

論文 定着用膨張材の膨張圧を側圧として用いた簡易三軸圧縮試験法

原田哲夫*¹・徳光 卓*²・山崎竹博*³・松田 浩*⁴

要旨：500kgf/cm²を越す高膨張圧および液圧的圧力伝播という定着用膨張材の特性を側圧荷重として利用した簡易三軸圧縮試験法を考案した。モルタル円柱供試体の周りに鋼管をセットし、供試体と鋼管のすきまに定着用膨張材を充填し、鋼管が所定の降伏膨張圧に達した段階で、軸方向に圧縮荷重を載荷し、三軸拘束下のモルタルの挙動を調べる方法である。実験の結果、降伏時の膨張圧（側圧）は一定のまま載荷でき、また、軸方向力をほとんど鋼管に作用させず、試験可能であることがわかった。さらに、この試験方法によって、側圧を変化させたモルタルのコンファインド効果について調べた。

キーワード：三軸圧縮試験、膨張圧、コンファインド効果、定着用膨張材

1. まえがき

筆者らは静的破砕剤の膨張圧挙動に関して、これまで行った基礎的研究の中から500kgf/cm²を越える高膨張圧が発生し、その伝播は液圧的であるなどの知見を得ている[1]。その特性を利用した研究として、これまでに「定着用膨張材を用いた連続繊維緊張材の定着法に関する研究」、「ケミカルジャッキに関する基礎的研究」等を実施してきている[2],[3]。ここで、定着用膨張材とは、静的破砕剤をベースに連続繊維緊張材の定着用として、膨張圧の発現特性、流動性、材料分離抵抗性等の改善が図られた材料である。

さて、本研究は上記のような膨張圧特性の利用に関する新たな視点からの研究である。通常、コンクリートあるいは岩盤の三軸圧縮挙動を調べるためには、油圧制御型の高圧三軸圧縮試験機が用いられている。本研究の第一の目的は、この高圧三軸圧縮試験機の側圧を定着用膨張材の膨張圧に置き換えて、上記の試験が実施できないかどうかを検討すること、すなわち、高膨張圧を利用した簡易三軸圧縮試験が可能であるかどうかの検討である。

一方、例えばコンファインド効果を主眼においたアンボンド型鋼管コンクリートの研究からもわかるように、膨張圧による側圧荷重を受けた円柱供試体は、三軸拘束効果によって耐力の向上とともに、靱性の向上も期待できる[4],[5]。予め膨張圧を拘束圧として積極的に作用させることにより、コンファインド効果を高めた補強工法への展開も考えられる。これを確認することを第二の目的として、今回は弾性体と考えられるモルタルについて、膨張圧による耐力向上および変形挙動に関する基礎的な性状の把握を行った。

2. 簡易三軸圧縮試験方法

今回考案した簡易三軸圧縮試験法の概要は以下の通りである。図-1のように、円柱供試体の周りに鋼管をセットし、供試体と鋼管のすきま（5mm程度）に定着用膨張材を充填する。鋼管

*1 長崎大学助教授 工学部構造工学科、工博（正会員）

*2 （株）富士ピー・エス 本店技術部 （正会員）

*3 九州工業大学助教授 工学部設計生産工学科、工博（正会員）

*4 長崎大学助教授 工学部構造工学科、工博（正会員）

が所定の膨張圧（作用させたい側圧）に達した段階で、アムスラー試験機を用いて軸方向に圧縮荷重を載荷し、三軸拘束下の円柱供試体の挙動を調べる、いたって簡便な方法である。このとき、問題となるのが側圧の管理である。膨張圧に関するこれまでの研究から、鋼管が弾性のうちは、膨張圧は増加するが、鋼管の降伏圧力に達した段階で、膨張圧は降伏時の膨張圧を保ったまま一定となることが

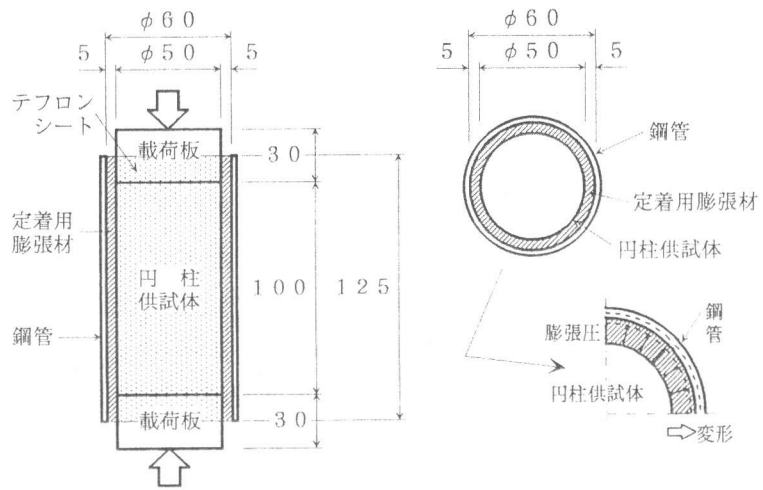


図-1 簡易三軸圧縮試験の概要

わかっている[1]。この性質により、軸方向荷重の載荷によって膨張圧が変化しなければ、側圧一定とした試験方法となりうる。降伏圧力、すなわち側圧は鋼管の材質と肉厚を定めることにより容易に調整できる。降伏は鋼管に貼付した歪ゲージにより判定する。なお、膨張圧は温度の影響を受けるので、膨張圧の適正な管理には、恒温室（20～25℃）にて実施することが望ましい。

降伏膨張圧の高い鋼管を用い、降伏膨張圧より低い膨張圧のときに軸圧縮力を作用させた場合、軸圧縮力のある段階で供試体が体積膨張を生じ始めると軸圧縮力の増加に伴って拘束圧が増加することになる。この場合は、能動的拘束から受動的拘束への載荷経路をもつ試験法となる。ここで能動的拘束とは、膨張圧のように軸方向力やそれにもなう変形とは独立して任意に与えることのできる拘束力であって、受動的拘束とは、軸方向荷重の増加に伴う供試体の体積膨張に対して鋼管等でそれが拘束されているために発生する拘束力をいう。なお、膨張圧の上限はこれまでの実験結果から判断しておよそ1000kgf/cm²であり、それまでの側圧であれば制御可能と思われる。

3. 実験概要

膨張圧拘束用鋼管の降伏圧力と、降伏後の挙動および膨張圧の挙動を調べる目的で、図-2に示すような二重管試験を実施した。膨張圧は内部に配置した鋼管（内管）の内周面に貼付した直交ひずみゲージのひずみ値より算出した。次に、市販の早強性無収縮モルタルでφ5×10cmの供試体を作製し、鋼製型枠に入れたまま28日間水中養生した。供試体表面には30mmのひずみゲージを直交して貼付し、供試体端面および側面にテフロンシートを巻いた後、載荷板も併せて膨張圧拘束用鋼管の中央部にセットした。その後、水比27%の定着用膨張材を鋼管と供試体の隙間に充填した（図-1）。鋼管降伏後、あるいは所定の膨張圧発現後、アムスラー試験機にて軸圧縮力を載荷し、モルタルおよび鋼管のひずみ挙動、最大耐力等を調べた。鋼管の降伏は、外周に貼付したひずみゲージにより判断した。外管の肉厚が厚いものについては、図-3のように側面にダイヤフラム型圧力計をセットし、膨張圧および載荷に伴う側圧の増加量を測定した。

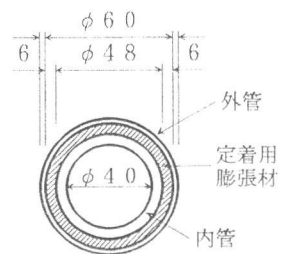


図-2 二重管試験による膨張圧の測定

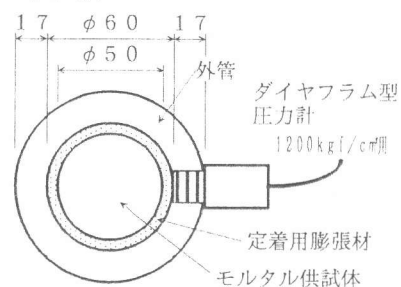


図-3 厚肉鋼管使用時の側圧測定方法

4. 実験結果および考察

4.1 鋼管の降伏と膨張圧の挙動

膨張圧と外管の円周方向ひずみの関係を図-4に示す。降伏圧力に達した後は、ひずみが一定となっていることがわかる。また、薄肉鋼管の降伏膨張圧 p_v は、式(1)によって求めることができ、計算結果と実験結果はほぼ一致した。

$$p_v = \sigma_v \cdot (k - 1) \quad (1)$$

ここに、鋼管の降伏強度 σ_v および外内径比 k (外径/内径) である。今回拘束用として使用した鋼管は、STKM13Aで、旋盤加工によって表-1に示す所定の寸法に仕上げた。

図-5には、内管のひずみから求めた膨張圧と、外管のひずみから求めた膨張圧を比較して示した。外管が降伏圧力に達するまでは両者は一致している。また、降伏後の膨張圧は時間が経過してもほぼ降伏膨張圧を一定に保っていることがわかる。

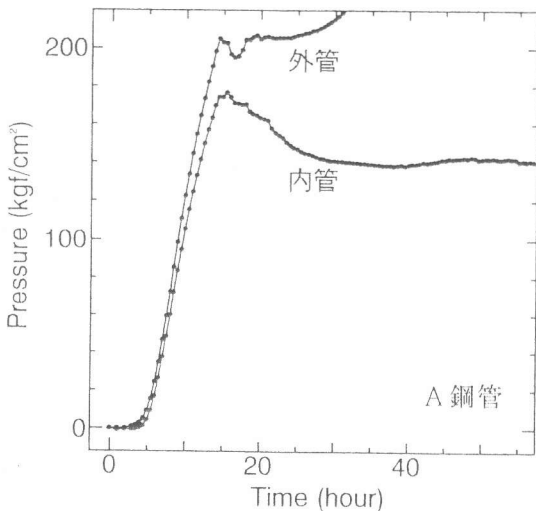


図-5 内管・外管のひずみから求めた膨張圧と時間の関係

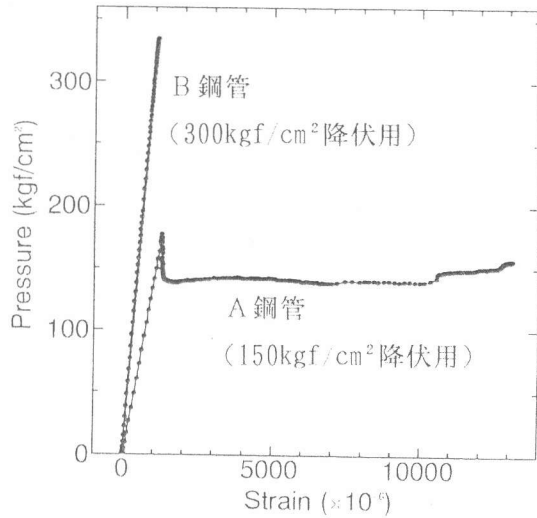


図-4 膨張圧と外管円周方向ひずみの関係

表-1 拘束用鋼管の寸法と最大耐荷力

	供試体番号	外径 (mm)	内径 (mm)	最大耐荷力 (tf)
A	1	64.2	60.0	32.4
	2			29.4
	3			30.0
	4			23.0
	5			24.2
B	1	68.8	60.0	42.8
	2			42.0
	3			37.3
	4			37.5
C	1	94.0	60.0	40.5
	2			41.0

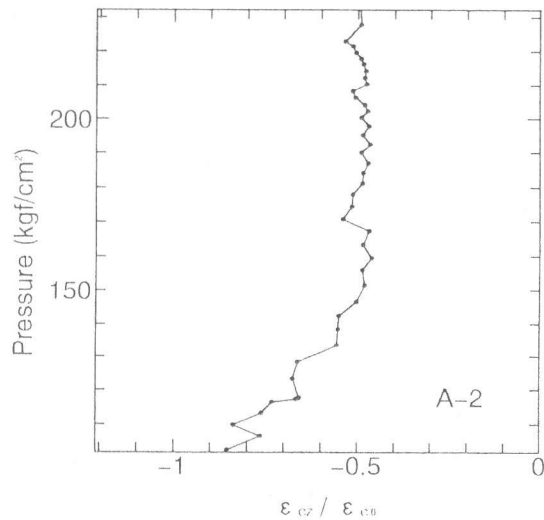
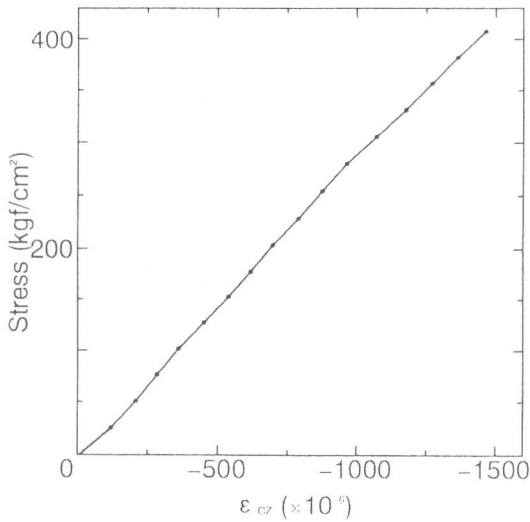


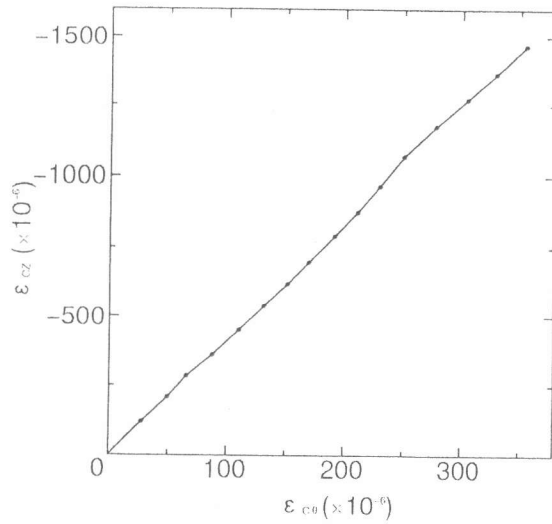
図-6 膨張圧とモルタルの軸方向/円周方向ひずみ比の関係

4.2 膨張圧によるモルタルのひずみ挙動

図-6は膨張圧の負荷にともなう軸方向ひずみ ϵ_{cz} と円周方向ひずみ $\epsilon_{c\theta}$ の比をプロットしたもので、膨張圧の増加にかかわらず約0.5で一定である。今回使用したモルタルの一軸圧縮試験時のひずみの挙動は、図-7(a), (b)に示すように、破壊まではほぼ直線的であって、弾性体とみなしてよいと考えられる。ただし、供試体載荷面にはグリースを塗布したテフロンシー



(a) 応力と軸方向ひずみの関係



(b) 軸方向ひずみと円周方向ひずみの関係

図-7 一軸圧縮試験におけるモルタル供試体のひずみ挙動

トをはさみ、摩擦を低減している。

いま、膨張圧 p の増加にともなう $\epsilon_{cz} / \epsilon_{c\theta}$ の値は、モルタルのポアソン比を ν_c とすれば、式(2)

$$\epsilon_{cz} / \epsilon_{c\theta} = -2\nu_c / (1 - \nu_c) \quad (2)$$

で与えられ、圧縮試験から求めた $\nu_c = 0.23$ を代入すれば、図-6の実験結果とほぼ一致する。

4.3 鋼管へ作用する軸方向力の影響

テフロンシートによって摩擦の影響は極力除去しているものの、荷重にともなう鋼管に軸方向力を生じることが懸念される。いま、拘束圧 260 kgf/cm^2 まで膨張圧を作用させたBタイプの鋼管は降伏に至っていないので、鋼管表面の直交ゲージのひずみ値を用いて、弾性計算により軸方向荷重を計算した。図-8に荷重荷重(N)と鋼管軸方向力(N2)との関係の一例を示した。わずかに鋼管軸方向力が生じているものの、荷重荷重にともなう増加はみられない。鋼管軸方向力の増加分、見かけ上最大耐力は増加することになる。

4.4 荷重にともなう側圧の増加について

まず、拘束鋼管を降伏させた時の側圧(降伏圧力)が一定のまま、軸方向力を荷重できるかどうかについて検討する。ここでは、モルタル供試体のひずみに着目して考察する。軸方向応力を作用させても、

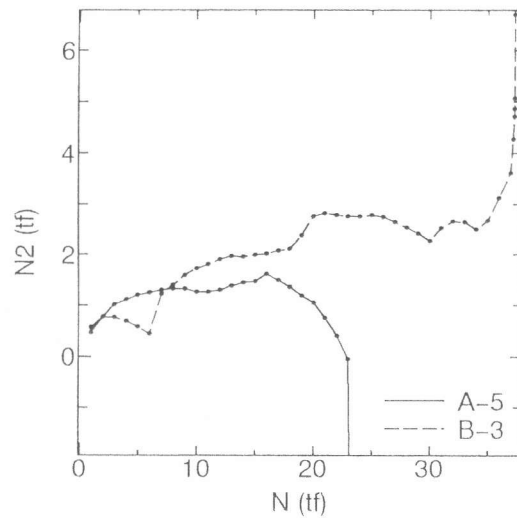


図-8 荷重荷重と鋼管軸方向力との関係

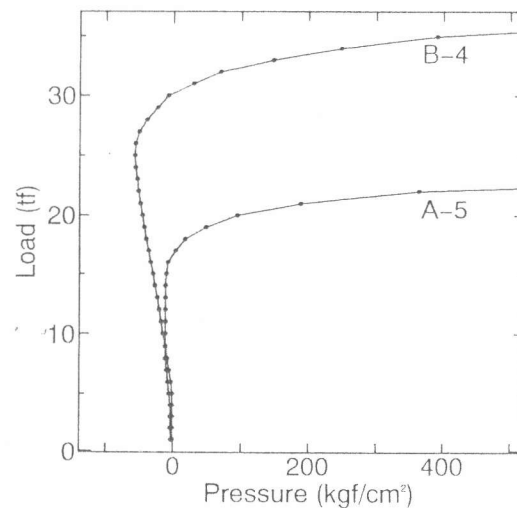


図-9 軸方向荷重と増加圧力との関係

側圧 p が一定のままであるならば、 ε_{cz} および $\varepsilon_{c\theta}$ は荷重による軸方向応力 σ_z のみに影響されることになるので、 $(\varepsilon_{c\theta} + \nu_c \cdot \varepsilon_{cz})$ の値は 0 となるはずである。仮に側圧の増加 Δp が生じれば、式 (3) で求められる。

$$\Delta p = \frac{E_c (\varepsilon_{c\theta} + \nu_c \cdot \varepsilon_{cz})}{(1 + \nu_c) (1 - 2\nu_c)} \quad (3)$$

図-9 に軸方向荷重と式 (3) で計算した増加圧力 Δp との関係を示した。後述するように、モルタル供試体の体積ひずみが収縮から膨張へ変化したと考えられる荷重まで、ほぼ $\Delta p = 0$ となっていることがわかる。

図-10 は肉厚を厚くし、降伏膨張圧を高めた鋼管 C を使い、予め膨張圧 150 kgf/cm^2 を作用させた段階で、軸圧縮力を荷重した場合の一例である。側圧の増加は、側面に取り付けたダイヤフラム型圧力計で測定した。モルタルのひずみから計算される膨張圧は、わずかながら負の方向に変化しているが、ダイヤフラム型圧力計による圧力は軸圧縮力 30 tf あたりまでほぼ 0 で、その後増加しはじめている。この側圧が増加しはじめる荷重は、膨張圧 150 kgf/cm^2 の能動的拘束圧を作用させて軸圧縮力を荷重させた供試体の最大耐力にほぼ等しい (表-1 参照)。この時点からモルタルの体積膨張を生じ、受動的拘束状態となって側圧が増加するものと推察され、図-10 での増加圧力は約 250 kgf/cm^2 で、軸圧縮力は 40 tf まで上昇している。

4.5 モルタル供試体の変形挙動 および最大耐力

図-11 に荷重荷重とモルタルの軸方向ひずみ、円周方向ひずみの関係を示した。拘束膨張圧が大きくなるに伴って耐力も上昇し、靱性も向上していることがわかる。4.4 で考察したように、鋼管 C を用いた供試体では鋼管 A の供試体に対し、能動的拘束状態から受動的拘束状態に変化したと考えられる分の耐力の上昇をみることができる。図-12 には、体積ひずみと軸方向ひずみの関係を示した。体積ひずみが、

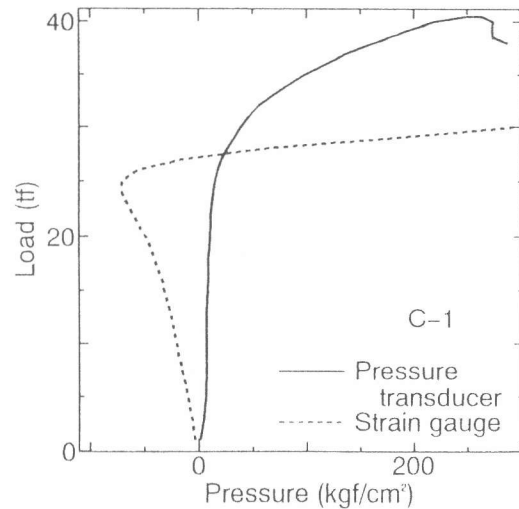


図-10 荷重荷重と側圧増加との関係 (膨張圧 150 kgf/cm^2 の場合)

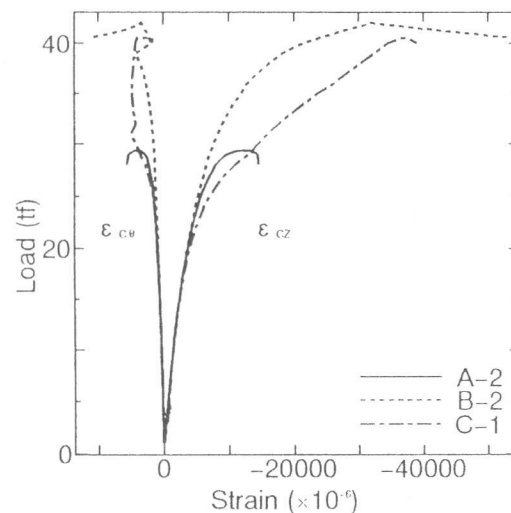


図-11 荷重荷重とモルタルの軸方向ひずみ、円周方向ひずみの関係

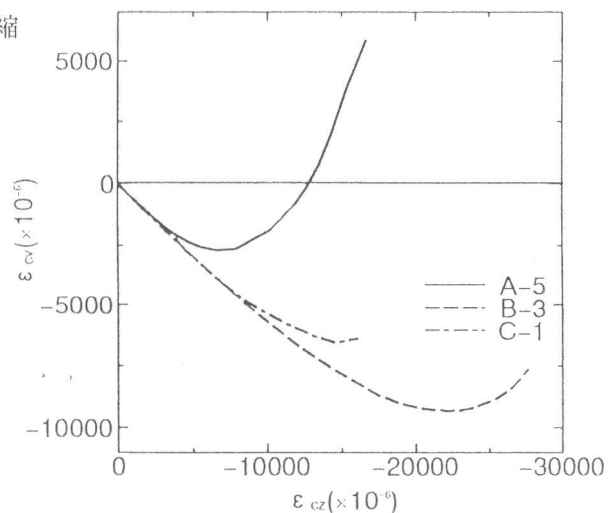


図-12 体積ひずみと軸方向ひずみの関係

収縮から膨張へ変化する点はいずれの供試体でも明らかに現れており、例えば図-10の場合のC供試体の側圧が増加する点は、図-12のA供試体の変曲点と一致する。次に、表-1に示す最大耐力から供試体の断面積で除した最大強度（ F_c ）と拘束圧（ p ）との関係を図-13に示す。ここで、鋼管の肉厚が大きく途中で受動的拘束状態に変化する場合には、初期側圧に増加側圧を加えた拘束圧として処理した。結果はほぼ直線で近似でき、最小自乗法で処理した結果、 $k = 5.56$ であった。

$$F_c = f_c + k \cdot p \quad (4)$$

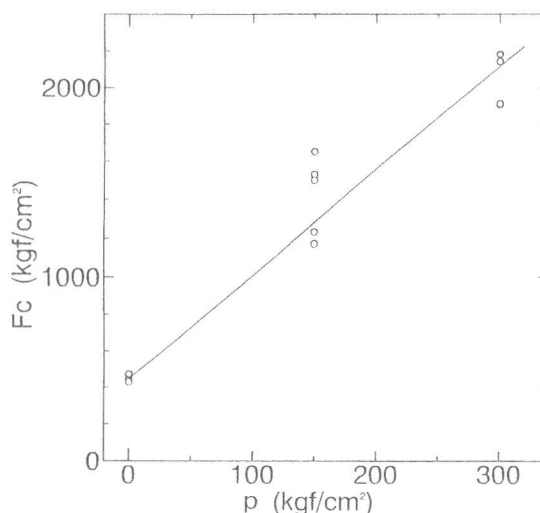


図-13 強度と拘束圧の関係

f_c は一軸圧縮強度で 449 kgf/cm^2 であった。拘束係数と呼ばれている k は、文献4), 5) 等で得られている $k = 4$ よりも大きめである。これは、文献ではアンボンド型鋼管についていわゆる受動的拘束によるコンファインド効果であるのに対し、本研究では膨張圧を作用させる能動的拘束効果であることあるいは鋼管軸方向力の影響等が考えられる。しかしながら、今回は簡易三軸試験法の検討が主であったために、コンファインド効果に関するデータ数が少なく、本試験法の改良も含めデータの蓄積を図ってゆく所存である。

5. まとめ

定着用膨張材の膨張圧を側圧として作用させる簡易三軸圧縮試験方法を考案し、今回の実験から得られた知見をまとめると以下のようなものである。

(1) 拘束鋼管を降伏させた状態で軸方向力を作用させても側圧の増加はなく、鋼管軸方向力の影響はわずかに入るものの、側圧一定の三軸圧縮試験とすることができる。

(2) 能動的拘束のみを受ける場合でも、能動的拘束圧から途中で受動的拘束に変化する場合も含めて、強度と拘束圧（膨張圧）の関係は $F_c = f_c + k \cdot p$ で近似したところ、 $k = 5.56$ を得た。この値はアンボンド型鋼管の研究で得られている拘束係数4よりもやや大きい。

参考文献

- 1) 原田哲夫・副田孝一・出光隆・渡辺明：静的破砕剤の膨張圧測定法と膨張圧の諸性質、土木学会論文集、No. 478/V-21、pp. 91-100、1993. 11
- 2) 原田哲夫・ミヨーキン・徳光卓・出光隆：定着用膨張材を用いたFRP緊張材の定着機構の一考察、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 16、No. 2、pp. 1135-1140、1994. 6
- 3) 原田哲夫・松田 浩：静的破砕剤を用いたケミカルジャッキによるPC部材の接合法、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 14、No. 1、pp. 177-182、1992. 6
- 4) 肖 岩・富井政英・崎野健治：コンファインドコンクリートの3軸圧縮挙動に関する実験的研究、コンクリート工学論文集、Vol. 2、No. 1、pp. 1-14、1991. 1
- 5) 佐藤孝典：円形断面の充填鋼管コンクリート構造におけるコンファインド効果のメカニズムとそのモデル化、日本建築学会構造系論文集、第452号、pp. 149-158、1993. 10