研究室主任研究員, 工博(正会員)

*3 前田建設工業技術研究所土木構造研究室研究員, 工修(正会員)

*4 アジア工科大学院助教授 構造工学科, 工博(正会員)

ここに、 V_c は斜めひび割れ発生時のせん断力、 p_w は主筋比(%), f'_c はコンクリートの圧縮強度(MPa) d は有効高さ(m), a はせん断スパン, b_w はウェブ幅である。

せん断補強筋の貢献分 V_s はトラス理論に基づき、式(3)より求められる。

$$V_s = A_w f_{wy} z / s \quad (3)$$

ここに、 A_w は一組のスターラップの断面積、 f_{wy} はスターラップの降伏強度、 s はスターラップ間隔 $z=(7/8)d$ である。

3. FRP補強コンクリートはりにおけるせん断耐荷機構の評価

3.1 せん断補強のないFRP補強コンクリートはりのせん断耐荷力

格子モデルを用いた解析より、FRPロッドを主筋に用いたせん断補強のないコンクリートはりのせん断耐荷力 V_{cf} は、式(4)に示すように、FRPロッドと鉄筋の弾性係数比を考慮して、式(2)に弾性係数比の1/4乗を乗じることで評価できることが示されている[4]。

$$V_{cf} = V_c (E_f / E_s)^{1/4} \quad (4)$$

ここで、 E_f はFRPロッドの弾性係数、 E_s は鉄筋の弾性係数 (2.0×10^5 MPa) である。

3.2 FRP補強コンクリートはりのせん断耐荷力の評価式

著者らは、格子モデルを用いた、FRP補強コンクリートはりのパラメトリックスタディーに基づき、終局時のコンクリート貢献分とせん断補強材貢献分を、それぞれ定量的に評価し、これを組み合わせることにより、以下のようなせん断耐荷力算定方法を提案している[4]。

(a) コンクリート貢献分の定量的評価

FRP補強コンクリートはりにおけるコンクリート貢献分は、斜めひび割れ発生時にピークとなり、以後変形の増加に伴って低下していく。終局時のコンクリート貢献分 V_{cu} は格子モデルによるパラメトリックスタディーの結果、式(5)のように評価できることが示された[4]。

$$V_{cu} = 0.65 V_{cf} \quad (5)$$

ここで、 V_{cu} は終局時のコンクリート貢献分、 V_{cf} は式(4)で求められたFRP補強はりの斜めひび割れ発生時のせん断力である。

(b) せん断補強材貢献分の定量的評価

格子モデルによる解析によれば、せん断破壊モードは力学係数 ($100r_w f_u / f'_c$) の増加に伴い、せん断補強材破断型からコンクリート圧壊型へと移行していく。そして破壊モードにより、終局時のせん断補強材貢献分が変化していく。この変化を格子モデルによるパラメトリックスタディーに基づいて評価した結果、終局時のせん断補強材貢献分を式(6)のように表すことができた[4]。

$$\begin{aligned} 0 < k \leq 7, & \quad V_{su} = 0.8 V_s \\ 7 < k, & \quad V_{su} = [0.8 - 0.04(k - 7)] V_s \end{aligned} \quad (6)$$

ここで、 k は力学係数 ($100r_w f_u / f'_c$; r_w はせん断補強筋比で、 $r_w = A_w / (b_w s)$)、 V_{su} は終局時のせん断補強材貢献分、 V_s は式(3)で f_{wy} の代わりにFRPロッドの曲げ成形部の強度低下[3]を考慮した破

断強度 f_u を用いたものである。

(c) セン断耐荷力の算定式

FRP補強はりの終局時のコンクリート貢献分とせん断補強材貢献分を定量的に評価することにより、式(7)でせん断耐荷力を算定することができる。

$$V_{uf} = V_{cu} + V_{su} \quad (7)$$

ここで、 V_{uf} はFRP補強はりのせん断耐荷力、 V_{cu} は式(5)による終局時のコンクリート貢献分、 V_{su} は式(6)による終局時のせん断補強材貢献分である。

表-1 解析したはりの諸元

Beams	f_c (MPa)	せん断補強材			主筋		
		r_w (%)	$E_s(\times 10^4 \text{MPa})$	f_{wy} (MPa)	p_w (%)	$E_s(\times 10^4 \text{MPa})$	f_y (MPa)
No.1	35	0.11*	8.5*	1200*	1.93	20.0	700
No.2	32	0.12	20.0	350	1.93*	8.5*	1300*

注) *はFRPロッドで、 f_{wy} は破断強度を示す。はりの寸法は $b_w=0.3\text{m}$ 、 $d=0.35\text{m}$ 、 $a/d=4.0$ である。

4. 鉄筋とFRPロッドを曲げおよびせん断補強材として用いたコンクリートはりにおけるせん断耐荷力の定量的評価

3.では主筋とせん断補強材の両方にFRPロッドを用いたはりのせん断耐荷力の評価方法を述べた。ここでは、格子モデルを用い、鉄筋とFRPロッドを、主筋およびせん断補強材に混用したはりにおけるせん断耐荷機構の変化を明らかにし、その際のせん断耐荷力の評価方法を提案する。

4.1 主筋に鉄筋、せん断補強材にFRPロッドを用いたコンクリートはり

主筋に鉄筋、せん断補強材にFRPロッドを用いたはりを対象に、せん断スパン中央で格子モデルのフリーボディを考え、仮定の切断面での各部材力より、せん断力分担の程度を評価していく。

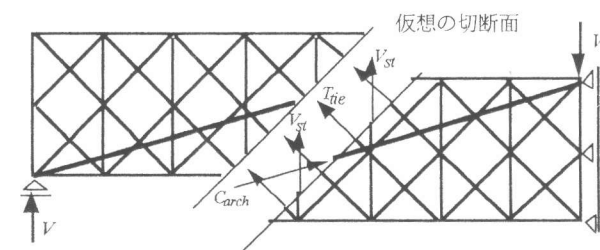
格子モデルにおける各部材の応力状態を考慮すると、コンクリートはりのせん断耐荷機構を支配するのは、コンクリートの斜め引張力、アーチ圧縮力、およびスターラップの抵抗力であると判断される。したがって、図-1に

示すように、せん断スパン中央の格子モデルの

仮定の切断面での各部材力より、せん断力分担を評価することにする。

図-2は主筋に鉄筋、せん断補強材にFRPロッドを用いたはり(表-1におけるNo.1)の、格子モデルから得られるせん断力分担状況の変化の例を示している。図-2における破線は式(2)による V_c と、式(6)でFRPロッドの曲げ成形部の強度低下を考慮した破断強度を用いた場合のせん断補強材の抵抗力 V_{su} を加算したものを表している。

図-2に示すように、コンクリート貢献分は、斜めひび割れ発生後、わずかに低下するが、終局時には、おおよそ V_c (式(2))相当のコンクリート貢献分が保持されていることが認められる。すなわ



V_{st} : スターラップの引張力

C_{arch} : アーチの圧縮力、

T_{nc} : コンクリートの引張斜材力

図-1 格子モデルのフリーボディと部材力

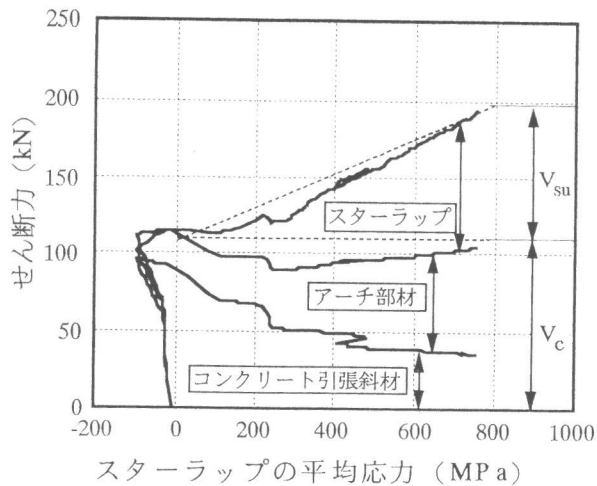


図-2 主筋に鉄筋，せん断補強材にFRPロッドを用いたコンクリートはりにおけるせん断力分担の変化

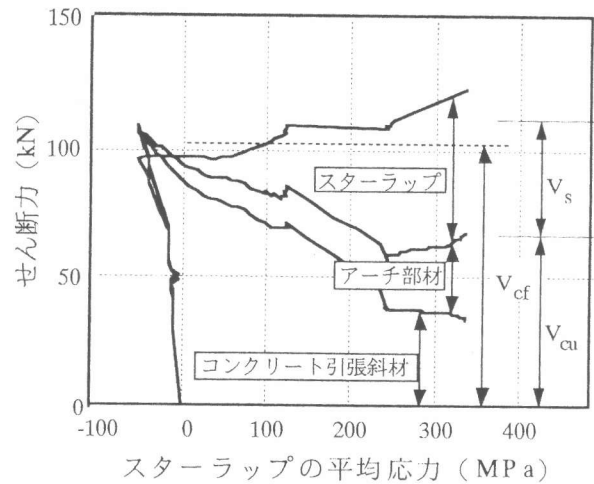


図-3 主筋にFRPロッド，せん断補強材に鉄筋を用いたコンクリートはりにおけるせん断力分担の変化

ち，コンクリート貢献分の変化は，RCはりの場合と同様であって，斜めひび割れ発生以後，せん断補強材の平均応力の増加に伴い，コンクリート引張斜材の抵抗力は単調に減少していくが，アーチ作用がこれを補完していくために，コンクリート貢献分はRCはりの場合と同様に，おおよそ一定値を保つのである．一方，せん断補強材の貢献分は，主筋，せん断補強材ともにFRPロッドで補強されたコンクリートはりにおける貢献分(式(6))と概ね対応していることが認められる．

以上を勘案し，主筋に鉄筋，せん断補強材にFRPロッドを用いたはりのせん断耐荷力を式(8)のように算定することとした．

$$V_u = V_c + V_{su} \quad (8)$$

ここで， V_u は主筋に鉄筋，せん断補強材にFRPロッドを用いたはりにおけるせん断耐荷力， V_c は式(2)， V_{su} は式(6)による，終局時のコンクリートおよびせん断補強材の貢献分である．

4.2 主筋にFRPロッド，せん断補強材に鉄筋を用いたコンクリートはり

続いて，主筋にFRPロッド，せん断補強材に鉄筋を用いたを对象に，せん断耐荷機構の変化を検討する．先ほどと同様にせん断スパン中央で格子モデルのフリーボディを考え，仮定の切断面での各部材力よりせん断力分担の程度を評価していく．

図-3は主筋にFRPロッド，せん断補強材に鉄筋を用いたはり(表-1におけるNo.2)の格子モデルから得られるせん断力の分担状況の変化の例を示している．図-3における破線は，FRPロッドと鉄筋の弾性係数比の1/4乗を考慮した，式(4)により計算される斜めひび割れ発生時のせん断力 V_{cf} を示している．さらに，主筋およびせん断補強材の両方にFRPロッドを用いたコンクリートはりに対して定式化された終局時のコンクリート貢献分 V_{cu} (式(5))と，式(3)で計算されるトラス理論に基づくスターラップのせん断抵抗力 V_s を示している．

図-3によれば，斜めひび割れ発生時のせん断力は式(4)による計算値に概ね対応している．斜めひび割れ発生以後，スターラップの平均応力の増加に伴い，コンクリート引張斜材の抵抗力は単調に減少していく．これを補うようにアーチ部材の抵抗力がわずかに増加するものの，それを加算したコンクリート貢献分は次第に低下していくことが認められる．そして終局時のコンクリート貢献

表-2 実験データの概要

実験者	せん断スパン比 (a/d)	コンクリートの 圧縮強度(MPa)	主筋弾性係数 ($\times 10^4$ MPa)	スターラップ弾性 係数($\times 10^4$ MPa)	スターラップの 破断強度(MPa)
寺田ら[5]	1.5~3.0	26.3~29.9	20.0	3.4~6.3	670~758
佐藤ら[6]	2.4	39.0~41.0	20.0	9.8	1335
	2.4	41.0	6.9	20.6	408*
金倉ら[7]	2.5	30.6	18.0	9.8	1334
	2.5	30.6	9.8	20.4	408*
著者ら[4]	4.0	37.9~42.1	20.0	5.0~11.5	1230~1300
	4.0	32.1	10.0	22.9	1652*

注) *は主筋にFRP, せん断補強材に鉄筋を用いた場合であり, 鉄筋の降伏強度を示す。

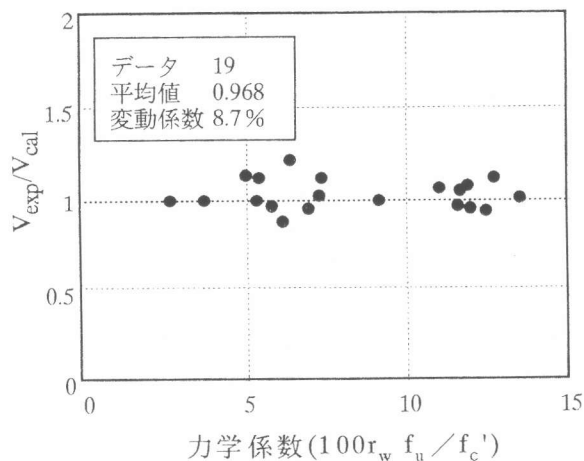


図-4 実験結果と式(8)による計算値との比較

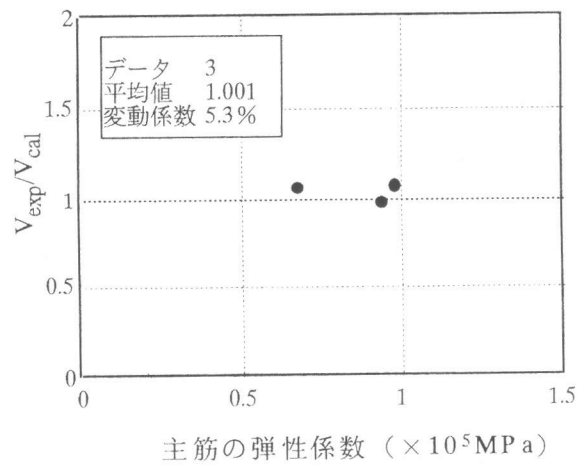


図-5 実験結果と式(9)による計算値との比較

分は, 主筋, せん断補強材ともにFRPロッドで補強されたはりにおける終局時のコンクリート貢献分(式(5))に概ね対応している。一方, せん断補強材の貢献分は, トラス理論に基づく式(3)による計算値と概ね対応していることが認められる。

以上より, 主筋にFRPロッド, せん断補強材に鉄筋を用いたはりのせん断耐力を, 式(9)のように算定することとした。

$$V_u = V_{cu} + V_s \quad (9)$$

ここで, V_u は主筋にFRPロッド, せん断補強材に鉄筋を用いたはりにおけるせん断耐力, V_{cu} は式(5), V_s は式(3)による, 終局時のコンクリートおよびせん断補強材の貢献分である。

4.3 式(8)および式(9)の適用性に関する検討

主筋に鉄筋, せん断補強材にFRPロッドを用いたはりのせん断耐力の算定方法として提案された式(8), および主筋にFRPロッド, せん断補強材に鉄筋を用いたはりの算定方法として提案された式(9)によって予測されたせん断耐力を, 既往の実験結果と比較しその適用性を明らかにする。

表-2は既往の実験データの概要を示したものである。図-4は実験値(表-2)と式(8)による計算値との比を力学係数に対してプロットしたものである。実験結果は全部で19データであり, 実験結果と式(8)との比の平均は0.968, 変動係数は8.7%である。図-4に示すように力学係数の変化に依存せ

ず、式(8)によるせん断耐荷力の算定値は実験結果を精度良く推定していることが認められる。

図-5は主筋にFRPロッド、せん断補強材に鉄筋を用いたはりのせん断耐荷力の実験値(表-2)と式(9)による計算値との比を力学係数に対してプロットしたものである。図-5に示すように実験データが少ないのであるが、図-5を見る限り、主筋の弾性係数の変化に依存せず、式(9)は実験結果を程良く推定していると言える。

5. 結論

本研究は格子モデルを用いた解析により、鉄筋とFRPロッドを曲げおよびせん断補強材として混用したはりの斜めひび割れ発生以後のせん断耐荷機構を定量的に評価し、せん断耐荷力の評価式を提案したものである。本研究の結果、得られた結論は以下の通りである。

- 1) 主筋に鉄筋、せん断補強材にFRPロッドを用いたはりにおけるコンクリート貢献分は、終局時におおよそ V_c 相当分が保持される。すなわち、斜めひび割れ発生以後、スターラップの平均応力の増加に伴い、コンクリート引張斜材の抵抗力は単調に減少していくが、アーチ作用がこれを補完していくために、コンクリート貢献分は、鉄筋コンクリートはりの場合と同様におおよそ一定値を保つのである。一方、せん断補強材の貢献分は、破壊モードによって変化し、トラス理論による計算値よりも小さい値を示す。
- 2) 主筋にFRPロッド、せん断補強材に鉄筋を用いたはりにおけるコンクリート貢献分は、斜めひび割れ発生以後、スターラップの平均応力の増加に伴い、次第に低下していく。一方、せん断補強材の貢献分は、トラス理論に基づく計算値に概ね対応している。
- 3) 終局時における、せん断耐荷機構中のコンクリート貢献分とせん断補強材貢献分をそれぞれ定量的に評価することにより、鉄筋とFRPロッドを曲げおよびせん断補強材として混用したはりのせん断耐荷力算定式を提案した。
- 4) 主筋に鉄筋、せん断補強材にFRPロッドを用いたコンクリートはりのせん断耐荷力の実験値と本研究で提案した算定式による計算値とを比較した結果、19個のデータに対して平均値0.968、変動係数8.7%となり、精度良く予測できることが示された。なお、主筋にFRPロッド、せん断補強材に鉄筋を用いたコンクリートはりのせん断耐荷力についても、実験データは少ないものの、実験結果を程良く推定できることが示された。

参考文献

- 1) 崔 益暢・二羽淳一郎：格子モデルによるRCはりのせん断性状の解析的評価，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.16, No.2, pp.563-568, 1994.6
- 2) 二羽淳一郎・崔 益暢・田邊忠顕：鉄筋コンクリートはりのせん断耐荷機構に関する解析的研究，土木学会論文集，V-26, No.508, pp.79-88, 1995.2
- 3) 中村 光・檜貝 勇：連続繊維で補強したコンクリートはりのせん断耐力の評価，土木学会論文集，V-26, No.508, pp.89-99, 1995.2
- 4) 二羽淳一郎・崔 益暢・三島徹也・鈴木顕彰：格子モデルによるFRP補強コンクリートはりのせん断耐荷力の定量的評価，土木学会論文集（投稿中）
- 5) 寺田年夫・鳥取誠一・涌井 一・宮田尚彦：FRPをせん断補強に用いたRCはりの破壊性状について，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.10, No.3, pp.541-546, 1988
- 6) 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量的評価，土木学会論文集，V-22, No.484, pp.51-60, 1994
- 7) 金倉正三・丸山久一・清水敬二・中村裕剛：FRP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
- 8) 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