

V-11

FRP ロッドで補強した円形スラブの押抜きせん断破壊性状

北海道大学大学院 学生員 佐藤 靖彦

北海学園大学工学部 正 員 高橋 義裕

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. まえがき

FRP ロッドは、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、FRP ロッドで補強した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、FRP ロッドの弾性係数が鋼材に比べ小さいことやその付着特性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、FRP ロッドを用いたRC はりの場合、従来の耐力算定式において、FRP ロッド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、我々はアラミド繊維製FRP ロッドで補強した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FRP ロッド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好な対応を示すことを報告した²⁾。

本研究では、アラミド繊維(AFRP)に加え、炭素繊維(CFRP)および鉄筋を用い、補強筋剛性(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筋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

表-1 補強筋の力学的特性値

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およびCFRPは、アラミド、炭素繊維を組紐状に編み樹脂を含浸させてもので表面に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としている。

	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	10.0	—	1225	64
CFRP	8.0	5.0	—	1086	147
鉄筋	12.7	12.7	569	931	142

Punching Shear Behavior of FRP Reinforced Concrete Circular Slabs

by Yasuhiko SATO, Yoshihiro TAKAHASHI, Tamon UEDA and Yoshio KAKUTA

2-2 実験供試体

供試体は、主に補強筋剛性（弾性係数×補強筋比）の相違に着目し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 荷重方法および測定方法

荷重は、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の鋼製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、ワイヤストレーンゲージによりスラブ上面（圧縮側）のコンクリートおよび補強筋のひずみ、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

破壊は、すべて押抜きせん断により破壊した。押抜きせん断破壊を起こした供試体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、押抜き性状は、すべての供試体において、荷重板周縁直下から押抜かれており、約30°の破壊面が形成されていた。

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算定式の多くは、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。FRPロッドで補強したRCスラブの押抜き形状には、荷重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いえ、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。

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

表-2 実験供試体諸元

	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	985
FCS7	36.2	鉄筋	1.54	2189

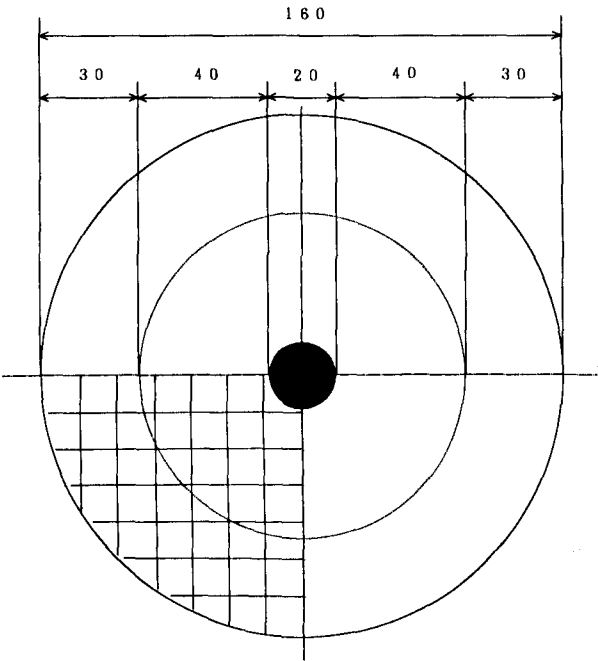


図-1 供試体図

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、FRP ロッドで補強した RC 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、鉄筋で補強した場合と同様に取り扱える様である。

3-3 補強筋比の影響

鉄筋で補強した RC スラブの場合、補強筋比があまり大きくなければ、押抜き耐力と補強筋比の間には、ほぼ直線的な関係が見られ、補強筋比が非常に大きい場合には、補強筋比と押抜きせん断耐力との間には、特定の傾向が見られないことが報告されている³⁾。これは、補強筋比が大きくなければ、最大曲げモーメント付近の鉄筋が降伏後に破壊を起こすのに対し、補強筋比が大きければ、鉄筋は降伏せずに破壊することが予想され、この補強筋応力度の相違が、補強筋比とせん断耐力関係に大きく影響していることが考えられる。その意味において、FRP ロッドは、降伏現象を示さない弾性体であるため、補強筋比と耐力の基本的な関係を検討する必要があると思われる。

そこで今回の実験では、補強筋比が、1.0 % から 2.2 % と比較的大きい範囲において、補強筋比に対する耐力の増加傾向を調査した。その結果を示したものが、図-3 である。この図において、押抜きせん断耐力に与えるコンクリート強度の影響を無視するために、実際の押抜きせん断破壊荷重を $\sqrt{f_c'}$ で除した値を用い整理することとした。また、本論文においては、改めて定義しない限り、押抜きせん断耐力は、 $\sqrt{f_c'}$ で除したものとする。

図-3 において、補強筋比の増加に伴い押抜きせん断耐力は、ほぼ直線的に増加しており、2.2 % 以内において、耐力は補強筋比の増加にともない押抜きせん断耐力は増加する結果が得られた。

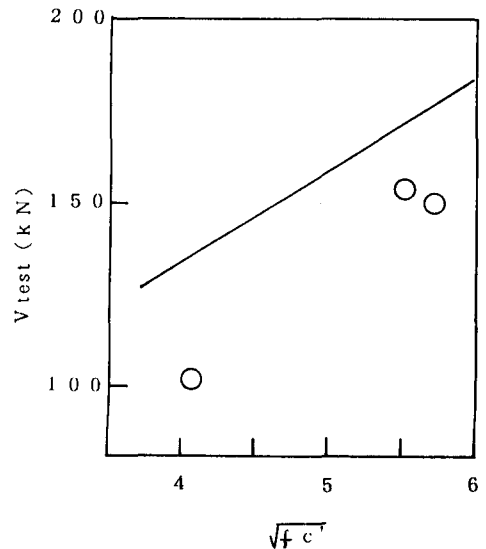


図-2 コンクリート強度の影響

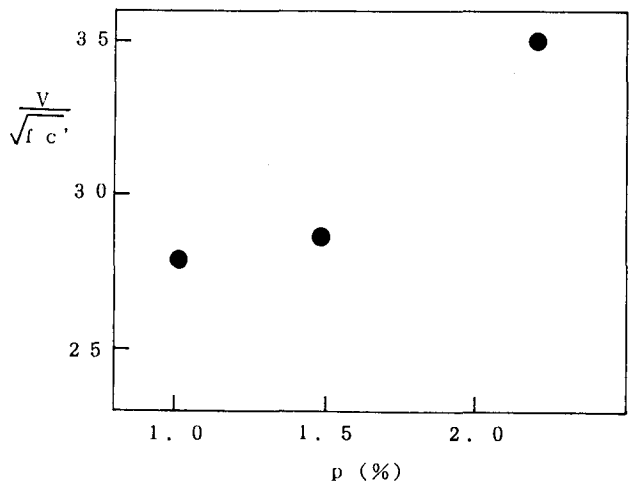


図-3 補強筋比の影響

3-4. 補強筋剛性の影響

(A) 変形性状に与える影響

図-4は、スラブ中央点の荷重-変位関係を、図-5は、破壊直前においてひずみが最も大きかった位置での荷重-ひずみ関係を示すものである。ただし、荷重は、 $\sqrt{f_c'}$ で除した値を用いている。

FCS2とFCS6は、それぞれAFRP、CFRPを補強筋として用いているが、それらは、補強筋比が異なり、補強筋剛性がほぼ等しいものである。図-4において両者の変形は、ほぼ同様な性状を示しており、補強筋剛性が同じであれば、その変形性状を同等に評価できることがいえる。一方、図-4に示すひずみ性状においては、FCS2とFCS6のひずみの増加傾向が異なっている。これは、FCS2の補強筋比が、1.5%に対し、FCS6では0.67%と約1/2程度小さいために、同じ荷重に対し、FCS6のひずみの方が大きくなっているものと考えられる。今、荷重 $V/\sqrt{f_c'}=15$ である時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、CS2の約2倍となっていた。また、この時の応力は、FCS2が、53MPaであり、FCS6では241MPaとなっていた。

FCS7は、焼き入れした鉄筋を補強筋として用いている。これは、補強筋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-4に示す荷重-変位関係よりわかるように、FCS8の変形性状は、FCS2およびFCS6同様、補強筋の材料特性がよく現れ、ひび割れ発生前後ともにほぼ直線的な変形性状を示している。

しかし、同じ補強筋比を持ち補強筋の弾性係数のみが異なるFCS2とは、ひび割れ発生後の変位の増加割合が異なるが、その割合は、FCS7とFCS2の弾性係数の大きさにほぼ比例し

ており、弾性係数の相違が明確に現れていた。また、その傾向は、図-5の荷重-ひずみ関係においても同様に見られた。また、荷重 $V/\sqrt{f_c'}=15$ である時のFCS7のひずみは 319μ であり、応力で表すと45MPaとなり、応力が53MPaであったFCS2と概ね等しかった。

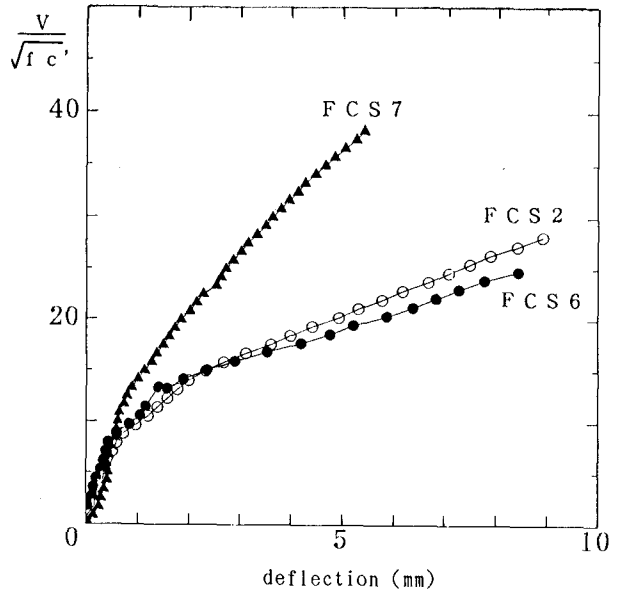


図-4 荷重-変位曲線

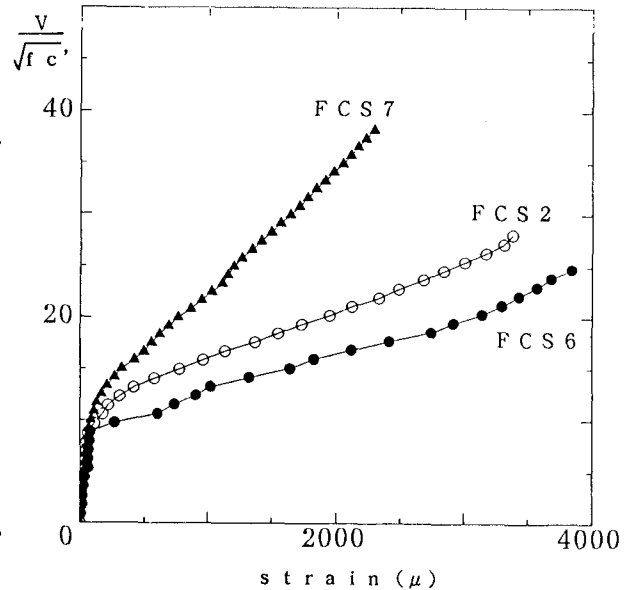


図-5 荷重-ひずみ曲線

(B) 押抜きせん断耐力に与える影響

図-6は、各供試体における破壊直前の補強筋ひずみの最大値と補強筋剛性の関係を表すものである。図から、補強筋剛性が、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、この補強筋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のかを検討することとする。ここでは、補強筋剛性と最大ひずみを掛け合わせた $p\sigma$ ($p \times E$)と、押抜きせん断耐力との関係を図-7に示す。この図より、 $p\sigma$ の増加により押抜きせん断耐力が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、破壊時の補強筋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考えられる。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。

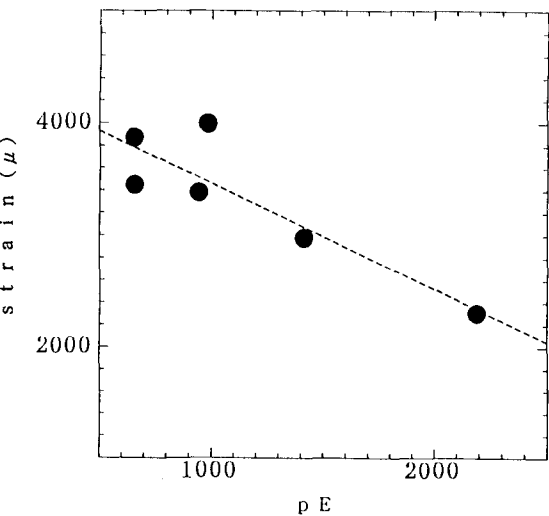


図-6 補強筋剛性と最大ひずみ関係

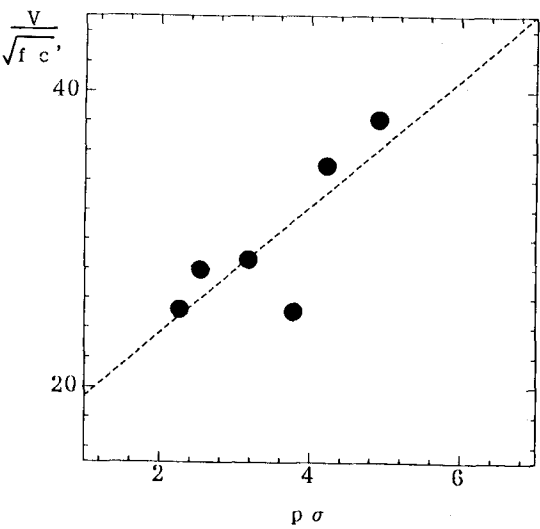


図-7 押抜き耐力と $p\sigma$ 関係

最後に、コンクリート標準示方書における面部材の押抜きせん断耐力算定式⁴⁾を用い、本実験スラブ耐力の評価を行った結果を示す(表-3)。

図-8は、実験値(V_t)と示方書式(V_c)の比を補強筋剛性で整理したものである。また、図中の●は、示方書式において、補強筋の弾性係数と鉄筋との弾性係数比を考慮した場合について比較したものであり、○は考慮しない場合である。今回の算定結果では、耐力比の平均が、弾性係数比を考慮しない場合で0.87、考慮した場合で1.22となっていた。また、この図-8からは、補強筋剛性の耐力比に与える影響は、見られなかった。

これらの結果から判断すると、示方書式において弾性係数比を考慮しなくても、その耐力を評価できるとも考えられるが、弾性係数のみが異なるFCS2とFCS7の耐力を

表-3 押抜きせん断耐力

供試体	破壊荷重	示方書式による耐力	
		①	②
FCS1	154	171	116
FCS2	163	200	135
FCS3	203	232	157
FCS4	150	178	120
FCS5	102	126	87
FCS6	142	152	142
FCS7	229	214	189

① 示方書式
② 弾性係数比を考慮した示方書式 (単位: kN)

比較すると、FCS2に対し弾性係数が約2倍であるFCS7の方が、耐力が約50%大きくなっており、示方書式により押抜きせん断耐力を評価する場合、補強筋の弾性係数の相違を考慮することが、やはり必要であると思われる。しかし、示方書式に弾性係数比を考慮した計算値においても、FCS7の耐力が、FCS2の耐力の約40%大きな値を示しており、示方書式において補強筋の弾性係数の相違を評価する方法として、補強筋比にFRPロッドと鉄筋の弾性係数比を考慮するだけで、妥当であるかどうかは、現時点では判断できず、今後、更に検討を続けていく予定である。

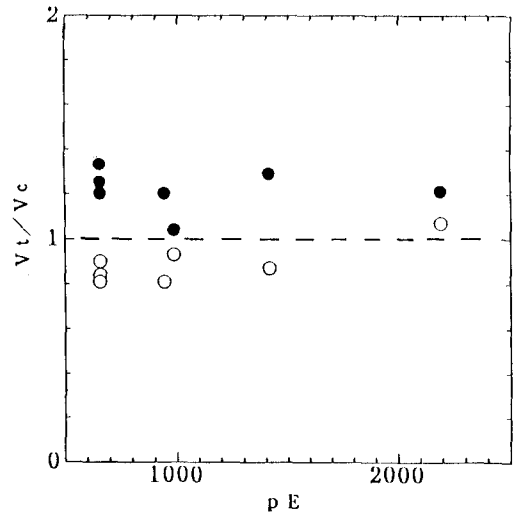


図-8 耐力比と補強筋剛性

5. まとめ

本論文の結論を整理すると以下のようなものである。

- 1) 鉄筋で補強したRCスラブ同様、FRPロッドで補強したRCスラブにおいても、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ていた。
- 2) 本実験供試体において、補強筋比が1.0%から2.2%の比較的大きい範囲においても、押抜きせん断耐力と補強筋比には、ほぼ直線的な関係が見られた。
- 3) 補強筋の弾性係数が異なっても、補強筋剛性が等しければ、その変形性状は概ね等しかった。
- 4) 補強筋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。また、その両者を掛け合わせた値 $\rho \sigma$ (補強筋剛性×最大ひずみ) と押抜きせん断耐力には、直線関係が認められた。

謝辞：三井建設(株)から、FRPロッドを御提供頂きましたことを、ここに厚くお礼申し上げます。

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、第10巻3号、1988年、pp. 547-552
- 2) 佐藤・古内・角田・高橋：アラミド繊維製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ついて、コンクリート工学年次論文報告集、第13巻2号、1991年、pp. 855-860
- 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、第229号、1974年9月、pp. 105-115
- 4) コンクリート標準示方書(設計編)、土木学会、1991年