

ケミカルプレストレスト軽量コンクリートの研究

竹本 靖

概 要

セメント膨脹剤 CSA と人工軽量骨材を組み合わせたケミカルプレストレスト軽量コンクリートの実用化への可能性を探るため、種々の基礎的性質、すなわち、本材料の膨脹特性におよぼす CSA 混入率、養生条件、骨材の種類、骨材の含水率、鋼棒による膨脹拘束などの影響について実験を行なった。その結果、上記組み合わせに対して当初予想された各種の性状が裏づけられると共に、今後本材料を実用化するに際して、なおいっそう究明しなければならない問題点のいくつかが明らかになった。

1. まえがき

乾燥収縮の問題で常々頭を痛めているコンクリート技術者が、かつてはセメントバチルスとして忌み嫌われたコンクリートの膨脹割れの原因となる一種のカルシウム塩に目をつけたのは、かなり古いことであるが実際にその利用法について具体的な研究が行なわれるようになったのは、その成分および水和反応の過程が明らかとなり、実験室的に製造されるようになった数年前からのことである。

現在、CSA として市販されているカルシウムスルフォアルミネートは、その水和反応に際して大量の結晶水を取り、硬化と共に自己の体積を著しく増す。したがって、これをセメント中に適当に混ぜ合せ、コンクリートあるいはモルタルとして練れば、いわゆる膨脹コンクリート（モルタル）となる。この特異な性質を持つセメント製品の用途は：1. 無収縮あるいは収縮補償セメントとして、乾燥収縮による体積減少やひび割れ発生を防ぐ；2. 鋼材などによって膨脹に拘束を与え、生じた圧縮応力で引張および曲げ抵抗力を高める、いわゆるケミカルプレストレスリングもしくはセルフストレスリング；の2種である。

収縮補償目的では、すでにいくつかの施工例があり非常に効果的とはいえないまでも、ある程度の実績が上っているのに対し、ケミカルプレストレスリングの面では研究の歴史もごく浅く、本格的な実施例はまだ見られない。

さらに、膨脹セメントに軽量骨材を組み合わせたケミカルプレストレスト軽量コンクリートについては、2種の素材の性質から見て、きわめて有望な複合材料と期待されながら、まだその基本的な特性が明らかにさ

れていない。

本研究ではこのケミカルプレストレスト軽量コンクリートの応用開発のために、若干の実験を行なって、その基礎的性質を確かめることとした。

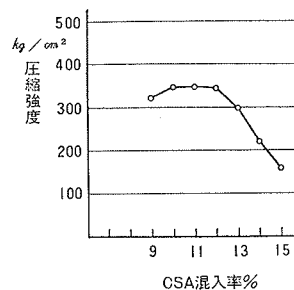
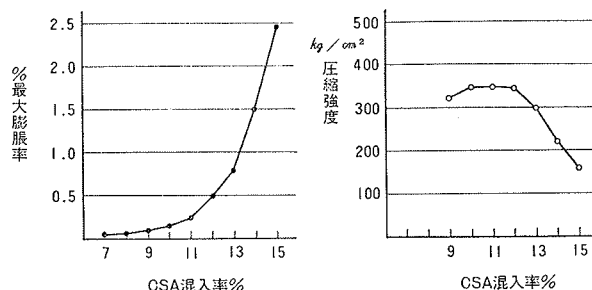
2. CSA 混入率別モルタル膨脹試験

膨脹コンクリートの膨脹特性を左右する最大の要素が、CSA のセメントに対する混入率であることは、すでに数多くの実験で確かめられている。本研究の各シリーズ実験に適用する CSA 混入率をあらかじめ決めておくため、モルタル供試体によって、種々の混入率と膨脹率の関係を得ることとした。

その結果を、図一1、2に示す。本供試体の仕様は、以下のとおりである。

形状 4×4×16cm角柱型
材料 セメント：普通ポルトランドセメント
砂：豊浦標準砂
配合 セメント+CSA 2：砂4：水1（重量）
CSA 混入率 0, 7, 8, ……14, 15%
（セメント内割、計10種）

養生 最大膨脹に達するまで水中養生



図一1 混入率—膨脹率曲線 図一2 混入率—強度曲線

図から明らかなように、CSA混入率13~14%で、膨脹率は飛躍的に増大する。一方、材令4週での圧縮試験によれば、逆にその附近から強度の低下がはなはだしくなる。以後の諸実験では、この最も微妙な領域である13~14%をもって、セメントに対するCSAの内割混入率と定めた。

3. 骨材別無拘束コンクリート膨脹率試験

膨脹コンクリートの膨脹特性を左右する第2の要素として、打設後若材令での養生条件、とりわけ養生水の補給いかんが挙げられている。実際の構造物では、完全な湿潤養生が期しがたいので、CSAの適当な混入率にもかかわらず、ケミカルプレストレスングに必要な膨脹量が得られるとは限らない。ところが、骨材に軽量骨材を用いると、その吸水性にもとづく自己養生が膨脹の促進に有効に働くものと期待できる。

この点を確かめるため、CSA混入率、セメント分量、水セメント比、養生条件を一定として、骨材を天然砂および天然砂利と人工軽量骨材に分けて、膨脹特性ならびに強度を比較した。

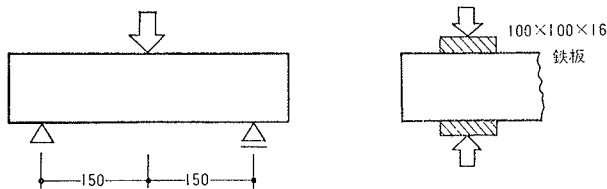
3.1. 試験方法

10×10×40cm角柱型供試体を用い、骨材によって次の種類に分けた、A、天然砂利と天然砂、B、人工軽量骨材（造粒型）と天然砂、C、粗細共人工軽量骨材。コンクリートの配合を表一1に示す。

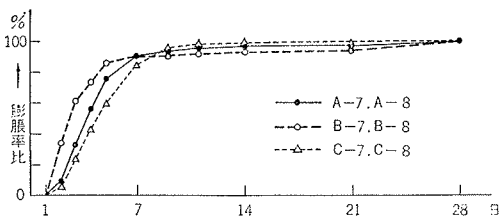
養生は、材令1日で脱型、原長測定後、各シリーズとも半数を、20℃水中養生、残り半数を、17~19℃55~65%RH空気中養生とした。

膨脹率の測定は、供試体中央の両側面にポイントを貼りつけ、たてよこ4点づつコンタクトゲージ（測定長、6cm）を用いて行なった。

各シリーズとも、材令2、4、7、14、28、91日で



図一3 曲げ・圧縮試験



図一4 材令一膨脹率比曲線（水中養生の場合）

	セメント	CSA	水	粗骨材	細骨材	スランプ
A	普通	内割	w/c=	川砂利	川砂	16.2
B	ボ・セ	14%	40%	人軽骨	川砂	12.4
C	430	70	200	人軽骨	人軽骨	18.0

表一1 コンクリート配合 kg/m³

図一3に示すような方式により、曲げ試験、次いで圧縮試験を行なった。

3.2. 試験結果と考察

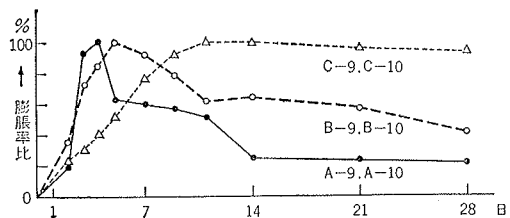
A, B, C, 各シリーズについて、4週まで測定した供試体の膨脹・収縮率を、それぞれ最大膨脹率に対する百分率で表し、図一4（水中養生）、図一5（空気中養生）に示す。各材令での曲げ引張および圧縮強度を、表一2に示す。

図から分かるように、水中養生を行なったものは、A, B, C いずれも、その膨脹速度、膨脹期間に本質的な差がないが、空気中で養生したものでは、Aシリーズすなわち天然骨材だけを用いたコンクリートは、外部からの水分補給がないため、短期間にわずかな膨脹をする（ 5×10^{-4} 程度）のみで、すぐ乾燥収縮に転ずるのに対し、粗細とも人工軽量骨材としたCシリーズのコンクリートは、膨脹生命が長く、水分補給がなくとも、ある程度の永久膨脹歪みを残す（約 20×10^{-4} ）。

軽量骨材の自己養生効果の存在は、以下の事実からも推察できる。

各シリーズとも1体（No. 4）は材令5日で水中から空気中へ、1体（No. 14）は同じく空気中から水中へ、それぞれ養生方法を転じた。乾気中から水中へ転じたものはいずれもその後、急激な膨脹を生じて、数日後には、養生開始当初より水中にあったものと同程度の膨脹率に達したが、A-14供試体は、表面に無数の膨脹ひび割れを生じた。B-14, C-14の表面は特に変化がなかった。

これは、初期から水中養生した場合と違って、ある期間（この場合4日）空気中で、CSAによる膨脹があまり起らないまま硬化が進み、その後水中に浸されることで表面に近い部分のみが急激に膨脹しようとし、内部の硬化したコンクリートの抵抗を受けて、膨脹ひび割れとなったものと考えられる。B, Cシリーズの



図一5 材令一膨脹率比曲線（空気中養生の場合）

ものは、空気中にあった4日間ではまだ骨材の保有水による膨脹が終っておらず、水中に移されてからの急速な膨脹に連続的に追従できる、いわば膨脹生命があり、ひび割れに至らなかったものであろう。

一方、材令5日で水中から空気中に出されたC-4は、表面が、乾燥のため膨脹を終え、さらに収縮を始めようとするのに対し、内部コンクリートがその保水性のゆえに、依然膨脹を続けようとし、結局表面に引張ひび割れを生じている。A-4ではこのひび割れはなく、B-4はC-4に準じて一部ひび割れが出た。

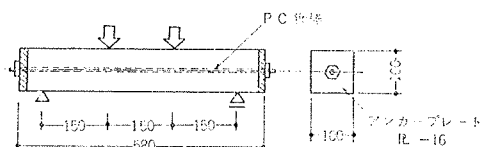
以上2つの現象と同じ理由により、材令28日での強度試験で、A-14の圧縮強度低下、B-4、C-4の曲げ引張強度低下がはっきりと現れている。

供試体番号		7	8	10	9	4	14	
養生方法		水	中	空気中	水→気	気→水		
材令(日)		28	91	28	91	28	28	
シリーズ	A	σM	51	58	56	41	35	44
		σC	469	499	427	407	444	367
	B	σM	60	63	54	66	39	60
		σC	459	450	397	415	434	415
	C	σM	36	40	34	40	24	34
		σC	233	266	303	285	266	220

表一 2 曲げ引張・圧縮強度 kg/cm²

4. 拘束コンクリートの膨脹率と曲げ試験

人工軽量骨材を用いた CSA コンクリートの自由膨脹(拘束なし)試験に引続いて、PC 鋼棒によって供試体に一軸拘束を与えた場合の膨脹・セルフストレス効果を実験的に確かめることとした。



図一 6 供試体および載荷形式

供試体番号	拘束		鉄筋比
	鋼棒		
01, 02, 03	なし		0
11, 12, 13	4種	1-10φ	0.64%
41, 42, 43	PC鋼棒	1-14φ	1.30%

表一 3 供試体の種類

普通ポルトランドセメント	CSA (14%)	水 (w/c=35%)	人工軽量骨材	
			粗(造粒型)	細
430	70	175	445	509

表一 4 コンクリート配合 kg/m³

4.1. 試験方法

供試体の形状および種類を、図一6、表一3に示す。

コンクリートの配合は表一4に示すとおりであるが、軽量骨材は粗細とも、24時間のプレウェッティング後表乾状態まで乾燥して計量した。コンクリート打設後約24時間で脱型、原長を測定の上、材令7日まで(供試体 No. 1, 2)と28日まで(No. 3)、20°C水中養生し、その後、18~20°C、55~65%RH 空気中養生した。

膨脹率の測定は、供試体中央の両側面に、ポイントを貼りつけ、軸方向4点ずつ、コンタクトゲージ(測定長10cm)を用いて行なった。

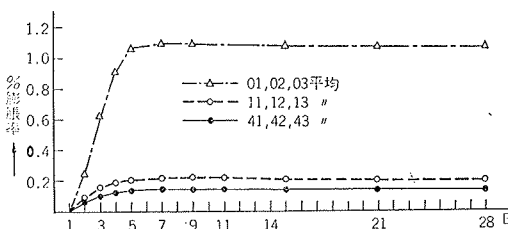
材令7日(No. 1)、28日(No. 2)で図一6のように梁式曲げ試験を行い、ひび割れモーメント、破壊モーメント、たわみを測定した。

鋼棒による一軸拘束供試体の場合、曲げひび割れの発見で荷重を下し、その部分にワイヤーストレインゲージを貼りつけ、再び載荷、同ゲージの荷重一ひずみ曲線を得て、その不連続点からひび割れ再開荷重(すなわち、プレストレスが曲げによる縁引張力と相殺される瞬間の荷重)を判定できるようにした。その後、載荷を続けて、曲げ破壊に至らした。

4.2. 試験結果

各供試体の材令-膨脹率曲線を図一7に、それぞれの最大膨脹率および最終膨脹率を表一5に示す。これら膨脹率は、梁軸方向4点の測定値平均である。

表一5には、それぞれの曲げひび割れ荷重、曲げ破壊荷重も掲げてある。



図一 7 材令-膨脹率曲線

No.	最大膨脹率		最終膨脹率		曲げひび割れ荷重 (kg)	曲げ破壊荷重 (kg)
	材令(日)	%	材令(日)	%		
01	7	1.20	7	1.20	484	
02	9	1.13	28	1.12	472	
03	28	1.03	193	1.00	未実施	
11	7	0.20	7	0.20	1600	3480
12	7	0.22	28	0.20	1300	3770
13	9	0.21	193	0.19	未実施	
41	7	0.14	7	0.14	2000	3760
42	8	0.14	28	0.13	1700	5090
43	30	0.14	193	0.12	未実施	

表一 5 膨脹率と試験結果

4.3. 考察

4.3.1. 自由膨脹と被拘束膨脹の比 拘束度の異なる2種の供試体の膨脹率を、無拘束体の自由膨脹と比べ

ると、以下のようになる。

供試体No.	02, 03	12, 13	42, 43
拘束	なし	1-10φ	1-14φ
膨脹率比	1	0.20	0.13

いずれも膨脹量の80%以上がロスとなっているが、これは比較的大きい膨脹（1%以上）がコンクリートをルースにすることによって実現するため、鋼棒の拘束に抗して伸びうる剛性には欠けるからであろう。

4.3.2. コンクリートのプレストレス 拘束供試体
コンクリートに導入されるプレストレスは、測定したコンクリート膨脹率（ひずみ）が、内部鋼棒の伸びと同量であると仮定し、次式で計算する。

$$\sigma_{e1} = P_t \cdot E_s \cdot \varepsilon \dots \dots \dots (1)$$

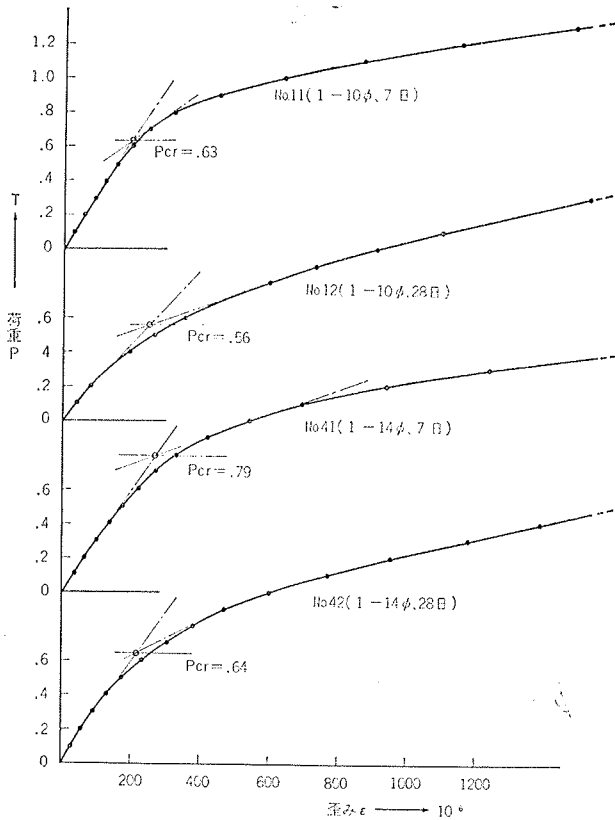
ここに、 σ_{e1} ：コンクリートプレストレス kg/cm²

P_t ：鋼棒の鉄筋比

E_s ：鋼棒弾性係数 2.0×10⁶ kg/cm²

ε ：鋼棒伸びひずみ

表一五の最終膨脹率から算出したプレストレス計算値 σ_{e1} を表一六に示す。



図一八 荷重ひずみ曲線

一方、梁曲げ試験に際し、第1回載荷時発生 of 曲げひび割れをまたいで貼ったストレインゲージから、ひび割れ再開モーメントを測定し、次式で実在プレストレスが計算できる。

σ_{e2} ：コンクリートプレストレス kg/cm²

M'_{cr} ：ひび割れ再開モーメント kg・cm

Z ：供試体断面係数 cm

とすれば、
$$\sigma_{e2} = \frac{M'_{cr}}{Z}$$

したがって、 $\sigma_{e2} = 0.045 \cdot P'_{cr} \dots \dots \dots (2)$

ここに、 P'_{cr} ：ひび割れ再開時荷重 kg

鉄筋比		0.64%			1.30%		
No.		11	12	13	41	42	43
プレス	σ_{e1}	26.3	25.7	24.6	36.9	33.5	30.2
	σ_{e2}	28.4	25.2	—	35.5	28.8	—

表一六 コンクリートプレストレス kg/cm²

各梁の第2回載荷時の荷重—ひずみ曲線を図一八に掲げる。また、(2)式から得たプレストレス値 σ_{e2} を、表一六に σ_{e1} と並べて示しているが、両者は、かなりよく一致している。

4.3.3. コンクリート強度 表一五に掲げた曲げ破壊荷重から、断面の平面保持を仮定してコンクリートの圧縮強度を算出し、無拘束供試体の圧縮試験結果と比べると、以下のようになる。

無拘束体	01：145	(材令7日)
	02：226	(材令28日)
被拘束体	11：337	41：294 (7日)
	12：379	42：449 (28日)

普通、CSA を加えないで、本供試体程度の配合とすれば、350~400kg/cm²の28日強度となるので、無拘束供試体の大幅な強度低下の原因が、1%にも達する自由膨脹にあることは明らかである。ところが、被拘束体では、若干の伸びがあるにもかかわらず、ほとんど強度低下が見られない。鋼棒の拘束によって、一種の加圧養生を受けたとみなすことができよう。

4.3.4. 乾燥収縮とクリープ 供試体 No. 03, 13, 43, は長期間にわたって乾燥収縮およびクリープを測定するため、恒温・恒湿で保管しているが、それぞれの最大膨脹時から最終測定時に至る供試体の収縮率を表一四から求めると、次のようになる（単位%）。

03：0.023	13：0.021	43：0.027
----------	----------	----------

無拘束体 No. 03 の値を乾燥収縮とすれば、No. 43 でクリープ値が0.004%、No. 13 に至っては、符号逆転恐らく測定誤差の範囲に入ったものであろう。

建築学会のPC設計規準にあるクリープ計算式を用いて本供試体の場合を算出すると、いずれも0.02~0.04%となり、実験値を大幅に上まわる。拘束を受けながら膨脹する際に、コンクリート組織内にすべりが生じれば先行クリープが発生することによって、硬

硬化後のクリープ量を減少させるものと思われる。

5. 軽量細骨材の含水率変化と膨脹率

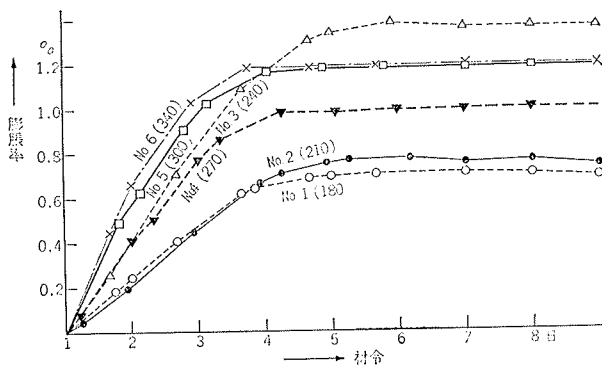
軽量骨材に含まれる水分が、CSAコンクリート・モルタルの膨脹性状に影響を持つことは、先の実験で明らかとなったが、混練水量と含水量の比率によってコンクリート・モルタルの膨脹性状がどれだけ左右されるか、という点に着目し、軽量細骨材を用いたモルタル供試体によって、全水量（混練水プラス骨材保有水）を一定とし、細骨材をほぼ表乾状態から絶乾状態まで変えてその膨脹量を測定した。

5.1. 試験方法

4×4×16cm角柱型モルタル供試体として、人工軽量細骨材の含水量により以下の6種類を製作した。

番号	1	2	3	4	5	6
含水	160g	130	100	70	40	0
混練水	180	210	240	270	300	340

セメント成分は550gの一定、うち、CSAが77g（14%）、軽量細骨材は絶乾状態（デシケーターで乾燥）で740g、全水量のセメント成分に対する比は、62%となっている。成型後24時間で脱型、原長測定後、20±0.5°C水中養生とした。膨脹率の測定は、コンパレーター（測定長10cm）によった。材令7日で水中からとり出し、以後20±1°C、60±5%RH空气中養生とし、測定を続けた。



図一 含水比別材令一膨脹率曲線

5.2. 試験結果と考察

図一に、各供試体の材令一膨脹率曲線を掲げる。全水量のうち、あとから加えた混練水の割合の高い供試体程、一般に膨脹率・膨脹速度とも高くなるという傾向が現れている。すなわち、細骨材中に含まれていた水分は必ずしも全部が、CSA結合水として有効に働くわけではない、ということが分かる。

なお、以後、空气中養生での乾燥収縮については、次表に見るとおり、特に水量比の影響が出ていない。

番号	1	2	3	4	5	6
収縮率	.085%	.108	.076	.061	.087	.070

6. むすび

膨脹剤 CSA と人工軽量骨材をあわせ用いた膨脹軽量コンクリートに関する4種の実験から得られた結果をまとめると：

- A. 他の条件が等しければ、モルタル・コンクリートの膨脹率は、CSAの混入率で決まり、その関係は安定していて、再現性が高い。
- B. 圧縮および曲げ強度は、混入率12%程度、膨脹率にして0.5%程度まではあまり変らないが、膨脹率の急増とともに、著しく低下する。
- C. 軽量骨材を使用すると、骨材の乾燥状態により膨脹率が影響を受けるが、もし全水量を一定とすれば、混練水の多い方が膨脹率をより高くする。
- D. 外部からの養生水補給が少いか、あるいは全くないとき、軽量骨材の保有水がその膨脹特性に与える影響は大きくなる。すなわち、自己養生効果が現れてくる。
- E. 養生条件の時間的なずれにより、コンクリート表面に膨脹もしくは収縮きれつを生ずることがあるが、膨脹きれつにより圧縮強度が、収縮きれつにより曲げ強度が、著しく低下する。
- F. 自由膨脹が大きいと、被拘束膨脹も大きくなるが、その有効率は低下する。
- G. コンクリートに導入されるプレストレスについて、鋼棒の伸び量から計算した値と、梁曲げ試験から計算した値とは、よく一致する。
- H. ケミカルプレストレスングにより、本実験の場合、圧縮応力度として25~35kg/cm²が得られ、これは、梁の曲げひび割れ耐力を約2倍に高めたことになった。
- I. 圧縮強度も、拘束による加圧養生の結果、ある程度高められている。
- J. コンクリートが伸びに対する拘束を受けながら膨脹をするとき、その組織内で一種の「先行クリープ」が生じ、膨脹量を小さく押えるが、その結果、硬化後のクリープ量が通常のコンクリートより少くなる、という効果が現れる。
- K. 保有水・混練水の比率が変わっても、乾燥収縮には特に影響が見られない。