

論文

[2079] 600キロ級の高強度コンクリートを用いた RC 柱のせん断耐力

桑田裕次^{*1}・中山昭夫^{*2}・南 宏一^{*2}

1. はじめに

本研究は、建設省総合技術開発プロジェクト「鉄筋コンクリート造建築物の超軽量化・超高層化技術の開発」の一環として行われたもので、強度が $\sigma_B=600\text{Kgf/cm}^2$ のコンクリートを用いた鉄筋コンクリート柱のせん断破壊性状を実験的・理論的に検討したものである。本論では破壊モード・履歴曲線・斜張力ひび割れ耐力・終局せん断耐力について実験的に検討し、文献[1]に示される終局耐力式の適合性について検証する。

2. 実験

2.1 実験計画

本実験では、文献[2]に示される1200キロ級のコンクリートを用いた場合と比較検討ができるように実験計画はたてられ、コンクリート強度が 600Kgf/cm^2 となる以外、柱の断面構成および形状寸法や材料強度等は原則的に文献[2]と同じ

である。実験変数は、軸力比 ($n=N/bD\sigma_B$) として2種類 ($n=1/6$ と $1/3$) 選択し、またせん断補強筋比 P_w として2種類 ($P_w=0.53\%$ と 1.19%) およびせん断補強筋の引張降伏強度 σ_{wy} として2種類 ($\sigma_{wy}=3500\text{Kgf/cm}^2$ と 8000Kgf/cm^2 、ただしこの値は計画時の公称値) を選択し、これらを組み合わせて合計8体の試験体を計画した。表-1に実験変数の組合せを示す。なお、文献[2]と同じように本実験でも、せん断補強筋量 $P_w \cdot \sigma_{wy}$ が同一条件で、その補強筋の引張強度 σ_{wy} が異なる場合の影響について検討している。

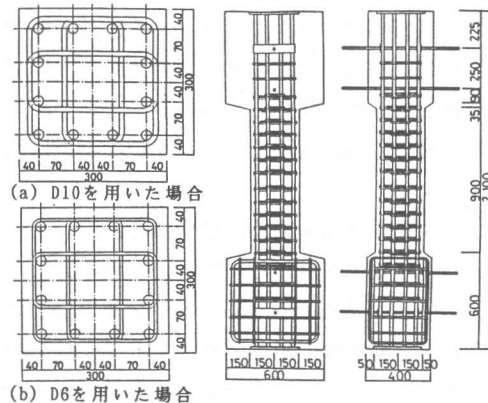
2.2 試験体の形状および材料強度

試験体の断面構成を図-1に、形状寸法を図-2に示す。柱断面は $b \times D = 300\text{mm} \times 300\text{mm}$ であり、柱長さ L は 900mm である。主筋には12-D19 (SD690相当品) を用い、せん断補強筋には D6 および D10 (SD345、SBPR785/930) をそれぞれ用いた。せん断補強筋の配筋は、図-1に示すようにフラッシュバット溶接による閉鎖形の中子筋方式とした。コンクリートの配合設計を表-2に、使用材料の機械的性質を表-3に示す。

表-1 実験変数

試験体名	軸力比	P_w	σ_{wy}	$P_w \cdot \sigma_{wy}$	ϕ
CA06-6-1	1/6	0.53	3500	18.6	D6
CA06-6-2		1.19	3500	41.7	D10
CA06-6-3		0.53	8000	42.4	D6
CA06-6-4		1.19	8000	95.2	D10
CA06-3-1	1/3	0.53	3500	18.6	D6
CA06-3-2		1.19	3500	41.7	D10
CA06-3-3		0.53	8000	42.4	D6
CA06-3-4		1.19	8000	95.2	D10

P_w ; せん断補強筋比 (%), σ_{wy} ; せん断補強筋強度 (kgf/cm^2), $P_w \cdot \sigma_{wy}$; せん断補強筋量 (kgf/cm^2), ϕ ; せん断補強筋の径



(単位: mm)

(単位: mm)

図-1 断面構成

図-2 形状・寸法

*1 福山大学助手 工学部建築学科、(正会員)

*2 福山大学教授 工学部建築学科、工博、(正会員)

砕石は岡山県後月郡産のものを使用し、比重2.70、FMは5.80である。一方、海砂は広島県豊田郡産のものを使用し、比重は2.53、FMは2.75である。なお、混和剤（高性能AE減水剤）を用いて、適正な流動化を図った。

実験材令は151日で、コンクリートの圧縮強度は735kgf/cm²で、その際の歪度はほぼ0.3%であった。

2.3 実験方法

実験は福山大学構造実験室に設置されている建研式加力装置を改良した載荷装置を用いて、正負漸増繰返し逆対称曲げせん断載荷によった。実験装置の載荷能力は圧縮軸力200tf、せん断力は正負とも100tfである。柱材の水平および鉛直変位量は、柱頭と柱脚部に固定した測定枠に変位計（感度100×10⁻⁶/mm）を取り付けて測定した。

載荷プログラムは、文献[2]の実験結果と比較できるようにするために同一のものとし、第1ループが正負両載荷において斜張力ひび割れの発生により制御し、第2ループは変位部材角R=±0.01rad.において変位制御を行った。最終ループはR=0.05rad.まで載荷を行うが、最大耐力の85%までに保有耐力が低下した場合には、その時点で除荷を行った。

3. 実験結果

3.1 破壊状況

図-3に試験体の最終破壊状況のスケッチを示す。表-4に初期ひび割れ荷重、変位部材角R=±0.01rad.における耐力および最大耐力を示す。なお初期斜張力ひび割れおよび最大耐力については、その変位部材角もあわせて示している。各試験体とも、曲げひび割れが生じた後、斜張力ひび割れが生じた。しかしながら最大耐力時の破壊状況は、実験変数によって異なる。Pw・σwyが小さい場合には典型的なせん断破壊の様相を示したが、Pw・σwyが大きい場合には曲げ圧縮域の付着割裂破壊の様相を示した。しかしながら軸力比に対しては、破壊モードに顕著な相違は認められなかった。

3.2 主筋・帯筋のひずみ状況

図-4に主筋および帯筋の応力度推移状況の例として、CA06-6-1とCA06-6-3を示す。図中の○・□および●印は、斜張力ひび割れ発生時・変位部材角R=1%rad.および最大耐力時の応力度を示し、破線は降伏応力度を示す。帯筋の応力度の状況は、配筋される帯筋の形状・方向・機械強度およびせん断補強筋比によって異なるが、軸力比の差異はほとんど認められない。外周帯筋をA筋、

表-2 コンクリートの調査表

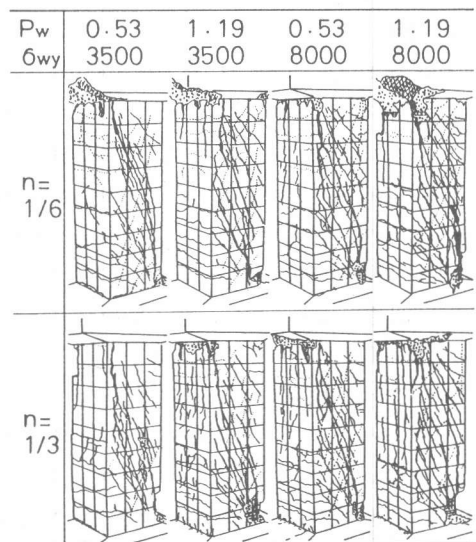
G _{max} (mm)	W/C (%)	スランプ (cm)	空気量 (%)	S/A (%)	単位量 (kg/m ³)				
					W	C	S	G	AD
10	35	22.5	2.6	41.0	194	554	633	972	11.08

表-3 使用材料の機械的性質 (単位: kgf/cm²)

(a) 鉄筋				(b) コンクリート			
種類	σ _y	σ _u	材令	F _c	F _t		
主筋	D19-7000	7565	8360	3日	375		
帯筋	D6-3500	3718	5125	7日	492		
	D10-3500	4134	5795	35日	654	39	
	D6-8000	8921	9321	151日	735	49	
	D10-8000	10740	10915				

F_c: 圧縮強度
F_t: 割裂強度

σ_y: 引降伏強度, σ_u: 最大引張強度



(単位: Pw:%, σ_{wy}:kgf/cm²)

図-3 試験体の最終破壊状況スケッチ

表-4 実験値 (単位: N; tf, Q; tf, R; $\times 10^{-2}$ rad)

試験体名	作用軸力 N	曲げひび割れ		斜張力ひび割れ		R = $\pm 1.0\%$		最大耐力	
		正 Q _F (R _F)	負 -Q _F (-R _F)	正 Q _D (R _D)	負 -Q _D (-R _D)	正 Q _{R1}	負 -Q _{R1}	正 Q _{max} (R _{max})	Q _{max}
CA06-6-1	110	27.20 (0.22)	-27.05 (-0.23)	39.00 (0.47)	-32.95 (-0.43)	46.30	-43.45	46.50 (0.97)	47.57
CA06-6-2	110	27.55 (0.22)	-25.15 (-0.17)	37.50 (0.40)	-37.55 (-0.38)	52.00	-56.25	66.55 (2.06)	68.82
CA06-6-3	110	22.50 (0.19)	-25.05 (-0.16)	35.00 (0.37)	-40.10 (-0.39)	51.80	-52.00	57.00 (1.80)	58.98
CA06-6-4	110	27.45 (0.20)	-27.45 (-0.21)	37.50 (0.35)	-40.00 (-0.43)	55.75	-56.30	70.45 (2.46)	73.16
CA06-3-1	195	42.55 (0.37)	-32.45 (-0.18)	47.45 (0.46)	-42.50 (-0.31)			53.20 (0.67)	54.51
CA06-3-2	195	34.95 (0.27)	-30.10 (-0.18)	45.00 (0.41)	-50.05 (-0.46)	62.05	-65.50	70.65 (2.00)	74.55
CA06-3-3	195	34.95 (0.27)	-45.00 (-0.30)	50.00 (0.54)	-50.10 (-0.40)	57.45	-60.55	58.50 (1.56)	61.54
CA06-3-4	195	39.95 (0.34)	-42.40 (-0.26)	49.95 (0.50)	-52.50 (-0.42)	63.25	-67.95	74.70 (2.56)	79.69

(註) Q_{max}は転倒モーメントの影響を補正した最大耐力

加力方向の中子筋をB筋、加力方向と直交方向の中子筋をC筋とし、加力方向をx方向、加力方向と直交方向をy方向として、最大耐力時のそれぞれの帯筋の応力度についてその特色を述べると、以下のように要約される。

1) A, B筋のx方向の応力度は、6-4と3-4の試験体以外のは全て降伏応力度に達するが、6-4と3-4の試験体は $0.5\sigma_y$ 程度の値にとどまっている。

2) A, B筋のy方向の応力度は、x方向に比べて全試験体とも降伏応力度に達せず、 $\sigma_y/4 \sim \sigma_y/2$ の値をとる。

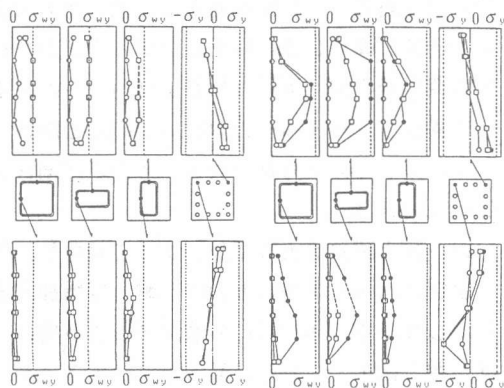
3) C筋のx方向の応力度は全試験体とも降伏応力度に達していない。 $\sigma_{wy}=3500\text{Kgf/cm}^2$ の場合にはPwにかかわらず $0.6\sigma_y \sim 0.8\sigma_y$ で、 $\sigma_{wy}=8000\text{Kgf/cm}^2$ の場合のPw=0.53%のときは $0.3\sigma_y \sim 0.6\sigma_y$ で、Pw=1.19%のときは $0.3\sigma_y$ 程度にとどまっている。

4) C筋のy方向の応力度は、全試験体ともA, B筋のy方向とほぼ同じ値を示し、 $\sigma_y/4 \sim \sigma_y/2$ の値を示す。

3.3 履歴曲線および包絡線

図-5に履歴曲線を示す。縦軸はせん断力Q (tf)を、横軸は変位部材角R ($\times 10^{-2}$ rad.)をそれぞれ示す。図中の▽印は曲げひび割れ発生時を、▼印は斜張力ひび割れ発生時を、M印は最大耐力時をそれぞれ表す。図中の点線はP- δ 効果を示す。また後述の曲げ耐力Q_F、終局せん断耐力として若林・南による耐力Q_M、A法による耐力Q_A、B法によるQ_Bの理論値をそれぞれ示す。図-6に各試験体の正載荷に対する包絡線を示す。履歴曲線および包絡線の比較検討によって次のことが認められた。

1) 同一軸力比においてPw・ σ_{wy} の如何に関わらずそれらの初期剛性には差異が認められない



(a) CA06-6-1の場合 (b) CA06-6-3の場合

図-4 柱筋及び帯筋の応力度分布

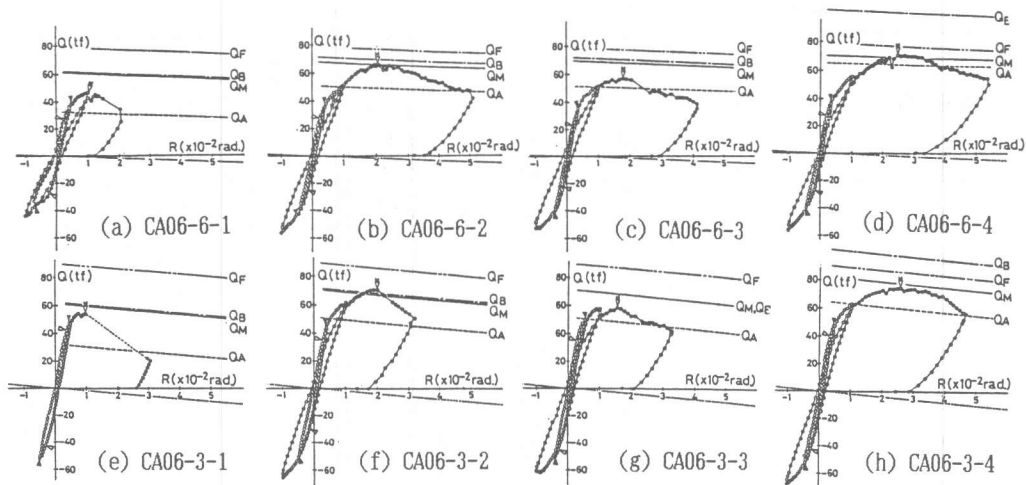


図-5 履歴曲線

が、初期斜張力ひび割れ耐力は、軸力比の大きいものほど高くなる。しかしながら斜張力ひび割れ発生後の剛性は軸力比および $P_w \cdot \sigma_{wy}$ によって異なり、 $P_w \cdot \sigma_{wy}$ の少ないものほど剛性の低下は大きく、軸力比の大きいものほど剛性の低下は大きい。

2) 最大耐力は実験変数によって異なり、 P_w および $P_w \cdot \sigma_{wy}$ が多いものほど耐力は増加する。しかしながら、 $P_w \cdot \sigma_{wy}$ の値が小さい場合には、軸力比が大きいほど最大耐力は大きいが、 $P_w \cdot \sigma_{wy}$ が大きい場合には最大耐力に対して軸力比の影響が小さい。

3) 最大耐力に至るまでの変形量は軸力比と $P_w \cdot \sigma_{wy}$ によって影響を受ける。 $P_w \cdot \sigma_{wy}$ が大きいほど、その変形量は大きくなる。

4) 最大耐力以後の性状は軸力比と $P_w \cdot \sigma_{wy}$ によって影響する。 $P_w \cdot \sigma_{wy}$ が大きくなるほど耐力の低下率は小さく、かつ変形能力は大きくなる。

5) $P_w \cdot \sigma_{wy}$ が等しい場合でも、高強度の補強筋を用いてその径を小さくした場合は、いずれの軸力比に対しても最大耐力が小さくなる。

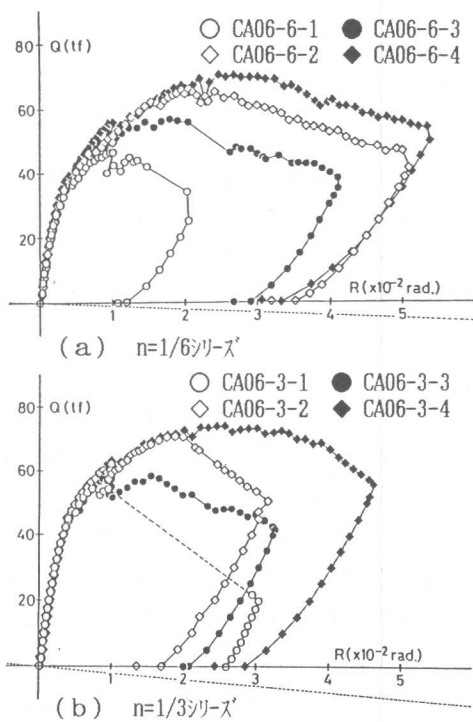


図-6 包絡線

4. 理論解析の検討

4.1 斜張力ひび割れ耐力の検討

図-7に斜張力ひび割れ耐力と軸力比の関係を示す。縦軸はせん断力 Q (tf)を横軸は軸力比 n ($n=N/b \cdot D \cdot \sigma_B$) を表し、図中の○印は実験値を示す。実線は主応力度理論から求めた理論値を

示し、その理論式を式(1)に示す。

$$Q_D = 3 \cdot b \cdot D \{ \sqrt{(\sigma \cdot \sigma_t + \sigma_t^2)} \} / 2 \quad (1)$$

ここに $\sigma = N/b \cdot D$

N: 圧縮力 (正の値)

σ_t : コンクリートの引張強度で、割
裂強度 F_t とする

圧縮力によって斜張力ひび割れ耐力が増加する傾向は、
ほぼ理論値と一致している。しかしその値については、
実験値は理論値に対して70%程度と実験値が小さい値
となるが、その理由は、 σ_t の値として割裂強度
 F_t を用いたことに一因があると考えられる。

4. 2 終局せん断耐力の検討

表-5 に終局せん断耐力に関する実験値と
理論値の比較を示す。なお表中の $P_w \cdot \sigma_{wy}$ の
値は材料強度の実測値に基づく値を、軸力比
n は作用軸力の実測値に基づく値をそれぞれ
示している。

図-8 に終局せん断耐力とせん断補強筋量
 $P_w \cdot \sigma_{wy}$ および作用軸力の関係を示す。縦軸
はせん断力 Q(tf) を、横軸の正側は $P_w \cdot \sigma_{wy}$
を横軸の負側は軸力 N をそれぞれ表す。図中
の○印および□印は実験値を表す。点線は文
献[1] に示されるA法による理論値 Q_A を、1点鎖線は文
献[1] に示されるB法による理論値の
 Q_B を示している。実線は、若林・南理論による理論値 Q_M
を示す。また終局時のコンクリートの
応力度分布を三角形と仮定して、一般化累加強度理論を適用して求めた曲げ耐力 Q_F
をあわせて示している。

$P_w \cdot \sigma_{wy}$ を変数とした場合、A法は $P_w \cdot \sigma_{wy}$ の増加に伴う耐力の増加状況を表している。しか
し、A法は実験値に対して全般的に耐力を低く評価しており、A法には軸力の影響は含まれてい
ない。それに対してB法は実験値に対して高めの値を与えるが、A法と同様に軸力の影響は含ま

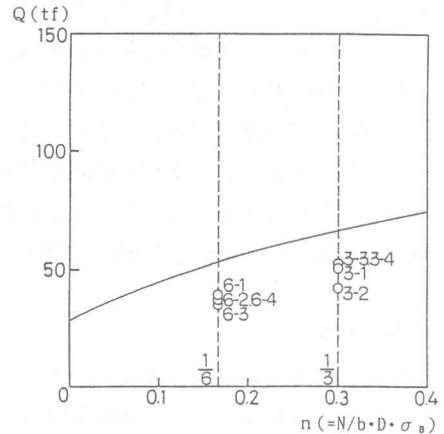


図-7 斜張力ひび割れ耐力と軸力比の関係

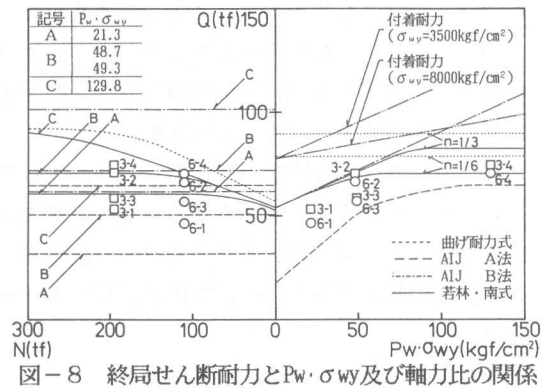


図-8 終局せん断耐力と $P_w \cdot \sigma_{wy}$ 及び軸力比の関係

表-5 実験値と理論値の比較

試験体名	作用軸力 (軸力比)	$P_w \cdot \sigma_{wy}$ (kgf/cm ²)	実験値 \bar{Q} (tf)	曲げ耐力 Q_F (tf)	せん断耐力			付着割裂耐力 藤井・森田式 Q_S (tf)
					若林・南式 Q_M (tf)	AIJ A法 Q_A (tf)	AIJ B法 Q_B (tf)	
CA06-6-1	110 tf (n=0.167)	21.3	47.57	78.76	60.85	32.16	62.02	85.19
CA06-6-2		48.7	68.82		68.34	50.73	71.76	94.94
CA06-6-3		49.3	58.98		68.79	51.00	71.98	84.68
CA06-6-4		129.8	73.16		70.12	64.90	101.84	96.23
CA06-3-1	195 tf (n=0.300)	21.3	54.51	89.83	60.85	32.16	62.02	85.19
CA06-3-2		48.7	74.55		70.78	50.73	71.76	94.94
CA06-3-3		49.3	61.54		71.44	51.00	71.98	84.68
CA06-3-4		129.8	79.69		82.68	64.90	101.84	96.23

れていない。これらに対して、若林・南式は実験値に対して高めの値を与えているが、軸力比および $P_w \cdot \sigma_{wy}$ による耐力の変動状況は、ほぼ対応していることが分かる。

また、図-8に2点鎖線の付着耐力が示されているが、これは異形主筋の付着強度として、藤井・森田式的全割裂のみを考慮した付着割裂耐力である。[4]本試験体では、付着割裂耐力はB法によるせん断耐力を下回る範囲が若干みられるが、A法および若林・南式によるせん断耐力に対して全範囲で上回っており、付着割裂破壊を生じない結果となっている。なお、主筋重心間距離としては、2段配筋を等価な1段配筋として求めた値を用いている。

5. 結論

1) 600Kgf/cm²級の高強度コンクリートを用いたRC柱部材のせん断耐力は、 $P_w \cdot \sigma_{wy}$ の増加に伴い大きくなるが、その増加率は $P_w \cdot \sigma_{wy}$ の増加に対して小さくなる。また作用軸力の影響は、 $P_w \cdot \sigma_{wy}$ の小さい場合には生じるが、大きい場合には顕著な相違は生じない。

2) $P_w \cdot \sigma_{wy}$ は同じ量であっても、せん断補強筋の引張強度によって終局せん断力は異なり、 σ_{wy} を高強度としてその径を小さくしたものは、逆のものとは比べてせん断耐力は小さくなる。

3) 600Kgf/cm²級の高強度コンクリートを用いたRC柱部材の斜張力ひび割れ耐力を主応力度理論式で評価する場合、実験変数に対する耐力の性状はほぼ評価できるが、その数値については実験値の方が理論値に対して70%程度低い。

4) 実用的なせん断耐力式であるA法およびB法で検討する場合、実験値に対してA法は低くB法は高い値を与えるが、A法とB法では軸力が考慮できないので、実用的な形で軸力の効果を導入する手法を更に検討する必要がある。なお、終局せん断耐力を若林・南式で検討する場合、実験変数に対する耐力の性状はほぼ評価できるが、その値については理論値の方が高い傾向を与える。

謝辞

本研究は、建設省総合技術開発プロジェクト「鉄筋コンクリート造建築物の超軽量化・超高層化技術の開発」(委員長 青山博之東大教授)の一環として行われた。本実験の実施にあたり、せん断補強筋のフラッシュバット溶接加工では㈱諏訪熔工に、コンクリート調合では㈱中国宇部生コンに、コンクリート打設では㈱前田組にご尽力を頂きました。また、実験装置の製作にあたっては㈱奥田にご協力を頂きました。また、本研究は谷口徹(現、オリエンタル建設)および南本敏宏(現、前田建設工業)両君の1991年度福山大学工学部建築学科の卒業研究として行われた。ここに記して、各位に心より謝意を表します。

参考文献

- [1] 日本建築学会：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、1990.11
- [2] 中江晃彦・倉本洋・南宏一：1200kgf級のコンクリートを用いたRC柱部材のせん断破壊性状、コンクリート工学年次論文報告集、第12巻、第2号、PP.357-362、1990.6
- [3] 若林実・南宏一：コンクリート系構造部材のせん断強度について、京都大学防災研究所年報、第24号B-1、PP.245-277、1981.4
- [4] 藤井栄：鉄筋コンクリートにおける付着・定着特性とその部材性能に及ぼす影響に関する研究、京都大学学位請求論文、1992.1