

論文

[2114] 高層 PCa 壁式ラーメン柱の力学的挙動に関する研究

岡田賢一^{*1}・榎谷栄次^{*2}・丁豪^{*3}・小澤健一^{*4}

1. 研究目的

本研究は、HFW構法をプレキャスト化する事を目的とする「高層壁式プレキャストラーメン鉄筋コンクリート構法の開発研究」の一環として、11層の桁行方向のプレキャスト（以後PCaと略す）壁式フレームにおける第1層の中壁柱の脚部に対する構造性能を調べるため、片持ち加力方式による部材の曲げ・せん断実験を行った。これよりPCa部材の偏平率および敷きモルタルが力学的挙動に与える影響に関して調べる。また、壁式PCa柱の水平接合部におけるせん断抵抗メカニズムを摩擦力とダウエル力との累加で表し、実験結果との比較検討を行った。

2. 実験概要

2.1 試験体

本実験に用いた試験体は、実際に構造設計されたPCa中壁柱の1/2スケールを考え、PCa試験体8体と在来工法の試験体1体の総数9体で、コンクリート

表-1 試験体構造諸元一覧

試験体名	柱幅 b (mm)	柱成 D (mm)	柱高 H (mm)	h m (mm)	$b_m \times 100 / b$ (%)	引張鉄筋比 $a_t / B D$ (%)	せん断補強筋比 (%)	軸力比	備考
WPC-01	300	900	1035	10	100	0.37	1.01	0.1	7' n t t i t'
WPC-02					100		1.81		
WPC-03					80 ²⁾				
WPC-04				15	100	0.53		主筋14-D19	
WPC-05				10	100				
WRC-06					100				
WPC-07	300	600	1035	10	100	0.55	1.01	0.1	7' n t t i t'
WPC-08							1.81		
WPC-09	225	900	1035	10	100	0.39	1.05	0.1	7' n t t i t'

注) 1) : 実設計柱と補強を同一とした。

設計基準強度を 330

2) : 敷きモルタルにおける欠陥を考え柱幅方向に20%低減した。

kgf/cm²として行った。試験体の構造諸元一覧を表-1に示す。また、試験体配筋図を図-1に、および敷モルタル形状図を図-2に示す。

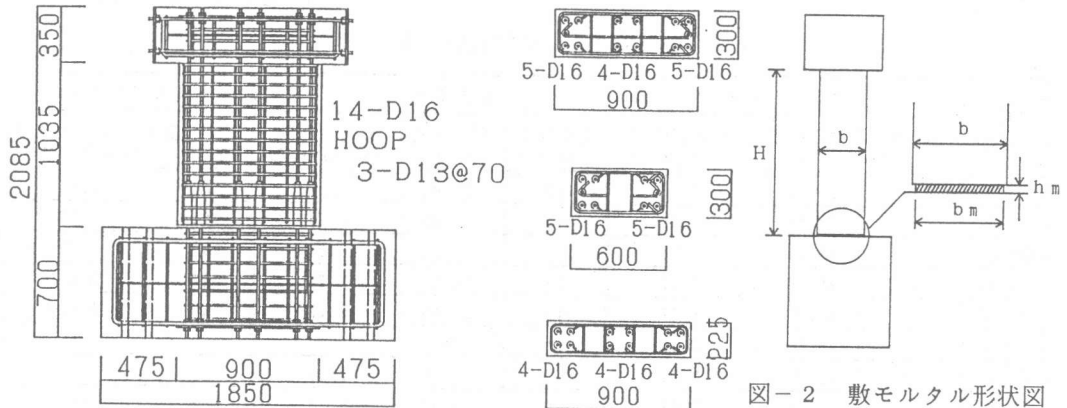


図-1 試験体配筋図

図-2 敷モルタル形状図

*1 (株)日建ハウジングシステム(正会員)

*3 エヌケーエソジニアリック株式会社

*2 関東学院大学教授 工学部建築学科、工博(正会員)

*4 関東学院大学大学院(正会員)

2.2 加力方法・測定方法

加力方法は、図-3に示すようにオイルジャッキにより水平加力と軸力を同時に加えた。反力点高さ $h=121\text{cm}$ とし、変位制御により正負交番繰り返し载荷を与えた。図-4に加力サイクルを示す。また、軸方向圧縮応力は $\sigma_0=33\text{kgf/cm}^2$ とした。

測定方法は、試験体各部の変位を図-5に示すように高感度変位計により測定し、鉛直方向接合筋およびせん断補強筋のひずみをストレインゲージによって測定した。ひび割れ発生状況は、目視により観察した。

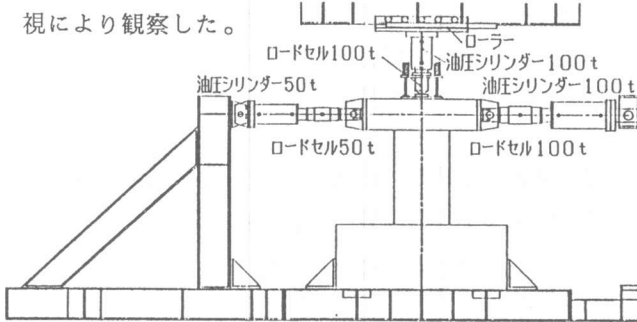


図-3 加力装置図

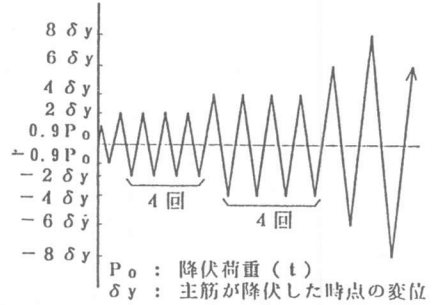


図-4 加力スケジュール

3. 実験結果および考察

3.1 材料性状

試験体に使用した鉄筋の機械的性質を表-2(a)に示す。また、各使用材料の試験結果を表-2(b)に示す。

表-2(a) 鉄筋の引張強度特性

種類	呼び強度	引張強度 (kg/cm^2)	降伏点強度 (kg/cm^2)	ヤング係数 ($\times 10^6 \text{kg/cm}^2$)	伸び率 (%)
D10	SD295A	5270	3735	2.31	16.0
D13	SD295A	5118	3572	2.18	18.0
D13	SD390	5690	4065	2.06	15.2
D16	SD390	5711	3924	1.96	16.8
D19	SD390	5615	4094	1.98	18.8

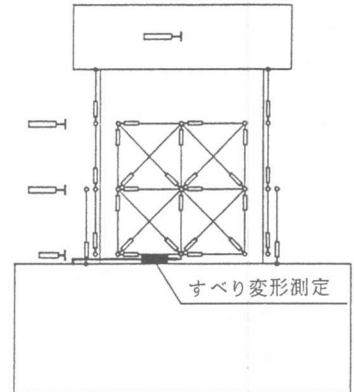


図-5 変位計取り付け位置

表-2(b) 材料試験結果

試験体名	コンクリート			敷きモルタル			注入グラウト	
	圧縮強度 (kg/cm^2)	割裂強度 (kg/cm^2)	ヤング係数 ($\times 10^5 \text{kg/cm}^2$)	圧縮強度 (kg/cm^2)	割裂強度 (kg/cm^2)	ヤング係数 ($\times 10^5 \text{kg/cm}^2$)	圧縮強度 (kg/cm^2)	ヤング係数 ($\times 10^5 \text{kg/cm}^2$)
WPC-01	337	22.49	2.59	429	31.96	2.50	588	3.24
WPC-02	284	22.25	2.66	391	26.20	2.94	463	2.18
WPC-03	380	27.20	2.61	374	34.74	2.38	691	3.65
WPC-04	386	25.90	2.63	399	38.28	2.74	812	3.68
WPC-05	429	28.90	3.22	340	36.19	2.62	768	3.40
WRC-06	439	26.83	2.88	—	—	—	—	—
WPC-07	344	21.75	2.25	449	25.75	2.52	—	—
WPC-08	313	21.45	2.38	448	28.58	2.73	—	—
WPC-09	317	20.09	2.33	415	25.29	2.67	—	—

3.2 破壊性状について

WPC-02、WRC-06、WPC-08、WPC-09 試験体の最終破壊性状を図-6に示す。すべての試験体において、引張鉄筋の降伏後、圧縮縁のコンクリートが圧壊し、その後耐力の増加は見られなかった。破壊

形式は、すべての試験体において曲げ降伏破壊であったと思われる。

一体打ちとP C aを比較すると、一体打ちの方が部材に入った亀裂は多かった。

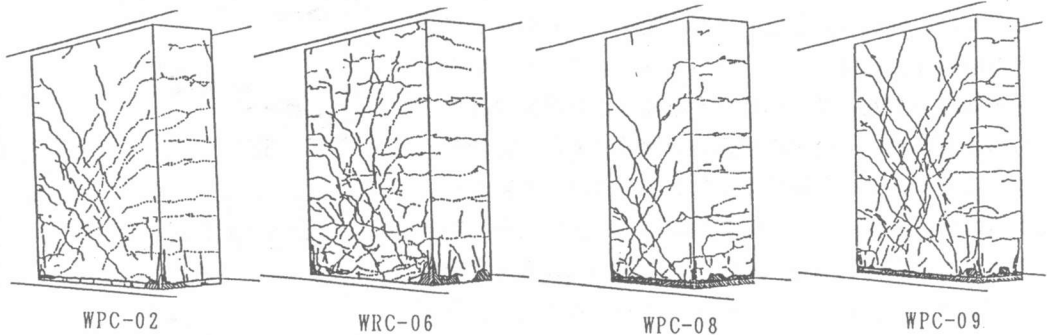


図-6 最終破壊性状

3.3 荷重・変形履歴曲線について

図-7にD/B=3の試験体のQ- δ 曲線を示す。すべての試験体において最終サイクルまでほとんど耐力低下は見られない。一体打ちの試験体WRC-06とP C a試験体WPC-02を比較すると、引張鉄筋の降伏時までは、ほとんど同じようなループを描いているが、その後P C a試験体の方が耐力の上昇が大きく最大耐力は、P C a試験体の方が高くなった。これは、主に、水平接合部において圧縮領域にある鉛直方向接合主筋によるダウエル効果が寄与するためと思われる。しかし、双方とも最終サイクルまで耐力の低下は見られず、靱性においては一体打ち試験体とP C a試験体の差は見られなかった。敷きモルタルの影響については、敷きモルタルの断面積を20%削ったWPC-03試験体と敷きモルタル厚を15mmにしたWPC-04試験体がやや耐力が低くなったが、こちらも最終サイクルまで耐力低下は見られず、靱性についてはほとんど問題はないと思われる。

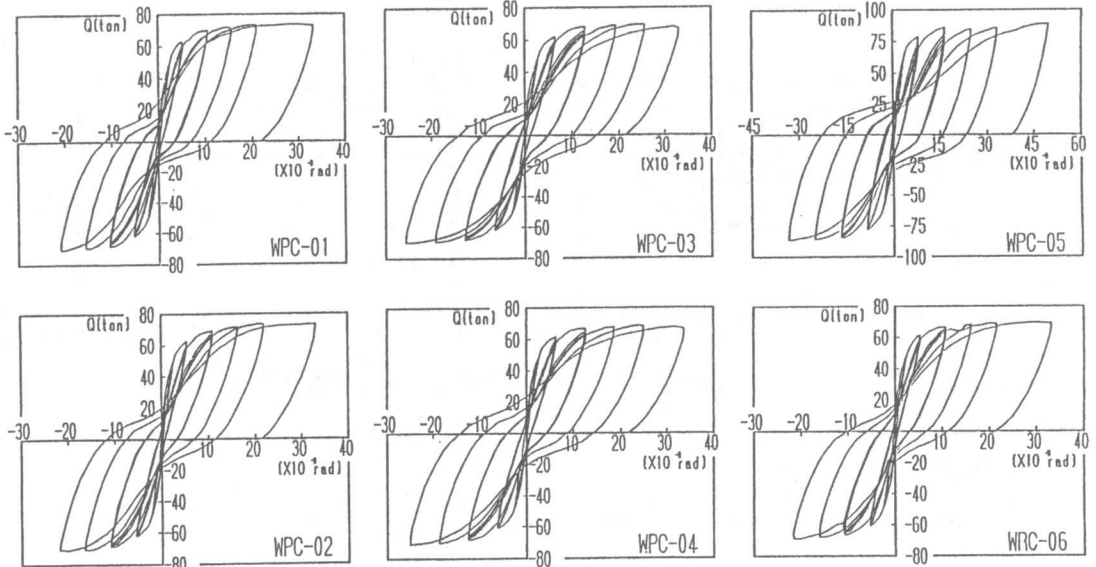


図-7 荷重-変形曲線

3.4 試験体の変形量について

図-8に各試験体の部材角-すべり変形量比の関係を示す。すべり変位量比は、全体の变形に対するすべり変形の割合で、すべり変形量を全体変形量で除した値とした。敷きモルタルの影響を

比較すると、3体ともほとんど差はなく、最大15%程度になっている。一体打ち試験体とP C a試験体を比較すると、WRC-06試験体が最大10%程度であるのに対して、WPC-02試験体は最大15%程度であった。このことから敷きモルタルの性状はすべり変形量にはさほど影響は無いものと思われる。偏平率の違いで比較すると、D/Bが大きいほどすべり変形量は小さいことがわかった。また、図-9にWPC-02試験体の全体変形に対する変形成分の割合を示す。この図から分かるように、変形成分の約半分が目開きによる回転の変形である事が分かる。曲げ変形はごく小さな値であった。

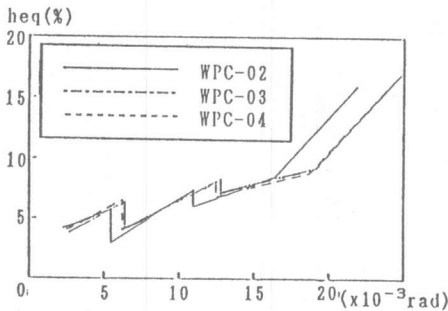
3.5 等価粘性減衰定数について

試験体の復元力特性を調べるために等価粘性減衰定数を算出した。各影響別の部材角と等価粘性減衰定数の関係を図-10に示す。

各試験体ともほぼ同等な復元力特性を示しており、一体打ち試験体とP C a試験体に関して大きな違いは見られなかった。また敷きモルタルの影響もほとんど無いものと思われる。

3.6 諸耐力について

諸耐力を算出するのに用いた既往の実験式を以下に示す。また、算定値と実験値の比較一覧を表-3に示す。



曲げ終局耐力

図-10 部材角と等価粘性減衰定数の関係

耐力壁の算定式： $cQwu$

$$cQwu = 0.9 a t \cdot \sigma_y \cdot D + 0.4 a w \cdot \sigma_{wy} \cdot D + 0.5 N D \left(1 - \frac{N}{b \cdot D \cdot \sigma_B} \right)$$

H F W設計施工指針式： $cQmu$ [1]

$$cQmu = 0.9 \Sigma (a t \cdot \sigma_y) D + 0.45 \Sigma (a w \cdot \sigma_{wy}) D + 0.45 N D$$

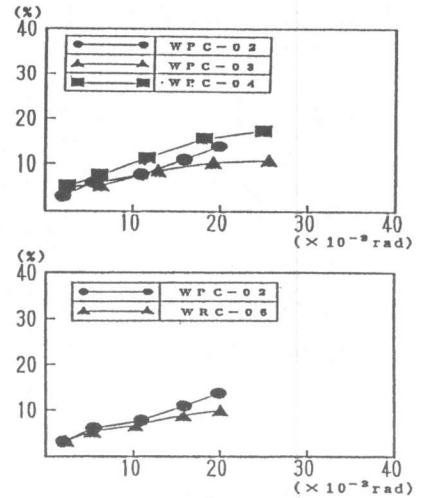


図-8 部材角とすべり変形量比の関係

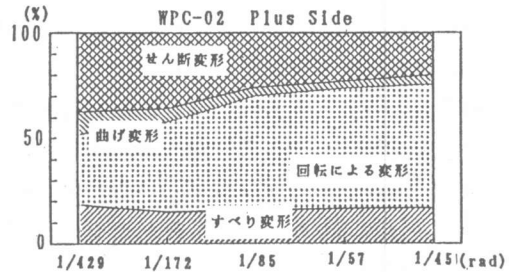
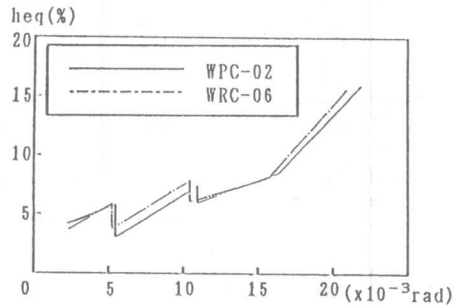


図-9 全体変形に対する変形要素



曲げ終局耐力式につ

表-3 諸耐力算定値と実験値の比較一覧

(単位: tonf)

いて、実験値と算定値を比較すると、耐力壁の算定式においては、実験値と算定値の誤差が大きいため13%と概ねよく一致している。しかもすべ

試験体名	実験値		計算値							
	降伏荷重 eQy	最大耐力 eQu	曲げ終局耐力		曲げ終局耐力		せん断終局耐力		付着割裂耐力	
			cQwu	実/計	cQmu	実/計	cQsu	実/計	cQbu	実/計
WPC-01	52.02	73.72	65.25	1.13	66.41	1.11	69.42	1.06	151.48	2.05
WPC-02	51.17	74.02	65.25	1.13	66.41	1.11	80.46	0.92	155.67	2.10
WPC-03	53.00	69.78	65.25	1.07	66.41	1.05	84.36	0.83	185.39	2.66
WPC-04	53.15	71.06	65.25	1.09	66.41	1.07	86.82	0.82	186.99	2.63
WPC-05	66.45	89.42	83.13	1.08	84.88	1.05	92.06	0.97	199.68	2.23
WRC-06	50.06	69.44	65.25	1.06	66.41	1.05	89.73	0.77	200.71	2.89
WPC-07	26.02	33.26	30.68	1.08	30.68	1.08	38.93	0.85	84.92	2.55
WPC-08	26.90	34.21	30.68	1.12	30.68	1.12	45.55	0.75	93.80	2.74
WPC-09	40.57	57.73	52.57	1.10	58.96	0.98	51.10	1.13	146.56	2.54

$$(1) cQsu = \left\{ \frac{0.053Pt^{0.23}(\sigma_B + 180)}{M/(Qd) + 0.12} + 2.7\sqrt{P_{wh} \cdot \sigma_{wy}} + 0.1\sigma\right\} b_j \quad [3]$$

$$(2) cQbu = j_t \cdot \tau_b \cdot \Sigma \phi + k_1(1 - k_2) \cdot b \cdot D \cdot \nu \cdot \sigma_B \quad [3]$$

M/Qd: せん断スパン長さ(M/Q)の有効せい(d)に対する比
 σ_{wy} : 中間部主筋の降伏強度
 ν : コンクリート圧縮強度の有効係数

$$k_1 : \{ \sqrt{(L/D)^2 + 1} - (L/D) \} / 2$$

$$k_2 : (2\tau_b \cdot \Sigma \phi) / (b \cdot \nu \cdot \sigma_B)$$

τ_b : 森田・藤井式による付着割裂強度

ての試験体において安全側に評価できている。HFW指針式では、誤差が最大のもので12%と耐力壁の算定式よりもよく一致した。しかし、WPC-09試験体において危険側に評価しているが、全体からみると曲げ終局耐力に関しては、既往の実験式で十分評価できると思われる。

4. P C a 壁柱のせん断抵抗メカニズム

P C a 部材の接合面におけるせん断抵抗として、鉄筋による圧縮合力、軸方向力および鉄筋のダウエル力を考え、せん断摩擦抵抗とダウエル効果の累積したせん断耐力式を極限解析より導き、実験値と比較した。

4.1 せん断耐力式

水平力Pと軸方向外力Nを同時に受けたP C a 壁柱は、終局時における脚部の変位分布を図-11のように仮定できる。[2]

主筋におけるダウエル効果は、引張鉄筋と圧縮鉄筋では異なるものと考えられる。特に引張鉄筋では終局時において大きな目開きが生ずるため、圧縮鉄筋に比してダウエル効果は小さいものと推測される。現在のところ実験による検証も見受けられないことから、ここでは引張鉄筋を無視した場合を考える。

$d_1 = d/D = 0.9$, $d_{c1} = d_c/D = 0.1$, $\gamma = 1(a_c = a_t)$ の場合を考えると、次の略算式が得られる。

$$Q_u = \mu \times a_t \times s_{\sigma y} + \mu_w \times a_w \times s_{\sigma y} + \mu_n \times N + \{ C_d \cdot \sigma_B (\Sigma d r^2) \} \dots \dots (1)$$

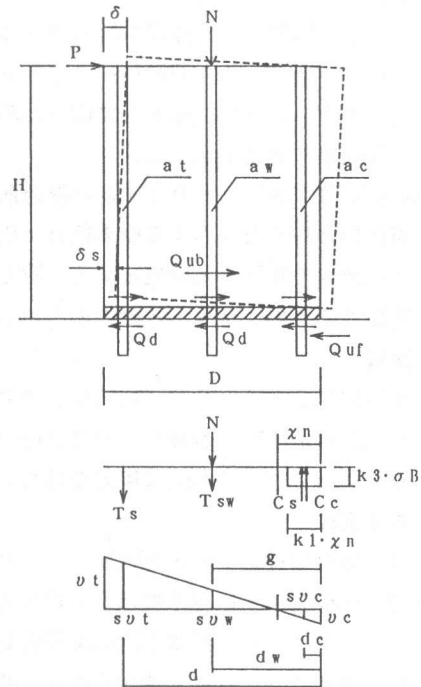


図-11 壁柱脚部に生ずる応力および変位分布

ここで、 $\lambda = H/D$: シアスパン比

$$\mu = 0.8 D/H = 0.8/\lambda$$

$$\mu_w = d_w l/\lambda \quad (d_w l = d_w/D)$$

$$\mu_n = 0.5 D \left(1 - \frac{N}{b D \sigma_B}\right) / H = 0.5 \left(1 - \frac{N}{b D \sigma_B}\right) / \lambda$$

$$C d = C d \cdot \sigma_B \cdot \sum d r^2 \quad (C d = 7.92 - 2.17 d r)$$

$s \sigma_y$: 鉄筋の降伏点強度

σ_B : コンクリート圧縮強度

$d r$: 鉄筋径

b : 柱幅

D : 柱成

表-4 実験値と理論値の比較一覧

(単位: tonf)

4.2 理論解析の考察
表-4に上式より求めた理論値と計算値の一覧表を示す。理論値と計算値を比較すると誤差の一番大きい物で7%とよく一致しており本実験においては十分適応すると思われる。また、全せん断力に対するダウエル力の比は、10~18%であることがわかった。このことから、引張鉄筋の降伏後

試験体名	実験値	計算値				
		せん断耐力 cQu	実/計	ダウエル力		摩擦力 cQf
	最大耐力 eQu			cQd	cQd/cQu	
WPC-01	73.72	70.71	1.04	8.25	0.12	62.46
WPC-02	74.02	69.42	1.07	6.95	0.10	62.47
WPC-03	69.78	71.77	0.97	9.30	0.13	62.47
WPC-04	71.06	70.97	1.00	8.51	0.12	62.46
WPC-05	89.42	92.53	0.97	13.60	0.15	78.93
WRC-06	69.44	73.49	0.94	11.03	0.15	62.46
WPC-07	33.26	33.78	0.98	6.02	0.18	27.76
WPC-08	34.21	33.24	1.03	5.47	0.16	27.77
WPC-09	57.73	57.83	1.00	6.65	0.11	51.18

注) cQuは、(1)式からの計算値。cQu=cQd+cQf
の耐力の増加は、ダウエル効果が寄与しているものと思われる。

5. まとめ

- (1) P C a 試験体は一体打ち試験体と比較し、接合部においてずれ変位が大きいものの耐力的には一体打ちを上回り、靱性の高い挙動を示した。
- (2) 敷きモルタルの断面を20%削った試験体についても、敷きモルタルの断面が100%の試験体とほぼ同等な挙動を示した。
- (3) 曲げ降伏を生じたP C a 部材接合部のせん断抵抗メカニズムに関して、接合部に生ずる曲げ圧縮合力と軸力方向による摩擦抵抗と圧縮領域にある鉛直方向接合主筋のダウエル効果を累加したせん断耐力式は、実験値とよく一致しており、終局強度式として評価できるものと考えられる。本実験に関して、ダウエル効果の占める割合は、10~18%であった。

謝辞

本研究は、(社)プレハブ建築協会内に設けられた、高層WR-P C 構法実験委員会(委員長望月重、武蔵工業大学教授)の研究活動の一環として行われた。試験体の作成は東急工建(株)大成プレハブ(株)の多大な協力を得た。ここに謝意を表する次第である。

参考文献

- [1] 中高層壁式ラーメン鉄筋コンクリート造設計施工指針・同解説、日本建築センター 1997
- [2] 小椋克也、楨谷栄次ほか：機械式鉄筋継手を有するP C a 壁の力学的挙動に関する研究、コンクリート工学年次論文報告集 1992.6
- [3] 鉄筋コンクリート造建物の終局強度型耐震設計指針・同解説、日本建築学会 1990