

## 膨張セメントの膨張圧に影響をおよぼす諸要因

### FACTORS INFLUENCING EXPANSION PRESSURES OF EXPANSIVE CEMENTS

小林 一 輔\*・伊藤 利 治\*\*  
By Kazusuke Kobayashi and Toshiji Ito

#### 1. はしがき

膨張性セメント混和材の利用目的を大別すると、一つはコンクリートの収縮ひびわれの防止であり、もう一つはコンクリート部材に対するケミカルプレストレスングである。

本文は、膨張性セメント混和材を後者の目的に使用する場合にきわめて重要な要素である膨張圧とこれに影響をおよぼす諸要因について実験的に検討したものである。

膨張性セメント混和材を用いたコンクリートの拘束によるケミカルプレストレスに關してはすでに内外を通じて数多くの研究<sup>1)~5)</sup>が行われ、それぞれ貴重な知見が得られているが、これらの大半は一軸拘束によるケミカルプレストレスを扱ったものである。拘束方法として一軸拘束はケミカルプレストレスの他に、拘束下におけるコンクリートの強度、弾性係数またはクリープなどの測定も行える点で、コンクリート部材に対するケミカルプレストレスングを検討する上では最も基本的な拘束方法であるが、材料としての膨張性混和材の機能を把握する目的からは、本研究で採用したような三軸拘束による方法が、養生条件や拘束条件の一様性が確保しやすい点で適しているものと考えらる。

本研究ではまず膨張圧の測定方法について検討を加えて上記の目的に適する測定方法を確立し、ついでこの方法を用いて膨張圧に及ぼす膨張性混和剤量、コンクリートの配合、乾湿状態などの影響ならびにその経時変化について検討したものである。

#### 2. 使用材料

本研究の実験に用いた膨張性混和材は Calcium sulphoaluminate を主成分とするもの（以下、CSA と略称）であって、その化学成分は表—1 のとおりである。また、セメントは普通ポルトランドセメントを使用した。

本研究の実験はすべてモルタルを用いて行ったが、この場合骨材としては豊浦標準砂を用いた。

#### 3. 膨張圧の測定

著者らは膨張圧を以下のような方法によって求めた。すなわち、膨張性混和材を混入したモルタルまたはセメントペーストの試料を黄銅製円管内に封入し、エトリンガイトの生成によって円管表面に発生したひずみを測定し、このひずみが円管に作用する内圧（すなわち、膨張圧）によって生ずるものとして、下記の厚肉円筒式を適用して膨張圧（ $p$ ）を求めた。

$$p = \frac{(e_t + \mu e_z) E}{1 - \mu^2} (t/r + t^2/2r^2)$$

ただし、 $e_t$ ：円管表面における円周方向のひずみ

$e_z$ ：円管表面における軸方向のひずみ

$E$ ：円管材料のヤング率

$\mu$ ：円管材料のポアソン比

$t$ ：管の厚み

$r$ ：管の内径

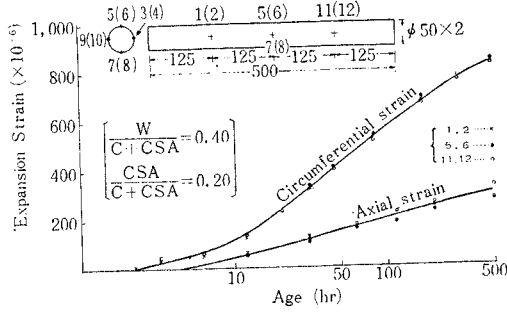
円管表面のひずみは抵抗線ひずみゲージにより測定した。試料の温度はすべての実験について  $20 \pm 1^\circ\text{C}$  とした。なお、比較検討のために、同時に製作した試料を用いて自由膨張を測定した。自由膨張量は薄いゴム製の氷のうに試料を封入し、水中天秤を利用して容積変化を浮力の変化におきかえて求めた。

表—1 膨張性混和材 (CSA) の化学組成

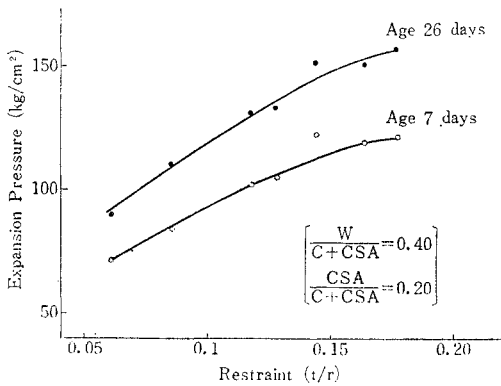
Ig. loss	insol.	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	free CaO	Total
0.9	1.4	1.4	13.1	0.9	47.8	0.5	32.2	19.4	98.2

\* 正会員 工博 東京大学助教授 生産技術研究所

\*\* 正会員 東京大学助手 生産技術研究所



図一 円管各部における膨張ひずみの分布

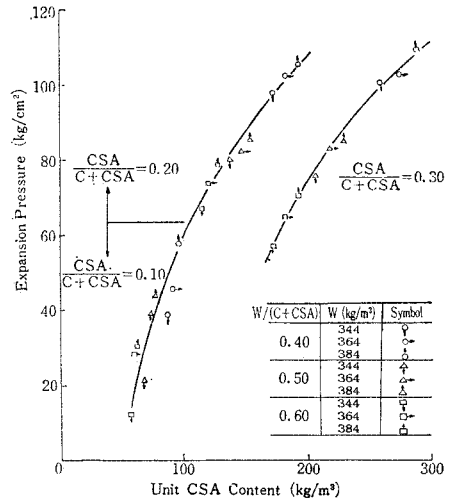


図二 拘束度と膨張圧との関係

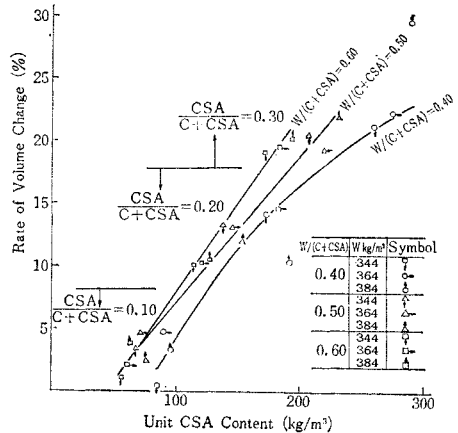
図一は  $r=44$  mm,  $t=3$  mm, 長さが 500 mm の円管にモルタル試料を封入し、円管各部における膨張ひずみの分布を調べるとともに、封入直後から材令 3 週に至るまでの円周方向および軸方向ひずみの経時変化を示したものである。この図より、測定個所による膨張ひずみの差はいずれの方向のものも比較的少ないことがわかる。一方、図二は円管の拘束度 ( $t/r$ ) と膨張圧との関係を示したもので、拘束度がある限度以下ではその大きさにほぼ比例して膨張圧が変化すが、その限度をこえて拘束度を増すと膨張圧の増加率が低くなり、線形関係は成立しなくなる。なお、円管の断面を一定としてその長さを変化させた場合における円管中央部における膨張圧を測定した結果、円管の長さが直径の約 25 cm 以上では膨張圧はほぼ一定値をとり、これ以下では端面拘束の不完全さによる影響で膨張圧がより低くなることが確かめられた。本研究では上記の実験結果を考慮して、以後の実験では主として  $t/r$  の値が 0.177, 長さが 25 cm 以上の円管を用い、ひずみはその中央部で測定した。

#### 4. 配合条件と膨張圧との関係ならびに膨張圧の経時変化

CSA を混入したモルタルの配合と膨張圧との関係を調べるために、CSA 混合率（セメントに対する重量百



図三 単位 CSA 量と膨張圧との関係 (材令 7 日)



図四 単位 CSA 量と自由膨張量との関係 (材令 7 日)

分率) が 10, 20 および 30% の場合について、それぞれ水セメント比および単位水量を変化させて膨張圧を測定した。図三は実験結果を示したものでこの図より次のことがわかる。

1) CSA 混合率が約 20% 以内では、膨張圧は CSA 混合率、水セメント比および単位水量のいかんを問わずコンクリート 1 m³ 当りの CSA 量によって決定される。すなわち、以上の範囲内における膨張圧と単位 CSA 量との関係は同一曲線上の点として表わすことができ、単位 CSA 量の増大とともに膨張圧も増す。

2) CSA 混合率が 30% の場合にも、膨張圧は水セメント比や単位水量のいかんにかかわらず、単位 CSA 量によってほぼ決まってくるが、両者の関係は前記の CSA 混合率が 20% 以下の場合の曲線とは別の曲線で示される。この曲線はあたかも CSA 混合率が 20% の場合の曲線をそのまま横軸に平行に移動せしめたような位置にあり、CSA 混合率はある一定の限度以上に増しても膨

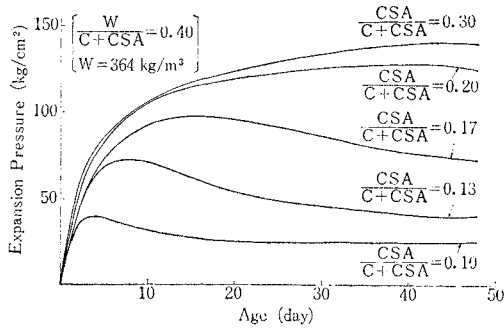


図-5 膨張圧の経時変化と CSA 混合率との関係

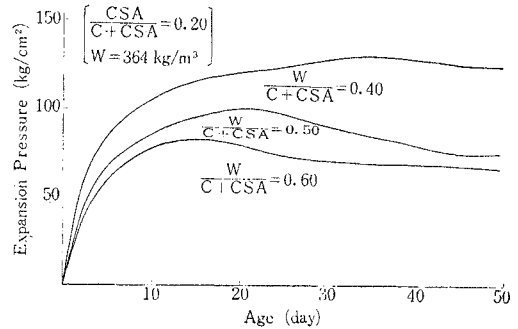


図-6 膨張圧の経時変化と水セメント比との関係

膨張圧はほとんど変化しないことを表わしている。この現象から、拘束条件下ではポルトランドセメントと反応してエトリンガイトを生成し得る CSA 量には限界がありこの限界はセメントに対する CSA の混合比率 CSA/C+CSA によって決定されることが推測できる。なお、上記の限界値は試料の拘束度によって左右され、たとえば、自由膨張の場合の実験結果を示した図-4 をみると、以上のような限界は認められない。

図-5 は CSA 混合率の異なるいくつかのモルタル試料について、膨張圧の経時変化を調べた結果である。

この図をみると、試料を密封し3軸拘束状態として膨張圧を測定した場合には膨張圧が最大となる材令があり、これ以後の膨張圧の低下は、ある期間を経過すると CSA の混和率に応じて決まるある一定値に落ち着くことが示されている。その値は配合、膨張材量によって異なるが、最大値の約 70% 前後である。膨張圧が最大となる時期および一定値をとる時期は CSA 混合率によって相違が異なり、CSA の混合率が大きくなるほどこれらの時期が遅くなる。

図-6 は水セメント比の異なるいくつかのモルタル試料について膨張圧の経時変化を調べた結果である。この図によると、材令に伴う膨張圧の変化は図-5 の場合と類似した傾向を示し、水セメント比が小さくなる時、すなわち単位 CSA 量が多くなる場合の膨張圧の時間依存特性は、図-5 における CSA 混和率が大きくなる時の時間依存特性によく対応している。

図-5 および図-6 において明らかにされたところ、膨張圧が一定期間後に低下する原因については、試料が密封状態にあることから、材令の経過に伴って生ずるクリープと自己乾燥によるものと推論される。

### 5. 膨張圧に及ぼす乾燥および湿潤の影響

密封状態で拘束した場合の膨張圧が一定期間後に低下する原因についてさらに検討するために、試料の乾燥および湿潤が膨張圧に及ぼす影響に関する以下のような実験を行った。すなわち、外側を黄銅管で拘束し、内部を中空とした試料を用いてこの部分から、i) 連続的に水分を補給した場合、ii) 中空部分を両端で閉じて密封状態とした場合、iii) 1週間水中養生を継続したのち湿度 50% の空中で乾燥させた場合、の3種の条件の下で膨張圧の変化を調べたもので、その結果を示したものが図-7 である。まず、連続して水分を供給した場合と密封状態においた場合の膨張圧を比較すると、後者では図-5~6 に示したと同様な傾向となっているが、前者では材令が経過してもほとんど膨張圧の低下を生じていない。

これは、密封状態においた場合の膨張圧低下の原因が不十分な水分供給に帰因することを裏付ける結果であると考えられる。一方、1週間だけ水分供給を行ったのち乾燥させると比較的すみやかに膨張圧が減少するが、これに再び水分を与えると膨張圧はかなり急激に回復する。この現象は、水分供給を継続したあと再び乾燥させた場合にも生じ、ある程度まで可逆的に行われるようである。

筆者らは、乾湿に伴う膨張圧の上記のような変化と、試料の内部組織との関係を調べるために、セメントペーストを用いて図-7 と同様な条件下で下記の測定を行った。すなわち、図-8 に示した①~⑤の条件ならば材令

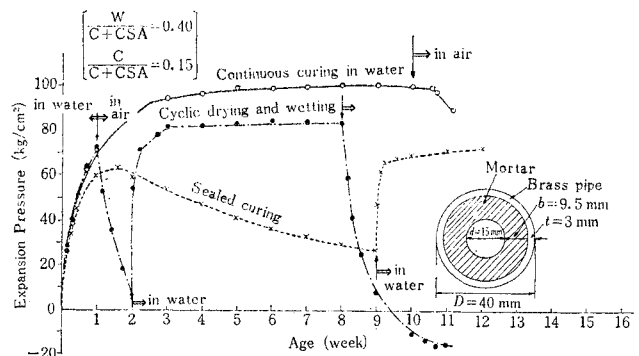


図-7 養生条件と膨張圧との関係 (モルタル試料)

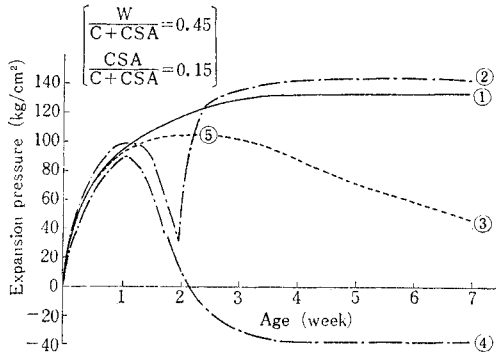


図-8 養生条件と膨張圧との関係  
(セメントペースト試料)

における試料について、水銀圧入式ポロシメータを用いて細孔径分布および開放空隙量を求めるとともに、X線回折試験によってエトリンガイトの生成量を調べた。

図-9 は以上の試料について求めた開放空隙量と膨張圧との関係を示したもので、開放空隙量の多い試料ほど膨張圧も小さくなっている。一方、試料の乾湿条件と開放空隙量との関係を見ると空隙量の小さい順から、①および②(水中養生)→⑤(密封養生で膨張圧が最大となったとき)→③(密封養生で膨張圧が低下したとき)→④(水中養生1週間後空中乾燥を継続したもの)、となり、開放空隙量は水分供給の十分な水中養生を継続したものが最小で、乾燥を継続したものが最大値を示し、密封養生のものはこれらの中間の値となっている。以上の結果は、密封養生の場合における膨張圧がある時期より低下しはじめる原因が、水分の供給不足による内部乾燥によるという推論を一応は裏付けているが、この点についてさらに詳細に検討するために上記の各試料について細孔径分布を求めた。図-10 はその結果を示したもので、まず水中養生を継続した試料1はその大半が細孔径半径  $75 \sim 750 \text{ \AA}$  程度の細孔によって占められており、これ以上の粗い空隙はほとんど見当たらない。一方、水中養生を1週間行ったのち空中で乾燥を継続した試料4の細孔径分布を試料1の分布と比較すると、細孔径半径が  $75 \sim 240 \text{ \AA}$  程度の細孔がやや減じ、その代りに試料1ではほとんど認められなかった  $750 \sim 2400 \text{ \AA}$  程度の粗い空隙の量が全空隙量の約  $1/3$  程度を占めており、より粗大な  $2400 \sim 24000 \text{ \AA}$  程度の空隙も目立っている。

試料4の細孔径分布にみられたような細孔径の大きい空隙の増加は、密封養生を行って膨張圧がほぼ最大値を示したときの試料5の細孔径分布においてすでにその徴候があらわれており、同じ密封養生で膨張圧が低下した場合の試料3における細孔径分布では、乾燥させた場合の特徴である細孔径半径  $750 \sim 2400 \text{ \AA}$  程度のやや粗い空隙の量が急激に多くなっている。この結果は、密封養

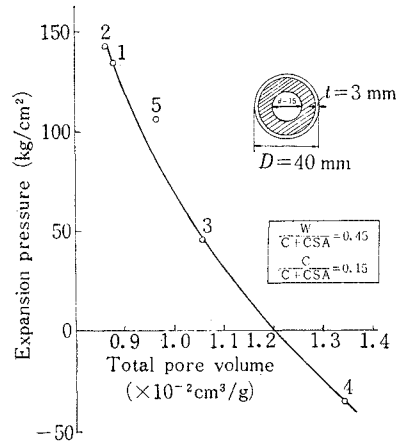
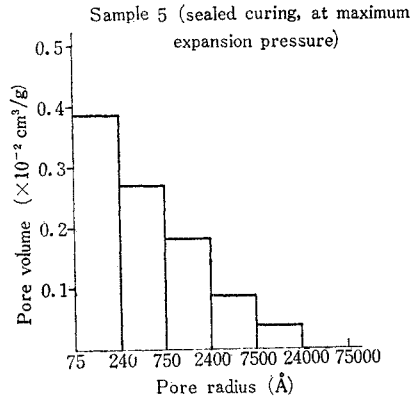
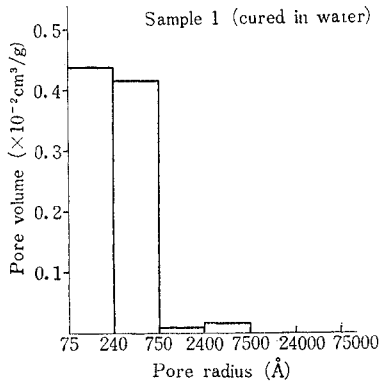


図-9 膨張圧と全空隙量との関係  
(セメントペースト量)

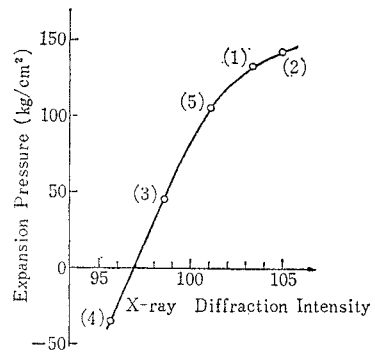
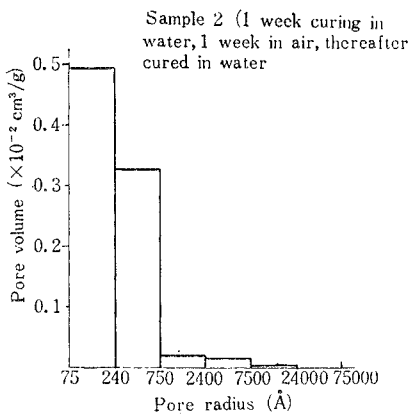
生を継続した場合に生ずる膨張圧低下の主な原因が乾燥による空隙の増大にあることを重ねて裏付けたものである。

一方、図-11 は上記の各試料について調べたエトリンガイト生成量と膨張圧との関係を示したものであって、これを見ると、水中養生を1週間行ったのち空中で乾燥を継続した膨張圧の最も小さい(負圧となっている)試料4のエトリンガイト生成量が最も少なく、水中養生を継続した膨張圧の大きい試料1および2ではエトリンガイト生成量も多くなっている。

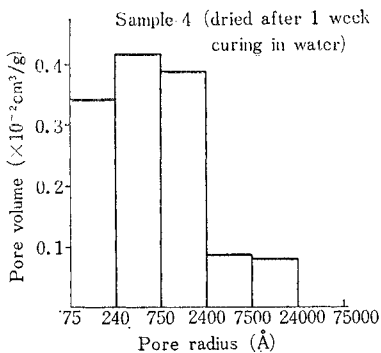
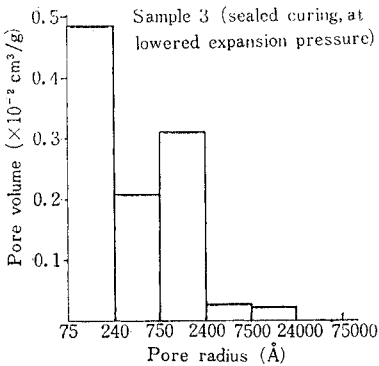
すなわち、図-11 より一定量の CSA を混入した試料の膨張圧は乾燥および湿潤などの養生条件のいかんを問わず、ほぼエトリンガイト生成量によって支配されることが明らかとなった。なお、図-11 において認められる特異な現象は、密封養生の場合において膨張圧がほぼ最大となったときの試料5におけるエトリンガイト量と、さらに材令が経過して膨張圧が低下したときの試料3におけるエトリンガイト量を比較した場合、後者のほうがエトリンガイト量が少なくなっていることである。このことは膨張圧の経時変化が養生条件のいかんを問わずエトリンガイト量の変化に依存することを示している。このように、いったん生成したエトリンガイトが部分的にもせよ消失する原因に関しては、現在のところ明らかでないが、おそらくは近藤らが指摘するように<sup>9)</sup> 乾燥によってエトリンガイトの一部が結晶水の一部を失って非結晶性の  $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$  になるためと推察される。なお、このような状態の試料に水分を与えるとエトリンガイトが容易に再成され、試料は再び膨張することが明らかにされている<sup>7)</sup>。図-7 において認められるような、乾燥状態の試料に水分を供給すると比較的急激に膨張圧が回復する現象は、上記のような理由に基づくものと考えられるが、さらに今回の水銀ボロ



図一10 細孔径分布



図一11 膨張圧とエトリンガイト量との関係



シメータによる細孔径の測定範囲からはずれた 75 Å 以下の細孔分布とも密接な関係があるものと推測される。今後はこれらの点について解明を進めることが必要である。

## 6. む す び

膨張セメントの膨張圧に関して、本実験により次のことが明らかになったと考える。

(1) 膨張圧の大きさは、一般に使用される範囲の水セメント比、単位水量、セメントに対する膨張材の混和比率においては、これらの値のいかんを問わずほぼ単位膨張材量によって支配される。ただし、セメントに対する膨張材の混和比率がある限度より大きくなると、単位膨張材量を増しても膨張圧はほとんど増加しない。

(2) 密封状態で拘束した場合の膨張圧は、はじめは材令とともに増加するが、ある材令を経過すると次第に低下し、やがてある一定値に落ち着く。膨張圧が低下し始める時期は水セメント比が大きいほど、セメントに対する膨張材混合率が小さいほど早期となる。

(3) 水分供給の差による膨張圧の変化は、水銀ポロシメータによって求めた開放空隙量の変化と密接な関係

があり、開放空隙量の多いものほど膨張圧は小さくなる。

(4) 一定量の膨張性混和材を使用して、一定期間養生を行ったのちにおける乾湿の養生条件の差による膨張圧の変化は、エトリンガイト量と密接な関係があり、エトリンガイト量の多いものほど膨張圧が大きい。

おわりに、ポロシチーの測定ならびにX線回折試験に関して多大のご協力を頂くとともに、実験結果について貴重な助言を賜った新日鉄化学工業(株)の阪本好史博士に深謝する。

#### 参 考 文 献

- 1) A. Klein, T. Karby and M. Polivka : ACI Journal, July, 1961, pp. 59~82
- 2) V. Bertero and M. Polivka : Proceedings, ASTM, Vol. 64, 1964, pp. 797~815.
- 3) V. Bertero : ACI Journal, No. 2, Feb. 1967, pp. 84-96
- 4) 長滝他 : セメント技術年報, No. 24, 1970
- 5) 岡村・辻セメント技術年報, No. 26, 1972  
1969.
- 6) 近藤連一・中川晃次・磯貝 純 : 窯業協会誌, 77, 238-48
- 7) M. Okushima, R. Kondo, H. Muguruma and Y. Ono. : Proc. 5th Int. Symp. Chemistry of Cement, Tokyo, Vol. IV, p. 419~438, 1968.

(1973.8.17・受付)