

論文 コンクリート構成則の検証を目的とした角形鋼管コンクリート柱の応力分布測定実験

西元 大輔^{*1}・塩屋 晋一^{*2}・増田 祐一郎^{*3}・末吉 伸丈^{*4}

要旨：コンクリート系部材内部の応力分布を詳細に測定する技術を開発する研究である。本研究では、実大寸法により近い部材にも適用できるように大型の測定装置を製作し、超高強度コンクリートにも対応できるように測定範囲の改良を行っている。そしてコンクリートの構成則を検証するための詳細なデータを得る目的で、一軸圧縮を受ける角形鋼管コンクリート柱に適用する実験を行っている。その結果、一軸圧縮力を受ける角形鋼管コンクリート柱では加力面の支持条件の違いにより内部の応力状態が異なり、最大強度以降では2種類の圧縮抵抗機構が存在することが確認された。

キーワード：コンクリート，柱，構成則，応力分布，CFT，有限要素解析

1. はじめに

コンクリート系部材内部の応力分布が詳細に測定できると、応力解析で用いるコンクリートの構成則を精度よく検証できたり、また解明されていない部材の挙動も解明できる。

研究代表者ら^{1),2)}は、コンクリート系部材内部の特殊な面のコンクリートの直圧縮応力とせん断応力分布を詳細に測定する技術の開発を行っている。これまでは小型の装置で普通強度の場合について測定方法を適用してきた。

今回、実大寸法により近い部材にも適用できるように大型の測定装置を製作し、高強度コンクリートにも対応できるように適用範囲の改良を行った。そしてコンクリートの構成則を検証するための詳細なデータを得る目的で、一軸圧縮を受ける角形鋼管コンクリート柱に適用する実験を行った。この応力状態は測定面で応力が局所的に変化し、構成則を検証するのに適していると考えた。

本論文では改良した測定装置と、角形鋼管で横拘束されたコンクリート柱の一軸圧縮実験概要と柱断面内の応力分布性状について述べる。

2. ロードセルの概要と適用範囲

応力分布の測定では力学的対称性を利用して、面の反力分布を測定できるロードセルを用いる。

測定原理については文献^{1),2)}を参照されたい。

図-1に荷重検出用素子と面分布ロードセルの形状を示す。これまでの測定面は132mm×132mmであったが、今回、製作したロードセルは測定面を209mm×209mmとして大型の部材に適用できるようにした。測定面内には荷重検出用素子(以後、素子)を11行11列のます目状に並べて鋼製枠で軽く拘束して一体的なものとした。

測定面の平面性については、その一体化された状態で素子の上下面を研磨し、3/1000mmの誤差範囲内の精度で仕上げた。またロードセルを下方から支持する鋼板も同じ精度で仕上げている。

素子の材質には、焼き入れ処理したSKD11を用いて比例限界を増大させた。測定できる圧縮応力度を、320N/mm²まで増大させた。また素子の表面を無電解ニッケルメッキ処理して防錆処理した。

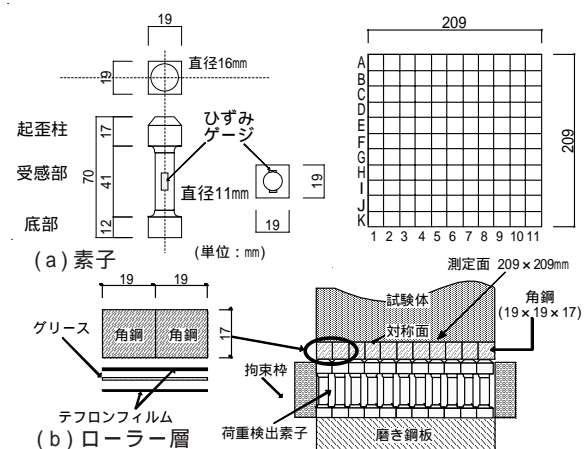


図-1 荷重検出用素子と面分布ロードセルの形状

*1 鹿児島大学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 鹿児島大学理工学研究科建築学専攻 (正会員)
 *4 鹿児島大学理工学研究科建築学専攻

素子の荷重は、受感部に2枚のひずみゲージを貼付してそれらの平均のひずみから検出した。

素子の上面と試験体の測定面の間はローラー支持される必要がある。ここでは焼入れ磨き角鋼(19mm×19mm×17mm)とグリース塗りの二重テフロンフィルムをセットして、ローラー支持層を実現した。以後これをローラー支持と定義する。一つの素子に対称面を支持する面積は角鋼の19mm×19mmである。素子のバネ係数はその支持する対称面で、単位面積あたり $6.22 \times 10^3 \text{N/mm/mm}^2$ である。

3. ローラー支持層の摩擦

高強度コンクリートへ測定方法を適用する場合、前述のローラー支持層が高圧縮応力下でも機能する必要がある。これまでは一般的なテフロンフィルムとシリコングリースを用いてきたが、今回、新たに特殊強化されたテフロンフィルムと2種類のグリースを加えて、それらを組み合わせる最も摩擦係数が小さいローラー支持層を明らかにする摩擦試験を行った。試験は図-2に示すように一組の、素子と角鋼の間にローラー支持層を挿入して行った。

高圧縮応力下でも減摩性能が良かったものは、特殊強化された二重のテフロンフィルム(一枚の厚さ0.05mm)とリチュウム系のグリースを用いたものであった。その結果を図-3に示す。横軸は垂直抗力を対称面で生じる圧縮応力に換算したものである。摩擦係数は0.4%~0.7%に留まっている。

改良されたロードセルとローラー支持層は超高強度コンクリートにも適用できることになる。

4. 角形鋼管コンクリート柱の圧縮実験

4.1 実験方針

図-4(a)に示すように一軸圧縮加力を行う場合、一般に加力面では加力鋼板と試験体の面の間で摩擦力が生じて加力面近傍の部分は横拘束される。このような支持方法では、角形鋼管による横拘束力が材軸方向の位置で異なる。図-4(b)に示すように加力面でもローラー支持層を挿入すると、その摩擦力が生じないため横拘束力が材軸方向の位置で変化しない。ここではその支持条件の応力分布を検証用のものとして、その応力分布を測定することを主目的に

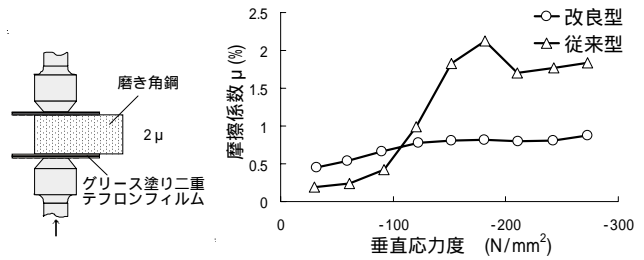


図-2 摩擦試験

図-3 ローラー支持層の摩擦係数

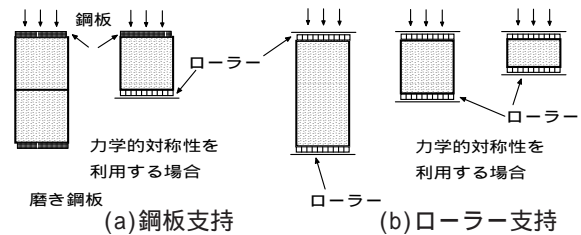


図-4 支持条件の違いによる柱の変形拘束状態と力学対称系モデル

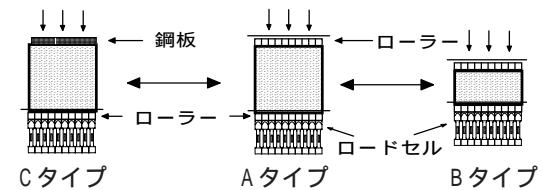


図-5 試験体の形状と支持条件の種類

計画した。このほか実験の簡易性をはかる目的で試験体の高さを半分にするダウンサイジングの影響と、加力鋼板の摩擦の影響も明らかにする計画をたてた。

4.2 試験体

図-5に試験体の形状と支持条件を示す。Aタイプは基本の試験体で、Bタイプは高さのダウンサイジングを検討する試験体で、Cタイプは加力鋼板の摩擦の影響を検討する試験体である。

図-6に試験体の基本断面とゲージの貼付位置を示す。試験体は、角形鋼管で横拘束した鋼管柱と無補強コンクリート柱である。鋼管の厚さは1.5mmと4.2mmである。試験体の種類は3種類である。A、Cタイプの高さは210mmでBタイプは105mmとした。試験体数は、それぞれの種類ともA、B、Cの各タイプについて1体ずつ製作し、計9体である。ただし、無補強柱のBタイプは製作に問題があり実験を行っていない。鋼管は鋼板をコの字形に切断・折り曲げ加工し、2カ所で突き合わせ溶接した。鋼管の内法寸法はロードセルの測定面寸法より2mm大きくした。これは試験体を測定装置に設置する際に、ローラー支持の角鋼が鋼管に接触しないで確実にコンクリートの面の応力

を測定するために設けた逃げ寸法である。鋼管のコーナーの内法半径は $R=4.5\text{mm}$ である。無補強柱のコーナーは丸めていない。鋼管のコーナーに用いる角鋼は図-7に示すように角が丸めてある。

表-1に使用材料の力学的特性を示す。

4.3 加力方法と測定状況

図-8に加力状況を示す。加力は 2000kN の耐圧試験機により行った。AタイプとBタイプでは上の加力面でもローラー支持層を挿入し、焼き入れ磨き鋼板で加圧した。Cタイプでは焼き入れしていない磨き鋼板で加圧した。

測定については、対称面の直圧縮応力分を測定するほか、鋼管柱のAタイプでは、図-6に示すように鋼管の内側と外側にひずみゲージを貼付して横ひずみと曲げひずみの分布および鋼管の水平方向の広がり変形を詳細に測定した。

5. 実験結果

5.1 破壊状況

写真-1に鋼管厚さが 4.2mm の鋼管柱(以後、厚い鋼管柱)の実験終了後の加力面と測定面の状況を示す。また写真-2に実験終了後に鋼管を切断して、破碎したコンクリートを除去した後の残った非破壊領域の部分を示す。

加力面を鋼板支持した場合(以後、鋼板支持)は、写真-1(a)のように加力面にひび割れが生じることなく、写真-2(a)のような四角錐状の非破壊部分が形成されている。これに対して加力面をローラー支持した場合(以後、ローラー支持)は、写真-1(b)のように鋼管内部のコンクリートには全般的にひび割れが生じていたものの、写真-2(b)のように軽打した段階では菱形柱状の領域が残った。この状況は鋼管厚さが 1.5mm の鋼管柱(以後、薄い鋼管柱)も同様であった。

5.2 平均の応力 - ひずみ関係

図-9に平均の圧縮応力 - ひずみ関係を示す。圧縮応力は圧縮荷重を柱のコンクリート断面積で除して、ひずみは4本の変位計の圧縮変形の平均値を試験体高さで除している。また同図にはコンクリートシリンダーの応力 - ひずみ関係も示している。無補強柱では最大強度がいずれの試験体でもシリンダーの圧縮強度を下回り、支持条件と柱高さの違いによる影響が明確に生じていない。こ

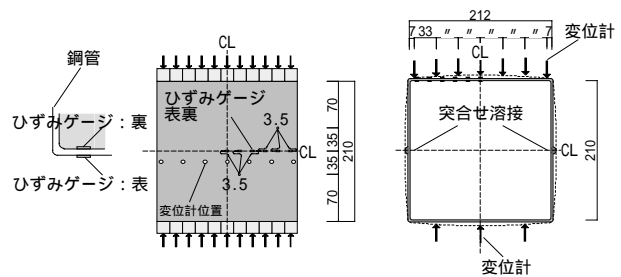


図-6 鋼管による横拘束力と変形の測定状況

表-1 使用材料の力学的特性

コンクリート		応力単位(N/mm^2)		
		$E_c (\times 10^4)$	c_B	$c_B (\%)$
		2.28	30.2	0.24
鋼管	種類	$E_s (\times 10^5)$		
	$t=1.5(\text{mm})$	s_y	s_B	s_B
	$t=4.2(\text{mm})$	2.06	324	389
		1.94	310	404

E_c : コンクリートのヤング係数、 c_B : 圧縮強度、 $c_B (\%)$: 圧縮強度時ひずみ度
 E_s : 鋼管のヤング係数、 s_y : 降伏強度、 s_B : 引張強度

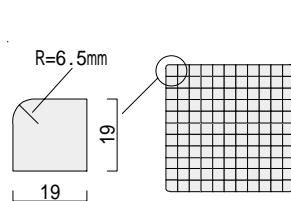


図-7 鋼管コーナーに用いる角鋼

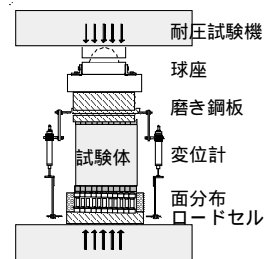


図-8 加力状況



(a) 鋼板支持



(b) ローラー支持



(c) 対称面のひび割れ



(d) 角鋼の移動状況

写真-1 加力終了後(厚い鋼管柱)



(a) 鋼板支持



(b) ローラー支持

写真-2 加力終了後に、鋼管を切断して破壊領域を除去後に残った非破壊領域

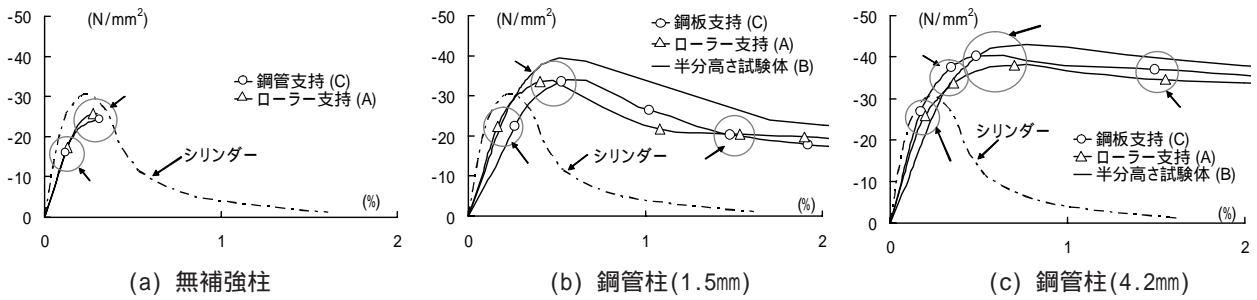


図 - 9 平均の圧縮応力 - ひずみ関係

れらについては原因を特定できていない。

鋼管柱のBタイプは、いずれの厚さでも最大強度がローラ支持した柱より大きくなっており、柱高さを半分にダウンサイジングして応力分布を測定するのは不相当であることが確認される。

薄い鋼管柱では支持条件による違いは明確に生じていないが、厚い鋼管柱では鋼板支持したCタイプの最大強度がローラ支持のAタイプの値に較べて大きくなっている。

5.3 柱断面内の直圧縮応力分布

(a) 無補強柱

図 - 10に測定された最大強度時の応力分布を示す。左の分布は直接測定されたもので、右の分布は応力分布が柱断面の中央を中心に点対称分布になるものとし、中央から同じ距離にある素子の応力を平均して平準化した分布である。

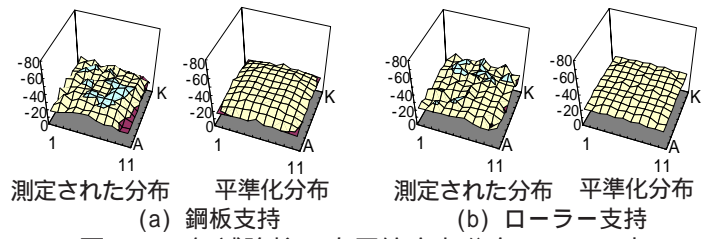


図 - 10 無補強柱の直圧縮応力分布 (max 時)

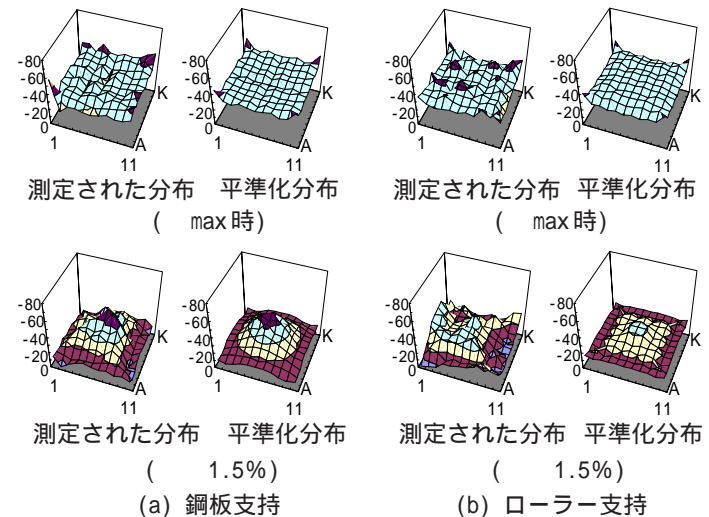


図 - 11 薄い鋼管柱 (1.5mm) の直圧縮応力分布

いずれの支持条件でも、弾性範囲から剛性低下が急激に生じる時点(最大強度の約2/3時点、図-9の の時点)までは断面内の分布は骨材の分散や材料の不均一性によるばらつきは生じていたが、それを除くとほぼ一様な分布になっていた。しかし、鋼板支持した場合、それ以降では中央部の応力がより大きくなり、周辺部の応力があまり増加しない分布になった。これに対してローラ支持した場合、その傾向は明確に生じなかった。

(b) 鋼管柱

図 - 11と図 - 12に鋼管柱の最大強度時の応力分布を示す。いずれの試験体でも剛性が急激に低下する の時点までは断面内の応力分布はほぼ一様となったが、それ以降、鋼管のコーナー部分の応力が大きくなり、最大強度直前から、断面周辺の柱幅中央の応力が低下し始めた。最大強度時に

ついては、厚い鋼管柱では、コーナーの応力の突出が、薄い鋼管柱に較べて大きくなっている。

最大強度以降でひずみが1.5%の 時(図 - 9での時点)では、鋼板支持した場合、柱の中央部の応力が突出し、コーナーの応力が低下している。これに対して、ローラ支持した場合、柱の中央部の応力は、それほど突出していない。柱高さを半分にしたBタイプでも同様な傾向であった。これらのことから、加力面を鋼板支持するかローラ支持するかにより、最大強度以降では柱内部の圧縮抵抗機構が異なり、圧縮軟化域のコンクリートの構成則を検証する場合には、加力面の支持条件を考慮する必要があると判断できる。また図 - 9に観られるような平均の応力 - ひずみ関係を適合させるだけでも不十分であることが確認できる。

5.4 最大強度以降の圧縮抵抗機構

前述した破壊状況と応力分布性状から最大強度以降、圧縮抵抗する機構として、つぎの二つが存在すると考えられる。図-13(a)に示すように加力面を鋼板で加圧する場合には、その鋼板の摩擦により横拘束される四角錐状の領域ができて、この領域は剛性・強度が大きくなり、結果として非破壊領域となる。この領域が圧縮抵抗する機構(加力面摩擦の抵抗機構)が存在する。もう一つは図-13(b)に示すように鋼管によりコーナー部分と断面中央部分の領域が横拘束されて、剛性・強度が大きくなる。この領域が圧縮抵抗する機構(鋼管の抵抗機構)が存在する。

鋼板支持される鋼管柱では、鋼管が降伏するまでは鋼管の抵抗機構が卓越し、降伏した以降では加力面摩擦の抵抗機構が卓越する。ローラー支持される鋼管柱では鋼管の降伏に関係なく鋼管の抵抗機構が卓越することになる。

5.5 鋼管の横ひずみ分布と曲率分布

図-14にひずみゲージにより測定された鋼管の横ひずみ分布を示す。これによる構面外曲げの曲率分布を図-15に示す。これらの分布はローラー支持された鋼管柱のもので、図-9中に示す時点のものである。また図-14には鋼管の降伏ひずみ ϵ_y を水平の一点鎖線で示している。

厚い鋼管柱では、コーナーの近傍で曲率が反転する、ひずみ分布と曲率分布になっている。コーナー近傍では曲率が鋼管の内側に凸になり、柱幅中央の範囲では外側に凸になる分布になっている。これに対して薄い鋼管柱では、その曲率が反転する分布になっておらず、コーナーの近傍だけが外側に凸になる分布になっている。

厚い鋼管柱では最大強度時にコーナー近傍が内側に凸になる状態で曲げ降伏し、その後、柱幅中央の範囲が外側に凸になる状態で曲げ降伏した。これに対して薄い鋼管柱では、最大強度以降でコーナー近傍が外側に凸になる状態で降伏した。

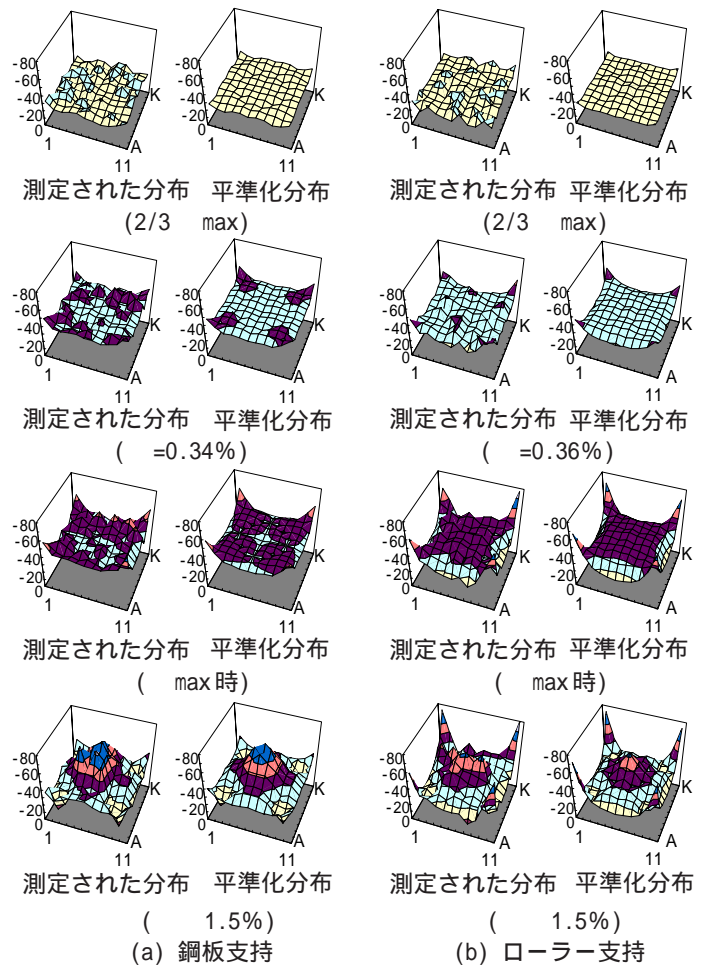


図-12 厚い鋼管柱(4.2mm)の直圧縮応力分布

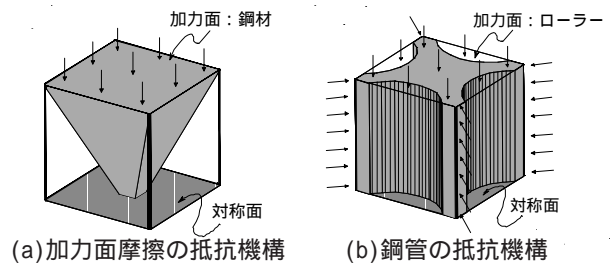


図-13 鋼管内の2種類の圧縮抵抗機構

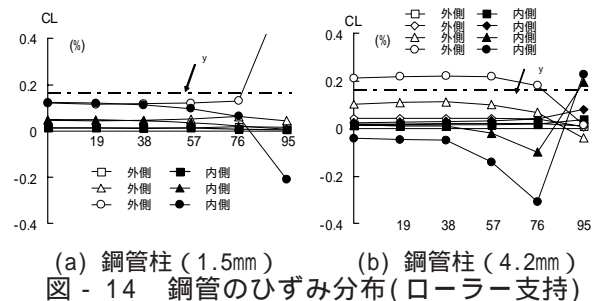


図-14 鋼管のひずみ分布(ローラー支持)

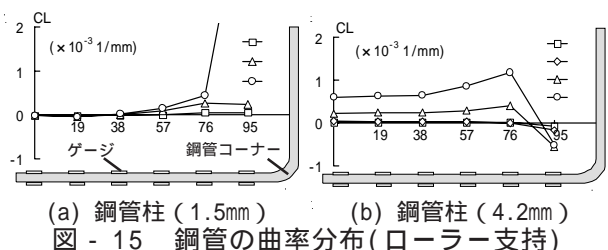


図-15 鋼管の曲率分布(ローラー支持)

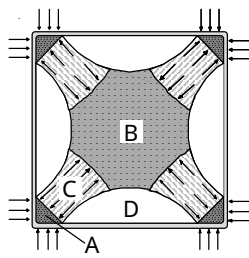


図 - 16 鋼管内における多軸
応力状態のゾーニング

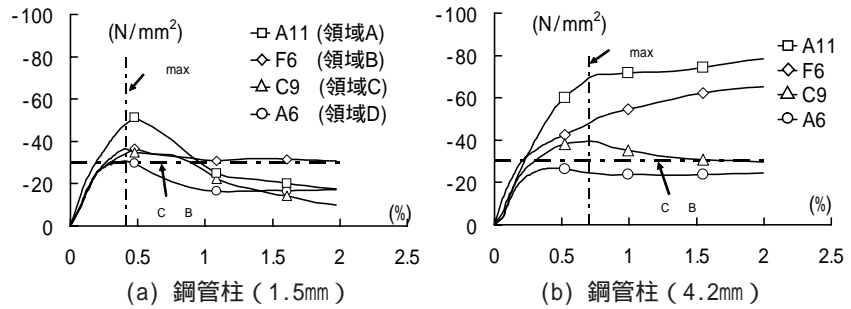


図 - 17 鋼管内の各ゾーニング領域の応力 - ひずみ関係

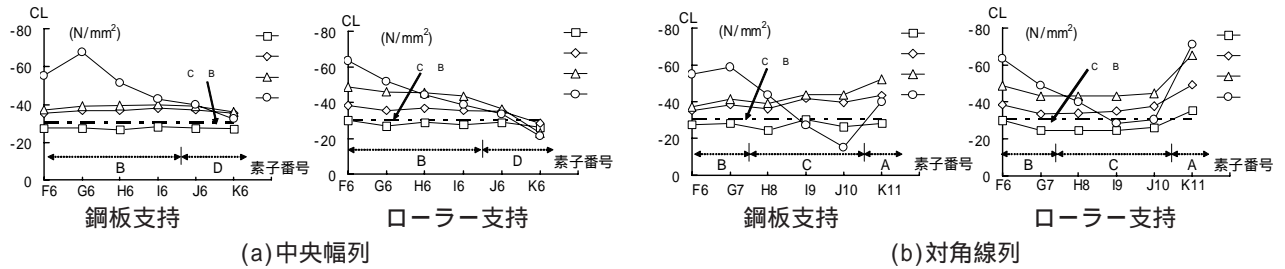


図 - 18 鋼管柱 (4.2mm) の応力分布

5.6 ローラー支持される鋼管柱の多軸応力状態

ローラー支持される鋼管柱の場合、図 - 16 に示すように柱断面内を横拘束力の状態の違いにより四つの領域に分けられる。Aの領域は鋼管のコーナーで、2軸の横拘束を受ける。Bの領域は4カ所のコーナーから横拘束を受けてほぼ等二軸の横拘束力を受ける。Cの領域はAとBの領域の間の横方向の圧縮力を伝達させるもので、一軸の横拘束力を受ける領域と考えられる。Dはそれらに比べ横拘束力をあまり受けないものと考えられる。図 - 17に各領域の代表的な位置の応力と平均のひずみの関係を示す。示した関係は、ローラー支持された鋼管柱のものである。同図には最大強度時のひずみ ϵ_{max} を縦の一点鎖線で示す。ひずみは5.2節の算出方法によるものである。また同図にはコンクリートの圧縮強度 σ_{CB} を水平の一点鎖線で示している。

薄い鋼管柱では最大強度時にAの領域の応力は σ_{CB} より大きくなり、それ以降、減少している。またBの領域の応力は最大強度以降、ほとんど変化していない。厚い鋼管柱では最大強度時に、大きい方からA,B,C,Dの領域の順で応力が大きく、それ以降、A,Bの領域の応力は増加している。図 - 18にローラー支持された厚い鋼管柱の柱中央幅列と対角線列の応力分布を示す。

対角線列のローラー支持では、最大強度時 (の時点) まではAとBの領域の応力が大き

く、最大強度以降 (の時点) ではC領域の応力が低下している。

6. まとめ

- (1) コンクリート内部の直圧縮応力分布を測定する装置の大型化をはかり、応力の測定範囲も超高強度コンクリートまで適用できるように改良できた。
- (2) 一軸圧縮力を受ける角形鋼管コンクリート柱の実験結果で、コンクリートの構成則を検証する場合、加力面の支持条件を考慮する必要がある。
- (3) 一軸圧縮力を受ける角形鋼管コンクリート柱では、コンクリートの圧縮抵抗機構として、加力面摩擦による抵抗機構と、鋼管の横拘束による抵抗機構の2種類が存在する。
- (4) 鋼管内のコンクリートに対する横拘束状態は4種類の領域に分けられ、そこにおける応力分布性状の特徴を明らかにした。

本研究は平成16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。

参考文献

- 1) 塩屋晋一:力学的対称面を利用するコンクリート内部の圧縮応力分布の測定, コンクリート工学年次論文集, Vol.21-1, pp. 583-588, 1999
- 2) 増田祐一郎:軸力・曲げ・せん断力を受けるRC造柱の降伏ヒンジ領域の応力伝達機構, コンクリート工学年次論文集, Vol.26-2, No.2, pp. 265-270, 2004