

論文

[2071] RC部材における中間主筋の座屈性状に関する実験的研究

加藤大介*1・大矢廣之*2

1. まえがき

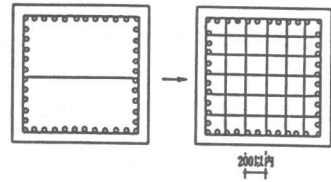
日本建築学会の鉄筋コンクリート(RC)造建物の終局強度型耐震設計指針(学会指針)[1]では、主筋の座屈防止の観点からの横補強筋の配筋規定が定められている。図1(a)(b)は、学会指針に示されている設計例2の柱の配筋決定例である。特別ヒンジ領域の構造規定のために、せん断と付着の規定により決定された必要量(図1(a))以上の横補強筋(図1(b))が要求されていることが分かる。この規定は、ニュージーランドのコンクリート構造設計基準(NZS3101)[2]を参考にして、主に主筋の座屈防止の観点から定められている規定であるが、「拘束されている主筋から200mm以内にある主筋を除き、全ての主筋を拘束する」というものである。このように、実際の配筋決定における座屈防止筋規定の影響は非常に大きい。一方、これらの構造規定の考え方やその背景は曖昧である。

筆者らは、座屈防止筋の設計法を確立することを目的とし、正方形横補強筋により拘束されたRC角柱試験体(主筋4本)の一方向単軸圧縮実験を行い、隅角部の主筋の座屈歪度の評価式を提案してきた[3]。しかし、実際の設計においては、図-1に示したように、隅角部以外の中間の主筋の扱いがより重要となる。そこで、本研究では、中間主筋の座屈歪度を実験的に求めることを目的に、正方形横補強筋および中子筋により拘束されたRC角柱試験体(主筋8本)の一方向単軸圧縮実験を行った。特に、中子筋の有無を主要なパラメータとした。

2. 中間主筋の単調載荷座屈実験

2.1 実験概要

主筋の座屈を考える際に、主筋の径の他に横補強筋の径と間隔および中子筋の有無が重要な因子となる。本節ではこの観点から主筋と横補強筋の配筋法をパラメータにした実験を計画した。表-1に計画した試験体名を主筋と横補強筋の配筋法別に示す。主筋の配筋法は3通り(内1つは主筋の無いものと考えている4-φ4あるいは8-φ4)を想定した。横補強筋は径と間隔について4通りとし、それぞれについて中子筋の有無をパラメータとして計8通り想定した。以上の24通りのうち20体の実験を行った。試験体の名前は、例えば8D10D6S70Tは、主筋にD10を8本、横補強筋にD6を用い間隔を70mmとし、中子筋(Tie)を用いたものを意味する。同図には使用した鉄筋とコンクリートの強度、および、軸歪度の測定区間の間隔も示した。図-2の右側に試験体8D10D6S47の配筋と主筋の歪ゲージ位置を示す。試験体は15x15x53cmの角柱、加力方法は両端固定の軸方向



主筋:44-D29 帯筋:D16-3x2-φ100 (a) 指針のせん断と付着規定による必要量
主筋:44-D29 帯筋:D13-7x7-φ100 (b) 指針の構造規定による必要量

図-1 学会指針設計例2, C₁柱の横補強筋の決定例

*1 新潟大学助教授 工学部建設学科、工博(正会員)

*2 新潟大学大学院 工学部建設学科

単調載荷、軸方向変形の測定は2面の側面で計4箇所で電気式変位計にて行った。なお、試験体の形状と加力方法は文献[3]で示した単調加力シリーズと全く同じである。

2. 2 実験結果およびその整理

図-2に試験体8D10D6S47の主筋の座屈形状および隅角部の主筋の歪度（各位置の表裏に貼付した2枚の平均）の分布を示す。この試験体はC～Fの3,4区間で座屈を生じており、この座屈区間で主筋の歪が大きくなっていることがわかる。次に、図-3(a)(b)に横補強筋がD6で間隔47mmのシリーズの軸方向力-測定区間の平均軸歪度の関係を示す。図(a)が中子筋が無く主筋の有無のみが異なる試験体、図(b)が中子筋が有り主筋の有無のみが異なる試験体である。これらのデータを用いて文献[3]で示した方法により各試験体の主筋の応力度-歪度関係を推定した。すなわち、まず主筋の有無のみが異なる試験体の軸方向力の差を主筋の負担分とし、全主筋の断面積で除して主筋の平均軸応力度とした。次に、座屈区間以外の主筋の歪度を歪ゲージの値より推定し、測定区間の平均軸歪度を座屈区間内の軸歪度に修正した。なお、座屈区間は座屈が横補強筋間隔の何倍かを示しているもので、実験後目視により決定したものを、表-2(a)の()内に示す。隅角部の主筋と中間主筋で座屈区間が異なっている場合には大きい方を採用した。本手法による修正例を図-4(a)(b)に示す。図(a)は中子筋の無い試験体8D10D6S47であるので、隅角部の主筋と中子筋の無い無拘束中間主筋の平均的な挙動を表していることになる。同様に、図(b)は中子筋の有る試験体8D10D6S47Tであるので、隅角部の主筋と中子筋の有る拘束中間主筋の平均的な挙動を表していることになる。

図-4の修正結果をみると、抽出された主筋の応力度-歪度関係には降伏点がみられるが、この降伏応力度は必ずしも引張試験から得られた降伏応力度（図中破線参照）と一致しない。これは主筋のある試験体と主筋のない試験体の差をとるときの誤差であると考えられる。しかし、明確な降伏点がみられるので、この降伏応力度を基本にして

座屈点を定義した。すなわち、降伏後に歪硬化域に入り、再び降伏点に達した点を座屈点とした。図中の○が座屈点となり、このときの軸歪度を座屈歪度 ϵ_{BUC} と

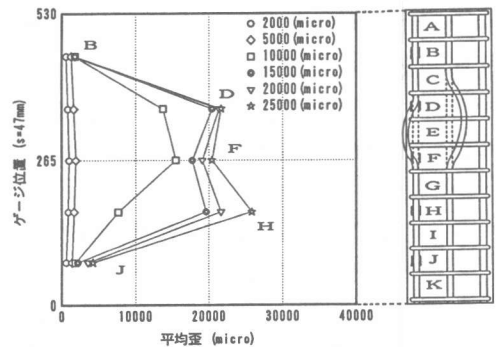


図-2 試験体の配筋と座屈形状および主筋の歪度の分布の例（試験体8D10D6S47）

表-1 試験体のパラメータと名称および材料強度

		主筋の配筋法			横補強筋降伏応力度 (Kgf/cm ²)	コンクリート σ_B (kgf/cm ²)	軸歪度測定間隔 (mm)
		8-D13	8-D10	8- ϕ 4 or 4- ϕ 4			
横補強筋の配筋法	2-D6-S70	—	8D10D6S70	4 ϕ 4D6S70	4000	269	300
	3-D6-S70	—	8D10D6S70T	8 ϕ 4D6S70T			
	2-D6-S47	8D13D6S47	8D10D6S47	4 ϕ 4D6S47	6842	265	360
	3-D6-S47	8D13D6S47T	8D10D6S47T	8 ϕ 4D6S47T			
	2- ϕ 4-S47	—	8D10 ϕ 4S47	4 ϕ 4 ϕ 4S47	283	360	
	3- ϕ 4-S47	—	8D10 ϕ 4S47T	4 ϕ 4 ϕ 4S47T			
2- ϕ 4-S35	8D13 ϕ 4S35	8D10 ϕ 4S35	4 ϕ 4 ϕ 4S35	268	350		
3- ϕ 4-S35	8D13 ϕ 4S35T	8D10 ϕ 4S35T	4 ϕ 4 ϕ 4S35T				
主筋降伏応力度 (kgf/cm ²)		3425	3860	6842			
主筋破断応力度 (kgf/cm ²)		4910	5330	7564			

した。隅角部と中間主筋の平均的な座屈歪度の実験値を座屈区間 N_B とともに表-2(a)にまとめた。

次に、本報告の結果より隅角部の主筋のみのデータを差し引くことにより、隅角部の主筋と中間主筋に分離することを試みる。なお、隅角部の主筋のみの挙動は文献[3]で求められているが、本報告と文献[3]の材料強度が多少異なること、および、隅角部と中間主筋のそれぞれの挙動の和が全体の挙動になるわけではないこと等の問題があるので、結果は必ずしも信頼性の有るものではないことに注意を要する。図-5は横補強筋がD6S47シリーズの中間主筋単独の応力度-歪度関係であるが、図(a)が文献[3]で得られた隅角部の主筋の挙動、図(b)が中子筋に拘束されない中間主筋、図(c)が中子筋に拘束される中間主筋の挙動である。隅角部の主筋と中子筋により拘束されない主筋の挙動はあまり差が無いが、中子筋により拘束される主筋の座屈歪度は他の2つに比べ非常に大きくなるのが分かる。これらのデータに関しても座屈歪度を定めた。その結果を表-2(b)に示す。

3. 実験結果の考察

3.1 隅角部の主筋の座屈歪度 (ϵ_{BUC}) の評価モデル (文献[3])

文献[3]による座屈モデルを図-6に示す。このモデルは横補強筋の数区間にわたって座屈が生じる場合の挙動を評価することに重点をおいたモデルであり、座屈歪度 ϵ_{BUC} の推定式を式(1)で与えている。ただし、式(1)は座屈区間 N_B の関数となっているので、 N_B に対する最小値が求める座屈歪度となる。また、最大の座屈長さ(座屈区間 \times 横補強筋間隔)は断面せいと実験で得られた座屈長さの大きい方と

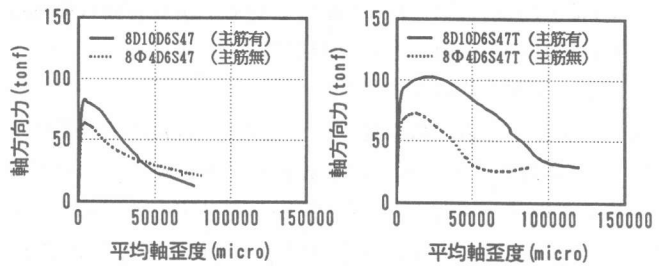


図-3 横補強筋がD6S47シリーズの荷重-測定区間平均軸歪度

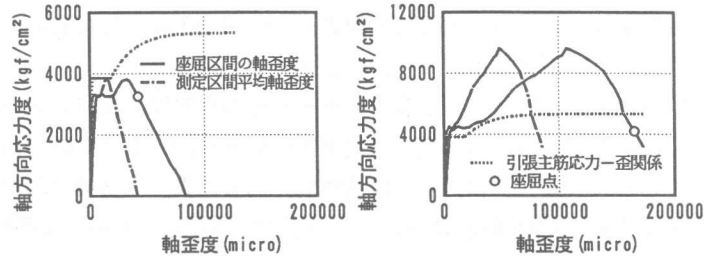


図-4 横補強筋がD6S47シリーズの主筋の挙動の抽出例と座屈歪度の定義

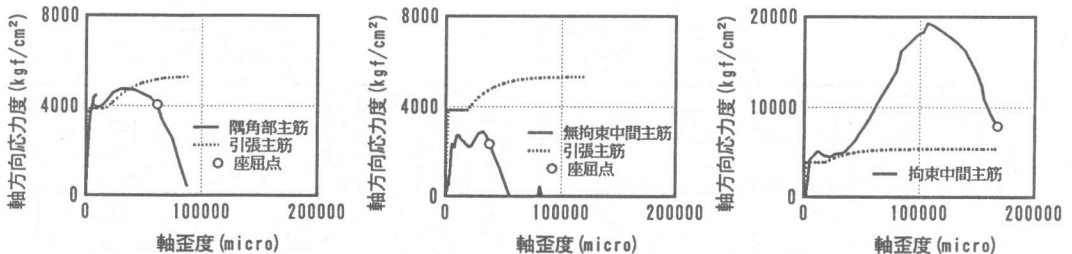


図-5 横補強筋がD6S47シリーズの主筋単独の応力度-歪度関係

している。なお、式(1)は隅角部の主筋を対象にした式であり、有効な横補強筋の径 (ϕ_{we}) は、断面積から逆算される横補強筋の平均的な直径としている。

$$\varepsilon_{BUC}(N_B) = \varepsilon_{ER} + \varepsilon_H + \varepsilon_B(N_B) \quad (1)$$

$$\varepsilon_{ER} = 10 \cdot \varepsilon_y \quad \varepsilon_H = 0.00173 \cdot \sigma_{cr} - 0.0661 (\geq 0) \quad (\sigma_{cr} \text{の単位はtf/cm}^2)$$

$$\varepsilon_B(N_B) = [2 / (3 \cdot N_B \cdot a_x \cdot \alpha) \cdot \{ \gamma_1 \cdot g(N_B) - 1 \}]^2$$

$$\sigma_{cr} = (\pi^2 \cdot E_s) / (4 \cdot N_B^2 \cdot \alpha^2) \quad f(N_B) = \begin{cases} (N_B^2 - 1) / N_B & N_B: \text{奇数} \\ (N_B^2 + 2) / N_B & N_B: \text{偶数} \end{cases}$$

$$g(N_B) = 1 + (\pi \cdot a_x \cdot f(N_B) \cdot N_B \cdot \alpha \cdot \beta^2 \cdot \gamma_2) / 16$$

ここで、 $\alpha = S / \phi_h$ $\beta = \phi_{we} / \phi_h$ $\gamma_1 = \sigma_m / \sigma_y$ $\gamma_2 = \sigma_{wy} / \sigma_y$
 $a_x = 0.65$ (主筋のN-M関係の係数)

であり、また、 ε_y は主筋の降伏歪度、 E_s は鉄筋ヤング係数、 ϕ_h は主筋径、 σ_y は主筋降伏応力度、 σ_m は主筋最大応力度、 ϕ_{we} は主筋にかかる有効な横補強筋の径、 σ_{wy} は横補強筋の降伏応力度、 S は横補強筋間隔、 N_B は座屈区間である。

3. 2 中間主筋のモデル化

図-7は実験から得られた座屈時歪度と式(1)による計算値を比較したものである。図(a)は文献[3]の試験体のうち今回の横補強筋と主筋の組み合わせが同じもの、図(b)が隅角部の主筋と中間主筋の平均値、図(c)が中間主筋のみを抽出したものである。図(b)(c)は中子筋の有無別に示してある。中子筋の無い中間主筋は隅角部主筋より座屈歪度実験値が小さく、中子筋のある中間主筋は相当大きいことがわかる。図-8は全主筋が8本(隅角部4本、無拘束中間主筋4本)の断面での横補強筋による主筋への拘束効果を表したモデルである。図(a)は一方向で力の釣合を考えたモデル、図(b)は横補強筋が膨らんで正多角形になったときのモデルであり、それぞれのモデルの主筋1本当当たりの平均的な拘束力Cは、図の下に示したものとなる。なお、式には中子筋の有る場合にも適用できるように表示してある。

図-9の一方向モデルと多角形モデルを表す線は、図-8の2つのモデルを用い、中間主筋の数と1本の主筋にかかる平均的な拘束力の関係を図示したものである。ただし、中子筋の拘束比 ν は1とした(隅角部に対する横補強筋と同じ効果)。横軸は断面1辺の中間主筋の数(図-8のような全主筋が8本の断面なら1)で、縦軸は1本の主筋にかかる平均的な拘束力を隅角部のみに主筋がある場合の拘束力で基準化して示したものである。隅角部を対象にした式(1)のモデルは、横補強筋からの拘束力として横補強筋1本分降伏力を与えているので、図-9の縦軸は中間主筋が有る場

表-2 座屈歪度の実験結果のまとめ
 (a)隅角部主筋と中間主筋の平均値 (b)中間主筋単独

		主筋の配筋		
		D13	D10	
横補強筋の配筋	中子筋無	D6-S70	-	86500 (1.2)
		D6-S47	73600 (4,5)	40900 (3,4)
		Φ4-S47	-	19200 (4,5)
	中子筋有	Φ4-S35	46500 (6)	31800 (5)
中子筋有	中子筋無	D6-S70T	-	104500 (1)
		D6-S47T	114000 (3)	162700 (3)
		Φ4-S47T	-	105500 (3)
		Φ4-S35T	58200 (6)	68000 (4)

単位: micro、()内は隅角部と中間主筋の座屈区間数

		主筋の配筋		
		D13	D10	
横補強筋の配筋	中子筋無	D6-S70	-	85500 (1)
		D6-S47	97000 (4)	38800 (3)
		Φ4-S47	-	17000 (4)
	中子筋有	Φ4-S35	15800 (6)	32300 (5)
中子筋有	中子筋無	D6-S70T	-	115500 (1)
		D6-S47T	126000 (3)	168200 (3)
		Φ4-S47T	-	132700 (3)
		Φ4-S35T	62300 (6)	66000 (4)

単位: micro、()内は座屈区間数

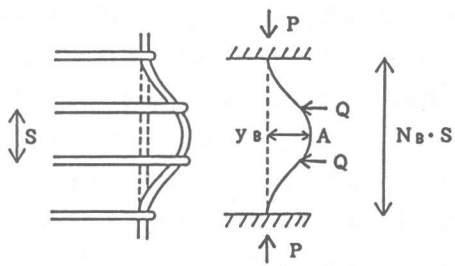
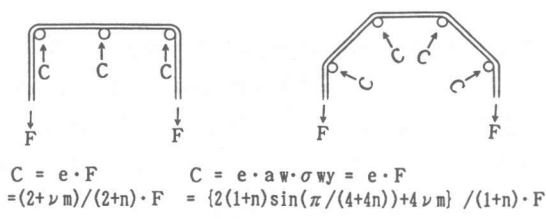


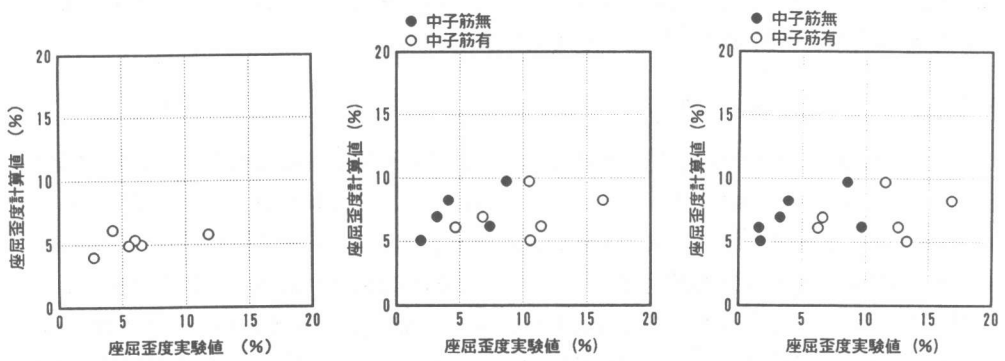
図-6 主筋の座屈モデル (文献 [3])
(3区間座屈の例)



C: 主筋一本当たりの横補強筋からの平均拘束力
 F: 横補強筋1本の降伏力 (= $a_w \cdot \sigma_{wy}$)
 e: 全主筋に対する1本あたりの平均的な横補強筋の拘束比
 a_w, σ_{wy} : 1本の横補強筋の断面積と降伏応力度
 n: 断面1辺の中間主筋の総数
 m: 中間主筋数nのうち中子筋により拘束されている主筋数
 ν : 拘束されている中間主筋1本に対する横補強筋の拘束比

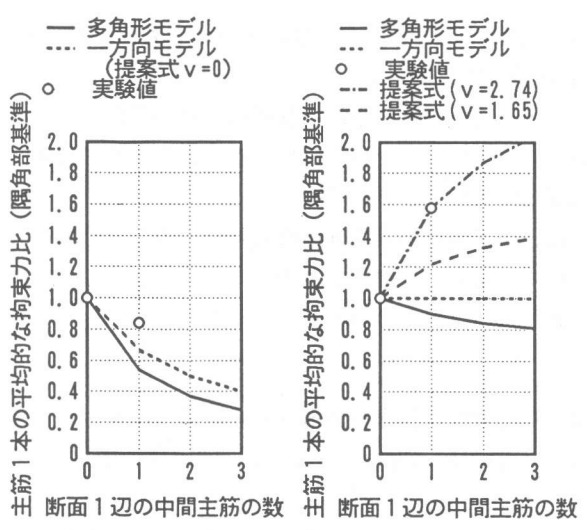
(a) 一方向モデル (b) 多角形モデル

図-8 主筋を拘束する横補強筋のモデルと拘束力
(図は中子筋の無い場合、 $n=1, m=0$)



(a) 隅角部主筋 (文献 [3]) (b) 隅角部主筋と中間主筋の平均 (c) 中間主筋のみを抽出

図-7 座屈時歪度の実験値と計算値の比較



(a) 中子筋の無い場合 (b) 中子筋の有る場合

図-9 横補強筋の有効断面積比の実験とモデルの比較

- 拘束中間主筋 (横補強筋有効断面積比1.52)
- 無拘束中間主筋 (同 0.72)
- ☆ 隅角部主筋 (同 0.92)
- ▲ 隅角部主筋+無拘束中間主筋 (同 0.77)
- △ 隅角部主筋+拘束中間主筋 (同 1.45)

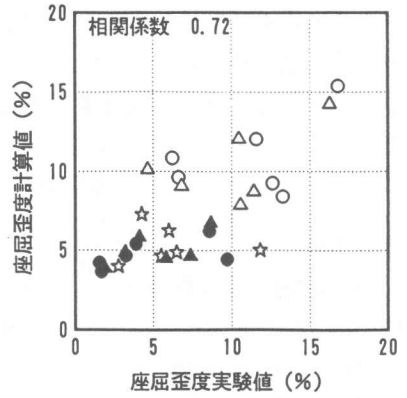


図-10 横補強筋の有効断面積を変えた場合の座屈時歪度の実験値と計算値の比較

合の主筋1本にかかる横補強筋の有効断面積比と言い代えることもできる。図-9には実験値も○で示してあるが、これは実験値によく一致する有効横補強筋断面積を、式(1)を用いて逆算したものである。すなわち、図-8で示した5つのグループ(表(a)と表(b)(c)については中子筋有り無しそれぞれ2つ)別に、それぞれ有効断面積比を変えて座屈歪度の計算を行い、計算値と実験値の差の2乗が最小となるものを選定した。結果は図-10中に示してあるが、このうち、隅角部と中間の主筋の平均的な値を隅角部の値で除したものが、図-9の○となる。なお、図-10は、それぞれのグループに最適な有効面積比を用いた場合の座屈歪度を、実験値と計算値で比較したものである。

図-9をみると、中子筋が無いものの実験値は、一方向モデルで表すことができることがわかる。一方、中子筋があるものは実験値が1以上になり、これらのモデル($\nu=1$)では追跡できない。これは中子筋による拘束効果が、隅角部の主筋に対する通常の横補強筋より大きいことを意味している。前述した図-10の検討では、中子筋により拘束される中間主筋単独の有効断面積比 ν は1.65(隅角部に対する比)となるが、中間主筋と隅角部主筋の平均的な有効断面積比 e (隅角部比)は1.58となり、これから ν を逆算すると ν は2.74となる。そこで、一方向の拘束モデルの式として、式(2)を提案した(図-8の一方向モデルの式と同一)。

$$C = e \cdot F = (2 + \nu \cdot m) / (2 + n) \cdot F \quad (2)$$

ここで、 C は主筋1本当たりの平均的な拘束力、 F が横補強筋1本の降伏力、 n は断面1辺の中間主筋の数、 m は n のうち中子筋により拘束されている数、である。隅角部のみに主筋がある場合は $C = F$ となるので、 e は平均的な横補強筋の有効断面積比となる。一方、 m にかかる係数 ν が個々の中子筋の隅角部に対する有効断面積比であり、中子筋の効果といえる。本論文では ν として1.6~2.7程度とする。 ν を1.65および2.74としたときの、式(2)より求められた有効断面積比を図-9(b)に示しておく。具体的な(1)式への適用法は有効断面積比 e を用いて横補強筋の直径を低減し(あるいは増大し)、 ϕ_{we} を計算することになる。

4. まとめ

正方形横補強筋および中子筋により拘束された主筋を有するRC角柱試験体の一方向単軸圧縮実験を行い、主筋の座屈歪度を実験的に求め、以下の結論を得た。

- (1) 中子筋に拘束されない中間主筋がある場合、全主筋に対する平均的な横拘束筋の効果は、横補強筋による拘束効果が全主筋に平均的に作用すると考えてよい(式(2))。また、その時の座屈歪度は、有効断面積比 e を用いて、式(1)で計算することができる。
- (2) 中子筋に拘束される中間主筋がある場合には、中子筋の効果を外周の横補強筋の効果の1.6~2.7倍として評価し、全横補強筋の効果が全主筋に平均的に作用すると考えてよい(式(2))。また、その時の座屈歪度は、有効断面積比 e を用いて、式(1)で計算することができる。

[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年
- [2] New Zealand Standard：Code of Practice for The Design of Concrete Structures (NZS 3101), 1982
- [3] 加藤大介：鉄筋コンクリート部材の主筋の座屈性状に関する研究、日本建築学会構造系論文報告集、NO. 436、pp. 135-143、1992