

中心軸圧縮を受けるコンファインドコンクリートの内部性状に関する解析的研究

Analytical study on confining condition inside confined concrete subjected to uniaxial compression

伊藤 誠*, 水野英二**, 畑中重光***

Makoto Ito, Eiji Mizuno, Shigemitsu Hatanaka

*博士 (工学), 東急建設 (株) 技術本部 (〒150-8340 東京都渋谷区渋谷 1 丁目 16 番地 14)

** Ph.D. 中部大学教授, 工学部都市建設工学科 (〒487-8501 愛知県春日井市松本町 1200 番地)

*** 工博 三重大学教授, 工学部建築学科 (〒514-8507 三重県津市栗新町屋町 1577 番地)

3-D FEM analysis of confined concrete subjected to the axial compressive load has been carried out to investigate the confining effect and damage condition inside concrete. In the present analysis, therefore, the influence of the transverse reinforcement ratio, the yield strength of reinforcement and concrete strength on the confining effect inside concrete has been evaluated in terms of the confining efficiency that is related to the rate of "equivalent confining pressure". The followings have turned out from the present analysis. (1) The confining efficiency depends on the mechanical reinforcement ratio, which is the ratio of confining pressure to concrete strength. (2) In the case of low mechanical reinforcement ratio, the confining effect extends the inner part of the concrete. Otherwise, the confining effect becomes predominant only near the corners.

Key Words: confined concrete, 3D-FEM analysis, equivalent confining pressure, confining efficiency, mechanical reinforcement ratio, damage index

キーワード: コンファインドコンクリート, 3次元有限要素解析, 等価拘束圧, 拘束効率, 力学的拘束筋比, 損傷度

1. はじめに

圧縮力を受けて生じる横膨張変形が横拘束筋によって拘束され, 応力状態が三軸圧縮状態となるコンクリート (コンファインドコンクリート) は, 横拘束筋による内部コンクリートへの拘束効果により, 耐力および塑性変形能力が高いことが実験的・解析的に知られており, その拘束機構や変形特性が検討されている。また, これまでは普通強度材料 (コンクリート強度および横拘束筋の降伏強度が普通レベルのもの) を対象にしていたが, 近年では, 高強度材料を用いた場合の拘束効果についても研究が進められている。

中塚ら^{1)~3)}は, サブタイを配置した角形補強筋によるコンファインドコンクリートの軸圧縮実験を行い, 角形補強筋の拘束機構を実験的に考察している。その結果, 角形の場合には, 円形の場合とは異なり, 補強筋はフープ力の他, 曲げの作用を受けるため, 最も曲げモーメントが大きい補強筋端部 (隅角部) が降伏し, その部分に伸び変形の集中と軸力の急増が起きることを指摘している。また, サブタイの本数を増やすことで拘束効果は円形の場合とほぼ同様になることを示している。

また, 秋山ら^{4), 5)}は, コンクリートの一軸圧縮強度, 横拘束筋の降伏強度, 横拘束筋量, 横拘束筋の配筋形状をパラメータにしたコンクリート柱の一軸圧縮実験を行い, コンファインドコンクリートの変形特性に与える影響を実験的に考察している。実験より, 高強度 RC 柱では, 最大強度時に横拘束筋の作用応力は降伏強度に至らず, 横拘束筋降伏強度を用いてコンファインド効果を評価した既往の応力-ひずみ関係は高強度 RC 柱に適用できないことを確認している。

また, 中澤ら⁶⁾はコンクリートの一軸圧縮強度を 30 ~ 90 MPa まで変化させ, 横拘束筋間隔の異なる円形断面供試体の一軸圧縮試験を行い, 高強度コンクリートにも適用可能な横拘束モデルを開発している。

解析的には, 吉田ら⁷⁾が横拘束筋により拘束された円形断面供試体の中心軸圧縮 FEM 解析を行い, コンクリート内部の高さ方向の拘束圧分布に違いについて考察している。解析結果より, 横拘束筋が巻かれている位置における拘束圧は他の部分より常に大きいことを明らかにしているが, 横拘束筋が巻かれた水平断面内の拘束圧の分布については明らかにしていない。また, Irawan ら⁸⁾は横拘束された角形断面供試体の中心軸圧縮 FEM 解析を

行い、内部の損傷度分布について考察し、中心部ほど損傷度が大きいことを明らかにしているが、横拘束筋の面積鉄筋比などが分布状況に与える影響については示されていない。

このように、実験的研究により横拘束筋の面積鉄筋比、横拘束筋の降伏強度およびコンクリートの一軸圧縮強度がコンファインドコンクリートの応力-ひずみ関係に与える影響については明らかになりつつあるが、内部性状に与える影響に関する研究は主に FEM 解析に頼らざるを得ず、必ずしも十分に行われていないのが現状である。

筆者らは、コンファインドコンクリートの拘束効果に影響を与えると考えられる、横拘束筋の面積鉄筋比 p_s 、横拘束筋の降伏強度 σ_p 、コンクリートの一軸圧縮強度 f'_c をパラメータとした三次元中心軸圧縮 FEM 解析を行い、コンファインドコンクリートの内部性状に関する研究を行っており、既報⁹⁾において各種パラメータが拘束効果に与える影響を「力学的拘束筋比」および「拘束効率」という指標を導入することにより統一的な評価ができることを示してきた。

本論文は、高強度材料使用時における解析の妥当性の評価(第3章)、各種パラメータがそれぞれコンファインドコンクリートの内部性状に与える影響(第4章)、「損傷度」なる観点からのコンファインドコンクリートの内部性状の評価(第6章)を追加し、既報⁹⁾を拡張したものである。

2. ひずみ軟化型構成モデルの概要と再現性の検証

2.1 モデルの概要

本研究では、水野・畑中が提案した三次元応力場でのコンクリートの圧縮軟化挙動を再現できる構成モデル^{10), 11)}を用いる。本モデルの負荷関数はLadeの提案した3パラメータモデルであり、式(1)のように表現できる。

$$f = (-I_1 + a)^3 - \left[27 + F_p \left(\frac{P_a}{-I_1 + a} \right)^m \right] \times \left[\frac{1}{27} (-I_1 + a)^3 - \frac{1}{3} (-I_1 + a) J_2 - J_3 \right] \quad (1)$$

ここで、 I_1 は応力の一次不変量、 J_2 は偏差応力の二次不変量、 J_3 は偏差応力の三次不変量、 P_a は大気圧のことである。 m, a, F_p がパラメータであり、 m は負荷曲面の曲率を表す定数、 a は引張強度に関係する定数、 F_p は負荷曲面の大きさを示す強度パラメータである。強度パラメータ F_p は塑性仕事量 W_p の関数であり、式(2)のように表される。

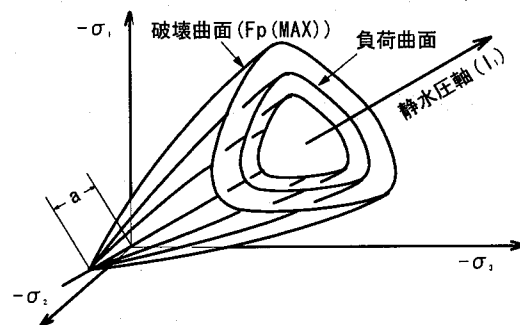


図-1 主応力空間における負荷曲面の概念図

$$F_p = \alpha \exp(-\beta \frac{P_a}{W_p}) \left(\frac{P_a}{W_p} \right)^\gamma \quad (2)$$

ここで、 α, β および γ は側圧の関数であり、側圧が大きいかほど $F_p - W_p$ 関係は延性的になる。強度パラメータ F_p の値は、ひずみ硬化時には増加し、破壊時に最大値に達し、ひずみ軟化時には減少する。応力空間における負荷曲面の概念図を示すと、図-1のようである。詳細は参考文献^{10), 11)}を参照されたい。

2.2 ひずみ軟化型構成モデルの再現性の検証

コンクリートの一軸圧縮強度が普通強度・高強度の場合および作用拘束圧が低拘束圧・高拘束圧の場合について、コンファインドコンクリートの三次元中心軸圧縮 FEM 解析を行い、実験結果^{12), 13)}と解析結果とを比較することによりひずみ軟化型構成モデルの再現性について検証した。図-2に実験結果と解析結果との比較を示す。

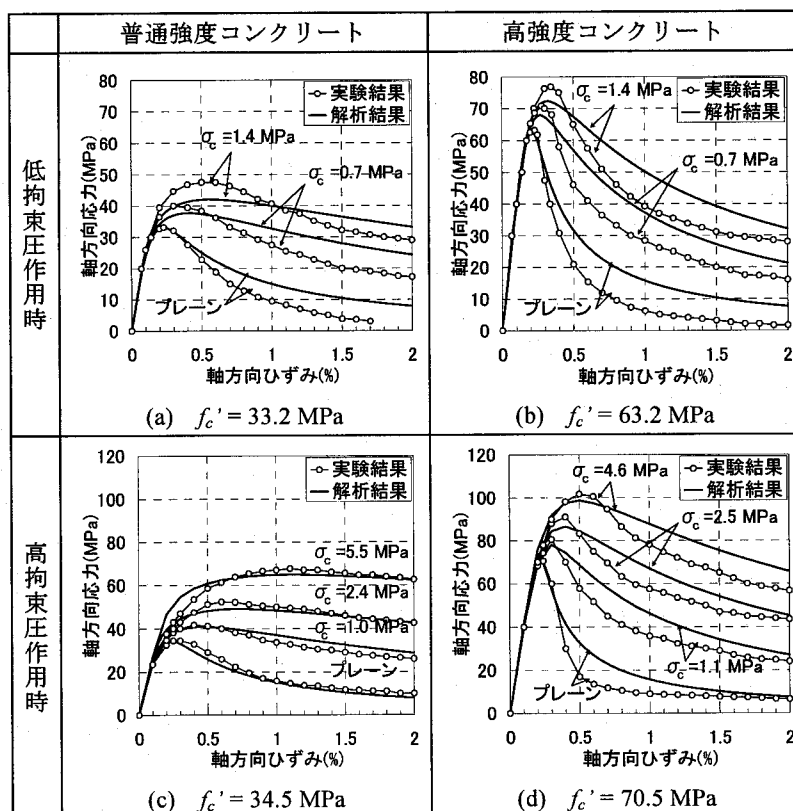


図-2 ひずみ軟化型構成モデルの検証

低拘束圧作用時の実験結果¹²⁾は1辺の長さ $D = 10 \text{ cm}$ の角形柱で $H/D = 1$ (H : 供試体高さ) の供試体に能動的に拘束圧を作用させたものである。一方、高拘束圧作用時の実験結果¹³⁾は直径 $\phi = 10 \text{ cm}$ の円柱で $H/\phi = 1$ (H : 供試体高さ) の供試体に離散的に配置された鋼輪により受動的に拘束圧を作用させたものである。

図-2によれば、解析結果のピークひずみおよびピーク応力は実験結果と比較的良好な一致を示していることが分かる。また、ポストピークの応力-ひずみ曲線は実験結果よりも若干延性的ではあるが概ね良好な一致を示している。それゆえ、中心軸圧縮を受けるコンファインドコンクリートの内部性状を考察するためのパラメトリック解析(第3章)では、ひずみ軟化型構成モデルを材料構成則として採用する。

3. コンファインドコンクリートの三次元有限要素解析

3.1 解析モデルおよび解析方法

本研究では、図-3(a)に示すような中心軸圧縮を受ける角形の横拘束筋で補強された鉄筋コンクリート部材を対象とした(図は1/4モデル)。しかし、コンファインドコンクリートの内部性状、特に拘束効果について検討するため、図-3(b)に示すような横拘束筋が巻かれている部分のみを抽出し解析することとした。

コンクリートに適用する材料構成則である「ひずみ軟化型構成モデル」は、1辺の長さ $D = 10 \text{ cm}$ 、 $H/D = 1$ (H : 供試体高さ) のコンクリート供試体の三軸圧縮実験結果に基づいていることから、要素サイズについても1辺の長さが 10 cm の立方体とした(図-3(c)参照)。なお、境界条件は対称面でのそれぞれの変位を拘束した。

解析は、変位増分による変位制御で行い、表-1に示すように横拘束筋の面積鉄筋比に応じて、 $p_s = 0 \sim 0.5\%$ では圧縮変位増分 0.01 mm 、 $p_s = 1.0 \sim 2.0\%$ では 0.02 mm 、 $p_s = 4.0\%$ では 0.03 mm とし、それぞれ400 stepまで載荷した。

3.2 要素タイプおよび材料構成則

将ら¹⁴⁾はコンファインドコンクリートの三次元中心軸圧縮FEM解析において、横拘束筋にTruss要素を用いた場合とBeam要素を用いた場合の解析結果を比較している。その結果、横拘束筋径が小さい場合、解析結果には差異がないが、横拘束筋径が大きくなり、横拘束筋のせん断および曲げ剛性を無視できなくなる場合、Beam要素を用いた場合の解析結果の方が横拘束筋による拘束効果をより良く表現できることを示している。

本研究では、横拘束筋の面積鉄筋比を最大で 4.0% としており横拘束筋径が大きくなるので、横拘束筋はBeam要素でモデル化することとした。また、横拘束筋に適用する材料構成則は「von Misesの降伏基準」とした。

コンクリートに適用する材料構成則は、第2章で適用性について検証済みである「ひずみ軟化型構成モデル¹⁰⁾。

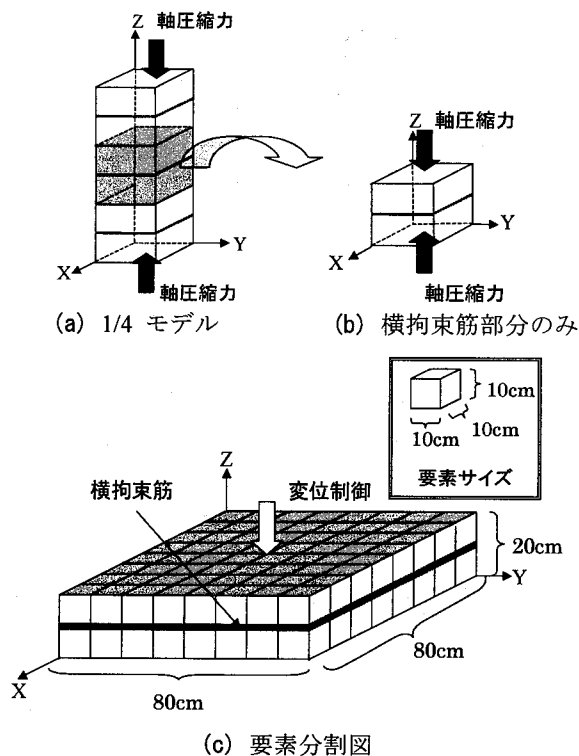


図-3 解析モデルの概要図

表-1 解析における変位増分

横拘束筋の面積鉄筋比 p_s (%)	圧縮変位増分 Δu (mm)	解析した最終ひずみ
0.0, 0.1, 0.2, 0.5	0.01	2 %
1.0, 2.0	0.02	4 %
4.0	0.03	6 %

ただし、 $p_s = 4.0\%$ は $\sigma_y = 175 \text{ MPa}$ のケースのみ

¹¹⁾とし、要素タイプは8節点アイソパラメトリック要素とした。また、軸圧縮力を受けるコンファインドコンクリートはポアソン効果によって側方に膨らむことにより、横拘束筋からの拘束圧を受けることになるが、横拘束筋とコンクリート間に軸方向の滑りがあるとしてもコンクリートに作用する拘束効果にはほとんど影響がないと考えられるため、横拘束筋とコンクリートの間には付着要素を設定せず、完全付着と仮定した。

3.3 解析ケース

本解析では、横拘束筋の面積鉄筋比 p_s 、横拘束筋の降伏強度 σ_y 、コンクリートの一軸圧縮強度 f_c' をパラメータとしたコンファインドコンクリートの三次元中心軸圧縮 FEM 解析を行った。

一般的に設計において、横拘束筋の面積鉄筋比は $0.0 \sim 1.0\%$ 程度、横拘束筋の降伏強度は $300 \sim 400 \text{ MPa}$ 程度、コンクリートの一軸圧縮強度は $24 \sim 40 \text{ MPa}$ 程度の範囲で使用される。しかし、近年では、高強度コンクリート ($50 \sim 100 \text{ MPa}$) や高強度鉄筋 ($500 \sim 700 \text{ MPa}$) を使用した設計もみられる。

表-2 解析のパラメータおよび材料定数

コンクリート			横拘束筋			
圧縮強度 f'_c (MPa)	ヤング係数 E_c (MPa)	ポアソン比 ν_c	横拘束筋の 降伏強度 σ_y	ヤング係数 E_s (MPa)	ポアソン比 ν_s	横拘束筋の 面積鉄筋比 p_s (%)
24	2.5×10^4	0.2	175	2.1×10^5	0.3	0.0
30	2.8×10^4		350			0.1, 0.2, 0.5,
50	3.3×10^4		700			1.0, 2.0
70	3.7×10^4					4.0

そのため、本研究では表-2 に示すように、一般的に設計で使用される範囲の2倍程度まで各種パラメータを変化させ、解析を実施した。ただし、横拘束筋の面積鉄筋比4.0%については横拘束筋の降伏強度 $\sigma_y = 175$ MPa の場合に限定した。これは、横拘束筋の降伏強度 $\sigma_y = 350$ MPa、横拘束筋の面積鉄筋比 $p_s = 2.0$ %の場合と同じ計算拘束圧(4.1節で後述)とするためである。解析は全部で68 ケース実施した。

4. 各種パラメータが最大圧縮強度に与える影響についての考察

本章では、横拘束筋の面積鉄筋比 p_s 、横拘束筋の降伏強度 σ_y 、およびコンクリートの一軸圧縮強度 f'_c の各種パラメータが、コンファインドコンクリートの応力-ひずみ関係における最大圧縮強度に与える影響について、拘束効率の分布状況を比較することにより考察した。

4.1 拘束効率 R の定義

コンクリート内部への拘束効果は、横拘束筋から受ける拘束圧の大きさにより変化する。そのため、拘束効果を評価する既往の指標として、[横拘束筋の降伏強度 σ_y] $\times$ [横拘束筋の面積鉄筋比 p_s] (これを計算拘束圧 σ_{LY} と定義する) が用いられてきた。ここで、計算拘束圧 σ_{LY} とは、円形断面コンクリートの場合で、横拘束筋が一様に降伏した時点の拘束圧のことである。

しかしながら、秋山ら⁴⁾が指摘しているように、軸方向ひずみレベルによっては横拘束筋が降伏していないこと、また、本研究で対象としている角形断面コンクリートでは、拘束圧は断面内で一様でないことから、計算拘束圧 σ_{LY} の値だけでは拘束効果を評価することは困難である。そのため、小阪らが定義した拘束効率 R ¹⁵⁾ なる指標を導入し、各軸方向ひずみレベルにおける拘束効果を評価することとした。拘束効率 R は次の式で定義した。

$$R = \frac{\sigma_L}{\sigma_{LY}} \quad (3)$$

ここで、 σ_L は等価拘束圧¹¹⁾(次節参照)であり、軸方向ひずみレベルによって変化する値である。拘束効率 $R=1.0$ は、計算拘束圧 σ_{LY} がコンクリートに作用していることを示しており、横拘束筋に期待されている拘束効果

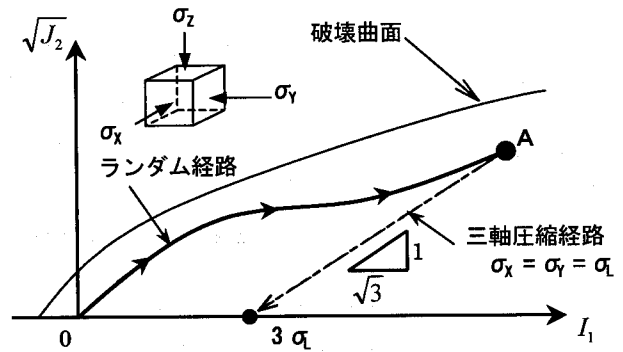


図-4 等価拘束圧 σ_L の定義

が最大限発揮されていることを表している。

本研究では、拘束効率 R を導入することにより、コンクリート内部の拘束効果の分布状況や軸方向ひずみの進展に伴う拘束効果の伝播を考察することができる。

4.2 等価拘束圧 σ_L

コンクリート構造物の有限要素解析を行う場合、各要素内の応力経路は図-4 に示すようにランダムな経路となるため、側圧は同じではない ($\sigma_x \neq \sigma_y$)。

本研究では、一般応力状態を三軸主応力状態に換算した時の等価側圧を等価拘束圧¹¹⁾と定義し、拘束効果を評価するための拘束圧とした。

等価拘束圧 σ_L とは、図-4 に示すように、载荷により応力状態が点 A の時、点 A から静水圧軸 (I_1 軸) に向かって $1/\sqrt{3}$ の傾きで下ろした直線と静水圧軸 (I_1 軸) との交点の値の $1/3$ とする。

4.3 各種パラメータの影響

横拘束筋の面積鉄筋比 p_s 、横拘束筋の降伏強度 σ_y 、コンクリートの一軸圧縮強度 f'_c が、最大圧縮強度に与える影響を考察するために、横拘束筋が巻かれている断面(図-5 参照)での拘束効率の分布状況を比較した。図-6~図-8 に解析結果から得られた平均軸方向応力-平均軸方向ひずみ関係(以後、平均軸応力-ひずみ関係と呼ぶ)と最大圧縮強度時における拘束効率の分布状況を示す。

図-6~図-8 に示す拘束効率の分布図では、水平断面(XY 平面)からの高さが拘束効率の大きさを、コンタ-では、拘束効率 1.0 以上は赤色として表示した。

(1) 横拘束筋の面積鉄筋比の影響 (図-6)

コンクリートの一軸圧縮強度 $f'_c = 24 \text{ MPa}$ 、横拘束筋の降伏強度 $\sigma_y = 350 \text{ MPa}$ の場合に対する解析結果を例に挙げ、横拘束筋の面積鉄筋比 p_s が 0.2%, 0.5% および 1.0% の場合の拘束効率に関する分布状況の比較を図-6 に示す。ここでは、面積鉄筋比 p_s によらず、横拘束筋が降伏した後に平均軸方向応力はピークを迎えていた。

図-6(b)～(d) に示す最大圧縮強度時の拘束効率の分布状況を比較すると、いずれの面積鉄筋比 p_s の場合においても、拘束効率は隅角部では $R = 1.0$ 以上と局所的に大きくなるという傾向は同じである。しかし、中心部分では面積鉄筋比 p_s が大きくなるに従い、拘束効率は隅角部のそれと比較して小さく、 $p_s = 0.2\%$ 、 0.5% の場合は中心部分でおよそ $R = 0.8$ であるのに対し、 $p_s = 1.0\%$ の場合はおよそ $R = 0.7$ となっており、面積鉄筋比 p_s が大きくなるに従い、横拘束筋による拘束効果は内部まで及ばない傾向にあることが分かる。

ここで、図-6(a) に示す平均軸応力-ひずみ関係より、各面積鉄筋比 p_s の場合における〔最大圧縮強度〕／〔プレーンコンクリートの圧縮強度〕の値を比較すると、 $p_s = 0.2\%$ 、 0.5% および 1.0% の場合に対して、それぞれ、1.15、

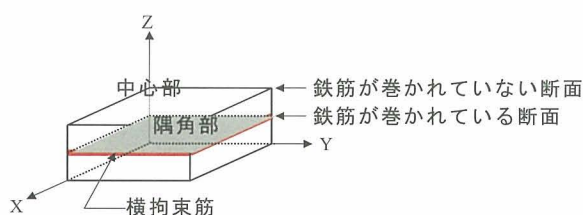


図-5 表示断面

1.30 および 1.45 であり、面積鉄筋比 p_s の増加率に対する圧縮強度の増加率は小さくなっており、横拘束筋による拘束効果が内部まで及んでいないことを示している。

(2) 横拘束筋の降伏強度の影響 (図-7)

横拘束筋の面積鉄筋比 $p_s = 0.5\%$ 、コンクリートの一軸圧縮強度 $f'_c = 24 \text{ MPa}$ の場合に対する解析結果を例に挙げ、横拘束筋の降伏強度 σ_y が 175 MPa、350 MPa および 700 MPa の拘束効率に関する分布状況の比較を図-7 に示す。ここでは、横拘束筋の降伏強度 σ_y によらず、横拘束筋が降伏した後に平均軸方向応力はピークを迎えていた。

図-7(b)～(d) に示す最大圧縮強度時の拘束効率の分布状況を比較すると、いずれの横拘束筋の降伏強度 σ_y の

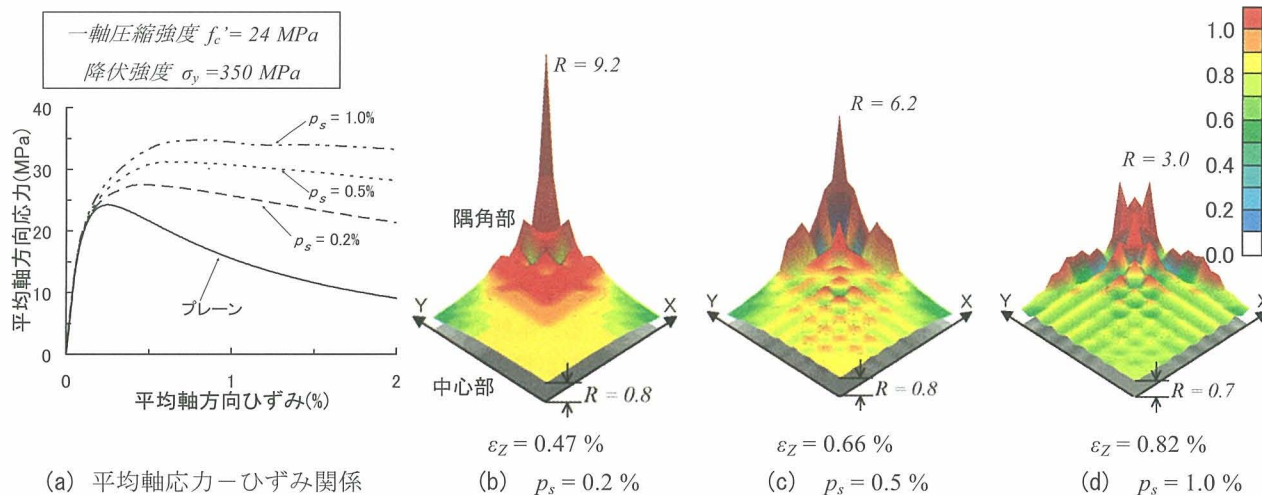


図-6 面積横拘束筋比 p_s が異なる場合の拘束効率 R の分布 ($f'_c = 24 \text{ MPa}$, $\sigma_y = 350 \text{ MPa}$)

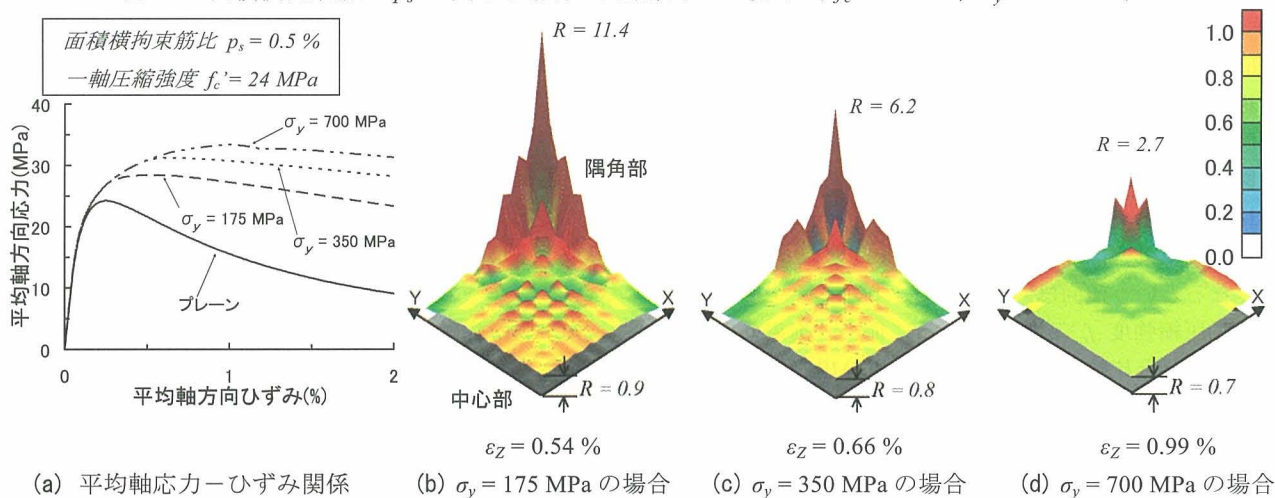
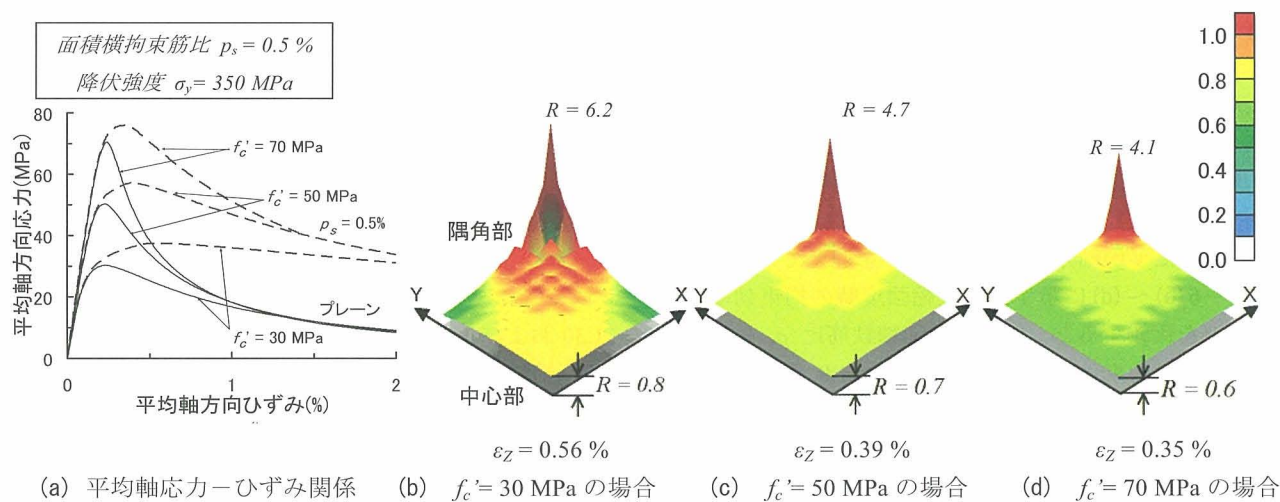


図-7 横拘束筋の降伏強度 σ_y が異なる場合の拘束効率 R の分布 ($p_s = 0.5\%$, $f'_c = 24 \text{ MPa}$)



(a) 平均軸応力－ひずみ関係 (b) $f'_c = 30 \text{ MPa}$ の場合 (c) $f'_c = 50 \text{ MPa}$ の場合 (d) $f'_c = 70 \text{ MPa}$ の場合
図－8 コンクリートの一軸圧縮強度 f'_c が異なる場合の拘束効率 R の分布 ($p_s = 0.5\%$, $\sigma_y = 350 \text{ MPa}$)

場合においても、拘束効率は隅角部では $R = 1.0$ 以上と局所的に大きくなるという傾向は同じである。しかし、中心部分では横拘束筋の降伏強度 σ_y が大きくなるに従い、拘束効率は隅角部のそれと比較して小さく、 $\sigma_y = 175 \text{ MPa}$, 350 MPa の場合は中心部分でそれぞれ $R = 0.9, 0.8$ であるのに対し、 $\sigma_y = 700 \text{ MPa}$ では $R = 0.7$ となっており、横拘束筋の降伏強度 σ_y が大きくなるに従い、横拘束筋による拘束効果は内部まで及ばない傾向にあることが分かる。

ここで、図－7(a)に示す平均軸応力－ひずみ関係より、各降伏強度 σ_y の場合における「最大圧縮強度」／「プレーンコンクリートの圧縮強度」の値を比較してみると、 $\sigma_y = 175 \text{ MPa}$, 350 MPa および 700 MPa の場合に対して、それぞれ、1.18, 1.30 および 1.39 であり、横拘束筋の降伏強度 σ_y の増加率に対する圧縮強度の増加率は小さくなっており、横拘束筋による拘束効果が内部まで及んでいないことを示している。

(3) コンクリートの一軸圧縮強度の影響 (図－8)

横拘束筋の面積鉄筋比 $p_s = 0.5\%$ 、横拘束筋の降伏強度 $\sigma_y = 350 \text{ MPa}$ の場合に対する解析結果を例に挙げ、コンクリートの一軸圧縮強度 f'_c が 30 MPa , 50 MPa および 70 MPa の場合の拘束効率に関する分布状況の比較を図－8に示す。コンクリートの一軸圧縮強度 $f'_c = 70 \text{ MPa}$ の場合を除き、 $f'_c = 30 \text{ MPa}$, 50 MPa の場合は横拘束筋が降伏した後に平均軸方向応力はピークを迎えていた。

図－8(b)～(d)に示す最大圧縮強度時の拘束効率分布を比較すると、いずれの一軸圧縮強度 f'_c の場合においても、拘束効率は隅角部では $R = 1.0$ 以上と局所的に大きくなるという傾向は同じである。しかし、中心部分では一軸圧縮強度 f'_c が大きくなるに従い、拘束効率は隅角部のそれと比較して小さく、 $f'_c = 30 \text{ MPa}$, 50 MPa の場合は中心部で $R = 0.8, 0.7$ であるのに対し、 $f'_c = 70 \text{ MPa}$ の場合は最大圧縮強度時に横拘束筋が降伏していないため、拘束効果が小さく、 $R = 0.5$ となっている。

ここで、図－8(a)に示す平均軸応力－ひずみ関係より、

各一軸圧縮強度 f'_c の場合における「最大圧縮強度」／「プレーンコンクリートの圧縮強度」の値を比較してみると、 $f'_c = 30 \text{ MPa}$, 50 MPa および 70 MPa の場合に対して、それぞれ、1.25, 1.14 および 1.08 となっており、一軸圧縮強度 f'_c の増加率に対する圧縮強度の増加率は小さくなっており、横拘束筋による拘束効果が内部まで及んでいないことを示している。

4.4 まとめ

各種パラメータが最大圧縮強度に与える影響について、実験的に研究している秋山ら^{4),5)}の知見と比較しながら、本解析で得られた知見をまとめると以下のようである。

1. 横拘束筋の面積鉄筋比 p_s が大きくなるに従い、最大圧縮強度は増加するが、その増加量は p_s の増加量に比例するものではないことが実験的に明らかになっている。本解析においても図－6(a)に示すように同様の傾向が得られており、解析的に内部性状を考察した結果、 p_s が大きくなるに従い、中心部分の拘束効率が小さくなる傾向が確認でき、拘束効果が内部まで及ばないことが分かった。
2. 横拘束筋の降伏強度 σ_y が大きくなるに従い、最大圧縮強度は増加するが、降伏強度 σ_y の増加が拘束効果の大幅な改善に寄与しないことをが実験的に明らかにされている。本解析においても図－7(a)に示すように同様の傾向が得られており、解析的に内部性状を考察した結果、横拘束筋の降伏強度 σ_y が大きくなるに従い、中心部分の拘束効率が小さくなる傾向が確認でき、拘束効果が内部まで及ばないことが分かった。
3. コンクリートの一軸圧縮強度 f'_c が高強度の場合、横拘束筋が降伏しないことがあり、そのため拘束効果が小さくなることが実験的に明らかにされている。本解析においても図－8(d)に示すように $f'_c = 70 \text{ MPa}$ の場合は横拘束筋が降伏しておらず、その結果、中心部分の拘束効率が小さくなる傾向が確認でき、拘束効果が内部まで及ばないことが分かった。

5. 拘束効果の統一的評価について

第4章では横拘束筋の面積鉄筋比 p_s 、横拘束筋の降伏強度 σ_y 、コンクリートの一軸圧縮強度 f'_c 、それぞれが最大圧縮強度に与える影響について考察した。しかし、最大圧縮強度時では、コンクリートの一軸圧縮強度によっては横拘束筋が降伏していないため、横拘束筋が最大限に拘束効果を発揮していると言えない。

そのため、本章では、横拘束筋が降伏し、拘束効果を最大限発揮しているポストピークにおける拘束効果について考察する。ポストピークにおける拘束効果を評価する指標として靱性率（ピーク変位に対するピーク後の最大圧縮強度の80%強度時の変位の比）があるため、ここでは80%強度時のひずみレベルでの拘束効果について考察することとした。

5.1 計算拘束圧 σ_{LY} と拘束効率 R の関係

本節では、拘束効果を評価する既往の指標である計算拘束圧 σ_{LY} が解析モデル全体の拘束効率に与える影響について考察する。

解析モデル全体の拘束効率とは、各種分点で計算される拘束効率 R の解析モデル全体での平均値のことであり、図-9に示すように、軸方向ひずみの増加に伴い変化する。ここでは、各解析ケースにおける上述したひずみレベル（図-9では ε_d ）での拘束効率を比較した。図-10に各解析ケースにおける計算拘束圧 σ_{LY} と解析モデル全体の拘束効率 R の関係を示す。図中の○印はコンクリ

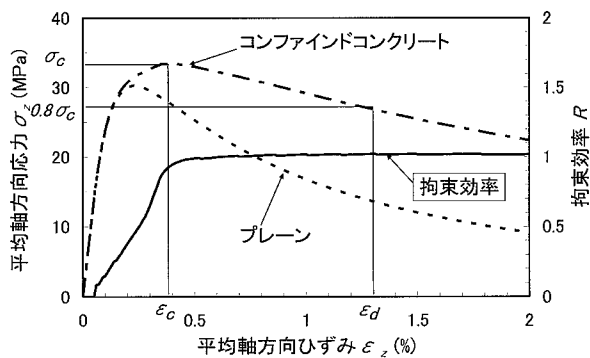


図-9 平均軸方向ひずみ ε_z と拘束効率 R の関係

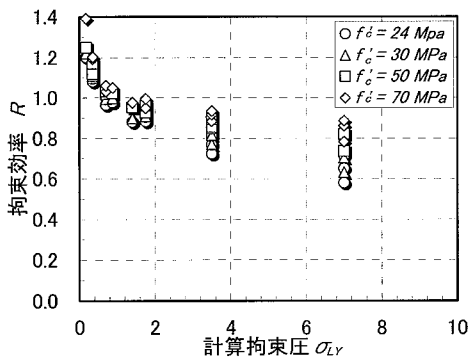


図-10 計算拘束圧 σ_{LY} と拘束効率 R の関係

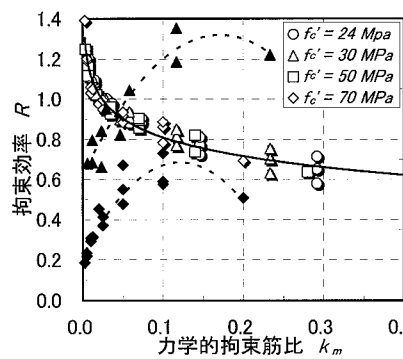


図-11 力学的拘束筋比 k_m と拘束効率 R の関係

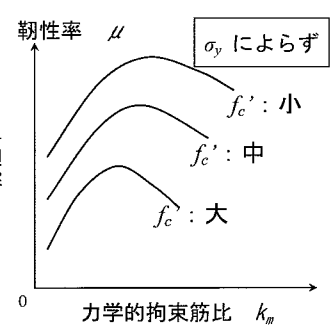


図-12 $\mu-k_m$ 関係の模式図

トの一軸圧縮強度が 24MPa、△印は 30MPa、□印は 50MPa、◇印は 70MPa の場合における拘束効率 R を表している。図-10によれば、計算拘束圧が大きくなるに従い、拘束効率は小さくなるという傾向が確認できる。しかし、同一の計算拘束圧の場合、コンクリートの一軸圧縮強度が小さいほど拘束効率が小さいという傾向がみられ、計算拘束圧の大きさだけでは拘束効果を十分に評価できないと考えられる。

5.2 力学的拘束筋比 k_m と拘束効率 R の関係

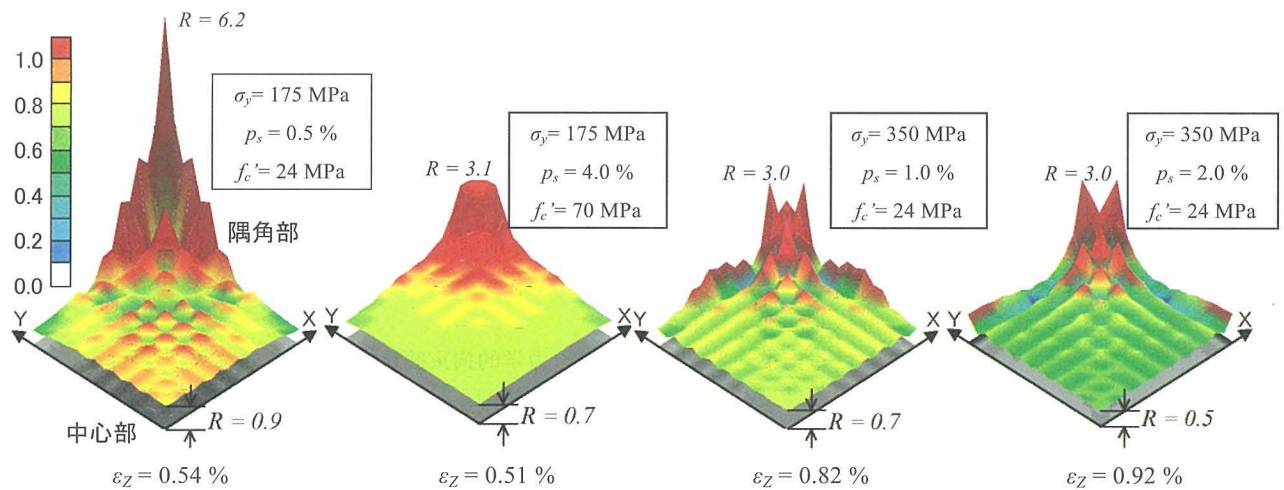
計算拘束圧 σ_{LY} では十分に拘束効果を評価できないため、本節では、新たにコンクリートの一軸圧縮強度の影響を考慮した拘束効果の指標として、以下に示す「力学的拘束筋比 k_m 」を導入して考察する。

$$k_m = \frac{\sigma_y \cdot p_s}{f'_c} \quad (4)$$

ここで、 σ_y は横拘束筋の降伏強度、 p_s は横拘束筋の面積鉄筋比、 f'_c はコンクリートの一軸圧縮強度である。力学的拘束筋比 k_m は、コンクリートに作用する計算拘束圧 σ_{LY} とコンクリートの一軸圧縮強度 f'_c との比であり、材料強度が反映された無次元量であるため、高強度材料に対しても拘束効果を統一的に評価できる指標である。

図-11に各解析ケースにおける力学的拘束筋比 k_m と解析モデル全体の拘束効率 R の関係を示す。また、併せて力学的拘束筋比 k_m と靱性率 μ の関係を示す。図-10と同様、図中における各シンボルは各コンクリートの一軸圧縮強度を表しており、白抜きは拘束効率を、黒は靱性率を示している。拘束効率は全ての解析ケースについて、靱性率は $f'_c = 30$ MPa および 70 MPa の解析ケースについてプロットした。

図-11より、力学的拘束筋比 k_m が大きくなるに従い、ポストピークでの拘束効率は小さくなる傾向にあることが確認できる。また、その傾向はコンクリートの一軸圧縮強度によらず、ほぼ同じ傾向となっており、力学的拘束筋比 k_m は各種パラメータがポストピークでの拘束効果に与える影響を統一的に評価できる指標であると考えられる。



(a) 力学的拘束筋比 $k_m = 0.04$ (b) 力学的拘束筋比 $k_m = 0.10$ (c) 力学的拘束筋比 $k_m = 0.15$ (d) 力学的拘束筋比 $k_m = 0.29$
 図-13 力学的拘束筋比 k_m が異なる場合の拘束効率 R の分布

また、靱性率について図-11の結果を模式的に表現すると図-12のようである。図-12によれば、コンクリートの一軸圧縮強度が小さい方が靱性率は大きくなる傾向にあること、 $k_m = 0.10 \sim 0.15$ 程度の場合に靱性率はピークとなることが分かる。そのため、面積横拘束筋比および材料強度を $k_m = 0.10 \sim 0.15$ 程度になるように組み合わせることにより、効率的に靱性を高めることができる。

5.3 力学的拘束筋比 k_m の違いによる拘束効率分布

本節では、力学的拘束筋比 k_m の値と拘束効率の分布状況との関係について検討する。

力学的拘束筋比 k_m が $0.04 \sim 0.29$ の範囲を対象として、図-5に示す横拘束筋が巻かれている断面の拘束効率の分布状況を比較した結果を図-13に示す。ここでは、横拘束筋が降伏した後に平均軸方向応力がピークを迎えていた解析ケースにおいて、ピークひずみ時での拘束効率の分布状況を比較してある。力学的拘束筋比 k_m の計算に使用した横拘束筋の面積鉄筋比 p_s 、横拘束筋の降伏強度 σ_y 、コンクリートの一軸圧縮強度 f'_c については図中の値を参照されたい。

図-13によれば、力学的拘束筋比 k_m が大きくなるに従い、中心部分では拘束効率は徐々に小さくなっていく傾向にある。つまり、力学的拘束筋比 k_m が大きくなるに従い、コンクリート内部まで拘束効果が及ばない傾向にあることが分かる。

また、力学的拘束筋比 k_m が 0.10 以下の場合と 0.15 以上の場合とでは、拘束効率 $R = 1.0$ 以上の分布状況に違いが確認できる。力学的拘束筋比 $k_m = 0.10$ 以下の場合、 $R = 1.0$ 以上の範囲は隅角部から中心部に向かって広がる傾向にあるが、力学的拘束筋比 $k_m = 0.15$ 以上の場合、 $R = 1.0$ 以上の範囲は中心部ではなく、横拘束筋に沿って広がる傾向にあることが確認できる。つまり、力学的拘束筋比 k_m が大きくなるに従い、拘束効果は横拘束筋が接している部分にのみ及ぶ傾向にあることが分かる。

そのため図-5に示すように、鉄筋が巻かれている断面および鉄筋が巻かれていない断面における拘束効率の分布状況の進展を調べ、その違いについてより詳細な検討を次節で行った。

5.4 力学的拘束筋比 k_m の違いによる拘束効率の分布状況の進展

(1) 力学的拘束筋比 $k_m = 0.10$ の場合 (図-14)

鉄筋が巻かれていない断面の拘束効率の分布状況 (図-14(a)) と鉄筋が巻かれている断面の拘束効率の分布状況 (図-14(b)) とを比較した。

ピークひずみ時の拘束効率の分布状況について、鉄筋が巻かれている断面と鉄筋が巻かれていない断面とを比較した場合、鉄筋が巻かれている断面の隅角部における拘束効率は鉄筋が巻かれていない断面よりも大きい傾向にあるが、全体としての拘束効率の分布状況はどちらの断面もほぼ同様であり、力学的拘束筋比 k_m が小さい場合、横拘束筋による拘束効果はモデル全体に及ぶことが分かる。

次に、拘束効率の分布状況の進展を考察すると、拘束筋降伏前 ($\epsilon_z = 0.21\%$) では、拘束効率はほぼ一様に分布しており、その値は 0.2 程度である。横拘束筋降伏時 ($\epsilon_z = 0.42\%$) では、横拘束筋からの拘束力が強く作用し、拘束効率は中心部分までほぼ一様に分布しており、コンクリート内部までほぼ一様に拘束効果が及んでいることが分かる。その後、軸方向ひずみが増加するにつれて、隅角部およびコンクリート内部で拘束効率が大きくなっていく傾向にある。

(2) 力学的拘束筋比 $k_m = 0.29$ の場合 (図-15)

鉄筋が巻かれていない断面の拘束効率の分布状況 (図-15(a)) と鉄筋が巻かれている断面の拘束効率の分布状況 (図-15(b)) とを比較した。

ピークひずみ時の拘束効率の分布状況について、鉄筋が巻かれている断面と鉄筋が巻かれていない断面とを比

降伏強度 $\sigma_y = 175 \text{ MPa}$, 面積横拘束筋比 $p_s = 4.0 \%$, コンクリートの一軸圧縮強度 $f_c' = 70 \text{ MPa}$

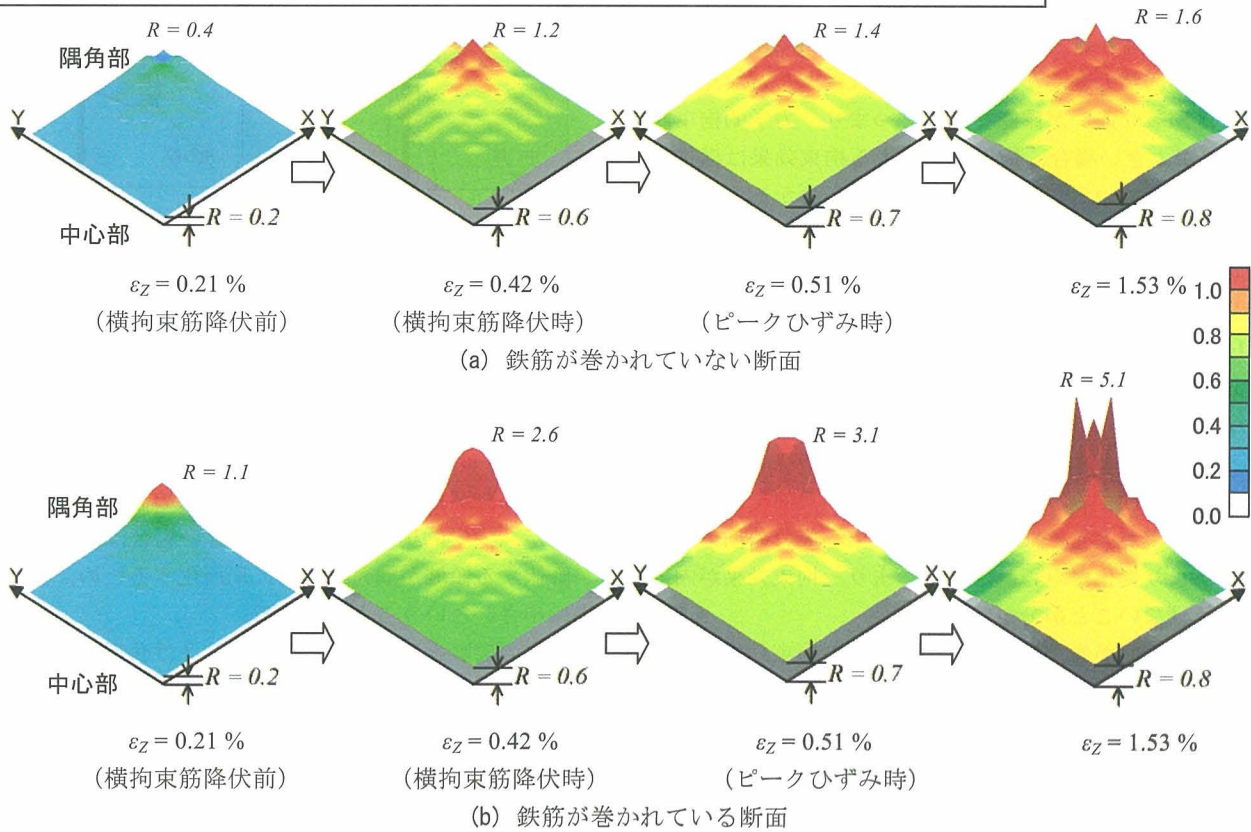


図-14 拘束効率 R の分布の進展 (力学的拘束筋比 $k_m = 0.10$ の場合)

降伏強度 $\sigma_y = 350 \text{ MPa}$, 面積横拘束筋比 $p_s = 2.0 \%$, コンクリートの一軸圧縮強度 $f_c' = 24 \text{ MPa}$

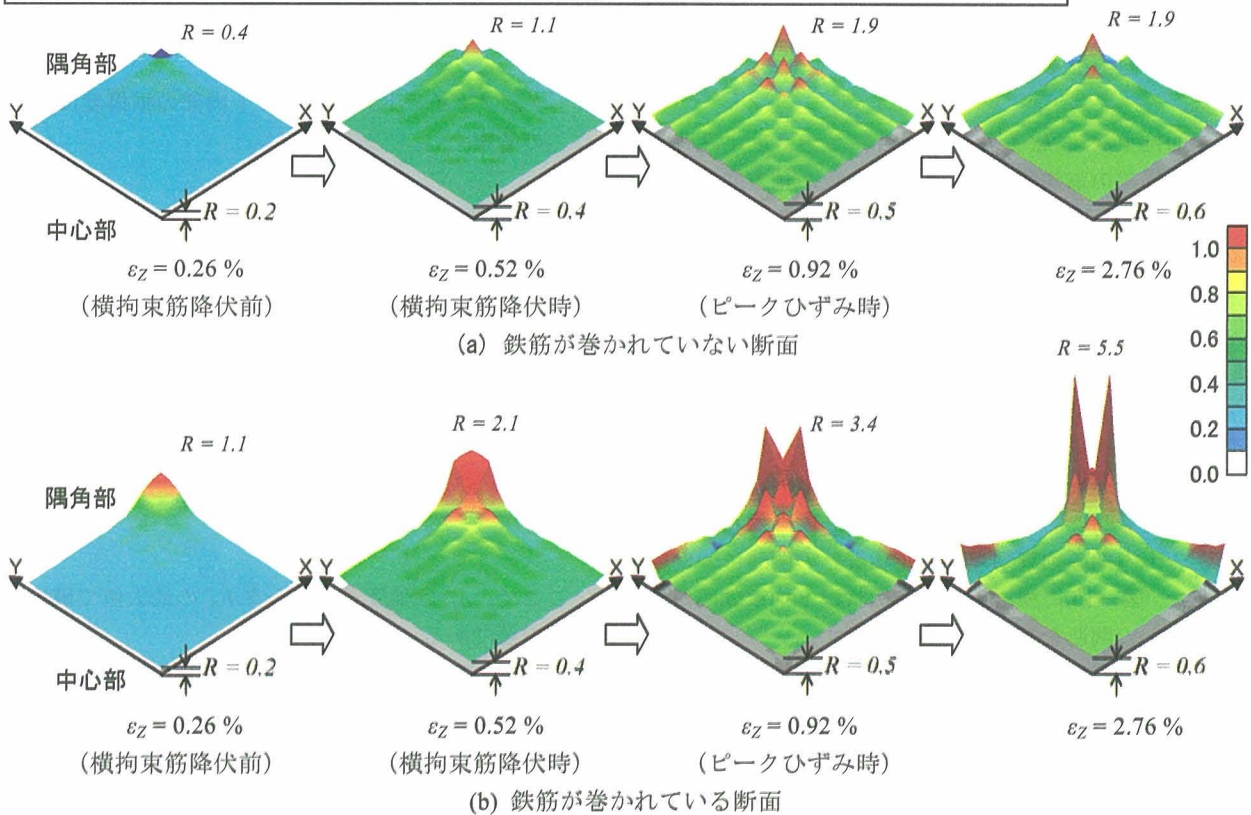


図-15 拘束効率 R の分布の進展 (力学的拘束筋比 $k_m = 0.29$ の場合)

較した場合、鉄筋が巻かれている断面では、隅角部において拘束効率 $R=1.0$ 以上と局所的に大きくなっているが、鉄筋が巻かれていない断面では、拘束効率 $R=1.0$ と局所的に大きくなっている部分はほとんどなく、両者には顕著な違いが確認できる。つまり、力学的拘束筋比 k_m が大きい場合、横拘束筋による拘束効果は横拘束筋が巻かれている部分にのみ及ぶことが分かる。

次に、鉄筋が巻かれている断面での拘束効率の分布状況の進展を考察すると、横拘束筋降伏前 ($\varepsilon_z=0.26\%$) では、拘束効率は 0.2 程度であり、力学的拘束筋比 $k_m=0.10$ の場合と同様である。横拘束筋降伏時 ($\varepsilon_z=0.52\%$) では、拘束効率の値は中心部分で $R=0.4$ と力学的拘束筋比 $k_m=0.10$ の場合より小さいが、分布状況は力学的拘束筋比 $k_m=0.10$ の場合と同様の傾向である。しかし、その後、軸方向ひずみが増加するに従い、隅角部では局所的に拘束効率が大きくなるのに対し、中心部分の拘束効率にはあまり変化がみられない。つまり、拘束効果が内部まで及ばないことが分かる。

また、鉄筋が巻かれていない断面での拘束効率の分布状況の進展は、横拘束筋が降伏した後、大きな変化がみられないことから、横拘束筋による拘束効果がほとんど及んでいないことが分かる。

(3) まとめ

力学的拘束筋比 k_m が小さい場合、横拘束筋による拘束効果は、横拘束筋が巻かれている部分だけでなく、モデル全体に一樣に及ぶということが分かった。それに対し、力学的拘束筋比 k_m が大きい場合、横拘束筋による拘束効果は、横拘束筋が巻かれている部分の表面部分に限定され、内部まで拘束効果が及ばないということが分かった。

力学的拘束筋比 k_m が小さい場合、ピークひずみ時までは隅角部で拘束効率が大きく、その後、軸方向ひずみの進展に伴い、内部の拘束効率が大きくなっていくが、この傾向は、塩屋ら¹⁶⁾が観測した角形コンファインドコンクリートの圧縮応力分布の進展の傾向と類似している。

5.5 横拘束筋の降伏状況

コンクリートはポアソン効果によって側方に膨らむことにより、横拘束筋から受動的な拘束圧を受ける。そのため、横拘束筋が降伏するとき拘束圧は最大となり、拘束効果が最も高い。ここでは、横拘束筋の降伏状況とコンクリート内部の拘束効率の分布状況との関連について考察した。図-16に横拘束筋の降伏状況と拘束効率が大きい領域との関連を表した概要図を示す。

力学的拘束筋比 $k_m=0.10$ と 0.29 の解析結果について横拘束筋の降伏状況を調べた結果、力学的拘束筋比 k_m が小さい場合（解析では 0.10 ）は、図-16(a)に示すように横拘束筋の隅角部以外が降伏し始めるが、力学的拘束筋比 k_m が大きい場合（解析では 0.29 ）は、図-16(b)に示すように横拘束筋の隅角部のみ降伏するという違い

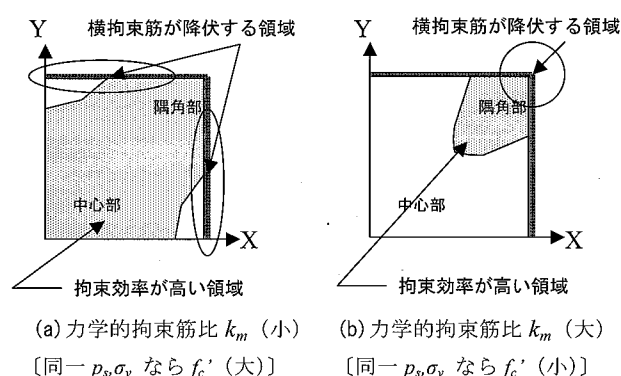


図-16 横拘束筋の降伏状況の比較

が確認できた。

つまり、力学的拘束筋比 k_m が小さい場合は、横拘束筋の大部分が拘束能力を発揮できるため、拘束効率が大きい。力学的拘束筋比 k_m が大きい場合は、横拘束筋が降伏する領域が隅角部近傍に局所化するため、拘束効率は小さいということが分かる。

既往の実験と比較すると、中塚ら³⁾は角形補強筋によるコンファインドコンクリートの拘束機構について実験的・理論的に考察し、図-16(a)にみられるような補強筋の降伏が生じていることを確認している。また、秋山ら⁴⁾は、試験体の破壊状況写真により横拘束筋が隅角部を支点として外側にはらみだしている様子を確認している。これらの実験における各種パラメータ（横拘束筋の面積鉄筋比、横拘束筋の降伏強度およびコンクリートの一軸圧縮強度）による力学的拘束筋比 k_m は $0.07\sim0.19$ 程度であり、解析から得られた知見と合致している。

6. コンファインドコンクリート内部の損傷度についての考察

6.1 損傷度 β の定義

本研究におけるコンクリートの材料構成則は、水野・畑中が開発したひずみ軟化型構成モデルであり、負荷曲面の大きさは強度パラメータ F_p で表される。

ここでは、コンファインドコンクリート内部の破壊状況を検討するために、ひずみ軟化域での損傷度 β なる指標を式(5)のように定義した。その概要を図-17に示す。

$$\beta = \frac{\eta_1 - F_p}{\eta_1} \quad (5)$$

ここで、 η_1 は強度パラメータ F_p の最大値で破壊曲面の時の値である。

例えば、破壊曲面上の応力点 A が軟化域において応力点 B までの経路を辿った場合、損傷度 β は $(224.2 - 100) / 224.2 = 0.55$ となる（同じ負荷曲面上では F_p 値は同じである）。それゆえ、破壊が開始する破壊曲面上では損傷度 $\beta=0.0$ 、破壊が終了する静水圧軸上では損傷度 $\beta=1.0$ となる。

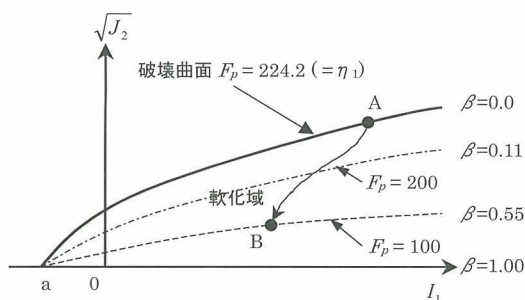


図-17 損傷度 β の定義

6.2 損傷度 β の分布状況の進展

ここでは、図-5 に示すような、鉄筋が巻かれている断面におけるピークひずみ以降の損傷度の分布状況を一例として示す。

図-18 には力学的拘束筋比 $k_m = 0.10$ の場合、図-19 には力学的拘束筋比 $k_m = 0.29$ の場合を示す。

(1) 力学的拘束筋比 $k_m = 0.10$ の場合 (図-18)

損傷は供試体中心部から始まっており、損傷度は 0.05 程度と軽微である。その後、軸方向ひずみの増加に伴い、損傷は断面全体に広がる傾向にある。ただし、中心部分の損傷度は大きい、隅角部は大きな拘束圧が作用しているため、損傷度は小さくなるという傾向にある。全体として損傷度はピークひずみ以降、増大する傾向にあり、モデル全体に圧縮軟化が進んでいることが推測できる。

(2) 力学的拘束筋比 $k_m = 0.29$ の場合 (図-19)

ピークひずみ時 ($\varepsilon_z = 0.92\%$)、鉄筋が巻かれた断面ではまだ損傷は生じておらず、ひずみ硬化域にある。ピークひずみ以降、軸方向ひずみの増加に伴って、コンクリート内部で大きくなる傾向にあるが、損傷度は力学的拘束筋比 $k_m = 0.10$ の場合と比較すると小さい。軸ひずみ

$\varepsilon_z = 4.00\%$ のような高ひずみ域であっても、内部の損傷度は 0.35 程度であり、比較的健全な領域が広く残っている。力学的拘束筋比 k_m が大きい場合、計算拘束圧 σ_{LY} が大きいため、損傷度が小さくなると考えられる。

7. 結論

本研究では、中心軸圧縮力を受ける角形コンファインドコンクリートのポストピーク領域にまで及ぶ三次元有限要素解析を行い、横拘束筋の面積鉄筋比 p_s 、横拘束筋の降伏強度 σ_y 、コンクリートの一軸圧縮強度 f'_c がコンクリートの内部性状に与える影響について検討した。

本研究で得られた結果をまとめると以下のようである。

- 1) 横拘束筋からの拘束力によりコンクリート内部への拘束効果は変化するため、「拘束力」の大きさではなく「拘束効率 R 」なる指標を導入することにより、拘束効果を統一的に評価した。
- 2) 横拘束筋の面積鉄筋比 p_s 、横拘束筋の降伏強度 σ_y 、およびコンクリートの一軸圧縮強度 f'_c が大きくなるに従い、最大圧縮強度は増加するが、その増加量は各種パラメータの増加量に正比例するものではないことが実験的に明らかされているが、解析的に内部性状を考察した結果、それらパラメータが大きくなるに従い、中心部分の拘束効率 R が小さくなる傾向を定量的に確認し、拘束効果が内部まで及んでいないことを示した。特に、一軸圧縮強度が大きい場合、横拘束筋が降伏していないため、中心部分の拘束効率 R が小さくなる傾向を解析的に確認した。
- 3) 拘束効果を評価する既往の指標である計算拘束圧 σ_{LY} では、コンクリートの一軸圧縮強度が拘束効果に

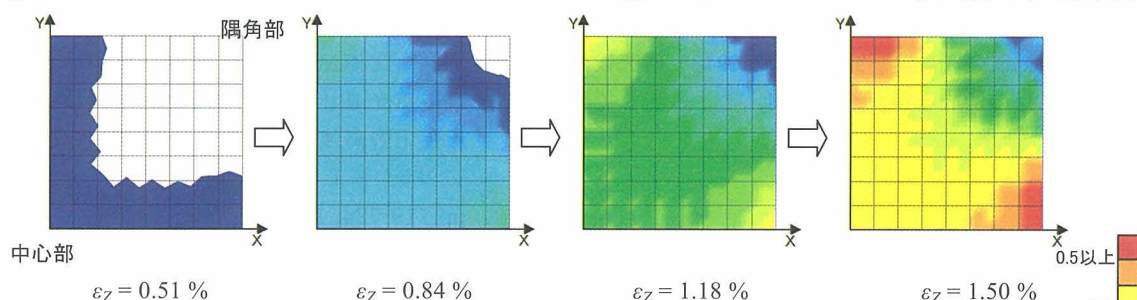


図-18 損傷度 β の分布の進展 (力学的拘束筋比 $k_m = 0.10$ の場合)

($p_s = 4.0\%$, $\sigma_y = 175\text{ MPa}$, $f'_c = 70\text{ MPa}$)

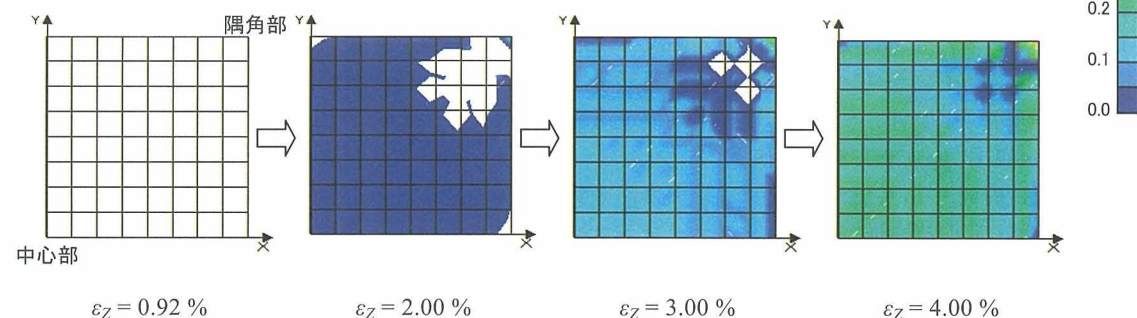


図-19 損傷度 β の分布の進展 (力学的拘束筋比 $k_m = 0.29$ の場合)

与える影響を十分に評価できないことを示し、「力学的拘束筋比 k_m 」なる指標を導入することにより、各種パラメータが拘束効果に与える影響を統一的に評価できることを示した。

- 4) ポストピークでの拘束効率 R と力学的拘束筋比 k_m の関係を考察した結果、力学的拘束筋比 k_m が大きくなるに従い、拘束効率 R は小さくなる傾向にあることを明らかにした。
- 5) 靱性率については、コンクリートの一軸圧縮強度が小さい方が靱性率は大きくなる傾向にあること、力学的拘束筋比 $k_m = 0.10 \sim 0.15$ 程度の場合に靱性率がピークとなることを明らかにした。
- 6) 力学的拘束筋比 k_m が小さい場合、横拘束筋の大部分が降伏しているため、鉄筋が巻かれている断面、および巻かれていない断面とも拘束効果が大きく、拘束が内部までほぼ一様に及ぶ傾向にあることが、コンクリート内部の拘束効率の分布状況から分かった。
- 7) 一方、力学的拘束筋比 k_m が大きい場合、隅角部の横拘束筋だけが降伏しているため、拘束効率が大きい部分は、横拘束筋が巻かれている部分の隅角部に限定され、鉄筋が巻かれていない断面および中心部分には拘束効果が及ばない傾向にあることが分かった。
- 8) コンクリート内部の損傷は、力学的拘束筋比 k_m が小さい場合、軸方向ひずみの増加に伴って、ほぼ一様に進展しモデル全体に及ぶ傾向があることが分かった。一方、力学的拘束筋比 k_m が大きい場合、コンクリート内部の損傷度の進展は力学的拘束筋比 k_m が小さい場合と比較して緩やかである。

謝辞：

本研究を実施するにあたり、平成17-18年度文部科学省科学研究費補助金（基盤研究（B）17360218 研究代表者：水野英二）の助成を得た。よって、ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 鈴木計夫, 中塚佑, 菅田昌宏: 角形横補強筋によるコンファインドコンクリートの拘束機構と強度・変形特性, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.11, No.2, pp.449-454, 1989.6
- 2) 中塚佑, 阪井由尚, 中川裕史, 鈴木計夫: 高強度材料による円形コンファインドコンクリートの強度・変形特性—コンファインドコンクリートの強度変形特性に関する研究（その 1）—, 日本建築学会構造系論文集, 第 483 号, pp.129-138, 1996.5
- 3) 中塚佑, 阪井由尚, 中川裕史: コンファインドコンクリートの強度・変形特性推定式—コンファインドコンクリートの強度・変形特性に関する研究（その 2）—, 日本建築学会構造系論文集, 第 505 号, pp.93-99, 1998.3

- 4) 秋山充良, 洪起男, 佐藤成禎, 鈴木将, 前田直己, 鈴木基行: 一軸圧縮を受ける高強度 RC 柱における横拘束筋の拘束効果と応力—ひずみ関係の定式化に関する実験的研究, 土木学会論文集, No.753/ V-62, pp.137-151, 2004.2
- 5) 秋山充良, 洪起男, 鈴木将, 佐々木敏幸, 前田直己, 鈴木基行: 普通強度から高強度までの構成材料を用いた RC 柱の一軸圧縮実験と圧縮破壊エネルギーを介したコンファインドコンクリートの平均化応力—ひずみ関係, 土木学会論文集, No.788/ V-67, pp.81-98, 2005.5
- 6) 中澤宣貴, 川島一彦, 渡邊学歩, 堺淳一: 円形断面高強度コンクリートの横拘束モデルの開発, 土木学会論文集, No.787/ I-71, pp.117-136, 2005.4
- 7) 吉田幸夫, 水野英二, 畑中重光: 円形コンファインドコンクリート内部の応力と損傷状態に関する FEM 解析, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.2, pp.97-102, 2002.6
- 8) P.Irawan and K.Mackawa: Three-Dimensional Analysis on Strength and Deformation of Concrete Confined by Lateral Reinforcement, J.Materials, Conc.Struct., JSCE, 472/V-20, pp.107-118, 1993.8
- 9) 伊藤誠, 水野英二, 畑中重光: 軸圧縮を受けるコンファインドコンクリートの内部性状に関する解析的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.2, pp.31-36, 2004.7
- 10) 水野英二, 畑中重光: 塑性理論によるコンクリートの圧縮軟化特性のモデル化, コンクリート工学論文集, Vol.2(2), pp.85-95, 1991.7
- 11) 水野英二, 畑中重光: 塑性理論によるコンクリートの経路依存型圧縮軟化特性のモデル化, コンクリート工学論文集, Vol.3(2), pp.1-13, 1992.7
- 12) 畑中重光, 服部宏己, 吉田徳雄, 谷川恭雄: 低側圧 3 軸圧縮下の高強度コンクリートの塑性変形挙動, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.12, No.2, pp.719-724, 1990.6
- 13) 畑中重光, 服部宏己, 近藤洋右, 谷川恭雄: 3 軸圧縮下の普通・高強度コンクリートの応力—ひずみモデル, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.13, No.2, pp.31-36, 1991.6
- 14) 蔣梅, 柏崎隆志, 野口博: 横補強筋に梁要素を用いた拘束コンクリートの 3 次元 FEM 解析, 日本建築学会大会学術講演梗概集(北陸), pp.179-180, 2002.8
- 15) 小阪義夫, 谷川恭雄, 畑中重光: 構成モデルに基づく各種横拘束コンクリートの圧縮靱性の統一評価, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.8, pp.365-368, 1986
- 16) 塩屋晋一, 黒木康博, 永田健二: 横拘束されたコンクリート柱の圧縮応力分布の測定実験, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.22, No.3, pp.187-192, 2000.6
(2007 年 4 月 12 日受付)