

論文 力学的対称性を利用するコンクリート柱の曲げ圧縮応力分布の測定実験

大迫 亘*1・塩屋 晋一*2・坂本 武文*3

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直圧縮応力分布を測定する方法を、高軸力とモーメントを受ける正方形断面のコンクリート柱に適用し、その柱のコンクリートの曲げ圧縮応力分布を測定して、その特徴を明らかにしている。部材のモーメントが最大になる曲げ終局時以降では、これまで認識されている曲げ圧縮応力分布とかなり異なり、柱断面の周辺部分に較べて、断面内部の最大応力が大きくなり、柱断面の中心に近い部分では、コンクリートシリンダーの圧縮強度の約 3.2 倍に達する部分も存在することが明らかになった。

キーワード: 曲げ特性, コンクリート, 応力-ひずみ関係, 応力分布, 鉄筋コンクリート

1. はじめに

鉄筋コンクリート造部材の曲げ特性を評価する場合、コンクリートの圧縮特性と平面保持の仮定を用いる曲げ解析がよく行われる。そこでは柱断面内のコンクリートの圧縮特性は同一として、中心圧縮実験の結果に基づいた応力-ひずみ関係が仮定される。しかし、高軸力を受ける柱では、曲げ圧縮域のコンクリートの特性が部材の特性に大きく影響を与え、中心圧縮の平均の応力-ひずみ関係を用いると曲げ耐力や曲げ変形を過小評価することが多く報告されている¹⁾。

研究代表者は、力学的対称性を利用したコンクリート内部の圧縮応力分布を詳細に測定する方法を提案し、一軸圧縮力を受けるコンクリートシリンダーで、その方法の妥当性を検証し、その内部の圧縮応力分布を測定している²⁾。ここでは、圧縮強度以降、内部の応力分布が不均一となり、平均の応力-ひずみ関係では全く説明できない部分が存在することを報告している。曲げ圧縮域においても、同様に、中心圧縮実験に基づく平均の応力-ひずみ関係を用いる曲げ解析では説明できない応力分布になってい

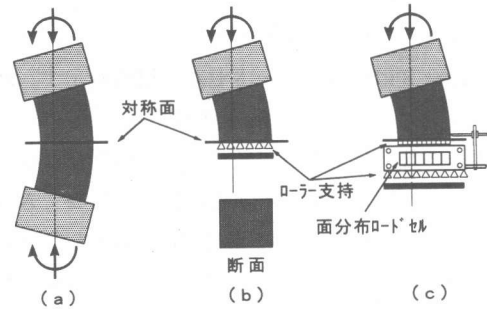


図-1 対称面の直圧縮応力分布の測定原理

る可能性がある。

本研究では、コンクリート系部材内部の曲げ圧縮域の応力分布を明らかにすることを目的とし、まず一定軸力を受ける正方形断面のコンクリート柱の曲げ圧縮域の圧縮応力分布の測定実験を行った。本論文では、その実験方法と測定されたモーメント-曲率関係及び曲げ圧縮応力分布の特徴について述べる。

2. 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

*1 鹿児島大学大学院 理工学研究科建築学専攻 (正会員)

*2 鹿児島大学助教授 工学部建築学科 工博(正会員)

*3 安藤建設

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。一軸圧縮力とモーメントを受ける柱の場合には、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)のように対称面より上半分高さの柱部分を、対称面で鉛直変位が生じないようにローラー支持して、その面の直圧縮反力分布を測定すると、反力と内力の釣り合いより内力の分布を測定していることになる。すなわち、その内力の応力分布は、図-1(a)の柱の対称面のものに等しいことになる。実験では、昨年開発した面分布ロードセルを図-1(c)のようにセットして加力を行っている。

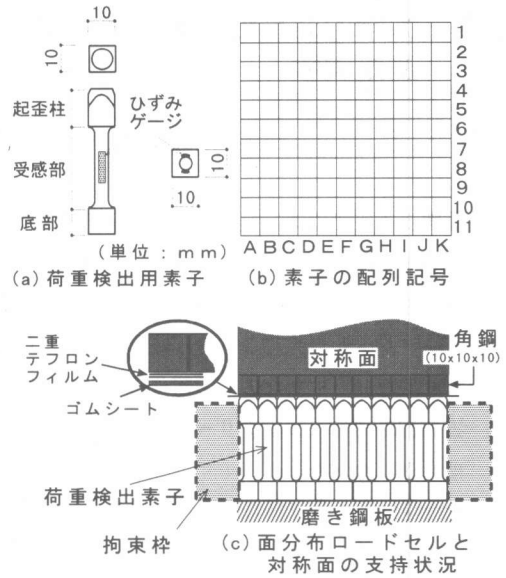


図-2 面分布ロードセルと荷重検出素子配列状況

3. 実験計画

3.1 面分布ロードセル

図-2に面分布ロードセルの概略を示す。図-2(a)中に示すような荷重検出用素子(以後、素子と称す)を鋼材で製作し、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。そして121個の素子を磨き鋼板の上に図-2(b)のように11行11列のます目状に並べている。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ひずみの積として検出している。対称面のローラー支持については、図-2(c)中に示す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フィルム(0.05mm)およびゴムシート(0.5mm)をセットし、これらの中で対称面の横変形を拘束しないようにしている。詳細については文献2)を参照されたい。ただし、ゴムシートを挿入する方法は今回改良されたものである。

3.2 試験体

曲げ圧縮応力分布を測定するためには、図-1(c)に示したように対称面より上半分の形状のものとなる。図-3に試験体の形状と寸法を示す。濃く塗った部分が試験部分で、薄く塗った部分は加力板に固定するためのスタブ部分で角形鋼管で補強している。表-1にコンクリー

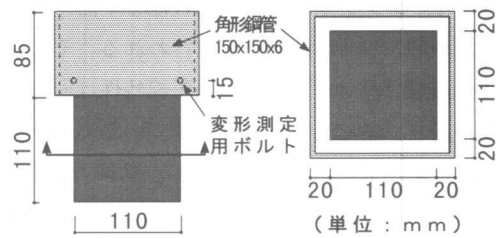


図-3 試験体の形状と寸法

表-1 コンクリートの力学的特性

E_C (GPa)	$c \sigma_B$ (MPa)	$c \epsilon_B$ (%)
18.4	15.1	0.152

E_C : ヤング係数, $c \sigma_B$ 圧縮強度,
 $c \epsilon_B$ 圧縮強度時の破壊ひずみ

トの力学的特性を示す。

コンクリート強度 $c \sigma_B$ は面分布ロードセルの素子の容量との関係で 15.1MPa と低いものになっている。

3.3 実験変数と加力

実験を行った試験体は 4 体で、一定軸力とモーメントを加力する試験体が 3 体、中心圧縮力だけを加力する試験体が 1 体である。一定軸力の軸力比 η は 0.3, 0.45, 0.8 の 3 種類である。加力については、軸力を導入した後、モーメントを一方方向に単調載荷する形式で行っている。

3. 4 加力装置

図-4に加力装置を示す。200ton 耐圧試験機の試験区間内に加力装置を設置している。図-1(b)の支持条件になるように、柱頭側を球座でピン支持し、面分布ロードセルの下部の支持台の下端面を水平ローラー支持し、その間に試験体をセットしている。しかし、対称面と面分布ロードセルの間には、3.1節で述べたようにゴムシートとテフロンフィルムを挿入しているため、その層でも水平変位が生じる可能性がある。対称面と面分布ロードセルにズレが生じると応力分布が正確に測定できなくなる。これを防止するため、対称面の水平移動に連動して面分布ロードセルも水平移動するように、面分布ロードセルと固定された支持台からアームを伸ばしてボルト先端(図-4のボルトA)を試験体の曲げ引張縁に接触させている。

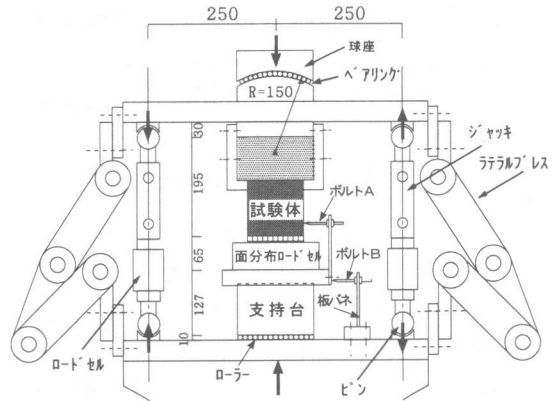


図-4 加力装置

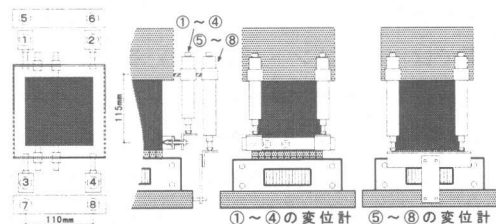


図-5 変形の測定方法

このほか、予備実験で、高軸力比の $\eta = 0.8$ の試験体では最大モーメント以降、急激に回転変形が生じて測定が不可能となった。このため、 $\eta = 0.8$ の試験体では図-4中に示すように支持台に対して下方の加力板から片持ち形式の板バネをボルト(図-4のボルトB)でピン接合できるようにして、最大モーメント以降、面分布ロードセルの支持台の水平移動を拘束することにより、回転変形の進行を緩和して剛性試験の形式で計測を行った。その拘束する水平力は、板バネにひずみゲージを貼付して検出した。

4. 実験結果

4. 1 モーメントの算出方法と精度

測定データから、試験体に加力されているモーメントを、2種類の方法で算出できる。

ひとつは、図-4の曲げ加力用のジャッキの圧縮力と引張力の偶力として算出できる。この方法では、柱頭側をピン支持する球座の摩擦や、水平ローラーの摩擦によるモーメントを含むことになる。ただし、 $\eta = 0.8$ の試験体では、ボルトBにより拘束されるモーメントを差し引くことになる。もうひとつは、面分布ロードセル

より測定される応力分布を基に、それが球座の回転中心まわりになすモーメントとして算出できる。この方法では前述の摩擦の影響を受けないので、試験体に直接生じる曲げモーメントを算出することになる。ただし、モーメントを算出する際に、曲げ加力に伴う対称面の水平移動距離を、球座の回転中心回りの距離に加算する必要があるが、今回は、その水平移動距離を測定しなかったために無視した。

図-6に試験体に作用する圧縮合力と面分布ロードセルより検出される圧縮合力の挙動を測定ステップとの関係で示す。試験体に作用している圧縮合力は、耐圧試験機の圧縮力と曲げ加力用のジャッキの圧縮力と引張力の合力として算出している。最大モーメントの時のステップを▼の記号で示す。面分布ロードセルによる圧縮合力の誤差範囲は、最大モーメントまでは、軸力比 $\eta = 0.3$ の試験体で約4%内で、 $\eta = 0.45$ と $\eta = 0.8$ の試験体で約2~3%内で、精度良く測定されている。このことから、面分布ロードセルから算出されるモーメントも精度がよいものと推察される。

図-7に軸力比 η が0.30, 0.45の試験体のモーメント-曲率関係(M- ϕ 関係)を示す。モーメントについては、白塗りの記号のものは面分布ロードセルによるモーメントを用いて、黒塗りの記号のものはジャッキの偶力によるモーメントを用いている。曲率については面分布ロードセルの支持台上端と柱頭スタブ間での変形量(図-5の⑤~⑧の変位計)を基に算出している。初期の軸力導入時に曲率が生じているが、これはゴムシートとテフロンフィルムの変形の影響を受けているものと考えられる。また、この軸力導入時に面分布ロードセルによるM- ϕ 関係では、モーメントが生じている。 η が0.3の試験体では加力方向に対して負のモーメントが生じ、 η が0.45の試験体では正のモーメントが生じている。この原因としては、耐圧試験機に対して加力装置や試験体を設置する際に生じるそれぞれの中心位置の不一致、またはコンクリート材料の内部の不均一性などによる、軸力用の加力中心と試験体の柱断面図心のズレによるものと考えられる。そこで、軸力導入時に生じるそのモーメントをジャッキによるモーメントに加算して修正したものを点線で示す。この点線のもの、面分布ロードセルのM- ϕ 関係より多少大きくなっている。これは前述した球座やローラーの摩擦の影響と考えられる。以上のことから、面分布ロードセルにより算出されるモーメントは試験体に作用しているモーメントにかなり近いものと考えられる。

4.2 曲げ圧縮応力分布

図-9に軸力比 η が0.3の試験体の曲げ圧縮応力分布を示す。示した分布は図-7(a)中に示す各時点のものである。A列(A1~A11)が曲げ圧縮縁で、K列(K1~K11)が曲げ引張縁である。各応力分布は図-8に示す3種類の方向から観たものである。

①の分布は、最大モーメントMmaxの約30%のモーメント時のもので、曲げ引張縁のK列の応力がほぼ零の時のものである。軸力導入後、モーメントの加力により曲げ引張縁のK列の応

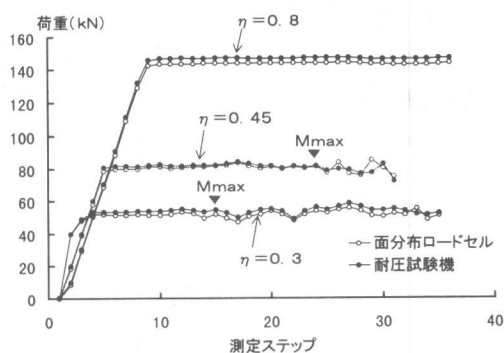
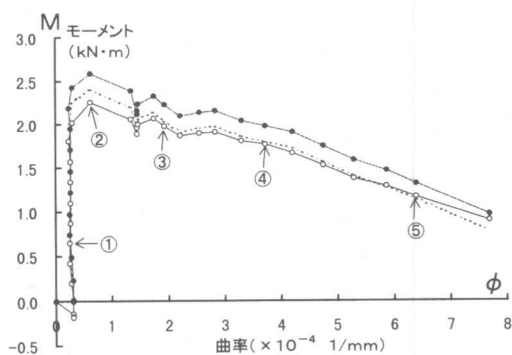
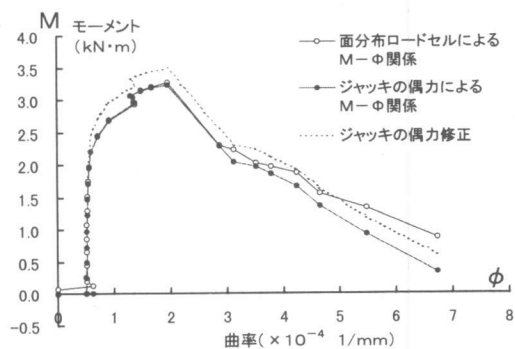


図-6 圧縮力の挙動



(a) $\eta = 0.3$



(b) $\eta = 0.45$

図-7 モーメント-曲率関係

力が圧縮から引張に転じる時のものである。この時のモーメントは、弾性は理論により求められる曲げ引張り縁の応力が零になる時のモーメントと、ほぼ一致した。図-9 b方向において曲げ圧縮縁側で、柱幅方向の中央部(4列~8列)が両端(1列, 2列, 10列, 11列)のものに比べ大きくなっている。

②の分布は、最大モーメント時のものである。中央部が両端に対して大きくなる傾向がより顕

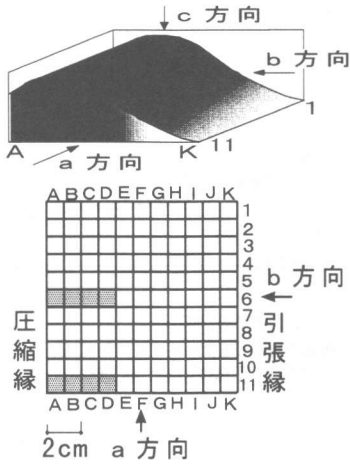


図-8 圧縮応力分布の視線方向

著になり、その中央部の応力はシリンドーの平均圧縮強度 $\sigma_B (=15.1 \text{ MPa})$ を上回っている。

③の分布は、最大モーメント以降のもので、応力は曲げ圧縮縁のA列とB列で減少し、C列で増加している。この時、曲げ圧縮縁で柱せい方向に約2cmほど、コンクリートの圧縮破壊が生じており、この破壊状況とその応力分布は対応していた。

④の分布は、最大モーメント以降のもので、 M_{\max} の約75%の時のものである。それでも中央部のC5~C7が大きく、その値は、 σ_B の約2.3倍になっている。

⑤の分布は最大の圧縮応力が検出されたときのもので、 M_{\max} の約50%の時のものである。圧縮応力はD6で最大となり、その値は、 σ_B の約3.2倍になっている。

図-10に中心圧縮された試験体の圧縮応力分布を示す。図-11にその試験体の平均の応力-ひずみ関係を示す。図-10の分布は、図-11の番号の時点のものである。

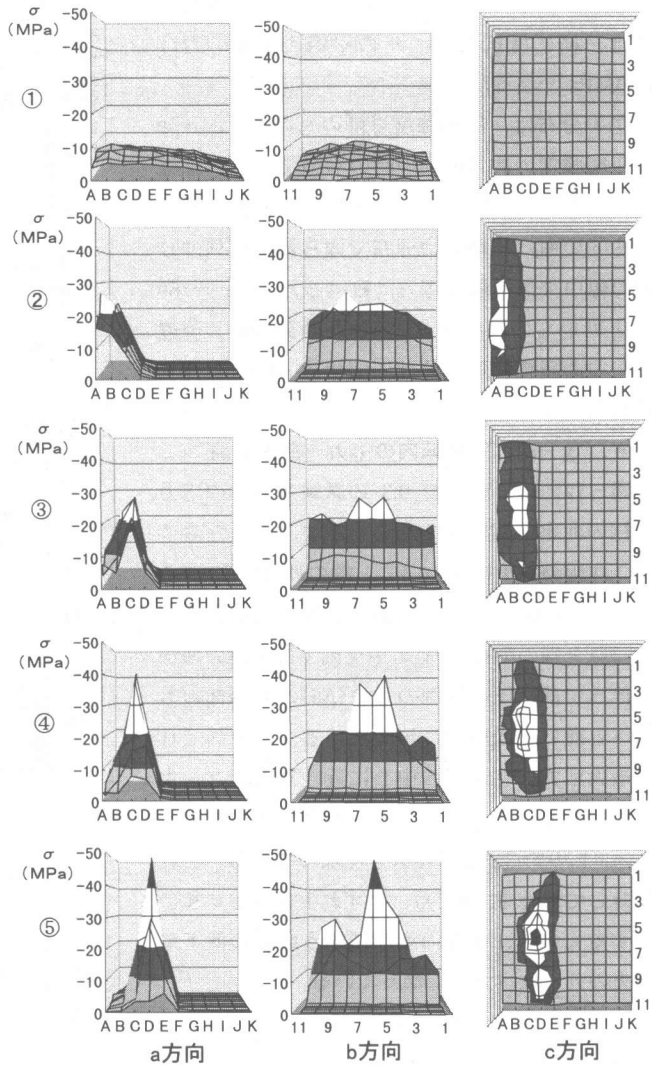


図-9 対称面の曲げ圧縮応力分布 ($\eta=0.3$)

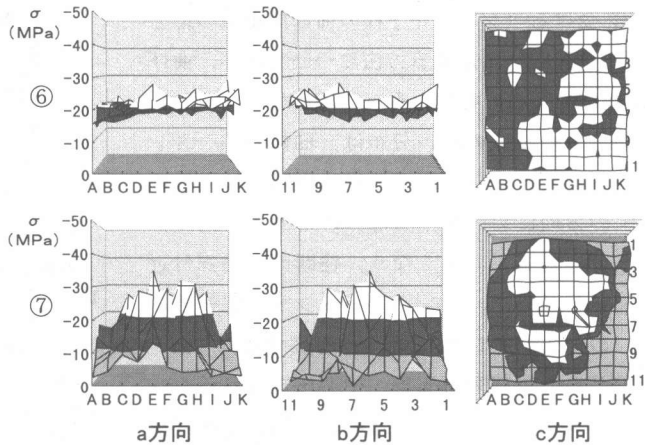


図-10 中心圧縮された試験体の圧縮応力分布

⑥の分布は、圧縮強度時のもので、全断面がほぼ一様に抵抗して、その平均の圧縮応力は18.6MPaとなった。

⑦の分布は、圧縮強度以降のもので、 $c \sigma B$ の圧縮強度の約70%の時のものである。圧縮応力は中央部で大きくなっているが、図-9の④や⑤の曲げ圧縮応力分布で観られたC列やD列の幅中央部の最大応力に較べると50%~60%と低いものになっており、柱断面の同じ位置でも中心圧縮状態と曲げ圧縮状態では応力性状が異なっている。

4. 3 曲げ圧縮域内の応力-曲率関係

図-12に軸力比 η が0.3の試験体内部の応力-柱の曲率の関係をそれぞれ示す。示した素子は、柱幅の中央の列(6列)と端の列(11列)の曲げ圧縮域の素子のものである。柱幅の中央の列(6列)と端の列(11列)の中央列では曲率の増加に伴って曲げ圧縮縁側のもの(A6)から内部のものへと順に最大応力に達しているが、それぞれの最大応力は柱断面の中心に近いものほど、大きくなっている。D6では4.2節で述べたように $c \sigma B$ の約3.2倍まで大きくなっている。これに対して端の11列では、いずれもほぼ $c \sigma B$ に達するものの、曲率の増加に伴う応力の低下が中央の列に較べ大きくなっている。

5. まとめ

力学的対称性を利用して、高軸力とモーメントを受けるコンクリート柱の曲げ圧縮域の応力分布を詳細に測定する方法について述べ、曲げ圧縮応力分布の特徴を明らかにした。

- (1) 曲げ圧縮域の応力分布は、部材のモーメントが最大になる曲げ終局時以降では、柱幅の方向において中央部分の応力が、両端部分に対して大きくなり、柱断面中央部付近においては、コンクリートシリンダー強度の約3.2倍に達する部分も存在する。
- (2) これらの応力分布は、中心圧縮されるコンクリートの平均の圧縮特性を用いる曲げ解析では説明できない。

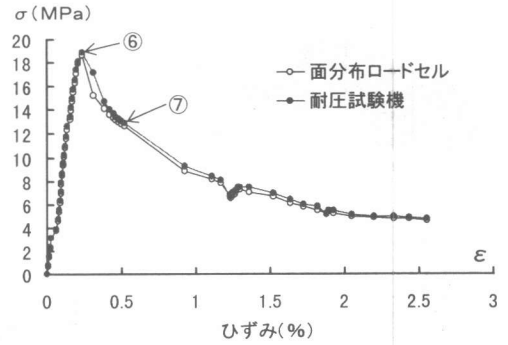
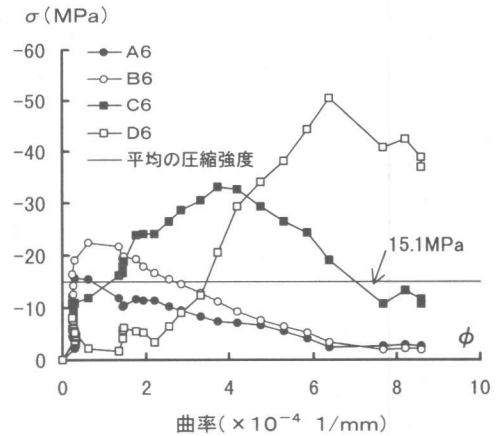
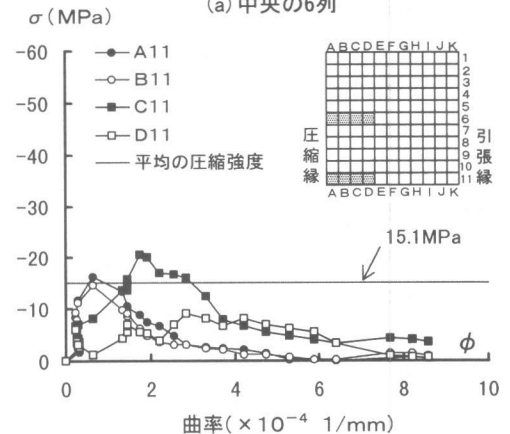


図-11 平均の圧縮応力-ひずみ関係 (中心圧縮された試験体)



(a) 中央の6列



(b) 端の11列

図-12 応力-曲率の関係

参考文献

- 1) 例えば、渡辺史夫・西山峰広・六車 照：超高強度コンクリートを用いたRC柱の曲げ強度と靱性，日本建築学会構造系論文報告集，No.446，pp.99-106(1993)
- 2) 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，pp.583-588(1999)