

# 論文 横補強筋を用いてプレストレスを導入する鉄筋コンクリート柱要素のひずみ分布性状

渡部 洋<sup>\*1</sup>・峯村守央<sup>\*2</sup>・林 静雄<sup>\*3</sup>

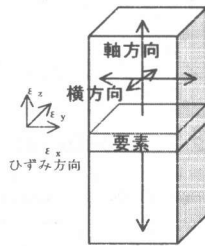
**要旨**：鉄筋コンクリート柱は、柱軸直交方向に配された横補強筋にて拘束されることにより強度・靱性が向上する。このような効果は拘束効果と呼ばれ、能動的に得られるものと受動的に得られるものの2種類がある。本研究は、横補強筋により主に能動的に横方向拘束される鉄筋コンクリート角型柱の微小要素をモデル化し、内部応力状態を実験より直接計測し検証することを目的として要素実験を行った。結果、拘束される断面の平面ひずみ分布は一様なものではなく位置によって異なる分布となることが認められた。また、有限要素法による3次元弾性解析は実験結果と良好な対応を示した。

**キーワード**：横方向プレストレス、柱、要素、ひずみ分布、内部応力状態

## 1. はじめに

鉄筋コンクリート柱は、柱軸方向に圧縮力を負担し、これと直交する方向に配された横補強筋に拘束されることにより強度・靱性が向上する。このような効果は拘束効果と呼ばれ、この効果には能動的に得られるもの<sup>1)</sup>と受動的に得られるもの<sup>2)</sup>の2種類がある。

本研究は、主に能動的に横補強筋によって横方向拘束された鉄筋コンクリート柱のひずみ分布性状、内部応力状態を解明し、能動的な拘束効果のメカニズ



図—1 柱微小要素

ムを実測値により検証することを目的として柱の微小要素を取り出し、拘束力載荷実験を行ったものである。

## 2. 実験概要

### 2.1 試験体概要

拘束されるコンクリートの平面ひずみ及び高さ方向のひずみ分布を把握するため、図—1のような柱要素を取り出した試験体の計画を行った。試験体名一覧を表—1に示す。試験体NO.1～5までを1シリーズとし、各々3体づつ3シリーズ分計15体を作製した。NO.1は筆者らがこれまでに実験に使用してきた試験体<sup>1)</sup>をモデル化し横補強筋を埋め込みとしたもの、NO.2～5は緊張力とひずみの関係を連続的に評価するた

表—1 試験体名一覧

NO.	1	2	3	4	5	
試験体名	E-120-H30 -φ2.0-1	E-120-H30 -φ6.0-1	E-250-H30 -φ7.2-1	E-250-H60 -φ7.2-1	E-250-H60 -φ7.2-2	
寸法	断面 (mm×mm)	120×120 	*120×120 	*250×250 	*250×250 	*250×250 
	高さ(mm)	30	30	30	60	60
横補強筋	径(mm)	2.0	6.0	7.2	7.2	7.2
	本数	1	1	1	1	2
プレストレス導入方法	プレテンション	ポストテンション				
横補強筋緊張方法	4隅ネジ式	4辺ターンバックル式				

\*想定した柱断面の寸法値を表す(かぶりコンクリートの厚さ分、コンクリート最外端寸法値は小さい)。

\*1 東京工業大学大学院 総合理工学研究科環境理工学創造専攻 工修 (正会員)

\*2 東海旅客鉄道(株) 工修 (正会員)

\*3 東京工業大学教授 建築物理研究センター 工博 (正会員)

めに外周部よりターンバックルと PC 鋼棒により形成された横補強筋を配し拘束するものとした。NO.1 はコンクリート打込み面およびその裏面、NO.2~5 は直方体状のコンクリート全面に 1 軸および 3 軸ひずみゲージを貼付するため、砥石及び耐水ペーパーを用いて表面の面だしを行った。ひずみゲージ貼付位置の例を図 2~4 に示す。

## 2.2 使用材料

### (1) 鉄筋材料性状

使用した鉄筋の諸元を表 2 に示す。φ2.0 の PC 鋼材は溶接閉鎖角型を使用しており、溶接点強度は母材引張強度の 70% 程度である (表中 φ2.0 の値は溶接点の値)。φ6.0, 7.2 は、ポストテンション方式でコンクリートに拘束を与えるため、右ネジ・左ネジの端部処理を施した 4 本の L 型 PC 鋼材を組み合わせその間にターンバックルを配し横補強筋を形成した。

### (2) コンクリート材料性状

使用したコンクリートの調合を表 3、諸元を表 4 に示す。ここで各シリーズの値は、φ50mm 高さ 100mm のシリンダー試験を行い得られた、加力開始時~加力終了時の平均の値を示す。貼付するひずみゲージの測定長さが 10mm (シート 18mm) であることから、粗骨材を用いないモルタルとし、細骨材には標準砂、セメントには早強ポルトランドセメントを用い水セメント比 55% にて作製した。試

表—2 PC 鋼材材料性状

直径 (mm)	有効面積 (mm <sup>2</sup> )	降伏強度 (MPa)	引張強度 (MPa)	降伏ひずみ (μ)	破断ひずみ (%)	ヤング係数 (GPa)
φ2.0	3.1	1390	1690	8660	—	206.9
φ6.0	28.3	400	600	2000	—	206.9
φ7.2	40.8 (37.4)*	1520	1846	7750	10.6	196.1

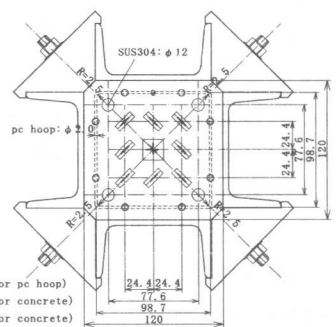
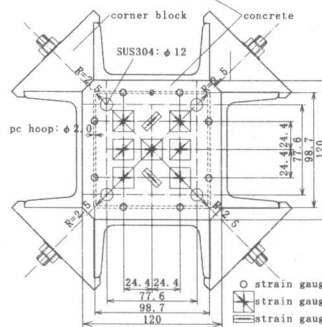
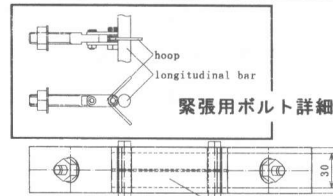
①\*( )内はネジ部の値。② φ2.0:村田発條株式会社製、φ6.0:東京工業大学工房製、φ7.2:高周波熱線株式会社製

表—3 コンクリート調査

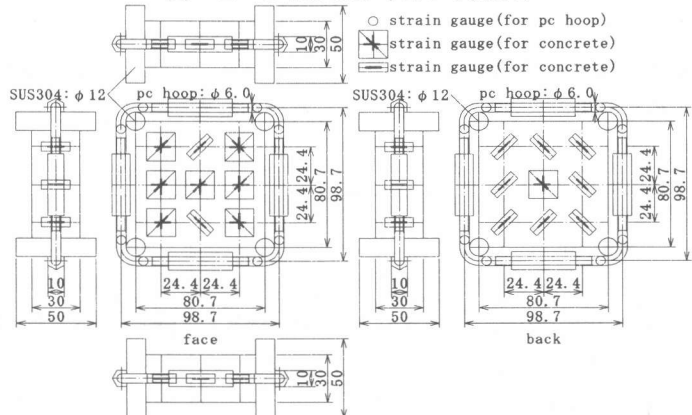
コンクリート種類	細骨材			セメント (kg/m <sup>3</sup> )	水 (kg/m <sup>3</sup> )	AE 剤 (kg/m <sup>3</sup> )	水セメント比 (%)
	単位置 (kg/m <sup>3</sup> )	比重 (g/cm <sup>3</sup> )	吸水率 (%)				
モルタル (早強ポルトランドセメント)	1438	2.44	3.91	575	281	7	55

表—4 コンクリート材料性状

シリーズ	圧縮強度 (MPa)	引張強度 (MPa)	ヤング係数 (Gpa)	比重 (g/cm <sup>3</sup> )	ポアソン比
1	34.0	2.0	19.0	2.06	0.2
2	32.3	2.2	18.0	2.04	0.2
3	36.2	2.4	20.1	2.05	0.2

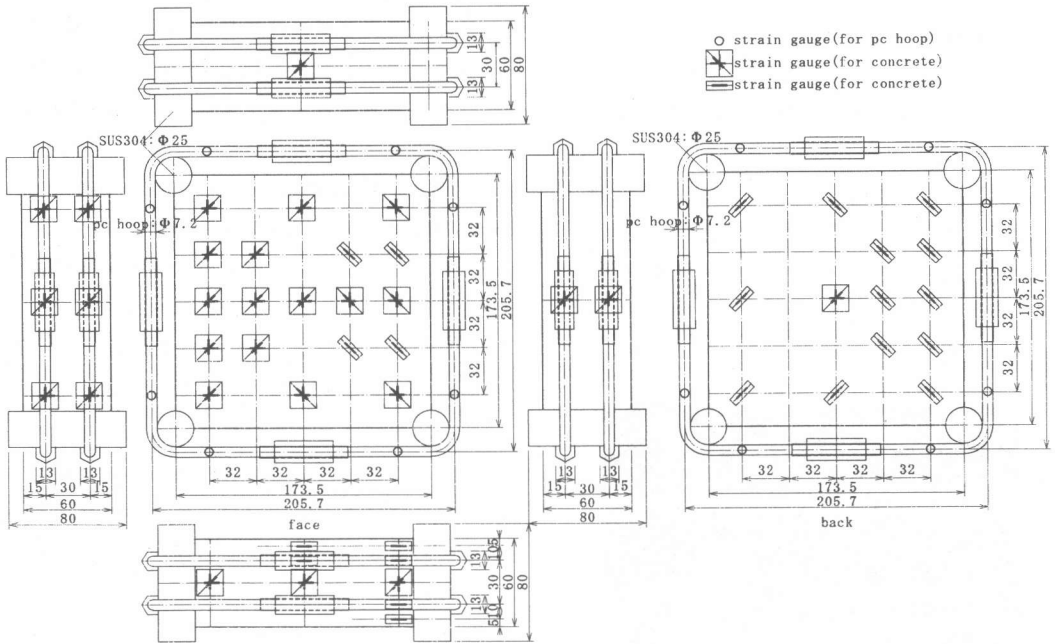


図—2 E-120-H30-φ2.0-1 (NO.1)



図—3 E-120-H30-φ6.0-1 (NO.2)

験体が薄型 (30mm) であることに起因するコンクリートの乾燥収縮を抑えるため、湿度 70~80%、室温 20度の恒温室にて湿潤養生を行った。



図—4 E-250-H60-φ7.2-2 (NO.5)

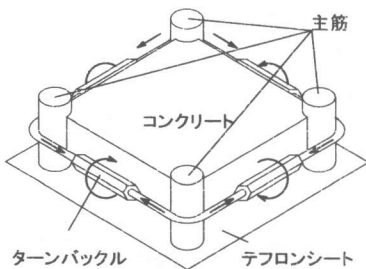
### 2.3 加力方法と測定方法

基本的に加力方法は、横補強筋に与えた緊張力を硬化後のコンクリートに対する拘束力として伝えるものとする。加力時のコンクリートは上下方向の拘束は受けない(つまり柱の材軸方向は拘束されない)。加力はコンクリート打込み後の材齢 10 日～14 日目に実施した。

NO.1 の横補強筋の緊張は、コンクリート打込み前に横補強筋 4 隅に取り付けたボルトを、図—2 の鋼製型枠 4 隅に取り付けたナットを同時に締めこむことにより行なった。緊張力の目標値は、降伏強度の 90% (3.7kN) とした。ボルトの横補強筋 4 隅への取り付けには金具を使用する。この金具は、主筋には直接触れないため、

横補強筋のみが緊張される。NO.1 への加力は、4 隅のナットを緩めることにより行なった。4 隅のナットが完全に緩みきった状態を加力終了とし、この時確保される有効プレストレスは初期緊張力の 80% であった。NO.1 の加力手順の細部詳細については文献 1 を参照されたい。

NO.2～5 への加力は図—5 に示すように、横補強筋 4 辺中央部のターンバックル・ナットを締めこみ、4 隅の主筋を介してコンクリートに対する拘束力を与える。このとき、コンクリート下面は地面に触れないように主筋長さを延長し、さらに主筋下端部での変形拘束が生じないようにするためテフロンシートを主筋の下に敷き、摩擦除去を図った。これらの加力は、横補強筋のひずみが 2000 $\mu$  程度に達した時点あるいはコンクリートが圧壊した時点で終了とした。



図—5 NO.2～NO.5 加力方法

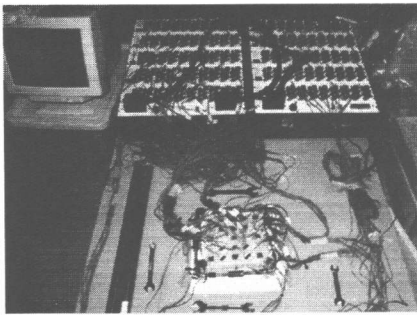
測定方法は、図—2～4 の位置の横補強筋上面に貼付したひずみゲージ (8 箇所/1 本, 2 箇所/1 辺) により補強筋に与えた緊張力を測定し、同時にこの緊張力に対するコンクリートのひずみをコンクリート表面に貼付した一軸および三軸のひずみゲージにより測定した。

### 3 実験結果および検討

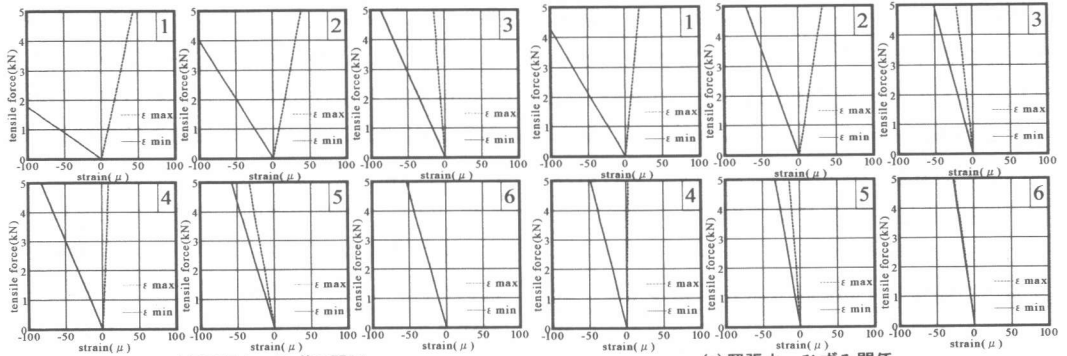
#### 3.1 緊張力—ひずみ関係

写真—1に加力時の測定装置の接続状況を示す。横補強筋による外周からの拘束力を受け、コンクリート中心部が破壊した試験体は無かったが、横補強筋ひずみが目標値に達する前に、主筋近傍での局所的な圧壊で終局に至った試験体も見られた。

実験より得られた緊張力—ひずみ関係を、弾性的な挙動を示した緊張力 0~5kN、ひずみ-100~100 $\mu$ の範囲内のみに限定して図—7(a)、8(a)に

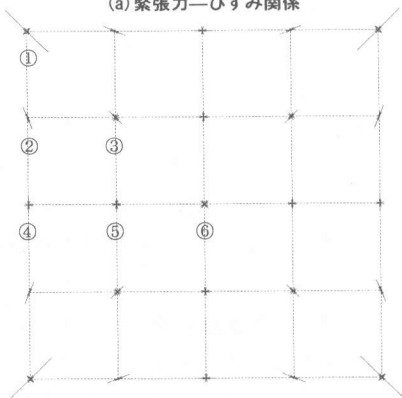


写真—1 測定装置接続状況



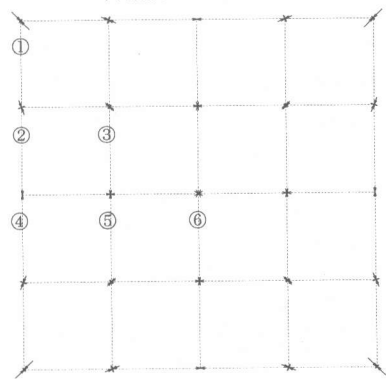
(a) 緊張力—ひずみ関係

(a) 緊張力—ひずみ関係



(b) 主ひずみ分布

図—7 最大および最小ひずみ分布 (NO. 3)



(b) 主ひずみ分布

図—8 最大および最小ひずみ分布 (NO. 4)

表す。ここで、縦軸が横補強筋もしくはターンバックルに貼付したひずみの値より換算した横補強筋一本あたりの緊張力を、横軸が平面上の各測定位置において計測されたコンクリートの最大主ひずみおよび最小主ひずみの値を示したものである。測定位置は同図(b)の番号に従っており、横軸の正の値が引張ひずみ、負の値が圧縮ひずみを示している。主筋近傍のひずみは最小主ひずみは圧縮であるが、最大主ひずみは引張が生じている。

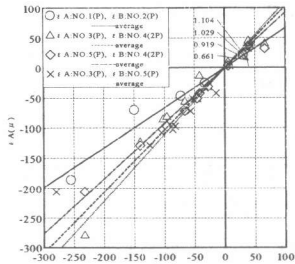
このことより、拘束力を負担した断面のひずみ分布は、柱の角型断面内において一様な圧縮分布となるのではなく、それぞれの位置、方向によって全く異なる値をとることが認められる。平面内部応力状態は静水圧のような均一な応力状態ではなく、部分的には引張応力が生ずる部分もある。なお本論では、1つのタイプの試験体について各々3体作製し実験を行っているので、各シリーズの比較を行う際には3体の緊張力—ひずみ関係の平均化を行った上での検討を行う。

表—5 平面主ひずみ分布の相関

NO.	横補強筋一本あたりの緊張力	ひずみ*	$\epsilon_A/\epsilon_B$ 平均値	相関係数
3	P	$\epsilon_A$	1.029	0.972
4	2P	$\epsilon_B$		
5	P	$\epsilon_A$	0.919	0.995
4	2P	$\epsilon_B$		
3	P	$\epsilon_A$	1.104	0.970
5	P	$\epsilon_B$		

\*試験体表面で計測された最大及び最小ひずみ(絶対値ではない)を表す

### 3.2 平面ひずみ分布



図—9 平面主ひずみ比較

同一緊張力下の NO. 3, 4 平面の各測定位置における最大及び最小主ひずみを図—7 (b), 8 (b) に示す。矢印長さはひずみの大きさを表す。また、表—5 に平面ひずみ分布の試験体間の相関係数を示す。表中の  $\epsilon_A$  及び  $\epsilon_B$  は平面上の各測定位置における各々の試験体の最大及び最小ひずみを表すものとする。表—5 中の  $\epsilon_A/\epsilon_B$  の平均値を図—9 に示す。横補強筋を埋め込みとした NO. 1 は表面で計測されるひずみの絶対値が NO. 2 と比較して小さくなるのがわかる。

#### (1) 横補強筋間隔の影響について

NO. 4 と NO. 5 の平面ひずみ分布の比較を行い、その分布形状に及ぼす横補強筋間隔の影響を検討する。同一緊張力下では横補強筋の芯とひずみ測定表面間の距離が増大する程表面の平面ひずみは相対的に小さくなるが、表—5、図—9 より NO. 5 の横補強筋一本当たりの緊張力 P 時のひずみ分布と、NO. 4 の緊張力 2P 時のひずみ分布を比較したところ、両者の相関係数は 0.995、前者を後者のひずみの値で除した値の平均値は 0.919 という高い相関性が確認できた。

NO. 3 と NO. 5 の平面ひずみ分布はほとんど一致する傾向が認められた。横補強筋間隔を狭くすることは、高さ方向の平面ひずみ分布を均一な状態とする上で非常に役立っていることが確認できる。

#### (2) 高さの影響について

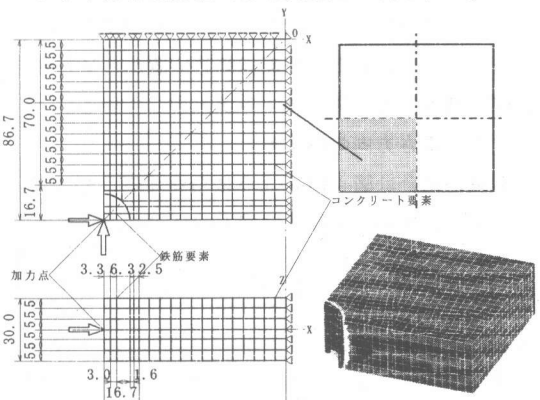
NO. 3 と NO. 4 の平面ひずみ分布の比較を行うこ

とにより、ひずみ分布形状に及ぼす高さの影響の検討を行う。NO. 4 と NO. 5 の比較と同様に、NO. 3 の横補強筋一本当たりの緊張力 P 時のひずみ分布と、NO. 4 の緊張力 2P 時のひずみ分布を比較したところ、両者の相関係数は 1.029、前者を後者のひずみの値で除した値の平均値は 0.985 という高い相関性が見られた。つまり本実験のように柱の上下端の拘束がない場合に、断面内のひずみ分布はその位置からの高さ方向の距離の増大に伴い値は減少するが、その分布の形状そのものは変わらないことがわかる。ただし、横補強筋が直接コンクリート側面を拘束しない場合の検討なので、横補強筋の辺等が直接コンクリートを拘束する柱に関しては別途の検討が必要になる。

#### (3) 実験結果と解析結果

実験結果との対応を確認するため、三次元有限要素弾性解析を行った。解析に適用したモデルを図—10 (a) に示す。断面の対称性を考慮した 1/4 モデルとしている。

解析結果の 1 例を図—10 (b) に、緊張力—ひずみ関係の実験値と解析値の比較を図—11 に示す。測定箇所は実験と揃えている。弾性範囲に限定した検討ではあるが、両者は相関関係にあり、解析はひずみ分布を評価できる見通しが得られた。

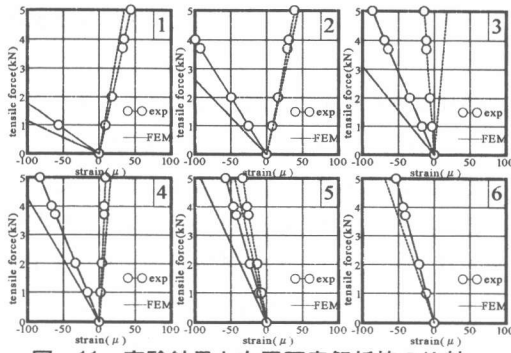


図—10 (a) 有限要素解析モデル (NO. 3) (b) 解析結果の 1 例 (最大主応力分布)

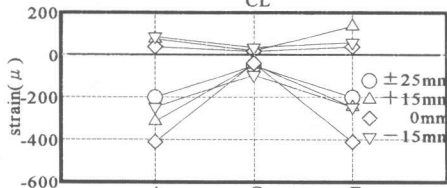
### 3.3 側面ひずみ分布

#### (1) 軸方向および横方向ひずみ

図—12 に実験より得られた要素側面の軸方向及び横方向ひずみを横補強筋芯位置からの距離別

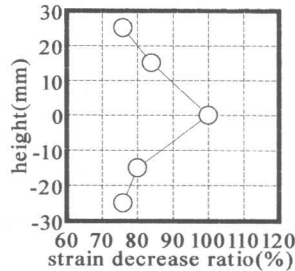


図—11 実験結果と有限要素解析値の比較



図—12 側面軸方向及び横方向ひずみ

に示す。縦軸はコンクリートのひずみを表し、正の値を軸方向ひずみ、負の値を横方向ひずみとした。横軸は側面の辺方向の

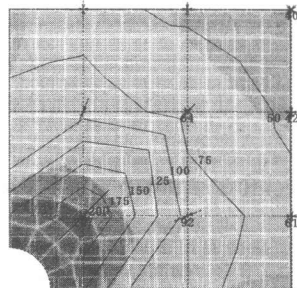


図—13 高さ方向ひずみ減衰率

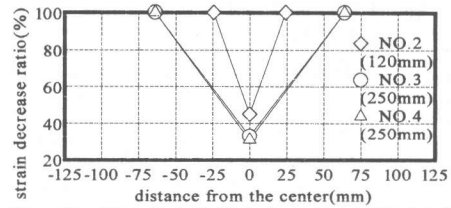
位置を示す (C:中心, A, E:主筋近傍)。横方向、軸方向ともに主筋に近い位置より、中心のひずみは減少している。また、横補強筋芯位置から軸方向距離が増大するに従いひずみが減少している。

### (2) 高さ方向のひずみ

減衰の割合は図—13のように分布する。この分布は NO.4 側面の主筋近傍横方向ひずみより求めた。これより NO.3 の表面のひずみ分布は、横補強筋芯位置のひずみ分布の約 82%となることを推測できる。この減衰の割合から実験値を計算整理した 1/4 要素の主ひずみ分布等高



図—14<sup>1)</sup> 実験結果に基づく 1/4 要素のひずみ等高線 (緊張力 3.7kN 時, 単位 μ)



図—15 辺の長さと同方向ひずみ減衰率の関係

線を図—14に描く。測定点の絶対数が実験結果は荒い為に、滑らかな曲線とはなっていない。今後、解析により応力分布を検討していく予定である。

### (3) 辺の長さの影響

図—15に想定断面一辺 120,250mm の辺上のひずみ減衰率を示す。これは主筋近傍に対する側面中心の横方向ひずみの割合を示したものであり、辺長の増大に伴い減衰している事がわかる。図—12の軸方向ひずみに関しても主筋近傍が中心と比較して高い値を示していることから、上下面に拘束のある実際の柱では柱の内側よりも外側の方が高い応力状態に置かれることになる。

## 4. 結論

- 1) 角型横補強筋により拘束されるコンクリートの内部応力状態は、静水圧のように均一な応力が断面のどの部分でも与えられるのではなく、局部的に高くなることが実験より確認出来た。
- 2) 弾性範囲のひずみ分布は、実測値を三次元有限要素解析にて評価できる。
- 3) 主に主筋により拘束される柱断面においては、絶対値は増減するものの、高さ方向の異なる位置における平面ひずみ分布形状はほぼ同様となる。

謝辞 本研究の実施に際し (株) 高周波熱練諸氏のご協力に謝意を表します。

参考文献 1) 渡部洋,横谷榮次,林静雄,伊藤嘉則:横補強筋を用いてプレストレスを導入したRC柱の圧縮及びせん断性状に及ぼす緊張力の影響,第 10 回プレストレスコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集,pp392-402,2000.10, 2) 日本建築学会構造委員会,プレストレスコンクリート構造運営委員会,終局限界変形・変位小委員会:コンクリート構造(PC,PRC)部材の靱性設計手法と耐震架構への応用,1997.9