

論文 横拘束を受けるコンファインドコンクリートの拘束効果に関する解析的研究

伊藤 誠^{*1}・水野 英二^{*2}

要旨：本研究では、中心軸圧縮下で横拘束を受けるコンファインドコンクリートの拘束効果に関して、実験データを検証するとともに、三次元有限要素解析を実施した。ここでは、コンクリートの一軸圧縮強度、横拘束筋の降伏強度および面積横拘束筋比が拘束効果に及ぼす影響について考察し、拘束効果に対して定量的な評価を試みた。また、「拘束係数」および「靱性率」なる指標を導入し、最も効果的な拘束パターンについても解析的な観点から検討した。

キーワード：拘束効果、力学的拘束筋比、靱性率、拘束係数、コンファインドコンクリート

1. はじめに

兵庫県南部地震以降、鉄筋コンクリート（RC）構造物の耐震設計方法は大きく変わり、RC部材の最終的な変形能力が求められるようになってきており、ポストピーク挙動や塑性変形性能に関する実験的研究が数多く行われ、その評価¹⁾がなされている。

また、近年では断面寸法の縮小による地震力の低減が見込めることから高強度コンクリートが採用される場合や、従来の普通強度鉄筋では過密配筋になるため、それを避けるために高強度鉄筋²⁾が使用される場合が増えている。

これまで、高強度材料を用いた実験的研究については、中澤ら³⁾が円形断面を、秋山ら⁴⁾が角形断面を対象に塑性変形性能の定量化を行い、応力-ひずみ曲線の定式化を試みているが、解析的研究は少ないのが現状である。

そこで、本研究では、拘束効果に影響を与えると考えられる、コンクリートの一軸圧縮強度 f_c' 、横拘束筋の降伏強度 σ_y および面積横拘束筋比 p_s をパラメータとし、コンクリートならびに横拘束筋の材料強度を普通強度から高強度まで変動させた三次元有限要素解析を実施し、コンファインドコンクリートの拘束効果について、解析的に考察した。

2. 拘束効果に関する実験的検証

2.1 秋山らの実験結果

秋山ら⁴⁾は一辺の長さ $D = 250 \text{ mm}$ の角形断面で、 $H/D = 3$ （ H ：供試体高さ）の実験供試体により、横拘束筋の降伏強度 σ_y を317, 1028, 1288 MPaと3種類、面積横拘束筋比 p_s を0.16, 0.24, 0.48, 0.96%と4種類、コンクリートの一軸圧縮強度 f_c' を40.4, 68.1, 99.4 MPaと3種類、それぞれ変化させた軸圧縮実験を行い、各種パラメータが平均応力-平均ひずみ関係に与える影響を考察している。

実験結果より、コンクリートの一軸圧縮強度 f_c' の影響として、1) f_c' が大きくなるにしたがい、面積横拘束筋比 p_s の増加に対する圧縮強度増分が小さくなること、2) f_c' が大きくなるにしたがい、コアコンクリートの横膨張量が小さくなるため、横拘束筋からの受動的な拘束圧が小さくなることを明らかにしている。また、横拘束筋の降伏強度 σ_y の影響として、1) σ_y が大きくなっても、圧縮強度の増加やポストピークでの下降勾配は緩やかになるといったコンファインド効果に対する大幅な改善は期待できないこと、2) 横拘束筋に高強度鉄筋を使用した場合、最大強度時において横拘束筋が降伏していないことを明らかにしている。

*1 東急建設（株） 土木エンジニアリング部 博士（工学）（正会員）

*2 中部大学 工学部 都市建設工学科 教授 Ph.D.（正会員）

2.2 実験結果に対する拘束効果の定量的評価

本節では、「拘束係数 k 」および「靱性率 μ 」を導入することにより、秋山らの高強度コンクリートおよび高強度鉄筋を使用したコンファインドコンクリートの実験結果を基に、内部コンクリートへの拘束効果を定量的に評価する。拘束係数 k は圧縮強度の増加に対する指標、靱性率 μ はポストピークにおける下降勾配の改善に対する指標であり、以下に示す(1)式および(2)式を定義する。

【拘束係数 k 】

$$F_{cf} = F_c + k \cdot \sigma_{LY} \quad (1)$$

ここで、

F_{cf} : コンファインドコンクリートの
圧縮強度

F_c : プレーンコンクリートの
圧縮強度

σ_{LY} : 計算拘束圧($=\sigma_y \times p_s$)

【靱性率 μ 】

$$\mu = \frac{\varepsilon_d}{\varepsilon_c} \quad (2)$$

ここで、

ε_d : 終局時のひずみ量 (図-1 参照)

ε_c : 最大荷重時のひずみ量

秋山らの実験結果を考察することにより得られる拘束係数 k と力学的拘束筋比 k_m との関係を図-2 に示す。ここで、力学的拘束筋比 k_m は(3)式により定義される。

$$k_m = \frac{\sigma_y \cdot p_s}{f'_c} \quad (3)$$

ここで、

σ_y : 横拘束筋の降伏強度

p_s : 面積横拘束筋比

f'_c : コンクリートの一軸圧縮強度

図-2 より、力学的拘束筋比 k_m が大きい領域では、横拘束筋の降伏強度 σ_y の違いによる影響を考察できないが、小さい領域では $\sigma_y = 317 \text{ MPa}$ の場合の拘束係数 k は、 $\sigma_y = 1028$ および 1228 MPa と比較して大きくなっており、図-3 に示すように、横拘束筋の降伏強度 σ_y が大きくなるにした

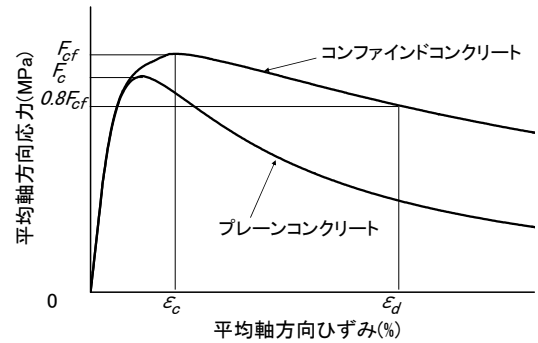


図-1 終局時のひずみ量 ε_d の定義

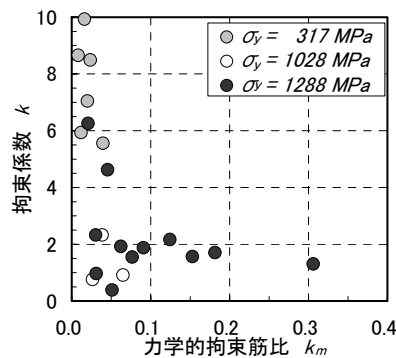


図-2 秋山らの実験結果に対する k - k_m 関係

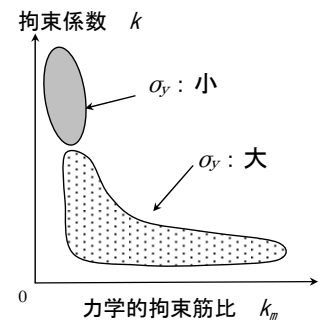


図-3 k - k_m 関係の傾向

がい、圧縮強度に対する拘束効果は小さくなる傾向にあることが分かる。

次に、靱性率 μ と力学的拘束筋比 k_m との関係を検証した結果を以下に述べる。

秋山らの実験では、供試体上下端部の端面摩擦の影響により破壊領域とならない部分が存在するが、非破壊領域を含めた供試体全長を基に平均ひずみを算出しているため、平均応力-平均ひずみ曲線のポストピーク領域の挙動は脆性的なものとして評価される。それゆえ、これら

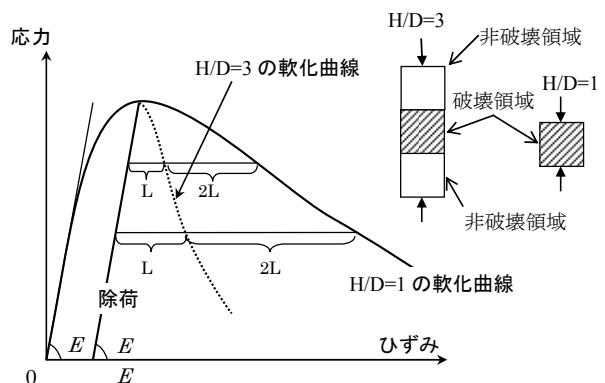


図-4 破壊領域を考慮した応力-ひずみ関係

実験結果から直接、本研究で定義する靱性率 μ を算出すると靱性率 μ を小さく評価する結果となるため、本節で用いる靱性率 μ の算出に関しては、破壊領域と非破壊領域とを区分し、図-4に示すように、破壊領域での応力-ひずみ関係を推定した上で靱性率 μ を算出した。端部拘束を受ける $H/D=2$ 以上の試験体の破壊領域は、既往の実験結果⁵⁾よりおよそ $H/D=1$ の領域であるため、破壊領域を $H/D=1$ の領域と仮定した。

靱性率 μ と力学的拘束筋比 k_m との関係を検証した結果を図-5に示す。

図-5を考察すると、コンクリートの一軸圧縮強度 f_c' が小さくなるにしたがい、靱性率 μ は大きくなる傾向があることが分かる。また、力学的拘束筋比 k_m の増加に伴い、靱性率 μ は大きくなる傾向にあるが、コンクリート強度が高強度($f_c' = 99.4 \text{ MPa}$)の場合、靱性率 μ はおよそ $k_m = 0.05$ 以降は増加しておらず、図-6に示すように、高強度コンクリートの場合、ある一定量以上、横拘束筋量を増加させても靱性率 μ は大きくなりず、ポストピーク域における塑性変形能力は改善されない傾向にあることが分かる。

3. 拘束効果に関する解析的検証

3.1 コンファインドコンクリートの三次元有限要素解析

本解析では、面積横拘束筋比 $p_s = 0.0 \sim 4.0\%$ 、横拘束筋の降伏強度 $\sigma_y = 175 \sim 700 \text{ MPa}$ 、コンクリートの一軸圧縮強度 $f_c' = 24 \sim 70 \text{ MPa}$ と変化した全68ケースのパラメトリック解析を実施した。

本解析に関する詳細および解析結果については前報⁶⁾を参照されたい。

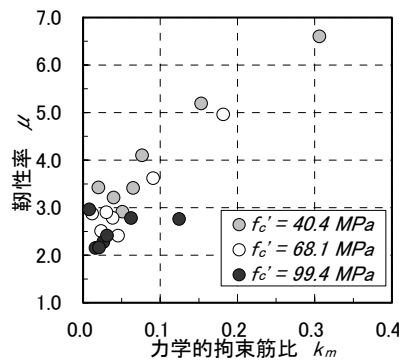


図-5 秋山らの実験結果に対する $\mu - k_m$ 関係

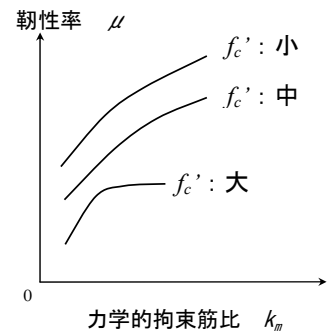


図-6 $\mu - k_m$ 関係の傾向

3.2 解析結果の妥当性の検証

本節では、解析結果の妥当性について、高強度コンクリートおよび高拘束圧作用時についての既往のコンファインドコンクリート圧縮実験結果^{7,8)}に対する再現解析により検証した。再現解析結果と実験結果との比較結果を図-7に示す。なお、本解析では、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「ひずみ軟化型構成モデル⁶⁾」を用いた。

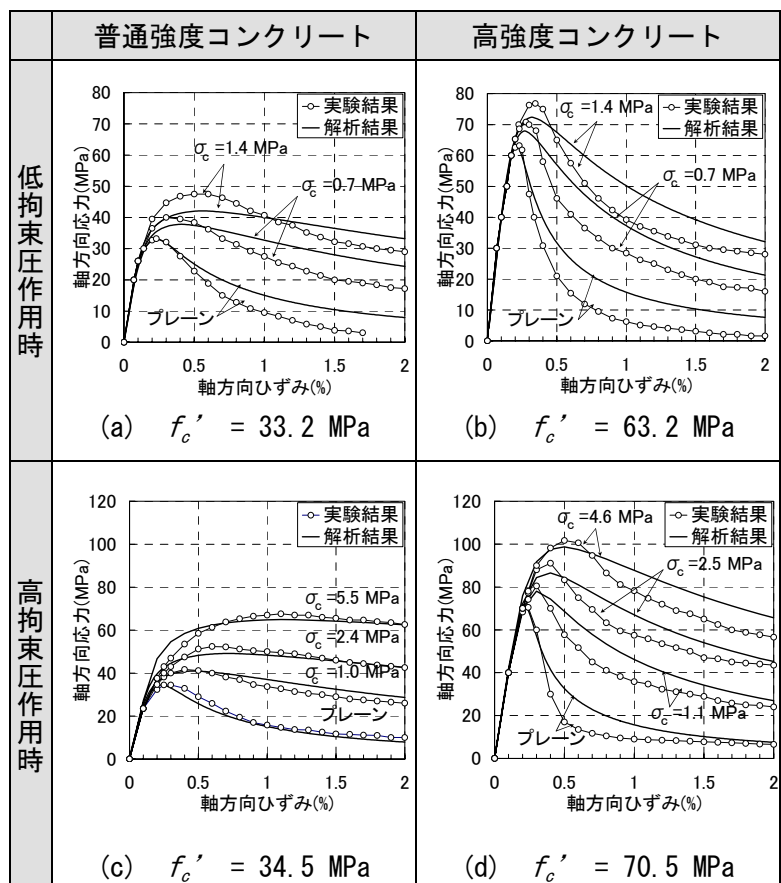


図-7 解析の妥当性の検証

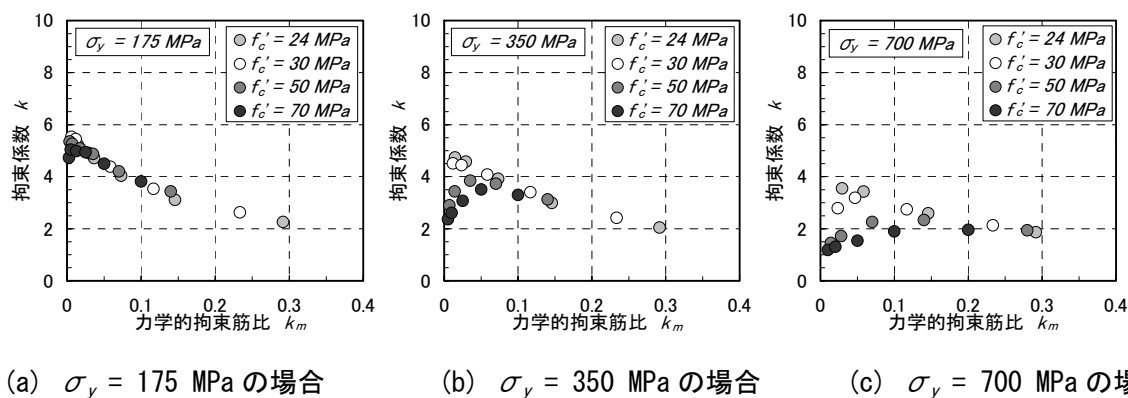


図-8 拘束係数と力学的拘束筋比との関係

図-7 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一致を示していることが分かる。また、拘束効果の影響を受ける下降領域では、解析結果は実験結果よりも若干延性的であるが、下降領域自体が不安定な領域であることを勘案すれば、概ね良好一致を示している。すなわち、本研究での解析結果はコンクリートの一軸圧縮強度が 70 MPa 程度まで、拘束圧が 5.5 MPa 程度までの高レベルであっても妥当性があると判断できる。

3.3 拘束係数 k に関する考察

解析結果を考察することにより得られる拘束係数 k と力学的拘束筋比 k_m との関係を図-8 に示す。図では、横拘束筋の降伏強度 σ_y ごとにコンクリートの一軸圧縮強度 f_c' 別に整理した。

図-8 を考察すると、横拘束筋の降伏強度 σ_y が大きくなるにしたがい、拘束係数 k は小さくなる傾向にあり、横拘束筋の降伏強度 σ_y の影響としては、図-9(a)に示すような関係がみられ、図-3 で示した秋山らの実験結果⁴⁾から得られた

傾向と一致する。

コンクリートの一軸圧縮強度 f_c' の影響としては、横拘束筋の降伏強度 $\sigma_y = 175 \text{ MPa}$ の場合、 f_c' に拘わらず、力学的拘束筋比 k_m が大きくなるにしたがい、拘束係数 k が小さくなる傾向がみられるが、横拘束筋の降伏強度 $\sigma_y = 350 \text{ MPa}$, 700 MPa と大きくなるにしたがい、力学的拘束筋比 k_m が小さい領域において、 f_c' の違いによる拘束係数の差が顕著となっており、秋山らの実験結果に対する考察からは得ることのできなかった傾向がみられる。

図-8 から、コンクリートの一軸圧縮強度 f_c' の影響について、拘束係数 k と力学的拘束筋比 k_m との関係を模式的に示すと、図-9(b)のようである。すなわち、コンクリートの一軸圧縮強度 f_c' が大きくなるにしたがい、力学的拘束筋比 k_m と拘束係数 k との関係は凸形の曲線を描く傾向にあり、拘束係数 k が最大となる力学的拘束筋比 k_m が存在することが解析的に考察できる。

そこで、拘束係数 k が最大となる力学的拘束

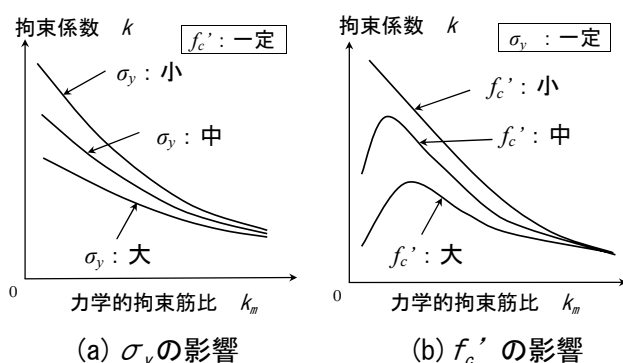


図-9 $k-k_m$ 関係の模式図

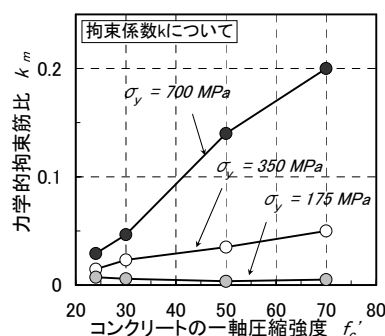


図-10 圧縮強度に対する効果的な拘束パターン

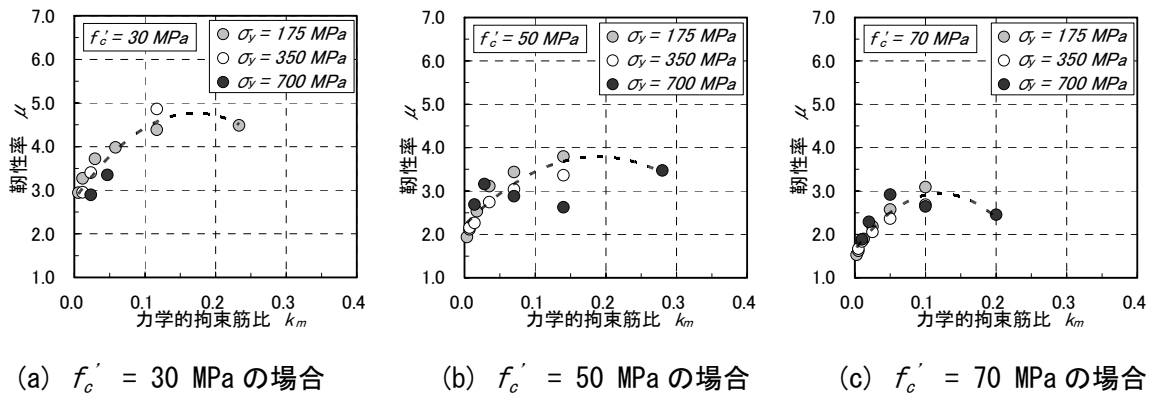


図-11 靱性率と力学的拘束筋比との関係

筋比 k_m の値を調べ、効率的な拘束パターンについて考察した結果を図-10に示す。

横拘束筋の降伏強度 σ_y が小さい場合は、最も効率良く圧縮強度を増加させることのできる力学的拘束筋比 k_m は、コンクリートの一軸圧縮強度 f'_c によらずほぼ一定であるが、横拘束筋の降伏強度 σ_y が大きくなるにしたがい、コンクリートの一軸圧縮強度 f'_c が大きいほど、最も効率良く圧縮強度を増加させることのできる力学的拘束筋比 k_m は大きくなる傾向にあることが図-10より分かる。

3.4 靱性率 μ に関する考察

解析結果を考察することにより得られる靱性率 μ と力学的拘束筋比 k_m との関係を図-11に示す。図では、コンクリートの一軸圧縮強度 f'_c ごとに横拘束筋の降伏強度 σ_y 別に整理した。

図-11を考察すると、横拘束筋の降伏強度 σ_y の影響は小さく、コンクリートの一軸圧縮強度 f'_c が小さくなるにしたがい、靱性率 μ は大きくなる傾向にあり、図-5に示した検討結果と同じ傾向になる。

また、図中にはコンクリートの一軸圧縮強度 f'_c ごとに近似曲線を表示しているが、凸形の曲線となっており、靱性率 μ にはピークが存在する傾向にあることが分かる。

図-11から、コンクリートの一軸圧縮強度 f'_c の影響について靱性率 μ と力学的拘束筋比 k_m との関係を模式的に示すと、図-12のよう

である。

秋山らの実験結果ではコンクリートの一軸圧縮強度 f'_c が高強度 ($f'_c = 99.4 \text{ MPa}$) の場合のみ、力学的拘束筋比が増加しても靱性率 μ が大きくなれないという傾向がみられたが、図-12に示すように、コンクリートの一軸圧縮強度 f'_c に拘わらず、靱性率 μ が最大となる力学的拘束筋比 k_m が存在することが解析的に考察できる。

そこで、靱性率 μ が最大となる力学的拘束筋比 k_m の値を調べ、効率的な拘束パターンについて考察した結果を図-13に示す。

コンクリートの一軸圧縮強度 f'_c が大きくなるにしたがい、最も効率よく靱性率 μ を改善できる力学的拘束筋比 k_m は、小さくなる傾向にあるが、概ね 0.10~0.15 の範囲にあることが図-13より分かる。

4. 効果的な拘束パターンに関する一検討例

図-14に示すような1辺が50 cmの角形RC柱（横拘束筋間隔が15 cm）について、効果的な

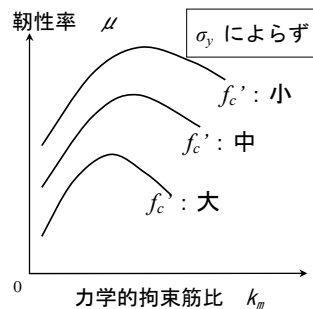


図-12 $\mu - k_m$ 関係の模式図

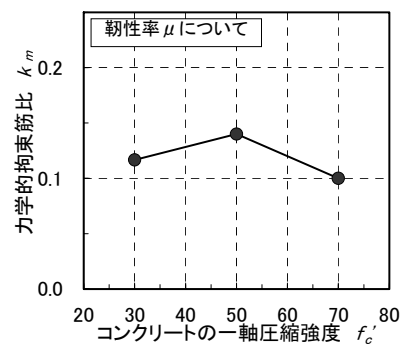


図-13 塑性変形に対する効果的な拘束パターン

拘束パターンに関して検討した。

コンクリートの一軸圧縮強度 $f'_c = 50 \text{ MPa}$ 、横拘束筋の降伏強度 $\sigma_y = 350 \text{ MPa}$ の場合、圧縮強度に対する最も効果的な力学的拘束筋比 k_m の値は、図-10 より 0.035 であるので、最適な面積横拘束筋比 p_s は $p_s = 0.035 \times 50 / 350 = 0.005$ となり、 $p_s = 0.5 \%$ となる配筋が最も効率的に圧縮強度を増加させることになる。また、塑性変形に対する最も効果的な力学的拘束筋比 k_m の値は、図-13 より 0.14 であるので同様の計算より、 $p_s = 2.0 \%$ とすれば、最も効率的にポストピーク挙動を改善できることになる。

5. まとめ

本研究で得られた結論を以下にまとめる。

- (1) コンファインドコンクリートの拘束効果に対して、「拘束係数 k 」および「靱性率 μ 」なる指標を導入して定量的評価を行った。
- (2) 既往の実験結果を基に、拘束係数 k は横拘束筋の降伏強度 σ_y が大きくなるにしたがい、小さくなる傾向にあること、靱性率 μ はコンクリートの一軸圧縮強度 f'_c が大きくなるにしたがい、小さくなる傾向にあることを考察した。
- (3) コンファインドコンクリートのパラメトリック有限要素解析を実施し、拘束効果の解析的検証を行ない、実験結果から考察された傾向と同様の傾向があることを確認した。
- (4) 加えて、拘束係数 k および靱性率 μ は、コンクリートの一軸圧縮強度 f'_c に応じて、それぞれ最大値となる力学的拘束筋比 k_m が存在することを解析的に明らかにした。
- (5) 拘束係数 k および靱性率 μ が最大となる力学的拘束筋比 k_m を基に、角形 RC 柱に対する最も効果的な拘束パターンを例示した。

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, 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。

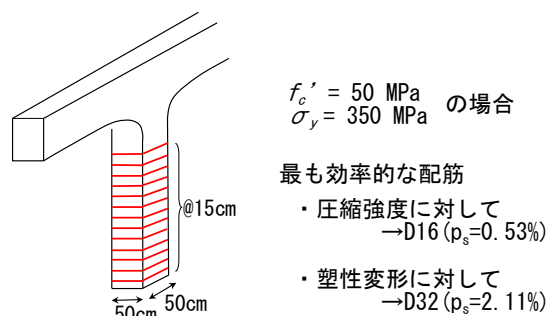


図-14 効果的な拘束パターン

参考文献

- 1) (社)日本コンクリート工学協会：コンクリート構造物のポストピーク挙動評価と設計への応用，2003
- 2) 水口和之, 芦塚憲一郎, 大塚一雄：高強度鉄筋, 高強度コンクリートの高橋脚への活用, コンクリート工学, Vol.36, No.11, pp.37-40, 1998
- 3) 中澤宣貴, 川島一彦ほか：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
- 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) 小池狭千朗, 畑中重光：横拘束コンクリートの圧縮特性に及ぼす供試体の形状・寸法の影響, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.12, No.2, pp.707-712, 1990
- 6) 伊藤誠, 水野英二, 畑中重光：軸圧縮力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
- 7) 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
- 8) 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