

膨張性セメント混和材を用いたコンクリートの 標準試験方法に関する研究

STUDY ON STANDARD TESTS FOR CONCRETE WITH EXPANSIVE COMPONENTS

国分正胤^{*1}・小林正几^{*2}・長滝重義^{*3}・岡村 甫^{*4}・町田篤彦^{*5}

By Masatane Kokubu, Masaki Kobayashi, Shigeyoshi Nagataki,

Hajime Okamura and Atuhiko Machida

1. 共通試験について

膨張性セメント混和材を用いたコンクリート（膨張コンクリート）における一つの大きな問題は、その試験方法である。自由膨張させた供試体による試験結果も実用上の目安を与えることは疑いないのであるが、構造部材に膨張コンクリートを用いる場合には、その膨張が拘束されることによる効果を期待する場合が多いので、自由膨張供試体による試験結果と構造物におけるコンクリートの挙動とが著しく相違することも事実である。なお、試験目的を膨張コンクリートに用いる材料および配合の選定だけに限ったとしても、自由膨張ひずみに基づいてコンクリートに導入されるケミカルプレストレスを推定

するのが適当でない場合もある。それは自由膨張ひずみが同じ場合でも膨張性混和材（膨張混和材）の種類・セメントの品質・コンクリートの配合等によってプレストレスが相当に異なるからである。したがって、拘束を与えた供試体による標準試験方法を制定することがぜひ必要である。この標準試験方法についてはアメリカその他でも検討中であり¹⁾、国際的な試験方法の制定が望ましいのであるが、短時間内には不可能であろう。そこでこの種の標準試験方法について6つの研究機関で共通試験を行って検討したのである。試験の概要は表-1に示すようであって、自由膨張ひずみ、拘束膨張ひずみ、自由膨張強度、拘束膨張強度等について膨張混和材2種（XおよびY、いずれもカルシウムサルフォアルミネート系）、セメント2種類、配合2種類、膨張混和材の使用量5種類に変化させて試験したのである。同一条件の試験が3か所で行われるように配慮するとともに、膨張混和材とセメントは同一ロットの製品を用いた。なお、紙製型枠によって拘束した共試本の魚笈試験をもあわせて行っ

- *1 正会員 工博 東京大学教授 工学部土木工学科
*2 正会員 工博 法政大学教授 工学部土木工学科
*3 正会員 工博 東京工業大学助教授 工学部土木工学科
*4 正会員 工博 東京大学助教授 工学部土木工学科
*5 正会員 工修 埼玉大学助教授 工学部建設基礎工学科

表-1 共通試験の概要ならびに骨材の性質

研究機関	単位水量およびスランプ (cm) ¹⁾								骨材の性質						
	膨張混和材 ²⁾		X			Y			細骨材				粗骨材 ³⁾		
	セメント		普通	早強		普通	早強		産地	比重	吸水量 (%)	粗粒率	産地	比重	吸水量 (%)
	単位セメント量(kg) ²⁾		300	400	400	300	400	400							
東京大学工学部土木教室	165 4~7	168 9~13	168 4~6					富士川	2.63	1.85	3.02	富士川	2.66	0.60	
法政大学工学部土木教室				160 4~10	165 11~16	171 6~9		富士川	2.63	1.85	2.73	富士川	2.66	0.88	
東京工業大学工学部土木教室	165 9~11	168 14~15		165 10~11	168 12~14			富士川	2.61	2.14	2.56	富士川	2.64	0.88	
埼玉大学理工学部建設基礎工学教室			168 3~5			168 2~4		荒川	2.62	1.60	3.25	荒川	2.58	1.60	
電気化学工業KK中央研究所	178 7~9	178 7~9	178 7~9					相模川	2.58	2.90	3.04	相模川	2.63	0.90	
日本セメントKK中央研究所				165 11~14	168 9~12	168 7~9		富士川	2.62	2.07	2.83	大井川	2.65	0.73	

- 1) 単位水量およびスランプ値を記入してあるものについて、各研究機関で膨張ひずみ試験ならびに圧縮試験を行った。
2) 混和材のセメントに対する置換率を混和材 X の場合 0, 11, 13, 15, 17%, 混和材 Y の場合 0, 7, 10, 12, 15% のおのおの5種類とした。セメント量には膨張混和材も含まれている。
3) 粗骨材の最大寸法は 25 mm である。

表-2 膨張混和材およびセメントの試験結果

		化 学 成 分 (%)									比 重	比表面積 (cm ² /g)
		Ig. loss	In sol	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Total		
膨 張 混 和 材	X	1.0	1.4	4.0	10.0	1.2	52.5	0.6	28.3	99.0	2.93	1510
	Y	0.6		1.3	7.2	0.4	59.7	0.6	30.2	100.0	3.04	2250
ボルトランド セメント	普通	0.5	0.1	21.9	5.1	3.1	64.9	1.3	1.8	98.7	3.16	3220
	早強	0.6	0.1	20.8	4.8	2.8	66.2	1.2	2.5	99.0	3.14	4350

た。用いた膨張混和材ならびにセメントの化学成分などは表-2に示すようであった。また、骨材の性質も表-1に示してある。

共通試験に従事して下さった6試験室の方々特に試験結果のとりまとめを担当された町山延昭氏（東京大学土木教室研究生），ならびにこの試験に協力された三宅信雄（電気化学工業KK），門司 唱・塚山隆一（日本セメントKK）の三氏に厚くお礼申し上げる。また，この研究に対して文部省科学研究費補助金を付与されたことを付記し，厚くお礼申し上げる。

2. 膨張ひずみの試験方法

(1) 膨張性セメント混和材を用いたコンクリートがその膨張を拘束されない場合（自由膨張ひずみ）および標準的な方法で拘束される場合（標準拘束膨張ひずみ）の膨張ひずみの試験は以下の諸事項に従って行うことを申し合わせて共通試験を実施した。

(2) 試験用器具

a) 型 枠

① 型枠は堅固で吸水性のないものとし，水平にして供試体を作ることができ，その際変形しないようなものでなければならない。

② 型枠はゲージプラグが供試体の両端面の中央に正確にくるようにできており，プラグが供試体の成形時および脱枠以前に正しい位置から動かないように取付けられるようになっていなければならない。

③ 型枠の内のり寸法は粗骨材の最大寸法が 30 mm 以下のコンクリートに対しては 10 cm × 10 cm × 50 cm とする。

b) ゲージプラグ

自由膨張ひずみ試験用供試体に埋めこんで供試体の有効長を測定するための標点とするもので，ステンレス鋼製とする（図-1参照）。

c) ゲージプラグ付鋼棒

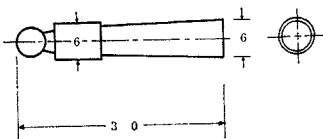


図-1 ゲージプラグ

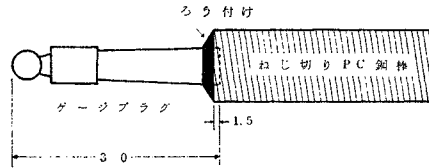


図-2 ゲージプラグ付鋼棒

拘束膨張ひずみ試験用供試体に埋めこんで供試体の膨張を拘束するとともに有効長を測定するための標点とするもので，全長 46.3 cm にわたってねじを切った直径 11 mm の PC 鋼棒の両端にゲージプラグを 1.5 mm 差し込んでろう付けしたものである（図-2 参照）。ねじ寸法は，JIS B 0207（メートル細目ねじ）の M 12（ピッチ 1.5 mm）とする。

d) 測定器

JIS A 1124（モルタルおよびコンクリートの長さ変化試験方法）に規定する測定器を用いる。

e) 突き棒

突き棒は直径 16 mm，長さ 50 cm の丸鋼とし，その先端を半球状にしたものとする。

(3) 供試体の寸法および個数

a) 供試体の寸法

断面 10 cm × 10 cm，長さ 50 cm のものとする。

b) 供試体の個数

同一条件の試験に対して必要な供試体の数は 3 個以上とする。この 3 個以上の供試体は，2 バッチ以上のコンクリートから作るものとする。

(4) 型枠の組立て

枠板の合せ目には漏水を防ぐため，油土またはかたいグリスなどを薄くはさみつけ，ゲージプラグまたはゲージプラグ付鋼棒を取付け，内面にはコンクリートを詰めるまえに，鉱物性の油を薄く塗るものとする。

ゲージプラグを取付けるにはプラグの内側の端面間の距離がどの供試体に対しても 460 ± 3 mm となるようにする。

(5) 有効長

ゲージプラグの内側端面間の距離を供試体の有効長と

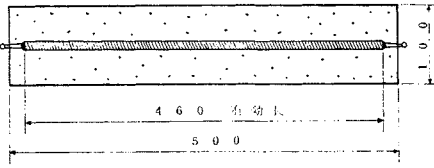


図-3 有効長

定義する（図-3 参照）。

(6) コンクリートの詰め方

JIS A 1124 参照。

(7) 脱型

コンクリートを詰め終わったら、ただちに、型枠のまま $21 \pm 3^\circ\text{C}$ で湿潤状態に保ち、24 時間たったのち脱型する。

供試体をつねに供試体受け台の同一位置に置くようにするため、各供試体の一端の近くの一面に目印をつけておく。

(8) 基長の測定

a) 測定器およびゲージプラグ付鋼棒を保存する室温は測定前3時間以前より $21 \pm 1^\circ\text{C}$ に保っておかなければならない。

b) ゲージプラグ付鋼棒の測長を行い、その有効長を標準拘束膨張ひずみの基長と定義する。

c) 供試体の脱型後ただちに測長し、このときの自由膨張ひずみ試験用供試体の有効長を、その基長と定義する。

(9) 供試体の保存

a) (8), c) の測長後供試体をただちに温度 $21 \pm 3^\circ\text{C}$ の水中に貯蔵する。

b) 供試体の材令が、24, 48, 72 時間, 5, 7, 14, 21, 28 日になったとき、各供試体の測長を行う。

(10) 測長方法

JIS A 1124 参照。

(11) 膨張ひずみの算出

膨張ひずみは次の式で計算する。

$$\text{膨張ひずみ} = \frac{\text{各測長時の有効長} - \text{基長}}{\text{基長}}$$

$$= \frac{\text{各測長時におけるダイヤルゲージの読み (mm)} - \text{基長測定時のダイヤルゲージの読み (mm)}}{\text{基長 (mm)}}$$

(12) 曲げ強度試験

最後の測長が終わった後材令28日に JIS A 1106(コンク

リートの曲げ強度試験方法) に準じて試験の終わった供試体の曲げ強度試験を行い、曲げひびわれ応力度を求める。

(13) 報告

試験結果の報告には次の事項を記載する。

- ① 使用した各材料の名称・製造会社名または産地
- ② 粗骨材の種類・最大寸法・骨材の粒度・吸水量および含水量
- ③ 配合、フローまたはスランプ
- ④ 保存期間中の温度
- ⑤ 各測長時の膨張ひずみ
- ⑥ 膨張ひずみ測定後における曲げひびわれ応力度

3. 圧縮強度の試験方法

(1) 膨張セメント混和材を用いたコンクリートがその膨張を拘束されない場合（自由膨張強度）および標準的な方法で拘束される場合（標準拘束膨張強度）の圧縮強度の試験は以下の事項に従って行うことを申し合せて共通試験を実施した。

(2) コンクリートの試料

JIS A 1132 (コンクリートの強度試験用供試体の作り方) 参照。

(3) 供試体の数

同一条件の試験に対して必要な供試体の数は3個以上とする。この3個以上の供試体は、2バッチ以上のコンクリートから作るものとする。

(4) 供試体

a) 供試体の寸法

供試体は、直径の2倍の高さをもつ円柱形とする。直径は粗骨材の最大寸法の3倍以上とする。

b) 供試体の製造器具

JIS A 1132 参照。

c) コンクリートの打込み

JIS A 1132 参照。

d) キャッピング

JIS A 1132 参照。

(5) 自由膨張強度試験用供試体の型枠の取りはずしおよび養生

JIS A 1132 参照。

(6) 標準拘束膨張強度試験用供試体の養生

a) コンクリートを詰め終わったのち、その硬化をまっ

て型枠ごと $21 \pm 3^\circ\text{C}$ の水中に入れ強度試験を行うまで養生する。水中養生を開始する時期は、コンクリートを詰め終わってから 24 時間以上 48 時間以内を原則とする。この間、供試体上面は板ガラス、鋼板または湿布でおおい、水分の蒸発を防がなければならない。

b) 供試体の製造および養生中の温度は標準として、 $21 \pm 3^\circ\text{C}$ とする。

(7) 試験を行う材令

試験を行う供試体の材令は、標準として 1 週、4 週および 13 週とする。

(8) 試験の準備

a) 自由膨張強度用供試体は、所定の養生を終った直後の状態で試験できるように準備する。

b) 標準拘束膨張強度試験用供試体は、所定の養生が終了した後脱型し、ただちに試験できるように準備する。

c) 供試体の高さの中央で、互いに直交する 2 方向の直径を 0.25 mm まで測り、その平均値を供試体の直径とする。

(9) 荷重を加える方法

JIS A 1108 (コンクリートの圧縮強度試験方法) 参照。

(10) 試験の結果

JIS A 1108 参照。

(11) 報 告

試験結果の報告は次の事項を記載する。

- ① 使用した各材料の名称・製造会社名または産地
- ② 粗骨材の種類・最大寸法・骨材の粒度・吸水量および含水量
- ③ 配合およびスランプ
- ④ 材令および圧縮強度
- ⑤ 養生方法および養生温度
- ⑥ 供試体の破壊状況 その他

4. 膨張ひずみの標準試験方法について

共通試験では、 $10 \times 10 \times 50 \text{ cm}$ のはりの中心に全長にわたってねじを切った直径 11 mm の鋼棒を埋込んだ供試体によって、一軸拘束を与えた場合の膨張量を測定した。すなわち、コンクリートの膨張を拘束するのにコンクリートと鋼材との付着力を利用したのである。この方法が標準試験方法となるためには、付着性状の一定な鋼材が容易に入手できる必要があり、これを達成する方法

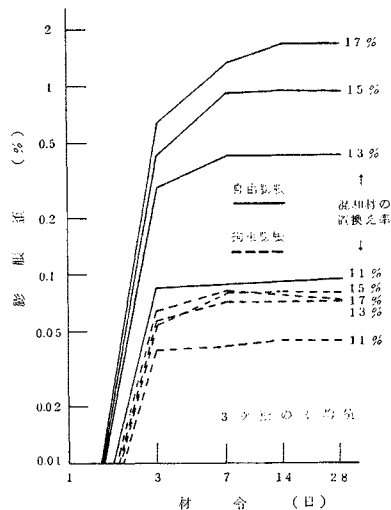


図-4 材令と膨張ひずみとの関係を示す一例 (混和材 X, 普通セメント, $C=400 \text{ kg}$)

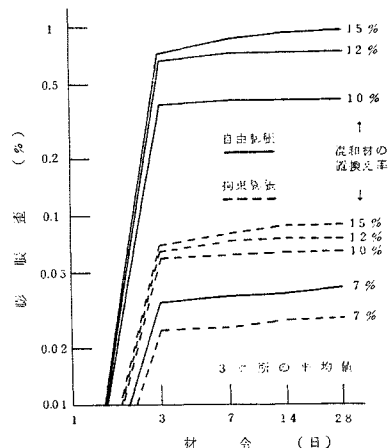


図-5 材令と膨張ひずみとの関係を示す一例 (混和材 Y, 普通セメント, $C=400 \text{ kg}$)

として、PC鋼棒に JIS 規定のねじを切る方法を採用したのである。

この方法で拘束した供試体の膨張ひずみ測定の結果の一例が図-4 および図-5 であって、この拘束が有効に作用していることが認められる。拘束膨張ひずみは自由膨張ひずみよりも著しく小さく、かつ自由膨張ひずみが大いほど拘束膨張ひずみも大きくなる傾向が認められたのである。図-6 および図-7 にも、セメントの種類、コンクリートの配合等が同じ場合には、自由膨張ひずみと拘束膨張ひずみとの間に相関関係が認められる。しかし、自由膨張ひずみが著しく大きく 1% 程度にもなると、むしろ拘束膨張ひずみが低下する例も見受けられた。これは、コンクリートと鋼棒との付着が切れたためであって、鋼棒に通常のねじを切る方法では、このような特殊な範囲まではカバーできないのである。しかし、

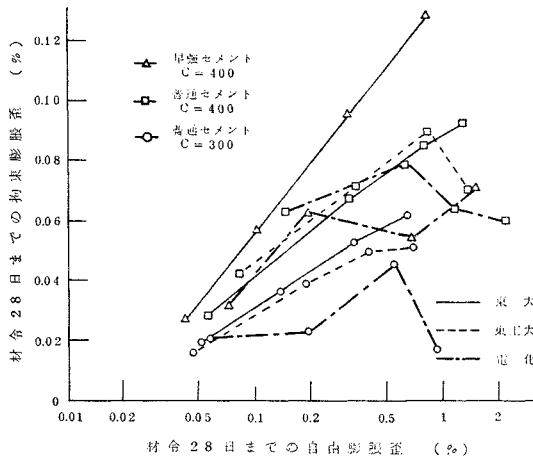


図-6 自由膨張ひずみと拘束膨張ひずみとの関係 (混和材 X の場合)

一般の実用に供する膨張の範囲では、十分な付着力が作用しているものと考えられるのであって、この拘束方法は標準試験方法として採用可能な方法と思われる。

コンクリートの膨張を付着によって拘束する方法では、供試体端部における鋼棒の伸びは中央部に比して小さくなり、鋼棒の伸びの平均値は供試体の長さによって異なる。それでこの方法を採用する場合には供試体の長さを一定とすることが重要である。長さが長いほど端部の影響が小さくなるので、共通試験では、長さ変化試験方法における最大の長さ 50 cm を採用した。なお、有効長をゲージプラグの内側端面間の距離 (46 cm) としたのは便宜的なものであって、この有効長による鋼棒の平均伸びから求めたプレストレスは供試体中央部におけるケミカルプレストレスよりも一般に小さくなるものと思われる。しかし、膨張コンクリートのケミカルプレストレスの特性を判断するための標準試験方法としては、本方法による値を用いることは何ら差しつかえないのである。

図-6 および 図-7 には、コンクリートの配合、セメントの種類等が異なる場合には、自由膨張ひずみが同じ値でも、拘束膨張ひずみは相当に異なることが明瞭に示されている。また、ある拘束による膨張ひずみが測定されておれば、その結果から、拘束の異なる場合の膨張ひずみを相当に精度良く推定できることが明らかにされている²⁾。したがって、膨張試験の標準試験方法として、拘束供試体による方法がぜひ必要であるが、拘束の方法としてはある一定の方法だけを定めておけば十分である。拘束の程度が異なる場合に対する推定の精度、測定の精度、その他を考慮すれば、その場合の拘束鋼材比としては 1% 程度が適当と思われる。

付着によらないで拘束する方法としては、PC 鋼棒とアンカープレートとを用いる方法が一般に行われている

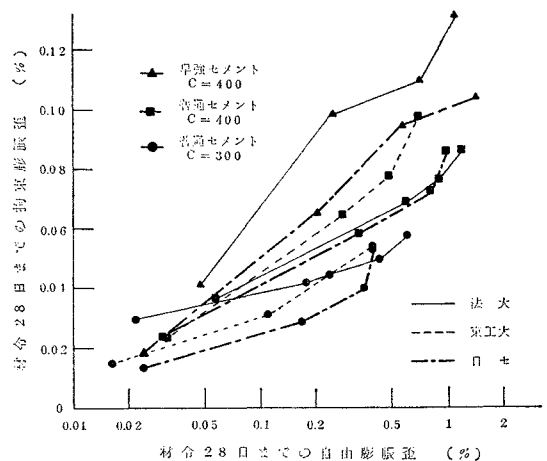


図-7 自由膨張ひずみと拘束膨張ひずみとの関係 (混和材 Y の場合)

が、アンカープレートを用いるとナットのゆるみの影響が導入されるし³⁾、個人誤差も大きくなるので、標準試験方法として必ずしも適当なものでないと判断したのである。しかし、PC 鋼棒とアンカープレートとを溶接その他によって一体とすれば、簡単かつ一定の拘束が得られることが最近明らかにされた²⁾。共通試験に用いた拘束方法には、ねじ切り鋼棒の引張力すなわちケミカルプレストレスを求めるのが困難な欠点、および一度使用した鋼棒はねじ部分にコンクリートが付着するので、これを回収して再度用いるのが困難な欠点がある。鋼棒とアンカープレートとを溶接する方法は、これらの欠点がなくむしろ標準試験方法として、より適当と思われるほどである。

拘束供試体の膨張ひずみの測定方法を自由膨張ひずみの場合と同様の方法とすることを考慮して、共通試験では JIS A 1124 のダイヤルゲージ方法を採用した。この方法によれば、拘束供試体の場合には、コンクリートの打込み直後からの膨張ひずみが測定でき、実験室で行う方法としてはきわめて優れた方法であって、標準試験方法として推奨できる方法である。コンタクトタイプのダイヤルゲージ法は、測定器具を簡単に運搬できるので、現場での測定には都合がよい利点があるが、自由膨張ひずみと拘束膨張ひずみの供試体寸法および測長をともに等しくして測定することが困難な欠点がある。また PC 鋼棒にワイヤストレインゲージを貼りつけておいて電氣的に膨張ひずみを測定する方法も行われているが、この方法も自由膨張ひずみの測定は困難である。標準試験方法としてはすでに JIS に定まっている方法が便利でもあり、現時点では、JIS A 1124 のダイヤルゲージ方法が最も適当と思われる。

共通試験では、供試体の保存方法を通常のコンクリートの養生方法と同様に、21°C 水中とした。現場の状況

その他に合わせた保存状態とすることも可能であるが、測定時の温度条件は一定とする必要がある。測長時の供試体の温度をできるだけ一定に保つためには、供試体保存中の水温をできるだけ一定とするのが望ましい。材令と膨張との関係を示す一例は図-4および図-5に示すようである、膨張は材令の初期に著しく、材令 28 日までに膨張の大部分が終了する。それで、測長の間隔は材令の初期には短くし、一般には材令 28 日まで測定すれば十分である。

5. 圧縮強度の標準試験方法について

拘束を与えた供試体についての圧縮強度の標準試験としては、試験の方法が簡単で試験値の誤差が小さいとともに、ある程度一定の拘束が得られるものである必要がある。共通試験では、鉄製のシリンダー型枠へ詰めたコンクリートを脱型せずに、そのまま水中養生し、所定の材令において脱型して試験する方法としたが、この方法は上記の点で優れた方法であることが確かめられたのである。脱枠直後に強度試験を行った場合と脱枠後ある時間を経過してから強度試験を行った場合とを入念に比較したが、経過時間が2時間程度までならば、その間の拘束を解放したことによる強度低下は全く認められなかったのである(図-8参照)。図-9は自由膨張ひずみと鉄製型枠拘束供試体の圧縮強度比率(膨張混和材を用いない場合に対する比率)との関係を示したものであって、鉄製型枠の剛性やねじの寸法などが必ずしも同じでない各研究機関における試験値にさほど大きなばらつきがないことが示されている。しかし、強度比率の特に小さいものも一部含まれているので、鉄製型枠はできるだけ堅ろうなものを用いるのがよいと思われる。

図-10は、自由膨張供試体の強度についての同様の

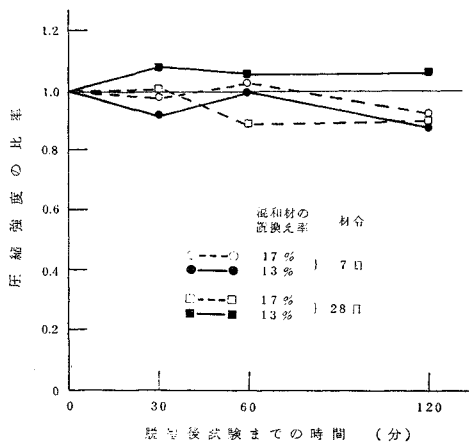


図-8 鉄型枠拘束供試体の圧縮強度におよぼす脱枠後試験までの経過時間の影響(混和材 X の場合)

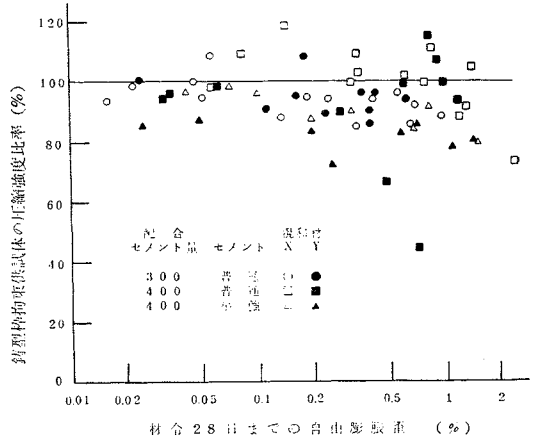


図-9 鉄型枠拘束供試体の圧縮強度比率 (膨張混和材を用いない場合に対する)

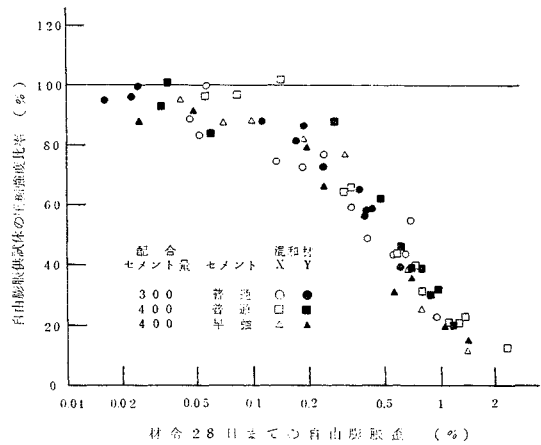


図-10 自由膨張供試体の圧縮強度比率 (膨張混和材を用いない場合に対する)

グラフであって、図-9と図-10とを比較すれば、鉄製型枠による拘束によって、自由膨張量が大きい場合における圧縮強度の低下が防止されることが明瞭である。この方法の欠点としては、拘束の程度が明確でないことであって、この方法による試験値がただちに実際の構造物における膨張コンクリートの強度を示すものではない。しかし、相当に大きな拘束が期待できる場合には、構造物における強度がこの方法による強度に近づくものと思われる、拘束供試体による圧縮強度の標準試験方法としては本試験方法が現時点で最も適当なものであろう。この試験によって膨張コンクリートにおけるセメントの品質や水セメント比の変動を検出することが可能であって、管理試験のための方法として有用と思われる。しかし、拘束した供試体による強度は、膨張混和材の性質やその使用量の変動に対してあまり敏感でないので、ケミカルプレストレストコンクリートの管理試験としては、これらの要因に敏感な自由膨張強度を併用する必要がある

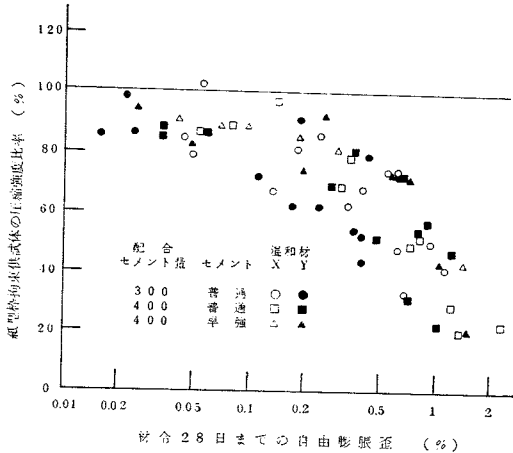


図-11 紙型枠拘束供試体の圧縮強度比率
(膨張混和材を用いない場合に対する)

(図-12 および 図-13 参照)。また、自由膨張強度比率と自由膨張ひずみとの間には、図-10 に示すように、コンクリートの配合、セメントの種類、混和材の種類および量等が相違しても、ほぼ一定の関係が存在することも示されているので、管理試験としては試験の簡単な自由膨張強度試験を行えば、必ずしも自由膨張ひずみを常に試験する必要はないものと思われる。

図-11 は市販の紙製型枠によって拘束された供試体の強度比率（膨張混和材を用いない場合に対する比率）と自由膨張ひずみとの関係を示したものである。紙製型枠による拘束では、自由膨張の場合と大差ない強度しか得られず、拘束の程度が小さすぎるばかりでなく、試験値のばらつきも自由膨張の場合よりも大きく、標準試験方法としては不適當である。

6. 結 論

膨張性セメント混和材を2種類、セメントを2種類、膨張混和材の使用量を5種類、それぞれに変化させて作成したコンクリートの自由膨張および拘束膨張の、ひずみならびに圧縮強度について、6研究機関で共通試験を実施した結果、膨張性セメント混和材を用いたコンクリートの標準試験方法として、2. および 3. に述べた方法が適當な方法であることが確かめられた。2. および 3. は標準試験方法としてそのまま利用できる形で書いたものであるが、その要点は以下のようである。

(1) 拘束膨張試験は、10×10×50 cm のはりの中心に、全長にわたってねじを切った直径 11 mm の鋼棒を埋込み、鋼棒とコンクリートとの付着によって一軸拘束を与えた場合の材令に伴う膨張を、JIS A 1124 のダイヤルゲージ法で測定する方法である。この方法によってケミカルプレストレスの特性が判断できるので、膨張コ

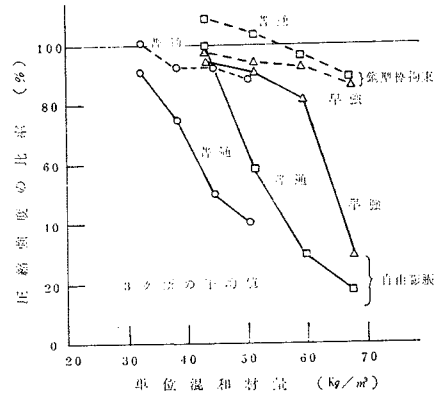


図-12 拘束が圧縮強度におよぼす影響
(混和材 X の場合)

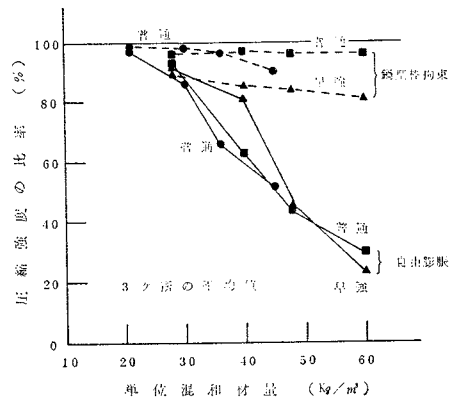


図-13 拘束が圧縮強度におよぼす影響
(混和材 Y の場合)

ンクリートに用いる材料および配合の選定に有用である。なお、PC鋼棒にアンカープレートを溶接して、端部から拘束する方法も標準方法となりうる。いずれの場合にも、拘束鋼材比は1%程度が適當と思われる。

(2) 拘束を与えた供試体の圧縮強度試験は、鉄製のシリンダー型枠へ詰めたコンクリートを脱型せずにそのまま水中養生し、所定の材令において脱型して試験する方法である。この試験によって、膨張コンクリートにおけるセメントの品質や水セメント比の変動を検出することも可能であって、管理試験方法として有用である。なお、自由膨張強度は、膨張混和材の性質やその使用量の変動に敏感であるので、管理試験としては両方法を併用する必要がある。

参 考 文 献

- 1) Tentative method of Test for Restrained Expansion of Chemcomp Cement Concrete, July 1968, Chemically Prestressed Concrete Corporation.
- 2) 辻 幸和：ケミカルプレストレスの推定方法について、セメント技術年報 XXVII, 1973, セメント協会
- 3) 国分・鈴木・辻：一軸拘束によるコンクリートのケミカルプレストレスに関する基礎研究，土木学会第26回年次学術講演会講演集，昭和46年（1973.10.15・受付）