

# [152] 小さなH形鋼を用いた鉄骨鉄筋コンクリート柱の軸方向耐力及び靱性

正会員 松崎 育弘 (東京理科大学工学部)

正会員 ○別所 佐登志 (鹿島建設技術研究所)

佐伯 俊夫 (鹿島建設技術研究所)

加藤 友康 (鹿島建設技術研究所)

## 1. まえがき

タイプフープとスパイラルフープとを組合せた特殊な帯筋補強形式(以後、KSタイプ)を採用し、比較的小さなH形鋼を用いた鉄骨鉄筋コンクリート造(以後、SRC造)の柱の曲げ・せん断性状については、筆者等の一部により既に耐力及び靱性共に優れていることを確認し、実用化の見通しを得ている<sup>1)</sup>。しかし、このようなSRC柱の設計法を確立するためには柱の性状に及ぼす各種要因の定量的な把握を行う必要がある。

そこで、本研究は上記のSRC柱の軸方向性状の究明を目標に柱の中心圧縮実験を行い柱の弾塑性性状に及ぼす各種要因を定量的に分析し、本柱の耐力評価について検討を行うものである。

## 2. 実験の計画

試験体の計画は、実験要因として帯筋補強形式・帯筋比(Pw)・鉄骨比(sA/bD、sA:鉄骨断面積)を選定して行った。試験体の要因と水準を表-1に示した。

試験体の形状は、実物の約1/5縮尺模型に相当する大きさである。試験体数は、表-1の要因と水準に従って計画したIシリーズ27体と在来のフープ形式(以後、Hタイプ)で鉄骨量の多いSRC試験体(sA/bD=6%)、無筋コンクリート及び帯筋のみを配したIIシリーズ14体の合計41体である。試験体の一覧を表-2に、代表的試験体の詳細を図-1に示した。

試験体の製作は、鉄骨をすべて板材(SM50A及びSPA-H)による溶接組立とした。主筋はD10(SD30)、帯筋は縮小模型試験体用に開発されたD3(SD30相当)を使用した。コンクリートは普通コンクリート( $F_c: 360 \text{ kg/cm}^2$ )とし、粗骨材には豆砂利(最大寸法10mm)を用いた。コンクリートの打設は鉄骨を垂直にする縦打ちとした。試験体の使用材料の機械的性質を表-3に示した。

加力は、200tアムスラー型万能試験機を用いて試験体に中心圧縮力を加える方法で行った。载荷は一方向単調载荷とし、最大耐力まで荷重制御( $0.4 \sim 0.7 \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{sec}$ )で行い以後変形制御で軸ひずみにして2%まで加力することを原則とした。変形測定は、図-2に示す方法により試験体の軸方向変形について行い、ひずみ測定はW.S.G.により鉄骨、主筋及び帯筋の主要各部について行った。

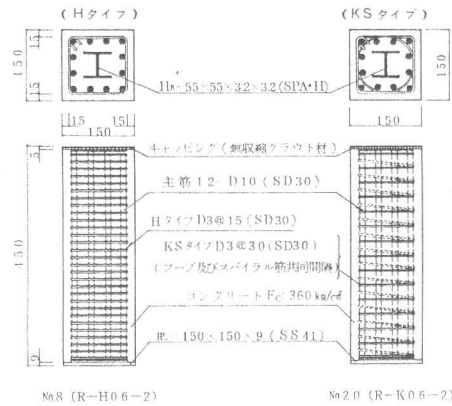


図-1 代表的試験体の詳細

表-1 試験体の要因と水準

要因	水準	1	2	3	4	5
帯筋補強形式		Hタイプ	KSタイプ	—	—	—
帯筋比 Pw(%)		0	0.3	0.6	0.9	1.2
鉄骨比 sA/bD(%)		0	2	4	—	—

注) Pw = aw / (b · S), aw, S: 帯筋の断面積及び間隔, b: 柱幅, D: 柱せい

表-2 試験体の一覧

シリーズ	No.	名称	補強形式	帯筋比 Pw(%)	鉄骨比 sA/bD(%)	鉄筋比 sA/bD(%)								
I	1	R-0.0-0	無補強	0	0	3.8								
	2	R-H 0.3-0												
	3	R-H 0.6-0												
	4	R-H 0.9-0												
	5	R-H 1.2-0												
	6	R-H 0.3-0												
	7	R-H 0.6-0												
	8	R-H 0.9-0												
	9	R-H 1.2-0												
	10	R-H 0.3-0												
	11	R-H 0.6-0												
	12	R-H 0.9-0												
	13	R-H 1.2-0												
	14	R-K 0.3-0												
	15	R-K 0.6-0												
	16	R-K 0.9-0												
	17	R-K 1.2-0												
	18	R-K 0.3-0												
	19	R-K 0.6-0												
	20	R-K 0.9-0												
	21	R-K 1.2-0												
	22	R-K 0.3-0												
	23	R-K 0.6-0												
	24	R-K 0.9-0												
	25	R-K 1.2-0												
	26	R-K 0.3-0												
	27	R-K 0.6-0												
II	28	SR-H 0.3-6	Hタイプ	0.3	6.1	1.3								
	29	H 0.6-6												
	30	H 0.9-6												
	31	H 1.2-6												
	32	C-0.0-0					無補強	0	0	0				
	33	C-0.3-0												
	34	H 0.6-0												
	35	H 0.9-0												
	36	H 1.2-0												
	37	C-K 0.3-0									KSタイプ	0.3	0	0
	38	K 0.6-0												
	39	K 0.9-0												
	40	K 1.2-0												
	41	R 0.3-0												
42	R 0.6-0													
43	R 0.9-0													

注1) 記号R-K0.3-2 (R) sA/bD=3.8% (12-D10) (SR) sA/bD=1.3% (4-D10) 補強形式: 無記号: 無補強, H: Hタイプ, K: KSタイプ Pw: 0, 0.3, 0.6, 0.9, 1.2% sA/bD: 0, 2, 4%

2) 帯筋ピッチ Hタイプ: 0, 8, 15, 30mm KSタイプ: 0, 15, 30, 60mm

3) 鉄骨 HR-55x55x3x32(SPA-H), HR-55x55x6x6(SM50A)

HR-80x80x6x6(SM50A); それぞれ sA/bD=2, 4, 6%

### 3. 実験結果

#### 3.1 破壊状況

表-4に実験終了後の代表的試験体の破壊状況を示した。

無筋コンクリートの試験体はくさび型の破壊をするのに対し、軸鋼材比  $P_c(=(rA+sA)/bD)$ 、 $rA$ :主筋総断面積)が4%以上の試験体では軸鋼材に沿うたてびひわれの割裂破壊が現れた。

軸鋼材量が一定で帯筋比が増加するとたてびひわれの割裂破壊は少なくなる。しかし帯筋比が最も大きい試験体( $P_w=1.2\%$ )ではかぶりコンクリートの剝離が著しかった。また、帯筋比が小さい試験体( $P_w=0.3\%$ )の場合には主筋の座屈が顕著であった。

補強形式の違いによる破壊性状の差はかぶりコンクリートの剝離以後に現れた。すなわち、Hタイプではかぶりコンクリートの剝離後コンクリート柱が著しくはらむのに対しKSタイプでは小さかった。しかし、帯筋比が小さい場合( $P_w=0.3\%$ )にはKSタイプのコーナー主筋は帯筋間隔が1/2のHタイプの試験体に比べ座屈が著しかった。

#### 3.2 荷重-変形関係

表-5に実験結果の一覧、図-3に荷重-変形曲線例を示した。

実験開始後の接線剛性は同じ軸鋼材比の試験体においてほとんど同じであり、帯筋比及び補強形式による違いはほとんどなかった。また、初期ひびわれは図-4に示すように鉄骨比が大きいほど最大耐力に対し小さい耐力で発生した。

最大耐力の軸ひずみは、0.12~0.54%であり軸鋼材比及び帯筋比が増加すると大きくなる傾向であった。最大耐力時付近では帯筋位置でのかぶりコンクリートの剝離によるひびわれが発生した(表-5)。

右表注1)  $E_{1/3} = 1/3 P_{max} / (A_e \cdot \epsilon)$ ,  $A_e = b \cdot D +$

$(n-1) \cdot (rA + sA)$ ,  $n=7.0$  2) 試験体変形測定区間

内の初期ひびわれ,3) 1) 最大耐力後に降伏した場合

4) 本文(2)式 5) 本文(1)式

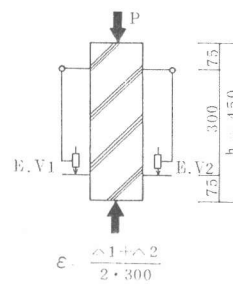


図-2 加力・測定方法

表-3 使用材料の機械的性質

(鋼材)			
表 材	$\sigma_{T_s}$ ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ )	$\sigma_{T_b}$ ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ )	伸長 (%)
R-32 (SPA H)	37.9	52.1	3.2
R-60 (SM50A)	44.6	55.0	2.35
D3 (SD30)	34.3	49.4	3.03
D10 (SD30)	37.1	54.0	2.65

(コンクリート)				
試験体及び 表示方法	種 別 (種)	圧 縮 ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ )	引 張 ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ )	ヤング係数 ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ )
標準養生	30	34.1	2.87	-
実養生	37	37.8	3.01	$3.0 \times 10^5$
(実験用)	42	39.6	2.87	-

(コンクリートの割合)					
水セメント比 W/C (率)	粗骨材率 S/A (%)	単位体積 W ( $\text{kg}/\text{cm}^3$ )	電 阻 率 ( $\Omega \cdot \text{cm}$ )	弾性係 数 ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ )	型枠耐 力 ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ )
5.1.6	4.9	1.94	37.6	8.27	8.67
注) 1) 打設日 昭和58.7.19. 2) シリンダー寸法100φ×200					

表-4 代表的試験体の破壊状況

補強形式	0		0.3		1.2	
	無補強	無補強	Hタイプ	KSタイプ	Hタイプ	KSタイプ
最 終 破 壊 状 況						
破 壊 機 構	最大耐力時点で鉄ひき出し時に鉄ひき出しに引張力に達する。以後、耐力は急低下する。	たてびひわれ発生に引張力に達する。以後、耐力は急低下する。	たてびひわれ発生に引張力に達する。以後、耐力は急低下する。	たてびひわれ発生に引張力に達する。以後、耐力は急低下する。	かぶりコンクリート位置でのたてびひわれに引張力に達する。以後、耐力は急低下する。軸ひずみは2%、実験終了時でも最大耐力に達して主筋の引張力を受ける。	かぶりコンクリート位置でのたてびひわれに引張力に達する。以後、耐力は急低下する。軸ひずみは2%、実験終了時でも最大耐力に達して主筋の引張力を受ける。

注)  $P_w$   $P_c$   $P_w/(h \cdot S)$   $P_c/(rA + sA)$  (b・D)

表-5 実験結果の一覧

試 験 体 番 号	弾性剛性 $E_{1/3}$ $\times 10^5$ $\text{kg}/\text{cm}^2$	初期ひびわれ		鋼材の降伏				かぶりコンクリートの剝離		最大耐力		耐力低下率 (%)	ヤング係数 ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ )	
		Per ( $\mu$ )	$\epsilon$ (%)	主筋 Pr1 (t)	鉄骨 $\epsilon$ (%)	帯筋 Pr2 (t)	帯筋 $\epsilon$ (%)	P (t)	$\epsilon$ (%)	Pmax (t)	$\epsilon$ (%)			
R-H03-0	3.09	0.25	0.18	92.5	0.18	-	-	-	-	0.25	0.18	-	0.73	
2	4.67	8.83	0.09	108.0	0.11	109.0*	0.13	-	-	110.5	0.12	-	0.74	
4	3.15	9.93	0.12	123.0	0.20	119.9*	0.29	-	-	126.3	0.23	-	0.66	
R-H03-3	3.31	10.50	0.25	94.0	0.16	-	-	10.50	0.25	104.0	0.3	105.0	0.25	6.56
2	4.95	19.22	0.14	110.0	0.15	108.5	0.18	9.96	0.19	108.0	0.25	110.8	0.20	3.94
4	3.30	12.63	0.22	116.5	0.17	130.5	0.25	9.71	0.24	130.8	0.32	132.1	0.26	3.48
R-H06-0	3.86	10.42	0.26	101.5	0.18	-	-	8.05*	0.18	9.96	0.38	104.2	0.26	5.12
2	3.28	11.13	0.15	114.5	0.16	109.5	0.18	11.00*	0.33	113.0	0.28	117.4	0.23	3.68
4	3.22	9.60	0.12	122.5	0.18	130.0	0.23	13.10	0.32	130.0	0.33	131.2	0.35	3.12
R-H09-0	3.58	10.25	0.25	98.5	0.19	-	-	7.80*	0.88	102.0	0.25	102.8	0.28	2.98
2	4.24	11.50	0.18	124.5	0.26	115.5	0.18	11.70*	0.36	119.6	0.36	124.4	0.25	2.28
4	2.83	12.13	0.17	132.4	0.21	138.9	0.25	9.85*	1.83	145.0	0.33	145.4	0.32	2.16
R-H12-0	3.24	10.92	0.22	97.5	0.16	-	-	9.0*	0.78	112.0	0.32	112.8	0.29	2.43
2	2.91	12.15	0.25	118.5	0.18	116.0	0.20	12.1*	0.48	124.4	0.30	126.7	0.28	1.29
4	2.69	13.43	0.25	127.0	0.20	140.0	0.22	-	-	143.0	0.33	144.9	0.31	3.04
R-K03-0	3.75	10.22	0.19	97.5	0.01	-	-	10.45*	0.30	104.0	0.22	106.8	0.24	6.41
2	3.62	10.92	0.16	122.5	0.22	120.5	0.23	-	-	120.0	0.27	121.8	0.24	4.19
4	2.95	12.13	0.19	121.5	0.20	131.5	0.25	9.51	0.82	124.0	0.28	135.5	0.31	3.05
R-K06-0	3.35	9.90	0.21	100.0	0.22	-	-	9.44*	0.50	102.0	0.35	103.4	0.31	2.83
2	3.42	10.51	0.17	113.5	0.22	107.5	0.18	11.20*	0.55	118.0	0.34	118.7	0.25	1.64
4	2.96	10.50	0.15	132.6	0.31	131.5	0.26	9.70*	1.80	131.0	0.26	133.6	0.30	2.42
R-K09-0	3.35	10.41	0.23	100.0	0.19	-	-	-	-	104.0	0.24	105.4	0.26	2.20
2	3.37	11.36	0.19	105.5	0.18	118.0	0.2	11.70*	0.43	120.0	0.31	122.3	0.25	2.30
4	2.94	11.54	0.15	126.0	0.18	137.5	0.22	12.60*	1.96	142.0	0.33	144.0	0.34	1.05
R-K12-0	4.11	10.21	0.21	90.0	0.14	-	-	9.20	1.04	101.0	0.24	102.3	0.29	1.71
2	3.31	10.71	0.16	100.5	0.18	117.5	0.2	12.57	0.53	128.0	0.28	132.0	0.33	8.7
4	3.74	13.44	0.23	128.0	0.21	133.0	0.23	-	-	139.0	0.33	141.5	0.31	7.2
SR-H03-6	4.27	11.63	0.16	110.0	0.17	122.5*	0.35	10.40*	0.73	122.0	0.26	122.8	0.33	2.16
H06-6	3.60	12.03	0.30	115.5	0.21	119.0	0.23	11.60*	0.65	121.6	0.35	124.9	0.42	1.49
H09-6	3.69	10.23	0.15	111.5	0.18	117.5	0.28	13.00*	0.57	120.0	0.30	131.0	0.54	1.27
H12-6	3.03	12.90	0.30	129.0	0.22	128.0	0.27	12.30*	0.97	127.0	0.34	129.0	0.30	4.6
C-H03-0	4.69	7.28	0.17	-	-	-	-	-	-	7.28	0.17	-	-	0.84
2	3.12	7.35	0.17	-	-	-	-	-	-	7.35	0.17	-	-	0.83
C-H06-0	3.49	7.12	0.15	-	-	-	-	7.00	0.28	-	-	7.22	0.22	7.65
H09-0	3.89	7.28	0.20	-	-	-	-	6.50*	0.43	7.20	0.23	7.33	0.22	6.59
H12-0	3.89	7.23	0.16	-	-	-	-	-	-	7.64	0.30	8.05	0.25	5.95
K03-0	3.56	8.10	0.22	-	-	-	-	6.90	0.37	8.10	0.24	8.16	0.24	3.85
K06-0	3.09	6.36	0.25	-	-	-	-	6.30	0.23	6.20	0.27	6.36	0.25	6.53
K09-0	3.55	7.26	0.18	-	-	-	-	6.75*	0.39	7.10	0.30	7.33	0.25	4.94
K12-0	3.14	7.34	0.26	-	-	-	-	6.60*	0.46	7.20	0.27	7.34	0.26	2.49
4	3.38	7.61	0.23	-	-	-	-	7.60*	0.46	7.90	0.32	8.03	0.25	2.01

最大耐力以後の耐力低下は、帯筋比が0%の場合には急激な耐力低下を生ずるが帯筋比が増加するのに伴い耐力低下は小さく優れた靱性を示した。また、軸鋼材比あるいは鉄骨比が増加しても耐力低下は小さくなる傾向にあった。帯筋補強形式の違いによる差は、最大耐力では認められないが最大耐力以後においてKSタイプはHタイプに比べ耐力低下は小さく靱性に優れていた。

軸鋼材比がほぼ同じ試験体において、鉄骨断面は小さいがKSタイプにより十分に帯筋補強した試験体(R-K12-2)は在来Hタイプにより帯筋補強し鉄骨断面の大きい試験体(SR-H12-6)と比較し同等以上の耐力及び靱性を示した(図-3d)。

### 3.3 鉄骨・主筋・帯筋のひずみ性状

鉄骨及び主筋は試験体の断面内において同一のひずみを生じており、加力は断面内において均一に行われていた。鉄骨及び主筋のひずみは最大耐力時にはいずれも圧縮降伏しており(表-5)、最大耐力時において軸鋼材は材料試験結果より求められた降伏応力度にその断面積を乗じた力を分担しているものと判断できる。ただし、帯筋比が0%の場合には軸鋼材が降伏せず最大耐力に達した試験体があった。

一方、帯筋は最大耐力時には降伏ひずみ $w_{ey}$ に対し30~50%の引張ひずみを生じ最大耐力以後かぶりコンクリートが剝離するとともに引張降伏した。

## 4. 考察

### 4.1 最大耐力

最大耐力実験値と帯筋比及び鉄骨比の関係を図-5に示した。これによると最大耐力実験値は鉄骨比の増加に伴い上昇した。また帯筋比が大きくなっても最大耐力は上昇し軸鋼材比が同じ場合に帯筋比が1.2%の場合では0%に比べ約10~20%高くなっている。

ここで、最大耐力は次の(1)式による累加強度法で表現できると仮定し鉄骨と鉄筋とが完全に有効に働いたものとして検討を行った。

$$P_{max} = \alpha \cdot A_c \cdot c \sigma_n + r_A \cdot r \sigma_y + s_A \cdot s \sigma_y \quad (1)$$

ただし、 $A_c, r_A, s_A$  : それぞれコンクリート、主筋、鉄骨部分の断面積、 $r \sigma_y, s \sigma_y$  : それぞれ主筋、鉄骨の降伏応力度、 $c \sigma_n$  : コンクリートシリンダー強度である。ここで、 $\alpha$ は試験体コンクリート部分のシリンダー強度に対する強度係数であり最大耐力実験値から(1)式により求め表-5に示した。また $\alpha$ と $s_A/bD$ 及び $\alpha$ と $P_w$ との関係をそれぞれ図-6、-7に示した。

図-6には、コンクリートの強度係数 $\alpha$ として若林

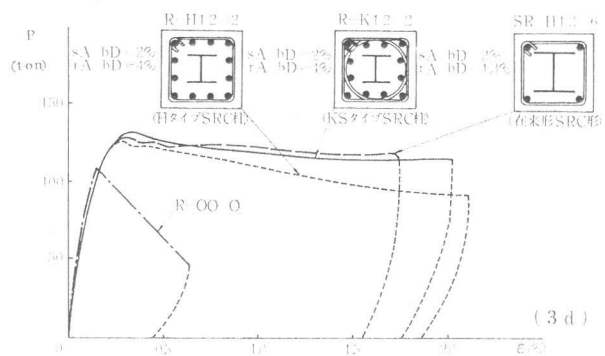
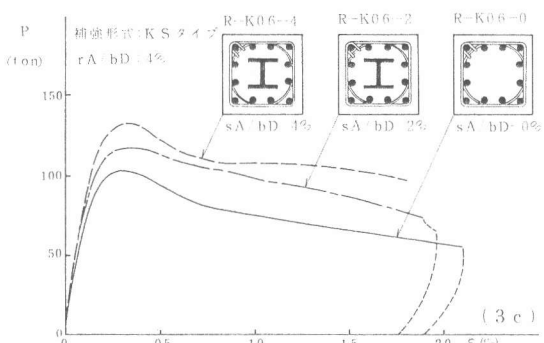
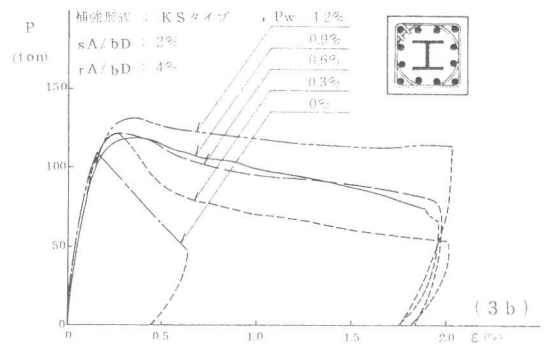
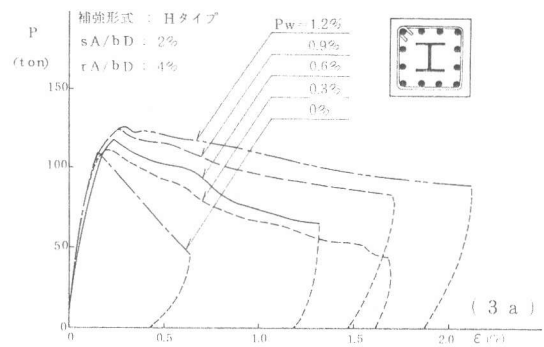


図-3 荷重-変形曲線例

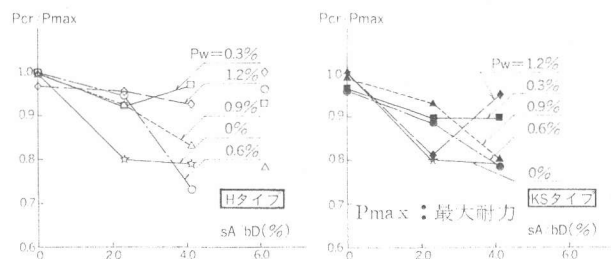


図-4 初期ひびわれ耐力  $P_{cr}/P_{max}$

式<sup>2)</sup>( $\alpha_1=0.80-2.5Pc$ ,  $Pc$ :軸鋼材比)及びSRC日本建築学会規準式<sup>3)</sup>( $\alpha_2=0.85-2.5sPc$ ,  $sPc$ :鉄骨比)を並記した。 $\alpha_1$ 及び $\alpha_2$ は実験結果の下限値を示し、コンクリート強度係数 $\alpha$ は鉄骨比の増加にほぼ比例して低下する傾向にあった。

一方、図-7によると $\alpha$ は帯筋比の増加に伴い大きくなった。これは帯筋のコンクリート拘束効果により最大耐力の上昇を期待できることを示している。

#### 4.2 耐力低下率

最大耐力以後の耐力低下率 $\eta$ は次の(2)式により求め表-5及び図-8に示した。

$$\eta = (P_{max} - P_{1.0}) / P_{max} \quad (2)$$

ただし、 $P_{1.0}$ :軸ひずみ1%時の耐力。

耐力低下率 $\eta$ は、軸鋼材比が一定の場合には帯筋比の増加にほぼ比例して減少した。また鉄骨比が大きくなっても $\eta$ は減少するが、鉄骨比が大きくなると帯筋比の増加による $\eta$ の減少率は小さくなる傾向にあった。

帯筋比が同じであれば、KSタイプの帯筋補強形式はHタイプに比べ耐力低下率 $\eta$ は小さかった。またKSタイプにより十分に帯筋補強した試験体( $Pw=0.9\sim 1.2\%$ )はHタイプの鉄骨断面の大きな試験体( $sA/bD=6\%$ )と同等の耐力低下率を示した。

#### 5. 結論

本実験結果を結論すると次のとおりである。

- 中心圧縮力を受ける比較的小さい断面のH形鋼を用いたSRC柱の最大耐力は、鉄骨比と帯筋比が大きく影響しこれらの要因が増すとほぼ比例して増加する。また、HタイプとKSタイプとの帯筋補強形式による差はほとんどない。
- 本柱の最大耐力以後の耐力低下率 $\eta$ は、帯筋補強形式の違いが大きく影響する。すなわち、KSタイプはHタイプに比べ $\eta$ が小さい。また、 $\eta$ は鉄骨比と帯筋比にも影響されこれらの要因が増加すると $\eta$ は小さくなるが、鉄骨比が増加すると帯筋比の与える影響が小さくなる傾向にある。
- 軸鋼材比がほぼ同じSRC柱において、鉄骨断面が小さくてもKSタイプにより十分に帯筋補強したSRC柱は従来のHタイプの鉄骨断面の大きい場合に比べ、耐力及び耐力低下率 $\eta$ において同等以上の優れた性状である。
- 本柱の最大耐力は、本文(1)式の累加強度式においてコンクリート強度係数 $\alpha$ は鉄骨比が増すと小さくなり、一方帯筋比が増すと大きくなることを考慮することにより評価できる。

本研究にあたり、御助力を頂いた東京理科大松崎研学生渡辺、竹内君と鹿島技研福島、畠本研究員に深謝致します。

(参考文献) 1) 別所登志, 他; H形鋼を用いた鉄骨曲げ耐力比の小さな鉄骨鉄筋コンクリート柱の研究(その1)(その2), 鹿島技研年報Vol. 31(昭58.6)  
2) 横尾, 若林, 他; H形鋼を用いた鉄骨鉄筋コンクリート柱に関する研究, 建築学会論報 第134号(昭42.4)  
3) 日本建築学会; 鉄骨鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説(昭50.11)

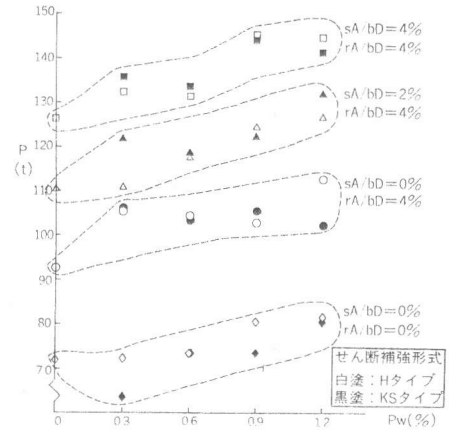


図-5 最大耐力

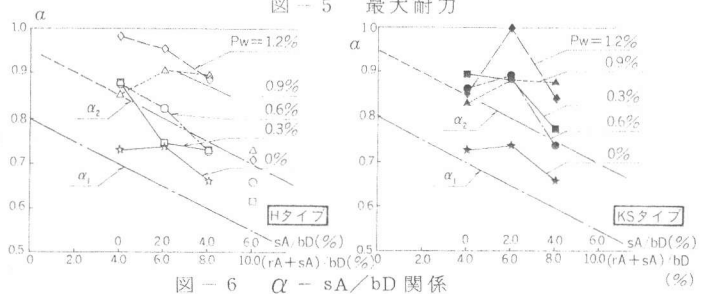


図-6  $\alpha - sA/bD$  関係

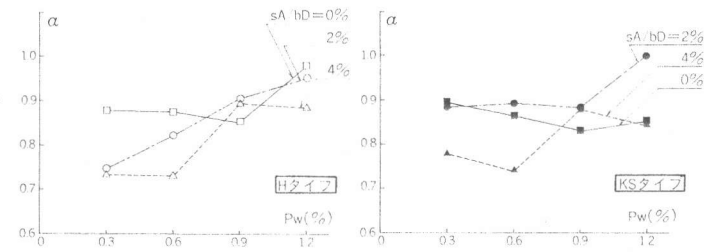


図-7  $\alpha - Pw$  関係

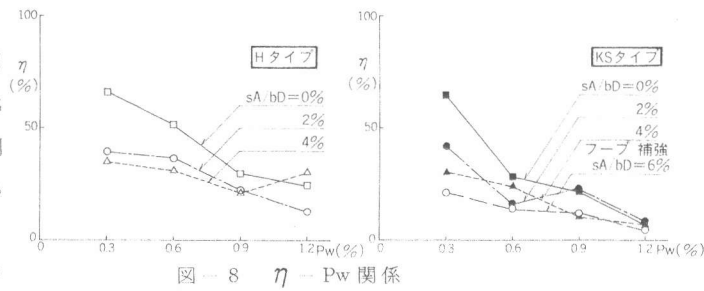


図-8  $\eta - Pw$  関係