

論文

[2145] 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

正会員○佐藤靖彦 (北海道大学大学院)  
 正会員 古内 仁 (北海道大学土木工学科)  
 正会員 角田与史雄 (北海道大学土木工学科)  
 正会員 高橋義裕 (北海学園大学土木工学科)

1. まえがき

近年、鉄筋に代わるコンクリート補強材として耐腐食性に優れたFRPロッドを用いた研究が数多く行われている。その内容としては、はり部材の静的荷重に対する曲げおよびせん断性状、繰返し荷重に対する疲労性状に関するものが多く、その基本的な問題点は既に明らかにされ、現在は、FRPロッドの緊張材としての利用方法が検討されている。しかし、スラブにFRPロッドを用いた場合の研究はあまり行われておらず、その破壊性状の解明が急がれるところである。

鉄筋で補強したスラブの破壊は、鉄筋の降伏にともなう降伏線破壊と、載荷直下のコンクリート部分が局部破壊を起こす押抜きせん断破壊に大別されるが、本研究は、鉄筋の代わりにアラミド繊維製FRP (AFRP) ロッドで補強したRCスラブにおける押抜きせん断破壊に着目し、その破壊性状を示すとともに、従来のRCスラブの耐力評価式を用い、その耐力の評価を行った結果を報告するものである。

2. 実験概要

2-1 使用材料

スラブの補強材として使用したFRPロッドは、アラミド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ている。その特性値を表-1に示す。

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/m<sup>3</sup>、水セメント比53%とした。また、コンクリートの圧縮強度は、300kgf/cm<sup>2</sup>から360kgf/cm<sup>2</sup>であった。

2-2 供試体および載荷方法

実験を行った8体のスラブは、辺長120cm×120cm、スパン100cm×100cm、スラブ厚10cmとした。

実験変数としては、ロッド径および間隔を変え補強筋比を0.22%から1.33%としている。

支持方法は、四辺単純支持とし隅角部

表-1 AFRPロッドの力学的特性

ロッドの呼称	公称径 (cm)	公称断面積 (cm <sup>2</sup> )	破断強度 (tonf)	破断ひずみ (%)	弾性係数 ×10 <sup>5</sup> (kgf/cm <sup>2</sup> )
K64S	0.80	0.50	6.50	2.00	6.46
K96S	1.08	0.75	9.77	2.06	6.34

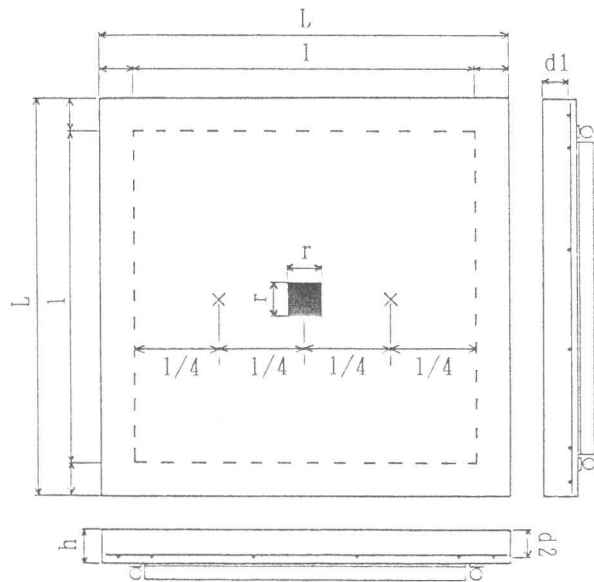


図-1 実験供試体

の浮き上がりは自由としている。また、載荷はすべてスラブ中央点に一点集中載荷とし、載荷板を F S T 01 から F S T 03 において 5cm × 5cm、F S T 04 から F S T 08 において 10cm × 10cm の 2 種類用いた。測定は、ひずみゲージによる補強筋のひずみ、スラブ上面での中央点およびスパン 1 / 4 点での変位について行った。

表-2 供試体諸元

	辺長L (cm×cm)	厚さh (cm)	スパンl (cm×cm)	有効厚d (cm)	ロッド径-間隔 (cm) (cm)	補強筋比ρ (%)	載荷辺長r (cm)
FST01	120×120	10	100×100	7.5	1.08-10.0	1.00	5
FST02	120×120	10	100×100	7.5	1.08-20.0	0.50	5
FST03	120×120	10	100×100	7.5	1.08-30.0	0.30	5
FST04	120×120	10	100×100	7.5	1.08-10.0	1.00	10
FST05	120×120	10	100×100	7.5	1.08-20.0	0.50	10
FST06	120×120	10	100×100	7.5	0.80- 5.0	1.33	10
FST07	120×120	10	100×100	7.5	0.80- 8.0	0.83	10
FST08	120×120	10	100×100	7.5	0.80-30.0	0.22	10

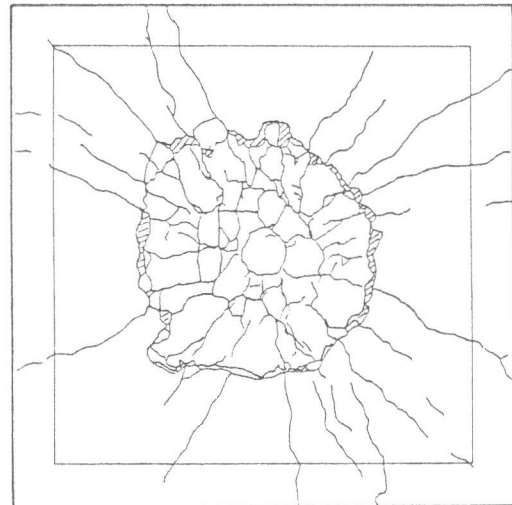
### 3. 実験結果および考察

#### 3-1 破壊性状

押抜きせん断破壊を起こした 8 体の R C スラブにおいて、すべて補強筋の破断は見られなかった。破壊後のスラブ下面のひびわれ性状を図-2 に示すが、これによれば、F S T 0 6 のように補強筋比が大きいものでは格子状ひびわれが卓越し、F S T 0 8 のように補強筋比が小さいものでは放射状ひびわれが卓越していた。

また、実験終了後、押抜けたコンクリート部分を完全に除去し、その押抜き性状を観察したところ、載荷板周縁から押抜かれており、約 30° の傾きを持つ破壊面がピラミッド状にスラブ下面に広がっていた。しかし、鉄筋で補強した場合に見られるような載荷板周縁直下の垂直部分は存在していなかった。これは、コンクリートの圧縮領域が非常に狭くなっていたものと思われる。実際に中立面位置を計算すると、補強筋比  $\rho = 1.33\%$  の F S T 0 6 では圧縮縁から 1.65cm、補強筋比  $\rho = 0.22\%$  の F S T 0 8 では圧縮縁から 0.75cm となり、ひびわれ発生後中立面がかなり上昇していたものと思われる。この理由として、AFRP ロッドの弾性係数が小さいことに起因しているものと考えられる。

FST06



FST08

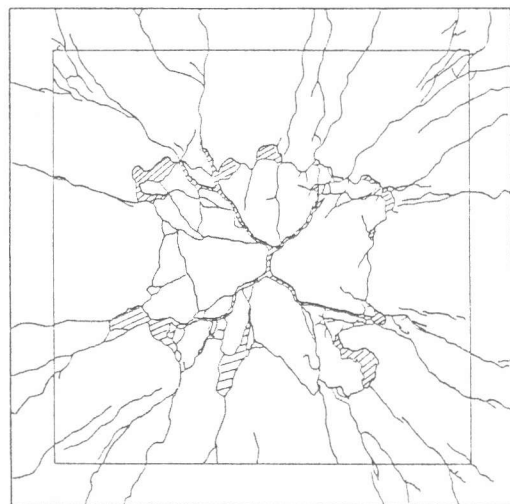


図-2 スラブ下面のひびわれ性状

### 3-2 荷重-たわみ関係

図-3は、FST06・05・08の  
スラブ中央点における荷重-たわみ関係  
を示すものである。

これによれば、補強筋比が小さいほど急  
激な変形を示していることが分かる。

また、図中の実線I・II・IIIは、順に  
FST06・05・08において引張側  
コンクリート断面を無視して考えた弾性  
計算値を示すものであるが、破壊直前  
におけるたわみにおいて、実験値は計算値  
を大きく上回っており、その傾向は、補  
強筋比が小さくなるほど顕著にあらわれ  
ている。これは、AFRPロッドの剛性  
が小さいことや、その付着特性が影響し  
ているものとも考えられるが、現段階で  
は、明確な原因は分かっていない。

図-4は、各供試体のスラブ中央点で  
の破壊直前のたわみ $W$ と引張断面を無視  
した弾性計算値 $W_c$ との比を補強筋比別  
に整理したものである。これによれば、  
載荷板の大きさによらずたわみ比は、補  
強筋比が減少すれば、増加する傾向にあ  
った。

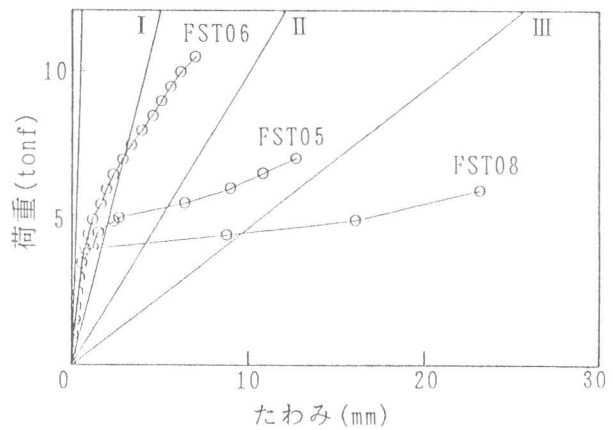


図-3 荷重-たわみ関係

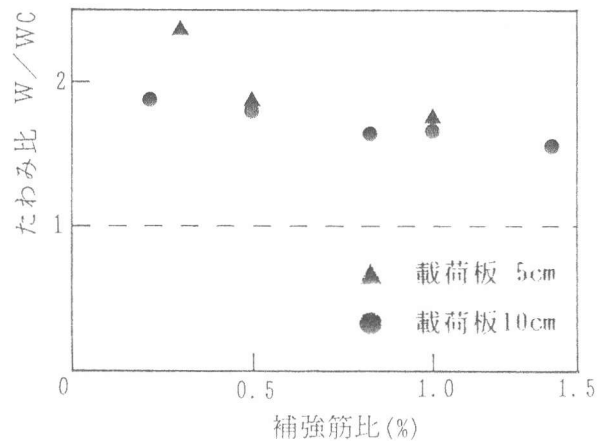


図-4 たわみ比と補強筋比の関係

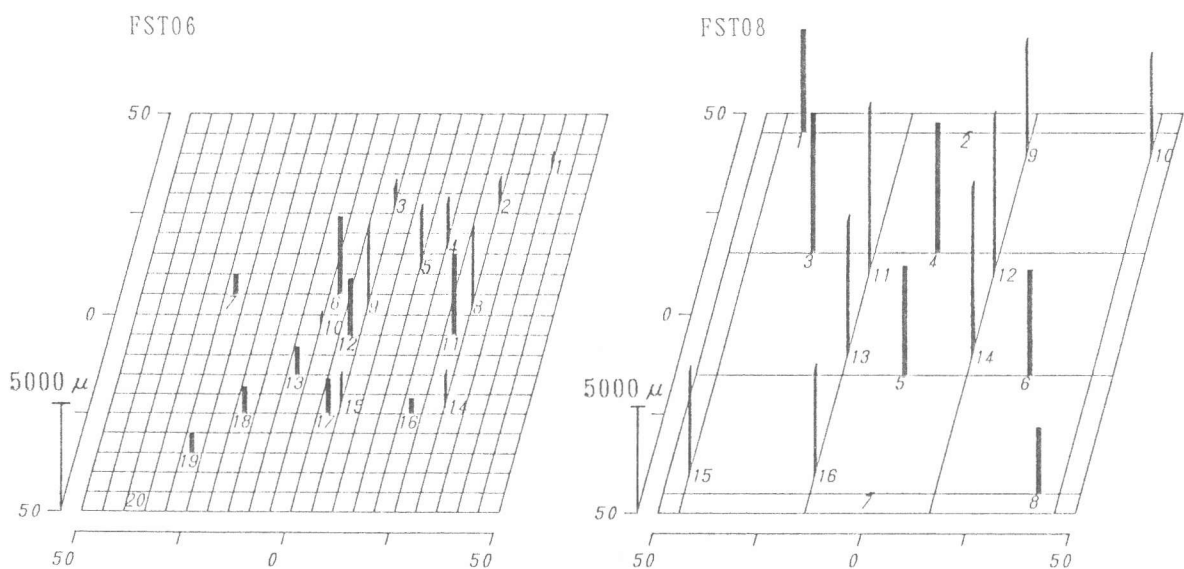


図-5 補強筋のひずみ分布

### 3-3 補強筋のひずみ

図-5にFST06とFST08の破壊直前におけるひずみ分布を示す。

FST08は、スラブ全域に大きなひずみを示しているが、この時のひずみの最大値は、測定位置11における $10068\mu$ であり破断ひずみの50%にしか達していない。また、FST06においては、その最大ひずみが測定位置9で $4291\mu$ であり破断ひずみの20%程度であった。

ここで、各供試体における補強筋のひずみ量を比較する為、測定した補強筋ひずみの中で大きいものから3つ取り出しその平均値を求めた場合、図-6に示す仮定した押抜き領域内で測定したひずみの平均値を求めた場合について考える。表-3に破壊直前のその平均ひずみを示すが、3点の平均ひずみで破断ひずみの18%から40%、仮定した押抜き領域内の平均ひずみで破断

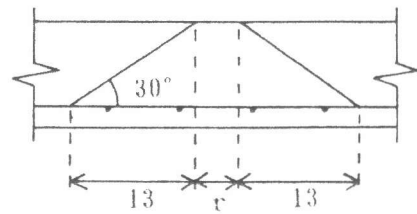


図-6 仮定した押抜き領域

表-3 実測平均ひずみ

供試体名	3点を平均した場合		仮定領域内での平均の場合	
	平均ひずみ ( $\mu$ )	破断ひずみに対する割合(%)	平均ひずみ ( $\mu$ )	破断ひずみに対する割合(%)
FST01	4112	20.6	2299	11.5
FST02	5857	29.3	5712	28.6
FST03	6450	32.3	5973	29.9
FST04	4881	24.4	3497	17.5
FST05	5869	29.3	5869	29.3
FST06	3773	18.9	2455	12.3
FST07	5328	26.6	5398	27.0
FST08	7948	39.7	6960	34.8

ひずみの10%から35%と低い範囲内であった。図-7および図-8は、2つの場合の平均ひずみを補強筋比別に整理したものであるが、どちらの場合も、補強筋比が大きいほど平均ひずみは減少していることが分かる。

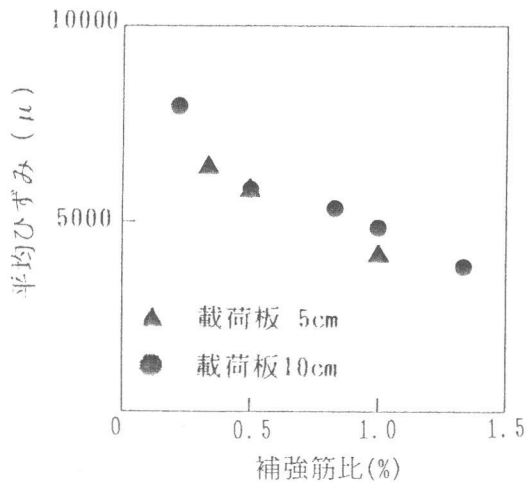


図-7 平均ひずみ(3点)と補強筋比

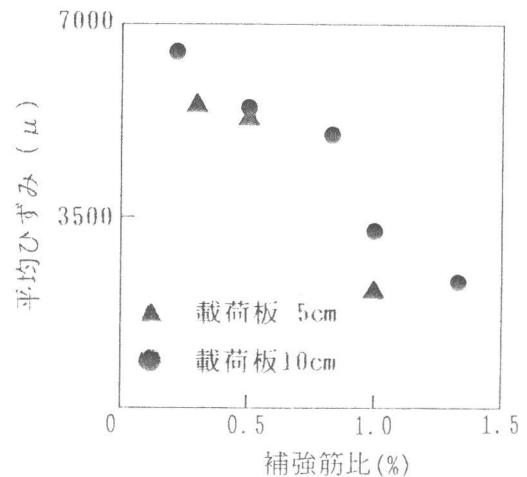


図-8 平均ひずみ(仮定領域)と補強筋比

### 3-4 補強筋の効果

鉄筋で補強したRCスラブでは、スラブ耐力はコンクリート強度の平方根と関係づけ良い適合性が示されているが、FRPロッドを用いた場合にも同様の傾向があると仮定し、本実験により得られた破壊荷重を、コンクリート強度の平方根で除した押抜き耐力と、補強筋比の関係を求めた結果を図-9に示す。

これによれば、補強筋比が増加すれば耐力も増加する傾向にあるが、補強筋比が1%前後で頭打ちが見られ、単純な比例関係にはないものと思われる。

また、図中の実線は、本実験スラブと同じ諸元を持つ鉄筋で補強したRCスラブの実験結果より得られた耐力と鉄筋比の関係を直線回帰したものであるが、実験値は実線をすべて下回っており、AFRPロッドで補強した場合は鉄筋で補強した場合よりも補強効果は低いことになる。

FRPロッドで補強したはり部材において、その耐力を評価するとき、補強筋断面積にFRPロッドと鉄筋との弾性係数比を掛けた換算断面積を考慮することにより鉄筋で補強した場合と同様に扱えることが報告されている[1]。

そこで、この補強筋比 $p$ にAFRPロッドと鉄筋の弾性係数比を掛けて修正した補強筋比 $p'$ を用い、鉄筋で補強した場合と比較した結果を図-10に示す。ここでは、補強筋比 $p$ が1%前後では、実線と良い対応を示しているが、補強筋比 $p$ が0.3%前後では、鉄筋で補強した場合よりも耐力は低くなっている。

### 3-5 耐力の評価

ここでは、コンクリート標準示方書での面部材の押抜きせん断耐力算定式を用い、本実験スラブの耐力を評価する[2]。示方書式においては、補強筋の影響を $\beta p$ において評価しているが、この式では補強材によらず補強筋比が同じであれば、耐力を同等に評価することになる。しかし、先に述べたように補強材の材料特性によりその傾向は異なっており、式中に剛性比等を考慮することが必要となる。

そこで、示方書式をそのまま用い耐力を求めた場合(case 1)と、補強筋比 $p$ にAFRPロッドと鉄筋との弾性係数比を考慮した場合(case 2)の耐力を求め検討を行う。表-4に、各計算値および耐力比(実験値/計算値)を示す。まず、示方書式をそのまま用い計算した場合は、平均で実験値は計算値の7割程度にしか評価されていない。しかし、弾性係数比を考慮した

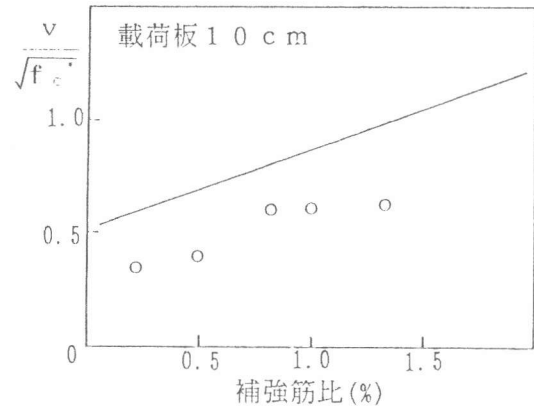


図-9 耐力と補強筋比の関係

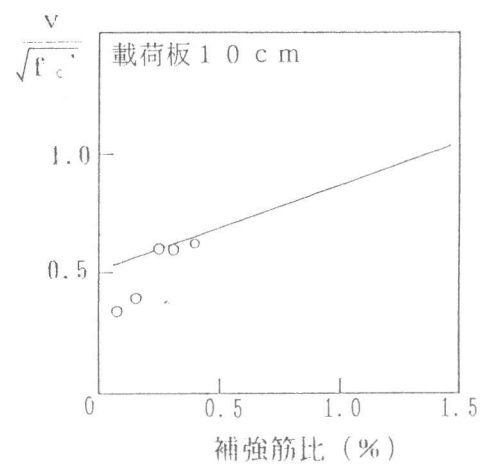


図-10 耐力と修正補強筋比の関係

表-4 示方書式における耐力算定結果

供試体名	実験値 (tonf)	示方書式による耐力(耐力比)	
		case 1	case 2
FST01	7.50	10.3 (0.73)	7.1 (1.06)
FST02	6.50	8.7 (0.75)	5.8 (1.12)
FST03	6.00	7.0 (0.86)	4.7 (1.28)
FST04	11.50	14.8 (0.78)	9.9 (1.16)
FST05	7.08	10.9 (0.65)	7.3 (0.97)
FST06	11.00	15.0 (0.73)	10.2 (1.08)
FST07	10.80	13.0 (0.83)	8.8 (1.23)
FST08	6.05	8.2 (0.74)	5.6 (1.08)

場合においては、耐力比が平均で1.12となり実験値と計算値は比較的良い対応を示している。この結果からは、はり部材と同様にFRPロッドと鉄筋の弾性係数比を考慮することにより耐力を評価できるようである。

鉄筋比があまり大きくないときは、鉄筋が降伏後に押抜ける形式をとる為、従来の耐力提案式では、鉄筋比とともに鉄筋の降伏応力を考慮しているものが多い[3]。

一方、FRPロッドは、鉄筋のような降伏現象を示さず、本実験で用いたAFRPロッドでは、破断応力が鉄筋の降伏応力に比べ3倍程度大きいことが特徴であるが、本実験結果では、破壊直前において補強筋の3点平均ひずみは、破断ひずみの18%から40%の範囲とかなり低かった。また、応力になおすと2414 kgf/cm<sup>2</sup> から5086 kgf/cm<sup>2</sup>となり、鉄筋の降伏応力を3500 kgf/cm<sup>2</sup>とすると降伏応力の70%から145%となる。

そこで、補強筋比によりその平均ひずみが異なっていることが耐力にどのような影響を与えているのかを検討する。図-11は実験値と、示方書式において弾性係数比を考慮した場合の計算値との比を、仮定した押抜き領域内の平均ひずみにより整理したものである。

この図からは、補強筋の平均ひずみの耐力に対する影響はあまり見られなかったが、今後、さらにデータを蓄積する必要がある。

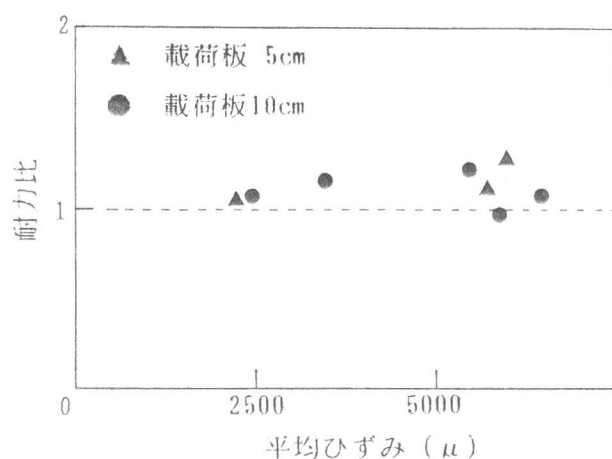


図-11 耐力比と平均ひずみの関係

#### 4. まとめ

押抜きせん断破壊を起こした8体のRCスラブにおいて、鉄筋で補強した場合との比較を行った結果を整理すると以下のようなものである。

- (1) 破壊後の押抜き領域には、荷荷板周縁直下に垂直部分は存在しておらず、圧縮領域が非常に狭かったことが分かる。
- (2) 破壊直前における補強筋の平均ひずみは、破断ひずみの18%から40%と低い範囲内にあり、補強筋比が大きいほど平均ひずみは小さくなっていた。
- (3) 示方書式によりその耐力を評価するとき、補強筋比にAFRP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い対応を示した。
- (4) 補強筋比により平均ひずみが異なったが、耐力に対する影響はあまり見られなかった。

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
- [2] コンクリート標準示方書（設計編）、土木学会、1987年
- [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