

# RC 中心圧縮部材の拘束効果に関する数値解析的研究

構造及びコンクリート工学分野 高井 由喜

## Abstract

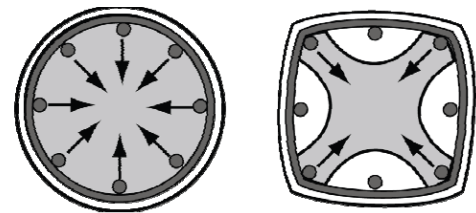
鉄筋コンクリート(以下, RC と称す)構造部材の変形性能を向上させるために, 帯鉄筋を適切に配置し, 曲げ圧縮部の靱性を増大することは重要である. 本研究では帯鉄筋配置間隔をパラメータとした RC 柱部材の中心圧縮載荷実験を行った結果をもとに, コアコンクリート, 帯鉄筋, 主鉄筋およびかぶりコンクリートを各々ひずみ空間で定義した構成則を導入した有限要素解析を通して評価し, その圧縮強度到達後のひずみ軟化域を含む挙動, 特に帯鉄筋で拘束されたコンクリート(以下, コアコンクリート)の応力ひずみ関係を明らかにしようとするものである. その結果, 帯鉄筋の作用状態の定量評価に検討すべき点を残すものの拘束効果による強度上昇を反映した応力-ひずみ関係を得た.

## 1. はじめに

兵庫県南部地震以降, 構造物に適切な耐震性を確保するため, 鉄筋コンクリート(以下, RC と称す)柱部材の変形性能の向上が求められるようになった. RC 柱部材の変形性能を向上させるためには, 曲げ圧縮部コンクリートの靱性を増大することが有効である. その具体的な手段として, 現在, 帯鉄筋や鋼管などが挙げられる. 拘束効果が及ぶ領域は図 1 に示すように断面形状によって異なり, 円形ではコアコンクリート部全域に一樣であるが, 角形断面においては断面内の位置によって異なることが知られており, 断面寸法や帯配筋と拘束領域の関係は明瞭にされていない. しかし, これらを実験のみで明らかにすることは困難であり, コアコンクリートの平均的な挙動として取り扱っているのが現状である<sup>1)</sup>. そこで, 横拘束筋を加えたコアコンクリートの拘束効果を厳密に評価できれば配筋構造細目にも合理的な根拠を与えることができると考えられる. それには, 解析的アプローチが有用であると考えられており, 弾塑性構成則に関する研究としてこれまでに種々の試みがなされてきた. なかでも, ひずみ空間において定義された塑性増分理論で定式化された構成則モデルが有用であることが知られている<sup>2)3)</sup>.

本研究は, 帯鉄筋比を実験変数とした角形 RC 中心圧縮実験結果を対象に, 圧縮軟化域を含めた部材の全体の挙動と帯鉄筋により与えられる拘束効果の発生機構を有限要素解析<sup>4)</sup>を通して, 検討を加えたものである. なお, 検討の手順として, RC 部材の構成材料である(1)コアコンクリート; (2)帯鉄筋; (3)主鉄筋およびかぶりコンクリートを(1)コアコンクリートを基準の構成材料として順次他要素を重ね合わせ, これら各々の組み合わせで有限要素解析を行った. そして, 各段階において上記

解析対象の実験結果ならびに既往の設計式や研究成果との比較を通しモデル妥当性の検証をふまえ検討を進める.



(a) 円形断面 (b) 矩形断面  
 図 1 断面の違いによる拘束領域の違い

## 2. ひずみ空間モデル

本研究で用いた構成則モデルは, 1977 年に Lade<sup>5)</sup>が提案した構成則を基礎として, 水野ら<sup>3)</sup>によりコンクリートの引張成分を考慮し, ひずみ空間において定式化された, ひずみ軟化を考慮できる構成則モデルである. 応力空間とひずみ空間での載荷関数をそれぞれ  $f$ ,  $F$  とすると, 次式が書ける.

$$df = \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} d\sigma_{ij} \quad dF = \frac{\partial F}{\partial \varepsilon_{ij}} d\varepsilon_{ij} \quad (1)$$

式(1)で示す応力空間での載荷関数の増分  $df$  は図に示すように, 応力空間で弾塑性挙動を表すと, 軟化は除荷と同一の式で判定する. 一方ひずみ空間では, このような矛盾が生じなくなり, 解析上有利となる.

本研究で用いる載荷関数  $F$  と塑性ポテンシャル関数  $G$  を以下に示す.

$$F = (\overline{AI_1 + a})^3 - \left[ 27 + f_p \left( \frac{P_a}{AI_1 + a} \right)^m \right] \left[ \frac{(\overline{AI_1 + a})^3}{27} - \frac{1}{3} (\overline{AI_1 + a}) \overline{BJ_2 + CJ_3} \right] = 0 \quad (2)$$

$$G = (\overline{AI_1 + a})^3 - \left[ 27 + \eta_2 \left( \frac{P_a}{AI_1 + a} \right)^m \right] \left[ \frac{(\overline{AI_1 + a})^3}{27} - \frac{1}{3} (\overline{AI_1 + a}) \overline{BJ_2 + CJ_3} \right] = 0 \quad (3)$$

$m$ : 降伏曲面の曲率.  $m > 0$  のとき鐘型,  $m = 0$  のとき円錐

型,  $m < 0$  のとき開口が広がる形.  $P_a$ : 大気圧,  $a$ : 静水圧軸上での引張方向への移動量( $a > 0$ ),  $f_p$ : 硬化及び軟化を示すパラメータ,  $\bar{I}_1$ : ひずみの第1不変量,  $\bar{J}_2, \bar{J}_3$ : 偏差ひずみの第2, 第3不変量,  $\bar{A}$ :  $\bar{A} = 3K$  ( $K$ : 体積弾性係数),  $\bar{B}$ :  $\bar{B} = 4\mu^2$  ( $\mu$ : せん断弾性係数),  $\bar{C}$ :  $\bar{C} = 8\mu^3$

本研究では, これらのパラメータを関連流動則を用い  $F = G$  とし, この载荷関数を汎用ソフト FINAL<sup>4)</sup> にユーザーサブルーチンとして組み込み, 有限要素解析を行なう. また, 一部解析において従来モデル(以下, 応力空間モデル<sup>4)</sup>と記す)と比較することで, 本研究で用いたモデルの有用性を確認する.

### 3. 数値解析結果と考察

本研究は, 一昨年度行った帯鉄筋体積比の違いによる拘束効果の比較を行うため, 帯鉄筋間隔  $s$  をパラメータとした正方形断面 RC 柱模型の中心圧縮実験を対象としている. 表 1 に示す供試体名 S-○の数字は帯鉄筋間隔  $s$  を表しており, 各章ごとに表に示すモデルで考察を行う. なお表 2-3 に示す材料定数は一昨年度実験で得られたものであり, 実験結果は比較対象解析の結果と共に示す.

表 1 対象供試体および解析モデル名

対象供試体名	解析モデル名			
	3.1	3.2	3.3	3.3
S-60	h30-c	h30-co	h30-full	(h30-cso)
S-90	h45-c	h45-co	h45-full	(h45-cso)
S-150	h75-c	h75-co	h75-full	(h75-cso)

表 2 コンクリートの材料定数<sup>2)</sup>

case	圧縮強度 $\sigma_c$ (N/mm <sup>2</sup> )	引張強度 $\sigma_t$ (N/mm <sup>2</sup> )	弾性係数 $E_c$ (kN/mm <sup>2</sup> )	ポアソン比 $\nu$
S60	23.5	1.69	24.8	0.21
S90	24.8		25.4	
S150	24.3		25.2	

表 3 鉄筋の材料定数<sup>2)</sup>

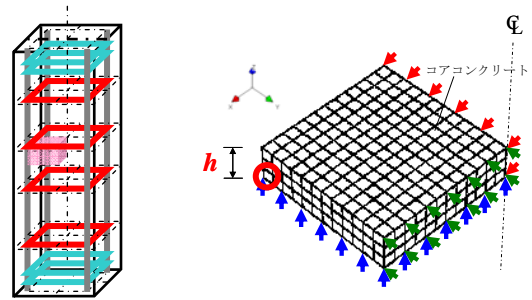
	公称直径 $d$ (mm)	弾性係数 $E_s$ (kN/mm <sup>2</sup> )	降伏強度 $\sigma_{sy}$ (N/mm <sup>2</sup> )	降伏ひずみ $\epsilon_{sy}$ ( $\mu$ )
主鉄筋(D16)	15.9	182.5	342.7	1878
帯鉄筋(D6)	6.35	198.5	357.2	1799

#### 3.1 コアコンクリートのみの解析

##### 3.1.1 解析概要

断面寸法は 120mm×120mm の正方形断面を有し, 高さ  $h$  は実験で用いた帯鉄筋間隔の  $s/2$  にあたる  $h=30, 45, 75$  を対象に計 3 体ずつ解析を行った. 解析モデル名を表 1 に示す. なお, この解析モデル寸法は, 実験で用いた供試体のコアコンクリート 1/4 断面と同様であり(図 2 参照), 本研究において最も基本となる解析である. また, 本解析において応力空間モデルとの比較を行うことで, 2. で示したひずみ空間で定式化した構成則の有用性を検証する. 解析モデルには, コンクリートに 3 自由度 (x,y,z 方向並進)8 節点 6 面体アイソパラメトリック要素

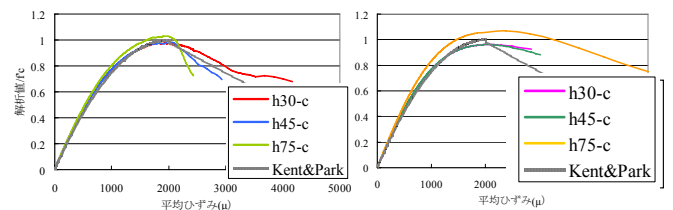
(以下, ソリッド要素)を用いた. 図 2 に解析モデル概要を示す. 一要素  $10 \times 10 \times 10$  (mm<sup>3</sup>) とし, 解析高さの関係上 z 軸方向が半分になる場合は解析上部に位置づけた. なお, 境界条件は y-z 面の境界辺では, 辺上全節点の x 軸方向並進を拘束し, x-z 面の境界辺では, 辺上全節点の y 軸方向並進を拘束し, x-y 面の境界辺では, z 軸方向並進を拘束することで対称条件を満たしている. 载荷は部材上端部全節点鉛直方向(z 方向)に軸ひずみ量が最大応力に到達後, 最大応力 20% 前後の軟化域の挙動をとらせるように強制変位を与えた.



a) 対象範囲 b) 解析モデルイメージ

図 2 解析モデル概要

##### 3.1.2 解析結果



(a) ひずみ空間モデル (b) 応力空間モデル

図 3 応力-ひずみ関係

図 3 に応力-ひずみ関係を構成則別に示す. 解析で求められた応力を圧縮強度  $f_c$  で除した値とひずみ関係のグラフおよび Kent&Park が提案した無拘束状態のコンクリートの応力-ひずみ関係<sup>9)</sup>を示す. ひずみ空間モデルを用いたモデルは最大応力値  $f_c$  の値に達した後, Kent&Park の提案した軟化勾配に近い勾配を示した. 一方で, 応力空間モデルは初期勾配および応力上昇域においては比較的似た勾配を示しているが, 最大応力値  $f_c$  の値にばらつきがあり, 軟化勾配も Kent&Park が定めたものよりも緩やかな勾配を示す. 図 4 は両構成則よりえられた体積ひずみ曲線(解析モデル: h30-c)である. なお, 図 4 に示す値は図 2(b)に示す赤丸の要素のひずみである. 一軸圧縮を受けるコンクリートの体積ひずみの挙動は, 図 4 に示すようにその最大圧縮強度  $f_c$  の約 30% まではほぼ線形弾性的で増加し, 約 75-90% に達すると体積膨張をする挙動を示す. しかし, どちらの空間モデルにおいても, 最大圧縮強度  $f_c$  まで線形弾性的にひずみが増加し, その後挙動が不安定になり解析が終了した. 以

下、ひずみ空間モデルについて考察する。当解析では式(2)、(3)は同一とする関連流動則を適用した。しかし、本来 Lade が提案した構成則モデルを導くにあたって用いた実験により二式は同一ではないことが示されており、二式を同一と塑性膨張ひずみに対して精度が低い比関連流動則として適用すべきものである。しかしながら、図3より、応力空間モデルと比較し、ひずみ空間モデルは最大強度以降の軟化勾配の再現性に優れていることがわかった。

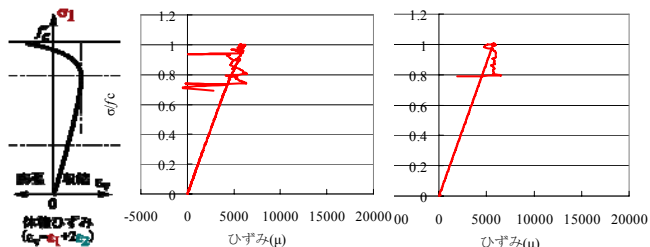


図4 構成則の違いによる体積ひずみの違い

### 3.2 帯鉄筋の影響を考慮したコンクリートの解析

#### 3.2.1 解析概要

解析モデルを図5に示す。なお、3.1で用いたモデルに帯鉄筋要素を配置したものであり、帯鉄筋間隔の1/2を対象としているため、上部に帯鉄筋の要素を帯鉄筋の断面積1/2で位置づけた。なお、帯鉄筋には曲げを考慮できるように3自由度(x,y方向並進, z軸回り回転)の2節点梁要素(以下、梁要素)を用いた。载荷は3.1と同様の方法で行った。

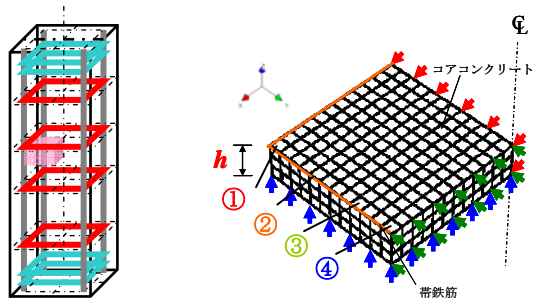


図5 解析モデル概要

#### 3.2.2 解析結果

図6に得られた応力-ひずみ関係を示す。なお、比較として道路橋示方書の横拘束を受けるコンクリートの設計式<sup>1)</sup>を併記した。応力上昇域の初期勾配はほぼ道路橋示方書が示す設計式と同等の値を示した。また、最大応力値および最大応力に達するひずみ値の差異は10%程度であり、非常に精度よく表現できている。なお、軟化域において、道路橋示方書より急な勾配を示すことがわかる。これは前述した3.1と関係していると考えられる。しかしながら、図6d)の結果より、帯鉄筋間隔が小さくなるにつれ、軟化勾配が緩やかになる傾向をとらえ

られている。

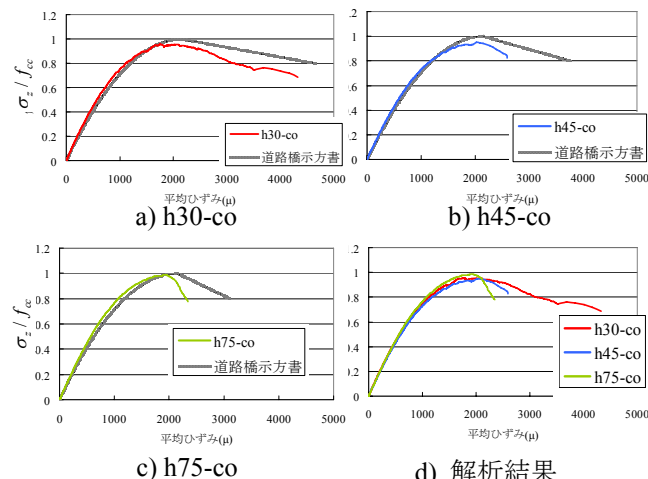


図6 横拘束を受けるコンクリートの  $\sigma$ - $\epsilon$  関係

図7は、対象実験より帯鉄筋に貼付したひずみゲージから得られたM-N相関図である。縦軸は帯鉄筋のひずみから算出した軸力(N, 実験値より算出)と  $N_p$ (降伏軸力)の比を、横軸は帯鉄筋中央部のひずみから算出した曲げモーメント(M, 実験値から算出)と  $M_p$ (全塑性モーメント)の比を示す。軸力は引張を正とし、曲げモーメントはかぶり部へはらみ出す作用を正と定義している。図より、いずれの各供試体  $0.8P_{max}$  時は比例的に軸力および曲げモーメントを負担しているが、 $P_{max}$  時に以降するにつれ端部に負の曲げモーメントが発生し、やがて軸降伏する。一方、図8は解析モデルより得られた帯鉄筋のM-N相関図である。解析において、 $0.8P_{max}$ (図中  $\Delta$  印)および  $P_{max}$ (図中  $\square$  印)の軸力負担は解析高さ、すなわち帯鉄筋間隔が広がるにつれ負担する軸力が大きいことがわかる。また、実験では計測の出来なかったより帯鉄筋隅角部(位置①)に近い位置の負の曲げ変形が著しく、隅角部に変形が集中していることがわかる。これより、実験および解析において図9に示すような帯鉄筋の変形が考えられる。

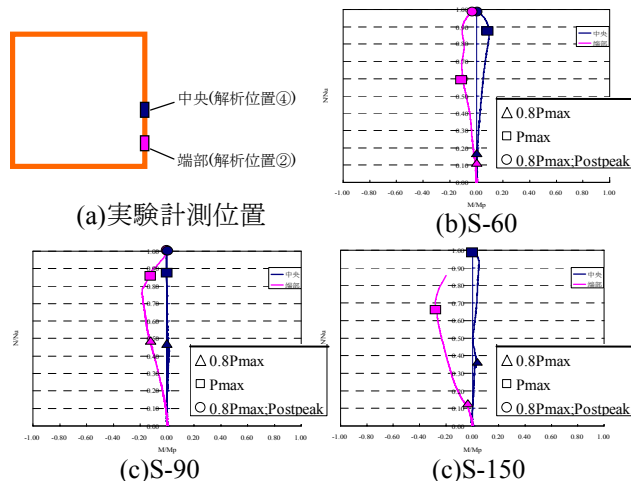


図7 実験より得られた帯鉄筋のM-N相関図

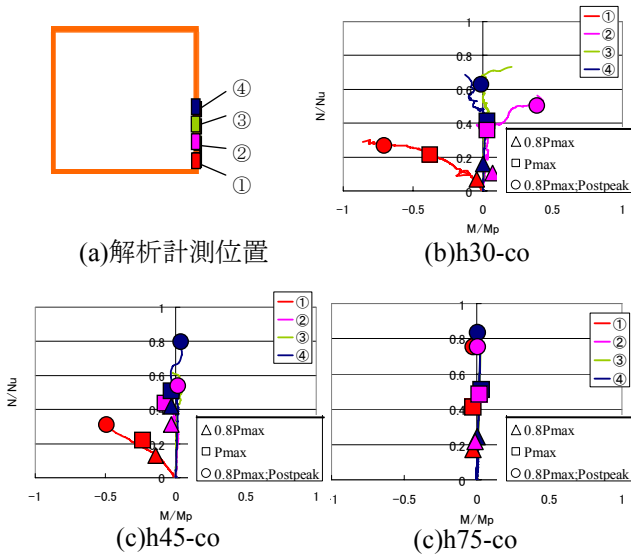


図8 解析より得られた帯鉄筋のM-N 相関図

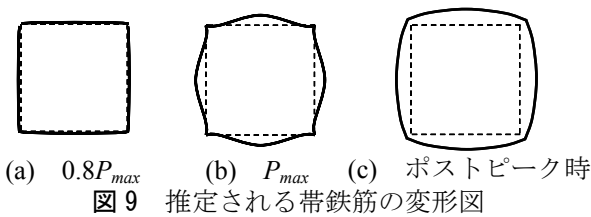


図9 推定される帯鉄筋の変形図

ここで、側方から作用する二つの主応力が等しい三軸応力状態にあるコンクリートの軸方向強度は式(4)<sup>7)</sup>によって与えられる<sup>7)</sup>。

$$f_{cc} = f_c + k \cdot \sigma_r \quad (4)$$

$f_{cc}$ : 側圧  $\sigma_r$  を受けるコンクリートの軸方向強度,  $f_c$ : コンクリートの圧縮強度,  $k$ : 拘束係数( $k=4.1$ )

図10は、要素位置別の拘束コンクリート強度を供試体別に式(4)に基づき整理した図である。なお、縦軸は式(4)で得られた値をで除して無次元化している。図より、帯鉄筋間隔中央断面において、荷重レベルが異なっても拘束効果にほぼ変化はない。一方で横拘束筋配置段面において、帯鉄筋中央部から帯鉄筋隅角部にいくにつれ、拘束効果が高くなることわかり、荷重レベルが高くなると拘束効果が高くなる。また、解析高さが大きくなるにつれ、帯鉄筋隅角部(位置①)の拘束効果が低くなること分かる。また、帯鉄筋間隔が小さくなるにつれ、帯鉄筋配置断面から遠ざかっても拘束効果があることがわかる。これは、帯鉄筋を密に配置することにより、帯鉄筋配置断面付近にも拘束効果が及ぶことを示している。

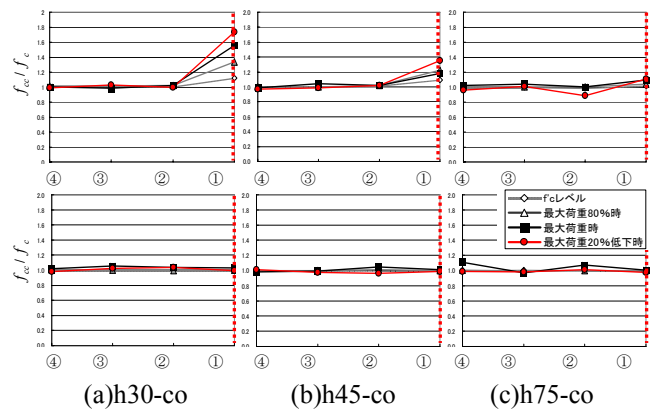


図10 帯鉄筋位置による拘束効果の差異

(上: 帯鉄筋配置断面, 下: 帯鉄筋間隔中央断面)

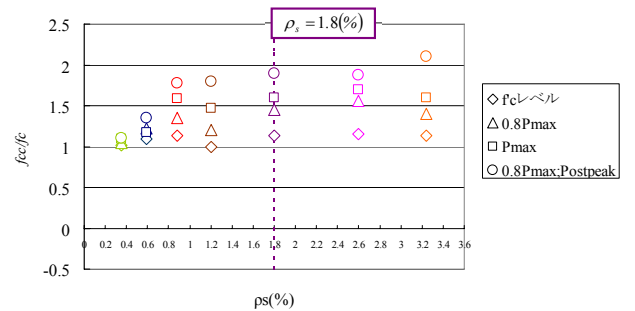
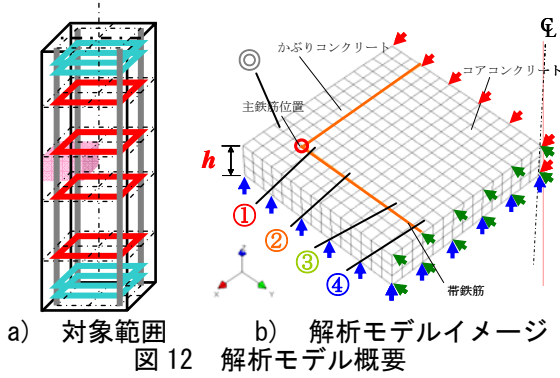


図11 帯鉄筋体積比による拘束効果の差異

図11は、帯鉄筋隅角部(位置①)にはたらく  $f_{cc}/f_c$  の値を帯鉄筋体積比により整理したものである。なお、 $\rho_s$  をパラメータに計4体解析モデルを増やし、帯鉄筋体積比の違いによる拘束効果の検証を行った。図より、 $f_c$  レベルにおいて帯鉄筋体積比による差異はないが、荷重レベルがあがるにつれ、帯鉄筋体積比が高い方が拘束効果の上昇率が高い。ただし、道路橋示方書で定められた適用限界である  $\rho_s=1.8(\%)$  を越えると、帯鉄筋体積比が上昇しても拘束効果が比例的に上昇するのではなく、拘束効果は同荷重レベルにおいて横ばいになる。以上より一定量以上の拘束筋を配置しても拘束効果は一定ではあるが、適用限界である  $\rho_s=1.8(\%)$  になるように鉄筋を配筋すると、 $P_{max}$  時にはコンクリート圧縮強度の約1.6倍、 $0.8P_{max}$ ; postpeak 時には約2倍の強度上昇が期待できる。ただし、この値は式(4)に示す拘束係数  $k$  に起因するものであり、実際の実験供試体において、解析モデル相当の拘束効果が示されたことを表すものではなく、注意が必要である。

### 3.3 全断面を考慮した解析

#### 3.3.1 解析概要



解析モデルを図 12 に示す。なお、3.2 で用いたモデルにかぶりコンクリートおよび主鉄筋を配置したものである。载荷は 3.1 および 3.2 と同様の方法で行った。

#### 3.3.2 解析結果

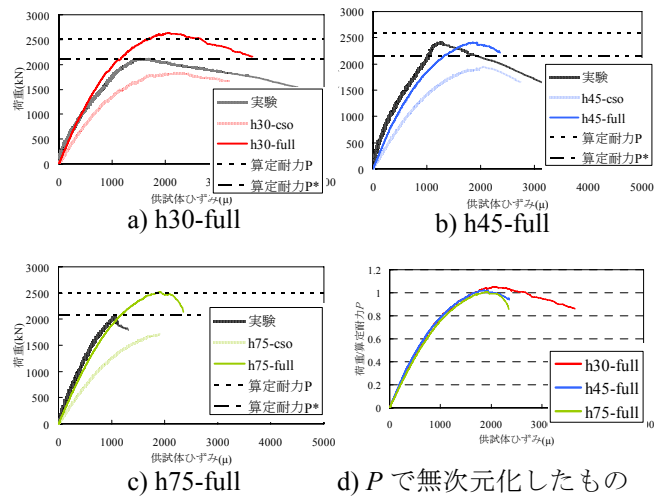


図 13 実験結果と解析から得られた荷重ひずみ関係

図 13 に示す.....は全断面の算定耐力  $P$ 、- - -はかぶり部を考慮していない算定耐力  $P^*$ である。

$$P = \sigma_{core} A_{core} + \sigma_{sy} A_{sl} + \sigma_{cover} A_{cover} \quad (5)$$

$$P^* = \sigma_{core} A_{core} + \sigma_{sy} A_{sl} \quad (6)$$

ここで、 $\sigma_{core}$  : コア部の応力(N/mm<sup>2</sup>)、 $A_{core}$  : コア部の断面積(mm<sup>2</sup>)、 $\sigma_{sy}$  : 主鉄筋の降伏強度(N/mm<sup>2</sup>)、 $A_{sl}$  : 主鉄筋の総断面積(mm<sup>2</sup>)、 $\sigma_{cover}$  : かぶり部の応力(N/mm<sup>2</sup>)、 $A_{cover}$  : かぶり部の断面積(mm<sup>2</sup>)であり、 $\sigma_{core}$  は道路橋示方書<sup>1)</sup>のものを準用した。

図 13 は、解析で得られた荷重-ひずみ関係を帯鉄筋間隔別に示したものである。なお、実験においてかぶり部のひびわれが異なったためにいるため、かぶり部を省いたモデルも作成し荷重ひずみ関係を表した(sco モデル)。その際にかぶり部に図 14 より、全モデルともに算定耐

力  $P$  に近い値を示したが、かぶり部で剥離が見られた S-60 では sco モデルに近い軟化勾配を示し、かぶり部にあまり損傷のみられなかった S-90 では full モデルに近い軟化勾配を示していることがわかる。このことより、軟化勾配においてかぶり部のひび割れの有無は非常に重要といえる。また図 16 d)より、帯鉄筋間隔が小さくなるにつれ、軟化勾配が緩やかになる傾向が認められた。S-150 は主鉄筋が座屈したと共に軟化挙動を示し、実験が終了したため、実験結果との考察から省く。

図 14、解析モデルより得られた帯鉄筋の M-N 相関図である。解析において、 $0.8P_{max}$  時および  $P_{max}$  時の軸力負担は解析高さ、すなわち帯鉄筋間隔が広がるにつれ負担する軸力が大きいことがわかる。また、帯鉄筋隅角部(位置①)の変形が著しく、隅角部に変形が集中していることがわかる。これより、かぶりコンクリートが存在していても、実験で推測される帯鉄筋の変形と同様の傾向を見出すことができたと考えられる。

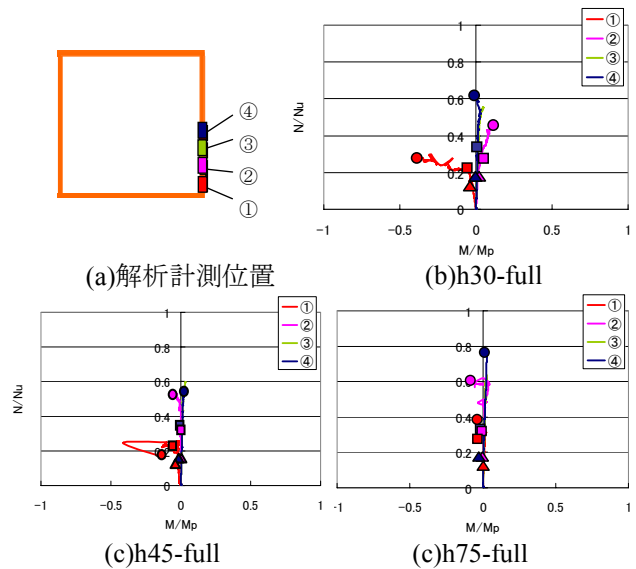


図 14 解析より得られた帯鉄筋の M-N 相関図

図 15 帯鉄筋位置による拘束効果の差異である。横軸は帯鉄筋位置を表し、縦軸は式(4)を  $f_c$  で除した値である。各供試体共通して、帯鉄筋配置断面の帯鉄筋隅角部(位置①)が最も拘束効果が高く、帯鉄筋間隔が小さい方がその効果が強くなる。また帯鉄筋に拘束されていないかぶり部(位置◎)には拘束効果がない。

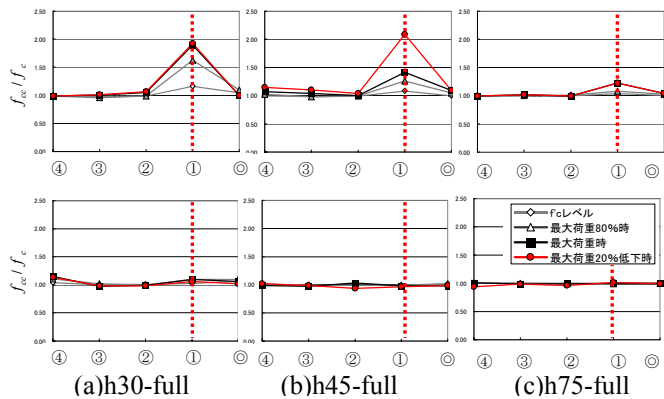


図 15 帯鉄筋位置による拘束効果の差異

(上：帯鉄筋配置断面，下：帯鉄筋間隔中央断面)

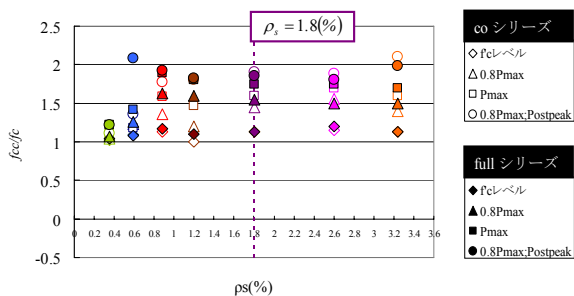


図 16 帯鉄筋体積比による拘束効果の差異

図 16 は、帯鉄筋隅角部(位置①)にはたらく断面内垂直応力 $f_{cd}/f_c$ の値を帯鉄筋体積比 $\rho_s$ およびかぶり部の有無により整理したものである。 $f_c$ レベルでは、かぶり部の有無による拘束効果の差異はなく、ほぼ同様とみなせる。しかしながら、 $0.8P_{max}$ 時に到達すると、 $\rho_s=1.8(\%)$ 以下であれば帯鉄筋体積比が増加するにつれ、比例的に $f_{cd}/f_c$ すなわち拘束効果は増大し、かぶり部の存在する full モデルはかぶり部のない co モデルに比べて拘束効果は約 1.2 倍の強度上昇が見受けられる。一方、前述のように道路橋示方書の適用限界 $\rho_s=1.8(\%)$ 以上になるとほぼ横ばいになり帯鉄筋体積比の増加による拘束効果の増大は認められなかった。さらに、 $P_{max}$ 時では co モデルにおいて  $0.8P_{max}$ 時より高い拘束効果を示しているが $\rho_s$ の影響は  $0.8P_{max}$ 時と相似的であった。一方、full モデルにおいては $\rho_s=1.2(\%)$ 以下で $f_{cd}/f_c$ は上昇するものの、その鉄筋比を超えてもそのような上昇は認められなかった。最後に、 $0.8P_{max}$  ; postpeak 時においては、 $\rho_s=1.8(\%)$ 以下であれば帯鉄筋体積比が増加するにつれ、比例的に拘束効果は増大し、かぶり部の存在する full モデルの方が拘束効果は約 1.2 倍高くなる。 $\rho_s=1.8(\%)$ 以上になると co モデルにおいては帯鉄筋体積比の増加による拘束効果の増大は見受けられなかった。一方で、full モデルにおいて $\rho_s=1.2(\%)$ 以上で拘束効果が横ばいになり、拘束効果は co モデルにおいて 10%低下することがわかった。これより、かぶりコンクリートを設けるにあたっては規定の $\rho_s=1.8(\%)$ より $\rho_s=1.2(\%)$ 程度が妥当であると考えられる。

#### 4. 結論

(1) Kent&Park が提案した無拘束コンクリートの応力-ひずみ関係と得られた数値解を比較すると、同時に実施した一般的な応力空間で記述された構成則による解に比して、ひずみ空間モデルがより軟化域を良好に対応していることがわかった。

(2) 今回用いたひずみ空間モデルでは  $F=G$  と定義しているため、横膨張ひずみに対し追従性が低く、今後は別々に定義する必要がある。

(3) 当構成則を用いた解析で得られた応力-ひずみ関係は、道路橋示方書で定められている横拘束をうけるコンクリートの効果を考慮した応力-ひずみ関係の設計式<sup>1)</sup>に良好に対応することがわかった。

(4) 最大圧縮強度以降の軟化勾配が、帯鉄筋間隔が小さくなるに伴い、緩やかになることを示し、面内垂直応力の増減を指標とした拘束効果を数値的に明らかにした。

(5) 前述したように横ひずみにおいて過少評価ではあるが、実験で得られた帯鉄筋の挙動を解析において定性的にとらえることができた。

(6) 帯鉄筋体積比 $\rho_s$ が増大するにより、拘束効果が上昇し、道路橋示方書の適用限界 $\rho_s=1.8(\%)$ 以上になると拘束効果の増大が見られないことがわかった。

(7) 帯鉄筋の影響を考慮したコンクリートに比べ、かぶりコンクリートを設けると  $0.8P_{max}$  ; postpeak 時において $\rho_s=1.2(\%)$ 以上で、コアコンクリートの強度上昇が見受けられなくなる。これより、かぶりコンクリートを設けるにあたっては規定の $\rho_s=1.8(\%)$ より $\rho_s=1.2(\%)$ 程度が妥当であると考えられる。

#### 参考文献

- 1) (社) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編，2002
- 2) 倉本亘：圧縮軸力を受ける鉄筋コンクリート部材の軟化特性に関する研究，大阪市立大学大学院都市系専攻修士論文，2011
- 3) 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，No.2，pp.85-95，1991
- 4) (株)CRC ソリューションズ：FINAL，2006
- 5) Lade, P. V. : Elasto-plastic stress-strain theory for cohesionless soil with curved yield surface, International Journal of Solids and Structures, Vol.13, pp.1019-1035, 1977
- 6) Park, R and Paulay, T : Reinforced Concrete Structures, John Wiley and Sons, pp.28, 1975
- 7) 日本建築学会：コンクリート充填鋼管構造設計施工指針，1997

## 討議等

### ◆討議 [ 谷口 与史也 先生 ]

・道路橋示方書との比較だけでいいのか。

◇回答：道路橋示方書の応力ひずみ関係の提案式はひとつの比較対象として、今回掲載しています。すなわち、それを含め実験および解析で得られた帯鉄筋の挙動から考察を行っており、帯鉄筋で拘束されたコンクリートの応力-ひずみ関係として十分対応しうると考えています。

### ◆討議 [ 谷口 与史也 先生 ]

・目的と結論は何か

◇回答：軟化勾配の現象を表現することで得られる解析結果から実験では計測することの出来ない応力変形、帯鉄筋による拘束効果を検証を行うことを目的とし、本研究で用いたモデルの妥当性を検証しました。それにより、帯鉄筋に作用する断面力は中央部や隅角部により異なり、配置断面に一樣に拘束効果を与えるものではないことを定性的に明らかにしました。それに加え、軟化勾配の現象が表現できたことと最大強度以降の軟化勾配で得られる拘束効果の機構および拘束効果による強度上昇を定性的に評価できたと考えています。

### ◆討議 [ 山口 隆司 先生 ]

・実際の拘束効果を当解析モデルで表現できたか

◇回答：今回、流動則には載荷関数と塑性ポテンシャル関数が等しいと考える関連流動則の構成則を用いているので、横膨張に関しては過小評価であると考えています。そのため、帯鉄筋による拘束効果も過小評価であり、実際の拘束効果を明確には表現できていないと考えています。しかしながら、帯鉄筋の挙動の傾向をとらえることができたことと今回発表を省いた章で得られた円形拘束筋との解析で比較をすることで、今後は二式を同一に定義しない非関連流動則を用い検証を行うことでより精度の良い拘束効果を表現できると考えています。

### ◆討議 [ 山口 隆司 先生 ]

・用いた解析モデルで拘束効果を定量的に評価できるということか

◇回答：今回、考察および検証を行ったのはとても基本的な部分であり、帯鉄筋の挙動およびコアコンクリート内部にはたらく面内応力を比較することで帯鉄筋間隔により異なる拘束効果を評価しました。今後はより細目部まで当モデルで検証をおこなうこ

とができると考えています。なお、関連流動則を用いたため、横ひずみ膨張に対する精度が低いと定量的な評価はできていないと考えられますが定性的な評価はできたと考えられます。なお、これは構成則に非関連流動則を用いることで解決されると考えられます。

### ◆討議 [ 角掛 久雄 先生 ]

・帯鉄筋比2%以上での拘束効果は増加しないのか

◇回答：増加しないと考えられます。この検証により、道路橋示方書で定められた $\rho_s=1.8(\%)$ の規定には妥当性があると考えられます。しかしながら、図a(概論内図16)の横拘束筋間隔による拘束効果の差異により、 $0.8P_{max}$  : Postpeak(◇印)段階を比較すると、 $\rho_s=1.2(\%)$ 程度からかぶりコンクリートを設けても拘束効果の増加が認められないため、本来であれば、 $\rho_s$ を低い値で規定しても良いと考えられます。

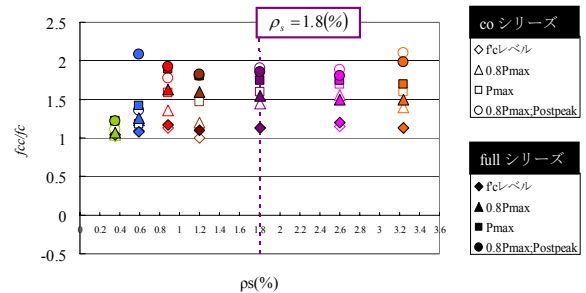


図 a : 帯鉄筋体積比による拘束効果の差異

### ◆討議 [ 木内 龍彦 先生 ]

・帯鉄筋量による軟化勾配の違いを表現したのか。

目的は現象の把握なのか。

◇回答：本研究では、圧縮軟化域まで適応しうるひずみ空間モデルを用いて解析を行いました。それに伴い、従来用いている応力空間モデルの構成則では計算のできない最大強度以降の軟化勾配を再現でき、それが帯鉄筋量による軟化勾配の違いを表現できたと考えています。既知である軟化勾配の現象(ここでいう軟化勾配の違い)を表現すること、およびに帯鉄筋に作用する断面力は帯鉄筋中央部や隅角部により異なり、配置断面に一樣に拘束効果を与えるものではないことを定性的に明らかにし、検証を行うことを本研究の目的としました。