

論文 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

塩屋晋一

要旨：本研究では、力学的対称性を利用することによりコンクリート内部の対称面の圧縮応力分布を測定する方法を提案して、一軸圧縮力を受けるコンクリートシリンダーでその測定方法の妥当性を検証している。コンクリートシリンダーの半分高さの供試体に提案する測定方法を適用して、標準のコンクリートシリンダーの中央高さ面（対称面）の直圧縮応力分布を精度よく把握できることが確認された。そして、圧縮強度以降、コンクリートシリンダーの内部の応力分布の一樣性は大きく崩れ、平均の応力-ひずみ関係では説明できない部分が存在し、中央高さ面の中心部の最大応力は圧縮強度の約2倍になることも明らかにした。

キーワード：コンクリート, 応力分布, 圧縮強度, 応力-ひずみ関係, 鉄筋コンクリート

1. はじめに

コンクリート内部のある面の応力分布が実験により詳細に測定されれば、コンクリートの構成則や応力解析方法の妥当性が精度の高いレベルで検証できる。またコンクリート部材における内部の種々の圧縮応力分布も明らかになる。

本論文では、まず力学的対称性を利用することによりコンクリート内部の対称面の直圧縮応力分布を測定する方法について述べ、そしてそれを一軸圧縮力を受けるコンクリートシリンダーに適用した実験の結果について述べる。

2. 内部の応力分布の測定原理

材料や形状および荷重などに対称性がある構造物では、対称線や対称面に仮定の支持条件を与えることにより、応力状態やひずみ状態を変化させることなく、構造物の一部だけを扱うことが可能になる。このような構造物の部分的な扱い方は解析対象物のモデル化でよく利用される。一軸圧縮力を受けるコンクリートシリンダーの場合には、図-1(a)に示すように中央高さの水平面が対称面となる。図-1(b)のようにコンクリートシリンダーの上半分高さのものに、対称面に相当する面を鉛直変位が生じない

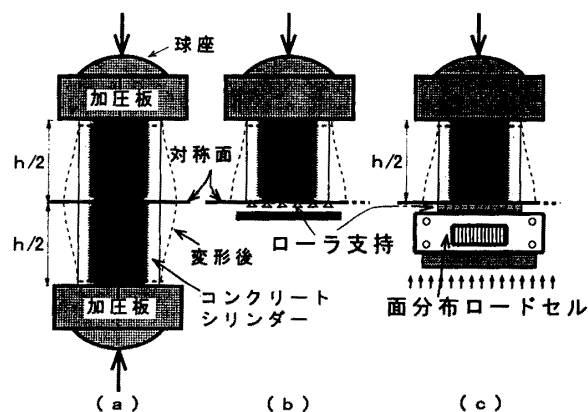


図-1 対称面の直圧縮応力分布の測定原理

ようにローラー支持して一軸圧縮力を加えることを考える。その内部で生じる応力分布やひずみ分布は、図-1(a)のコンクリートシリンダー上半分のものに等しいことになる。そのローラー支持の鉛直反力は対称面での内力の直圧縮応力度と釣り合うため、その鉛直反力分布を詳細に測定することは、コンクリートシリンダー内部の対称面での直圧縮応力分布を測定することになる。

本研究では、鉛直反力の面分布を測定できる面分布ロードセルを開発し、図-1(c)のようにセットして加力を行っている。面分布ロードセルとローラー支持の詳細は、次章で後述する。

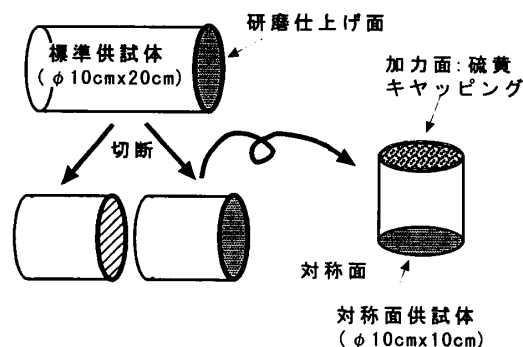


図-2 対称面用供試体の製作

3. 実験計画

3.1 供試体

コンクリートシリンダーでは中央高さの水平面が対称面となる。対称面の応力分布を測定する供試体の高さは、コンクリートシリンダー高さの半分となる。ここでは、直径10cm高さ20cmのコンクリートシリンダーを標準供試体とし、その半分高さのものを対称面供試体とする。

対称面供試体については、コンクリートを横打ちした標準供試体を図-2のようにその中央高さで切断して製作している。研磨仕上げの型枠面側のコンクリート面を対称面とし、切断面に硫黄キャッピングをほどこして加力面としている。供試体記号についてはつぎのようにする。供試体記号：①-②-③，例えばN-8-R

①：標準供試体はNで対称面供試体はHとする。

②：供試体の番号

③：繰り返し加力の場合にRとする。

表-1にコンクリートの調合表を示し、表-2に供試体の一覧と力学的性質を示す。

3.2 面分布ロードセル

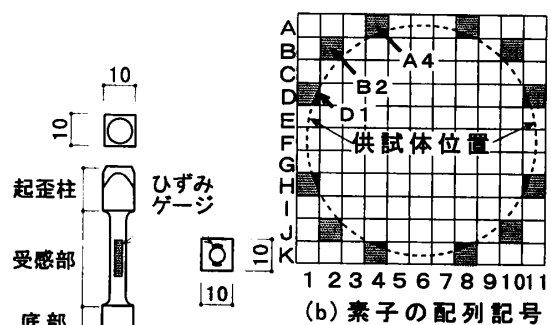
図-3(a)中に示すように起歪柱，受感部，底部からなる荷重検出用素子（以後，素子と称す）を鋼材で製作し，起歪柱の上面と底部の底面は研磨仕上げしている。受感部に2枚のひずみゲージを貼付し，曲げ成分を除去できるようにしている。図-3(b)のように121個の素子を磨き鋼板の上に11行11列のます目状に並べている。受感部に生じる曲げ応力を軽減するために鋼製の枠で軽く横拘束し，起歪柱の側面をで

表-1 コンクリートの配合

粗骨材 寸法 (mm)	水セメント比 W/C(%)	細骨材 率 S/a(%)	単位重量 (kg/m ³)			
			水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 A
20	59.5	41.4	189	318	724	1026

表-2 供試体記号の一覧と力学的性質

供試体記号	材齢 (日)	ヤング係数 ($\times 10^4$ N/mm ²)		圧縮強度 (N/mm ²)	圧縮強度時のひずみ(%)		備考
		ゲージ	変位計		ゲージ	変位計	
N-1	88	1.9	2.1	28.7	-0.26	-0.25	
N-2	89	2.3	2.4	27.3	-0.24	-0.24	
N-3	89	-	-	28.9	-	-0.19	
N-4	89	-	2.4	28.0	-	-0.23	
H-1	81	-	-	30.1	-	-	剛性試験機
H-2	84	2.9	-	30.1	-0.23	-	剛性試験機
H-3	86	3.4	3.2	28.9	-0.27	-0.24	剛性試験機
H-4	92	-	2.5	31.2	-	-0.24	剛性試験機
H-5	92	-	2.6	30.2	-	-0.24	
H-6	92	-	2.3	30.4	-	-0.23	
H-7	93	-	2.2	28.8	-	-0.25	
H-8-R	93	-	1.7	28.7	-	-0.26	繰り返し加力
H-9-R	94	-	3.5	32.4	-	-0.25	繰り返し加力



(a) 荷重検出用素子

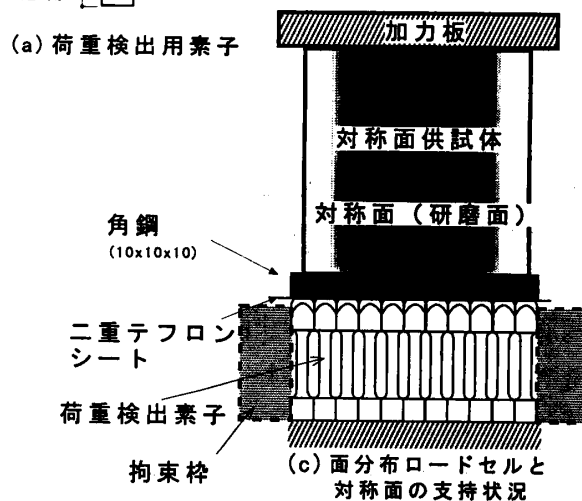


図-3 荷重検出素子と素子配列状況

るだけ縦ローラー支持状態に近づけている。ただし起歪柱の側面と拘束枠の内側面にはグリースを塗布し，その面での摩擦を軽減している。

各素子が受ける荷重は，個別に行ったキャリブレーションによる換算係数と受感部の平均の

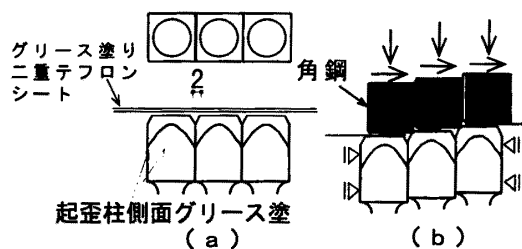


図-4 対称面でのローラー支持状況

ひずみの積として検出している。鋼材は1/100mm以下の誤差で加工している。

3.3 対称面のローラー支持

図-3(c)のように対称面と素子の上面の間に焼き入れ角鋼（研磨仕上げ）とグリース塗りの二重テフロンシートをセットし、テフロンシート間で水平滑りが生じるようにしている。

角鋼と素子上面の間の静止摩擦係数は単一の角鋼(1cm×1cm)あたりに4kNの圧縮力を作用させた時、1.5%であった。図-4のように素子上面での各素子の最小隣接間隔を2mmとしている。

これは圧縮強度以降、ポアソン効果により対称面の横変形が急増して、角鋼が隣接する素子の起歪柱に接触し、荷重検出に影響を与えることを防ぐためである。対称面で一樣な横ひずみが生じる場合、その許容横ひずみは4%となる。

3.4 加力と測定

図-5に対称面供試体の加力状況と変形の測定状況を示す。加力は耐圧試験機を用い、単調一方向圧縮加力または一定ひずみ繰り返し圧縮加力を行い、その対称面の直圧縮応力分布を測定している。H-1～H-4では、図中に示すように4本のPC棒鋼をセットして剛性試験を行っている。H-3～H-9-Rでは、図中に示しているように供試体内の60mm区間の縦圧縮変形と、加力面側の測定用フレームから下加圧板までの区間の縦圧縮変形を測定している。また、H-1とH-2では図-6中に◀で示している位置の横変形も測定している。標準供試体ではこれに準じて図中に示しているように変形を測定している。H-1, H-2, N-1, N-2では図中に示しているようにコンクリート表面の縦ひずみと横ひずみもひずみゲージで測定している。

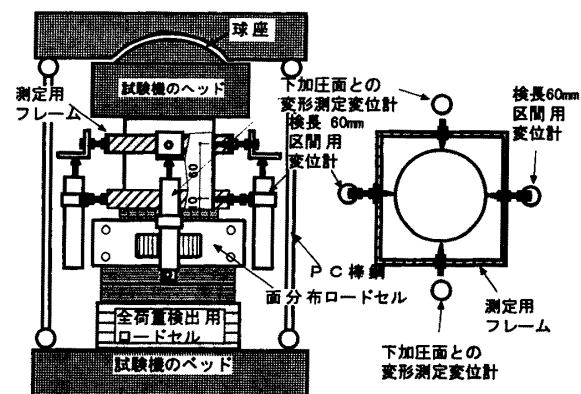


図-5 加力状況と変形測定状況

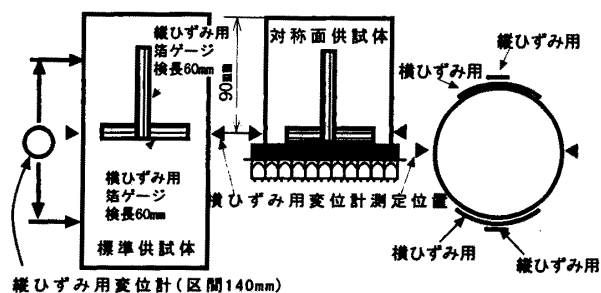


図-6 ひずみゲージ測定状況

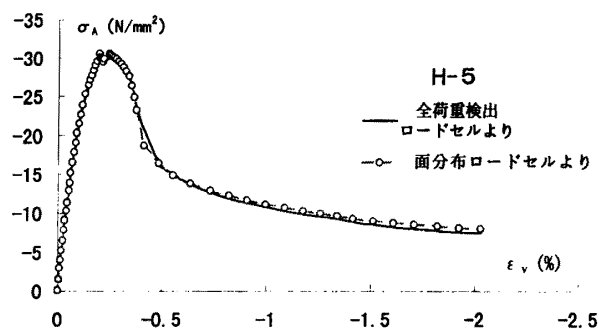


図-7 一方向加力による平均の応力-ひずみ関係

4. 実験結果

4.1 面分布ロードセルの精度

図-7に一方向圧縮加力を行ったH-5の平均の応力-ひずみ関係を示す。実線は図-5中の全荷重検出用ロードセルの荷重を供試体水平断面積で除した平均の応力によるもので、-○-線は面分布ロードセルの各素子の合計荷重を供試体の水平断面積で除した平均の応力によるものである。ひずみは図-5中の60mm区間の変位計の縦圧縮変形から算出している。両方の応

カーひずみ関係を比較することにより開発した面分布ロードセルの精度を検証できる。

圧縮強度までは、各測定ステップの計測中(10秒間)は一定荷重を保持するように試験機を制御していることもあり、開発した面分布ロードセルで精度良く計測されている。他の供試体を含めても圧縮強度までの測定誤差は±1%以内であった。圧縮強度直後の急激な強度低下域に差が生じているが、それは計測中に試験機の荷重を一定に保持できないことによる。

図-8に一定ひずみ繰り返し圧縮加力を行ったH-9-Rの平均の応力-ひずみ関係を示す。約-0.15%のひずみで8回の繰り返し加力を行い、約-1.25%で2回の繰り返し加力を行っている。圧縮強度直後の急激な強度低下域を除くと、繰り返し加力を行っても精度良く計測されている。

4.2 ローラーの支持の検証

対称面のローラー支持の状態は、厳密には図-4(b)中に示すように各素子の応答縦ひずみが異なるため平面性は崩れ、また3.3節で述べたように採用したローラーにも若干の摩擦がある。しかし、これらの要因が破壊状況や応力-ひずみ関係に影響を与えない範囲であれば、測定される応力分布は意味を持つことになる。ここでは標準供試体のものと比較して検証する。

(1) 対称面近傍の横ひずみ状況

図-9にコンクリートゲージによる円周方向の横ひずみ(ϵ_h)と縦ひずみ(ϵ_v)の挙動を平均の圧縮応力との関係で示す。ひずみは図-6中のそれぞれのゲージ2枚の平均値である。圧縮強度までは対称面供試体(白塗りの記号付き線)のひずみが多少生じにくい傾向が観られる。

図-10に変位計による横ひずみ(ϵ_h)と縦ひずみ(ϵ_v)の挙動を平均の圧縮応力との関係で示す。横ひずみは図-6中の横ひずみ用の2本の変位計の変形量の和を供試体の直径で除した値である。対称面近傍の破壊状況と変位計の測定位置の関係でバラツキが生じやすい量であるが、圧縮強度以降では、対称面供試体と標準供試体の傾向にはあまり差異は観られない。

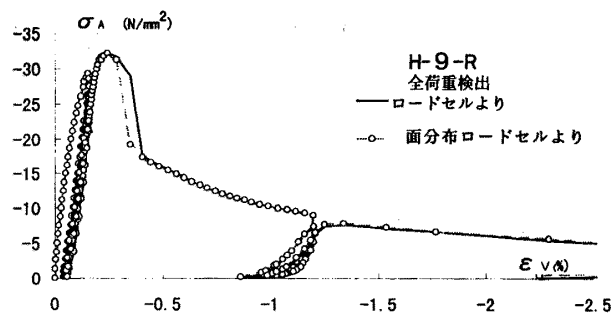


図-8 繰り返し加力による平均の応力-ひずみ関係

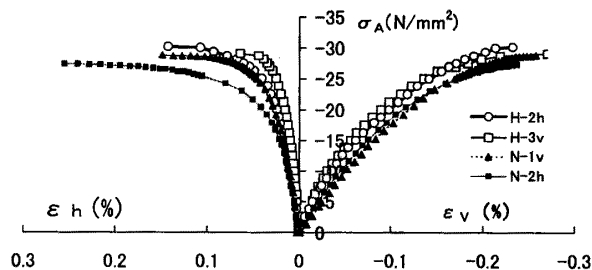


図-9 ゲージによる横ひずみと縦ひずみの挙動

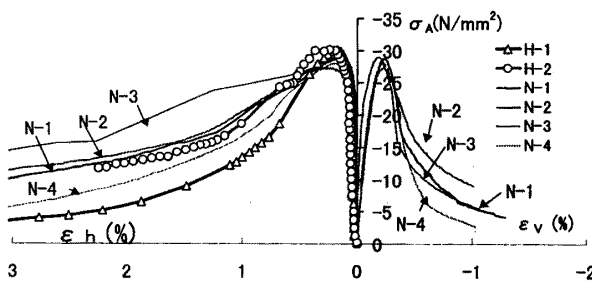
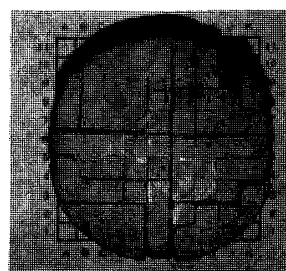


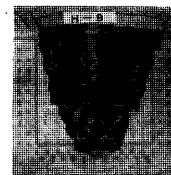
図-10 変位計による横ひずみと縦ひずみの挙動



(a) 対称面のひび割れ状況



(b) 標準供試体



(c) 対称面供試体

写真-1 試験後の破壊状況

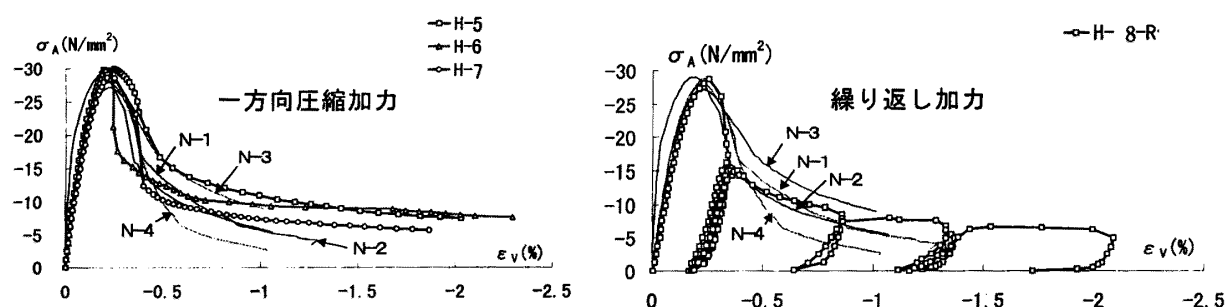


図-11 対称面供試体と標準供試体の平均の応力-ひずみ関係の比較

(2) 破壊状況

写真-1に対称面供試体の対称面のひび割れ状況と試験終了後の非破壊部分を示す。対称面のひび割れは、対称面で鉛直支持する角鋼(図-3(c))の間で生じる離れによるものである。ひび割れ幅にバラツキが観られるが、ひび割れは対称面全体に生じている。非破壊部分は、供試体の破壊部分をハンマーで軽打することにより除去して、残った部分である。標準供試体では、上下の加力面を底面とし中央高さ面(すなわち対称面)側を先端とする円錐形の非破壊部分が形成されている。対称面供試体も全て、上加力面を底面とし対称面側を先端とする円錐形の非破壊部分が形成され、標準供試体の上半分の破壊状況とほぼ同様であった。

(3) 平均の応力-ひずみ関係

図-11に対称面供試体と標準供試体の平均の応力-ひずみ関係を比較して示す。

一方向圧縮加力を行った場合と一定ひずみ繰返し加力を行った場合についてそれぞれ示している。平均の応力とひずみは4.1節のものと同じである。両方の応力-ひずみ関係とも、ひずみが約-1.0%までは対称面供試体と標準供試体には明確な差異は観られないが、それ以降で対称面供試体の方(記号付き線)がひずみの増加に伴う応力の低下の程度が標準供試体に比べて小さくなる傾向が観られる。そのようなひずみのレベルでは、写真-1(b)(c)で観られたように非破壊部分が主に直圧縮応力を負担する状況になる。標準供試体では上下の非破壊部分の先端部分で直圧縮力を伝達するため、わずか

なバランスの崩れでそれらの先端がずれやすくなり、安定した直圧縮力の伝達ができなくなるものと考えられる。これに対して、対称面供試体では非破壊部分の先端部分是对称面の面分布ロードセルと接するので、安定した直圧縮力の伝達ができるものと考えられる。

4.3 対称面の直圧縮応力分布

図-12にH-5の対称面の直圧縮応力分布を示す。(a)~(f)の分布は図-13中に①~⑤で示す時点のものである。直圧縮応力は各素子で検出される荷重を、素子上部の角鋼が対称面と接する面積で除して算出している。

初期応力時(圧縮強度の約1/3)の①では中心部分の応力が円周部分に較べて大きくなっているが、圧縮強度時の③の分布では、ある程度一様な分布になっている。その分布でも多少のバラツキが観られるが、その原因としては、対称面近傍のコンクリート内部で分散している粗骨材の影響が考えられる。圧縮強度以降の④と⑤の分布ではひずみの増加に伴って、円形断面の中心部分の応力が突出し、円周部分の応力が低下する傾向が顕著になっている。このほか、円周部分で局部的に応力が大きくなっている箇所がある。それらは図-3(b)中の素子配列記号図にドットで示す素子(A4,B2,D1など)の応力である。それらでは素子上部の角鋼と対称面の接する面積(図-3(b)中の黒塗り部分)が非常に小さいため、加力前の供試体の設置誤差や、ポアソン効果による対称面の膨張などの影響を大きく受けやすく、応力を算出する際には除す面積を修正する必要がある。(f)の分布は、前

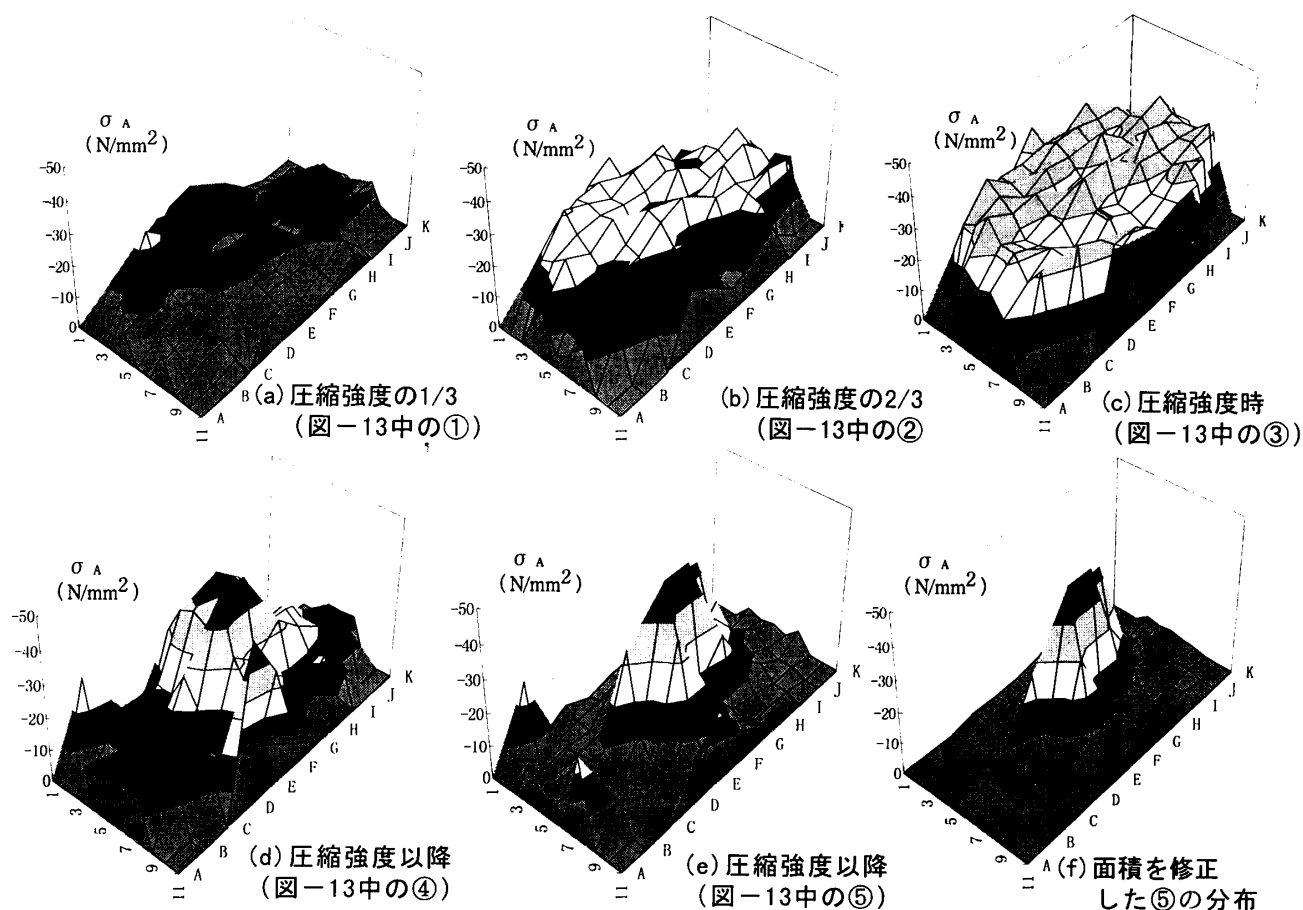


図-12 圧縮強度以降の対称面の直圧縮応力分布 (H-5)

述のドットの素子上部の角鋼が接する面積を約1.5～2倍にして修正した⑤の分布である。

4.4 対称面内の直圧縮応力-ひずみ関係

図-13にH-7の対称面内の6個の素子位置の直圧縮応力と平均のひずみ関係を、平均の応力-ひずみ関係(太線)と比較して示す。平均のひずみは4.1節のもと同じである。

円形断面の中心部のE7では圧縮強度以前から大きな応力が生じ測定終了時までほとんど強度低下は生じていない。その最大応力は圧縮強度の約2倍の値となっている。これらの傾向は断面中心部に近い位置ほど生じている。それに対し円形断面の円周に近い位置のF10では、平均の圧縮強度まで達していない。このような傾向は、他の対称面供試体でも観られた。

5. まとめ

- (1) 提案する測定方法を対称面供試体に適用することにより、標準のコンクリートシリン

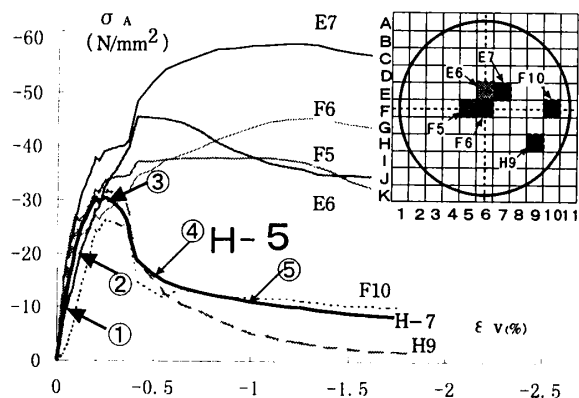


図-13 対称面内の応力-平均ひずみ関係

ダーの破壊性状や平均の応力-ひずみ関係とほぼ差異を生じさせることなく、コンクリートシリンダーの対称面の直圧縮応力分布を精度良く測定できた。

- (2) 圧縮強度以降、コンクリートシリンダーの中央高さ面の応力分布の一様性は大きく崩れ、平均の応力-ひずみ関係では説明できない部分が存在し、円形断面の中心部の最大応力は圧縮強度の約2倍になることも示した。