

矩形開口部をもつプレストレストコンクリート梁の 終局強度に関する研究

本 岡 順 二 郎*
中 山 優**

1. ま え が き

PC 梁にダクト用開口部を設ける要求は多いが、これに関する規定はない。

開口部の設計には弾性時の応力状態、開口周辺の応力集中、開口部の強度と変形および補強法などが問題となるが、梁の破壊を開口部で生ぜしめないことが最も重要であると考え、本論では梁端部近傍に開口部が存在するときの終局強度を目的とする実験と解析を行った。

試験体は梁端近傍に矩形開口をもつ片持梁形式とし、漸増正負繰返し集中荷重を行った。

実験の結果、梁は 1) 材端に生ずる曲げ破壊、2) 開口部圧縮弦材に生ずる曲げ破壊、3) 開口部圧縮弦材に生ずるせん断破壊、のいずれかで終局強度に達した。

したがって、任意開口部をもつ梁について上記3通りの終局荷重を求めれば、このうち最も低い荷重となる破壊形式が実際に起こる破壊となる。また、前記 1) の終局荷重が最も低くなるように開口位置と形状を選定すれば、破壊は材端部に生ずるから無開口と同じ耐力をもつこととなる。

開口部の圧縮弦材に生ずる前記 2) および 3) の終局

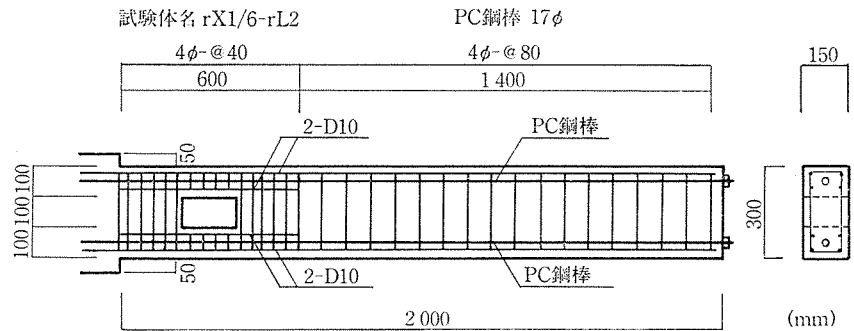


図-1 試験体配筋例

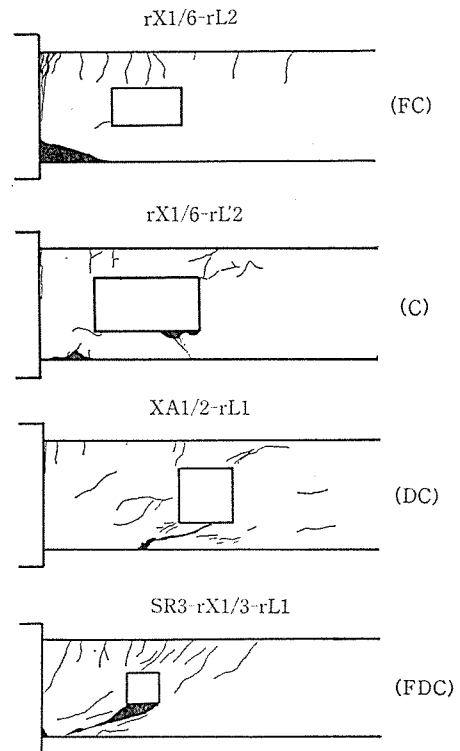


図-2 破壊モード

強度を外力による軸圧縮力とプレストレス力による圧縮力を受ける柱材として求め、このときのせん断力と引張弦材の負担せん断力の和が全せん断力となることから終局荷重を求めた。この計算値は各破壊形式に対して実験



* Junjiro MOTOOKA
日本大学理工学部教授、工博



** Yasashi NAKAYAMA
日本大学理工学部助手

表—1 試験体諸元

試験体名	PC 鋼 棒				※1 P_e (t)	主 筋		開口補強筋		あばら筋			コン σ_B (kg/cm ²)	
	s^{σ_t} (cm ²)	s^{σ_y} (kg/cm ²)	s^{σ_u} (kg/cm ²)	$E 10^6$ (kg/cm ²)		r^{σ_t} (cm ²)	r^{σ_y} (kg/cm ²)	r^{σ_t} (cm ²)	r^{σ_y} (kg/cm ²)	r^{σ_t} (cm ²)	S (cm)	P_w (%)		
SR 3-rH 1/3-rL 1	2.27	C種	11 700	12 700	2.10	35.855	1.43	3 490	1.43	3 490	0.13	4	0.4	341.8
SR 3-rH 1/3-rL 2	2.27	C種	11 700	12 700	2.10	35.855	1.43	3 490	1.43	3 490	0.13	4	0.4	399.2
SR 3-rH 1/3-rL 3	2.27	C種	11 700	12 700	2.10	35.855	1.43	3 490	1.43	3 490	0.13	4	0.4	380.0
SR 3-rH 1/2-rL 1	2.27	C種	11 700	12 700	2.10	35.855	1.43	3 490	1.43	3 490	0.13	4	0.4	440.3
SR 3-rH 1/2-rL 2	2.27	C種	11 700	12 700	2.10	35.855	1.43	3 490	1.43	3 490	0.13	4	0.4	341.8
SR 3-rH 1/2-rL 3	2.27	C種	11 700	12 700	2.10	35.855	1.43	3 490	1.43	3 490	0.13	4	0.4	399.2
SR 6-rH 1/3-rL 1	2.27	C種	11 700	12 700	2.10	35.855	1.43	3 490	1.43	3 490	0.13	4	0.4	341.8
SR 6-rH 1/3-rL 2	2.27	C種	11 700	12 700	2.10	35.855	1.43	3 490	1.43	3 490	0.13	4	0.4	399.2
SR 6-rH 1/3-rL 3	2.27	C種	11 700	12 700	2.10	35.855	1.43	3 490	1.43	3 490	0.13	4	0.4	380.0
SR 6-rH 1/2-rL 1	2.27	C種	11 700	12 700	2.10	35.855	1.43	3 490	1.43	3 490	0.13	4	0.4	341.8
SR 6-rH 1/2-rL 2	2.27	C種	11 700	12 700	2.10	35.855	1.43	3 490	1.43	3 490	0.13	4	0.4	399.2
SR 6-rH 1/2-rL 3	2.27	C種	11 700	12 700	2.10	35.855	1.43	3 490	1.43	3 490	0.13	4	0.4	380.0
rX 1/3-rL 1	2.27	C種	11 700	12 700	2.10	35.855	1.43	3 490	1.43	3 490	0.13	4	0.4	341.8
rX 1/3-rL 2	2.27	C種	11 700	12 700	2.10	35.855	1.43	3 490	1.43	3 490	0.13	4	0.4	399.2
rX 1/3-rL 3	2.27	C種	11 700	12 700	2.10	35.855	1.43	3 490	1.43	3 490	0.13	4	0.4	341.8
rX 1/6-rL 1	2.27	C種	11 700	12 700	2.10	35.855	1.43	3 490	1.43	3 490	0.13	4	0.4	399.2
rX 1/6-rL 2	2.27	C種	11 700	12 700	2.10	35.855	1.43	3 490	1.43	3 490	0.13	4	0.4	380.0
rX 1/6-rL 3	2.27	C種	11 700	12 700	2.10	35.855	1.43	3 490	1.43	3 490	0.13	4	0.4	440.3
rX 1/3-rL 1	2.27	C種	11 700	12 700	2.10	35.855	1.43	3 490	1.43	3 490	0.13	4	0.4	449.7
rX 1/3-rL 2	2.27	C種	11 700	12 700	2.10	35.855	1.43	3 490	1.43	3 490	0.13	4	0.4	449.7
rX 1/3-rL 3	2.27	C種	11 700	12 700	2.10	35.855	1.43	3 490	1.43	3 490	0.13	4	0.4	449.7
rX 1/6-rL 1	2.27	C種	11 700	12 700	2.10	35.855	1.43	3 490	1.43	3 490	0.13	4	0.4	449.7
rX 1/6-rL 2	2.27	C種	11 700	12 700	2.10	35.855	1.43	3 490	1.43	3 490	0.13	4	0.4	449.7
rX 1/6-rL 3	2.27	C種	11 700	12 700	2.10	36.855	1.43	3 490	1.43	3 490	0.13	4	0.4	449.7
XA 1/3-rL 1	2.27	C種	12 000	13 000	2.02	36.774	1.43	4 038	1.43	4 038	0.13	4	0.4	386.0
XA 1/3-rL 2	2.27	C種	12 000	13 000	2.02	36.774	1.43	4 038	1.43	4 038	0.13	4	0.4	386.0
XA 1/3-rL 3	2.27	C種	12 000	13 000	2.02	36.774	1.43	4 038	1.43	4 038	0.13	4	0.4	386.0
XA 1/2-rL 1	2.27	C種	12 000	13 000	2.02	36.774	1.43	4 038	1.43	4 038	0.13	4	0.4	328.2
XA 1/2-rL 2	2.27	C種	12 000	13 000	2.02	36.774	1.43	4 038	1.43	4 038	0.13	4	0.4	328.2
XA 1/2-rL 3	2.27	C種	12 000	13 000	2.02	36.774	1.43	4 038	1.43	4 038	0.13	4	0.4	328.2
OPw 0-rL 1	2.27	C種	12 000	13 000	2.02	36.774	1.43	4 038	1.43	4 038	—	—	0	406.8
OPw 0-rL 2	2.27	C種	12 000	13 000	2.02	36.774	1.43	4 038	1.43	4 038	—	—	0	406.8
OPw 0-rL 3	2.27	C種	12 000	13 000	2.02	36.774	1.43	4 038	1.43	4 038	—	—	0	406.8
OPw 0.8-rL 1	2.27	C種	12 000	13 000	2.02	36.774	1.43	4 038	1.43	4 038	0.13	2.5	0.8	380.9
OPw 0.8-rL 2	2.27	C種	12 000	13 000	2.02	36.774	1.43	4 038	1.43	4 038	0.13	2.5	0.8	380.9
OPw 0.8-rL 3	2.27	C種	12 000	13 000	2.02	36.774	1.43	4 038	1.43	4 038	0.13	2.5	0.8	380.9
OPw 1.2-rL 1	2.27	C種	12 000	13 000	2.02	36.774	1.43	4 038	1.43	4 038	0.28	3	1.2	434.8
OPw 1.2-rL 2	2.27	C種	12 000	13 000	2.02	36.774	1.43	4 038	1.43	4 038	0.28	3	1.2	434.8
OPw 1.2-rL 3	2.27	C種	12 000	13 000	2.02	36.774	1.43	4 038	1.43	4 038	0.28	3	1.2	434.8
OPt 0-rL 1	2.27	C種	12 000	13 000	2.02	36.774	1.43	4 038	0.00	0.00	0.13	4	0.4	371.1
OPt 0-rL 2	2.27	C種	12 000	13 000	2.02	36.774	1.43	4 038	0.00	0.00	0.13	4	0.4	371.1
OPt 0-rL 3	2.27	C種	12 000	13 000	2.02	36.774	1.43	4 038	0.00	0.00	0.13	4	0.4	371.1
OPt 2.5-rL 1	2.27	C種	12 000	13 000	2.02	36.774	1.43	4 038	2.86	4 038	0.13	4	0.4	337.6
OPt 2.5-rL 2	2.27	C種	12 000	13 000	2.02	36.774	1.43	4 038	2.86	4 038	0.13	4	0.4	337.6
OPt 2.5-rL 3	2.27	C種	12 000	13 000	2.02	36.774	1.43	4 038	2.86	4 038	0.13	4	0.4	337.6
q 0.1-rL 1	0.95	D種	14 000	14 900	2.08	17.955	1.43	4 038	1.43	4 038	0.13	4	0.4	295.1
q 0.1-rL 2	0.95	D種	14 000	14 900	2.08	17.955	1.43	4 038	1.43	4 038	0.13	4	0.4	295.1
q 0.1-rL 3	0.95	D種	14 000	14 900	2.08	17.955	1.43	4 038	1.43	4 038	0.13	4	0.4	295.1
q 0.15-rL 1	2.27	B種	10 500	12 500	2.06	32.177	1.43	4 038	1.43	4 038	0.13	4	0.4	414.1
q 0.15-rL 2	2.27	B種	10 500	12 500	2.06	32.177	1.43	4 038	1.43	4 038	0.13	4	0.4	414.1
q 0.15-rL 3	2.27	B種	10 500	12 500	2.06	32.177	1.43	4 038	1.43	4 038	0.13	4	0.4	414.1
rX 1/3-rL 4	2.27	C種	11 800	12 800	2.05	36.161	1.43	3 779	1.43	3 779	0.13	4	0.4	373.2
rX 1/3-rL 5	2.27	C種	11 800	12 800	2.05	36.161	1.43	3 779	1.43	3 779	0.13	4	0.4	373.2
rX 1/3-rL 6	2.27	C種	11 800	12 800	2.05	36.161	1.43	3 779	1.43	3 779	0.13	4	0.4	373.2
XN 0.85-rL 5	2.27	C種	11 800	12 800	2.05	36.161	1.43	3 779	1.43	3 779	0.13	4	0.4	294.9
XN 0.90-rL 5	2.27	C種	11 800	12 800	2.05	36.161	1.43	3 779	2.46	3 588	0.13	4	0.4	294.9
SR 3-rX 1/3-rL 1	2.27	C種	11 800	12 800	2.05	36.161	1.43	3 779	1.43	3 779	0.13	4	0.4	414.4
SR 3-rX 1/6-rL 1	2.27	C種	11 800	12 800	2.05	36.161	1.43	3 779	1.43	3 779	0.13	4	0.4	373.2
Fc 21-rL 1	1.327	C種	14 400	15 100	2.03	20.423	1.43	3 779	1.43	3 779	0.13	4	0.4	160.1
Fc 21-rL 2	1.327	C種	14 400	15 100	2.03	20.423	1.43	3 779	1.43	3 779	0.13	4	0.4	160.1
Fc 21-rL 3	1.327	C種	14 400	15 100	2.03	20.423	1.43	3 779	1.43	3 779	0.13	4	0.4	160.1

および実験結果

クリート		※2 X/a_r	a_r/D	λ_1	λ_2	α	h/D	L_0/D_0	モード (実験)	eP_u (t)	P_u (t)	MP_u (t)	QP_u (t)	eP_u
σ_t (kg/cm ²)	$E 10^5$ (kg/cm ²)										cP_u			cP_u
34.1	2.50	0	3	2.666	0.167	0.333	1/3	1	DC	8.90	9.57	8.03	9.19	1.11
37.7	2.80	0	3	2.333	0.333	0.333	1/3	2	DC	8.70	10.1	7.67	7.96	1.13
38.7	2.80	0	3	2.000	0.500	0.333	1/3	3	DC	7.90	9.95	6.60	7.10	1.20
42.9	2.90	0	3	2.500	0.250	0.250	1/2	2	DC	6.80	11.0	7.28	6.55	1.04
34.1	2.50	0	3	2.000	0.500	0.250	1/2	4	DC-C	4.90	10.1	4.59	5.07	1.07
37.7	2.80	0	3	1.500	0.750	0.250	1/2	6	C	4.40	10.7	4.24	5.27	1.04
34.1	2.50	0	6	5.666	1.666	0.333	1/3	1	FDC	4.80	4.34	4.34	6.47	1.11
37.7	2.80	0	6	5.333	0.333	0.333	1/3	2	FDC	4.90	5.06	4.39	6.10	1.12
38.7	2.80	0	6	5.000	0.500	0.333	1/3	3	FDC-C	4.70	4.97	3.98	5.76	1.18
34.1	2.50	0	6	5.500	0.250	0.250	1/2	2	DC	3.40	5.06	3.67	5.19	0.93
37.7	2.80	0	6	5.000	0.500	0.250	1/2	4	DC-C	4.10	5.34	3.43	4.71	1.20
38.7	2.80	0	6	4.500	0.750	0.250	1/2	6	C	3.30	5.26	2.86	4.71	1.15
34.1	2.50	1/3	6	3.750	0.250	0.250	1/2	2	FC	4.40	4.68	4.78	5.72	0.94
37.7	2.80	1/3	6	3.500	0.500	0.250	1/2	4	FC	4.70	4.89	4.15	4.96	1.13
34.1	2.50	1/3	6	3.250	0.750	0.250	1/2	6	C	3.50	4.68	2.98	4.82	1.17
37.7	2.80	1/6	6	4.750	0.250	0.250	1/2	2	FC	4.60	4.89	4.53	5.58	1.02
38.7	2.80	1/6	6	4.500	0.500	0.250	1/2	4	C	3.90	5.26	3.51	4.75	1.11
42.9	2.90	1/6	6	4.250	0.750	0.250	1/2	6	C	3.70	5.51	3.24	4.87	1.14
39.1	3.00	1/3	6	3.833	0.167	0.333	1/3	1	FC	4.30	4.82	7.07	8.32	0.89
39.1	3.00	1/3	6	3.667	0.333	0.333	1/3	2	FC	4.40	4.82	6.18	7.18	0.93
39.1	3.00	1/3	6	3.500	0.500	0.333	1/3	3	FC	4.50	4.82	5.49	6.56	0.94
39.1	3.00	1/6	6	4.833	0.167	0.333	1/3	1	FC	4.40	4.82	5.82	7.36	0.91
39.1	3.00	1/6	6	4.667	0.333	0.333	1/3	2	FC	4.70	4.82	5.21	6.56	0.94
39.1	3.00	1/6	6	4.500	0.500	0.333	1/3	3	FC	4.80	4.82	4.71	6.11	1.00
37.1	2.75	1/3	3	1.75	0.25	0.25	1/2	2	DC	6.80	10.0	8.48	6.77	1.00
37.1	2.75	1/3	3	1.50	0.5	0.25	1/2	4	C	5.35	11.0	5.87	5.38	0.99
37.1	2.75	1/3	3	1.25	0.75	0.25	1/2	6	C	4.16	11.0	4.49	5.38	0.93
32.5	2.55	1/2	3	1.25	0.25	0.25	1/2	2	DC	6.44	9.52	8.52	6.60	0.98
32.5	2.55	1/2	3	1	0.5	0.25	1/2	4	C	5.18	9.52	5.57	5.25	0.99
32.5	2.55	1/2	3	0.75	0.75	0.25	1/2	6	C	3.94	9.52	4.14	5.25	0.95
36.0	2.87	0	3	2.5	0.25	0.25	1/2	2	DC	5.00	11.2	7.28	5.65	0.88
36.0	2.87	0	3	2	0.5	0.25	1/2	4	DC	5.03	11.2	5.58	4.23	1.12
36.0	2.87	0	3	1.5	0.75	0.25	1/2	6	DC	3.75	11.2	4.53	4.23	0.89
38.1	2.70	0	3	2.5	0.25	0.25	1/2	2	DC	5.70	10.9	6.95	6.82	0.84
38.1	2.70	0	3	2	0.5	0.25	1/2	4	DC	5.30	10.9	5.29	5.73	1.00
38.1	2.70	0	3	1.5	0.75	0.25	1/2	6	C	4.05	10.9	4.28	5.78	0.95
36.8	2.91	0	3	2.5	0.25	0.25	1/2	2	DC	6.55	11.4	7.58	7.30	0.90
36.8	2.91	0	3	2	0.5	0.25	1/2	4	DC	6.05	11.4	5.82	6.18	1.04
36.8	2.91	0	3	1.5	0.75	0.25	1/2	6	C	4.59	11.4	4.73	6.26	0.97
34.0	2.79	0	3	2.5	0.25	0.25	1/2	2	DC	5.56	9.91	5.52	4.95	1.12
34.0	2.79	0	3	2	0.5	0.25	1/2	4	DC	4.86	9.91	4.10	4.36	1.19
34.0	2.79	0	3	1.5	0.75	0.25	1/2	6	C	3.59	9.91	3.26	4.38	1.10
35.3	2.55	0	3	2.5	0.25	0.25	1/2	2	DC	5.24	11.3	7.23	6.43	0.81
35.3	2.55	0	3	2	0.5	0.25	1/2	4	DC	4.99	11.3	5.63	5.27	0.95
35.3	2.55	0	3	1.5	0.75	0.25	1/2	6	C	4.21	11.3	4.61	5.31	0.91
25.3	2.31	0	3	2.5	0.25	0.25	1/2	2	DC	4.53	7.45	5.70	4.78	0.95
25.3	2.31	0	3	2	0.5	0.25	1/2	4	DC	4.05	7.45	4.52	3.88	1.04
25.3	2.31	0	3	1.5	0.75	0.25	1/2	6	C	3.26	7.45	3.74	3.92	0.87
40.8	2.87	0	3	2.5	0.25	0.25	1/2	2	DC	6.50	10.6	7.32	6.27	1.04
40.8	2.87	0	3	2	0.5	0.25	1/2	4	DC	5.63	10.6	5.65	5.08	1.11
40.8	2.87	0	3	1.5	0.75	0.25	1/2	6	C	4.51	10.6	4.60	5.12	0.98
37.2	2.80	1/3	6	3.333	0.667	0.333	1/3	4	FC	4.19	4.63	4.51	6.08	0.93
37.2	2.80	1/3	6	3.167	0.833	0.333	1/3	5	FC-C	4.13	4.63	4.10	5.95	1.01
37.2	2.80	1/3	6	3.000	1.000	0.333	1/3	6	FC-C	3.98	4.63	3.76	5.95	1.06
30.6	2.77	0	6	4.750	0.625	0.250	1/2	5	C	2.81	4.82	2.22	4.08	1.27
30.6	2.77	0	3	1.750	0.625	0.250	1/2	5	C	3.75	10.1	3.72	4.76	1.01
37.7	3.02	1/3	3	1.833	0.166	0.333	1/3	1	FDC	8.83	9.55	12.5	11.1	0.92
37.2	2.80	1/6	3	2.333	0.166	0.333	1/3	1	FDC	8.79	10.0	9.54	10.0	0.92
20.1	1.82	1/6	6	4.833	0.166	0.333	1/3	1	FC	2.98	2.77	2.91	—	1.08
20.1	1.82	1/6	6	4.667	0.333	0.333	1/3	2	FC	3.10	2.77	2.62	4.31	1.18
20.1	1.82	1/6	6	4.500	0.500	0.333	1/3	3	C	2.93	2.84	2.38	4.07	1.23

表—1 (つづき) 試験体諸元

試験体名	PC 鋼 棒				※1 P_e (t)	主 筋		開口補強筋		あばら筋			コン σ_B (kg/cm ²)	
	$s a_t$ cm ²	$s \sigma_y$ (kg/cm ²)	$s \sigma_u$ (kg/cm ²)	$E 10^6$ (kg/cm ²)		$r a_t$ (cm ²)	$r \sigma_y$ (kg/cm ²)	$r a_t$ (cm ²)	$r \sigma_y$ (kg/cm ²)	$r a_t$ (cm ²)	S (cm)	P_w (%)		
rq 0.4-rL1	2.27	C種	9 500	10 400	2.06	29.113	3.69	3 558	1.43	3 779	0.13	4	0.4	414.4
rq 0.4-rL2	2.27	C種	9 500	10 400	2.06	29.113	3.69	3 558	1.43	3 779	0.13	4	0.4	414.4
rq 0.4-rL3	2.27	C種	9 500	10 400	2.06	29.113	3.69	3 558	1.43	3 779	0.13	4	0.4	414.4
C11-rX1/6-rL/3	0.95	D種	14 700	15 100	2.03	▲19.336	1.43	3 699	1.43	3 699	0.13	4	0.4	438.43
C13-rX1/6-rL/3	1.33	D種	14 500	15 400	2.04	27.651	1.43	3 699	1.43	3 699	0.13	4	0.4	438.43
C17-rX1/6-rL/3	2.27	C種	11 900	12 800	2.05	47.866	1.43	3 699	1.43	3 699	0.13	4	0.4	438.43
C11-rX1/3-rL/3	0.95	D種	14 700	15 100	2.03	19.366	1.43	3 699	1.43	3 699	0.13	4	0.4	431.80
C13-rX1/3-rL/3	1.33	D種	14 500	15 400	2.04	27.651	1.43	3 699	1.43	3 699	0.13	4	0.4	431.80
C17-rX1/3-rL/3	2.27	C種	11 900	12 800	2.05	47.866	1.43	3 699	1.43	3 699	0.13	4	0.4	431.80
A23-rX1/6-rL4	4.16	A種	9 400	12 800	2.04	71.798	1.43	3 699	1.43	3 699	0.13	4	0.4	395.33
A'23-rX1/6-rL4	4.16	A種	9 400	12 800	2.04	○35.151	1.43	3 699	1.43	3 699	0.13	4	0.4	395.33
C13-rX1/6-rL2	1.33	D種	14 500	15 400	2.04	27.651	1.43	3 699	1.43	3 699	0.13	4	0.4	318.90
C13-rX1/6-rL3	1.33	D種	14 500	15 400	2.04	27.651	1.43	3 669	1.43	3 699	0.13	4	0.4	318.90
C13-rX1/6-rL2	1.33	D種	14 500	15 400	2.04	27.651	1.43	3 669	1.43	3 699	0.13	4	0.4	334.61
C11-rX1/6-rL/1	0.95	D種	14 700	15 100	2.03	19.366	1.43	3 669	1.43	3 699	0.13	4	0.4	334.61
C11-rX1/6-rL/2	0.95	D種	14 700	15 100	2.04	19.366	1.43	3 669	1.43	3 699	0.13	4	0.4	334.61
C11-rH1/2-rL2	0.95	D種	14 700	15 100	2.03	19.366	1.43	3 669	1.43	3 699	0.13	4	0.4	418.26
C11-rH1/2-rL3	0.95	D種	14 700	15 100	2.03	19.366	1.43	3 669	1.43	3 699	0.13	4	0.4	334.61
SR3-rX1/3-rL/2	0.95	D種	14 700	15 100	2.03	19.366	1.43	3 669	1.43	3 699	0.13	4	0.4	438.43
SR3-rX1/3-rL/3	0.95	D種	14 700	15 100	2.03	19.366	1.43	3 669	1.43	3 699	0.13	4	0.4	334.61
rX0-rL0	2.27	C種	11 700	12 700	2.09	35.855	1.43	3 490	—	—	0.13	4	0.4	449.70
SR3-rX0-rL0	2.27	C種	11 800	12 800	2.05	36.161	1.43	3 779	—	—	0.13	4	0.4	392.40

※1 有効プレストレス $0.9 \times 0.75 \times s a_t \times s \sigma_y$
 ▲以後は、 $0.9 \times 0.75 \times s a_t \times s \sigma_u$
 ○は、 $0.9 \times 0.5 \times s a_t \times s \sigma_y$

値とよい一致を示した。

2. 実 験

2.1 試験体諸元

試験体はすべて幅 15 cm, せい 30 cm の長方形断面で図—1 の配筋例に示すように PC 鋼棒上下 2 本でプレストレスが与えてある。開口位置, 寸法および配筋量などの試験体諸元は表—1 に示す。

2.2 実験結果

梁は要因により種々の破壊形態を示すが, モードとしては以下の 4 タイプに分類した。図—2 に代表例 (一方荷重に対応するひびわれを示す) を示す。

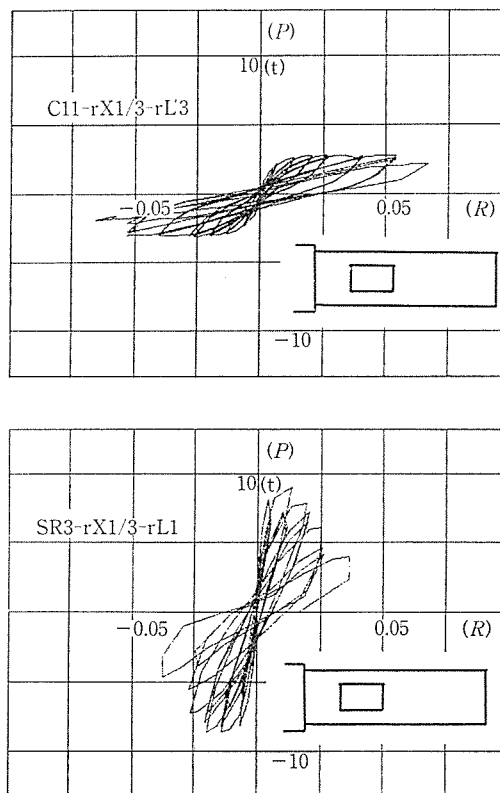
[破壊モード FC] 鋼材が降伏後にコンクリートが圧壊するいわゆる曲げ破壊で, 最大荷重以後の耐力低下が小さい。

[C] 曲げ降伏前に圧縮弦材の端部が曲げ破壊し, 耐力低下を生ずる。

[DC] 曲げ降伏前に圧縮弦材がせん断破壊し, 急激な耐力低下をきたす。靱性は最も低い。

[FDC] 曲げ降伏後開口部の圧縮弦材にせん断ひびわれが生じ, 急激な耐力低下を生ずる。

靱性は本論の範囲外であるが, 荷重変形曲線の一例を図—3 に示す。



図—3 荷重変形曲線例

および実験結果

ク リ ー ト		※2 X/a_r	a_r/D	λ_1	λ_2	α	h/D	L_0/D_0	モ ー ド (実験)	eP_u (t)	P_u	MP_u	QP_u	eP_u / cP_u
σ_t (kg/cm ²)	$E 10^5$ (kg/cm ²)										(t)	(t)	(t)	
37.7	3.02	1/6	6	4.833	0.166	0.333	1/3	1	FC	5.05	5.21	6.52	7.95	0.97
37.7	3.02	1/6	6	4.667	0.333	0.333	1/3	2	FC	4.96	5.21	5.90	7.01	0.95
37.7	3.02	1/6	6	4.500	0.500	0.333	1/3	3	FC	4.90	5.48	5.35	6.43	0.90
43.10	2.83	1/6	6	4.250	0.750	0.250	1/2	6	C	2.76	4.17	3.06	3.77	0.90
43.10	2.83	1/6	6	4.250	0.750	0.250	1/2	6	C	2.91	4.84	3.15	4.32	0.92
43.10	2.83	1/6	6	4.250	0.750	0.250	1/2	6	C	3.19	5.72	3.25	5.03	0.98
38.75	3.02	1/3	6	3.250	0.750	0.250	1/2	6	FC	2.95	3.26	3.42	3.94	0.90
38.75	3.02	1/3	6	3.250	0.750	0.250	1/2	6	C	3.36	3.95	3.51	4.49	0.96
38.75	3.02	1/3	6	3.250	0.750	0.250	1/2	6	C	3.84	5.47	3.58	5.20	1.07
35.70	2.86	1/6	6	4.333	0.667	0.333	1/3	4	C	4.39	6.23	4.02	6.97	1.09
35.70	2.86	1/6	6	4.333	0.667	0.333	1/3	4	C	4.43	6.23	4.58	6.51	0.97
30.89	2.68	1/6	6	4.667	0.333	0.333	1/3	2	FC	3.31	3.67	4.04	5.44	0.90
30.89	2.68	1/6	6	4.500	0.500	0.333	1/3	3	FC	3.43	4.29	3.68	5.09	0.93
35.88	2.66	1/6	6	4.500	0.500	0.250	1/2	4	C-DC	3.34	4.51	3.20	4.14	1.04
35.88	2.66	1/6	6	4.750	0.250	0.333	1/2	2	FC	2.84	3.22	4.18	4.93	0.88
35.88	2.66	1/6	6	4.500	0.500	0.250	1/2	4	C-DC	2.99	3.94	3.12	3.61	0.96
39.49	3.03	0	6	5.000	0.500	0.250	1/2	4	DC	3.10	4.13	3.29	3.66	0.94
39.49	3.03	0	6	4.500	0.750	0.250	1/2	6	C	2.65	3.94	2.90	3.70	0.91
43.10	2.83	1/3	3	1.500	0.500	0.250	1/2	4	DC	4.85	8.34	5.91	4.37	1.11
35.88	2.66	1/3	3	1.250	0.750	0.250	1/2	6	C	3.53	7.87	3.99	4.11	0.88
39.10	2.99	—	6	—	—	—	—	0	FC	4.40	4.80	—	—	0.90
38.20	2.34	—	3	—	—	—	—	0	FC	9.10	9.41	—	—	0.97

※2 開口中心距離 (0は $X_0=0$ とする) eP_u : 実験値
 P_u : 梁曲げ終局耐力
 MP_u : 弦材曲げ終局耐力
 QP_u : 弦材せん断耐力

3. 開口 PC 梁の終局強度算定式

3.1 記 号

- A: 弦材のコンクリート断面積
- r_{at}, s_{at} : 引張鉄筋および PC 鋼材の断面積
- b: 梁幅
- C: 荷重 P により生ずる弦材の圧縮軸力
- D: 梁の全せい
- d: 有効せい
- E, E_s : コンクリートおよび鉄筋のヤング係数
- j: 応力中心距離 = $7/8 \cdot d$
- k_u, k_p : せん断耐力計算式での断面寸法および鉄筋比による補正係数
- cM_u : 曲げ圧縮材の終局モーメント
- N: 弦材に作用する全軸力
- N_0, N_{max} : 弦材の中心圧縮時終局強度と累加終局強度
- P: 片持梁に作用する終局荷重
- P_e : 弦材の有効プレストレス力
- Q_0 : プレストレスのみが作用したときの弦材の終局せん断力または終局モーメント時せん断力
- M_{QC} : 全圧縮力が作用したときの圧縮弦材の曲げ破壊時せん断力
- M_{QT} : M_{QC} のときの引張弦材の負担せん断力

s_{QC} : 全圧縮力が作用したときの圧縮弦材の終局せん断力

s_{QT} : s_{QC} のときの引張弦材の負担せん断力

T: 荷重 P による弦材の引張軸力

T_y : 鉄筋と PC 鋼材の合計降伏荷重

κ : 荷重 P により弦材に生ずる軸力の係数 = $\lambda_1 + \lambda_2 / 1 - \alpha$

ϵ_0 : コンクリートの圧縮強度時のひずみ度

ϵ_1 : 軸力 C により生ずる弦材の圧縮ひずみ度

3.2 仮 定

a) 圧縮弦材 荷重により圧縮力を受ける弦材のせん断力 Q_C , 有効プレストレス力 P_e および荷重 P による軸力の合力が一軸応力として伝達される。

$$C = T = \frac{\lambda_1 + \lambda_2}{1 - \alpha} P = \kappa P \quad \dots\dots\dots (1)$$

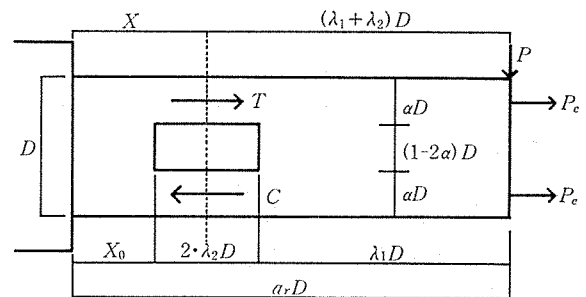
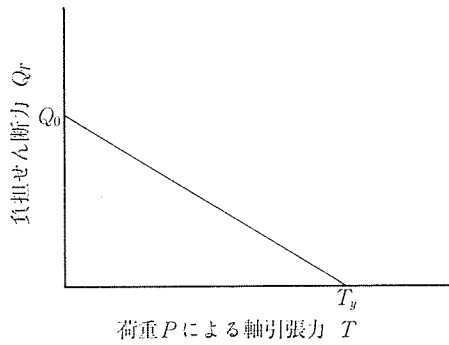


図-4 記 号



図—5

$$N = \kappa P + P_e - P_r \dots\dots\dots(2)$$

ここに、 N ：弦材に作用する軸力

P_r ：荷重 P により生ずる弦材の圧縮ひずみ
に対応する PC 鋼材引張力の減少分

b) 引張弦材 引張弦材の負担せん断力 Q_T と荷重 P により生ずる弦材の引張軸力 T は 図—5 のような直線関係をもつ。

$$\begin{aligned} Q_T &= \left(1 - \frac{T}{T_y}\right) Q_0 = \left(1 - \frac{\kappa P}{T_y}\right) Q_0 \\ &= \left(1 - \frac{P}{P_{um}}\right) Q_0 \dots\dots\dots(3) \end{aligned}$$

ここに、 Q_0 ：外力による軸力がないときの PC 弦材のせん断強度または曲げ強度時のせん断力

T_y ：全鋼材の降伏荷重

$$P_{um} = T_y / \kappa$$

c) 弦材の端部が終局モーメントに達したときの反曲点は弦材の中央とする。

3.3 曲げ圧縮材の終局モーメント cM_u

cM_u の算定には建築学会略式¹⁾を用いる。

$0.4 \alpha N_0 < N < N_{max}$ のとき

$$\begin{aligned} cM_u &= \alpha D (0.8 r a_{tr} \sigma_y + 0.12 \alpha N_0) \\ &\times \frac{N_{max} - N}{N_{max} - 0.4 \alpha N_0} = \alpha D T_0 (N_{max} - N) \dots\dots\dots(4-a) \end{aligned}$$

$0 < N < 0.4 \alpha N_0$ のとき

$$cM_u = \alpha D \left\{ 0.8 r a_{tr} \sigma_y + \frac{N}{2} \left(1 - \frac{N}{\alpha N_0}\right) \right\} \dots\dots\dots(4-b)$$

このときのせん断力は、

$$MQC = cM_u / \lambda_2 D \dots\dots\dots(4')$$

ここに、

$$T_0 = \frac{0.8 r a_{tr} \sigma_y + 0.12 \alpha N_0}{N_{max} - 0.4 \alpha N_0}$$

$r a_{tr} \sigma_y$ ：引張鉄筋の降伏荷重

N_{max} ：鉄筋を含めた断面の純圧縮強度時荷重

N_0 ：コンクリート断面の純圧縮強度時の荷重

N ：軸圧縮力

3.4 圧縮材の終局せん断力 sQ_C

sQ_C の算定には荒川式²⁾を用いる。

せん断スパン比 $M/Qd < 3$ のとき

$$\begin{aligned} sQ_C &= \left\{ \frac{0.092 k_u k_p (\sigma_B + 180)}{M/Qd + 0.12} + 2.7 \sqrt{p_w \cdot \sigma_{wy}} \right. \\ &\quad \left. + 0.1 \frac{N}{A} \right\} b j \dots\dots\dots(5) \end{aligned}$$

$$= (\tau_1 + 0.1 N/A) b j \dots\dots\dots(5')$$

せん断スパン比 $M/Qd \geq 3$ のとき

$$\begin{aligned} sQ_C &= \left\{ 0.0295 k_u k_p (\sigma_B + 180) + 2.7 \sqrt{p_w \sigma_{wy}} \right. \\ &\quad \left. + 0.1 \frac{N}{A} \right\} b j \dots\dots\dots(6) \end{aligned}$$

$$= (\tau_2 + 0.1 N/A) b j \dots\dots\dots(6')$$

ここに、 k_u, k_p ：断面寸法および引張鉄筋比 p_t による補正係数

σ_{wy} ：あばら筋の降伏強度

N ：軸力

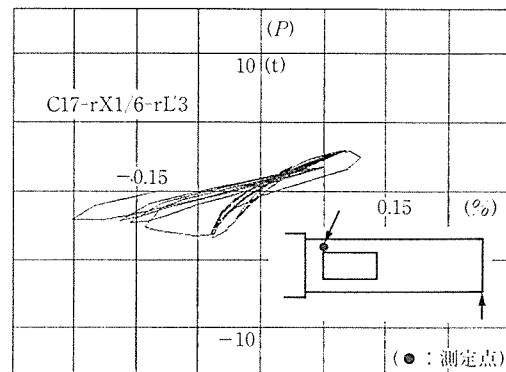
A ：弦材の断面積

b ：梁幅

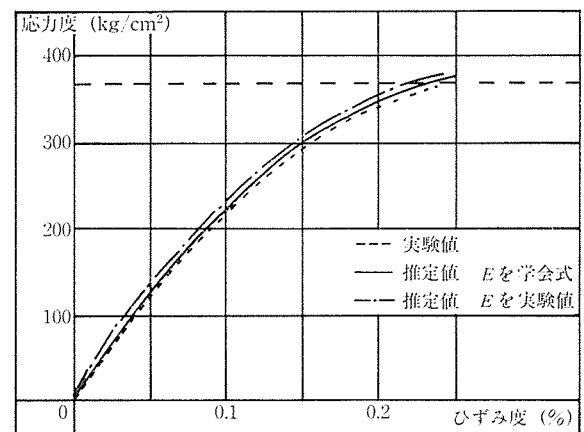
j ：応力中心距離

3.5 軸圧縮による緊張力の減少

圧縮弦材は終局時に荷重 P による高い圧縮力 κP を



図—6 PC 鋼棒の荷重ひずみ関係



図—7 Kent Park 式と実験値の比較

受け、コンクリートの圧縮ひずみに対応する PC 鋼材引張力のゆるみ P_r が生ずる。図-6 は PC 鋼材表面で測定したひずみ度の一例であり、無視できない程度の大きさとなる。

コンクリートの応力ひずみ関係には Kent Park 式³⁾を用いる。図-7 に同式の適応性を示す。

$$\sigma_i = \sigma_B \left\{ \frac{2\varepsilon_i}{\varepsilon_0} - \left(\frac{\varepsilon_i}{\varepsilon_0} \right)^2 \right\} \dots\dots\dots(7)$$

上式に原点の接線条件を用いれば、

$$\frac{\partial \sigma_i}{\partial \varepsilon_i} = \frac{2\sigma_B}{\varepsilon_0^2} (\varepsilon_0 - \varepsilon_i), \quad \varepsilon_i = 0 \text{ のとき}$$

$$\frac{2\sigma_B}{\varepsilon_0} = E, \quad \varepsilon_0 = \frac{2\sigma_B}{E}$$

$$\therefore \sigma_i = \sigma_B - \frac{E^2}{4\sigma_B} (\varepsilon_0 - \varepsilon_i)^2 \dots\dots\dots(7')$$

ここに、 σ_i : 任意応力度

ε_i : σ_i に対するひずみ度

ε_0 : 強度時ひずみ度

σ_B : 圧縮強度

E : ヤング係数

弦材が荷重 P による圧縮応力 $\kappa P/A$ を受けたときのひずみ度を ε_1 とすれば、

$$P_r = \varepsilon_1 E_{ss} a_t \dots\dots\dots(8)$$

また、(7') 式より、

$$\frac{\kappa P + P_e}{A} = \sigma_B - \frac{E^2}{4\sigma_B} (\varepsilon_0 - \varepsilon_1)^2$$

$$\therefore \kappa P = \sigma_B A - P_e - \frac{AE^2}{4\sigma_B} (\varepsilon_0 - \varepsilon_1)^2 \dots\dots\dots(9)$$

コンクリートのヤング係数 E は建築学会式を用いる。

$$E = 2.1 \times 10^5 \times \left(\frac{r}{2.3} \right)^{1.5} \times \sqrt{\frac{\sigma_B}{200}}$$

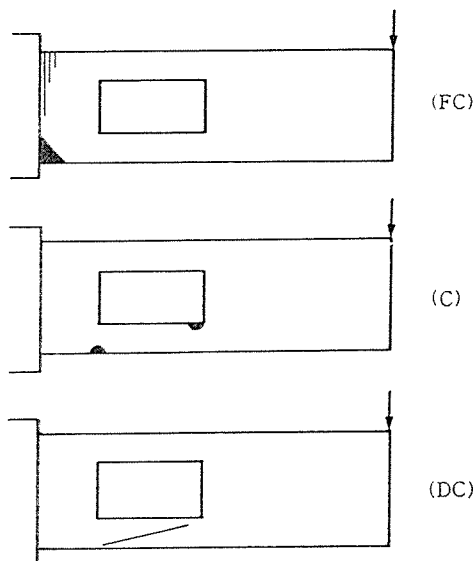


図-8 計算用モデル

ここに、 $E_s, s a_t$: PC 鋼材のヤング係数および断面積

P_e : 有効プレストレス力

r : 比重

なお、 $\sigma\varepsilon$ 関係を直線に仮定すれば 3.7, 3.8 項の計算が簡略化される。

3.6 開口 PC 梁の計算用モデル

2.2 で述べた破壊モードのうち FDC は耐力としては曲げ破壊の FC と同じとなるので、計算用モデルは図-8 に示すような 3 タイプとした。なお、長方形断面では端部でのせん断破壊は一般に生じないので除外した。

以上の 3 タイプのそれぞれについて終局荷重 P を求め、その最小値が真の終局荷重となるものとした。

破壊モード FC は端部曲げ破壊であり、規準式等で容易に算出できるので計算式は省略する。

3.7 圧縮弦材の曲げ破壊に基づく終局荷重 (破壊モード C)

両弦材の負担せん断力の和が終局荷重となるから、

$$M Q_T + M Q_C = P \dots\dots\dots(10)$$

$M Q_T$ は圧縮弦材が曲げ破壊したときの引張弦材の負担せん断力で、(3) 式より、

$$M Q_T = \left(1 - \frac{P}{P_{um}} \right) Q_0 \dots\dots\dots(3')$$

Q_0 は、(4') 式で $N = P_e$ とした値を用いる。

$M Q_C$ は圧縮弦材が曲げ破壊したときのせん断力で、(4-a) 式より

$$M Q_C = c M_u / \lambda_2 D \dots\dots\dots(4')$$

上式で、 $N = \kappa P + P_e - P_r$ とする。

(8) 式から、 $P_r = \varepsilon_1 E_{ss} a_t$

(9) 式から、 $\kappa P = \sigma_B A - P_e - \frac{AE^2}{4\sigma_B} (\varepsilon_0 - \varepsilon_1)^2$

ただし、 ε_1 は平均応力時のひずみ度を PC 鋼棒位置ひずみ度と仮定している。

(3') および (4') 式を (10) 式に代入すれば、2 次式の根として終局荷重 P が求められる。

3.8 圧縮弦材のせん断破壊に基づく終局荷重 (破壊モード DC)

$$s Q_T + s Q_C = P \dots\dots\dots(12)$$

$s Q_T$ は圧縮弦材がせん断破壊したときの引張弦材の負担せん断力で、(3) 式から

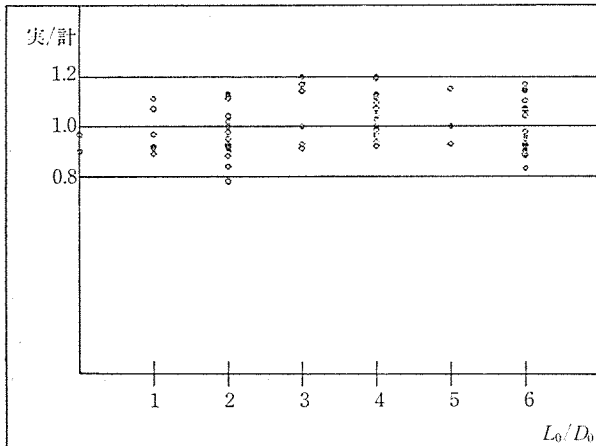
$$s Q_T = \left(1 - \frac{P}{P_{um}} \right) Q_0 \dots\dots\dots(3'')$$

$Q_0, \kappa P$ は (5') または (6') 式で、 $N = P_e$ を用いる。

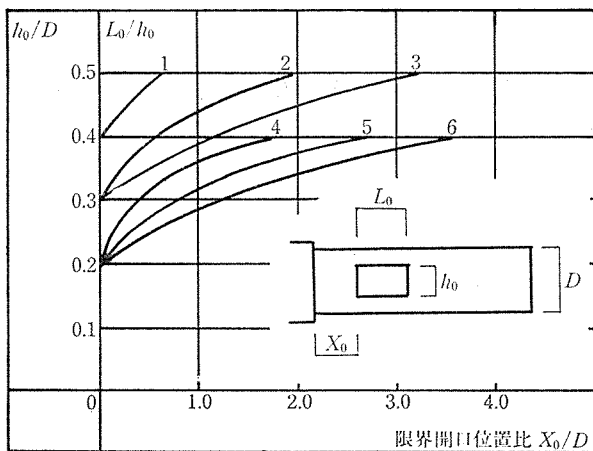
$s Q_C$ は圧縮弦材の終局せん断力で、

$$s Q_C = (\tau + 0.1 N/A) b j \dots\dots\dots(6')$$

上式で $N = \kappa P + P_e - P_r$ とする。 τ は τ_1 または τ_2 , 上(3) 式から 2 次式の根として終局荷重 P が求められる。



図—9 実験値/計算値



図—10 開口高さ比と限界開口位置比

4. 結果の考察

以上の算定式を用いて計算した終局荷重 P および実験値との比を 表—1 および 図—9 に示した。計算値は比較的良好一致し、破壊モードもほぼ一致した。また、この計算式を用いた開口部限界位置（端部曲げ破壊と開口部破壊が同時に生ずるときの開口部位置）の計算例を 図—10 に示した。ただし、 $a_r=6$ 、 $D=30$ cm、 $b=15$ cm、主筋、補助筋 2-D 10、 $r\sigma_{s,y}=3500$ kg/cm²、PC 鋼棒 17 ϕ C種、 $s\sigma_{s,y}=11\ 000$ kg/cm²、 $\sigma_B=350$ kg/cm² とする。

算定式を設計に用いるには、端部降伏時開口位置せん断力を用いた式に変える必要がある。また、スラブの存在、開口部高さ位置の変化、PC 鋼材の偏在など考慮する必要があり、今後の問題とした。

謝 辞

PC 鋼棒を提供していただいた高周波熱錬（株）および試験体の製作をいただいたオリエンタルコンクリート（株）にも深い感謝の意を表す。

また、本研究にあたって尽力いただいた日本大学海洋建築工学科助手・工博 浜原正行氏、実験データの解析にあたっては日本大学大学院院生 前田潔君、竹ノ内信次君にも感謝の意を表す。

参 考 文 献

- 1) 「構造計算指針・同解説」日本建築センター
- 2) 「鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説」日本建築学会
- 3) 「コンクリート工学ハンドブック」朝倉書店

【昭和 62 年 2 月 12 日 受付】