

論文

[2104] プレキャスト床版の接合部付近の押抜き強度に関する研究

三原 弘士\*1・阿部 宗人\*2・浜田 純夫\*3・兼行 啓治\*4

1. はじめに

柱とスラブの結合部やフーチング、さらに道路橋鉄筋コンクリート床版に集中荷重が作用する場合には、押抜きせん断破壊と呼ばれる局部破壊を生ずることがある。現在、コンクリート標準示方書やACIビルディングコードにおいては、スラブの押抜きせん断耐力算定式は、基本的にはりのせん断耐力算定式と同様に扱われているが、スラブは面的な広がりをもつため破壊に影響する要因は、はりのせん断破壊に比べて極めて複雑であり、また異なった様相を示す。破壊に影響するすべての要因を考慮するのは大変困難であるため、コンクリート標準示方書の耐力算定式は決して十分なものとはいえない。また、荷重域近傍に開口部や自由縁が存在する場合については、押抜きせん断耐力の低下を考慮する方法は示されていないが、これに対する研究もまだ不十分でさらに研究が必要であると思われる。さらに、最近のプレキャスト化に伴い、道路橋床版などでPCスラブが頻繁に使用されるようになったが、このPCスラブの継目部や鉄筋コンクリートスラブの打ち継目近傍に集中荷重が作用する場合における押抜きせん断破壊に関する研究は、ほとんど行われていない。

そこで本研究では、普通のスラブ、自由端をもつスラブ、継手を有するスラブをモデル化し、鉄筋コンクリートスラブおよびPCスラブについて押抜きせん断に対する実験的な研究を行い、コンクリート標準示方書の耐力算定式を基に実験結果との適合性のよい耐力算定式を検討したものである。

2. 実験概要

供試体は道路橋床版に対し、プレキャスト床版を用いることを想定して図-1に示すRCS, HALF, RCH, PCH, PCSの5種類を作成し、実験を行った。

RCS は普通のスラブ、HALFは自由縁を有するスラブ、

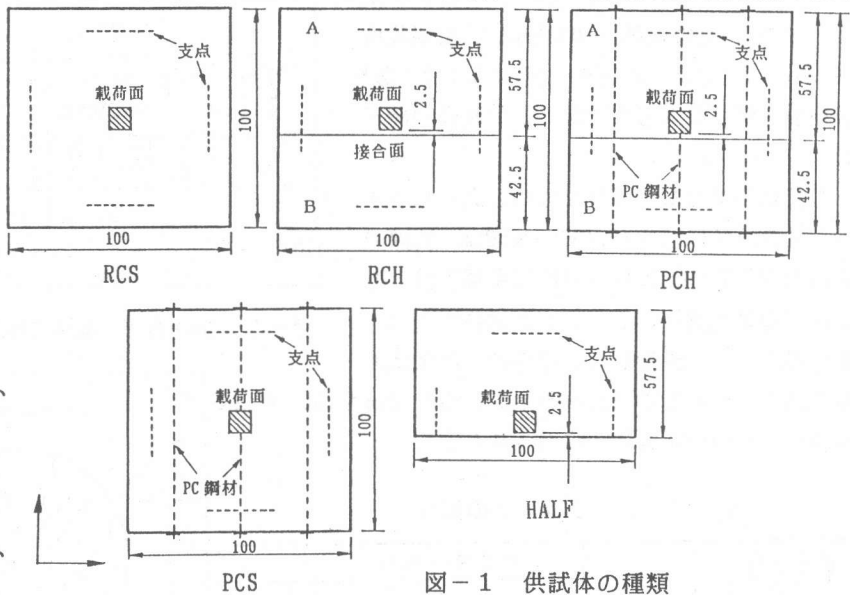


図-1 供試体の種類

\*1 山口大学大学院 工学研究科社会建設工学専攻 (正会員)

\*2 (株)ピーエス 技術部 (正会員)

\*3 山口大学教授 工学部社会建設工学科、Ph.D (正会員)

\*4 山口大学技官 工学部社会建設工学科

RCHは継手を有するRCスラブ、PCHはプレキャスト部材継目を有するPCスラブ、PCSは継目のないPCスラブをそれぞれモデル化したものである。なお、RCHについては図-1におけるY方向の鉄筋を張り出させたままA側の打設を行い、2週間後B側の打設を行った。PCスラブには、コンクリートに作用する残存プレストレス量が $30\text{kg}/\text{cm}^2$ となるようにプレストレスを1方向のみに導入し、導入後のグラウトの注入は行わなかった。

供試体に使用したコンクリートの配合を表-1に示す。セメントは普通ポルトランドセメントを使用し、コンクリートは試験時において平均して圧縮強度 $318.8\text{kgf}/\text{cm}^2$ 、割裂引張強度 $24.6\text{kgf}/\text{cm}^2$ 、曲げ強度 $46.6\text{kgf}/\text{cm}^2$ 、ヤング係数 $34.5 \times 10^5\text{kgf}/\text{cm}^2$ であった。鉄筋は全てSD30のD10で降伏強度 $1070\text{N}/\text{mm}^2$ 、引張強度 $1145\text{N}/\text{mm}^2$ であり、PC鋼棒はSBPR95/110であり、規格値を満足したものである。供試体の諸元を表-2に示す。

載荷試験は材令約28日で行い、図-2に示すように支持条件はスパン $80\text{cm} \times 80\text{cm}$ 、四隅の浮き上がり防止を設けない四辺単純支持（HALFは三辺単純支持）とし、支点は長さ $30\text{cm}$ で支持辺の中央に設置した。荷重は、供試体上面に厚さ $5\text{mm}$ の硬質ゴム板を介し、辺長 $10\text{cm} \times 10\text{cm}$ 厚さ $3\text{cm}$ の正方形鋼板を置いて作用させた。

表-1 コンクリートの配合

粗骨材の最大寸法 (mm)	W/C (%)	S/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )			
			W	C	G	S
20	55	40	185	336	158	27

### 3. 実験結果および考察

#### 3-1 ひびわれ状況

RCS, HALF, RCHの供試体下面におけるひびわれ状況を図-3

表-2 供試体の諸元

供試体名	床版厚 H (cm)	有効厚 d (cm)	鉄筋径 - 間隔 (mm) (cm)	鉄筋比 P <sub>w</sub> (%)	PC数 (本)
RCS 1	13	10.5	D10-13.0	0.54	-
RCS 2	13	10.5	D10-11.0	0.61	-
RCS 3	13	10.5	D10-10.0	0.68	-
RCS 4	10	7.5	D10-13.0	0.76	-
RCS 5	10	7.5	D10-11.0	0.86	-
RCS 6	10	7.5	D10-10.0	0.95	-
RCS 7	10	7.5	D10-13.0	1.35	-
RCS 8	10	7.5	D13-10.0	1.69	-
RCS 9	13.5	9.85	D16-23.0	1.01	-
HALF 1	10	7.5	D10-11.0	0.84	-
HALF 2	10	7.5	D10-10.0	0.89	-
HALF 3	13	10.5	D10-11.0	0.60	-
HALF 4	13	10.5	D10-10.0	0.64	-
RCH 1	13	10.5	D10-13.0	0.54	-
RCH 2	13	10.5	D10-11.0	0.61	-
RCH 3	13	10.5	D10-10.0	0.68	-
PCH 1	13	10.5	D10-13.0	0.54	3
PCH 2	13	10.5	D10-11.0	0.61	3
PCH 3	13	10.5	D10-10.0	0.68	3
PCS 1	13	10.5	D10-13.0	0.54	3
PCS 2	13	10.5	D10-11.0	0.61	3
PCS 3	13	10.5	D10-10.0	0.68	3
PCS 4	13	10.5	D10-13.0	0.54	2
PCS 5	13	10.5	D10-11.0	0.61	2
PCS 6	13	10.5	D10-10.0	0.68	2

注. 有効高さ $d$ と鉄筋比は、2方向の鉄筋の平均値から計算した

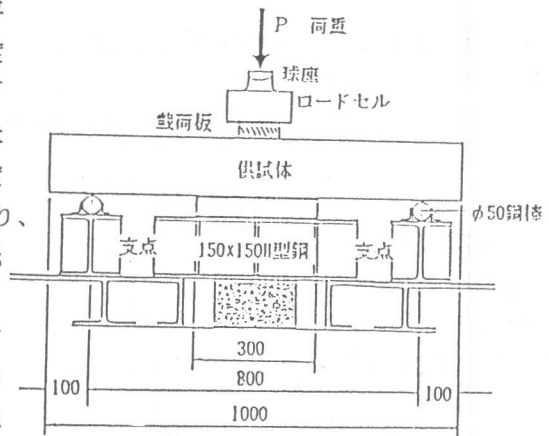


図-2 押抜きせん断試験載荷装置

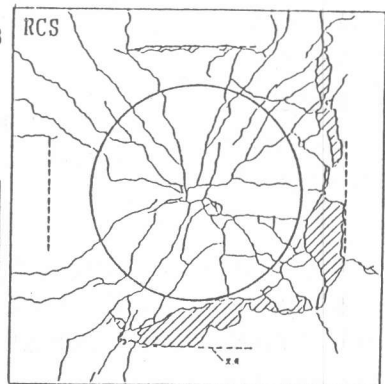


図-3(1) ひびわれ状況

に示す。RCS, RCHのひびわれは、供試体中央から放射線状に広がっていたが、HALFでは供試体中央に引張鉄筋に沿って曲げひびわれが発生していた。図中の太線は、引張鉄筋位置における破壊面の形状を示しており、RCS では円形、HALFは楕円形、RCHはA側ではRCSと同じ円形でB側ではHALFよりもさらにつぶれた楕円形の破壊面を呈しており、その角度は約25° ~30° であった。

### 3-2 押抜きせん断耐力算定式について

コンクリート標準示方書の押抜きせん断耐力算定式を下記に示し、それによる計算結果と実験結果を表-3に示す。

$$V_{pcd} = \beta_d \beta_p \beta_r f_{pcd} u_p d / \gamma_b \quad \dots \text{式(1)}$$

ここに、  $f_{pcd} = 0.6$  ,  $\beta_d =$   $\dots \text{式(2)}$

$$\beta_p =$$
 ,  $\beta_r = 1 / (1 + 0.25 u / d)$

ただし、 $\beta_d, \beta_p > 1.5$  となる場合には

$$\beta_d, \beta_p = 1.5 \text{ とする}$$

$f_{cd}$ : コンクリートの設計圧縮強度 ,

$u$ : 載荷面の周長 ,  $u_p$ : 設計断面の周長

$p$ : 鉄筋比 ,  $\gamma_b$ : 材料係数

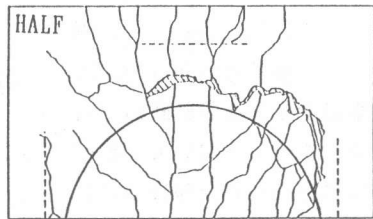
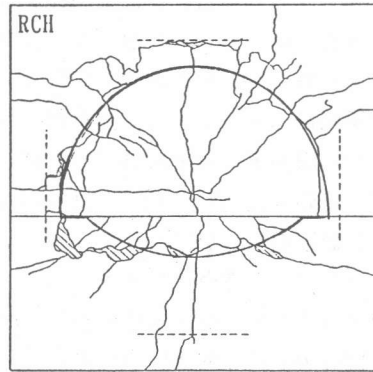


図-3(2) ひびわれ状況

#### a) RCSについて

実験においてRCSの破壊荷重は、コンクリート標準示方書の押抜きせん断耐力算定式による計算値よりもかなり上回っており、実験値/計算値の平均は1.42であった。なお、材料係数 $\gamma_b$ は一般には1.3を用いるのが適当とされているが、計算値は実験値との比較のため、安全率を考えずに $\gamma_b = 1.0$ として求めたものである。このことから、コンクリート標準示方書の耐力算定式は、安全率を考慮せずに計算を行った場合でもかなり安全側に評価していることがわかる。

#### (1) $\beta_d$ に関する補正について

上記の原因の一つは、コンクリート標準示方書の算定式が基本的にはりのせん断耐力算定式と同様の形式で表されているところにある。コンクリート標準

表-3 破壊荷重および $\beta_d$ と $u_p$ に対する修正値

No	供試体名	破壊荷重 $P_{max}$ (tf)	示方書 $V_{pcd}$ (tf)	$P_{max}/V_{pcd}$	修正値 $V_{pcd}^*$ (tf)	$P_{max}/V_{pcd}^*$
1	RCS 1	19.8	15.00	1.32	19.98	0.99
2	RCS 2	22.5	15.33	1.48	20.43	1.10
3	RCS 3	24.5	16.90	1.45	22.51	1.09
4	RCS 4	14.7	10.28	1.43	14.10	1.04
5	RCS 5	16.0	10.61	1.51	14.58	1.10
6	RCS 6	15.8	10.98	1.44	15.07	1.05
7	RCS 7	17.5	13.14	1.33	18.05	0.97
8	RCS 8	20.5	13.88	1.48	19.06	1.08
9	RCS 9	24.5	18.65	1.31	24.84	0.99
10	HALF 1	7.25	8.25	0.88	14.29	0.51
11	HALF 2	7.75	8.62	0.90	14.92	0.52
12	HALF 3	8.75	10.51	0.83	18.65	0.47
13	HALF 4	10.00	10.23	0.98	18.15	0.55
14	RCH 1	18.2	14.56	1.25	19.40	0.94
15	RCH 2	19.8	15.67	1.26	20.87	0.95
16	RCH 3	20.8	14.65	1.42	20.21	1.03
17	PCH 1	21.5	15.04	1.43	20.04	1.07
18	PCH 2	20.5	15.79	1.30	21.03	0.97
19	PCH 3	17.8	15.75	1.13	20.97	0.85
20	PCS 1	25.0	15.00	1.67	19.98	1.25
21	PCS 2	28.0	16.30	1.72	21.72	1.29
22	PCS 3	29.0	16.57	1.75	22.08	1.31
23	PCS 4	24.5	16.57	1.48	22.08	1.10
24	PCS 5	25.0	14.11	1.77	18.80	1.33
25	PCS 6	23.5	15.25	1.54	20.32	1.16

示方書では有効高さ $d$  による影響を考慮する係数 $\beta_d$  について制限があり、有効高さ $d$  が20cm以上の場合には $\beta_d < 1.5$  となるが、 $d < 20$ cm以下の場合には $\beta_d > 1.5$  となり式(2)の上限値となる。スラブにおいては押抜きせん断耐力が非常に大きなものであるため、ほとんどが $d < 20$ 以下の供試体で実験が行われている。本研究においても $d = 7.5$ と $10.5$ の供試体について実験を行っており、 $\beta_d$ の制限が実験値との整合性を悪くしていると考えられる。そこで $\beta_d$ の制限を入れずに計算を行うと実験値/計算値の平均は1.15となり両者の値が近づくことがわかる。

## (2) 断面強度について

コンクリート標準示方書ではスラブの押し抜きせん断破壊が載荷板周辺部から約 $45^\circ$ の角度でピラミッド状のコーンを形成するように破壊するとして、図-4のように荷重部分から $d/2$ 離れた垂直な断面を設計断面としている。本研究において、荷重試験後に押抜かれた部分のコンクリートを取り除いて破壊面の形状を観測したところ、図-5のように約 $25^\circ \sim 30^\circ$ の角度をなしたドーム状の破壊面を呈しており、有効高さ $d$ が大きくなると押し抜きの範囲も大きくなる傾向にあった。この様に破壊面の傾斜は主として $L$ に影響される。

そこで、破壊断面は有効高さ $d$ とせん断スパン $L$ に大きく影響されると考え設計断面の周長 $u_p$ をせん断スパン比 $L/d$ を考慮にいたれた係数 $(1+d/L)$ を用いて次式のように修正する。

$$u_p = 2a + 2b + (1 + d/L)\pi d$$

上式を用いて押し抜きせん断耐力を求めると、実験値/計算値の平均は1.05となり実験値にはほぼ近い値を得ることができた。

## b) HALFについて

表-3より実験値/計算値の平均は0.90で、実験値/修正値の平均は0.51となり修正を行ったことにより逆に整合性を悪くしている。しかし、HALFにおいてもRCS同様破壊断面はコンクリート標準示方書の仮定よりも大きくなっており、 $\beta_d$ および $u_p$ の修正を行いさらに次のような修正を行った

コンクリート標準示方書では荷重域近傍に自由縁が存在する場合、図-6に示すように設計断面の周長 $u_p$ を減少させることによりこれを考慮するのがよいとしている。ひびわれ図に示したように、RCSでは円形の破壊面を呈していたのに対し、HALFでは楕円に近い破壊面を呈しており、 $u_p$ について若干の配慮をする必要性が生じた。

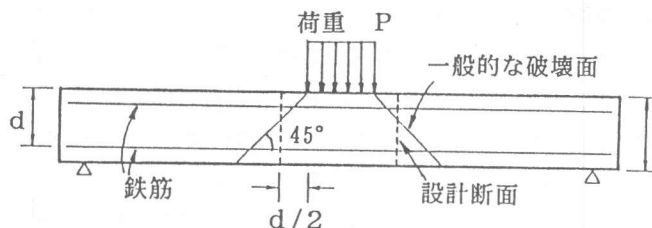


図-4 コンクリート標準示方書による仮想限界断面図

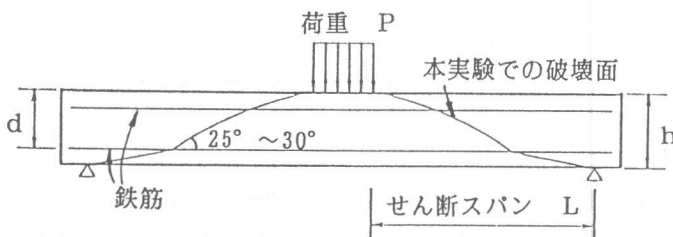


図-5 本実験における破壊断面図

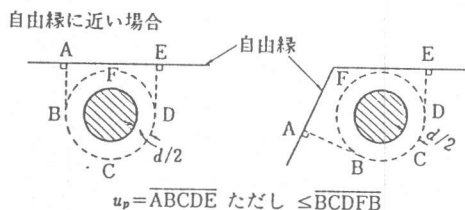


図-6 コンクリート標準示方書による設計断面

そこで、押抜き幅を測定してそれにより押抜き角度を算出し、破壊断面が楕円形状になったことによる  $u_p$  の減少をこの角度から算定して、コンクリート標準示方書による  $u_p$  との比を求めると約0.85とな。そこで、設計断面の周長  $u_p$  の減少は0.85を乗ずることにした。

また、スラブが降伏して面外側方への変位を生じる場合、スラブ周辺の拘束によってスラブ内に面内力が発生するが、通常のスラブにおいても降伏部分の外側が弾性領域であるならばスラブの側方変位が拘束されて面内力が発生する。この面内力は、押し抜きせん断耐力にいくらかの影響を与えると考えられる。しかしながら、スラブに発生する面内力の大きさは、載荷条件や支持条件に加え、供試体寸法やスパン長などの部材条件によっても異なるため、面内力の押し抜きせん断耐力への影響を定量的に評価することは困難である。しかし、HALFでは載荷板よりも自由縁側ではスラブの側方変位を拘束する弾性領域が存在しないため、RCSのような正方形スラブに比べ面内力の効果は明らかに小さいと思われる。そこで、面内力の効果を供試体寸法に着目し、図-1のX,Y方向において対称な正方形スラブの面内力を1と考え、図-7に示すように支点から自由縁までの距離を  $a$ 、支点から載荷板中央までの距離を  $b$  とし、この比を用いた係数  $a/(2b)$  により面内力の押し抜きせん断耐力に対する効果の低減を考慮する。

以上2つの修正を行うと表-4のようになり、実験値/修正値の平均は1.01となり、両者の値は相当近づく。

### c) RCHについて

表-3より、実験値/計算値の平均は0.97と若干小さめの値がでており、荷重域近傍に継目が存在することによる影響がでている。

RCHの押し抜き状況は、A側ではRCSよりも多少大きめの破壊断面を呈していたが、B側での押し抜きはほとんど生じておらず、継目付近で引張鉄筋位置よりも下側のコンクリートがはく離している程度であった。つまり、継目部におけるコンクリート間での荷重の伝達が行われにくく、一般にB側への押し抜き

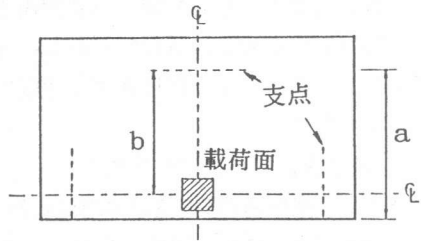


図-7 aおよびbの取り方

表-3 修正結果 (HALF)

No	供試体名	破壊荷重 $P_{max}$ (kg/cm <sup>2</sup> )	a/2b	修正値 $V_{pcd}'$ (tf)	$P_{max}/V_{pcd}'$
1	HALF 1	7.25	0.594	7.22	1.00
2	HALF 2	7.75	0.594	7.53	1.03
3	HALF 3	8.75	0.594	9.42	0.93
4	HALF 4	10.00	0.594	9.17	1.09

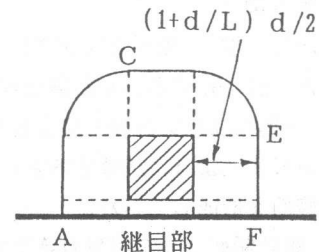


図-8 継目近くにおける  $u_p$  の仮定

表-5 修正結果 (RCH, PCH)

No	供試体名	破壊荷重 $P_{max}$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$u_p$	修正値 $V_{pcd}'$ (tf)	$P_{max}/V_{pcd}'$
1	RCH 1	18.2	80.09	18.75	0.97
2	RCH 2	19.8	80.09	20.17	0.98
3	RCH 3	20.8	80.09	19.53	1.07
4	PCH 1	21.5	80.09	19.37	1.11
5	PCH 2	20.5	80.09	20.32	1.01
6	PCH 3	17.8	80.09	20.26	0.88

き力の伝達は少なく、A 側のみに押抜き力が集中するため、A 側での破壊断面が大きくなると考えられる。そこで設計断面の周長  $u_p$  を図-8のようなABCDEFで囲まれる図形の周長で表し、継目が存在することによる押抜きせん断耐力の減少を考慮し算出すると、表-5のように実験値と修正値がよく合う。

#### d) PCS, PCHについて

表-2より実験値/修正値の平均は1.24 で、同じプレストレスを導入した場合でも載荷位置によって破壊荷重に多少の影響が現れるようであるが、PCスラブではプレストレスの導入によってRCスラブよりも20%~30%の耐力の増加を望むことができると考えられる。今回の実験では、PCHとの比較のために供試体の1方向のみにプレストレスを導入したが、2 方向に導入したならばさらに耐力が増加すると思われる。さらに、導入するプレストレスの大小によっても影響が現れると考えられ、今後これらについても研究が必要であると考えられる。

PCHは、RCHと異なりB 側での押抜きも見られたが、A 側ではRCHと同様に破壊面が若干大きくなっていった。そこでRCHと同様の修正を行うと、表-4のように実験値と計算値が近づく。

今回の実験においては2 枚のスラブの結合をプレストレス力のみで行っているため耐力の減少がみられたが、プレストレス導入後のグラウト注入や継目部での接着を十分に行ったならば、押抜きせん断耐力はさらに増すと考えられる。

#### 4. まとめ

本研究では、5種類のスラブにおける押抜きせん断試験を行い、その耐力算定式について検討を試みた。以下に得られた結論を要約する。

1) 一般にスラブの押し抜きせん断破壊は載荷板周辺部から約45° の角度でピラミッド状のコーンを形成するように破壊するとされているが、本実験では約25° ~30° の角度をなしたドーム状の破壊面を形成していた。

2) 設計断面の設定が耐力算定式に大きく影響を与えており、下記に示すように周長  $u_p$  にせん断スパン比  $L/d$  を考慮にいれた係数  $(1+d/L)$  を用いることにより、より実験値に近い値を得ることができた。 $u_p$  は次式で与えられる。

$$u_p = 2a + 2b + (1 + d/L)\pi d$$

3) 荷重域近傍に自由縁が存在する場合には、コンクリート標準示方書に示された方法に、さらに  $u_p$  および面内力に対する修正を行うことにより実験値に近い値を得ることができる。

4) 荷重域近傍に接合部が存在する場合には、 $u_p$  を減少させることにより、実験値に近い値を得ることができる。また、プレキャスト床版のPCスラブにおいても提案した修正によって実験値に近づくことがわかる。

#### (参考文献)

- 1) 土木学会：コンクリート標準示方書 平成3年版 設計編，pp62~65
- 2) 角田与史雄・井藤昭夫・藤田嘉雄：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，No.229, pp105~115, 1974, 9
- 3) 小柳 治：鉄筋コンクリートスラブの押抜きせん断とその設計上の取扱い，コンクリート工学 Vol.19, No.8, pp3~13, 1981, 8