

# 論文 三次元拘束によるコンクリートの力学的特性の改善に関する研究

角 広幸\*1・米倉亜州夫\*2・田澤榮一\*3・周 平\*4

要旨：阪神大震災では、多くのコンクリート構造物が瞬時に破壊されたが、本研究ではコンクリートの圧縮耐力と変形能力を増大させて靱性の大きい地震に強い複合材料の開発を目指し、CFRP パイプまたは鋼管内に打設したコンクリートの図心位置にシースを配置しておき、その中に静的破砕材と称されている膨張材を注入し、ケミカルプレストレスを導入し、中心軸圧縮試験を行った。その結果、拘束係数はケミカルプレストレスにより大きくなり、拘束されたコンクリートの見かけの1軸圧縮強度が向上することが明らかとなった。

キーワード：三次元拘束、静的破砕材、ケミカルプレストレス、拘束係数

## 1. はじめに

コンクリートは横方向の広がりを拘束されると、強度及び靱性が向上し、地震に強い構造とすることができる。このようなコンクリートは、コンフ

表-1 CFRP パイプの材料特性

繊維の方向 及び 積層方法	厚み (mm)	軸方向			周方向		
		引張強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)	ポアソン 比	引張強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)	ポアソン 比
10°/90°	1.75	586	74.6	0.105	692	61.7	0.171

ァインドコンクリートと呼ばれ国内外で古くから多くの研究がなされている。コンファインドコンクリートに関する研究は、供試体に機械的に側圧をかけていく能動的な拘束と円形鋼管等の拘束体により横方向の広がりを拘束する受動的な拘束の2つに大別でき

表-2 鋼管の引張試験結果

厚み (mm)	引張強度 (MPa)	降伏強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)	ポアソン 比
5.5	424	247	199	0.27

る。前者は、機械的に側圧をかけるほど、強度が向上するという材料科学的興味に端を発したもので、実際の構造物への応用は困難であり、後者は、実構造物への応用が可能であるが、コンファインド効果はある程度の軸圧縮応力がかからないと発揮されない[1]。そこで本研究では実構造物への応用を目指して載荷前より三軸圧縮応力が生じるようにすることを第一目的とし、後者のタイプの供試体に静的破砕材を用いてコンクリートにケミカルプレストレスを導入し、能動的な側圧を与えて中心軸圧縮試験を行った。このようなコンクリート柱のコンファインド効果、圧縮挙動、圧縮強度を把握することを第二の目的とした。このようなコンクリート柱は三軸方向のプレストレスによって見掛け上の引張強度が増大するため、せん断やねじり耐力も増大する。また、比較のため、ケミカルプレストレスを導入しない普通コンクリート充填柱の場合についても検討を行った。

\*1 広島大学大学院 工学研究科構造工学専攻(正会員)

\*2 広島大学教授 工学部第四類(建設系), 工博(正会員)

\*3 広島大学教授 工学部第四類(建設系), 工博(正会員)

\*4 広島大学大学院 工学研究科構造工学専攻, 工修(正会員)

## 2. 実験概要

### 2.1. 膨張圧試験

#### (1) 使用材料

##### ・鋼管及び CFRP パイプ

拘束体に用いる CFRP パイプは、外径(D)153.5mm 及び 157mm、厚さ(t)1.75mm 及び 3.5mm の 2 種類(D/t=87.7, 44.9)で、鋼管は外径(D)165mm、厚さ(t)5.5mm の 1 種類(D/t=27.5)でそれぞれ長さ 600mm のものを使用した。CFRP パイプの積層方法は、パイプの軸方向と繊維方向のなす角度が

10° 及び 90° の 2 方向で内側から 10° → 90° の順に交互に 2 層(1.75mm)または 4 層(3.5mm)に巻いてある。CFRP パイプの材料特性を表-1 に、鋼管の引張試験結果を表-2 に示す。

##### ・静的破砕剤

静的破砕材(以下破砕材)は、春用のものを用いた。破砕材の配合は、製品に明記されている配合に従い、W/B(水/静的破砕材比)=30%とした。

・コンクリート コンクリートは、セメントに早強ポルトランドセメントを用い、最大寸法 20mm の粗骨材を使用し、配合は W/C=30%、45%及び 65%の 3 配合とした。

・シース 破砕材を充填する空間を作るためにφ 20mm のシースを用いた。

・アスファルト 膨張圧試験後、中心軸圧縮試験を行うがその際に拘束体とコンクリートの付着力を意図的に切る目的でアスファルトを使用した[1]。

#### (2) 供試体

膨張圧試験に用いる供試体は、拘束体内面にアスファルトを膜状に塗布し、これを専用の打ち込み台に固定した状態でコンクリートを何層にも分けながら打ち込み、つき棒及び振動機にて十分締め固めた。その際、断面中心部にシースを用いて後に静的破砕材を充填する空間を作っておいた(図-1)。養生は、20℃、95±5%R.H. の環境にて行った。

#### (3) 静的破砕材の充填及び測定方法

供試体は軸方向に拘束されていないため、本実験では、専用の型枠を使用し軸方向を拘束した。破砕材の充填方法は、コンクリートの材齢 7 日で供試体を拘束型枠に固定し、破砕材を充填し、すぐにフタをして拘束した(図-1)。その際、破砕材の膨張圧を直接測るために、内径がシースとほぼ同径の鋼管にも静的破砕材を充填し、同様に上下を拘束した。供試体を拘束した時点(材齢 7 日)から、2 軸のひずみゲージ及びひずみ測定器を用いて測定を開始した。測定は 1 時間毎とした。測定期間中の環境は、20±2℃、50±5%R.H. である。

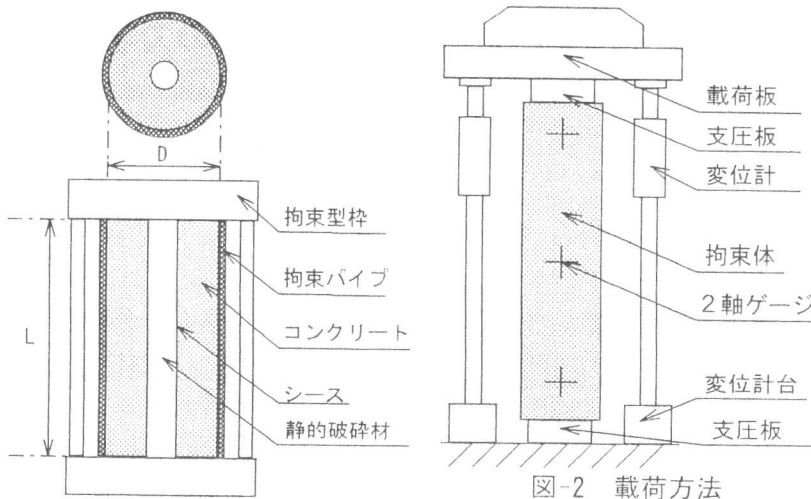


図-1 供試体断面及び膨張圧試験法

図-2 載荷方法

(ex.)

3.5 F 45 - 51 - 5.0				
拘束体の厚み (mm)	拘束体の種類 F: CFRP パイプ S: 鋼管	W/C	中心軸圧縮試験時のΦ10×20cm円柱供試体のコンクリートの圧縮強度 (MPa)	破砕剤の膨張によるケミカルプレストレス (MPa)

図-3 供試体の略称

## 2.2. 中心軸圧縮試験

### (1) 供試体及び荷重方法

膨張圧試験の測定開始(材齢7日)から10日後に測定を終了し、直ちに拘束型枠を脱型し、コンクリートの材齢17日で中心軸圧縮試験を行った。荷重方法は、図-2に示すように、上端、下端ともに十分剛な支圧板を介して拘束体内部のコンクリートのみを圧縮し、荷重速度は、0.2~0.3MPa/secとした。

### 3. 実験結果及び考察

本実験に用いた供試体の略称を図-3に示す。

#### 3.1. 膨張圧試験

##### (1) 膨張圧の算出及び膨張特性

拘束体(外管)に破砕材スラリーを充填すると、膨張圧は鋼管に内圧として作用する。破砕材の膨張圧は、拘束体外周面に貼付したゲージによりひずみを測定し、厚肉円筒理論を用いて次式で計算できる。

$$p = \frac{E(k^2 - 1)}{2(1 - \nu_z \nu_\theta)} (\varepsilon_\theta + \nu_z \varepsilon_z) \quad (1)$$

ここに、 $E$ : 拘束体の弾性係数

$\nu_\theta$ : 拘束体の周方向のポアソン比

$\nu_z$ : 拘束体の軸方向のポアソン比

$k$ : 拘束体の外内径比(外径/内径)

$\varepsilon_\theta$ : 拘束体の周方向ひずみ

$\varepsilon_z$ : 拘束体の軸方向ひずみ

式(1)を用いてシーブと同径の破砕材のみを充填した膨張圧試験結果から膨張圧を計算すると10日で60MPaもの膨張圧を生じていた。しかし、図-1に示すように本実験の供試体の場合、供試体図心位置の破砕材の膨張圧はコンクリートを介して、拘束体に伝わるので、拘束体面における膨張圧は、拘束体に貼り付けた2軸ひずみゲージのひずみに基づいて(1)より求めた。その値は、シーブと同径の鋼管内に注入した破砕材により生じた

膨張圧の1/10程度となった。これをコンクリートが受けるケミカルプレストレスとした。図-4は、拘束率を変化させ内圧の経時変化を調べたものである。図-5は、全供試体の測定終了時の内圧と破砕材充填時のコンクリートの圧縮強度との関係を示している。拘束率が高くなると、あるいは圧縮強度が高くなると内圧が大きくなる傾向がみられるが、実験の範囲内ではあまり大きな差は認められなかった。また、コンクリートに導入された最終的なケミカルプレストレスは、測定終了時の内圧とした。

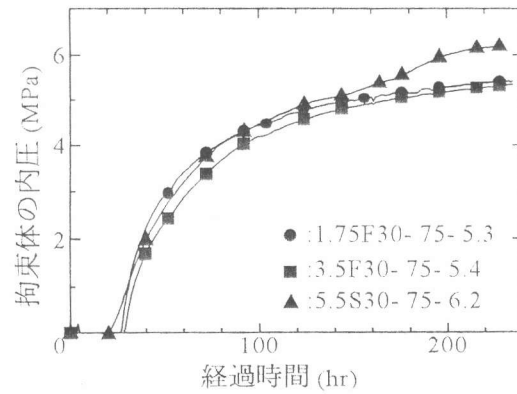


図-4 内圧の経時変化

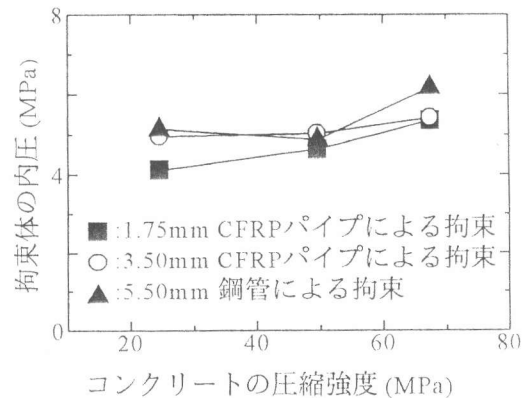


図-5 測定終了時の膨張圧

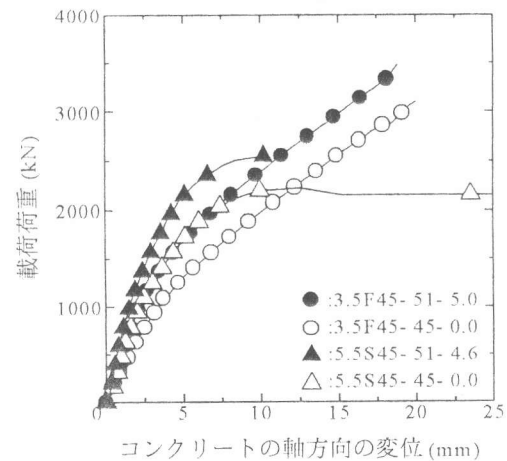


図-6 荷重-変位関係

## (2)ひびわれ性状

膨張圧試験終了後、拘束型枠を外してみると全ての供試体でコンクリートの上面と下面に円を3等分するような放射状のひびわれが観察された。また、荷重を行わないで拘束体を除去して内部コンクリートを観察するとひびわれが円筒の中心軸を含む縦断面に生じていたので、それは破砕材の膨張による周方向の引張応力に誘起されたことがうかがえる。

### 3.2.中心軸圧縮試験

#### (1)変形性状及び圧縮耐力

図-6 にコンクリートと拘束体の合成柱としての荷重-変位関係の代表例を示す。図上には、比較のため破砕材を充填していない供試体の結果もプロットした。図上黒印の記号が破砕材を充填した供試体である。以後、主に図-6 に示すこれら4つの供試体について考察する。最大変位には大きな差は見られないが破砕材を充填することにより、初期剛性が向上する結果となった。この結果は、破砕材を充填した全供試体で確認された。それは、破砕材を充填した供試体では、膨張圧によってコンクリートと拘束体の付着が高められ、圧縮荷重時に拘束体の軸方向の圧縮分担荷重が破砕材を充填しない供試体の場合より大きくなった(図-10 を参照)。一方、拘束体にCFRPパイプを用いた供試体の初期剛性は、破砕材を充填した場合または破砕材を充填しない場合、いずれも鋼管を拘束体に用いた供試体の初期剛性より小さくなっている。これはCFRPパイプの拘束度及び軸方向の弾性係数が鋼管の場合より小さいためである。合成柱としての圧縮耐力についてもコンクリート強度に若干違いがあるが破砕材を充填することで向上傾向にあった。

コンクリート強度に違いがあるのは、破砕材を充填した供試体とそうでないものとの試験材齢が異なるためで、一軸圧縮強度を考慮して最大荷重について考察を行うことにする。図-7 に中心軸圧縮試験を行った全供試体の最大荷重と一軸圧縮強度の関係を示す。拘束体の種類により破砕材を充填する効果が現れるものと現れないものがあり、これを(3)、(4)で考察することにする。

#### (2)破壊性状

破壊は、破砕材を充填しない供試体と同様に鋼管の降伏あるいはCFRPパイプの周方向の繊維の破断によっておこる。破壊については、文献[1]で述べたので省略する。

#### (3)拘束体のひずみと応力

供試体の高さ中央断面で測定された拘束体の2点の軸方向及び周方向ひずみの平均値を中央断面のひずみ( $\epsilon_z$ ,  $\epsilon_\theta$ )とした。荷重されるまでに破砕剤の膨張により生じたひずみを含めた荷重-ひずみ関係を図-8 に示す。図-8 に示すように、同一荷重において、破砕材を充填しないものと充填した供試体では、CFRPパイプの軸方向の圧縮弾性係数が鋼管のより小さいため、CFRPパイプの軸方向の初期ひずみは鋼管の場合より大きくなっている。一方、破砕材を充填した供試体に対して、CFRPパイプの厚み及び周方向の弾性係数が鋼管の場合より小さいため、同一荷重において、CFRPパイプの初期周方向ひずみは鋼管の場合より大きくなっている。さらにこれらのひずみに対し、鋼管はMisesの降伏条件とPrandtl-Reussの流れ則を用い、CFRPは異方性材料とし弾性理論を用いて、それぞれ平面応力状態と仮定して拘束体の軸方向及び周方向応力( $\sigma_z$ ,  $\sigma_\theta$ )を求めた。鋼管の場合、降伏点を越えると、応力の値はほとんど増大しない。荷重前に生じて

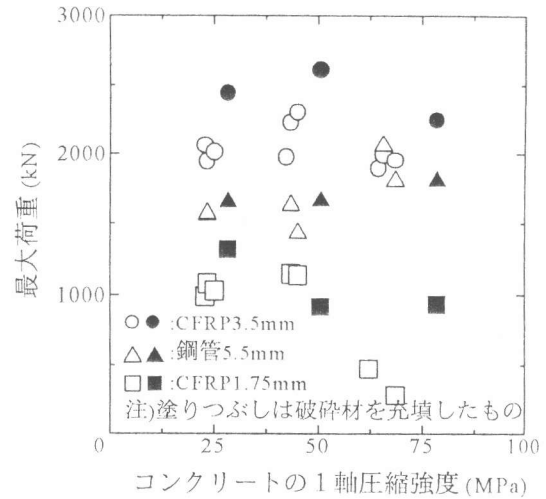


図-7 最大荷重に及ぼす破砕材の影響

いた応力を含めた荷重-応力関係を図-9 に示す。図-8 及び 9 は、周方向と軸方向のスケールが違うことに注意して欲しい。これらの図の軸方向の挙動に着目すると破砕材を充填した場合、荷重初期から軸ひずみが急激に増えだす。これは、破砕材の膨張によりコンクリートと拘束体との付着が高められ、荷重初期の荷重の一部を拘束体が受け持ったためと考えられる。図-6 において破砕材を充填した供試体の初期剛性が向上していたのはこれに起因すると思われる。

また、図-7、8 上の鋼管を拘束体に用いた供試体の応力経路を図-10 に示す。破砕材を充填した供試体と充填していない供試体は、異なった応力経路で降伏曲面に達している。また、図から明らかなように破砕材を充填した供試体の拘束体は膨張圧により、荷重による応力を受ける前に周方向の降伏強度の約 25% をケミカルプレストレスを発生させるために受け持っていることになる。つまり荷重により生じる内圧を鋼管が負担できる能力は小さくなってしまふ。しかし、ケミカルプレストレスによりコンクリートが強められていれば決してマイナスの効果ではないのでこれについて(4)で考察する。

#### (4)コンクリートの応力

(3)のところで求めた軸応力( $\sigma_z$ )から荷重以前に生じていた軸応力( $\sigma_{z0}$ )を差し引いたものに拘束体の断面積を乗じたものを、荷重履歴において拘束体の分担した荷重とする。次に荷重荷重からそれを差し引いたものをコンクリートの分担した荷重とし、これをコンクリートの断面積で除したものを供試体中央断面のコンクリートの軸応力( $\sigma_c$ )と定義する[1]。

また、一般に拘束されたコンクリートの最大応力( $\sigma_{c \max}$ )は、一軸圧縮強度( $f'_c$ )、拘束係数( $k$ )及び側圧( $\sigma_r$ )を用いて簡便な次式で表現される。

$$\sigma_{c \max} = f'_c + k\sigma_r \quad (2)$$

式(2)としたときの拘束係数( $k$ )について考察する。ここで問題となるのが破砕材を充填した柱供試体のコンクリートの一軸圧縮強度( $f'_c$ )である。実際の 1 軸圧縮強度は拘束の程度によってコンクリートの緻密化の程度が異なってくるので、把握しづらい。従って、便宜上鋼管または CFRP パイプに打設した無拘束の普通コンクリートの一軸圧縮強度を用いることにする。また側圧( $\sigma_r$ )は、拘束体の周方向応力( $\sigma_r$ )を用いて式(3)により求められる。

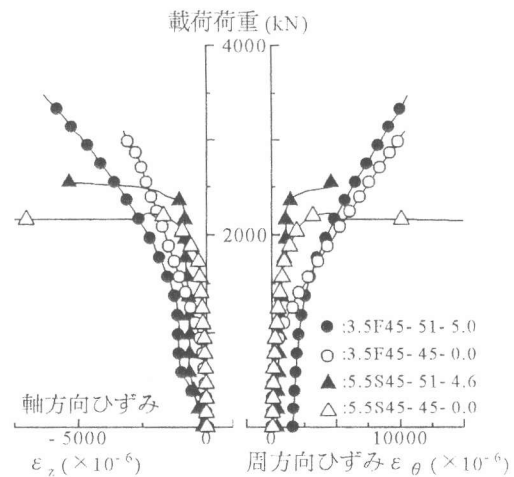


図-8 荷重-拘束体のひずみ

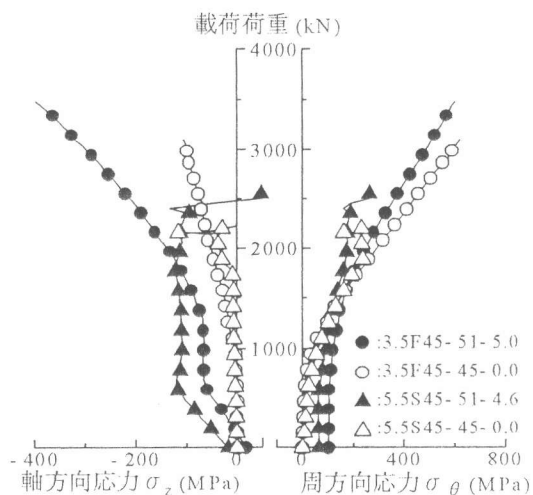


図-9 荷重-拘束体の応力

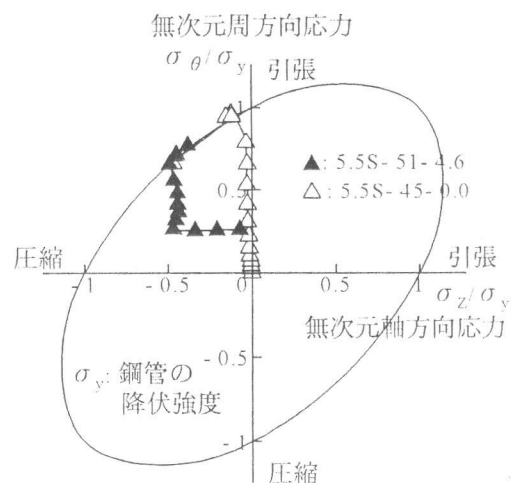


図-10 鋼管の応力経路

$$\sigma_r = 2t\sigma_{\theta}/D \quad (3)$$

ここに、 $D$ :拘束体の内径、 $t$ :拘束体の厚み

鋼管の周方向応力及び CFRP の周方向応力は、コンクリートの最大応力時の値からそれぞれ荷重までに生じていた周方向応力( $\sigma_{\theta 0}$ )を差し引いて式(3)により荷重により生じた側圧を計算した。破砕材を充填していない供試体の場合は、 $\sigma_r$ を0とした。上記の条件で解析したコンクリートの最大応力-側圧関係を縦軸、横軸ともに一軸圧縮強度で除して無次元化し、図-11に示す。図より破砕材を充填した拘束コンクリートの拘束係数( $k$ )が向上していることが分かる。厳密に言えば、破砕材を充填したコンクリートもしないコンクリートも拘束体は同じであるので拘束係数が大きく変化することは疑問である。この原因は、ケミカルプレストレスによりコンクリートが緻密となることと三軸方向により拘束コンクリートの見掛け上の一軸圧縮強度が向上したために起こったと予想される。しかし、破砕材を充填した供試体の場合、膨張を拘束するために拘束体の強度の一部が荷重前に膨張拘束のために使われており、荷重により生じる内圧に耐える能力は拘束体の残存強度になるため、柱の耐力は拘束により強化されたコンクリートの強度と拘束体の残存強度との兼ね合いで決まる。

図-12 に図-6 に示した供試体の内部コンクリートの応力-ひずみ関係を示す。破砕材を充填したものと充填しないものとのコンクリートのみの最大応力はほぼ同じになっている。これは、上述のように、破砕材の充填によるコンクリートの一軸圧縮強度向上の効果とそれによる拘束体の拘束力の減少が相殺しあっていることを意味している。合成柱として見ると拘束体が軸方向応力を多く受け持つ分圧縮耐力は向上している(図-6、9)。

#### 4. 結論

- (1)コンクリートと拘束体の合成柱ととらえた場合、静的破砕材を充填すると膨張により付着が高まるため初期剛性が向上する。圧縮耐力も向上する傾向にあった。
- (2)静的破砕材を充填した拘束コンクリートは、ケミカルプレストレスにより拘束係数が向上するが、拘束体による側圧は無限ではないので、荷重されるまでに生じる拘束体の周方向応力と拘束体の引張強度(または降伏強度)との兼ね合いが重要である。

【謝辞】本研究は、広島大学と企業4社との共同研究である「SUPCOM」の研究の一環として行われたものであり、また、実験に際しては、学生の川水浩二君の協力を得た。ここに記して感謝申し上げます。

#### 【参考文献】

[1]米倉亜州夫他:3軸拘束を受けるコンクリートの力学的特性、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.17、No.2、pp.53-pp58、1995

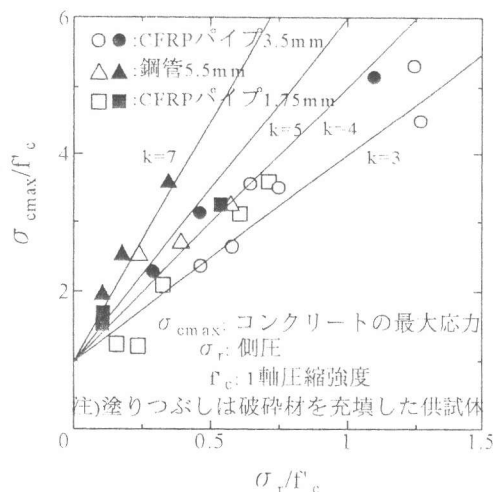


図-11 コンクリートの最大応力-側圧

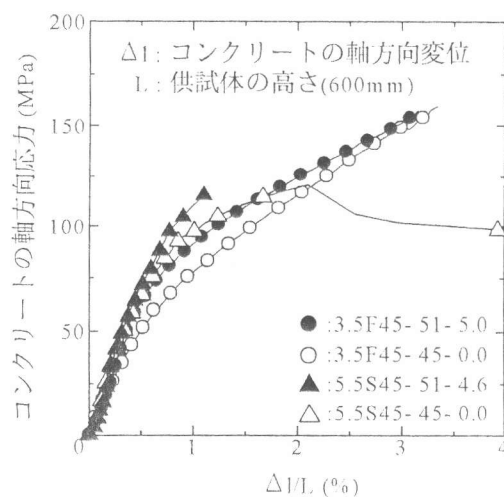


図-12 コンクリートの応力-ひずみ関係