

配筋詳細が鉄筋コンクリート部材の変形性能におよぼす影響

田所 敏弥* 中田 裕喜* 谷村 幸裕*

**The Influence of the Details of Reinforcement Arrangement on
Deformation Performance of Reinforcement Concrete Members**

Toshiya TADOKORO Yuki NAKATA Yukihiro TANIMURA

In the design of RC members, the reinforcement arrangement method is specified as a part of structural reinforcement details, because it is a precondition for application of design method. However when the reinforcement arrangement method is applied to the members of small sections, it is difficult for the method to be applied properly, because it is proposed for the members of comparatively large sections. So in this study, we carried out loading tests and analysis for the specimens of various reinforcement arrangements, such as various diameters and spacing of reinforcement. Then we made clear the influence of the details of reinforcement arrangement on deformation performance of RC members. Moreover we proposed a reasonable reinforcement arrangement method from the aspect of the buckling of reinforcement bars based on the mechanical theory.

キーワード：配筋，変形性能，座屈，鉄筋間隔，細長比，構造細目

1. はじめに

構造物の耐震設計においては、構造物を適切にモデル化し、設計地震動に対する応答が限界値に達しないことを照査する。また、コンクリート構造物のモデル化は、構造要素である鉄筋コンクリート（以下、RC）部材のひび割れ、鉄筋降伏および鉄筋座屈等の非線形性を適切に考慮しなければならない。このような部材のモデル化に関する研究^{1), 2)}は、これまでに数多く行われているが、荷重低下に支配的な座屈に影響をおよぼすと考えられる軸方向鉄筋や帯鉄筋の径や間隔などの配筋詳細については、その影響が指摘されているものの、定量的な評価に至っていないのが現状である。

ラーメン高架橋柱を対象とした実大レベルの荷重試験より提案された鉄道構造物等設計標準・同解説（コンクリート構造物）³⁾（以下、コンクリート標準）における変形性能算定式¹⁾では、配筋詳細の影響が考慮されていないが、変形性能算定式の適用にあたっては、帯鉄筋の間隔等に関する構造細目を遵守するため、RC部材においては所定の性能が担保される。しかしながら、現行の設計法で想定している部材断面より小さい断面に適用する場合には、検討が十分でなく、また、施工性の観点から不合理となる場合がある。したがって、配筋詳細の影響を変形性能算定式、あるいは構造細目におい

て適切に考慮することにより、合理的なRC部材の設計が可能になると考えられる。

本研究では、RC部材の変形性能に大きな影響をおよぼす軸方向鉄筋の座屈に着目し、配筋詳細がRC部材の変形性能におよぼす影響について検討した。具体的には、軸方向鉄筋や帯鉄筋の径や間隔をパラメータとした座屈解析および正負交番荷重試験を行い、配筋詳細がRC部材の変形性能におよぼす影響を示した。さらに、これらの検討結果から、変形性能算定式を適用するにあたって遵守すべき構造細目について、再検討した。

2. 軸方向鉄筋の座屈に関する解析的検討

2.1 解析概要

RC部材の変形性能に支配的な現象である軸方向鉄筋の座屈におよぼす配筋詳細の影響を検討するため、軸方向鉄筋や帯鉄筋の径や間隔をパラメータとした座屈解析を行った。ここでは、鉄筋単体の座屈強度や座屈モードにおよぼす配筋詳細の影響を把握することを目的に鉄筋単体による座屈解析を行った。そのため、繰返し荷重を受けるRC部材の塑性ヒンジ部における軸方向鉄筋の曲率および、かぶりコンクリートの影響については、考慮しないこととした。

2.2 帯鉄筋間隔に関する座屈解析

帯鉄筋間隔の影響について検討するため、帯鉄筋間隔

* 構造物技術研究部 コンクリート構造研究室

特集：構造物技術

を鉄筋長さとした軸方向鉄筋の座屈解析を行った。解析は、既往の研究⁴⁾を参考に、両端固定支持のはり要素に解析結果に影響をおよぼさない程度の微小不整力を作用させた状態で、軸圧縮方向の漸増変位を作用させた。

座屈解析から得られた平均応力-平均ひずみ関係の例を図1に示す。図1より、有効細長比の減少にしたがって、座屈強度とともに座屈時のひずみが増加していることがわかる。また、有効細長比と座屈強度の関係を図2に示す。図2より、有効細長比が大きい領域では、最大荷重はEulerの座屈強度に一致し、有効細長比が小さい領域では、式(1)に示すEmgesserによる接線係数理論⁵⁾にしたがって求めた座屈強度 σ_{cr} に近い値になることがわかる。

$$\sigma_{cr} = \frac{\pi^2 E_t}{(l/r)^2} \dots\dots\dots(1)$$

ここで、 E_t ：接線係数 (= $d\sigma/d\varepsilon$)
 l/r ：有効細長比

接線係数 E_t は、既往の研究⁶⁾を参考に、大ひずみ領域における交番載荷時の平均剛性として、Bauschinger効果を考慮した図3に示す割線剛性 E_B を用いた。 E_B は、式(2)により算定した。

$$E_B = \frac{E_0}{6} \log_{10}(10\varepsilon_p) \dots\dots\dots(2)$$

ここで、 E_0 ：弾性剛性

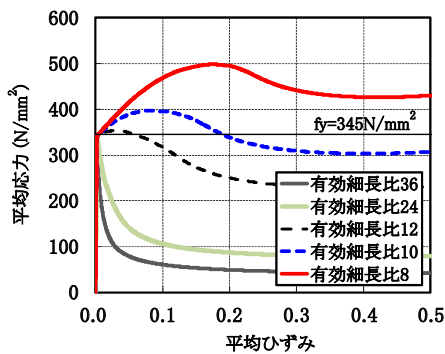


図1 平均応力-平均ひずみの関係

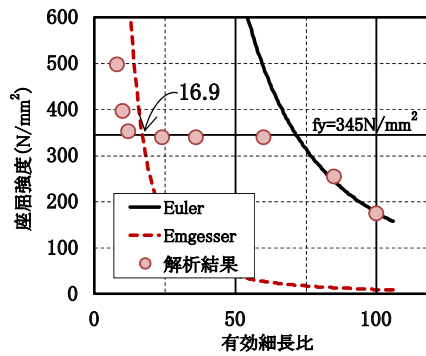


図2 座屈強度-有効細長比の関係

表1 座屈解析による鉄筋の変形図 (変形倍率10倍)

	帯鉄筋			
	D10	D13	D16	D19
軸方向鉄筋D16				
	多区間座屈		単区間座屈	

ε_p ：塑性ひずみ

なお、塑性ひずみ ε_p は、正負交番載荷試験において測定した終局時の軸方向鉄筋のひずみから $\varepsilon_p = 0.05$ とした。このとき、割線剛性 E_B は、 10.0 (kN/mm^2)となる。

図2より、式(1)および式(2)より求めた座屈強度が降伏強度と一致する有効細長比16.9以下において、座屈強度が急増することがわかる。このことから、両端固定を仮定した有効細長比16、つまり細長比32以下の場合には、座屈に対する抵抗が大きくなると考えられる。このため、RC部材においては、帯鉄筋間隔が細長比32より小さい場合には、座屈強度が小さい図4(b)に示すような複数の帯鉄筋間隔にわたる座屈モード(以下、多区間座屈)となる。一方、帯鉄筋間隔が細長比32より大きい場合には、座屈強度の増加がないため、図4(a)に示すような単一の帯鉄筋間隔内の座屈モード(以下、単区間座屈)となる。

2.3 帯鉄筋径に関する座屈解析

軸方向鉄筋と帯鉄筋の径をパラメータにした座屈解析を行い、鉄筋径と座屈モードの関係について検討した。解析モデルを図5に示す。軸方向鉄筋は両端固定支持とし、軸方向鉄筋と帯鉄筋の中央位置の節点を剛ばねで結合した。このため、座屈による軸方向鉄筋の面外方向変位に対して、帯鉄筋が抵抗することになる。また、鉄筋

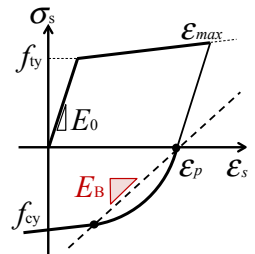


図3 割線剛性 E_B の算定

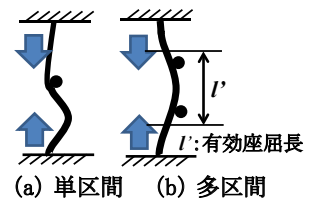


図4 鉄筋の座屈モード

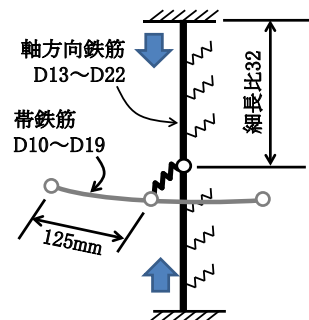


図5 解析モデル

表2 試験パラメータ

	径 - 間隔	軸方向鉄筋				<i>S/d</i>	
		鉄筋比 %	D13 @ 50	D16 @ 100	D19 @ 150		D22 @ 300
帯鉄筋	径 - 間隔	鉄筋比 %	0.63	0.57	0.61	0.55	
	D10 @ 65	0.55	—	—	No.1	—	0.19
	D13 @ 110	0.58	No.8	No.9	No.2	—	0.31
	D16 @ 175	0.57	No.5	No.6	No.3	No.7	0.50
	D19 @ 250	0.57	—	—	No.4	—	0.71

S: 帯鉄筋の間隔, d: 有効高さ
 なお, 軸方向の鉄筋比は引張鉄筋比,
 「—」は試験体なし

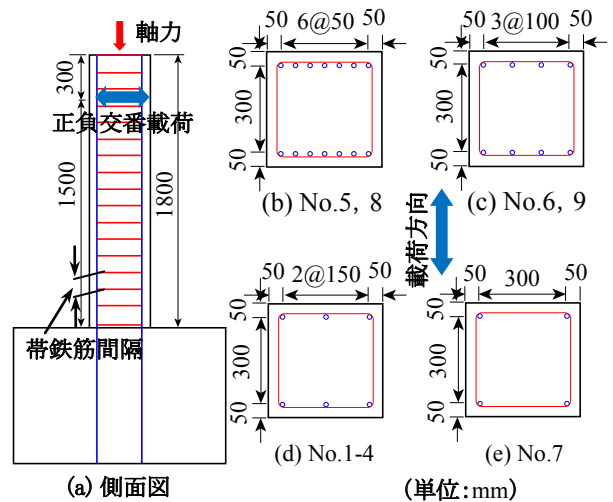


図6 試験体寸法

表3 試験体諸元および材料試験結果

No.	f_c (N/mm ²)	E_c (kN/mm ²)	軸方向鉄筋				帯鉄筋			
			径-間隔 (mm) 一本数	f_{sy} (N/mm ²)	E_s (kN/mm ²)	p_t (%)	径-間隔	f_y (N/mm ²)	E_w (kN/mm ²)	p_w (%)
1	33.2	27.0	D19 - 150 - 6	386	187	0.61	D10 - 65	375	182	0.55
2	35.5	28.0	D19 - 150 - 6	386	187	0.61	D13 - 110	378	190	0.58
3	27.9	25.2	D19 - 150 - 6	377	198	0.61	D16 - 175	356	189	0.57
4	36.5	28.5	D19 - 150 - 6	386	187	0.61	D19 - 250	386	187	0.57
5	33.4	27.6	D13 - 50 - 14	370	198	0.63	D16 - 175	356	189	0.57
6	30.5	26.7	D16 - 100 - 8	382	194	0.57	D16 - 175	356	189	0.57
7	33.4	28.1	D22 - 300 - 4	379	192	0.55	D16 - 175	356	189	0.57
8	32.5	25.2	D13 - 50 - 14	376	182	0.63	D13 - 110	372	179	0.58
9	37.6	27.4	D16 - 100 - 8	398	199	0.57	D13 - 110	367	190	0.58

f_c : コンクリートの圧縮強度, E_c : コンクリートのヤング率, f_{sy} : 軸方向鉄筋の降伏強度, E_s : 軸方向鉄筋のヤング率,
 p_t : 引張鉄筋比, f_{wy} : 帯鉄筋の降伏強度, E_w : 帯鉄筋のヤング率, p_w : 帯鉄筋比

のモデル化には、ひずみ硬化を考慮した。さらに、鉄筋とコンクリートの間は、圧縮に対しては十分に大きな剛性、引張に対しては、微小な剛性を設定し、鉄筋がコンクリートにめり込まないようにした。なお、荷重は鉄筋単体の座屈解析と同様の漸増変位を作用させた。また、帯鉄筋間隔は座屈強度が急増する特異点である細長比32となる長さとし、帯鉄筋の支点間距離は250mmとした。

解析結果の例として、軸方向鉄筋 D16 の結果を表1に示す。ここでは、すべての鉄筋で座屈が生じた平均ひずみ0.01に達する時点の変形を示した。なお、変形図は倍率を10倍して表示した。表1より、帯鉄筋径の増加にしたがって、多区間座屈から単区間座屈に移行することがわかる。本解析においては、D13からD22のすべての軸方向鉄筋に対して、帯鉄筋径がD10またはD13の場合は、多区間座屈が生じるのに対し、拘束の程度が大きい帯鉄筋径D16またはD19の場合は、単区間座屈が生じた。

このことから帯鉄筋が太径になることによって、帯鉄筋の拘束が大きくなるため、多区間座屈から単区間座屈に移行する可能性があることがわかった。

3. 配筋詳細をパラメータとした正負交番荷試験

3.1 試験概要

鉄筋単体の座屈解析で示した配筋詳細の影響をRC部材において検討するため、鉄筋の径や間隔をパラメータとしたRC柱の正負交番荷試験を行った。表2、表3に試験体パラメータ、試験体諸元および材料試験結果、図6に試験体寸法を示す。配筋詳細の影響を検討するため、軸方向鉄筋比および帯鉄筋比が等しくなるように鉄筋の径と間隔を設定した。帯鉄筋間隔はNo.1を除き、現行の設計法における構造細目(有効高さの1/4以下)を満足しない。また、実強度に基づく曲げせん断耐力比が3.03~3.29となる曲げ破壊型の試験体である。

荷重は、鉛直力480kN(軸応力3.0N/mm²)を作用させた状態で、水平力をせん断スパン1500mmの位置に作用させた。荷重方法は引張鉄筋の降伏変位 δ_y を基準変位とし、 δ_y の整数倍変位において、各サイクル3回の繰返しとした。基準変位は、繰返し回数の影響を排除するため、すべての試験体で8.6mmとした。

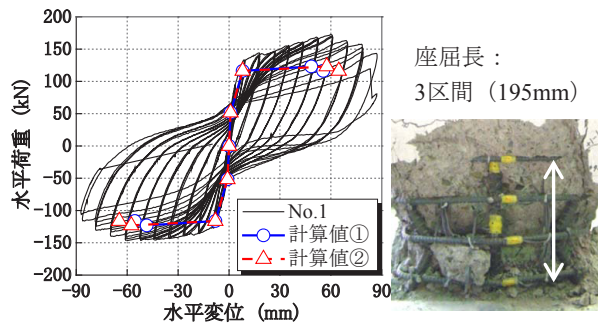


図7 荷重－変位関係および損傷状況
(No.1, 帯鉄筋間隔 65mm)

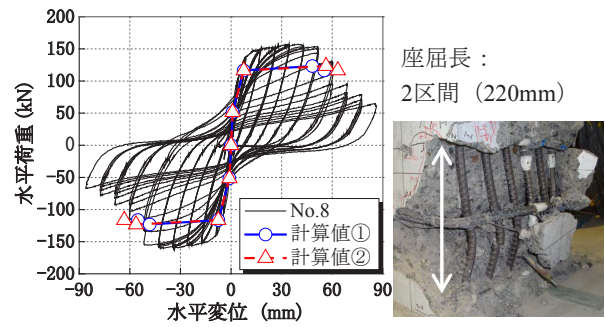


図11 荷重－変位関係および損傷状況
(No.8, 軸方向鉄筋径 D13)

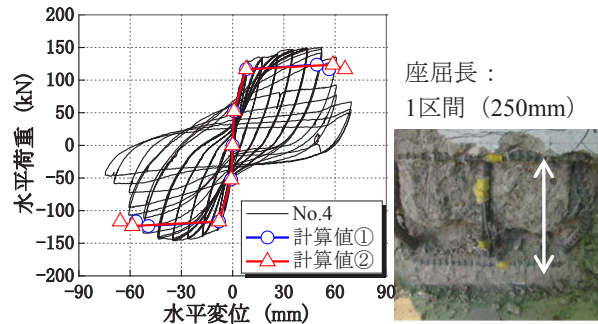


図8 荷重－変位関係および損傷状況
(No.4, 帯鉄筋間隔 250mm)

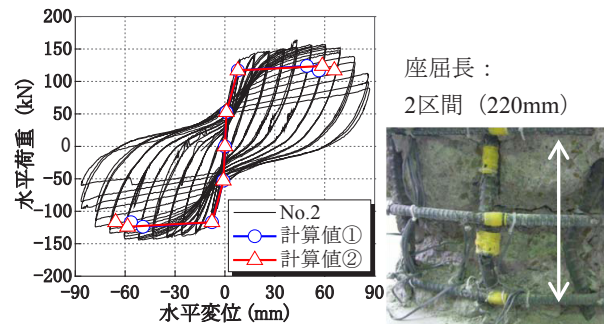


図12 荷重－変位関係および損傷状況
(No.2, 軸方向鉄筋径 D19)

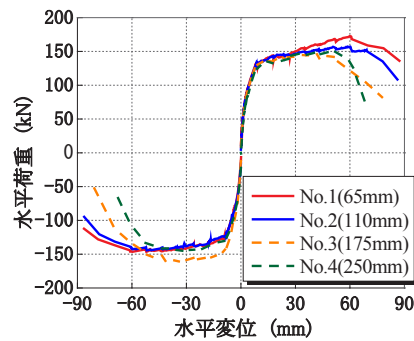


図9 荷重－変位関係包絡線(鉄筋間隔)

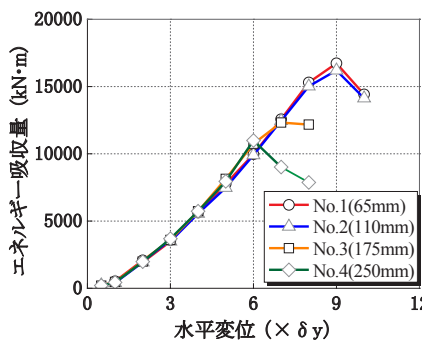


図10 エネルギー吸収量(帯鉄筋間隔)

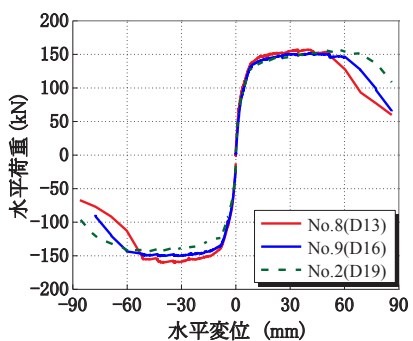


図13 荷重－変位関係包絡線(鉄筋径)

3.2 試験結果

3.2.1 損傷状況

すべての試験体において、柱基部に曲げひび割れが発生した後、軸方向鉄筋の降伏、かぶりコンクリートの圧壊、軸方向鉄筋の座屈が生じ、その後 No.4 を除き、軸方向鉄筋が低サイクル疲労により破断した。

3.2.2 帯鉄筋間隔が変形性能におよぼす影響

帯鉄筋比 0.6% の条件において、帯鉄筋の径と間隔のみが異なる試験体 No.1 ～ No.4 の正負交番荷試験の結果を比較した。帯鉄筋間隔が最小の No.1 (65mm) と最大の No.4 (250mm) の荷重－変位関係と損傷状況を図7および図8、No.1 ～ No.4 の荷重－変位関係の包絡線を図9に示す。また、図7および図8の荷重－変位関係には、コンクリート標準にしたがって計算した骨格曲線をあわせて示した。なお、ここでは、いわゆる設計値

である変形性能算定式の引張鉄筋比の下限値を考慮した M 点変位(最大荷重を維持できる最大変位)の計算値(計算値①)と下限値を考慮しない計算値(計算値②)を示した。変形性能算定式においては、算定式の適用範囲から引張鉄筋比の下限値を 0.79% としており、本研究における試験体では引張鉄筋比は 0.60% 程度であることから、算定式の下限値を下回ることになる。また、No.1 は帯鉄筋間隔有効高さ比 (S/d) が 0.19 となり、現行の設計法における構造細目 ($S/d \leq 0.25$) を満足する試験体である。一方、No.2 は $S/d = 0.31$ 、No.3 は $S/d = 0.50$ 、No.4 は $S/d = 0.71$ となり、現行の構造細目を満足しない試験体である。さらに、No.4 は、せん断補強鉄筋の間隔に関する構造細目 ($S/d \leq 0.50$) も満足しない試験体である。

図9より、同じ帯鉄筋比であっても、帯鉄筋間隔の減少にしたがって変形性能が向上することがわかる。また、

表4 M点変位に関する試験値と計算値

No.	試験値 (正側)	計算値① (mm)	計算値② (mm)	座屈長 (mm) (鉄筋間隔の倍数)
1	77.4	48.5	57.6	195 (3)
2	68.8	49.3	58.6	220 (2)
3	51.6	49.1	58.4	175 (1)
4	51.6	49.4	58.7	250 (1)
5	43.0	47.5	55.6	175 (1)
6	43.0	48.1	60.4	175 (1)
7	51.6	49.1	62.5	175 (1)
8	51.6	48.2	56.3	220 (2)
9	60.2	48.2	60.6	220 (2)

計算値①：引張鉄筋比の下限值を考慮した値（設計値）
 計算値②：引張鉄筋比の下限值を考慮しない値

M点変位の試験値（荷重低下が顕著にならない最大繰返し変位）との差異は、No.1とNo.4で $3\delta_y$ であった。試験値と計算値との比較では、引張鉄筋比の下限值を考慮したM点変位の計算値（計算値①）は、すべての試験体において上回るが、下限値を考慮しない計算値（計算値②）は、No.1, No.2では上回るが、No.3, No.4では下回る結果となった。試験終了時の座屈状況は、No.1では帯鉄筋間隔の3倍、No.2は2倍、No.3およびNo.4では1倍の座屈長であった。つまり、帯鉄筋間隔が小さいNo.1とNo.2は多区間座屈、帯鉄筋間隔が大きいNo.3とNo.4は単区間座屈であった。また、図10にNo.1からNo.4のエネルギー吸収量を示す。エネルギー吸収量が低下した変位は、M点変位の試験値と概ね一致することがわかる。このことから、帯鉄筋間隔の減少にとともなって、座屈モードが単区間座屈から多区間座屈に移行し、同時に変形性能が増加することがわかった。

3.2.3 軸方向鉄筋径が変形性能におよぼす影響

引張鉄筋比0.6%の条件において、軸方向鉄筋の径と間隔のみが異なる試験体No.2, No.8, No.9の正負交番荷重試験の結果を比較した。鉄筋径が最小のNo.8 (D13) と最大のNo.2 (D19) の荷重-変位関係と損傷状況を図11および図12, No.2, No.8, No.9の荷重-変位関係の包絡線を図13に示す。また、図11および図12の荷重-変位関係に骨格曲線をあわせて示す。なお、すべての試験体において、帯鉄筋間隔は現行の設計法における構造細目を満足していない。

図13より、軸方向鉄筋の径の増加にしたがって、変形性能が向上することがわかる。No.2, No.8, No.9は、表4からわかるように帯鉄筋の間隔および荷重試験における座屈長が等しいため、座屈長に着目した細長比が異なる。軸方向鉄筋径の増加にしたがって、細長比が小さくなるため、太径の軸方向鉄筋を用いる場合は、座屈強度とともに座屈時のひずみレベルが大きくなる可能性があることが、図1の座屈解析の結果からわかる。このように、座屈開始時のひずみレベルが大きくなるため、座屈開始時の水平変位、つまり変形性能が増加した可能性

表5 M点変位の計算値①に対する試験値

		軸方向鉄筋			
		D13 @ 50	D16 @ 100	D19 @ 150	D22 @ 300
帯鉄筋	D10 @ 65	—	—	1.60 (1.34)	—
	D13 @ 110	1.07 (0.92)	1.25 (0.99)	1.40 (1.17)	—
	D16 @ 175	0.90 (0.77)	0.89 (0.71)	1.05 (0.88)	1.05 (0.83)
	D19 @ 250	—	—	1.04 (0.88)	—

「—」は、試験体なし
 () は、計算値②に対する試験値
 なお、網掛けは、帯鉄筋間隔が細長比32以下の試験体

がある。なお、座屈モードは、すべての試験体において2区間にわたる座屈であった。

4. 配筋詳細が変形性能におよぼす影響

各試験体におけるM点変位の試験値と計算値、および荷重試験後に確認した座屈長と帯鉄筋間隔との比を表4に示す。また、計算値に対する試験値の比を表5に示す。変形性能の計算値はすべての試験体で等しいため、帯鉄筋については細径の鉄筋を小さい間隔で配置し、軸方向鉄筋については太径の鉄筋を大きい間隔で配置することによって変形性能が向上することがわかる。

また、表5に細長比32以下を満足する試験体を網掛けで示す。細長比32以下を満足する試験体においては、引張鉄筋比が若干小さいNo.7を除いて、試験値が計算値②と同等かそれ以上であることがわかる。また、No.7を除いたすべての試験体は、多区間座屈が生じていた。

ここで、各試験体における帯鉄筋間隔を鉄筋長さとした細長比とM点変位の試験値と計算値の比の関係を図14に示す。ここでは、変形性能算定式における引張鉄筋比の下限值を考慮した設計で用いる計算値①と考慮しない計算値②をあわせて示した。図14からわかるように細長比とM点変位に相関があることがわかる。細長比が32より小さい場合、下限値を考慮した計算値①は、すべての試験体において、所定の変形性能を有するとともに、細長比が小さくなるにしたがって、変形性能が向上することがわかる。また、細長比と荷重試験後に確認した座屈区間（帯鉄筋間隔の倍数）の関係を図15に示す。細長比32以上の試験体は単区間座屈であり、細長比32より小さい試験体は、No.7を除き、2区間あるいは3区間の多区間座屈であった。

このことから、細長比、つまり帯鉄筋間隔が小さくなることによって、座屈モードが単区間座屈から多区間座屈に移行し、その結果、変形性能が向上すると考えることができる。これは、細長比が小さくなるのにしたがって、座屈強度が増加するため、単区間座屈が生じにくくなるためと考え

特集：構造物技術

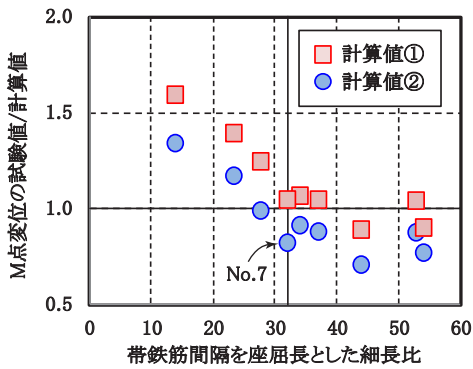


図 14 細長比と変形性能の関係

られる。そして、多区間座屈では座屈区間を拘束する帯鉄筋の本数が単区間座屈に比べ増加することから、座屈に対する帯鉄筋の抵抗が増し、変形性能が向上すると考えられる。

5. 帯鉄筋間隔に関する構造細目の検討

設計において配筋詳細の影響を考慮するには、変形性能算定式において考慮することが望ましいが、配筋詳細の影響に着目した試験結果の蓄積が十分ではないため、ここでは、構造細目において配筋詳細の影響を考慮した。

図 14 に示した細長比と M 点変位の試験値と下限値を考慮した計算値との比の関係より、細長比が 32 より小さいすべての試験体において、所定の変形性能を有していることがわかる。また、試験値と下限値を考慮しない計算値②との比の関係より、細長比が 32 より小さい試験体において、試験値が計算値に達していない No.7 は、帯鉄筋が D16 であり他の試験体よりも太径であった。このことから、帯鉄筋の拘束が大きい場合においては、座屈モードが単区間座屈となり、変形性能がわずかではあるが、低下する可能性があることがわかった。

この結果から、現行の変形性能算定式を適用する場合においては、帯鉄筋間隔を細長比 32 以下にし、帯鉄筋径にある程度の制限を設ければよいと考えられる。そのため現行の設計法においては、帯鉄筋間隔を有効高さの 1/4 以下にすることが構造細目として規定されているが、上記の規定を満足することによって、これを削除できると考えられる。なお、本研究における適用範囲は、軸方向鉄筋径 D13 ~ D25、帯鉄筋径 D10、D13、軸方向鉄筋の間隔である帯鉄筋のスパンは 250mm である。また、せん断力に関しては、帯鉄筋間隔を有効高さの 1/2 以下にすることが規定されているが、これについては、せん断耐力を確保する観点から遵守するのがよいと考えられる。

6. まとめ

配筋詳細をパラメータとした座屈解析および載荷試験に関する本研究の範囲において、以下の知見を得た。

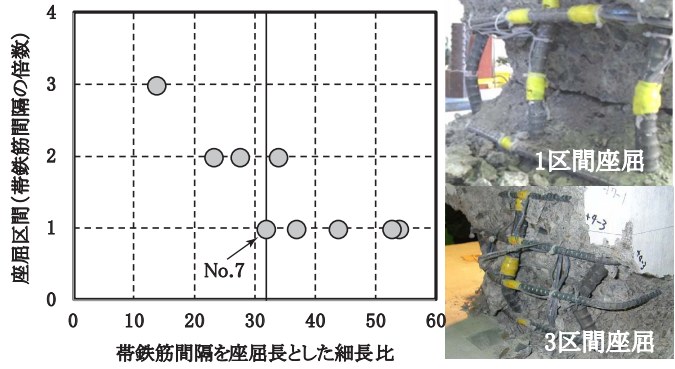


図 15 細長比と座屈区間の関係

- (1) 帯鉄筋比が等しい RC 部材においては、帯鉄筋間隔が小さくなるにしたがって単区間の座屈強度が増加するため、多区間座屈が生じると考えられる。
- (2) 多区間座屈の場合、軸方向鉄筋を拘束する帯鉄筋の本数が増加するため、変形性能が向上すると考えられる。
- (3) 帯鉄筋の径と間隔が等しい RC 部材では、軸方向鉄筋が太径になるにしたがって、細長比が小さくなる。その結果、座屈強度および座屈開始ひずみが増加するため、変形性能が向上すると考えられる。
- (4) 帯鉄筋間隔を鉄筋長さとした細長比が等しい場合、帯鉄筋径が大きくなると軸方向鉄筋を拘束する程度が大きくなるため、座屈モードが多区間から単区間座屈に移行し、変形性能が低下する可能性がある。
- (5) 現行の設計法における構造細目（有効高さの 1/4 以下の間隔で帯鉄筋を配置）は、使用する鉄筋径に制限を設けたうえ、細長比に関する規定を遵守することによって、削除できると考えられる。

文 献

- 1) 渡邊忠朋, 谷村幸裕, 瀧口将志, 佐藤勉: 鉄筋コンクリート部材の損傷状況を考慮した変形性能算定手法, 土木学会論文集, No.683, V-52, pp31-45, 2001.8
- 2) 星隈順一, 運上茂樹, 川島一彦, 長屋和宏: 載荷繰返し特性と塑性曲率分布に着目した曲げ破壊型鉄筋コンクリート橋脚の塑性変形性能とその評価法, 構造工学論文集, Vol.44A, pp877-888, 1998.3
- 3) 鉄道総合技術研究所編: 鉄道構造物等設計標準・同解説 (コンクリート構造物), 丸善, 2004
- 4) 田上和也, 中村光, 齋藤成彦, 檜貝勇: 繰返し荷重を受ける鉄筋の座屈モデルに関する研究, 構造工学論文集, Vol.47A, pp.725-734, 2001.3
- 5) 土木学会: 座屈設計ガイドライン (2005 年改訂版), 丸善, 2005.10
- 6) 前川宏一, 福浦尚之: 類似直交 2 方向ひび割れを有する平面 RC 要素の空間平均化構成モデルの再構築, 土木学会論文集, No.634, V-45, pp.157-176, 1999.11