

# 論文 格子モデルによるFRPロッド補強コンクリートはりのせん断耐荷力の評価

崔 益暢<sup>\*1</sup>・二羽淳一郎<sup>\*2</sup>・田辺忠顯<sup>\*3</sup>

**要旨** 本研究は、格子モデルを用いた解析結果により、FRPで補強されたコンクリートはりの斜めひび割れ発生後のコンクリートのせん断抵抗機構の変化を明らかにし、さらにせん断耐荷力を評価する方法を検討したものである。すなわち、斜めひび割れ発生時のコンクリート貢献分と破壊時のコンクリート貢献分の比率、トラス機構により予測されるせん断補強材の貢献分と破壊時の実際の貢献分の比率を解析的に明らかにした。

**キーワード**：FRPロッド、格子モデル、斜めひび割れ、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、曲げおよびせん断補強材としての利用が考えられ、補強筋としてFRPロッドを用いたコンクリートはりに関する研究が活発に行われている。その結果、せん断補強のないコンクリートはりにFRPロッドを曲げ補強筋として用いた場合、斜めひび割れ発生時のせん断耐荷力は、従来の耐荷力算定式にFRPロッドと鉄筋との弾性係数比を考慮することにより評価できることが報告されている[1]。

修正トラス理論によれば、せん断補強された鉄筋コンクリートはりでは、斜めひび割れ発生以後も斜めひび割れ発生時のコンクリート貢献分( $V_c$ )が保持されると仮定されている。これは鉄筋コンクリートはりにおいて、載荷点から支点へと伝達される直接的な圧縮力の流れ、いわゆるアーチ作用の増加を考慮することにより説明することが可能である[2]。しかしながら、FRP補強コンクリートはりにおいては、斜めひび割れ発生時のコンクリート貢献分は斜めひび割れの発生後、低下していくことが実験的に報告されている[3]。

本研究は格子モデルを用いた解析により、FRP補強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、せん断耐荷力の評価のための基礎的な知見を得ることを目的とするものである。

## 2. コンクリートはりのせん断耐荷力

### 2.1 スターラップのないコンクリートはりのせん断耐荷力

土木学会のコンクリート標準示方書に規定されている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の算定式に基づき、主筋にFRPロッドを用いたコンクリートはりの斜めひび割れ発生時のせん断力 $V_c$ について、辻らは弾性係数比を考慮した式(1)を提案している[1]。

$$V_c = 0.94 f'_c c^{1/3} [p_w(E_f/E_s)]^{1/3} d^{-1/4} [0.75 + 1.4/(a/d)] b_w d \quad (1)$$

\*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 名古屋大学助教授 工学部土木工学科、工博（正会員）

\*3 名古屋大学教授 工学部土木工学科、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( $\text{kgf/cm}^2$ )、 $d$ は有効高さ(m)、 $a$ はせん断スパン、 $b_w$ はウェブ幅、 $E_f$ はFRPロッドの弾性係数、 $E_s$ は鉄筋の弾性係数である。

## 2.2 せん断補強筋を有する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(2))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。

$$V_y = V_c + V_s \quad (2)$$

$V_s$ 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。

鉄筋コンクリートはりのせん断耐荷力の算定式として用いられている式(2)をFRPロッド補強コンクリートはりに適用するにはいくつかの問題点がある。例えば、修正トラス理論では、コンクリート貢献分 $V_c$ が斜めひび割れ発生以後、終局状態まで一定値を保つと仮定されている。著者らが提案した格子モデル[2, 4]によれば、鉄筋コンクリートはりの場合、斜めひび割れの発生以後、ウェブコンクリートのアーチ作用が卓越してくるので、コンクリート貢献分 $V_c$ は斜めひび割れ発生後も、おおよそ一定値を保つことが確認された。斜めひび割れ発生以後、コンクリートの斜め引張抵抗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 $V_c$ は、おおよそ一定値を保つと考えられたのである。

しかしながら、FRPロッド補強コンクリートはりでは、補強材の剛性低下に伴って、鉄筋コンクリートはりより、斜めひび割れ発生以後、同一のせん断力レベルでの変形が大きくなるので、圧縮軟化も進み、終局時のコンクリート貢献分は斜めひび割れ発生時の貢献分よりも小さくなると考えられる。

また、修正トラス理論において、せん断補強筋の貢献分 $V_s$ の計算には、式(3)に示されるようにスターラップの降伏強度 $f_{wy}$ が用いられているが、FRPロッドは降伏を示さず破断に至る。したがって、応力の再分配は期待できない。また、FRPロッドをせん断補強材として用いた場合、スターラップの曲げ成形部における強度低下のため、その引張強度は一軸引張試験から求まる値よりも小さくなる。これについては、理論的な強度低下の算定方法が報告されている[5]。

## 3. 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評価

鉄筋コンクリートはりのせん断耐荷力は修正トラス理論に基づいた式(2)により、算定されている。しかしながら、FRPロッドの力学的特性により、FRP補強コンクリートはりのせん断耐荷力の算定方法として、修正トラス理論をそのままの形では適用できない。

格子モデルは、鉄筋コンクリートはりのみならず、材料特性を考慮すればFRP補強コンクリート

はりにも適用できるので、格子モデルを用いてFRP補強コンクリートはりの解析を行うこととした。解析においては、FRPロッドをスターラップとして使用した場合の曲げ成形による強度低下を考慮した[5]。

解析の対象としたFRP補強コンクリートはりは全部で31通りであり、コンクリート圧縮強度を3水準、 $f_{c'}=25, 35, 45 \text{ MPa}$ 、FRPロッドを想定したせん断補強筋比を3水準、 $r_w=0.1, 0.2, 0.3\%$ 、FRPロッドの破断強度（母材）を3水準、700、1000、1300MPaに変化させた。さらに、コンクリート圧縮強度が、35および45MPaの場合、せん断補強筋比 $r_w=0.4\%$ で破断強度1600MPaのものを追加した。

図-1は解析したコンクリートはりの断面であり、ウェブ幅 $b_w=0.3\text{m}$ 、有効高さ $d=0.35\text{m}$ 、せん断スパン比 $a/d=4.0$ に固定している。主筋にもFRPロッドを使用することを想定したが、主筋比 $P_w=1.93\%$ 、破断強度1300MPaは一定とした。また、FRPロッドの弾性係数はすべて $8.5 \times 10^4 \text{ MPa}$ とした。

図-2は格子モデルによるFRP補強コンクリートはりの解析結果であり、力学係数( $r_w f_u / f'_{c'}$ )の増加に伴うせん断耐荷力の変化を示している。ここで用いた破断強度 $f_u$ は、曲げ成形部の強度低下を考慮したものである。図-2に示すように、力学係数の増加に伴い、次第にせん断耐荷力は増加していくが、力学係数がある程度以上になると、せん断耐荷力の増加は頭打ちとなる。このようなせん断耐荷力の増加傾向の変化は破壊モードの変化により説明することが可能である。解析結果によれば、力学係数が小さく、力学係数の増加とともに、せん断耐荷力が増加していく領域（おおよそ力学係数が7以下）では、破壊モードはスターラップとして使用されたFRPロッドの破断となるが、力学係数が増加してせん断耐荷力が頭打ちとなる領域での破壊モードは、ウェブコンクリート

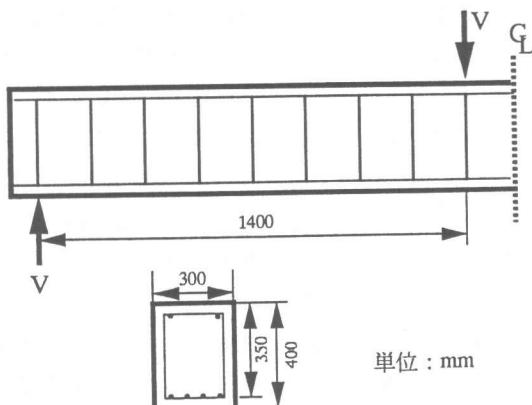


図-1 解析したコンクリートはりの断面・寸法

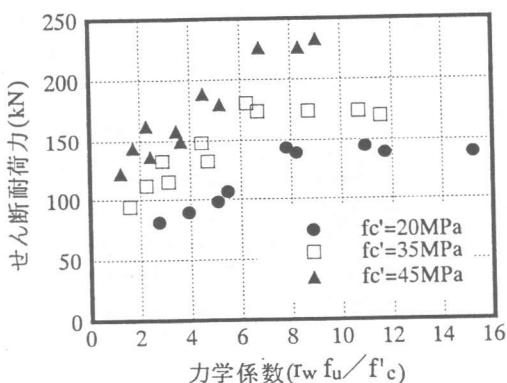


図-2 FRP補強コンクリートはりのせん断耐荷力と力学係数との関係

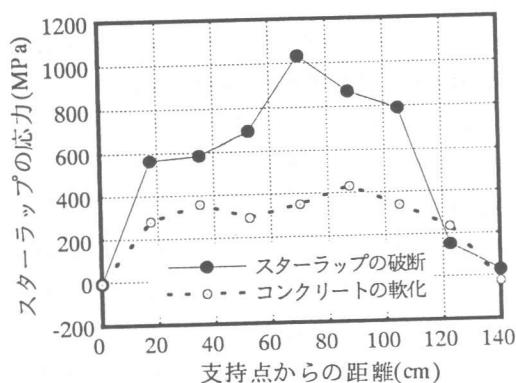


図-3 FRP補強コンクリートはりにおける破壊時のスターラップの応力

の圧縮軟化となっている。

図-3は格子モデルにより計算したFRP補強コンクリートはりの解析上のピーク時におけるせん断スパン内でのスターラップの応力分布を示している。なお、図-3に示したFRP補強コンクリートはりのせん断補強に使用したFRPロッドの破断強度は母材では1300MPaであるが、曲げ成形部の強度低下を考慮したため、破断強度は $f_u=1014\text{ MPa}$ となっている。

図-3において、実線で示したものがFRPロッドの破断により破壊に至るFRP補強コンクリートはりのスターラップの応力分布であり、破線で示したものがコンクリート圧縮部材の軟化により破壊に至るFRP補強コンクリートはりのスターラップの応力分布である。力学係数はそれぞれ5.07と15.2である。図-3に示したようにせん断補強の程度が低い場合は、せん断スパン中央部のスターラップ応力が破断強度に達するが、せん断補強量が著しく大きくなると、スターラップの応力があり増加しないうちに破壊に至ることが示されている。

#### 4. 格子モデルによる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

##### 4.1 FRP補強コンクリートはりの各部材のせん断力分担

修正トラス理論によるせん断耐荷力の算定式(式(2))では、コンクリート分担分 $V_c$ が斜めひび割れ発生以後も一定値を保つと仮定されているが、鉄筋コンクリートはりの場合、格子モデルによる解析結果はこれを裏付けるものとなっていた[2]。

ここでは、FRP補強コンクリートはりを対象に、格子モデルにより、斜めひび割れ発生以後の各部材の分担力を評価することとした。

格子モデルにおける各部材の応力状態を考慮すると、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部材、コンクリートのアーチ部材、およびスターラップの抵抗力であると判断されている。したがって、図-4に示すように、せん断スパン中央で格子モデルのフリーボディを考え、仮想の切断面での各部材力より、せん断力の分担の程度を評価することとした。

図-5は格子モデルから得られるせん断力の分担状況の変化の一例である。なお、解析条件は、 $f_{c'}=35\text{ MPa}$ ,  $r_w=0.2\%$ , せん断補強用FRPロッドの破断強度1000MPa、 $p_w=1.93\%$ 、曲げ補強用FRPロッドの破断強度1300MPa、 $b_w=0.3\text{ m}$ 、 $d=0.35\text{ m}$ 、 $a/d=4.0$ であり、FRPロッドの弾性係数はいずれも $8.5 \times 10^4\text{ MPa}$ としている。図-5中の破線は式(1)による $V_c$ の計算値と、式(3)でFRPロッドの破断強度を用いた場合のせん断補強材の抵抗力 $V_s$ の計算値を加算したものを見ている。なお、せん断補強用FRPロッド

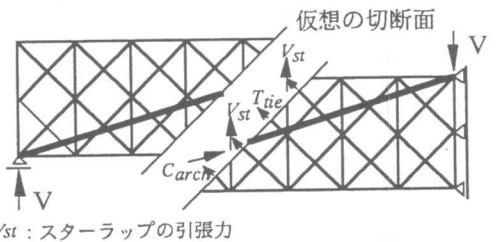


図-4 格子モデルのフリーボディと各部材力

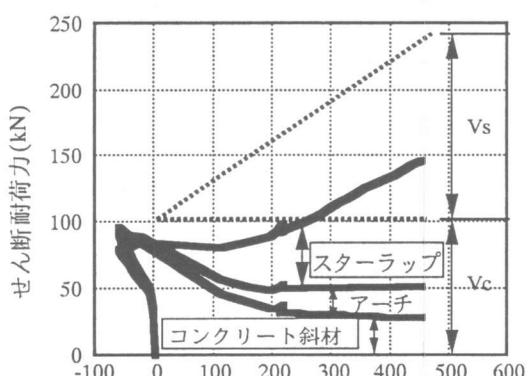


図-5 格子モデルによるせん断耐力の分担力の評価

については曲げ成形に伴う強度低下を考慮し、 $f_u = 780 \text{ MPa}$ としている。斜めひび割れの発生以後、コンクリート貢献分はコンクリート引張斜材による抵抗力とアーチ部材の抵抗力から構成される。斜めひび割れ発生時のせん断力は概ね式(1)によるものに対応している。斜めひび割れ発生以後は、スターラップの平均応力の増加に伴い（すなわち変形の増加に伴い）、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していくが、それらを加算したものは、鉄筋コンクリートはりにおいて見られたように、 $V_c$ 相当の値を保つことなく、変形の増加とともに、コンクリート貢献分が次第に低下していくことが示されている。

また、スターラップの貢献分も最終的に $V_s$ に達していない。斜めひび割れの発生以後、剛性の低いFRP補強コンクリートはりでは鉄筋コンクリートはりよりも同一のせん断力レベルに対する変形が大きいために、コンクリートの圧縮軟化が進むことと、FRPロッドが応力再分配を示さないことが、このような結果をもたらすものと考える。

#### 4.2 コンクリート貢献分とせん断補強材貢献分の終局値

FRP補強コンクリートはりのせん断耐荷機構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、低下していくことが解析結果より確認された。

図-6は3.で行ったパラメトリックスタディーの結果を用いて、FRP補強コンクリートはりにおける終局時のコンクリート貢献分（図-4に示した仮想の切断面における引張斜材の負担力とアーチ部材の負担力の和） $V_{cu}$ と $V_c$ （式(1)）の比率を表したものである。図-6に示されるように $V_{cu}/V_c$ は0.4～0.8の範囲に分布しており、力学係数の増加とともに若干低下していく傾向にあるが、概ね0.6程度の値となっている。

図-7は同様にパラメトリックスタディーの結果から、終局時のスターラップの平均応力（仮想の切断面における平均値） $\sigma_u$ と、曲げ成形部の強度低下を考慮したせん断補強用FRPロッドの破断強度 $f_u$ との比率を示したものである。図-7に示されるように $\sigma_u/f_u$ は0.4～0.8の範囲にあるが、力学係数の増加に伴い、次第に減少していく。力学係数が7程度よりも小さく、破壊モードがせん断補強材の破断となる場合では、 $\sigma_u/f_u$ は0.6程度である。一方、力学係数が7を越えてさらに増加していくと、破壊モードがスターラップ破断型からコンクリート圧壊型へと移行していくが、これに伴って $\sigma_u/f_u$ の値も低下していく傾向にある。

図-6および図-7に示された各貢献分の終局値を用いれば、これらを $V_c$ および $V_s$ に乘じて加算することにより、FRP補強コンクリートはりのせん断耐荷力を、破壊モードによらず予測していくこ

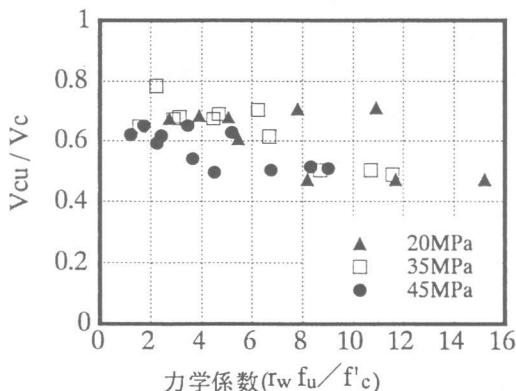


図-6 コンクリート貢献分の終局値

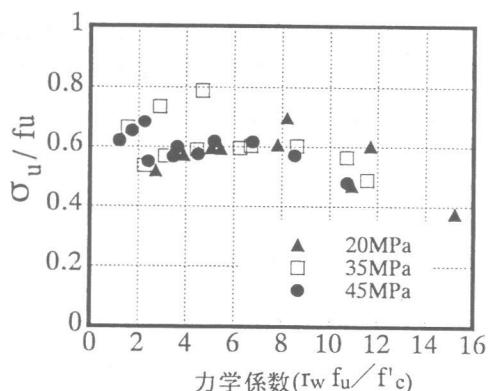


図-7 せん断補強材貢献分の終局値

とが可能となる。精度の高いせん断耐荷力評価のためには、さらに広範なパラメトリックスタディーを行い、各貢献分の終局値の変化を適切に定式化していくことが必要であるが、本手法によれば比較的容易に、FRP補強コンクリートはりのせん断耐荷力算定式が得られるものと考えられる。

## 5. 結論

格子モデルを用い、FRP補強コンクリートはりの解析を行った。解析結果より、FRP補強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の変化が明らかとなった。さらに耐荷機構を構成する各部材の貢献分に着目して、せん断耐荷力を評価する方法を検討した。本研究の結果、得られた結論は以下の通りである。

- 1)格子モデルを用いたパラメトリックスタディーの結果、FRP補強コンクリートはりのせん断破壊モードは、力学係数の増加とともに変化し、スター・ラップ破断型からコンクリート圧壊型へと移行していくことが明らかとなった。
- 2)修正ト拉斯理論においては斜めひび割れ発生以後、コンクリート貢献分が保持されると仮定されているが、格子モデルによる解析結果より、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、斜めひび割れ発生以後、単調に減少していくことが示された。
- 3)FRPロッドをスター・ラップに使用した場合、終局時の平均応力は、曲げ成形部の強度低下を考慮した以上に低下していく。
- 4)FRP補強コンクリートはりにおいて、コンクリート貢献分とせん断補強材貢献分の終局値は $V_c$ および $V_s$ に比較して、いずれも0.4～0.8程度となっていた。特にせん断補強材貢献分は、力学係数の増加に伴う破壊モードの変化に応じて、次第に減少していく。

## 参考文献

- 1) 辻 幸和・齊藤 等・関島謙蔵・小川広幸：FRPで補強したコンクリートはりの曲げおよびせん断性状、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.10, No.3, pp.547-552, 1988.6
- 2) 二羽淳一郎・崔 益暢・田辺忠顯：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) 横井克則・島 弘・水口裕久：RCせん断耐力算定式のFRPロッドで補強したはりに対する適用性、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.14, No.2, pp.713-716, 1992.6
- 4) 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
- 5) 中村光・桧貝 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