

V—7

RC面部材のせん断耐力について

北海道大学大学院 学生員 稲元 久晃
 北海道大学工学部 正 員 角田与史雄
 北海道大学工学部 正 員 林川 俊郎
 北海学園大学工学部 正 員 高橋 義裕

1. まえがき

鉄筋コンクリート部材のせん断挙動は、鉄筋コンクリートの基本的概念を形成しており、ひびわれや破壊状態が鉄筋コンクリートとして独特の挙動を示す。そして、今までに行なわれたさまざまな研究の成果を元に、現在の示方書、設計基準等に生かされてきた。だが、鉄筋コンクリート部材のせん断挙動は、従来の成果だけでは、説明のつかない不明瞭な点も少なくない。本研究では、過去に行なわれた矩形スラブと片持ちスラブのせん断耐力に関する実験結果を元に、解析を行なったものである。以下にその結果を示す。

2. 使用データ

使用データは、S60～S63年度の北海学園大学と、S63年度の北海道大学のRCスラブのせん断挙動に関する実験結果である。実験供試体は、図-1に示す相対する二辺が単純、他の二辺が自由な長方形部材と、図-2に示す両側に対称な張り出しを持つT形部材であり、使用したデータは表-1～表-4に示す通りである。

ただし、補正破壊荷重 $\bar{P}_0$ は、コンクリートの圧縮強度 σ_{cs} のばらつきの影響を、ある程度取り除くために、実際の破壊荷重 P_0 に、 $\sqrt{300/\sigma_{cs}}$ を乗じ、 P_0 をコンクリート強度300kgf/cm²に換算した値である。

矩形スラブ

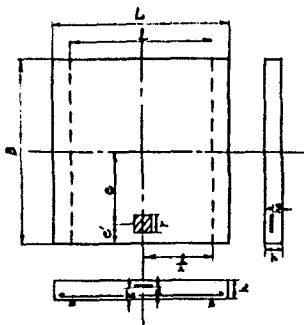


図-1

片持ちスラブ

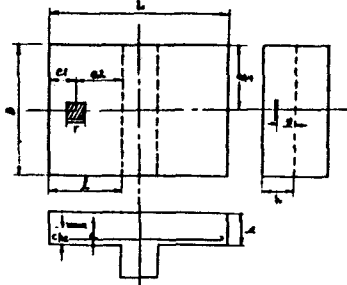


図-2

B, L: 辺長 h: 部材厚 l: スパン he: 埋め込み深さ
 r: 載荷辺長 d: 有効高 e1: せん断スパン e2: 張り出し長
 e: スラブ中心から載荷位置まで e': 載荷位置から自由縁まで

・矩形スラブのデータ(1) 表-1

No.	B (cm)	L (cm)	d (cm)	r (cm)	e' (cm)	e (cm)	h (cm)	P_0 (%)	σ_{cs} (kgf/cm ²)	P_0 (t)	$\bar{P}_0$ (t)
1	75	90	12.2	10.0	37.50	0.00	15	1.440	275	25.4	26.53
2	75	90	7.2	10.0	37.50	0.00	15	1.440	275	14.4	15.04
3	75	90	2.2	10.0	37.50	0.00	15	1.440	275	7.4	7.73
4	75	90	12.2	10.0	18.75	18.75	15	1.440	234	20.0	22.65
5	75	90	7.2	10.0	18.75	18.75	15	1.440	267	10.3	10.92
6	75	90	2.2	10.0	18.75	18.75	15	1.440	267	7.6	8.06
7	75	90	12.2	10.0	5.00	32.50	15	1.440	234	12.6	14.27
8	75	90	7.2	10.0	5.00	32.50	15	1.440	288	10.4	10.61
9	75	90	2.2	10.0	5.00	32.50	15	1.440	288	5.8	5.92
10	75	90	12.2	7.5	37.50	0.00	15	1.440	281	21.6	22.32
11	75	90	7.2	7.5	37.50	0.00	15	1.440	297	9.3	9.35
12	75	90	2.2	7.5	37.50	0.00	15	1.440	317	5.5	5.35
13	75	90	12.2	7.5	18.75	18.75	15	1.440	281	20.5	21.18
14	75	90	7.2	7.5	18.75	18.75	15	1.440	315	10.8	10.34
15	75	90	2.2	7.5	18.75	18.75	15	1.440	317	4.7	4.57
16	75	90	12.2	7.5	3.75	33.75	15	1.440	297	12.1	12.16
17	75	90	7.2	7.5	3.75	33.75	15	1.440	315	9.7	9.47
18	75	90	2.2	7.5	3.75	33.75	15	1.440	171	2.8	3.71
19	75	90	12.2	12.5	37.50	0.00	15	1.440	232	27.0	30.70
20	75	90	7.2	12.5	37.50	0.00	15	1.440	200	11.3	13.84
21	75	90	2.2	12.5	37.50	0.00	15	1.440	200	5.7	6.98
22	75	90	12.2	12.5	6.25	31.25	15	1.440	171	11.6	15.38
23	75	90	7.2	12.5	6.25	31.25	15	1.440	192	5.8	7.25
24	75	90	2.2	12.5	6.25	31.25	15	1.440	192	3.2	4.00
25	90	90	17.2	10.0	45.00	0.00	20	1.104	313	46.3	45.33
26	90	90	12.2	10.0	45.00	0.00	20	1.104	275	29.0	30.29
27	90	90	7.2	10.0	45.00	0.00	20	1.104	282	17.8	18.36

Ultimate Strength on Punching Shear of Reinforced Concrete Slabs

by Hisateru INAMOTO, Yoshio KAKUTA, Toshiro HAYASHIKAWA, Yoshihiro TAKAHASHI

。 矩形スラブのデータ (2)

表-2

No.	B (cm)	L (cm)	d (cm)	r (cm)	e' (cm)	e (cm)	h (cm)	h. (cm)	P. (%)	σ_{cs} (kg/cm ²)	P _s (tf)	F _s (tf)
28	90	90	17.2	10.0	22.50	22.50	20	20	1.104	278	31.5	32.72
29	90	90	12.2	10.0	22.50	22.50	20	15	1.104	310	23.7	23.31
30	90	90	7.2	10.0	22.50	22.50	20	10	1.104	326	15.4	14.55
31	90	90	17.2	10.0	5.00	40.00	20	20	1.104	325	20.0	19.22
32	90	90	12.2	10.0	5.00	40.00	20	15	1.104	235	15.0	17.63
33	90	90	7.2	10.0	5.00	40.00	20	10	1.104	262	11.2	11.55
34	75	90	17.2	10.0	37.50	0.00	20	20	1.135	289	37.5	38.21
35	75	90	12.2	10.0	37.50	0.00	20	15	1.135	219	24.4	28.56
36	75	90	7.2	10.0	37.50	0.00	20	10	1.135	249	14.0	15.37
37	75	90	17.2	10.0	18.75	18.75	20	20	1.135	302	37.1	38.90
38	75	90	12.2	10.0	18.75	18.75	20	15	1.135	260	24.2	25.58
39	75	90	7.2	10.0	18.75	18.75	20	10	1.135	300	17.0	17.00
40	75	90	17.2	10.0	32.50	5.00	20	20	1.135	325	18.8	18.06
41	75	90	12.2	10.0	32.50	5.00	20	15	1.135	286	15.4	15.77
42	75	90	7.2	10.0	32.50	5.00	20	10	1.135	301	12.8	12.58
43	60	90	17.2	10.0	30.00	0.00	20	20	1.064	228	36.5	41.67
44	60	90	12.2	10.0	30.00	0.00	20	15	1.064	229	22.3	25.52
45	60	90	7.2	10.0	30.00	0.00	20	10	1.064	229	15.7	17.97
46	45	90	17.2	10.0	22.50	0.00	20	20	1.104	228	29.7	34.47
47	45	90	12.2	10.0	22.50	0.00	20	15	1.104	306	22.6	12.44
48	45	90	7.2	10.0	22.50	0.00	20	10	1.104	308	18.2	17.96
49	30	90	17.2	10.0	15.00	0.00	20	20	0.947	367	23.2	20.98
50	30	90	12.2	10.0	15.00	0.00	20	15	0.947	367	13.4	12.12
51	30	90	7.2	10.0	15.00	0.00	20	10	0.947	367	13.6	12.30
52	15	90	17.2	10.0	7.50	0.00	20	20	0.945	301	12.8	12.58
53	15	90	12.2	10.0	7.50	0.00	20	15	0.945	301	10.6	10.58
54	15	90	7.2	10.0	7.50	0.00	20	10	0.945	301	7.4	7.39

。 片持ちスラブのデータ (1)

表-3

No.	B (cm)	L (cm)	d (cm)	σ_{sy} (kg/cm ²)	e1 (cm)	e2 (cm)	h (cm)	h. (cm)	P. (%)	σ_{cs} (kg/cm ²)	P _s (tf)	F _s (tf)
1	100	100	12.5	3710.4	10	30	15	15	0.880	278	16.55	17.10
2	100	100	7.5	3710.4	10	30	15	10	0.880	353	14.05	12.05
3	100	100	2.5	3710.4	10	30	15	5	0.880	353	9.20	8.48
4	100	100	12.5	3710.4	15	25	15	15	0.880	304	17.85	17.73
5	100	100	7.5	3710.4	15	25	15	10	0.880	321	12.35	11.93
6	100	100	2.5	3710.4	15	25	15	5	0.880	321	8.75	8.53
7	100	100	12.5	3710.4	20	20	15	15	0.880	329	30.00	28.65
8	100	100	7.5	3710.4	20	20	15	10	0.880	335	14.15	13.39
9	100	100	2.5	3710.4	20	20	15	5	0.880	335	8.65	8.29
10	100	100	12.5	4075.2	20	20	15	15	1.556	323	28.75	27.71
11	100	100	7.5	4075.2	20	20	15	10	1.556	318	14.65	14.23
12	100	100	2.5	4075.2	20	20	15	5	1.556	318	7.60	7.38
13	100	100	12.5	3710.4	20	20	15	15	0.528	277	17.70	18.42
14	100	100	7.5	3710.4	20	20	15	10	0.528	353	14.80	13.64
15	100	100	2.5	3710.4	20	20	15	5	0.528	353	8.90	8.43
16	100	90	12.5	3710.4	10	25	15	15	0.880	327	20.20	19.35
17	100	90	7.5	3710.4	10	25	15	10	0.880	341	12.55	11.77
18	100	90	2.5	3710.4	10	25	15	5	0.880	341	9.05	8.49
19	100	80	12.5	3710.4	10	20	15	15	0.880	291	27.20	26.30
20	100	80	7.5	3710.4	10	20	15	10	0.880	291	15.45	15.69
21	100	80	2.5	3710.4	10	20	15	5	0.880	291	8.90	9.04
22	100	100	12.8	3886.0	10	30	15	15	1.484	301	22.00	26.98
23	100	100	7.8	3886.0	10	30	15	10	1.484	300	14.00	14.00
24	100	100	2.8	3886.0	10	30	15	5	1.484	301	8.50	8.50
25	100	100	12.8	3886.0	10	30	15	5	1.484	300	8.15	8.15
26	100	80	12.8	3886.0	10	20	15	15	1.484	299	29.00	29.05
27	100	80	7.8	3886.0	10	20	15	10	1.484	338	31.00	29.21

。 片持ちスラブのデータ (2)

表-4

No.	B (cm)	L (cm)	d (cm)	σ_{sy} (kg/cm ²)	e1 (cm)	e2 (cm)	h (cm)	h. (cm)	P. (%)	σ_{cs} (kg/cm ²)	P _s (tf)	F _s (tf)
28	100	80	2.8	3886.0	10	20	15	5	1.484	299	15.50	15.53
29	100	80	2.8	3886.0	10	20	15	5	1.484	338	8.10	7.86
30	100	100	13.0	3906.0	10	30	15	15	0.502	347	16.00	14.88
31	100	100	8.0	3906.0	10	30	15	10	0.502	277	12.00	12.49
32	100	100	3.0	3906.0	10	30	15	5	0.502	277	5.50	5.72
33	100	100	3.0	3906.0	10	30	15	5	0.502	347	4.50	4.18
34	100	80	13.0	3906.0	10	20	15	15	0.502	304	10.10	18.97
35	100	80	8.0	3906.0	10	20	15	10	0.502	316	10.25	9.99
36	100	80	3.0	3906.0	10	20	15	5	0.502	316	7.00	6.82
37	100	80	3.0	3906.0	10	20	15	5	0.502	304	5.70	5.55

3. 解析結果

二辺支持の矩形スラブと、三辺自由一辺固定の片持ちスラブにおけるせん断耐力と曲げ耐力は、以下の式により算定を行なった。

はりとしてのせん断耐力

$$V_u = 0.94(p_w \sigma_{CB})^{1/3} (100/d)^{1/4} (0.75 + 1.4/(a/d)) b_o d \quad (1)$$

ディープビームとしてのせん断耐力

$$V_d = 0.53(\sigma_{CB})^{2/3} (1 + \sqrt{p_w}) (1 + 3.33 r/d) b_o d / (1 + (a/d)^2) \quad (2)$$

押し抜きせん断耐力

$$V_{p.c.d} = 0.6(100/d)^{1/4} (p_w)^{1/3} (1 + 1/(1 + 0.25 u/d)) \sigma_{CB} u_o d / r_b \quad (3)$$

曲げ耐力

$$M_{uu} = p_w b_o d \sigma_{su} (d - 0.412 x) \quad (4)$$

$$x = A_s \sigma_{su} / (0.8 b_o \sigma_{CB}) \quad (5)$$

以上において

σ_{CB} : コンクリートの強度(kgf/cm ²)	a : せん断スパン(cm)
d : 有効高(cm)	b : 断面幅(cm)
b_o : 有効幅(cm)	A_s : 引張鉄筋断面積(cm ²)
p_w : 鉄筋比(=100 A_s/bd)	r : 載荷辺長(cm)
u : 載荷板の周長(cm)	u_o : 設計断面の周長(cm)
σ_{su} : 鉄筋の降伏強度(kgf/cm ²)	r_b : 1.0

(i) 矩形スラブ (二辺支持スラブ)

載荷位置が中央付近 (No.1~3) と、自由縁付近 (No.7~9) について比較検討を行なう。

① 有効幅 b_o 。

コンクリート標準示方書 (13.1.6) に従って求めた。以下にその計算方法を示す。

$$c \geq 1.2m(1-m/l) \text{ のとき、} \quad b_o = v + 2.4m(1-m/l) \quad (6)$$

$$c < 1.2m(1-m/l) \text{ のとき、} \quad b_o = c + v + 1.2m(1-m/l) \quad (7)$$

但し、

c : 集中荷重の分布幅の端からスラブの自由縁までの距離

m : 集中荷重作用点から最も近い支点までのきより

v : 荷重の分布幅

式(6), (7)を用いて計算した結果、それぞれの有効幅は表-5に示す通りである。

表-5 から、自由縁載荷 (No.7~9) における有効幅 b_o は全幅 b の約半分となっており、式(1), (2)で耐力を計算する際は、大きな影響をもたらすことになる。

表-6

表-5

荷 No.	1	2	3	7	8	9
全幅 b	75	75	75	75	75	75
有効幅 b_o	67	67	67	36.5	36.5	36.5

(単位: cm)

耐力(ton)	No.	1	2	3	7	8	9
荷重(ton)		26.53	15.94	7.73	14.27	10.61	5.92
せん断耐力 V_u (P_u/V_u)		24.23 (1.044)	13.35 (1.127)	4.43 (1.746)	12.67 (1.106)	7.79 (1.363)	2.56 (2.291)
せん断耐力 V_d (P_u/V_d)		34.52 (0.736)	10.66 (1.384)	6.92 (0.373)	16.61 (0.849)	6.44 (1.649)	6.55 (10.021)
押し抜きせん断耐力 $V_{p.c.d}$ ($P_u/V_{p.c.d}$)		25.66 (0.992)	13.24 (1.136)	3.37 (2.296)	22.61 (0.631)	13.35 (0.783)	3.45 (1.716)
曲げ耐力 M_{uu} (P_u/M_{uu})		29.22 (0.666)	16.76 (1.492)	6.94 (0.215)	16.36 (0.876)	5.62 (1.623)	6.54 (10.696)

(単位: tonf)

②補正破壊荷重 P_B と耐力(せん断, 曲げ)

次に、補正破壊荷重と式(1)~(5)により求めた耐力を、表-6に示す。

また、カッコで示されている値は、埋め込み深さの違いによる補正破壊荷重とそれぞれの耐力との比である。そして、それらの値を中央載荷(No.1~3)の場合と、自由縁載荷(No.7~9)の場合に分けて、図-3, 図-4に示している。

図-3と図-4を見ると、 $(h-h_e)=0$ cm, 5 cmのときは、どの計算値もその比が0.7~1.8の間にあり、ある程度の精度を得ているが $h_e=5$ cmのときには、どの計算値も実験値と合わなくなる。中央載荷、自由縁載荷のどちらの載荷位置においても V_u , $V_{u,d}$ が、全体としてよい精度を示している。

中央載荷と自由縁載荷を比べると、自由縁載荷の方が、ばらつきが大きくなっていることがわかる。

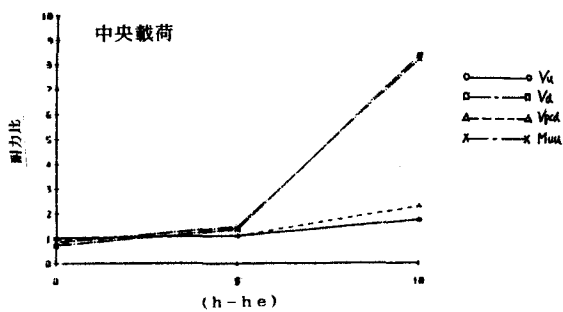


図-3

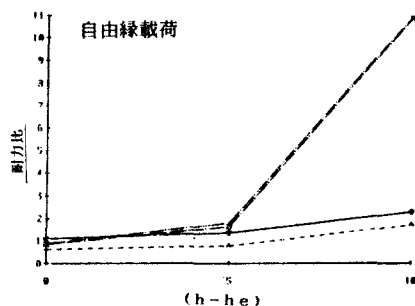


図-4

表-7

No.	1	2	3	7	8	9
全幅 b	100	100	100	100	100	100
有効幅 b_e	85.1	88.1	55.1	78.0	71.0	68.0

(単位: cm)

(ii)片持ちスラブ(三辺自由一辺固定スラブ)

矩形スラブのときと同様に載荷位置が、中央付近(No.7~9)と自由縁付近(No.1~3)について比較検討を行なう。

①有効幅 b_e

表-2に示したデータを用いて、回帰分析を行い有効幅 b_e を決定した。有効幅 b_e の関数として、載荷辺長 r , 鉄筋比 R , 張り出し長 e_1 , 埋め込み深さ h_e を適用した。得られた式を、以下に示す。

$$b_e = 0.013r(1.0 + 342.122R) + 1.096e_1 + 0.998h_e \quad (8)$$

式(8)を用いて計算した結果、それぞれの有効幅 b_e は表-7に示す通りである。有効幅 b_e を決定する要素の一つに、埋め込み深さ h_e を考慮しているので、その影響が現われている。

表-8

No.	1	2	3	7	8	9
補正破壊荷重 P_B	17.19	12.95	8.46	26.85	13.38	8.29
せん断耐力 V_u (P_B/V_u)	10.72 (1.603)	8.03 (2.140)	1.91 (4.430)	16.15 (1.774)	8.12 (1.649)	2.46 (2.818)
せん断耐力 V_d (P_B/V_d)	19.25 (0.891)	7.40 (1.751)	8.78 (12.153)	47.88 (0.568)	17.79 (0.756)	1.00 (3.490)
許容せん断耐力 $V_{u,d}$ ($P_B/V_{u,d}$)	21.51 (0.799)	13.36 (0.970)	3.74 (2.268)	23.49 (1.224)	13.01 (1.029)	3.64 (1.727)
曲げ耐力 $M_{u,d}$ ($P_B/M_{u,d}$)	18.48 (1.854)	3.50 (3.697)	6.36 (23.784)	18.48 (1.557)	6.20 (2.161)	6.64 (6.829)

(単位: t onf)

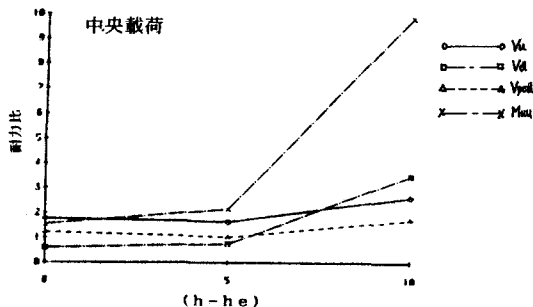


図-5

②補正破壊荷重 P_B と耐力(せん断, 曲げ)

矩形スラブのときと同様に、中央載荷(No.7~9)と自由縁載荷(No.1~3)における埋め込み深さと、耐力比との関係を示した表-8, 図-5, 図-6を見ると、矩形スラブのときよりは、全体的にばらつきは大きい、 $(h-h_e)=0\text{ cm}$, 5 cm のときは、曲げ耐力を除いて、耐力比が0.6~2.2の間にあり、ある程度の精度を得ている。

しかし $h_e=5\text{ cm}$ のときは、矩形スラブのときと同様に、どの計算値も実験値と合わなくなってくる。どちらの載荷位置においても、 V_{pcd} が最も精度が良い。

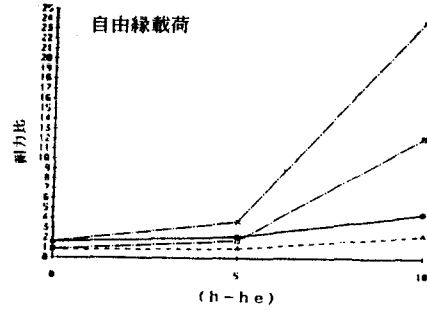


図-6

表-9

平均耐力比 ($h-h_e$)/h	0.0	0.25	0.333	0.5	0.666
平均 ($\bar{P}_B/V_u$)	1.203	1.345	1.075	1.725	1.757
平均 ($\bar{P}_B/V_d$)	0.758	0.958	1.373	2.027	0.045
平均 ($\bar{P}_B/V_{cd}$)	0.603	0.764	0.841	0.978	1.006
平均 ($\bar{P}_B/M_{ue}$)	0.910	1.209	1.417	2.737	0.114

(iii)全データによる解析

矩形スラブのデータ(No.1~54)と片持ちスラブのデータ(No.1~37)を用いて、実験値とそれぞれの計算値について比較検討を行なう。

①矩形スラブ

表-1のデータを用いて、それぞれの埋め込み深さにおける耐力比の平均値を求め、表-7, 図-7に示す。表-9, 図-7より、 $(h-h_e)/h \geq 0.5$ のとき V_{pcd} を除いて、平均耐力比が1.5を超える。すなわち、部材厚 h の中間($h/2$)より埋め込み深さが深くなると、明らかに計算値が実験値より小さくなる。

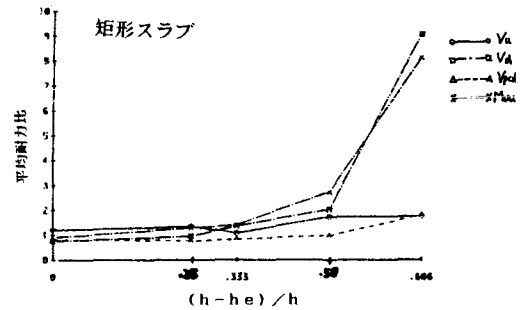


図-7

表-10

平均耐力比 ($h-h_e$)/h	0.0	0.333	0.666
平均 ($\bar{P}_B/V_u$)	1.610	2.076	3.470
平均 ($\bar{P}_B/V_d$)	0.647	1.223	5.693
平均 ($\bar{P}_B/V_{cd}$)	0.940	1.092	1.011
平均 ($\bar{P}_B/M_{ue}$)	1.563	3.120	14.391

また、それぞれの計算式における $(h-h_e)/h=0.0 \sim 0.666$ の平均耐力比を、さらに加重平均すると、 V_u , V_d , V_{pcd} , M_{ue} におけるそれは、それぞれ1.389, 2.348, 0.983, 2.463となり、矩形スラブの場合計算式として、押し抜きせん断耐力式(示方書) V_{pcd} が最も適切であると思われる。

②片持ちスラブ

表-2のデータを用いて、それぞれの埋め込み深さにおける耐力比の平均値を求め、表-9, 図-8に示す。

表-10, 図-8より、 $(h-h_e)/h \geq 0.333$ のとき V_d , V_{pcd} を除いて、平均耐力比が2.0をこえる。

$(h-h_e)/h \geq 0.666$ のときには、すべての計算値が実験値に比べて、遙かに小さくなる。また、矩形スラブのときと同様に、それぞれの計

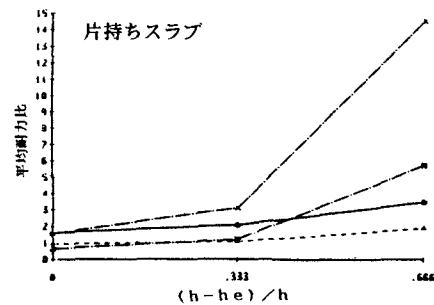


図-8

算式に対する加重平均を求めると、矩形スラブのときの順序に従うなら2.503, 2.864, 1379, 7.226となる。T形スラブも矩形スラブと同様に、押し抜きせん断耐力式 V_{psd} が最も適切であると思われる。

4. まとめ

本研究は、RC面部材のせん断耐力について、矩形スラブと片持ちスラブの実験結果を元にそのせん断挙動について、解析を行なった。得られた結果を以下に列挙する。

- 1) 有効幅という概念を、計算式に導入した。
- 2) 矩形スラブについて、 $(h-h_e)=0\text{ cm}$ [表面載荷], 5 cm [埋め込み載荷] ではどの計算式においても耐力比が、0.7~1.8の範囲に含まれる程度の精度を得ることができた。特に、 V_d (はりのせん断耐力式)と V_{psd} (押し抜きせん断耐力式)が、良い精度を示した。しかし、 $(h-h_e)=10\text{ cm}$ [埋め込み載荷] では、計算式によってばらつきはあるが、明らかに精度が低下した。また、中央載荷と自由縁載荷の結果を比べると、自由縁載荷の結果によりばらつきがみられた。
- 3) 片持ちスラブについて、曲げ耐力を除けば、 $(h-h_e)=0\text{ cm}$, 5 cm では耐力比が、0.6~2.2の範囲に含まれる程度の精度を得ることができた。特に、 V_{psd} が、良い精度を示した。 $(h-h_e)=10\text{ cm}$ では、矩形スラブのときと同様に精度は、低下した。
- 4) 全データによる解析結果から、矩形スラブの場合は、 $(h-h_e)/h \geq 0.5$ のとき、 V_{psd} を除いて、平均耐力比が1.5を越えて、明らかに精度が低下する。また、埋め込み深さに関わらず総合的に見て、 V_{psd} が最も良い精度を示した。片持ちスラブの場合は、 $(h-h_e)/h \geq 0.333$ のとき、 V_d (ディープビームのせん断耐力式)、 V_{psd} を除いて平均耐力比が2.0を越え、 $(h-h_e)/h \geq 0.666$ のときには、すべての計算値の精度が、明らかに低下した。また、埋め込み深さに関わらず総合的に見て、矩形スラブと同様に V_{psd} が最も良い精度を示した。

5. 参考文献

- 1) 中村 哲男ほか：RCスラブの押し抜きせん断耐力に関する実験的研究，北海学園大学，昭和61年度，卒業論文
- 2) 石村 正一ほか：RCスラブの押し抜きせん断耐力に関する実験的研究，北海学園大学，昭和62年度，卒業論文
- 3) 清水 光明ほか：RC面部材の局部せん断破壊に関する実験的研究，北海学園大学，昭和63年度，卒業論文
- 4) 斉藤 彰ほか：RCスラブの局部せん断破壊耐力に関する研究，北海道大学，昭和63年度，卒業論文
- 5) 昭和61年度制定 コンクリート標準示方書（設計編）