

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EXPERIMENTAL STUDY ON PUNCHING STRENGTH
OF REINFORCED CONCRETE SLABS角田与史雄*・井藤昭夫**・藤田嘉夫***
By Yoshio Kakuta, Akio Itoh and Yoshio Fujita

1. ま え が き

鉄筋コンクリート (RC) は、引張応力領域のコンクリートにひびわれが生じてもお鉄筋とコンクリートとの間の付着抵抗が有効に働くことにより、両素材の強度を十分に使用しようとする特異な複合材料であるため、その耐荷性状は他の構造材料に比べて非常に複雑であって、従来の多くの研究にもかかわらず幅広い合意を得るに至っていない問題が数多く残されている。RC部材のせん断耐荷性状はその典型的な例であり、最も単純な部材であるはりについてさえ、現在なお多くの研究者によって研究が続けられている注1)。

橋床版やフーチングなどのように局部的に大きな荷重を受けるRCスラブのせん断破壊は通常、荷重直下のコンクリートが押し抜かれるような形で生ずるので、押抜きせん断破壊またはパンチング破壊とよばれている。

スラブの押抜きせん断耐力に関する研究は、1913年の Talbot に始まるといわれ注2)、その後今日までに多くの研究者によって実験報告、破壊機構の考察および耐力算定式の提案などが行われている^{3)~21)}。わが国においては従来この問題についての組織的な研究はほとんど見られなかったが、最近、小柳らによって提案された、ひびわれ先端部のコンクリートの応力再分配と組合せ応力下のコンクリートのせん断破壊条件を導入した M-Q 法や^{16)・19)}、石川らによって行われた周辺補剛ばりを有するスラブの耐力に関する一連の実験的研究^{20)・21)}などの

注目すべき報告がなされている。

スラブの押抜きせん断耐力は非常に多くの因子に影響を受けるため、実験的研究においても多かれ少なかれある程度の破壊機構の仮定に基づいたものが多いが、特にその点に重きを置いた研究と、むしろ実用的な耐力算定式を得ることに主眼を置いたものがある。前者としては Kinnunen-Nylander の研究¹⁰⁾、Long-Bond の研究¹⁴⁾などがその代表的なものである。この種の研究は破壊機構の仮定が適切であれば普遍性の高い結果を得ることができるが、はりの破壊機構についてさえ異論の多い現状では、その仮定の適否を判断する資料に乏しく、また、得られる結果が複雑となって実用性に欠けるうらみもある。一方、実用的な耐力算定式としては下記の提案式が著名である。

Elstner-Hognestad 式⁷⁾

$$P = \frac{7}{8} b_0 d \sigma_{CB} \left(\frac{333 \text{ psi}}{\sigma_{CB}} + \frac{0.046}{\phi_0} \right), \quad \phi_0 = \frac{P}{P_y} \quad \dots\dots\dots (1)$$

Whitney 式⁸⁾

$$P = 4 d (r + d) \left(100 \text{ psi} + 0.75 \frac{m_y}{d^2} \sqrt{\frac{d}{l_s}} \right) \quad \dots\dots\dots (2)$$

Moe 式¹¹⁾

$$P = b_0 d \sqrt{\sigma_{CB}} \cdot \frac{15(1 - 0.075 r/d)}{1 + 5.25 b_0 d \sqrt{\sigma_{CB}} / P_y}; \quad \text{pound-inch 単位} \quad \dots\dots\dots (3)$$

Yitzhaki 式¹³⁾

$$P = 8 d^2 (1 - 0.5 p \sigma_{sy} / \sigma_{CB}) (149.3 \text{ psi} + 0.164 p \sigma_{sy}) (1 + 0.5 r/d) \quad \dots\dots\dots (4)$$

以上において d はスラブ有効厚、 r は載荷辺長、 b_0 は載荷周長、 p は鉄筋比、 σ_{CB} はコンクリート圧縮強度、 σ_{sy} は鉄筋の降伏応力度、 l_s はせん断スパン長、 m_y はスラブ単位幅当りの降伏モーメント、 P_y は降伏線理論

注 1) 既往の研究の概況については、土木学会終局強度設計小委員会報告書¹⁾、ACI-ASCE 委員会報告書^{2)・9)}、Bresler McGregor の報文⁹⁾などを参照されたい。

注 2) 初期の研究については文献 2) の Part 3 を参照されたい。

* 正会員 工博 北海道大学助教授 工学部土木工学科

** 正会員 北海道開発局土木試験所 構造研究室長

*** 正会員 工博 北海道大学教授 工学部土木工学科

によるスラブの曲げ破壊荷重を表わす。

近年わが国の道路橋床版に破損がしばしば見られ、北海道においてもその例外でなかったため²²⁾、著者らはその原因調査の一環としてRC模型スラブの押抜きせん断破壊実験を行い、十分な静的耐力を有することを確認したが、その際上記の各式の実験結果との適合性が決して満足すべきものでないことが示された²³⁾。それは、前述のようにスラブの耐力に対して影響をもつと思われる因子の数が多いわりにはりや柱に比べて実験データの数が非常に少ないことに帰因するものと思われる。このような状況からみて、スラブの押抜きせん断耐力に関する実験データの数を幅広く蓄積していくことが、その合理的設計法を見出していく上に肝要であると考えられた。

本研究はこのような目的で、上述の予備的な実験を含む合計60枚の普通コンクリートを用いた単純支持RCスラブについて実験を行い、その耐荷性状について調べたものである。その際特に、特定の場合に限られはするが、個々の変数の影響を概略的に知りうるように供試体諸元を選定した。さらに、その結果をもとに、既往のデータを含めた統計的解析によって従来のもよりも実験データとの適合性がよいと思われる実用的耐力算定式を導いた。その式は普通コンクリートを用いた単純支持スラブに限定されるものであり、またその性格上、今後のデータの積み重ねによって改善されていくべき性格のものであるが、本研究がRCスラブの押抜きせん断破壊機構の解明、ひいてはスラブの合理的設計法の確立に一助となれば幸いである。

2. 供試体および実験方法

実験を行った供試体は表-1に示す60枚のRCスラブからなり、No. 1~49は正方形、No. 50~53は長方形の4辺単純支持スラブ、No. 54は円形の単純支持スラブ、およびNo. 55~60は相対する2辺単純支持、他の2辺自由の長方形スラブである。調べた変数はコンクリート強度（圧縮強度 $\sigma_{CB}=150\sim500\text{ kg/cm}^2$ ）、スパン（ $l=50\sim200\text{ cm}$ ）、有効厚（ $d=7.5\sim17\text{ cm}$ ）、鉄筋径（ $\phi=10\sim22\text{ mm}$ ）、鉄筋比（ $p=0.5\sim3.4\%$ ）、載荷面積（辺長 $r=5\sim30\text{ cm}$ ）および載荷位置である。

使用したコンクリートは、スラブNo. 1~29に対して単位セメント量 280 kg/m^3 、水セメント比50%、細骨材率40%（白老海岸産砂、粗粒率2.98；富川産砂利、最大寸法25mm、粗粒率7.10）、No. 30~41に対してそれぞれ 300 kg/m^3 、51.7%、40%（錦岡海岸産砂、2.40；静内川産砂利、20mm、6.14）、No. 42~44に対して 274 kg/m^3 、58.4%、45.4%（錦岡、2.74；静内、25mm、6.92）、No. 45、46に対して 420 kg/m^3 、40%、

45.4%（同上）、No. 47~54に対して 291 kg/m^3 、55%、45.4%（同上）、No. 55、56に対して 280 kg/m^3 、50%、38%（白老、2.19；富川、20mm、6.60）およびNo. 57~60に対して 280 kg/m^3 、55%、40%（錦岡、2.92；静内、20mm、6.62）である。これらのうち、No. 42~44スラブに対して普通ポルトランドセメントを用いた（試験材令4~7日）ほかは、すべて早強ポルトランドセメントを用いた（2週間湿潤養生、試験材令28日以降）。スラブ試験時のコンクリートの圧縮強度は、スラブと同じ条件のもとで製作、養生を行った $\phi 10\times 20\text{ cm}$ 円筒供試体3個の平均値として求めた（表-1）。

鉄筋はいずれも熱間圧延異形棒鋼を用いた。その品質は各種別ごとに無作為に抜きとった3本以上の試験片の試験によって調べた。各スラブに対する鉄筋の降伏応力は表-1に示すとおりである。スラブの配筋はいずれも直交配置とし、No. 18、19、55~60は2方向の鉄筋間隔を変えることによって異方配筋としたほかは、いずれも等方配筋とした。また、No. 55および56を除き、スラブ中央部に圧縮鉄筋は挿入しなかった。

スラブの載荷はアムスラー型静的試験機（容量100t）、ローゼンハウゼン型疲労試験機（静的容量30t）、同（75t）のいずれかを用い、所定の辺長の鋼板を通じ行なった。載荷位置はNo. 90がスパンの1/4点、No. 93および95が長スパンの1/4点、No. 91が隅角部を結ぶ対角線上の1/4点、他はスラブ中央点とし、いずれも一点載荷とした。支承は幅約10cmの鋼板の間に鋼丸棒を挟むことによっており、隅角的の浮上りは自由としている。なお、載荷板とスラブ上面の間、および支承板とスラブ下面または支承台との間に生じたわずかな隙間には砂を充填した。

試験時における測定事項は、スラブ中央位置の鉄筋のひずみ（ワイヤゲージ）、スラブ各点のたわみ（ダイヤルゲージまたは電気抵抗式変位計）、ひびわれ幅（コンタクト型ひずみ計、一部のスラブのみ）およびコンクリート圧縮面のひずみ（ワイヤゲージ、一部のスラブのみ）などである。

3. 実験結果および考察

(1) 破壊状況

試験スラブの変形および破壊の状況は、従来の研究において報告されていることとほぼ同じであるので、ここではその概要について述べるにとどめる。

スラブの変形ははじめ荷重の増加に伴ってほぼ直線的に増加したが、破壊荷重の30%前後の荷重においてスラブ中央部に曲げひびわれが生じ、その後の荷重に対し

表-1 実験スラブの諸元

No.	呼 び 名	辺長 L (cm)	厚さ h (cm)	スパン l (cm)	有効厚 [*] d (cm)	鉄筋径-間隔 (mm-cm)	鉄筋降伏強度 σ_{yp} (kg/cm ²)	鉄筋比 ρ^* (%)	コンクリート圧 縮強度 σ_{cb} (kg/cm ²)	載荷辺 長 r (cm)
1	SB1-S1	115×115	10	100×100	7.5	D10-8.0	3920	1.166	365	5
2	SB1-S2	115×115	10	100×100	7.5	D10-8.0	3920	1.166	398	5
3	SB2-S3	115×115	10	100×100	7.5	D10-8.0	3920	1.166	341	10
4	SB2-S4	115×115	10	100×100	7.5	D10-8.0	3920	1.166	373	10
5	SB2-S5	115×115	10	100×100	7.5	D10-8.0	4280	1.150	390	10
6	SB3-S6	115×115	10	100×100	7.5	D10-8.0	3920	1.166	338	15
7	SB3-S7	115×115	10	100×100	7.5	D10-8.0	3920	1.166	360	15
8	SB4-S8	115×115	10	100×100	7.5	D10-8.0	3920	1.166	344	20
9	SB4-S9	115×115	10	100×100	7.5	D10-8.0	3920	1.166	320	20
10	SP1-S10	115×115	10	100×100	7.5	D10-20.0	3920	0.466	323	10
11	SP1-S11	115×115	10	100×100	7.5	D10-20.0	3920	0.466	348	10
12	SP3-S12	115×115	10	100×100	7.5	D10-6.0	3920	1.554	357	10
13	SP3-S13	115×115	10	100×100	7.5	D10-6.0	3920	1.554	344	10
14	SP4-S14	115×115	10	100×100	7.5	D10-5.0	3920	1.865	347	10
15	SP4-S15	115×115	10	100×100	7.5	D10-5.0	3920	1.865	348	10
16	SC1-S16	115×115	10	100×100	7.2	D13-15.0	3540	1.179	362	10
17	SC1-S17	115×115	10	100×100	7.2	D13-15.0	3540	1.179	346	10
18	SC4-S18	115×115	10	100×100	7.5	D10-8.0/15.0	3920	0.916	311	10
19	SC4-S19	115×115	10	100×100	7.5	D10-8.0/15.0	3920	0.916	319	10
20	SA1-S20	65×65	10	50×50	7.5	D10-4.0	3920	2.331	322	10
21	SA1-S21	65×65	10	50×50	7.5	D10-4.0	3920	2.331	344	10
22	SA3-S22	165×165	10	150×150	7.5	D10-8.0	3920	1.166	324	10
23	SA3-S23	165×165	10	150×150	7.5	D10-8.0	3920	1.166	326	10
24	SA4-S24	220×220	10	200×200	7.5	D10-8.0	3920	1.166	385	10
25	SA4-S25	220×220	10	200×200	7.5	D10-8.0	3920	1.166	353	10
26	SH3-S28	115×115	15	100×100	12.0	D10-5.0	3920	1.166	322	10
27	SH3-S29	115×115	15	100×100	12.0	D10-5.0	3920	1.166	346	10
28	SH4-S30	115×115	20	100×100	17.0	D10-3.5	3920	1.175	334	10
29	SH4-S31	115×115	20	100×100	17.0	D10-3.5	3920	1.175	326	10
30	S61	165×165	20	150×150	17.0	D10-5.0	3500	0.789	464	30
31	S62	165×165	20	150×150	17.0	D10-5.0	3500	0.789	492	30
32	S63	165×165	20	150×150	17.0	D16-10.0	4830	1.190	403	30
33	S64	165×165	20	150×150	17.0	D16-10.0	4830	1.190	460	20
34	S65	165×165	20	150×150	17.0	D22-20.0	3920	1.091	460	20
35	S66	165×165	20	150×150	17.0	D22-20.0	3920	1.091	524	20
36	S67	165×165	15	150×150	12.0	D16-5.0	4830	3.372	436	20
37	S68	165×165	15	150×150	12.0	D16-5.0	4830	3.372	485	20
38	S69	165×165	15	150×150	12.0	D16-8.0	4830	2.107	459	30
39	S70	165×165	15	150×150	12.0	D16-8.0	4830	2.107	465	30
40	S71	165×165	15	150×150	12.0	D16-15.0	4830	1.124	479	30
41	S72	165×165	15	150×150	12.0	D16-15.0	4830	1.124	530	30
42	S73	165×165	15	150×150	12.0	D10-6.0	3500	0.993	154	10
43	S74	165×165	15	150×150	12.0	D10-6.0	3500	0.993	198	10
44	S74'	165×165	15	150×150	12.0	D10-6.0	3500	0.993	248	10
45	S75	165×165	15	150×150	12.0	D10-6.0	3500	0.993	505	10
46	S76	165×165	15	150×150	12.0	D10-6.0	3500	0.993	492	10
47	S89	115×115	10	100×100	8.0	D10-8.0	3500	1.117	297	10
48	S90	115×115	10	100×100	8.0	D10-8.0	3500	1.117	283	10†
49	S91	115×115	10	100×100	8.0	D10-8.0	3500	1.117	338	10††
50	S92	120×70	10	100×50	8.0	D10-8.0	3500	1.117	299	10
51	S93	120×70	10	100×50	8.0	D10-8.0	3500	1.117	295	10†††
52	S94	120×95	10	100×75	8.0	D10-8.0	3500	1.117	337	10
53	S95	120×95	10	100×75	8.0	D10-8.0	3500	1.117	284	10†††
54	S98	φ130	10	φ100	8.0	D10-8.0	3500	1.117	335	φ30
55	Ⅲ-4	180×240	17**	150***	13.3	D13-18.0/24.5	3690	0.455	422	φ10
56	I-4	180×240	14**	150***	10.3	D16-22.0/27.5	3690	0.775	337	φ10
57	S101	120×140	10	100***	7.5	D10-9.0/12.75	3870	0.877	326	10
58	S102	120×140	10	100***	7.5	D10-9.0/12.75	3800	0.888	377	10
59	S103	120×140	10	100***	7.5	D10-9.0/12.75	3820	0.893	368	10
60	S104	120×140	10	100***	7.5	D10-9.0/12.75	3840	0.891	394	10

* 2方向の平均値 ** ハンチあり(支承上の厚さは No. 55-20cm, No. 56-16.5cm) *** 一方方向スラブ

† 1/4点載荷 †† 対角線上の1/4点載荷 ††† 長スパンの1/4点載荷

てはひびわれ発生領域の拡がりに応じて変形量も加速度的に増加した。スラブ周辺部におけるひびわれは常に放射状になったが、中央部においては格子状ひびわれが卓越するものと、放射状ひびわれが卓越するものがあり、一般に前者は鉄筋間隔の小さいスラブに数多く見られた。しかしこれらのひびわれのパターンのスラブ破壊性状に及ぼす影響はほとんど見られなかった。

ひびわれ幅の測定は No. 1~29 のスラブについてのみ行ったが、鉄筋降伏直前においても最大幅は約 0.3 mm 以下であった。

スラブは、中央点の鉄筋の降伏後にも十分な耐力を示し、最終的には荷重直下のコンクリートがピラミッド状に押抜けることによって生じた。一部のスラブについて押抜けた部分のコンクリートを完全に除去し、石こうを用いた型をとって鉄筋面形状の観察をしたが、それによれば、破壊面は載荷周縁直下のほぼ垂直に近い部分、それより下方の鉄筋までの 30° 前後の傾斜部分、および鉄筋より下側のかぶりコンクリートのかなり広い範囲にわたる脱落部分とからなつた。

各スラブの破壊荷重 (P_{test}) は表-2 に示すとおりである。表にはさらに降伏線理論による曲げ破壊荷重の計算値 (P_y) も示してある注3)。これによれば、No. 10 と 11 の 2 枚の P_{test} が P_y を越えているが、観察された破壊状況が明らかに押抜き型であったこと、および降伏線理論は鉄筋のひずみ硬化やスラブの面内変形の影響などによる付加的抵抗を無視するため、一般に過小な計算値を与えることなどを考慮し、以下ではいずれのスラブも、押抜きせん断破壊によると考えることにする。

(2) 既往の主な耐力算定式との比較

鉄筋コンクリートスラブの押抜きせん断耐力の実用的な算定式として提案されている主なものとして、前述の 4 本の式について本実験スラブに対する計算値を求め、実測値と比較した結果を表-2 に示してある注4)。これより主な傾向について述べれば、Elstner-Hognestad 式は公称せん断応力度を計算する位置 ($\tau = P/bd$ において b の長さをとる位置) を載荷周縁にとっているが、耐力の計算値は $r \leq 10$ cm のときに過小な値を示し、これだけでは r の影響を十分に反映していないこと、Whit-

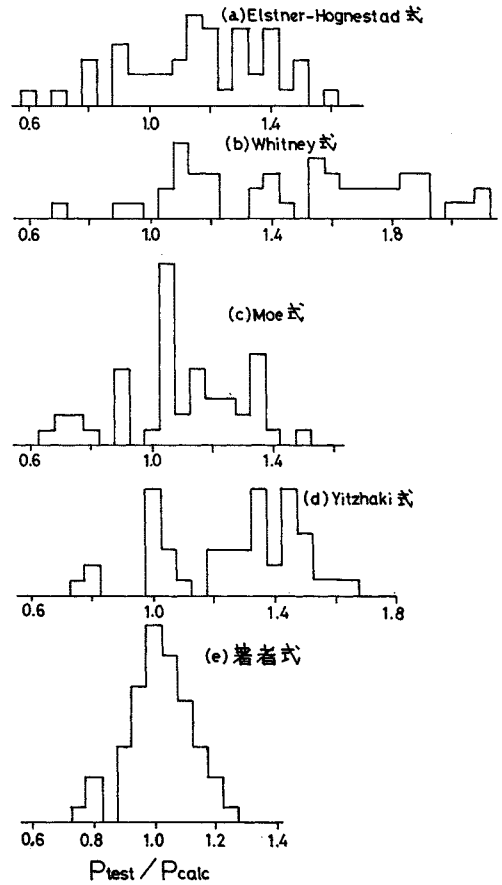


図-1 P_{test}/P_{calc} 比の度数分布図

ney 式はせん断スパン比の影響を考慮しているが、その比が小さい場合を除き計算値は過小になっており、むしろ適合性が低下している傾向が見られること、Moe 式は他の式に比べて実験結果との適合性は比較的よいが、 r/d 比の小さい場合に過小な、大きい場合に過大な値を与えていること、Yitzhaki 式は d の小さい場合に過小な値を与えているほか、コンクリート強度の影響も弱く見積りすぎている傾向があること、などが示されている。

これらの式に対する耐力の測定値/計算値の比の度数分布は図-1(a)~(d) に示すとおりであり、その比の最小値~最大値の範囲および平均値と標準偏差(変動係数)はそれぞれ、Elstner-Hognestad 式に対して 0.59~1.58、 1.16 ± 0.22 (19%)、Whitney 式に対して 0.68~2.08、 1.48 ± 0.36 (24%)、Moe 式に対して 0.66~1.52、 1.09 ± 0.20 (18%)、Yitzhaki 式に対して 0.74~1.66、 1.26 ± 0.22 (17%) である。

以上の結果より、上記の提案式の実験結果との適合性は必ずしも満足すべきものでないことがいえよう。

注 3) 崩壊の機構としては、スラブ隅角点と載荷面隅角点を対角線状に結ぶ 4 本の直線と載荷周縁に降伏線をもつ形式を用いた。このとき $P_y = 8 m_y L / (1-r)$ によって与えられる。ここに m_y ははりに対する藤田の終局強度理論²⁴⁾に準じて、 $m_y = \rho \sigma_{sy} d^2 (1 - 0.515 \rho \sigma_{sy} / \sigma_{CB})$ より求めた。

注 4) 一部の結果はセメント技術大会に発表しているが²⁵⁾、本文の表-2 と数値にわずかな相違があるのは、降伏線理論値としてここではスラブの支承からのわずかな張り出し部の影響も考慮したことによる。

表-2 破壊荷重の測定値および主な計算値との比較

No.	P_{test} (t)	Yield line theory		Eltstner-Hognestad		Whitney		Moe		Yitzhaki		Authors	
		P_{calc} (t)	$\frac{P_{test}}{P_{calc}}$	P_{calc} (t)	$\frac{P_{test}}{P_{calc}}$	P_{calc} (t)	$\frac{P_{test}}{P_{calc}}$	P_{calc} (t)	$\frac{P_{test}}{P_{calc}}$	P_{calc} (t)	$\frac{P_{test}}{P_{calc}}$	P_{calc} (t)	$\frac{P_{test}}{P_{calc}}$
1	14.02	23.29	0.60	8.86	1.58	7.37	1.90	9.24	1.52	10.12	1.39	13.99	1.002
2	13.02	23.43	0.56	9.20	1.42	7.40	1.76	9.60	1.36	10.17	1.28	14.28	0.912
3	20.03	24.47	0.82	13.57	1.48	10.46	1.91	15.08	1.33	12.59	1.59	16.83	1.190
4	16.03	24.62	0.65	14.04	1.14	10.51	1.53	15.62	1.03	12.67	1.27	17.17	0.934
5	17.03	26.46	0.64	14.65	1.16	10.44	1.63	16.17	1.05	12.64	1.35	18.06	0.943
6	20.04	25.89	0.77	18.02	1.11	13.69	1.46	19.36	1.04	15.10	1.33	19.83	1.011
7	22.04	26.01	0.85	18.42	1.20	13.74	1.60	19.81	1.11	15.16	1.45	20.11	1.096
8	24.04	27.54	0.87	22.47	1.07	17.09	1.41	22.66	1.06	17.63	1.36	22.96	1.047
9	23.54	27.39	0.86	21.94	1.07	17.02	1.38	22.10	1.07	17.54	1.34	22.58	1.043
10	11.78	10.20	1.15	10.09	1.17	6.53	1.80	11.12	1.06	9.83	1.20	11.04	1.067
11	13.18	10.22	1.29	10.31	1.28	6.54	2.02	11.37	1.16	9.85	1.34	11.32	1.164
12	21.03	31.95	0.66	15.20	1.38	12.50	1.68	16.27	1.29	14.06	1.50	20.10	1.046
13	20.03	31.83	0.63	14.98	1.34	12.46	1.61	16.02	1.25	14.01	1.43	19.96	1.004
14	22.28	37.48	0.59	15.98	1.39	13.99	1.59	16.56	1.35	15.09	1.48	20.22	1.102
15	22.03	37.49	0.59	16.00	1.38	13.99	1.57	16.59	1.33	15.10	1.46	20.24	1.088
16	17.08	20.80	0.82	12.75	1.34	9.26	1.84	14.29	1.20	11.48	1.49	15.36	1.112
17	19.03	20.74	0.92	12.54	1.52	9.24	2.06	14.04	1.36	11.45	1.66	15.20	1.252
18	16.88	19.42	0.87	12.15	1.39	9.07	1.86	13.73	1.23	11.56	1.46	14.50	1.164
19	16.03	19.45	0.82	12.26	1.31	9.08	1.77	13.86	1.16	11.56	1.39	14.58	1.099
20	23.83	57.05	0.42	18.28	1.30	22.04	1.08	17.03	1.40	16.40	1.45	19.47	1.224
21	21.23	57.68	0.37	18.85	1.13	22.28	0.95	17.56	1.21	16.57	1.28	20.13	1.055
22	18.94	22.48	0.84	12.94	1.46	9.09	2.08	14.49	1.31	12.54	1.51	16.64	1.138
23	19.24	22.49	0.86	12.97	1.48	9.10	2.11	14.52	1.33	12.55	1.53	16.66	1.155
24	16.04	22.36	0.72	13.72	1.17	8.39	1.91	15.42	1.04	12.69	1.26	17.30	0.927
25	15.04	22.23	0.68	13.28	1.13	8.36	1.80	14.91	1.01	12.62	1.19	16.96	0.887
26	30.06	62.36	0.48	25.22	1.19	24.55	1.22	26.94	1.12	27.28	1.10	31.60	0.951
27	29.16	62.70	0.47	25.97	1.12	24.67	1.18	27.78	1.05	27.42	1.06	32.10	0.908
28	50.03	126.41	0.40	41.67	1.20	48.73	1.03	41.56	1.20	50.28	1.00	51.27	0.976
29	52.03	126.17	0.41	41.23	1.26	48.65	1.07	41.11	1.27	50.19	1.04	50.99	1.020
30	66.0	85.10	0.78	81.55	0.81	58.58	1.13	88.22	0.75	64.54	1.01	61.39	1.075
31	66.0	85.25	0.77	83.19	0.79	58.66	1.13	89.80	0.73	64.66	1.02	62.49	1.056
32	>75.0	169.30	>0.44	98.61	>0.76	71.59	>1.05	105.72	>0.71	71.11	>1.05	92.90	>0.807
33	75.0	157.81	0.48	78.49	0.96	55.14	1.36	84.13	0.89	60.38	1.24	74.72	1.003
34	63.5	119.49	0.53	70.52	0.90	54.23	1.17	78.95	0.80	59.85	1.06	63.77	0.996
35	60.0	120.22	0.50	74.28	0.81	54.47	1.10	82.98	0.72	60.18	1.00	65.90	0.910
36	40.0	192.32	0.21	67.60	0.59	59.18	0.68	60.92	0.66	54.00	0.74	54.36	0.736
37	66.0	196.95	0.34	71.38	0.92	60.08	1.10	64.01	1.03	54.85	1.20	57.32	1.151
38	54.0	142.79	0.38	78.12	0.69	58.61	0.92	76.64	0.70	53.43	1.01	67.31	0.802
39	71.0	143.03	0.50	78.57	0.90	58.67	1.21	77.06	0.92	53.49	1.33	67.75	1.048
40	60.0	80.97	0.74	64.40	0.93	38.98	1.54	66.06	0.91	41.82	1.43	57.82	1.038
41	60.0	81.46	0.74	66.90	0.90	39.09	1.53	68.39	0.88	41.99	1.43	59.15	1.014
42	19.0	41.70	0.46	17.09	1.11	17.31	1.10	18.53	1.03	23.46	0.81	23.07	0.824
43	19.0	42.92	0.44	18.64	1.02	17.64	1.08	20.66	0.92	24.12	0.79	24.36	0.780
44	24.0	43.78	0.55	20.21	1.19	17.88	1.34	22.72	1.06	24.58	0.98	25.65	0.936
45	31.2	45.51	0.69	26.55	1.18	18.36	1.70	30.24	1.03	25.53	1.22	30.87	1.011
46	34.1	45.47	0.75	26.28	1.30	18.35	1.86	29.94	1.14	25.50	1.34	30.63	1.113
47	17.4	23.84	0.73	13.37	1.30	10.62	1.64	15.04	1.16	13.14	1.32	16.35	1.064
48	16.5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	16.18	1.020
49	17.7	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	16.86	1.050
50	16.2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	16.38	0.989
51	16.0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	16.34	0.979
52	17.0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	16.86	1.008
53	15.8	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	16.19	0.976
54	26.4	27.44	0.96	26.12	1.01	19.18	1.38	23.20	1.14	—	—	24.74	1.067
55	30.0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	24.45	1.227
56	21.0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	19.25	1.091
57	13.8	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	14.27	0.967
58	13.7	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	14.78	0.927
59	14.0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	14.76	0.949
60	13.45	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	15.05	0.894

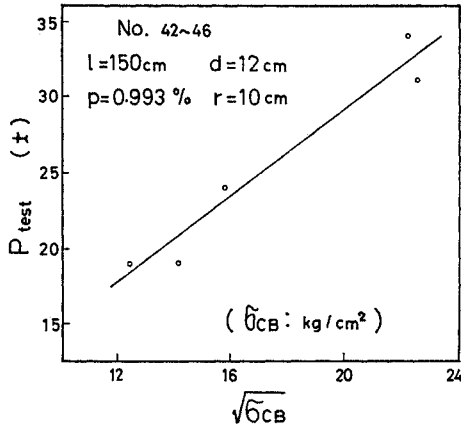


図-2 コンクリート強度の影響

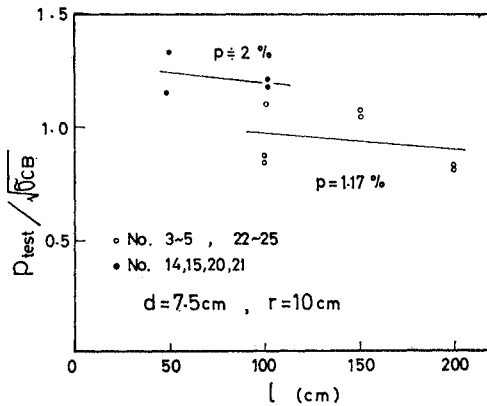


図-3 スパンの影響

(3) 押抜きせん断耐力に対する各種変数の影響についての概略的検討

a) コンクリート強度の影響

はりのせん断耐力の研究によれば、せん断スパン比の大小によって斜引張型とせん断圧縮型の破壊形式に分けることができ、両者の場合でコンクリート強度の影響度が異なるといわれており、前者の場合には引張強度、後者の場合には圧縮強度を影響因子にとるものが多いようである。

スラブの押抜きせん断耐力に関する既往の研究においても、仮想する破壊機構によってコンクリート強度の影響についての考え方が異なっている。本実験結果によれば、前述の各提案式の中では押抜きせん断耐力をコンクリート圧縮強度の平方根（引張強度に対応するとみなすことができる）に関係づけた Moe 式がこの点について最も良い適合性を示している。図-2 は、コンクリート

注 5) より正確には $\tau = S/bz$ で表わされる。

注 6) わが国では荷重周縁から $h/2$ の距離の断面をとっている（コンクリート標準示方書、RC 120 条）。

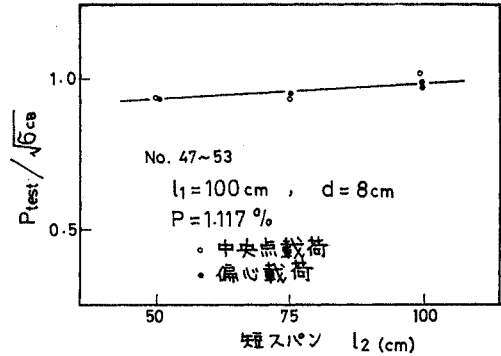


図-4 スラブ形状および荷重位置の影響

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り、圧縮強度の平方根との間にはほぼ直線的な関係が示されている。

b) スパン、荷重位置およびスラブ形状の影響

はりのせん断耐力においては前述のようにせん断スパン比が重要な役割をもっている。スラブにおけるせん断スパン比は、幾何学的な意味においてはもちろん、曲げ応力/せん断応力比の意味においてもひびわれや鉄筋の局部的な降伏による断面力の再分配などのため、はりにおけるほど単純に考えることはできない。

本実験結果によれば、図-3 に見られるようにスパンの影響として明確な傾向は見られなかった。また、スラブの形状および荷重位置の影響は、スパンの影響と密接な関係にあると考えることができるが、図-4 に見られるように、本実験で調べた程度の変化範囲ではいずれもほとんど影響を示さなかった。

c) スラブ有効厚および荷重辺長の影響

鉄筋コンクリート曲げ部材の公称せん断応力度は周知のように一般に次式； $\tau = S/bd$ （注5）によって計算される。もしも、部材のせん断破壊時の τ 値が b および d に関係なく一定であり、かつスラブの場合の b が荷重周長 b_0 （正方形荷重のとき $b_0 = 4r$ 、円形荷重のとき $b_0 = \pi r$ ）にとることができることと仮定すれば、押抜きせん断耐力はスラブ有効厚 d および荷重辺長 r に比例することになるが、実際にはそうでないことは古くから知られているところである。本実験においてもスラブの耐力は、 d とは図-5 に見られるように放物線状の、また、 r とは図-6 のように直線的な関係が示されている。これらの影響を同時に考慮する便利な方法として、公称せん断応力度の計算を行う位置を荷重周縁からスラブ有効厚のある倍数の距離だけ離れた位置にとる方法が広く用いられている（注6）。この方法は、前述の $\tau = S/b_0d$ で与えられるせん断応力度が d/r 比の影響を受けると考えるものであるが、本実験におけるように d を一定として r だけを変化させた場合と、 r を一定として d だけを変化させた場合

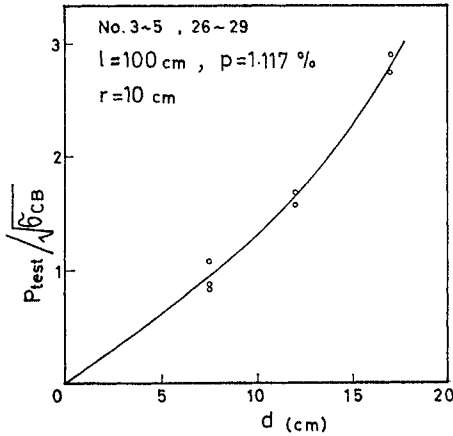


図-5 有効厚の影響

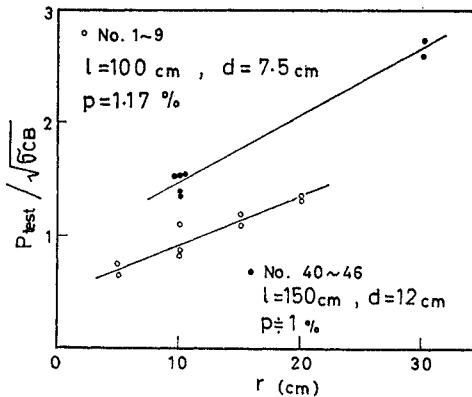


図-6 載荷辺長の影響

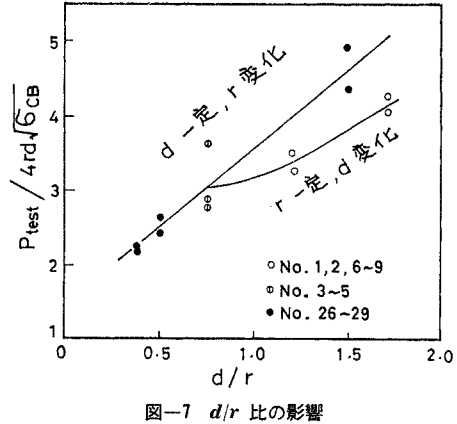


図-7 d/r 比の影響

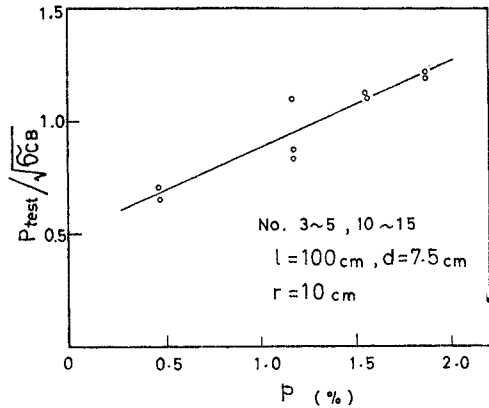


図-8 鉄筋比の影響

の両者について調べた結果によれば、図-7に見られるように両者の場合で d/r 比の影響度が明らかに異なり、この比によって d および r の影響を同時に反映させようとすることには無理があるようである。

d) 鉄筋径および鉄筋比の影響

鉄筋径および鉄筋間隔は、鉄筋比とともに鉄筋の付着性状やダウェル (dowel) 作用などと関連してスラブの押抜きせん断耐力に影響をもつと考えることができるが、一般には2次的要因として無視されている。本実験においても、比較的狭い範囲でしかその影響を調べていないが、たとえば No. 16, 17 (D 13) と No. 3~5 (D 10), No. 34, 35 (D 22) と No. 33 (D 16) との比較などに見られるように、明確な影響は現われていない。

鉄筋比は上記の作用のほかに部材の曲げ耐力などに関連して、RC部材のせん断耐力に大きな影響をもつことは周知のとおりである。本実験においてもそれは顕著であり、図-8に示すようにスラブの耐力との間にほぼ直線的な関係が見られた。ただし、鉄筋比が約2%を越えるスラブでは、 $p=3.372\%$ の No. 36 ($P_{test}=40.0 t$)

と No. 37 ($P_{test}=66.0 t$), $p=2.107\%$ の No. 38 ($P_{test}=54.0 t$) と No. 39 ($P_{test}=71.0 t$) の結果に見られるように、同じ諸元値のスラブでありながら耐力に大きな差が現われ、本実験結果のみから特定の傾向をとらえることは困難であった。

e) まとめ

以上に述べたRCスラブの押抜きせん断耐力に対する各種の変数の影響に関する概況をまとめれば、

i) スラブ耐力はコンクリート圧縮強度の平方根とほぼ直線関係にあった。

ii) スパン、載荷位置およびスラブ形状は、本実験において調べた範囲内ではスラブ耐力にほとんど影響もたなかった。

iii) スラブ耐力は有効厚の増加とともにほぼ放物線状に、載荷辺長とほぼ直線的に増加するが、それらの影響を慣用の公称せん断応力度に対する有効厚/載荷辺長比の影響として考慮するだけでは十分でない。

iv) スラブ耐力は鉄筋比とほぼ直線関係にあったが、鉄筋比の高いものについては実験値のばらつきが大きいため、一定の法則性が見出されなかった。

表-3 解析に用いた既往の実験データ

	No.	呼び名	l (cm)	d (cm)	ρ (%)	σ_{sy} (kg/cm ²)	σ_{cb}^* (kg/cm ²)	r (cm)	P_{test} (t)	P_{calc} (t)	$\frac{P_{test}}{P_{calc}}$
Graf's slabs ¹¹⁾	61	1362	150	27.1	1.057	4750	160	30.0	118.8	98.23	1.209
	62	1375	150	47.3	0.603	4750	159	30.0	169.6	144.41	1.174
Elstner-Hognestad's slabs ⁷⁾	63	A-1 a	183	11.8	1.15	3390	143	25.4	30.8	33.51	0.919
	64	A-1 b	183	11.8	1.15	3390	257	25.4	37.2	37.84	0.983
	65	A-1 c	183	11.8	1.15	3390	296	25.4	36.3	39.08	0.929
	66	A-1 d	183	11.8	1.15	3390	375	25.4	35.8	41.39	0.865
	67	A-1 e	183	11.8	1.15	3390	207	25.4	36.3	36.10	1.006
	68	A-2 a	183	11.4	2.47	3280	139	25.4	34.0	32.17	1.057
	69	A-2 b	183	11.4	2.47	3280	199	25.4	40.8	38.50	1.060
	70	A-2 c	183	11.4	2.47	3280	382	25.4	47.6	53.32	0.893
	71	A-7 b	183	11.4	2.47	3280	285	25.4	52.2	46.06	1.133
	72	A-3 a	183	11.4	3.70	3280	130	25.4	36.3	31.10	1.167
	73	A-3 b	183	11.4	3.70	3280	231	25.4	45.4	41.47	1.095
	74	A-3 c	183	11.4	3.70	3280	271	25.4	54.4	44.91	1.211
	75	A-3 d	183	11.4	3.70	3280	352	25.4	55.8	51.19	1.090
	76	A-4	183	11.8	1.15	3390	266	35.6	40.8	45.45	0.898
	77	A-5	183	11.4	2.47	3280	283	35.6	54.4	54.85	0.992
	78	A-6	183	11.4	3.70	3280	255	35.6	50.8	52.08	0.975
	79	A-7	183	11.4	2.47	3280	290	25.4	40.8	46.47	0.878
	80	A-8	183	11.4	2.47	3280	224	35.6	44.5	48.82	0.912
81	A-7 a	183	11.4	2.47	3280	285	25.4	28.6	46.06	0.621	
82	A-11	183	11.4	2.47	3280	264	35.6	54.0	52.99	1.019	
83	A-12	183	11.4	2.47	3280	290	35.6	54.0	55.53	0.972	
84	B-9	183	11.4	2.00	3480	448	25.4	51.5	57.31	0.899	
85	B-11	183	11.4	3.00	4170	138	25.4	33.6	32.06	1.048	
86	B-14	183	11.4	3.00	3320	515	25.4	59.0	61.91	0.953	
Scordelis-Lin-May's slabs ⁹⁾	87	S-1	183	10.8	2.50	3370	198	33.0	47.6	41.47	1.148
	88	S-2	183	10.8	2.50	3370	285	33.0	49.4	49.75	0.993
Kinnunen-Nylander's slabs ¹⁰⁾	89	5	ϕ 171	11.7	0.80	4500	268	ϕ 15.0	26.0	26.94	0.965
	90	6	ϕ 171	11.8	0.79	4630	262	ϕ 15.0	28.0	27.33	1.025
	91	24	ϕ 171	12.8	1.01	4645	264	ϕ 30.0	43.8	44.91	0.975
	92	25	ϕ 171	12.4	1.04	4600	251	ϕ 30.0	41.6	43.33	0.960
	93	32	ϕ 171	12.3	0.49	4570	263	ϕ 30.0	26.3	29.60	0.889
94	33	ϕ 171	12.5	0.48	4705	266	ϕ 30.0	26.3	30.36	0.866	
Moe's slabs ¹¹⁾	95	H1	183	11.4	1.15	3340	266	25.4	37.9	36.36	1.043
	96	S1-60	183	11.4	1.06	4070	238	25.4	39.7	37.88	1.048
	97	S1-70	183	11.4	1.06	4070	250	25.4	40.1	38.28	1.048
	98	R2	183	11.4	1.38	3340	271	15.2	31.8	32.55	0.975
99	M1A	183	11.4	1.50	4900	212	30.5	44.1	43.60	1.011	
Yitzhaki's slabs ¹⁰⁾	100	II-5	ϕ 116	8.23	0.526	4800	233	ϕ 22.1	15.5	16.12	0.960
	101	II-8	ϕ 116	8.23	0.578	4650	253	ϕ 33.3	22.3	21.03	1.059
	102	II S20-1	ϕ 171	7.82	0.660	4110	148	20.1	13.0	15.04	0.866
	103	II-1	ϕ 116	8.23	1.210	4660	142	ϕ 22.1	18.5	18.36	1.005
	104	II-4 a	ϕ 116	8.23	0.893	5690	243	ϕ 22.1	24.9	23.70	1.053
	105	II-4 b	ϕ 116	8.23	0.893	4750	133	20.1	16.5	19.09	0.863
	106	II-4 c	ϕ 116	8.23	0.893	5200	188	20.1	22.0	22.94	0.957
	107	II R20-2	ϕ 116	10.85	0.930	5100	202	ϕ 20.1	31.3	29.77	1.050
	108	II R30-1	ϕ 171	8.03	2.020	4110	238	ϕ 30.0	24.4	27.01	0.902
	109	II-2	ϕ 171	8.03	1.255	3800	132	ϕ 22.1	15.5	17.17	0.901
	110	II-6	ϕ 171	8.23	1.327	4650	293	ϕ 22.1	24.5	26.38	0.928
	111	II-9	ϕ 116	7.91	0.850	5610	125	20.1	16.0	17.65	0.905
	112	III-3	ϕ 116	8.23	1.210	5690	245	ϕ 22.1	20.5	24.11	0.849
	113	7	ϕ 116	8.23	0.736	4650	135	ϕ 11.9	12.0	12.99	0.922
114	II-10	ϕ 171	8.23	1.040	3920	158	ϕ 11.9	10.0	14.90	0.670	

* 立方体強度が報告されているものは、その 80% をとった

4. 押抜きせん断耐力の実用算定式

前節の結果をもとに従来よりも実験データとの適合性

のよい押抜きせん断耐力の実用的な算定式を求めることにする。その際、従来の式は前述のように多少なりとも破壊機構を仮想しているが、ここでは実験データの統計的解析のみによって実験式を導くことにした。

解析に用いたデータは、前述の実験のうち No. 32 を除く 59 枚のスラブのデータのほか、必要な変数値のすべてについて著者らが知ることのできた既往の発表データの中から押抜きせん断破壊をしたと報告されている普通コンクリートを用いた RC 単純支持スラブについてのデータを用いた（有孔スラブ、型枠の貫入などによって欠陥の生じているスラブ、球接触載荷や舗装を介した間接載荷などの特殊な載荷をしたスラブ、周辺補剛ばりを有するスラブ、人工軽量骨材を用いたスラブなどは除外した）。採用したデータの詳細は表-3 に示すとおりで合計 54 個からなり、著者らのデータと合わせて 113 個である。

上記の実験データを用い、回帰分析によって各変数の影響について調べた。その際、3. (3) e) に述べた結果をもとに各変数の影響について累加型、累積型および両者の複合型の関数を用い、得られた結果において実験データとの相関性の不満足なものについては部分的に関数形を修正して再分析を行うか、棄却をした。計算過程についてはここでは省略し、以下に主な結果を述べる。

i) 著者らの実験では鉄筋の品質の影響について調べなかったが、3. (3) e) iv) に述べた鉄筋比の影響は、 $p\sigma_{sy}$ の影響に置き換えるほうが実験データとの相関性がよくなる。このことは既往の提案式の影響因子の採り方とも一般に一致する。

ii) 押抜きせん断耐力は $p\sigma_{sy}$ の増加とともにほぼ直線的に増加するが、 $p\sigma_{sy}$ または $p\sigma_{sy}/\sqrt{\sigma_{CB}}$ がある値を越えれば耐力の増加はほとんどなくなり、また、実験データのばらつきも大きくなる。その限界における鉄筋比は終局曲げ理論による平衡鉄筋比に比べてかなり低いところにある。

iii) 3. (3) e) iii) に述べたように、スラブ有効厚および載荷辺長の影響を無次元量で表わすとき、 d/r 比だけでは十分ではなく、他にもう一個の変数を導入する必要があるが、スパンに関係する変数を用いても良好な結果が得られず、むしろ長さの次元をもった定数を導入する方が実験データとの相関性が良かった。

iv) d/r 比の影響は d/b_0 (b_0 は載荷周長) に置き換えるほうがいくぶん良い結果となった。

v) 実験データとの相関性が比較的良好な耐力算定式として、次式を得た。

$$P = 0.674(b_0 + 3\pi d)d\sqrt{\sigma_{CB}} \left(1 + 0.5 \frac{p\sigma_{sy}}{\sqrt{\sigma_{CB}}} \right) \left(1 + \frac{d}{20 \text{ cm}} \right) \dots\dots\dots (5)$$

ただし、 $p\sigma_{sy}/\sqrt{\sigma_{CB}} > 3.33$ のときは $p\sigma_{sy}/\sqrt{\sigma_{CB}} =$

注 7) 正確には式 (5) 中の $\sqrt{\sigma_{CB}}$ を $\sqrt{1 \text{ kg/cm}^2 \times \sigma_{CB}}$ と表わせばよい。なお、これをコンクリート引張強度の倍数に置換すれば式 (5) の両辺の次元が一致する。

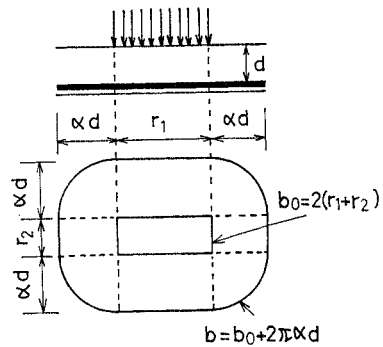


図-9 臨界断面の周長

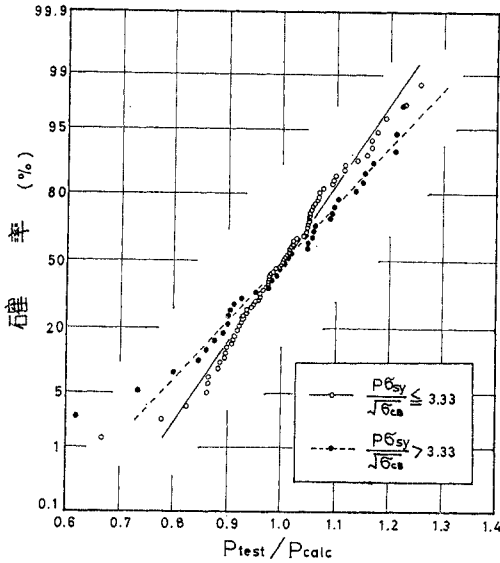
3.33 とする。

なお、上式中の係数値は σ_{CB} として kg/cm^2 の単位を用いたときの値である注7)。

上記 iii) に関連する既往の研究としては、はりの実験ではあるが、Kani が行った一連の研究において、せん断スパン比や鉄筋比だけでなく、有効高さ自身もはりのせん断耐力に影響をもつことを実験的に明らかにし、これを説明するためにせん断破壊機構として櫛の歯モデルを提案し、長さの次元をもつ新たな変数としてひびわれ間隔を導入している²⁵⁾。しかし現時点ではその適否が不明であり、また、スラブのひびわれ性状は複雑であって、ひびわれ間隔を適切にとらえがたいことから、本研究では物理的意味は不明のまま、長さの次元をもつ定数を導入するにとどめた。また、上記 iv) は、変数として d/r および d/b_0 のいずれをとっても結果に著しい差が生ずるのではないが、後者の場合、公称せん断応力度によって安全性の検討を行う慣用の方法を用いるとき、その計算を行う臨界断面が図-9 に示すように方形載荷の場合にも隅角部をまるくすることになり、結果として任意の載荷形状に対して連続性が保たれる利点もあるので、ここでは d/b_0 を用いることにした。

前述の各スラブに対する式 (5) の計算値は、表-2 および表-3 に示すとおりである。これより測定値/計算値の比の平均値および標準偏差を求めれば、 $p\sigma_{sy}/\sqrt{\sigma_{CB}} \leq 3.33$ の 77 枚のスラブに対して 1.000 ± 0.100 、 $p\sigma_{sy}/\sqrt{\sigma_{CB}} > 3.33$ のスラブ 36 枚に対して 1.000 ± 0.136 である。また、著者らの行った実験スラブのうち No. 32 を除く 59 枚に対しては $1.021 \pm 0.108 (10.6\%)$ であり、測定値/計算値の度数分布は図-1(e) に示すとおりである。これらの結果より式 (5) の実験データとの適合性がかなり良好であるといえよう。

式 (5) は実験データの平均値に対応するものである。もしもこれを実際の設計に応用するとすれば、もっと安全側の式に修正する必要がある。図-10 は、前述の測定値/計算値の比の分布を正規確率紙上に描いたものであり、これより $p\sigma_{sy}/\sqrt{\sigma_{CB}}$ の 2 つの領域においてばら



図一〇 正規確率座標における P_{test}/P_{calc} の分布

つきは異なるが、それぞれがほぼ正規分布に従っていることがわかる。したがって、前述の標準偏差の値と正規確率図表より式 (5) を任意の信頼度の式に修正することができる。一例として 95% 信頼度の式を示すと、次のようになる。

$$P = 0.563(b_0 + 3\pi d)d\sqrt{\sigma_{CB}} \left(1 + 0.5 \frac{p\sigma_{sy}}{\sqrt{\sigma_{CB}}}\right) \left(1 + \frac{d}{20}\right) \dots\dots\dots (6)$$

ただし、 $p\sigma_{sy}/\sqrt{\sigma_{CB}} > 2.95$ のときは 2.95 の値を用いる。

5. ま と め

本研究は、普通コンクリートを用いた鉄筋コンクリートからなる単純支持スラブの押抜きせん断耐力について実験的に検討したものである。まず 60 枚のスラブについて実験を行って主な変数の影響を概略的に調べ、それに基づいて既往の実験データを含む合計 113 個のデータの統計的解析によってさらに詳細な検討を行い、慣用の変数である d/r 比のみによって d および r の両者の影響を考慮するには無理があること、鉄筋比の影響は曲げ理論における平衡鉄筋比よりかなり低いところで頭打ちになること、鉄筋比の高い領域では実験値のばらつきが大きいこと、などの結果を得た。最後に従来のものより実験値との適合性のよい実用的な耐力算定式を示し、かつそれによる実験値/計算値のばらつきがほぼ正規分布に従うことを示した。

謝 辞：本研究は、横道英雄博士の指導のもとに、大島久氏（現在本州四国連絡橋公団）、佐々木秀男氏を

はじめ北海道開発局土木試験所構造研究室の諸氏、高田宣之氏、成井信氏、小野定氏をはじめ北海道大学コンクリート工学研究室、同交通構造工学研究室の諸氏の協力を得て行ったものである。ここに感謝の意を表したい。

参 考 文 献

- 1) 梶貝 勇：鉄筋コンクリート部材の諸性状（その4）せん断一般，同（その5）アメリカにおけるせん断の研究 青柳征夫：同（その6）西ドイツおよびソ連におけるせん断の研究，土木学会コンクリートライブラリー第34号，1972.
- 2) Report of ACI-ASCE Committee 326: Shear and Diagonal Tension, Journal of ACI, Vol. 59, No. 1, 2 and 3, 1962
- 3) Report of ASCE-ACI Committee 426: The Shear Strength of Reinforced Concrete Members, Journal of the Structural Division, ASCE, Vol. 99, No. ST 6, 1973
- 4) Bresler, B. and McGregor, J.G.: Review of Concrete Beams Failing in Shear, Journal of the Structural Division, ASCE, Vol. 93, No. ST 1, 1967
- 5) Richart, F.E.: Reinforced Concrete Wall and Column Footings, Journal of ACI, Vol. 45, Nos. 2 and 3, 1948
- 6) Hognestad, E.: Shearing Strength of Reinforced Concrete Column Footings, Journal of ACI, Vol. 50, No. 3, 1953
- 7) Elstner, R.C. and Hognestad, E.: Shearing Strength of Reinforced Concrete Slabs, Journal of ACI, Vol. 53, No. 1, 1956
- 8) Whitney, C.S.: Ultimate Shear Strength of Reinforced Concrete Flat Slabs, Footings, Beams, and Frame Members without Shear Reinforcement, Journal of ACI, Vol. 54, No. 4, 1957
- 9) Scordelis, A.C., Lin, T.Y. and May, H.R.: Shearing Strength of Prestressed Lift Slabs, Journal of ACI, Vol. 55, No. 4, 1958
- 10) Kinnunen, S. and Nylander, H.: Punching of Concrete Slabs without Shear Reinforcement, Trans., Royal Institute of Technology, Stockholm, No. 158, 1960
- 11) Moe, J.: Shearing Strength of Reinforced Concrete Slabs and Footings under Concentrated Loads, Development Department Bulletin, D47, PCA, 1961
- 12) Hognestad, E., Elstner, R.C. and Hanson, J.A.: Shear Strength of Reinforced Structural Lightweight Aggregate Concrete Slabs, Journal of ACI, Vol. 61, No. 6, 1964
- 13) Yitzhaki, D.: Punching Strength of Reinforced Concrete Slabs, Journal of ACI, Vol. 63, No. 5, 1966
- 14) Long, A.E. and Bond, D.: Punching Failure of Reinforced Concrete Slabs, Proc. of ICE, Vol. 37, 1967
- 15) Mowrer, R.D. and Vanderbilt, M.D.: Shear Strength of Lightweight Aggregate Reinforced Concrete Flat Plates, Journal of ACI, Vol. 64, No. 11, 1967
- 16) 小柳 治・児嶋孝之・平沢征夫・米田俊一：コンクリート床版のせん断破壊に関する一実験，セメント技術年報 XXII, 1968
- 17) 赤塚雄三・関 博：周辺補剛ばりを有する鉄筋コンクリートスラブの終局耐力について，コンクリートジャーナル，Vol. 7, No. 10, 1969
- 18) Ivy, C.B., Ivy, D.L. and Buth, E.: Shear Capacity

- of Lightweight Concrete Flat Slabs, Journal of ACI, Vol. 66, No. 6, 1969
- 19) 小柳 治・平沢征夫・米田俊一：フラットスラブのパンチング破壊についての2, 3の実験と考察, セメント技術年報 XXIV, 1970
- 20) 徳光善治・石川達夫・松下博通・太田正彦：周辺補剛ばりを有する鉄筋コンクリートスラブの押抜きせん断破壊に関する実験, セメント技術年報 XXIV, 1970
- 21) 石川達夫・平田登基男：集中荷重をうける大型模型床版のパンチング破壊, 九大工学集報, 43巻5号, 1970
- 22) 大島 久：鉄筋コンクリート床版の破損と対策について, 北海道土木技術会コンクリート研究委員会資料, 第2号, 1972
- 23) 横道英雄・角田与史雄・成井 信・大島 久：鉄筋コンクリートスラブの押抜きせん断強度に関する2, 3の実験, セメント技術年報 XXVI, 1972
- 24) 藤田嘉夫：単純曲げをうける鉄筋コンクリート桁およびプレストレストコンクリート桁の極限強さ設計法に関する研究, 北大工学部研究報告, 32号, 1963
- 25) Kani, G.N.J.: How Safe are our Large Reinforced Concrete Beams?, Journal of ACI, Vol. 64, No. 3, 1967

(1974.5.17・受付)