

論文

[2109] 連続繊維補強材を用いたRCスラブの押抜きせん断強度に与える補強材剛性の影響について

正会員○佐藤 靖彦 (北海道大学大学院)
 正会員 高橋 義裕 (北海学園大学土木工学科)
 正会員 上田 多門 (北海道大学土木工学科)
 正会員 角田與史雄 (北海道大学土木工学科)

1. はじめに

連続繊維は、鉄筋やPC鋼材とは異なる材料特性を持つため、それらに代わるコンクリート用補強材として用いる場合、従来の設計概念や設計式をそのまま適用することには数多くの問題点が存在し、その一つとしてはりおよび面部材のせん断耐力に関する設計方法があげられる。

一般に、連続繊維補強コンクリートはりのせん断耐力は、同じ補強面積を持つ鉄筋コンクリート部材に比べ低下することが言われている。この理由として、連続繊維の弾性係数が鋼材に比べ小さいことやその付着性状が影響していることが考えられるが、現在のところ明確な低下原因は解明されていない。現段階では、そのせん断耐力の評価方法として連続繊維補強材と鉄筋との弾性係数比を考慮することが提案されている [1]。その結果を踏まえ我々は、連続繊維補強材 (アラミド繊維) を用いたRCスラブの静的載荷試験を行い、その押抜きせん断耐力をコンクリート標準示方書のせん断耐力算定式により整理した結果、RCスラブにおいても連続繊維補強材と鉄筋との弾性係数比を考慮することにより実験値と計算値は比較的良い対応を示すことを報告したが [2]、補強筋比の増加とともに耐力比 (実験値/計算値) が大きくなる傾向を示し、更なる調査が必要と思われた。

そこで本研究は、スラブの補強材としてアラミド繊維 (AFRP) に加え、炭素繊維 (CFRP) および鉄筋を用い、補強材剛性 (補強筋比×弾性係数) の相違に着目し、RCスラブの押抜きせん断性状およびその耐力に与える補強材剛性の影響を検討することを目的として行うこととした。

2. 実験概要

2.1 使用材料

使用したスラブの補強材は、表-1に示すAFRP、CFRPおよび鉄筋の3種類である。AFRPとCFRPは、それぞれアラミド繊維、炭素繊維を組紐状に編み樹脂を含浸させたもので、その表面には珪砂を接着したものである。また、鉄筋は焼き入れすることにより降伏強度を高めたものである。

コンクリートは、早強ポルトランドセメントを用い、粗骨材の最大寸法を25mm、単位水量175kg/m³、水セメント比53%とした。

表-1 補強材の力学的特性値

| | 公称直径 (mm) | 公称断面積 (mm ²) | 降伏強度 (MPa) | 引張強度 (MPa) | 弾性係数 (GPa) |
|------|--------------|-----------------------------|---------------|---------------|---------------|
| AFRP | 11.3 | 100 | — | 1225 | 64 |
| CFRP | 8.0 | 50 | — | 1118 | 126 |
| CFRP | 11.3 | 100 | — | 1105 | 121 |
| 鉄筋 | 12.7 | 127 | 569 | 931 | 142 |

2. 2 実験供試体

供試体は、主に補強材剛性（補強筋比×弾性係数）を実験変数として7体作成した。その供試体諸元を表-2に示す。供試体の形状は、図-1に示すように、全長1600mm、スパン長1000mm、スラブ厚100mmの円形スラブである。ただし、補強筋はすべての供試体において直交二方向配筋としており、有効厚は二方向の平均で75mmとしている。

2. 3 载荷方法および測定項目

载荷は、スラブ中央点に直径200mmの円形鋼板を介し、静的に約5kN間隔で単調に増加させ破壊に至らしめた。支承は、直径1000mmの鋼性円形リングを用い単純支持としている。

また、測定は、破壊荷重、ワイヤストレインゲージによりスラブ上面のコンクリートと補強筋のひずみ、およびスラブ上面での変位について行った。

3. 実験結果および考察

3. 1 破壊性状

8体の供試体はすべて押抜きせん断破壊を起こした。各供試体の破壊荷重を表-3に示す。破壊後のスラブ下面のひびわれ性状は、既往の実験結果と同様なものであった。また、その押抜き性状は、すべての供試体において载荷板周縁直下から約30°の傾きを持つ破壊面が観察され、補強材による破壊性状の違いは見られなかった。

3. 2 コンクリート強度の影響

一般に、スラブの押抜きせん断耐力の多くは、せん断耐力がコンクリート強度の平方根に比例すると考えている[3]。これは、押抜きせん断破壊がコンクリートの引張強度に支配されるとしているものである。連続繊維で補強したスラブの押抜き形状には、载荷板直下の垂直領域が観察されず、その破壊は、はりにおける斜め引張破壊形式となっていると言え、その意味において、押抜きせん断耐力はコンクリート強度の平方根（以下 $\sqrt{f_c'}$ ）に関連づけられると予想される。

表-2 供試体諸元

| | コンクリート強度 (MPa) | 補強筋 | 補強筋比 (%) | 補強筋剛性 p E |
|------|----------------|------|----------|-----------|
| FCS1 | 30.4 | AFRP | 1.03 | 656 |
| FCS2 | 32.5 | AFRP | 1.48 | 943 |
| FCS3 | 33.7 | AFRP | 2.22 | 1415 |
| FCS4 | 32.8 | AFRP | 1.03 | 656 |
| FCS5 | 16.4 | AFRP | 1.03 | 656 |
| FCS6 | 32.1 | CFRP | 0.67 | 844 |
| FCS7 | 36.2 | 鉄筋 | 1.54 | 2189 |
| FCS8 | 32.3 | CFRP | 1.48 | 1790 |

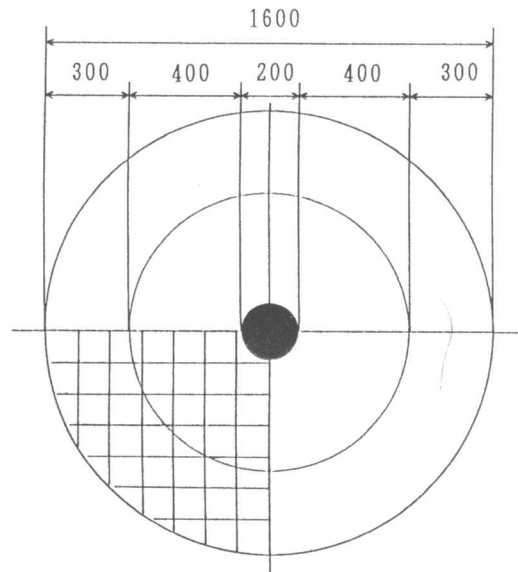


図-1 実験供試体

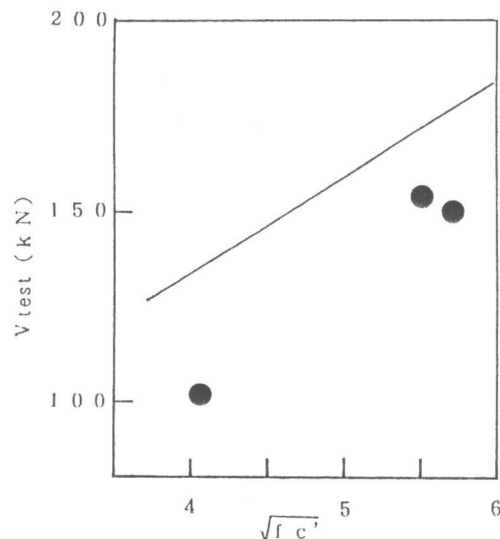


図-2 コンクリート強度の影響

図-2は、コンクリート強度以外の変数値の等しいスラブについて、破壊荷重の比較を行ったものである。ここでは幅広いコンクリート強度において調査していないが $\sqrt{f'c}$ の増加によりせん断耐力は増加していることがわかる。また、図中の実線はコンクリート標準示方書の押抜きせん断耐力算定式[4]により求めた耐力と $\sqrt{f'c}$ の関係を示すものである。これと本実験結果を比較してみると同じコンクリート強度に対するせん断耐力は異なっているが、 $\sqrt{f'c}$ に対する耐力の増加割合はほぼ同程度となっており、やはり連続繊維で補強したスラブにおいても、押抜きせん断耐力に与えるコンクリート強度の影響を鉄筋を用いた場合と同様に取り扱えるようである。

図-3・4は、コンクリート強度がそれぞれ30.4MPa、16.4MPaであるFCS1とFCS5の中央点の変位および補強筋のひずみを、荷重を $\sqrt{f'c}$ で除した値により整理したものである。これらの図からわかるように、両者は変位においても補強筋のひずみにおいても同じ性状を示しており、荷重を $\sqrt{f'c}$ で除すことにより、コンクリート強度以外の変数値の等しいスラブの変位およびひずみ性状を同一視できるものと思われる。

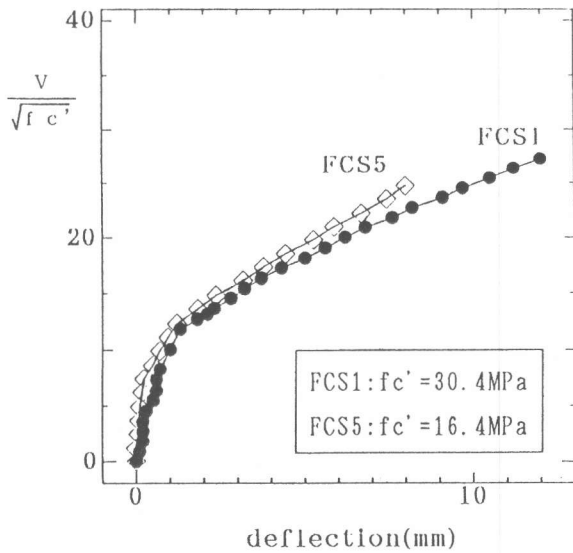


図-3 荷重-変位関係

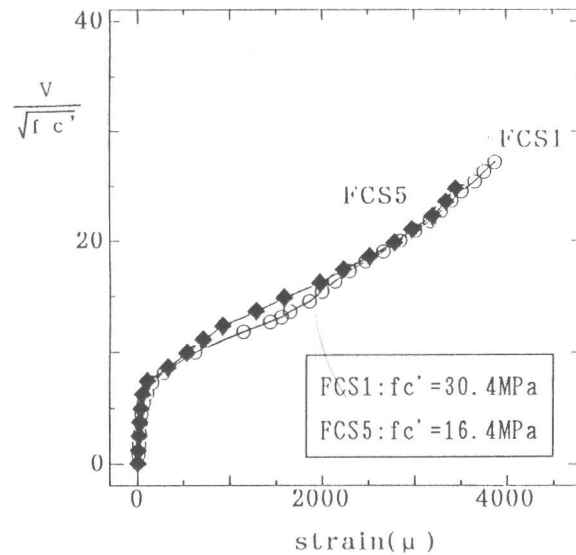


図-4 荷重-ひずみ関係

3.3 補強材剛性の影響

ここでは、補強材剛性とスラブの変形性状および押抜きせん断耐力との関係について検討する。ただし、それらに与えるコンクリート強度の影響を除くために、荷重をコンクリート強度の平方根で除した値を用い整理することとする。

(A) 変形性状に与える影響

図-5は、スラブ中央点の変位性状を、図-6は破壊直前において補強筋のひずみが最も大きかった位置でのひずみ性状を示すものである。ここで示す4つの実験値は、補強材剛性がFCS7・FCS8・FCS2・FCS6の順に大きいものであるが、変位およびひずみ図において、

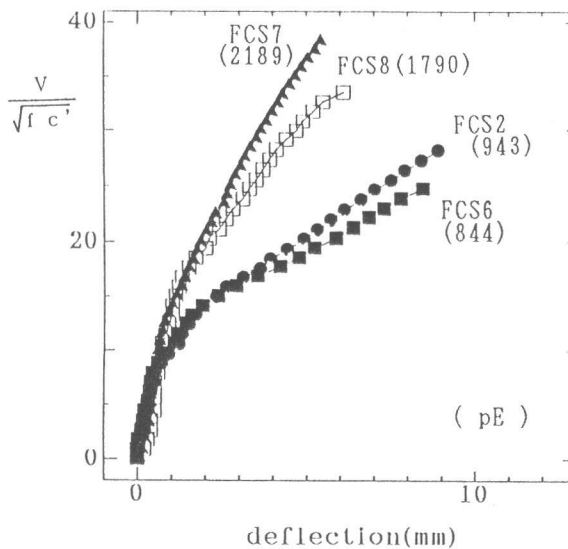


図-5 荷重-変位関係

補強材剛性の影響が明確に現れている。その中でFCS2とFCS6は、それぞれ、AFRP・CFRPを補強材としているが、それらは補強筋比が異なり補強材剛性がほぼ等しいものである。図-5において両者の変形は、ほぼ同様な性状を示しており、補強材剛性が同じであれば、その変形性状をほぼ同等に評価できることが言える。一方、ひずみ性状において両者は一致こそしていないが、その増加傾向は概ね等しい。しかし、同じ強度に対するそれぞれのひずみ値には違いがみられ、 $V/\sqrt{f_c'}$ が15であるときの両者のひずみを比較してみると、FCS2では、 829μ 、FCS6では 1639μ となっており、FCS6のひずみの方が、FCS2の約2倍となっていた。また、応力で示すと、FCS2が53MPaでありFCS6が198MPaとなっていた。これは、FCS2の補強筋比が1.48%に対しFCS6では0.67%と約2倍程度小さいため、その影響がひびわれ発生時に大きく現れたものと思われる。

FCS7は、焼き入れした鉄筋を補強材として用いている。これは補強材が降伏する前に破壊させる目的で行ったものであるが、図-5に示すように、その変形性状は、連続繊維を用いた場合と同様に、補強材の材料特性がよく現れ、ひびわれ発生前後ともに直線的な挙動を示している。また、同じ補強筋比を持ち補強材の弾性係数のみが異なるFCS2およびFCS8とは、ひびわれ発生後の変位の増加割合が異なっているが、その割合は、それらの弾性係数の大きさにほぼ比例しており弾性係数の相違が顕著に見られた。また、 $V/\sqrt{f_c'}$ が15であるときのFCS7、FCS8およびFCS2の応力は、それぞれ、45MPa、60MPa、53MPaであり概ね等しかった。

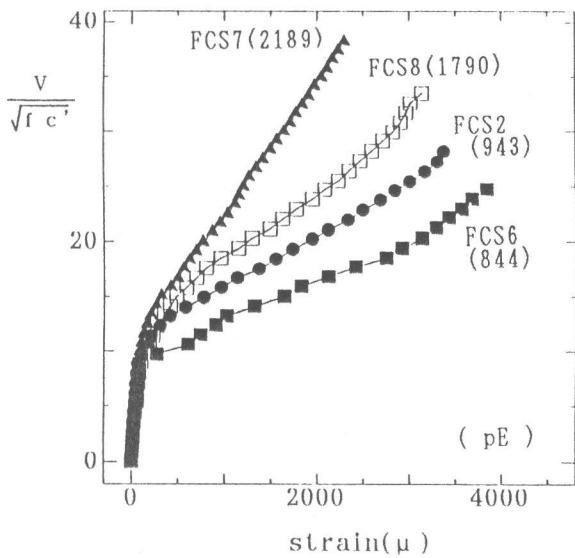


図-6 荷重-ひずみ関係

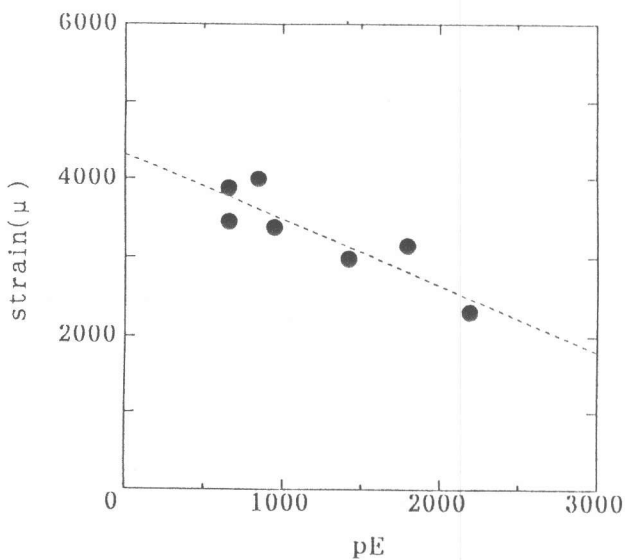


図-7 補強材剛性と最大ひずみ

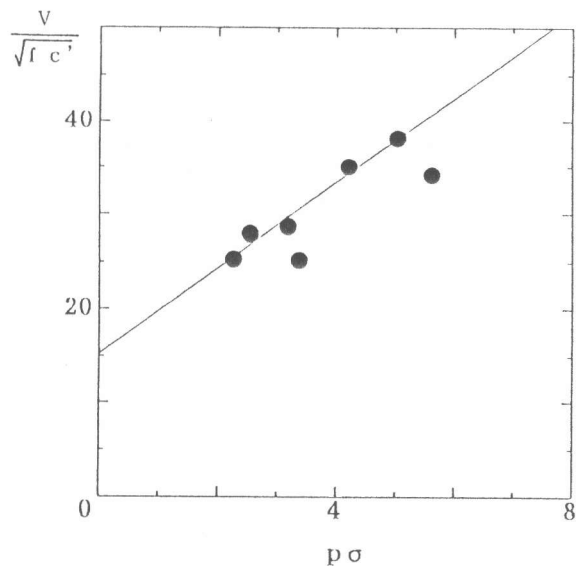


図-8 $V/\sqrt{f_c'}$ と $p\sigma$

(B) 押抜きせん断耐力に与える影響

図-7は、各供試体の破壊直前における補強筋ひずみの最大値と補強材剛性の関係を表すものである。図から補強材剛性が増加するにつれ最大ひずみが直線的に低下していることがわかる。

次に、この補強材剛性と最大ひずみが押抜きせん断耐力とどのような関係にあるかを検討することとする。ここでは、補強材剛性と最大ひずみを掛け合わせた $p\sigma$ ($p \varepsilon E$) と $V/\sqrt{f_c'}$ との関係を図-8に示す。この図より $p\sigma$ の増加により $V/\sqrt{f_c'}$ は直線的に増加していることがわかる。したがって、補強筋比とともに破壊時の補強材の応力を設定することができるならば、その押抜きせん断耐力を評価できるものと思われる。しかし、実際には破壊時の応力を予想することは非常に難しく、今後、詳細な検討が必要とされる。

4. 押抜きせん断耐力の評価

まず、補強筋比が等しく弾性係数のみが異なるFCS2、FCS7およびFCS8の耐力の比較を行う。

その中で弾性係数が64GPaと最も小さいFCS2を基準に考えると、弾性係数が1.9倍であるFCS8の耐力は1.2倍であり、弾性係数が2.2倍であるFCS7では耐力は1.4倍となっていた。よって明らかに弾性係数の相違が耐力に現れており、押抜きせん断耐力を評価するためには、補強材の材料特性の影響を何等かの方法で考慮する必要がある。

表-3は、コンクリート標準示方書の押抜きせん断耐力算定式を用い本実験スラブの耐力の評価を行ったものである。

今、先に比較したFCS2、FCS7およびFCS8に着目すると、示方書式をそのまま用いた場合(表-3の①)、FCS7とFCS8における耐力比(実験値/計算値)が1.0程度に対し、FCS2の耐力比は0.8程度となっているが、示方書式の βp なる項に補強材と鉄筋との弾性係数比を考慮した場合(表-3の②)は、耐力比がすべて1.2程度となっており、示方書式によりその耐力を算定する場合は、弾性係数比を考慮することにより材料特性の相違を評価できると思われる。しかし、この方法では、どの供試体においても20%あまり安全側の評価となっている。

そこで、弾性係数比を考慮する方法との比較として、先に示したように押抜きせん断強度と $p\sigma$ の間には一義的な関係が観察されたので、この現象を示方書式に反映させることを考える。

しかし、示方書式においては、角田式[3]のように破壊時の応力度を用いるようにはなっていない。よって、破壊時の応力度を鉄筋の降伏強度(353MPa)として、示方書の βp を以下のように修正して考えることとした。

$$\beta p = \sqrt[3]{100 \cdot p \frac{\sigma_f}{\sigma_y}}$$

p : 補強筋比

σ_f : 本実験スラブの最大ひずみより求めた応力

σ_y : 鉄筋の降伏応力

表-3 耐力算定結果

| 供試体 | 破壊荷重 (kN) | 示方書式 | | | 角田式 |
|---------|--------------|---------------|---------------|----------------|----------------|
| | | ① | ② | ③ | |
| FCS1 | 154 | 171 (0.90) | 116 (1.33) | 152 (1.01) | 147 (1.05) |
| FCS2 | 163 | 200 (0.82) | 135 (1.21) | 167 (0.98) | 166 (0.98) |
| FCS3 | 203 | 232 (0.88) | 157 (1.29) | 191 (1.06) | 192 (1.06) |
| FCS4 | 150 | 178 (0.84) | 120 (1.25) | — [*] | — [*] |
| FCS5 | 102 | 126 (0.81) | 87 (1.17) | 107 (0.95) | 116 (0.88) |
| FCS6 | 142 | 152 (0.93) | 127 (1.16) | 171 (0.83) | 167 (0.85) |
| FCS7 | 229 | 214 (1.07) | 189 (1.21) | 208 (1.10) | 216 (1.06) |
| FCS8 | 194 | 199 (0.97) | 167 (1.16) | 206 (0.94) | 225 (0.86) |
| 耐力比の平均値 | | 0.90 | 1.22 | 0.98 | 0.96 |

* FCS4は、測定機が不調のため補強筋ひずみを計測できなかった

その結果を表-3 (③) に示すが、FCS2、FCS7およびFCS8の耐力比は、それぞれ0.98、0.94、1.10であり、精度良く評価できている。また、全供試体と比較すると、弾性係数比を考慮した場合の耐力比の平均値が1.22に対し、応力比を考慮した場合には0.98となっており、実験値と計算値は非常に良い対応を示した。

また、比較のため補強材強度を考慮できる角田式を用い場合の計算結果を表-3に示す。ここでも、補強材の応力に実際の応力 σ_f を用いている。また、先に示した図-7における実線は、角田式により求めた押抜きせん断強度と $p\sigma$ の関係を示すものであるが、これらよりわかるように、実験値と計算値は良い相関関係を示し、耐力比は0.96となっていた。しかし、FCS6とFCS8は、若干ではあるが他の供試体とは耐力比が異なる。これは、示方書式を用いた場合においても同様な傾向にあったが、それらの破壊直前の応力は、それぞれ481MPa、379MPaであり、これらだけが今回基準とした鉄筋の降伏応力よりも大きなものであった。

以上、本研究では、押抜きせん断耐力を既往の耐力算定式により評価した結果、補強材の実測応力を用いることにより実験値を精度良く評価することができたが、今後、更に調査および検討を続けていく予定である。

5. 結論

本論文を整理すると以下の内容にまとめられる。

- 1) 鉄筋コンクリートスラブ同様、連続繊維を用いた場合においても押抜きせん断耐力は、コンクリート強度の平方根と良い相関関係を示した。
- 2) 補強材の弾性係数が異なっても補強材剛性が等しければ、その変形性状は概ね等しかった。
- 3) 補強材剛性が大きくなると破壊直前における補強筋の最大ひずみは直線的に減少していたが、その両者を掛け合わせた値 $p\sigma$ と押抜きせん断耐力をコンクリート強度の平方根で除した値 $V/\sqrt{f_c'}$ には直線関係が認められた。
- 4) 3)の結果を踏まえ、既往の押抜きせん断耐力算定式に実測ひずみより求めた応力を考慮することにより、押抜きせん断耐力を精度良く評価できた。

謝辞：三井建設（株）から、連続繊維を御提供頂きましたことを、ここに厚くお礼申しあげます。

また、実験を行うにあたり、北海道大学の木村 勉技官、風野裕明君（修士1年）には多大な助力を得た。ここに深く謝意を表します。

参考文献

- 1) 辻・斉藤・関島・小川：FRPロッド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、1988.5
- 2) 佐藤・古内・角田・高橋：アラミド繊維性FRPロッドで補強したRCスラブの押抜きせん断破壊性状に、
コンクリート工学年次論文報告集、Vol.13、No.2 pp.855-860、1991.6
- 3) 角田・井藤・藤田：鉄筋コンクリートスラブの押抜きせん断耐力に関する実験的研究
土木学会論文報告集、Vol.229、pp.105-115、1974.9
- 4) コンクリート標準示方書（設計編）、土木学会、1991