

# RCスラブの自由縁附近載荷に対する 实用せん断設計法の研究

古内 仁<sup>1</sup>・高橋義裕<sup>2</sup>・角田與史雄<sup>3</sup>

<sup>1</sup>正会員 北海道大学助手 工学部土木工学科 (〒060 札幌市北区北13条西8丁目)

<sup>2</sup>正会員 工博 北海学園大学教授 工学部土木工学科 (〒064 札幌市中央区南26条西11丁目)

<sup>3</sup>正会員 工博 北海道大学教授 工学部土木工学科 (〒060 札幌市北区北13条西8丁目)

鉄筋コンクリートスラブの押抜きせん断耐力は、作用荷重が自由縁に近づくにつれて低下する。土木学会コンクリート標準示方書では、このような破壊に対して設計断面の長さを減少させることにより考慮している。本研究は、相対する二辺が単純支持されたスラブの試験結果を基に、上記の方法が不十分なものであることを指摘するとともに、自由縁附近載荷の場合における耐力の評価方法を検討した。その結果、耐力低下を押抜きせん断に対する設計断面の長さの減少のほかはその単位長さ当たりのせん断強度の減少としてとらえる方法と、有効幅を用いてはりのせん断耐力として設計する方法を提案した。

**Key Words :** reinforced concrete slabs, punching shear, free edges, critical section, design

## 1. まえがき

鉄筋コンクリートスラブが局部的に集中荷重を受ける場合や、柱から伝達される荷重を直接支持するフーチング等の場合においては、押抜きせん断破壊（パンチング破壊）、はりに類似したせん断破壊、あるいは降伏線の発達による曲げ破壊がみられる。中でも、押抜きせん断破壊は、荷重直下のコンクリートがピラミッド状に押し抜ける脆性的な破壊である。また、集中荷重がスラブの自由縁附近に作用する場合には、さらに複雑な破壊となり耐力が減少することが知られている。現在、土木学会コンクリート標準示方書〔設計編〕<sup>1)</sup>（以下、示方書とする）では、面部材の押抜きせん断に対して終局耐力の照査式が示されているが、自由縁附近載荷に対しては、設計断面 (critical section) の長さを低減する方法をとっている。しかし、この方法だけでは自由縁の影響を適切に評価できないことが指摘されている<sup>2)</sup>。

本研究は、相対する二辺が単純支持されたRCスラブを対象として、荷重が自由縁附近に作用する場合に対して、押抜きせん断実験の結果を基に、上記の方法について再評価を行うとともに、新たに实用せん断設計法の提案を行うことを目的としている。

## 2. 示方書によるスラブの設計法

### (1) スラブの曲げモーメントに対する検討

示方書では線形解析に基づく方法を基本としているが、降伏線理論やストリップ法による塑性解析も許している。集中荷重を受ける単純支持された一方方向スラブの場合は、図-1に示すような有効幅をもつはりとして設計してよいこととしている。これは、弾性論に基づく曲げモーメント分布を考慮したものであり、有効幅  $b_e$  は次式によって算定する。

$$c \geq 1.2x(1-x/l) \text{ の場合} \\ b_e = v + 2.4x(1-x/l) \quad (1)$$

$$c < 1.2x(1-x/l) \text{ の場合} \\ b_e = c + v + 1.2x(1-x/l) \quad (2)$$

ここに、 $c$  : 集中荷重の分布幅の端からスラブ自由縁までの距離

$x$  : 集中荷重作用点から最も近い支点までの距離

$l$  : スラブのスパン

$v$  : 荷重の分布幅

### (2) スラブのせん断力に対する検討

スラブのせん断力に対しては、幅の広いはりとなしにそれに準じた検討と、押抜きせん断に対する検討の2つの規定から成っている。しかしながら、

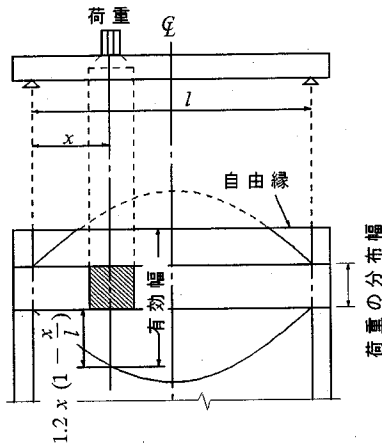


図-1 一方向スラブの有効幅

はりに準じた検討において、フーチングでは有効幅の取り方が示されているのに対し、スラブでは明確な方法が盛り込まれていない。押抜きせん断力に対しては次の規定がある。

### (3) 面部材の設計押抜きせん断耐力

スラブのような面部材に局所的な荷重が作用する場合において、次式によって安全性の検討を行っている。

$$V_{pcd} = \beta_d \cdot \beta_p \cdot \beta_r \cdot f_{pcd} \cdot u_p \cdot d / \gamma_b \quad (3)$$

ここに、

$$f_{pcd} = 0.19 \sqrt{f'_{cd}} \text{ (MPa)} \quad (4)$$

$$\beta_d = (100/d)^{1/4} \quad (d : \text{cm})$$

ただし、 $\beta_d > 1.5$  となる場合は 1.5 とする。

$$\beta_p = (100 p)^{1/3}$$

ただし、 $\beta_p > 1.5$  となる場合は 1.5 とする。

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

$f'_{cd}$  : コンクリートの設計圧縮強度で、単位は MPa である。

$u$  : 載荷面の周長

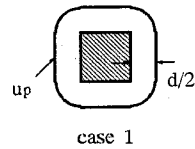
$u_p$  : 設計断面の周長で、載荷面から  $d/2$  離れた位置で算定するものとする。

$d$  および  $p$  : 有効高さおよび鉄筋比で、二方向の鉄筋に対する平均値とする。

$\gamma_b$  : 一般に 1.3 としよ。

上記の設計式は、基本的にははりのせん断耐力算定式と同様の形式で表しており、既往のスラブおよびフーチングの押抜きせん断実験結果<sup>3), 4)</sup>を基に

(自由縁から離れている場合)



(自由縁に近い場合)

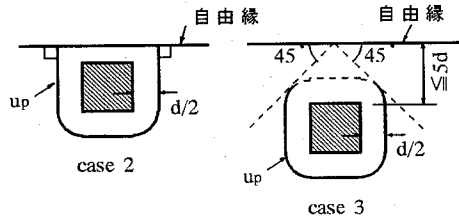


図-2 設計断面の取り方

して得られたものである<sup>5)</sup>。設計式による適合性は、回帰で用いた実験結果に対して、実験値/計算値の平均が 1.033、標準偏差/平均値が 0.159 となっている。

一方、載荷面が自由縁または開口部に近い場合に対しては、スラブ中央部に載荷する場合に比べて耐力が低下することから  $u_p$  (設計断面の周長を表している) を減少させることによって考慮されている。 $u_p$  の算定にあたっては、1978 年の CEB/FIP モデルコード<sup>6)</sup>に準拠して定められており、自由縁に近い場合は図-2 に示す case1 から case3 の最も小さいものを採用することとしている。

なお、1990 年の CEB/FIP モデルコード<sup>7)</sup>では、上記の case3 が削除され、設計断面は載荷面から  $2d$  離れた位置に取ることに変更されたが、自由縁の影響については基本的には概ね同様の考え方が採用されており、設計断面は case1, case2 のいずれかの小さい方をとることとなっている。また、1989 年の ACI318<sup>8)</sup>では載荷面から  $d/2$  離れた位置、Eurocode 2<sup>9)</sup>では  $1.5d$  離れた位置に設計断面を取っているが、自由縁の影響については同様な規定となっている。

### 3. 押抜きせん断試験の概要

本研究で用いる実験結果の概要を以下に示す。供試体は、図-3 に示すように相対する二辺が単純支持された鉄筋コンクリートスラブである。実験変数は、表-1 に示すように主としてスラブの寸法(幅、支間および厚さ)と載荷状態(位置および分布形状)

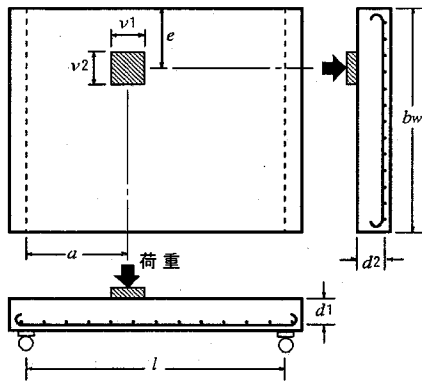


図-3 供試体

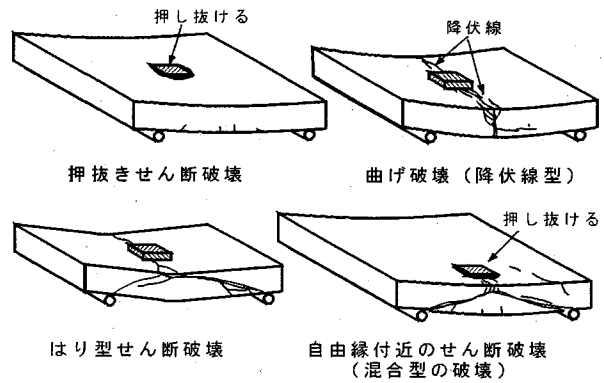


図-4 破壊状況

表-1 供試体寸法および破壊荷重

No	記号	支間 (cm) <i>l</i>	全幅 (cm) <i>b<sub>w</sub></i>	厚さ (cm) <i>h</i>	有効高 (cm)		載荷面				鉄筋比 (%)		注1) 降伏 強度 MPa	注2) 圧縮 強度 MPa	破壊 荷重 kN	注3) 形 式
					主 <i>d<sub>1</sub></i>	配力 <i>d<sub>2</sub></i>	幅 (cm)		距離 (cm)		主 <i>p<sub>1</sub></i>	配力 <i>p<sub>2</sub></i>				
							<i>v<sub>1</sub></i>	<i>v<sub>2</sub></i>	<i>a</i>	<i>e</i>						
1	H56-05	50	30	10	8.0	7.0	10.0	10.0	25.0	15.0	1.67	1.91	400	31.0	108	BM
2	H56-06	50	30	10	8.0	7.0	10.0	10.0	25.0	10.0	1.67	1.91	400	29.3	98	BM
3	H56-07	50	50	10	8.0	7.0	10.0	10.0	25.0	25.0	1.67	1.91	400	29.9	168	PS
4	H56-08	50	50	10	8.0	7.0	10.0	10.0	25.0	17.5	1.67	1.91	400	29.9	141	PS
5	H56-09	50	50	10	8.0	7.0	10.0	10.0	25.0	10.0	1.67	1.91	400	30.3	102	PS
6	H56-10	50	70	10	8.0	7.0	10.0	10.0	25.0	35.0	1.67	1.91	400	33.0	183	PS
7	H56-11	50	70	10	8.0	7.0	10.0	10.0	25.0	22.5	1.67	1.91	400	33.0	152	PS
8	H56-12	50	70	10	8.0	7.0	10.0	10.0	25.0	10.0	1.67	1.91	400	33.0	110	PS
9	H56-13	50	100	10	8.0	7.0	10.0	10.0	25.0	50.0	1.67	1.91	400	31.7	199	PS
10	H56-14	50	100	10	8.0	7.0	10.0	10.0	25.0	40.0	1.67	1.91	400	28.6	174	PS
11	H56-15	50	100	10	8.0	7.0	10.0	10.0	25.0	30.0	1.67	1.91	400	26.9	180	PS
12	H56-16	50	100	10	8.0	7.0	10.0	10.0	25.0	20.0	1.67	1.91	400	28.2	160	PS
13	H56-17	50	100	10	8.0	7.0	10.0	10.0	25.0	10.0	1.67	1.91	400	31.1	129	PS
14	H56-18	100	50	10	8.0	7.0	10.0	10.0	50.0	25.0	1.67	1.91	400	31.0	85	BM
15	H56-19	100	50	10	8.0	7.0	10.0	10.0	50.0	10.0	1.67	1.91	400	28.4	82	PS
16	H56-20	100	70	10	8.0	7.0	10.0	10.0	50.0	35.0	1.67	1.91	400	30.1	124	BM
17	H56-21	100	70	10	8.0	7.0	10.0	10.0	50.0	10.0	1.67	1.91	400	37.3	93	PS
18	H56-22	100	100	10	8.0	7.0	10.0	10.0	50.0	50.0	1.67	1.91	400	32.0	175	PS
19	H56-23	100	100	10	8.0	7.0	10.0	10.0	50.0	10.0	1.67	1.91	400	27.2	88	PS
20	H56-24	100	140	10	8.0	7.0	10.0	10.0	50.0	70.0	1.67	1.91	400	34.5	214	PS
21	H56-25	100	140	10	8.0	7.0	10.0	10.0	50.0	55.0	1.67	1.91	400	30.4	184	PS
22	H56-26	100	140	10	8.0	7.0	10.0	10.0	50.0	40.0	1.67	1.91	400	29.0	174	PS
23	H56-27	100	140	10	8.0	7.0	10.0	10.0	50.0	25.0	1.67	1.91	400	31.5	140	PS
24	H56-28	100	140	10	8.0	7.0	10.0	10.0	50.0	10.0	1.67	1.91	400	27.2	96	PS
25	H56-29	100	140	20	18.0	17.0	10.0	10.0	50.0	40.0	1.13	1.20	400	36.5	431	PS
26	H56-30	100	140	20	18.0	17.0	10.0	10.0	50.0	25.0	1.13	1.20	400	31.6	349	PS
27	H56-31	100	140	20	18.0	17.0	10.0	10.0	50.0	10.0	1.13	1.20	400	29.7	196	PS
28	H57-61	100	140	20	18.0	17.0	10.0	10.0	50.0	70.0	1.10	1.16	399	30.1	470	PS
29	H57-62	100	140	20	18.0	17.0	10.0	10.0	50.0	60.0	1.10	1.16	399	31.5	503	PS
30	H57-63	100	140	20	18.0	17.0	10.0	10.0	50.0	45.0	1.10	1.16	399	30.7	444	PS
31	H57-64	100	140	20	18.0	17.0	10.0	10.0	50.0	30.0	1.10	1.16	399	30.1	372	PS
32	H57-65	100	140	20	18.0	17.0	10.0	10.0	50.0	15.0	1.10	1.16	399	30.5	270	PS
33	H57-66	100	120	20	18.0	17.0	10.0	10.0	50.0	60.0	1.10	1.16	399	33.5	478	PS
34	H57-67	100	120	20	18.0	17.0	10.0	10.0	50.0	45.0	1.10	1.16	399	34.8	458	PS
35	H57-68	100	120	20	18.0	17.0	10.0	10.0	50.0	30.0	1.10	1.16	399	35.9	418	PB
36	H57-69	100	120	20	18.0	17.0	10.0	10.0	50.0	15.0	1.10	1.16	399	32.3	255	PB
37	H57-70	100	90	20	18.0	17.0	10.0	10.0	50.0	45.0	1.10	1.16	399	30.1	405	PS

38	H57-71	100	90	20	18.0	17.0	10.0	10.0	50.0	30.0	1.10	1.16	399	31.9	378	PB
39	H57-72	100	90	20	18.0	17.0	10.0	10.0	50.0	15.0	1.10	1.16	399	34.9	296	PB
40	H57-73	100	60	20	18.0	17.0	10.0	10.0	50.0	30.0	1.10	1.16	399	28.0	282	BS
41	H57-74	100	60	20	18.0	17.0	10.0	10.0	50.0	15.0	1.10	1.16	399	35.1	157	BS
42	H57-75	100	30	20	18.0	17.0	10.0	10.0	50.0	15.0	1.10	1.16	399	31.5	160	BS
43	G57-41	100	140	10	8.0	7.0	7.0	14.0	50.0	70.0	1.70	1.94	419	31.2	190	PS
44	G57-42	100	140	10	8.0	7.0	7.0	14.0	50.0	55.0	1.70	1.94	419	33.7	164	PS
45	G57-43	100	140	10	8.0	7.0	7.0	14.0	50.0	40.0	1.70	1.94	419	33.4	180	PS
46	G57-44	100	140	10	8.0	7.0	7.0	14.0	50.0	25.0	1.70	1.94	419	28.4	138	PS
47	G57-45	100	140	10	8.0	7.0	7.0	14.0	50.0	10.0	1.70	1.94	419	32.6	102	PS
48	G57-46	100	140	10	8.0	7.0	14.0	7.0	50.0	70.0	1.70	1.94	419	31.6	188	PS
49	G57-47	100	140	10	8.0	7.0	14.0	7.0	50.0	55.0	1.70	1.94	419	26.6	165	PS
50	G57-48	100	140	10	8.0	7.0	14.0	7.0	50.0	40.0	1.70	1.94	419	27.7	154	PS
51	G57-49	100	140	10	8.0	7.0	14.0	7.0	50.0	25.0	1.70	1.94	419	24.4	149	PS
52	G57-50	100	140	10	8.0	7.0	14.0	7.0	50.0	10.0	1.70	1.94	419	27.1	89	PS
53	G57-81	100	140	10	8.0	7.0	10.0	10.0	65.0	70.0	1.70	1.94	419	24.2	157	PS
54	G57-82	100	140	10	8.0	7.0	10.0	10.0	65.0	55.0	1.70	1.94	419	28.7	147	PS
55	G57-83	100	140	10	8.0	7.0	10.0	10.0	65.0	40.0	1.70	1.94	419	26.7	152	PS
56	G57-84	100	140	10	8.0	7.0	10.0	10.0	65.0	25.0	1.70	1.94	419	27.0	123	PS
57	G57-85	100	140	10	8.0	7.0	10.0	10.0	65.0	10.0	1.70	1.94	419	26.9	82	PS
58	G58-01	100	140	10	8.0	7.0	7.5	7.5	50.0	70.0	1.67	1.91	412	32.0	154	PS
59	G58-02	100	140	10	8.0	7.0	7.5	7.5	50.0	55.0	1.67	1.91	412	33.1	134	PS
60	G58-03	100	140	10	8.0	7.0	7.5	7.5	50.0	40.0	1.67	1.91	412	30.7	144	PS
61	G58-04	100	140	10	8.0	7.0	7.5	7.5	50.0	25.0	1.67	1.91	412	35.5	135	PS
62	G58-05	100	140	10	8.0	7.0	7.5	7.5	50.0	10.0	1.67	1.91	412	30.5	85	PS
63	G58-06	100	140	10	8.0	7.0	15.0	15.0	50.0	70.0	1.67	1.91	412	31.2	179	PS
64	G58-07	100	140	10	8.0	7.0	15.0	15.0	50.0	55.0	1.67	1.91	412	32.2	186	PS
65	G58-08	100	140	10	8.0	7.0	15.0	15.0	50.0	40.0	1.67	1.91	412	30.8	187	PS
66	G58-09	100	140	10	8.0	7.0	15.0	15.0	50.0	25.0	1.67	1.91	412	36.0	157	PS
67	G58-10	100	140	10	8.0	7.0	15.0	15.0	50.0	10.0	1.67	1.91	412	31.2	96	PS
68	G58-11	100	140	15	13.0	12.0	10.0	10.0	50.0	70.0	1.03	1.12	412	31.7	306	PS
69	G58-12	100	140	15	13.0	12.0	10.0	10.0	50.0	55.0	1.03	1.12	412	32.7	294	PS
70	G58-13	100	140	15	13.0	12.0	10.0	10.0	50.0	40.0	1.03	1.12	412	34.2	281	PS
71	G58-14	100	140	15	13.0	12.0	10.0	10.0	50.0	25.0	1.03	1.12	412	32.8	223	PS
72	G58-15	100	140	15	13.0	12.0	10.0	10.0	50.0	20.0	1.03	1.12	412	32.7	187	PS
73	G58-16	100	140	15	13.0	12.0	10.0	10.0	50.0	10.0	1.03	1.12	412	30.9	143	PS
74	G58-17	100	140	15	12.9	11.7	10.0	10.0	50.0	70.0	1.84	1.00	430	36.3	312	PS
75	G58-18	100	140	15	12.9	11.7	10.0	10.0	50.0	55.0	1.84	1.00	430	33.6	306	PS
76	G58-19	100	140	15	12.9	11.7	10.0	10.0	50.0	40.0	1.84	1.00	430	28.2	278	PS
77	G58-20	100	140	15	12.9	11.7	10.0	10.0	50.0	25.0	1.84	1.00	430	31.7	236	PS
78	G58-21	100	140	15	12.9	11.7	10.0	10.0	50.0	10.0	1.84	1.00	430	30.8	152	PS
79	G60-04	70	90	15	12.9	11.6	10.0	10.0	35.0	45.0	1.55	1.72	402	29.2	302	PS
80	G60-07	70	90	15	12.9	11.6	10.0	10.0	35.0	30.0	1.55	1.72	402	29.5	335	PS
81	G60-10	70	90	15	12.9	11.6	10.0	10.0	35.0	30.0	1.55	1.72	402	21.8	258	PS
82	G60-13	70	90	15	12.9	11.6	10.0	10.0	35.0	6.0	1.55	1.72	402	28.0	103	PS
83	G60-16	70	15	15	12.9	11.6	10.0	10.0	35.0	7.5	1.55	1.72	402	23.6	50	BS
84	G60-19	70	30	15	12.9	11.6	10.0	10.0	35.0	15.0	1.55	1.72	402	23.6	109	BS
85	G60-22	70	45	15	12.9	11.6	10.0	10.0	35.0	22.5	1.55	1.72	402	28.5	162	BS
86	G60-25	70	60	15	12.9	11.6	10.0	10.0	35.0	30.0	1.55	1.72	402	28.5	230	PB

注 1) 鉄筋の降伏強度 注 2) コンクリートの圧縮強度

注 3) 破壊形式 (BM: 曲げ破壊, PS: 押抜きせん断破壊, PB: 曲げと押抜きの混合型破壊, BS: はり型のせん断破壊)

である。また、表-1には供試体の材料特性と破壊荷重もあわせて示した。供試体に使用されたコンクリートの圧縮強度は 21.8～37.3MPa で、鉄筋は熱間圧延異形棒鋼 SD345 (降伏点は 400～429MPa) の D10 と D13 である。主鉄筋は端部でフックにより定着させ、配力鉄筋は最も外側の主鉄筋に掛けて定着させた。実験に際して、スラブ供試体は幅 10 cm×厚さ 1cm の鋼板を介して丸鋼棒で支持されて

おり、支承端部での浮き上がりは自由としている。載荷は、厚さ 3cm の鋼板をスラブ上面に密着させて行われた。

なお、表に示した破壊モードは、実験終了後に破壊面などの観察によって判定されたものである。その破壊状況は、図-4に示すような押抜きせん断破壊、降伏線型の曲げ破壊、はりに類似したせん断破壊、あるいはそれらの混合型の破壊 (押抜けるピラ

ミッド状のコンクリートの1部が自由縁によって断ち切れ斜めひび割れが自由縁に現れる)などが観察された。ここでいう"はりに類似したせん断破壊"とは、スラブ幅の小さなものに多くみられ、はりのように斜めひび割れが両側面に現れ破壊するような形式である。また、この場合せん断スパン比の小さなスラブでは、ディープビームにみられるせん断圧縮破壊に類似した破壊と考えられる。

#### 4. RCスラブの終局耐力に対する検討

##### (1) 曲げ破壊したRCスラブの耐力評価

全供試体86体のうち、4体が引張鉄筋の降伏が先行して破壊に至った。これらの破壊は、一般に降伏線型破壊といわれており、鉄筋の降伏が始まってからも耐力がいくらか上昇し大きな変形をもたらす。この場合は、降伏線が載荷点を含むスラブ全幅に生じるメカニズムで破壊が起こったので、全幅を用いて終局曲げ耐力を算定した。なお、算定にあたっては載荷面を考慮しても算定値に与える影響が小さいので、点載荷として計算を行った。その結果、曲げ破壊した4体のスラブは以下の耐力算定値を得た。

H56-05	89.57 kN (1.21)
H56-06	88.89 kN (1.10)
H56-18	74.67 kN (1.14)
H56-20	104.1 kN (1.19)

上記の耐力算定値は、H56-20は押抜きせん断耐力とほぼ同じ値となったが、その他の3つは押抜きせん断耐力よりも小さく、実測値の曲げ破壊荷重に対してやや安全側の評価が得られた。なお、( )内の数値は実験値を算定値で除したものである。一般に実際の終局曲げ耐力は、降伏線理論から求められる崩壊荷重を上回ることが知られており、本実験においても妥当な結果となっている。以下では、これらの4つのスラブを除いたものについて、せん断耐力の評価に対して検討を行う。

##### (2) 自由縁附近に載荷されたスラブの押抜きせん断耐力

スラブに作用する荷重の位置が自由縁に近づいていくと、破壊面が自由縁で断ち切られることによって押抜きせん断耐力が小さくなることが知られている<sup>2)</sup>。図-5は、幅の異なるスラブについて、載荷位置と押抜きせん断耐力の関係を示したもので、横軸には載荷位置を表すパラメータとして  $e/a$  を用いている(記号の定義は図-3参照)。図において、実測された押抜きせん断耐力は、圧縮強度が30

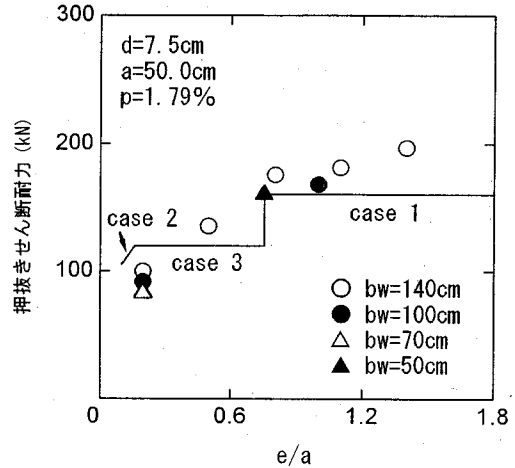


図-5 押抜きせん断耐力に与える自由縁の影響

MPaのときの耐力に換算(実測値に $\sqrt{30/f_c}$ を乗じた)してプロットした。また、実線は式(3)による示方書の押抜きせん断耐力算定値を表しているが、実験値との適合性をみるため部材係数 $\gamma_b = 1.0$ としている。なお、case1からcase3は図-2の3種類の $u_p$ のうち最小値となるものを表す。これによると、 $e/a$ が小さくなるにつれて実測された耐力は徐々に小さくなっていく傾向がある。示方書によれば、載荷面の辺から自由縁までの距離 $e'$ ( $= e - v_2/2$ )の大きさが $5d$ 以下のときにおいて $u_p$ を不連続に減少(case1からcase3へ移行)させているが、実際には連続的に変化している。そのため、載荷面が自由縁にそれ程近くない場合は算定値が安全側となっている。また、荷重が自由縁に近い場合にはcase2の $u_p$ を用いているにもかかわらず危険側となることが示された。このように、自由縁附近の押抜きせん断耐力に対して、 $u_p$ のみによって耐力低下を考慮することは定性的にも定量的にも異なった性質を示しており、合理的な方法とはいえないことがわかる。なお、実験による破壊形式においてもcase3のような破壊面は観察されていない。

そこで、設計断面の長さ $u_p$ として実際の性状と合わないcase3を除外し、case1またはcase2のうち短い方をとることとした。また、自由縁の影響による耐力の低下は、 $u_p$ が減少する他にせん断強度 $f_{pcd}$ も減少することが考えられる。そこで、せん断強度の低下を調べるため、低減係数 $\alpha$ を設けて、押抜きせん断による破壊荷重を次式のように定義した。

$$\text{破壊荷重} = \beta_d \cdot \beta_b \cdot \beta_r \cdot f_p \cdot u_p \cdot d \quad (5)$$

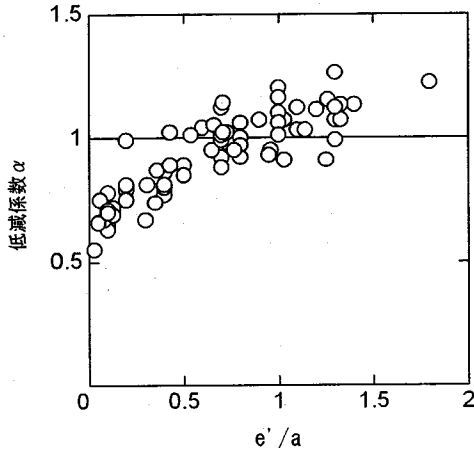


図-6 自由縁附近載荷によるせん断強度の低下

ここに  $f_p = \alpha \cdot 0.19 \sqrt{f_c'} \quad (\text{MPa})$   
 $f_c'$  : 実測コンクリート圧縮強度 (MPa)  
 $\alpha$  : せん断強度の低減係数

図-6は、 $\alpha$ と自由縁附近載荷のパラメータである  $e'/a$  との関係を表したものである。なお、ここで用いたスラブは、実験において押抜きせん断破壊したもので、はり型のせん断破壊および混合型の破壊と判定されたものは除外した。これによれば、荷重が自由縁からかなり離れた位置において既にせん断強度が減少することとなっている。このことは、荷重が自由縁から十分に離れているときに通常の押抜きせん断耐力が得られるのに対して、荷重が自由縁に近づけばせん断強度が減少して耐力が低下していく。さらに、荷重が自由縁のごく近傍に作用した場合には、せん断強度の減少と  $u_p$  の減少 (case2 に相当する) の両者によって耐力の著しい低下が起こることになる。なお、 $e'/a$  のほかに  $e'/h$  などの影響についても検討を行ったが、 $e'/a$  の影響を考慮すれば、他の因子の影響は実験値のばらつきのため分解できない程度のものであった。結局、低減係数  $\alpha$  は、回帰によって次式が得られた。

$$\begin{aligned} \alpha &= 0.64 + 0.46 e'/a & (e'/a \leq 0.78) \\ \alpha &= 1.0 & (e'/a > 0.78) \end{aligned} \quad (6)$$

ここに、 $e'$  : 載荷面端辺から自由縁までの距離

式(6)の低減係数  $\alpha$  を用いた押抜きせん断耐力の

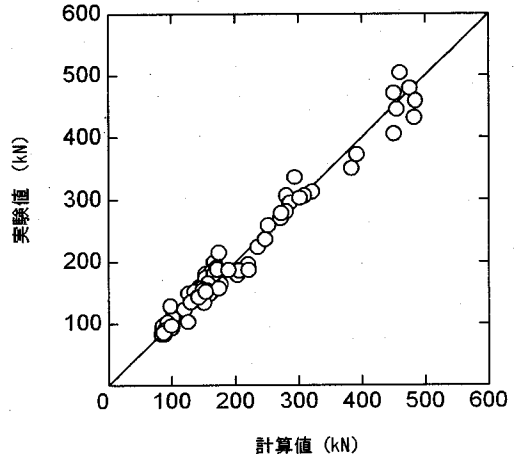


図-7 押抜きせん断耐力

計算値と実験値の比較を図-7に示す。この結果、対象としたスラブ71体に対して、実験値/計算値の平均は1.01で、変動係数は9.1%となった。

### (3) はりとしてのせん断耐力による評価

前節で示した  $\alpha$  は、相対する二辺が単純支持されたスラブに対するもので、任意の支持条件については別途実験等により調査しなければならない。そこで、これに代わる方法としてはりとしてのせん断耐力を用いる方法について検討を行った。すなわち、前述の実験では、スラブの幅が十分に大きければ完全な押抜きせん断破壊が起こるのに対し、スラブ幅が十分に小さければはり型のせん断破壊となる。そこで、(2)では両者の中間的な破壊を不完全な押抜きせん断破壊として取り扱ったが、同様に不完全な(全幅有効でない)はり型せん断破壊として取り扱うことも可能であると考えられるからである。スラブをはりとして考えた場合、載荷幅に対して有効な部材幅がどの程度となるかが問題である。一方向スラブの場合は、曲げに対する有効幅が示方書によって規定されているが、せん断に対しては明確なものがない。本研究では、はりとしてのせん断耐力を検討する上で、図-1に示した曲げに対する有効幅をそのまま用いることとした。なお、ここで用いるせん断耐力式は、示方書における棒部材およびディーブビームの設計せん断強度式の原式である式(7)と式(8)を用いることとした。

$$V_c = 0.20 (p_w f_c')^{1/3} d^{-1/4} (0.75 + \frac{1.4}{a/d}) b_w d \quad (7)$$

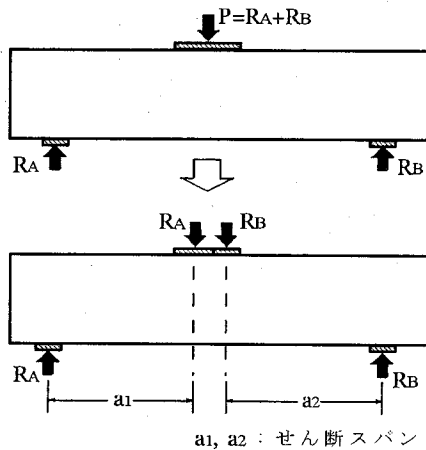


図-8 せん断スパンの定義

ここに  $b_w$  : 腹部の幅  
 $d$  : 有効高さ  
 $p_w = 100A_s / (b_w \cdot d)$   
 $A_s$  : 引張側鋼材の断面積  
 $f_c'$  : コンクリート圧縮強度 (MPa)

上式は、二羽ら<sup>10)</sup>によって軸方向鉄筋比の影響と寸法効果の影響とを再評価された鉄筋コンクリートはりのせん断耐力度式で、斜め引張破壊する場合について整理されたものである。

$$V_{wd} = \frac{0.24f_c'^{2/3} (1 + \sqrt{p_w})(1 + 3.33r/d)}{1 + (a/d)^2} b_w \cdot d \quad (8)$$

ここに、 $r$  : 支圧板幅

上式は、二羽<sup>11)</sup>によってタイドアーチモデルを基本として形づくられたものでディーブビームのせん断耐力を表している。

以上の両式によって計算される値の大きい方を、各スラブに対するはり型せん断破壊の耐力値とした。ただし、はりの実験では一般に対称2点荷重が用いられているのに対し、本研究の実験データは全て1点集中荷重であり、また支圧板幅と載荷板幅の異なるケースが多い。そのため、ディーブビームのせん断耐力の算定にあたっては、せん断スパンの取り方に対して図-8に示すような仮定を行った。このように仮定することによって、載荷板が大きいことによる耐力増加にも対処することができる。しかしながら、この考え方は暫定的なものであって、載荷板

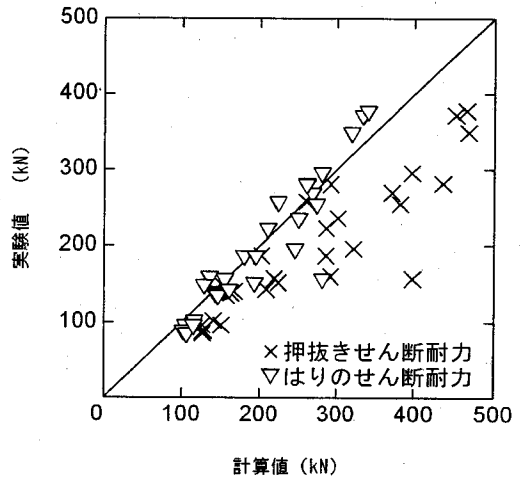


図-9.1 はりのせん断耐力とした場合

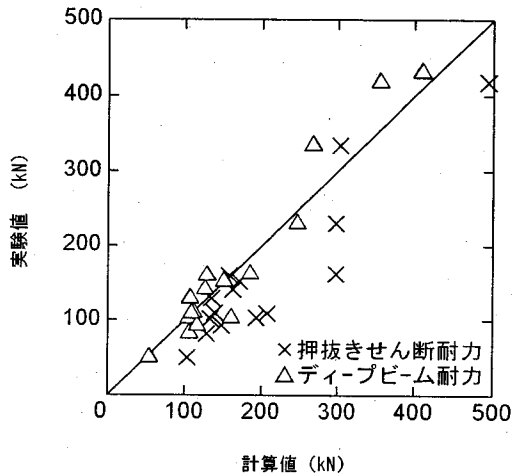


図-9.2 ディーブビームのせん断耐力とした場合

の大きさが変化することによってタイドアーチ機構がどのように変化するかは、今後検討の必要があると思われる。

なお、ここでは前節で示したように、自由縁の影響によってせん断強度が低下したスラブ ( $e'/a \leq 0.78$ ) を対象として検討を行った。図-9.1と図-9.2は、それぞれ上記の式(7)と式(8)を用いたはり型せん断耐力が押抜きせん断耐力よりも下回るものを抜き出して示したものである。図にはそれぞれのスラブの押抜きせん断耐力(低減係数 $\alpha$ を用いない)を $\times$ 印で示したが、それらと比較して有効幅を用いたはり型のせん断耐力がかなり良い適合性があることが示された。

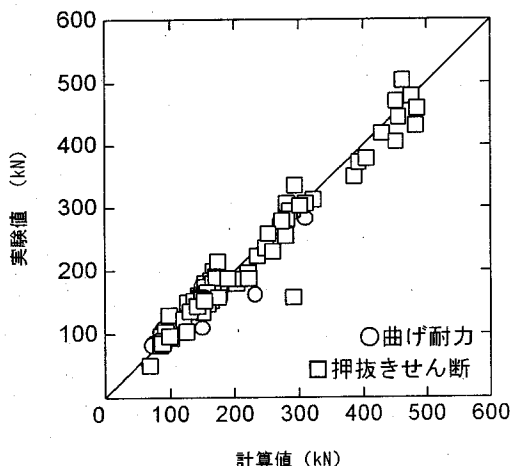


図-10.1 スラブの終局耐力(手法A)

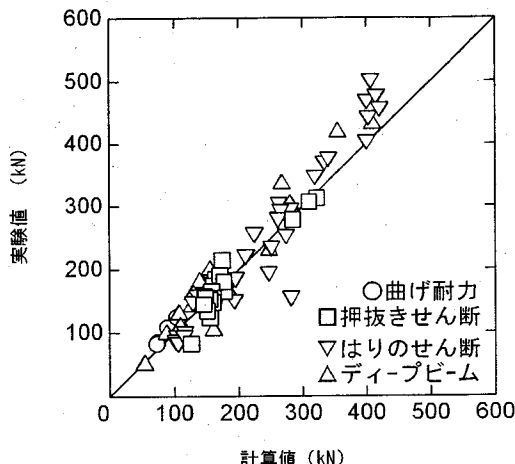


図-10.2 スラブの終局耐力(手法B)

この結果から、押抜きせん断破壊と見られるスラブにおいても、荷重が自由縁に近い場合には有効幅を用いたはり型のせん断耐力としての適用が可能であると考えられる。

#### (4) スラブの終局耐力に対する評価法の提案

これまでに得られた結果より、RCスラブの終局耐力を評価する方法を整理すると以下ようになる。

- ・曲げ破壊に対して
  - ①降伏線型の曲げ終局耐力
- ・せん断破壊に対して
  - ②通常の押抜きせん断耐力 (case1 の設計断面；自由縁による影響なし)
  - ③ case1 または case2 による設計断面を用い、自由縁附近荷の影響を低減係数で考慮する押抜きせん断耐力
  - ④曲げに対する有効幅を用いたはり型せん断耐力 (はりあるいはディープビームのせん断耐力の大きい方をとる)

手法Aとして、上記①②③の最小値の耐力をスラブの終局耐力とする。手法Bとして、上記①②④の最小値の耐力をスラブの終局耐力とする。全てのスラブについて、手法Aと手法Bによる結果を示したものが図-10.1と図-10.2である。この結果、手法Aによる実験値/計算値の平均値は1.01で変動係数8.5%となり、手法Bによる平均値は1.03で変動係数は14.0%となった。

この結果より、いずれの手法を用いても評価が可能であることが示されたが、手法Bのはり型せん断耐力算定に用いる有効幅は、弾性解に基づいているので任意の支持条件に拡張しやすい利点を持ってい

る。従って、実用的には手法Bを用いて終局耐力を評価することが妥当であると考えられる。

#### 5. まとめ

相対する二辺が単純支持されたRCスラブの押抜きせん断実験の結果をもとに、終局耐力について検討した結果、以下のことが明らかになった。

1. スラブの実験結果から、荷重位置が自由縁に近づくにつれて耐力が減少することが確認された。
2. 示方書の設計押抜きせん断強度において、設計断面の減少による方法では、荷重位置が自由縁に近いとき、実験値に対して危険側となる場合があることが示された。
3. 荷重面の端辺から自由縁までの距離が有効高さの5倍以下のときに、自由縁から設計断面への接線が45°に接する内側を有効としない方法 (case3) は、実験結果と比較して定性的にも定量的にも異なるものとなった。
4. 設計断面の長さは、case3による方法を取り除き、自由縁附近荷の影響を考慮した低減係数を導入することにより、押抜きせん断耐力の評価が良好となることを示した。
5. 上記の方法にかわり、自由縁附近荷の場合は、曲げに対する有効幅を用いたはりあるいはディープビームとしてのせん断耐力が、スラブの終局耐力に良い適合性があることを示した。
6. 実用的な終局耐力の評価法として、曲げ耐力、はりとしてのせん断耐力 (有効幅を用い、はりあるいはディープビームのせん断耐力値の大きい方) および押抜きせん断耐力 (設計断面として case3 を除



く)の最小値によって評価する方法を提案した。

謝辞：本論文の作成にあたり、多数の実験を遂行していただいた当時の北海道大学工学部および北海学園大学工学部の卒論学生諸氏に多大なご協力を得た。ここに記して謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) コンクリート標準示方書【平成3年版】設計編，土木学会，1991年3月。
- 2) 高橋義裕，角田与史雄：RCスラブの押抜きせん断耐力に対する自由縁の影響について，第5回コンクリート工学年次講演会講演論文集，pp.273-276，1983年6月。
- 3) 角田与史雄，井藤昭夫，藤田嘉夫：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，土木学会論文集，第229号，pp.105-115，1974年9月。
- 4) Vanderbilt, M.D. : Shear Strength of Continuous Plate, proceedings of ASCE, ST 5, May 1972.
- 5) コンクリート標準示方書(昭和61年制定)改訂資料，土木学会コンクリートライブラリー，第61号，1986年10月。
- 6) CEB-FIP Model Code for Concrete Structures, CEB, 1978.
- 7) CEB-FIP Model Code 1990, CEB, 1990.
- 8) Building Code Requirements for Reinforced Concrete (ACI 318M-89) and Commentary-ACI 318Rm-89, ACI, 1989.
- 9) Eurocode 2-1: Design of concrete structures - Part 1: General rules and rules for buildings, 1991.
- 10) 二羽淳一郎，山田一宇，横沢和夫，岡村 甫：せん断補強鉄筋を用いないRCはりのせん断強度式の再評価，土木学会論文集，第372号/V-5，pp.167-176，1986年8月。
- 11) 二羽淳一郎：FEM解析に基づくディープビームのせん断耐荷力算定式，第2回RC構造のせん断問題に関する解析的研究に関するコロキウム論文集，pp.119-128，1983年10月。

(1995. 6. 13 受付)

## STUDY ON PRACTICAL DESIGN METHOD FOR SHEAR OF REINFORCED CONCRETE SLABS LOADED NEAR FREE EDGE

Hitoshi FURUUCHI, Yoshihiro TAKAHASHI and Yoshio KAKUTA

The punching shear strength of reinforced concrete slabs decreases when a load is applied near the free edge. In the JSCE Standard Specification for Design and Construction of Concrete Structures, the diminution of the strength is considered by shortening of the length of the critical section which resists to punching shear. This study reveals that the above method is insufficient to consider the effect of free edge based on the test of simply supported slabs with free edges. The method evaluating the ultimate shear strength in such case is discussed and two practical design methods are proposed; the method considering the shortening of the length of the critical section as well as the decrease of the punching shear strength per unit length of the critical section, and the method applying beam shear strength to the effective width of the slab.