

論文 一軸圧縮を受ける角形鋼管コンクリート柱の応力分布性状に関する有限要素解析

西元 大輔^{*1}・塩屋 晋一^{*2}・増田 祐一郎^{*3}

要旨：既往のコンクリートの構成則を検証する目的で、一軸圧縮荷を受ける角形鋼管コンクリート柱の三次元弾塑性有限要素解析を行った。筆者らが既に測定しているコンクリートの直圧縮応力分布と解析による応力分布を比較して検証した。解析による検証はまだ十分ではないが、内部の応力分布についてコンクリートの内部摩擦角を 30°程度にして関連流れ則を用いる解析が実験の応力分布の性状を説明しやすくなる。しかし、最大強度や最大強度以降の平均の応力 - ひずみ関係については、実験値を説明できなかった。またポアソン比だけで内部の応力分布性状を説明できる状況ではなかった。

キーワード：コンクリート，破壊基準，構成則，有限要素解析，三軸圧縮状態，鋼管コンクリート

1. はじめに

コンクリートの多軸圧縮状態の構成則に関する実験的研究や塑性学に基づく理論的研究はこれまで多くなされている。しかし、それらは比較的明快な荷重状態に対するものであり、鋼管コンクリート部材や鉄筋コンクリート部材の内部のコンクリートへ適用することについてはまだ検討すべき課題が多く残されている。

筆者らはコンクリートの構成則の検証や部材の挙動の解明を目的とし、コンクリート系部材の内部の応力分布を測定する技術を開発している。そして一軸圧縮荷を受ける角形鋼管コンクリート柱の内部のコンクリートの直圧縮応力分布を詳細に測定する実験¹⁾を行っている。

本論文ではこの実験に関する三次元弾塑性有限要素解析を行い、既往の構成則を用いた解析による応力分布と実験で測定された応力分布の適合性を検証している。

2. 鋼管コンクリートや鉄筋コンクリートの部材

における鋼管や鉄筋の周拘束

コンクリートの多軸圧縮状態の応力 - ひずみ関係に関する荷重実験は、図 - 1 (a)に示すように三軸方向から直接、圧縮荷重される。

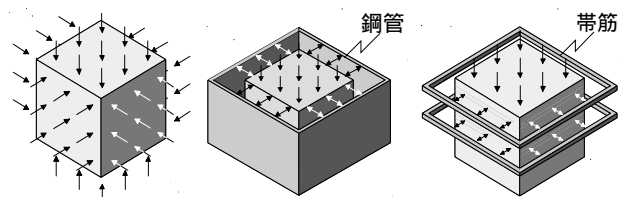
これに対して鋼管コンクリートや鉄筋コンクリートの部材では、図 - 1 (b), (c)に示すようにコ

ンクリートが圧縮力を受けてポアソン効果により横変形が生じ、この変形を鋼管や帯筋が拘束してコンクリートは間接的に三軸圧縮状態になる。

図 - 1 (a)の三軸荷重でもポアソン効果は存在するが、これに較べて図 - 1 (b), (c)の間接的な三軸圧縮状態の場合では、ポアソン効果による横変形量が周拘束力を生じさせるため、その拘束力にポアソン効果が大きな影響を与える。すなわち、鋼管コンクリートや鉄筋コンクリートの部材のコンクリートの応力や変形にポアソン効果は大きな影響を与える可能性がある。

3. ポアソン比

ポアソン効果はポアソン比で表される。コンクリートのポアソン比は一般に約 0.2 とされる。しかし、これは弾性体のもので、一軸圧縮荷を受ける場合では圧縮強度直前から急激に増大し、体積膨張に転じると 0.5 を超えることが報告されている。ただし、0.5 を超えることはあくまでも一



(a) 三軸荷重 (b) 鋼管コンクリート (c) 鉄筋コンクリート
図 - 1 コンクリートの三軸圧縮応力状態

*1 鹿児島大学大学院理工学研究科建築学専攻 (正会員)

*2 鹿児島大学工学部建築学科助教授・工博 (正会員)

*3 清水建設株式会社 (元鹿児島大学大学院理工学研究科 大学院生)

軸圧縮の場合や、三軸状態で周拘束力が小さい場合である。この0.5はダイラタンシ - の発生を意味し、弾性体では限界値とされている。これらのことから、圧縮強度の直前からポアソン比は0.2から0.5へと増大する。

4. 関連流れ則と非関連流れ則

多軸状態で塑性化した物体の応力 - ひずみ関係を推定する場合、一般に塑性理論の関連流れ則が用いられる。これは様々な材料に適用され、有効な仮説である。しかし、これが圧縮破壊を伴うコンクリートにどれほど有効であるか、検討の余地が残されている。これについては水野ら²⁾は多軸圧縮のコンクリートの応力 - ひずみ関係の解析を行い、関連流れ則と非関連流れ則を解析変数として検討している。しかし、そこでは確たる結論に至っていない。

5. 角形鋼管で周拘束されたコンクリート柱の内部の直圧縮応力分布の測定実験の概要

検証した試験体の実験概要を以下に述べる。図 - 2 に示すように加力面と応力分布を測定する対称面は口 - ラ - 支持している。そこでは力学的対称性を利用して対称面の直圧縮応力分布を測定している。口 - ラ - 層は摩擦係数が0.006以下で摩擦を無視できる。図 - 3 に試験体形状と寸法および測定位置を示す。試験体の高さは210mmで鋼管の内径は約210 × 210mmである。鋼管の厚さは4.2mmである。表 - 1 に材料の力学的特性を示す。図 - 4 に加力と変形の測定状況を示す。変形については上下の加力鋼板の間を4本の変位計で測定している。当然、測定される変形には口 - ラ - 層や口 - ドセルの変形、鋼板間の変形が含まれ、これらの変形の除去が必要となる。図 - 5 (a) に測定された平均の圧縮応力 - ひずみ関係を示す。载荷はコンクリート面にだけ行い、圧縮応力は荷重をコンクリート断面で除している。初期のひずみはわずかな応力で増大し、前述の除去すべき変形が影響を与える。同図中にはシリンダ - の応力 - ひずみ関係を破線で示す。柱試験体の初期の剛性は少なくともシリンダ - の剛性以上になるべきである。ここでは、

図 - 5 (b) に示すように柱の応力 - ひずみ関係がシリンダ - の関係を包含するまで柱の応力 - ひずみ関係を左側に移動させて修正した。コンクリートの圧縮ひずみの測定方法は今後改良が必要である。測定された圧縮応力分布については7章で示す。

6. 三次元弾塑性有限要素解析

6.1 解析の方針

前章の鋼管コンクリート柱の三次元弾塑性有限

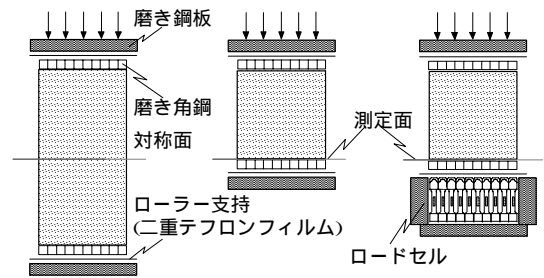


図 - 2 支持条件と測定面

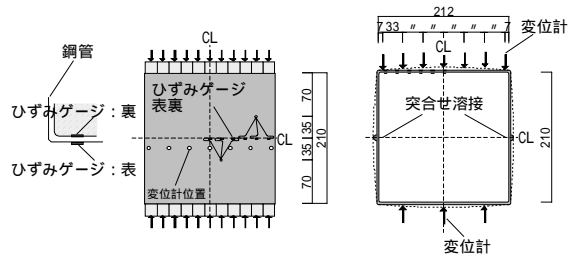


図 - 3 試験体の形状と寸法および測定位置

表 - 1 材料の力学的特性 (N/mm²)

コンクリート		$E_c (\times 10^4)$	$c\sigma_B$	$c\epsilon_B (\%)$
		2.28	30.2	0.24
鋼管	種類	$E_s (\times 10^5)$	$s\sigma_y$	$s\sigma_B$
	t=4.2(mm)	1.94	310	404

E_c : コンクリートのヤング係数、 $c\sigma_B$: 圧縮強度、 $c\epsilon_B$: 圧縮強度時ひずみ度
 E_s : 鋼管のヤング係数、 $s\sigma_y$: 降伏強度、 $s\sigma_B$: 引張強度

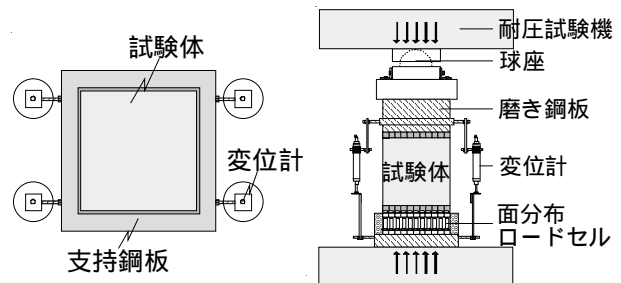


図 - 4 加力と変形の測定状況

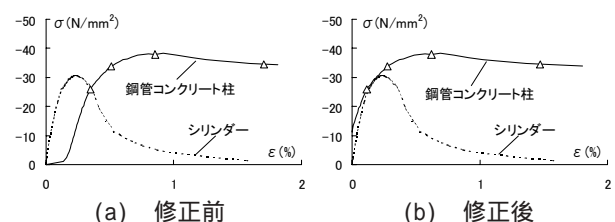


図 - 5 平均の圧縮応力 - ひずみ関係

要素解析を行う。目的は、解析により実験の応力 - ひずみ関係やコンクリート - トの応力分布をどの程度、説明できるかを検証することである。

解析変数はコンクリートの内部摩擦角、ポアソン比、関連流れ則および非関連流れ則である。解析には有限要素解析プログラムDIANAを用いた。

6.2 解析モデル

図 - 6 に解析モデルを示す。対称性を利用して柱の1/4の部分にモデル化している。コンクリートには8節点ソリッド要素を用い、鋼管には4節点のシェル要素を用いた。コンクリートと鋼管の間には付着バネを表す境界要素を設けた。測定面に該当する下の水平面を水平口 - ラ - 支持して、上の加力面に鉛直方向に等しい強制変位を与えた。

6.3 材料の構成則と特性値

表 - 2 に仮定した材料の特性値を示す。

(a) コンクリートの破壊基準と塑性剛性

コンクリートの圧縮領域の破壊基準はDruker-Pragerの破壊基準に従うものとし、引張領域はテンション・カットオフと引張軟化、およびせん断保有を考慮した。塑性ひずみのベクトルは破壊基準に基づく関連流れ則と非関連流れ則を用いた。関連流れ則では、内部摩擦角を13°、19°、30°とした。非関連流れ則ではを30°の1種類として、膨張角を10°、25°、30°と変化させた。摩擦角と膨張角が等しい場合が関連流れ則になる。Druker-Pragerの破壊基準はを10°とすると二軸圧縮実験結果と一致する。周拘束が低いレベルではこのに近いものと考えられる。

(b) コンクリート - トのポアソン比と一軸圧縮特性

ポアソン比は解析においては一定値として、0.2と0.4の2種類とした。一軸圧縮応力 - ひずみ関係はコンクリートシリンダ - のものとした。シリンダ - は上下の載荷面で横変形が拘束されるため、その平均の応力 - ひずみ関係が本来の一軸の応力 - ひずみ関係を表すものではないが、ここではその差は無視した。

(c) 鋼管

降伏基準はVon Misesとして弾塑性材料とした。

7. 解析結果

7.1 関連流れ則における解析結果

(a) 平均の圧縮応力 - ひずみ関係

図 - 7 に平均の応力 - ひずみ関係を示す。最大強度は、内部摩擦角を13°としポアソン比を0.4とした場合(- -)と、を19°としを0.2とした場合(- -)の解析値が実験値にほぼ等しい。しかし、最大強度以降の応力 - ひずみ関係はいずれの場合でも解析値の軟化の程度が実験値に対して大きくなっており、実験値を説明できる状況ではない。を0.2とした場合より0.4として大きくした方が、最大強度とそれ以降の強度が大きくなっている。

(b) 最大強度時の直圧縮応力分布

図 - 8 に最大強度時()の直圧縮応力分布を示す。図 - 8 (a)は直接測定した分布と平準化した分布を示している。当然、測定した応力分布は骨材などのバラツキにより必ずしも柱断面の中央を中心に点対称の分布とならない。平準化の分布

表 - 2 仮定した材料の力学的特性

コンクリート						鋼管		
E_c (N/mm ²)	ν_c	F_c (N/mm ²)	F_t (N/mm ²)	ϕ (°)	ψ (°)	E_s (N/mm ²)	ν_s	$s\sigma_y$ (N/mm ²)
2.4×10^4	0.2, 0.4	30.6	3.06	13, 19, 30	10, 13, 19, 25, 30	1.94×10^5	0.3	310

E_c:コンクリートのヤング係数, ν_c :ポアソン比, F_c:圧縮強度, F_t:引張強度, ϕ :内部摩擦角, ψ :ダイレイタンス角, E_s:鋼管のヤング係数, ν_s :ポアソン比, s σ_y :降伏強度

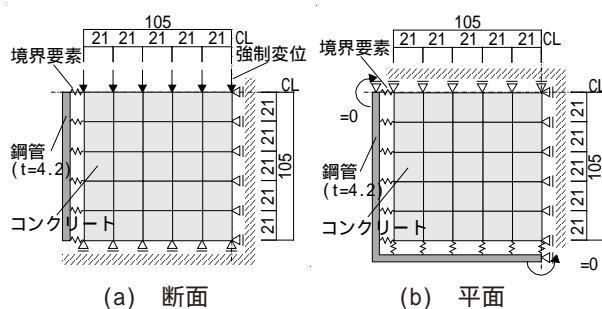


図 - 6 解析モデル

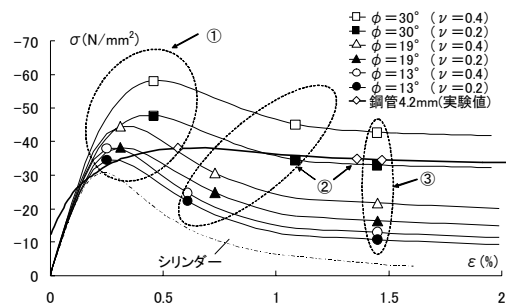


図 - 7 平均の圧縮応力 - ひずみ関係

は点対称分布になるものとし、中央から同じ距離にある応力を平均したものである。以後、平準化の分布を実験値として議論する。

図 - 8 (b), (c), (d) は解析による分布である。図 - 8 (d) の ϕ が 13° で ν が 0.2 の場合の分布は、コ - ナ - の応力が僅かに大きくなっている程度で応力はほぼ一様になっている。これに対して、図 - 8 (b) の ϕ が 30° で ν が 0.4 の場合の分布は、コ - ナ - で応力が大きくなって突出する傾向が顕著になっている。 ϕ が大きく、また ν も大きいほどコ - ナ - の応力が突出する傾向が顕著になることが確認される。しかし、図 - 8 (b) の ϕ が 30° で ν が 0.4 の場合でも、図 - 8 (a) の実験の分布を説明できるほどコ - ナ - の応力が突出していない。図 - 8 (e) は柱幅の中央列と対角線列の応力分布であり、それらは柱断面中心から外周までの範囲を示している。太実線が実験値を意味するが、幅中央列では実験値は中心の応力が僅かに大きくなり、外周部の応力が大きく低下している。その外周の応力はコンクリートシリンダの一軸圧縮強度 σ_B より小さくなっている。これに対していずれの解析の分布でも外周部の応力はあまり低下していない。対角線列では実験値は中心が僅かに突出して、コ - ナ - が大きく突出している。図 - 8 (f) は図 - 8 (e) の分布を断面中心の応力で除した分布形状である。幅中央列では解析の分布で断面中心の応力が僅かに大きくなり、外周部で応力が低下する傾向が僅かに確認される。対角線列ではコーナーが突出する状況は ϕ が 30° の分布が実験の分布形状に近い。しかし、図 - 7 で観られるようにその場合の最大強度は実験値より 25% 大きくなっているので実験結果を説明できるものではない。前述したように、解析では幅中央列の外周部の応力が実験値ほど低下しない。これは、その領域において鋼管からの周拘束力を過大に評価していることが原因として考えられる。その領域のコンクリートへの鋼管の拘束メカニズムについては、測定されている鋼管のひずみ分布や変形分布を基に詳細に検証する必要がある。

- - と - - の分布は図 - 7 で観られたように解析による最大強度が実験値に等しかった解析の

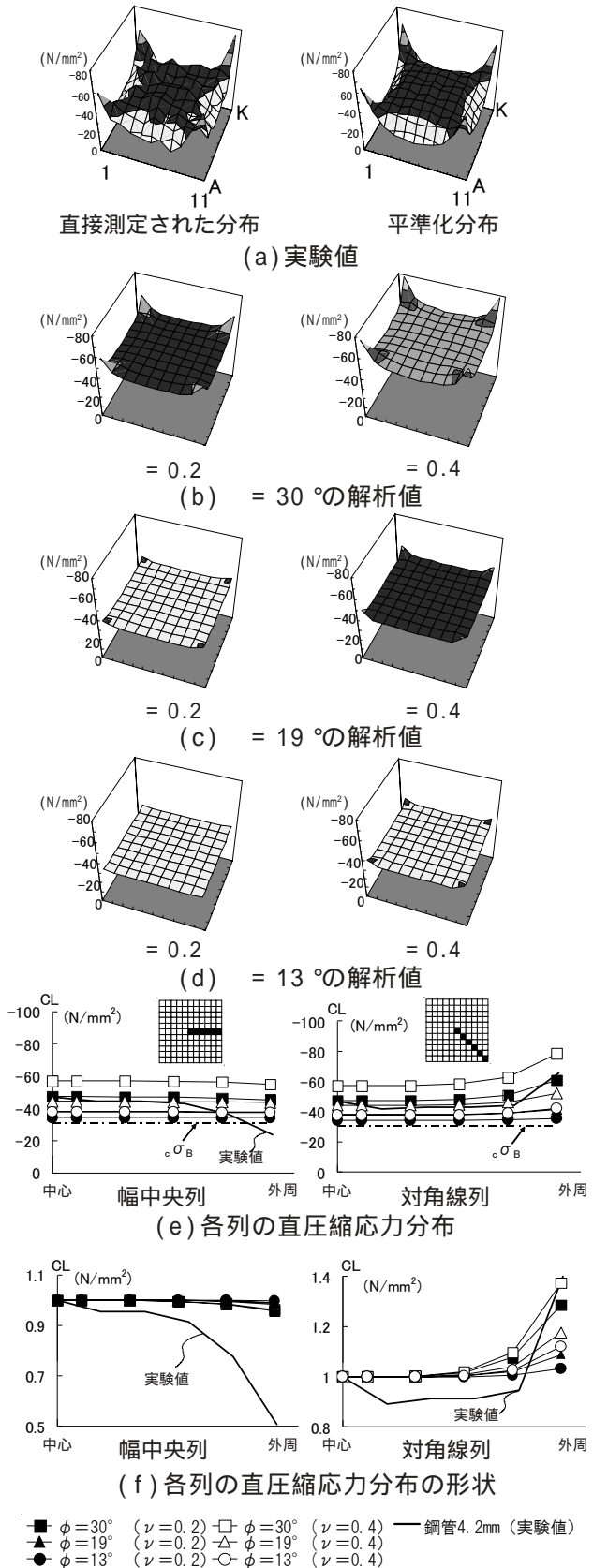


図 - 8 最大強度時の直圧縮応力分布

ものである。図 - 8 (e) では、両者には差は生じていない。しかし、実験の分布とは差が生じている。すなわち、解析による最大強度が実験値と一致し

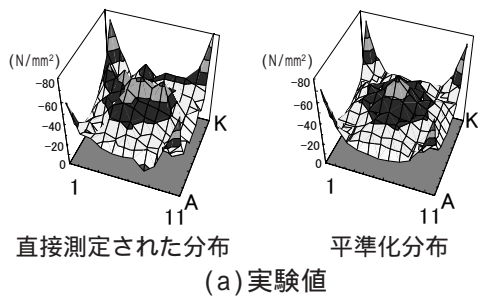


図 - 9 最大強度時のひずみ ϵ_B の2.4 倍の時点の直圧縮応力分布

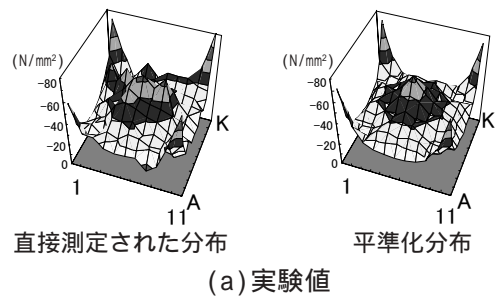


図 - 10 が1.5%の時点の直圧縮応力分布

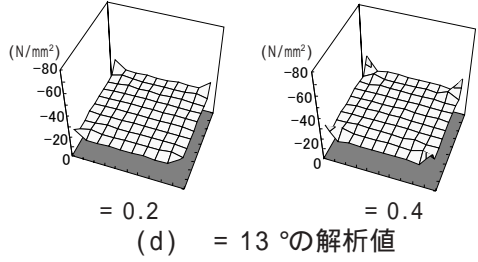
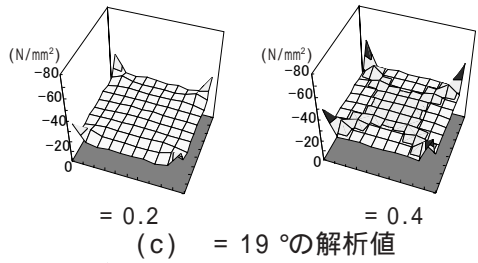
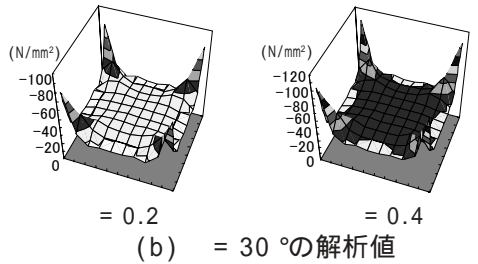


図 - 9 最大強度時のひずみ ϵ_B の2.4 倍の時点の直圧縮応力分布

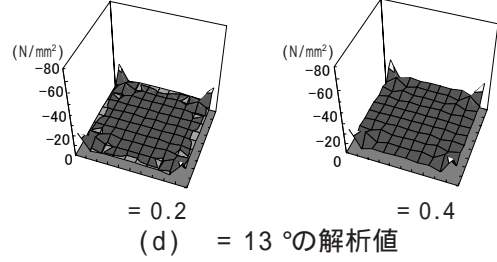
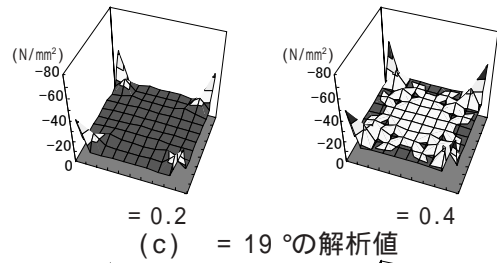
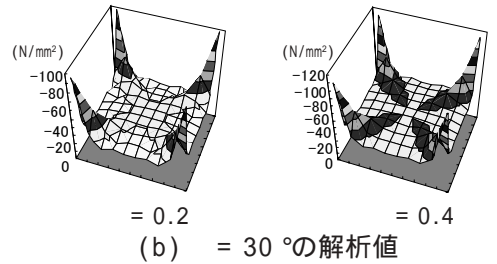


図 - 10 が1.5%の時点の直圧縮応力分布

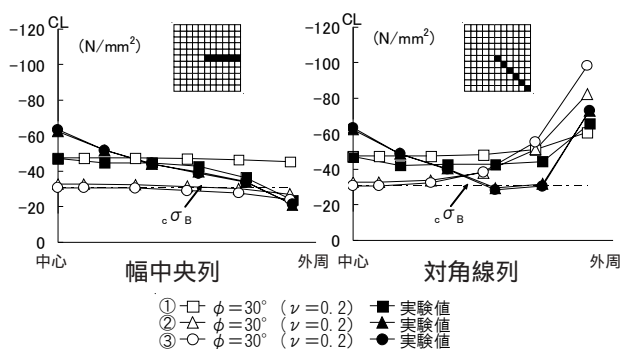


図 - 11 塑性化に伴う直圧縮応力分布の変化

ていても、解析による応力分布が内部の応力分布に一致していることを保証することにならないことが確認できる。

(c) 最大強度以降の直圧縮応力分布

図 - 9 に最大強度時の平均圧縮ひずみ ϵ_B の2.4 倍の時点 () の直圧縮応力分布を示す。図 - 7

で観られるように各解析により ϵ_B は異なる。図 - 10 に平均圧縮ひずみが1.5%の時点 () の直圧縮応力分布を示す。と の時点は図 - 7 に示している。

解析の分布は、最大強度時と同様に と が大きい場合ほど、コ - ナ - の応力が突出する傾向が顕著になっている。 が30°の場合、コ - ナ - の応力は実験値より大きくなっている。図 - 7 で観られるように が30°で が0.2の場合 (- -)、 と の時点の圧縮強度は実験の圧縮強度にほぼ近い。その場合の解析の分布および実験の分布を比較したものを図 - 11 に示す。塑性化が進展して最大強度時から や へ移ると、解析の分布は幅中央列では全体の応力が低下している。対角線列では中心の応力が低下してコーナーの外周部が増大している。

これに対して実験の分布では、中心の応力が増大し、対角線列のコ - ナ - より内側に入った領域

で応力が低下している。このような現象は解析の応力分布では生じていない。その低下する領域も柱幅中央の鋼管からの周拘束力を過大評価していることが原因と考えられる。

7.2 非関連流れ則における解析結果

図 - 12に ψ を 30° として膨張角 ϕ を変化させた場合の平均の応力 - ひずみ関係を示す。

ν を小さくして非関連性を強くすると、最大強度は低下し、最大強度以降の圧縮強度も低下している。 ν が 0.4 で ϕ を 25° とした場合(---), 圧縮ひずみが約 1.0% 以降の圧縮強度が実験値に近づいている。

図 - 13 に最大強度時()と平均圧縮ひずみが 1.5% の時点()の直圧縮応力分布を示す。 ν を 0.4 とした場合のものである。 ϕ に対して ψ を小さくして非関連性を強くすると、コ - ナ - の応力の突出が小さくなり、実験の内部の応力分布性状を説明できなくなる。

8. まとめ

- (1) 鋼管の内部のコンクリ - トの直圧縮応力分布の性状は、コンクリ - トの内部摩擦角を 30° として関連流れ則による解析の方が実験の応力分布の性状に近づく。しかし、最大強度や最大強度以降の平均の応力 - ひずみ関係については、実験値を説明できなかった。この原因としては、解析では柱幅の中央のコンクリ - トに対する鋼管からの周拘束力を過大に評価していることが考えられる。今後は鋼管のひずみや変形状に基づく検証が必要である。
- (2) ポアソン比については大きくした方が鋼管のコ - ナ - で応力が突出する内部の応力分布性状に近づく。しかし、ポアソン比だけで内部の応力分布性状を説明できる状況ではなかった。
- (3) 非関連流れ則については、非関連性を強めると鋼管のコ - ナ - で応力が突出する内部の応力分布性状を説明できなくなる。

本研究は平成 17 年度科学研究補助金 (課題番号 : 16560505 , 代表者 : 塩屋晋一) により行われた。

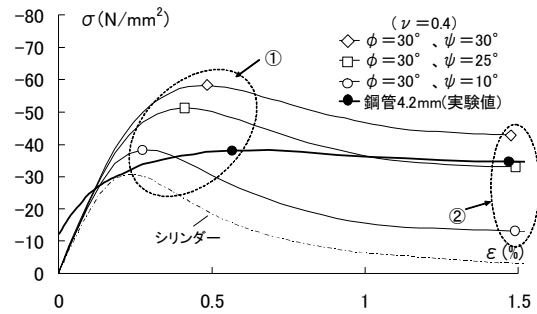


図 - 12 膨張角 ψ を変化させた場合の平均の圧縮応力 - ひずみ関係

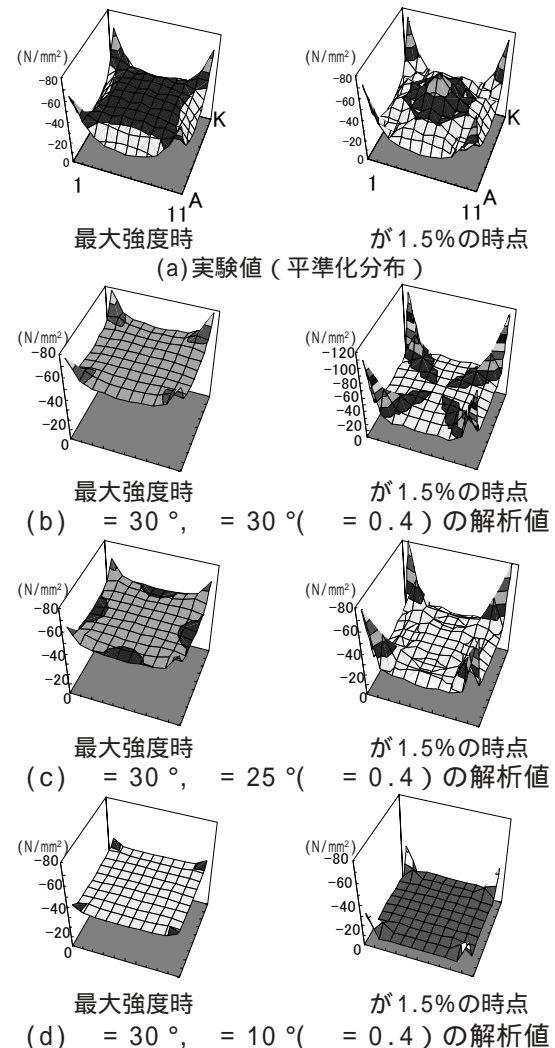


図 - 13 最大強度時と平均圧縮ひずみが 1.5% の時点の直圧縮応力分布

参考文献

- 1) 西元大輔, 塩屋晋一ほか: コンクリ - トの構成則を目的とした角形鋼管コンクリ - ト柱の応力分布測定実験, コンクリ - ト工学年次論文集, Vol.27, No.2, pp115-120, 2005
- 2) 吉田幸夫, 水野英二ほか: 境界要素を考慮した円形コンファインドコンクリ - トの圧縮破壊FEM解析, 日本建築学会構造系論文集第 563 号, 169-176, 2003 年 1 月