

# 膨張セメントコンクリートの性質 —セルフプレストレスと拘束養生の効果

## CHARACTER OF EXPANSIVE CEMENT CONCRETE —SELF-PRESTRESS AND AN EFFECT OF RESTRAIN CURING

神 山 一\*  
By Susumu Kamiyama

要 旨：凝結、硬化の過程で収縮を起さない膨張セメントペーストを用いたコンクリートの性質は、材料組織の欠陥が少なくなり、強度も大きく、優れている。しかしセメントペーストが過度の自由膨張を起すときは、過度の収縮が起るときと相似の現象が生じ、コンクリートの組織に欠陥を誘起する可能性がある。このために膨張セメントコンクリートの特徴を生かすためには膨張変形拘束養生が必要である。膨張変形を拘束して養生することにより、ある程度のセルフプレストレスが導入され、また膨張変形拘束圧力によってコンクリートの組織が改善されるものと推察され、両者の和が強度増加その他の効果として現われる。この報告は膨張セメントペーストの自由膨張、セメントモルタル、セメントコンクリートの膨張拘束養生の効果、セルフプレストレスの大きさなどについての実験結果を要約したものである。

### 1. 膨張セメントペーストの自由膨張

膨張セメントペーストの自由膨張特性がモルタルあるいはコンクリートの膨張特性と直接に関係があるわけではない。しかし、普通セメントペーストの収縮特性と膨張セメントペーストの膨張特性とを比較検討しておくことは、セメントモルタルおよびセメントコンクリートの膨張特性や拘束養生の効果の判断、セルフプレストレスの発生機構を考察するときの手がかりになる。

自由膨張率の測定方法には試料を直接に水に接触させる方法と水を遮断して測る方法とがある。膨張セメントペーストは初期に膨張が起こるので、型わくの中で初期膨張が始まることを考慮して後者の方法を用いた。後養

Table 1 Tested Cement Paste

Type of Cement; Normal Portland Cement
Expansive Admixture; DENKA CSA, 11, 13, 17%
Water-Cement Ratio; W/C=30, 35, 40%
Curing Temperature; T=20, 40, 60°C

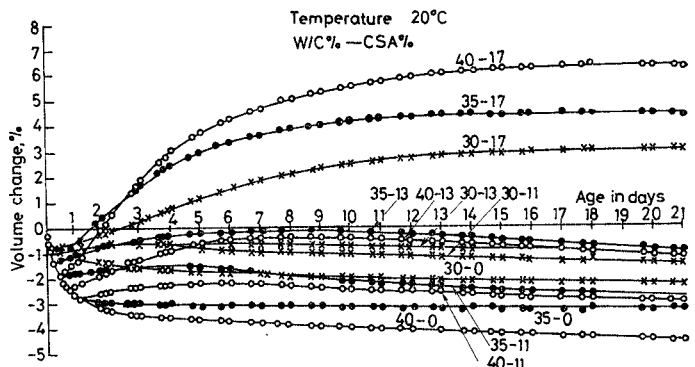


Fig. 1 Volume change of cement paste

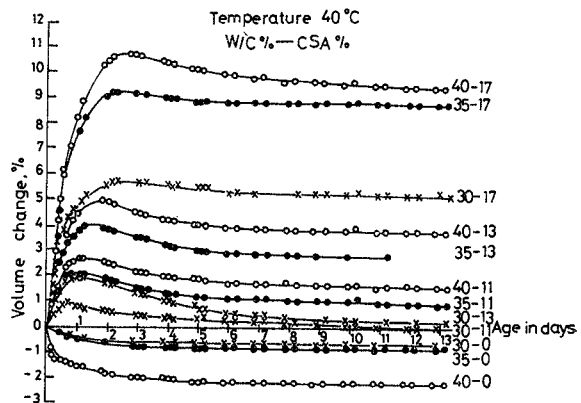


Fig. 2 Volume change of cement paste

\* 正会員 早稲田大学教授 理工学部土木工学科

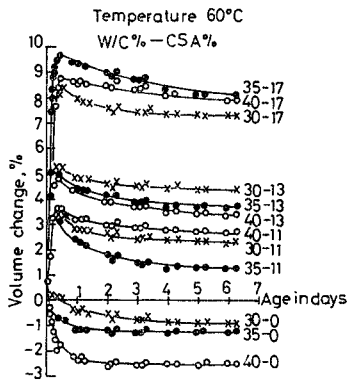


Fig. 3 Volume change of cement paste

生を対象とすれば前者の方法がよい。本試験では練りまぜ直後に薄ゴム製の氷のうに試料を入れ、空気を追い出した後に、密閉し、水中重量を測定した。水温による氷のうの水中重量の変化を測定し、試料の水中重量を補正して収縮率、膨張率を求めた<sup>1)</sup>。水中重量測定用水槽は恒温水槽を用い、1~3 週間の測定期間中、同一水槽を使用した。セメントペーストの配合、その他は Table 1 のとおりである。試料の恒温水中重量は練りまぜ後 10 分以内に測定を始めたので、試料の温度と水槽水温とが一致しなかったが、この影響は無視した。セメントペーストの練り温度は 18~20°C、養生水温は 20, 40, 60°C の 3 種である。

時間と容積変化の關係の測定結果を Fig. 1~3 に示した。Fig. 1 は水温 20°C、Fig. 2 は水温 40°C、Fig. 3 は水温 60°C の測定結果である。収縮率、膨張率は養生水温が低く、膨張材混和率が少ないほど小さく、安定している。養生水温が 60°C の場合は急激な膨張が起こり、膨張率も大きい。時間の経過に伴って膨張率の低下が起こり、不安定な容積変化であることを示している。膨張材混和率と最大容積変化率との關係を養生温度別に示したものが Fig. 4~6 である。養生温度 60°C の場合の最大容積変化率は不安定で、徐々に低下する傾向がある。

膨張セメントペーストの容積変化率の経過時間変化の様相を要約すれば Fig. 7 の曲線 ① と曲線 ② の二つに分類できる。この図は初期の容積変化率に重点をおいたもので、Fig. 7 の曲線 ② は養生温度 20°C の場合のような低温養生のときの膨張の様相である。Fig. 7 の曲線 ① は養生温度 40°, 60°C の場合のように、比較的高温養生の場合の膨張の様相である。養

生温度 20°C のときは、最初は普通セメントペーストと同様に収縮し、時間  $t_0$ 、収縮率  $v_0$  で膨張しはじめる。収縮から膨張に転ずる時間  $t_0$  と、このときの収縮率  $v_0$  は膨張材混和率を増せば減少する。養生温度 40°, 60°C では初期に明確な量の収縮を起こすことなく膨張ははじまる。しかし、初期に急激に起こった膨張は不安定で、後に低下しはじめる。

膨張セメントペーストの膨張率に影響する要因として膨張材混和率、養生温度、水セメント比をとり、要因分析した結果、それぞれの要因の寄与率は膨張材混和率が約 60%、養生温度が約 30% で、両者が 90% を占めている。また、セメントペーストの動ヤング係数に及ぼす要因の寄与率は、膨張材混和率が約 60%、養生温度と水セメント比、膨張材混和率と養生温度の相互作用がそれぞれ約 10% である。

膨張セメントペーストの自由膨張率、膨張の安定性からみれば、膨張材として CSA を用いた場合、混和率 13%、養生温度 40°C が良好である。

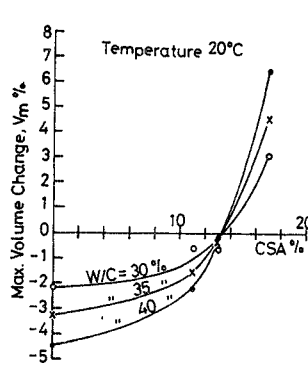


Fig. 4 Max. volume change of cement paste

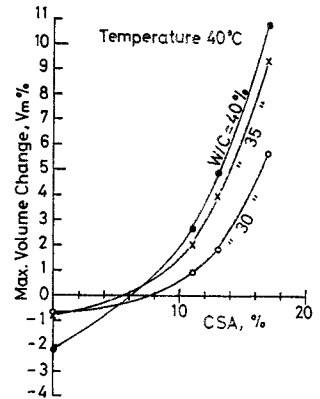


Fig. 5 Max. volume change of cement paste

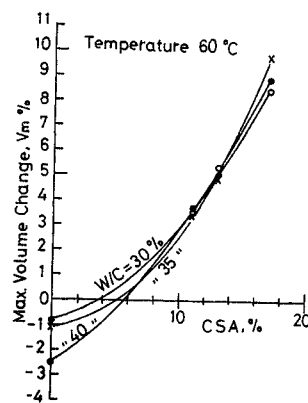


Fig. 6 Max. volume change of cement paste

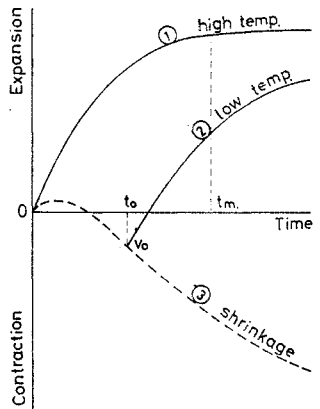


Fig. 7 Volume Expansion Curve of Expansive Cement Paste under Low and High Temperature

## 2. 膨張拘束養生の効果

セメントコンクリートの高温促進養生では膨張拘束が有効なことはよく知られている。オートクレーブ養生などはその一例である。膨張セメントコンクリートの養生でも膨張拘束養生の効果が有効であることは従来の実験、予備実験の結果に現われている。

コンクリート中のセメントペーストの変形拘束の方法には内部的なものと外部的なものがある。内部的な原因は骨材の影響や断面形状の影響などで、自然に起こるものである。外部的な方法は鋼棒や型わくによる変形拘束である。また、現場施工コンクリートの場合の目地や間詰めコンクリートなどは両側の硬化コンクリートによって膨張が拘束される。

膨張セメントコンクリートの自由膨張率は、骨材の容積変化が小さいと仮定すれば、コンクリート中のセメントペースト量によってきまると考えられる。すなわち、コンクリートの容積変化率は、

$$\epsilon_{vc} = V_p \cdot \epsilon_{vp} / (V_p + V_a) = V_p \cdot \epsilon_{vp} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、

$\epsilon_{vc}$  : コンクリートの容積変化率

$\epsilon_{vp}$  : セメントペーストの容積変化率

$V_p$  : コンクリート中のセメントペーストの容積率

$V_a$  : コンクリート中の骨材の容積率

$$V_c = V_p + V_a = 1.00$$

本実験に用いたコンクリート中のセメントペーストの容積率は  $V_p \doteq 0.25 V_c$ 、 $\epsilon_{vc} \doteq 0.25 \epsilon_{vp}$  となるはずである。 $\epsilon_{vp}$  を測定して計算した  $\epsilon_{vc}$  はコンクリートで測定した値よりはるかに大きい。すなわち、コンクリートの容積変化率はセメントペーストの容積変化率を用いて計算した値の数%にすぎない。これは骨材による膨張変形拘束によるものと考えられる。コンクリート中の膨張セメントペーストは骨材の変形拘束によって圧縮応力を受けていることが推察される。

使用方法や断面形状によっては自然に膨張変形を拘束することができる。使用方法の例としてアーチクラウンやスラブの間詰めコンクリートなどがある。隣接するコンクリートが硬化しているので、膨張セメントコンクリートの膨張拘束が容易にできる。同様のことがアンカーボルト孔などの充てんモルタルの場合にも起こる。プレキャストコンクリート管などは円周方向に起こる膨張が相互に拘束されるので、特殊な方法を行わなくても自然に拘束効果が現われる。しかし、このような自然拘束は特殊な断面形状の場合にのみ限定される。

鉄筋やP C鋼棒などによる膨張拘束は実用的な方法である。鉄筋とコンクリートとの付着抵抗、鉄筋のフック

あるいは鉄筋端の溶接定着板などによって、どの程度の膨張拘束ができるか、その効果をどのような方法で測定するかの問題がある。見かけの強度増加ということだけでは効果の内容が十分に理解できないので、セルフプレストレスの大きさ、コンクリートの組織変化の影響などを分離して検討する必要がある。

密閉型わく養生はプレキャストコンクリートの加熱養生時間の短縮と長期材令強度低下を防止することを目的とした養生方法である<sup>2)</sup>。加熱によるコンクリートの膨張を拘束し、膨張圧を利用して組織の改善を計るものである。前養生の必要はなく、養生温度が90~100°Cでも長期材令強度の低下はない。また、後養生による強度増加が見られる。これは密閉型わくによる加熱養生がコンクリート組織の安定のために重要な要因であることを示唆している。この方法によれば、プレキャストコンクリートの養生期間を著しく短縮できる。**Table 2** は実験結果の一例である<sup>2)</sup>。

**Table 2** Strength of Concrete Cured by Closed Forme (R. Malinowski)

The Later	Principal Curing Method (kg/cm <sup>2</sup> )		
	NC	HC-OF	HC-CF
Curing			
Conditions	20°C	90°C	90°C
	24 hrs, 28 days	8 hrs, 28 days,	4 hrs, 28days
Air	675	600	675
	450	418	430
Water	750	650	770

\*Note: NC=Normal curing 20°C, 70% R.H.  
 HC=Heat curing  
 OF=Open form  
 CF=Closed form

## 3. 鋼管による膨張拘束実験

鋼管に充てんして膨張拘束養生した膨張セメントモルタルの強度を調べる目的で行った実験である。内径 48 mm、肉厚 1.5 mm、長さ 1000 mm の鋼管内に、**Table 3** の配合の膨張セメントモルタルを充てんし、40°C の水中で 8 時間養生した後に約 24°C の水中で後養生した。後養生として水中養生した理由は温度保持が容易であるためである。強度試験は材令 14 日、21 日および 28 日で行った。供試体は直径の 2 倍の長さ 96 mm に切断し、モルタルを取出したものである。鋼管の両端は拘束したものと、しないものと区別した。鋼管の長さは内径の約 14 倍である。

膨張材混和率を大きい目にとったのは膨張拘束効果を知るため、水セメント比を 5% 変えたのは、その影響が現われるかどうかを確かめるためである。

圧縮強度は水セメント比 W/C=50% の場合は材令



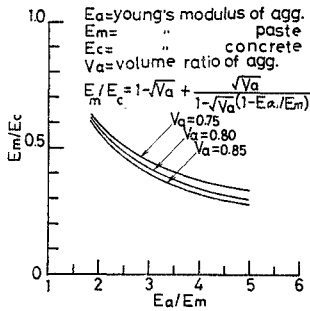


Fig. 8 Effect of elastic modulus of cement paste on elastic modulus of concrete

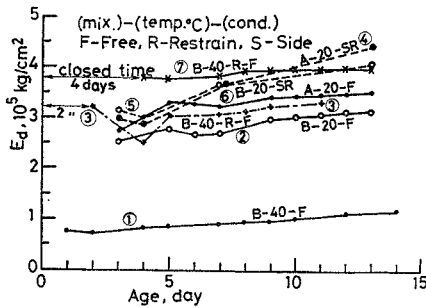


Fig. 9 Dynamic modulus of elasticity of expansive cement concrete (An effect of curing condition)

ンクリートの組織の変化を知るために動ヤング係数を測定した。養生温度を 20, 40°C とし、膨張拘束条件を変えて動ヤング係数と材令との関係を求めた。膨張材混和率は Table 4 に示した 2 種で、A が標準、B が過大なものである。その結果を示したのが Fig. 9 で、図の記号は (配合 A と B) — (温度) — (膨張拘束条件: 自由膨張を F, 拘束膨張を R, 側面拘束を S で表わした) を表わしている。強度、膨張率などは Table 5 の値になった。A-20°C-F, B-20°C-F はともに自由膨張の場合で、配合 A のほうが動ヤング係数が大きい。B-40°C-F は動ヤング係数が著しく小さく、膨張材混和率が大きい場合に高温で自由膨張させると、コンクリートの組織が著しく粗になることを示している。記号 SR (側面のみ拘束、略号) のものは型わく側面のみを拘束して養生したもので、自由膨張の場合よりも動ヤング係数が大きく、膨張拘束によってコンクリートの組織が改善されていることを示している。Fig. 9 の ③ と ⑦ は全面拘束の密閉型わく養生したもので、動ヤング係数が大きく、コンクリートの組織が緻密になっていることが推測される。コンクリートの組織が安定する前に拘束を解くと ③ の場合のように動ヤング係数が一度低下し、材令とともに回復する。組織が安定するまで拘束養生した ⑦ は、拘束を解除した後も動ヤング係数が低下することなく、ほぼ一定値である。過度の膨張材混和率のときでも大きい動ヤ

ング係数であることは、自由膨張の場合 ① と比較すれば明らかである。この原因は膨張拘束にあると思われる。密閉型わくによる膨張拘束養生が、緻密な組織のコンクリートを造るために重要な要因であることを示唆している。膨張混和材を用いる場合、用いない場合ともに高温促進養生に密閉型わくを用いれば、膨張圧力によって安定した緻密な組織のコンクリートが得られる。後養生を行えば動ヤング係数が低下しないことから、長期材令における強度増加が期待できる。膨張材を用い、密閉型わくによって高温促進養生を行えば、早期に安定した組織のコンクリートが得られ、後養生として温潤養生、水中養生すればさらに良好な結果が得られる。

### 5. コンクリートの膨張率

コンクリートの成形後 (15×30 cm, 15×120 cm 円柱形供試体) の膨張率を Fig. 10 の方法で、軸方向と直径方向の膨張を測定した。コンクリートの配合は Table 4 のもので、養生温度 20, 40°C, 自由膨張, 側面拘束養生, 三軸拘束養生の場合を比較した。自由膨張測定用供試体は表面乾燥を防止するために、サララテックス C 型を 3 倍希釈液として塗布した。膨張測定はコンクリート打込み後、5~8 時間ではじめた。

Fig. 10 の (A) と (B) は膨張を拘束したときのセルフプレストレス測定用の供試体である。(A)、(B) とともに側面は型わくで膨張を拘束し、(A) は軸方向の膨張を自由にし、(B) は軸方向の膨張を PC 鋼材で拘束した。(A) の軸方向膨張量はダイヤルゲージで、(B) の PC 鋼棒の伸びはコンタクトゲージで測定した。すなわち、Fig. 10 の (A) と (B) は側面拘束したときの軸方向の膨張量測定、セルフプレストレスおよび強度を調べることを目的としたものである。Fig. 10 の (C) と (D) は拘束がない場合と側面拘束のみがある場合の軸方向および直径方向の膨張量を測定するための供試体である。軸方向の膨張量は (C) に示したようにダイヤルゲージで、直径方向の膨張量は埋設したゲージプラグ間の距離をコンタクトゲージで測定した。したがって、直径

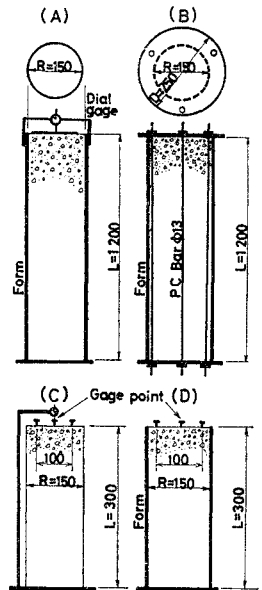
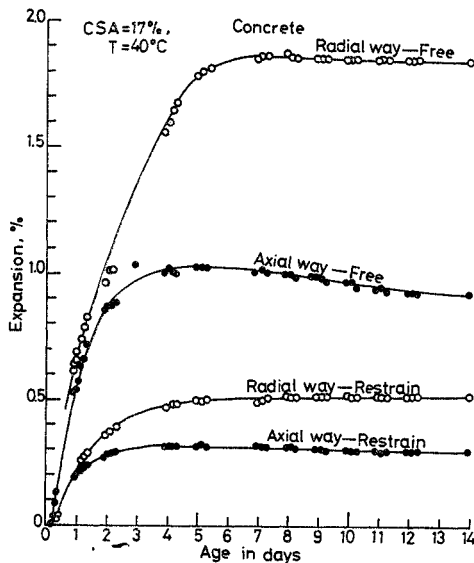


Fig. 10 Mould and location of gage point

方向の膨張率は上層に近い部分のものである。

**Table 5** の膨張率は軸方向のものである。膨張材混和率 13% (配合 A) を 20°C で養生した場合は、拘束によって膨張はきわめて小さい値となった。**Fig. 11** は側面拘束の場合の軸方向と直径方向の膨張率が著しく変化することを示している。三軸拘束によって膨張は著しく減少する。すなわち、拘束によってコンクリートの膨張はきわめて小さいものとなる。膨張率は拘束によって著しく減少するが、材令に伴う変化が少なく、安定した値になる傾向がある。自由膨張、側面拘束の場合ともに膨張率は直径方向が軸方向よりも大きい。

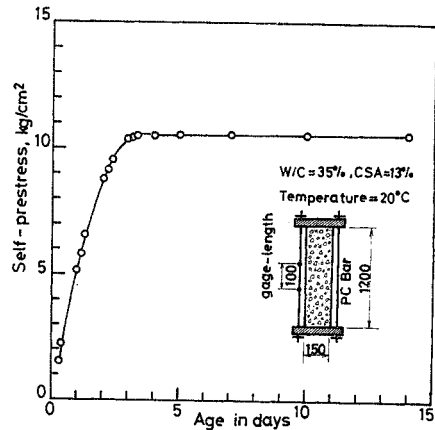


**Fig. 11** Expansion of concrete in the axial and radial direction

## 6. セルフプレストレス

膨張セメントコンクリートを拘束養生すると、コンクリートの組織が緻密になるとともにプレストレスが導入される。拘束による強度増加とプレストレスとの和が、見かけの拘束養生の効果である。セルフプレストレスは、鉄筋などによる内部拘束、型わくによる外部拘束部材断面形状などによって差異がある。本実験では **Fig. 10(B)** の方法を用い、PC 鋼棒を用いて外部拘束し、均等プレストレスとなるようにして測定した。

拘束を受ける膨張セメントコンクリートは、ひずみが一定値に近い状態に保持されるので、リラクセーションが起こり、膨張拘束によるプレストレスの多くは消失する。コンクリートのヤング係数  $E_{ct}$ 、ポアソン比  $\nu_{ct}$ 、膨張ひずみ  $\epsilon_{ct}$  など、ほとんどの係数が時間の係数で、膨張混和材の種類によっても差異があるので、計算することは、現在できない。



**Fig. 12** Self-prestress due to expansion of concrete

**Fig. 12** は測定結果の一例で、初期材令からプレストレスが導入され、材令 3 日 (20°C) でほぼ一定値になっている。40°C で促進養生した場合もほぼ同じ結果が得られた。促進養生の場合は短時間内にセルフプレストレスが導入されるが、その大きさは変わらない。セルフプレストレスの大きさは 10~12 kg/cm<sup>2</sup> 程度である。

## 7. 密閉型わく養生コンクリートの圧縮強度

高温で自由膨張させた膨張セメントコンクリートの圧縮強度が著しく小さいのは、収縮が大きい場合に似た現象が起こり、セメントペースト、骨材接着面に欠陥ができるためであろう。拘束によって膨張が低下するのは、セメントペーストが拘束圧力によって緻密な安定した組織となるためであろう。

密閉型わく養生は普通コンクリートの高温圧力養生と同じ効果が期待できるものであるから、拘束程度、養生温度、拘束解除後の養生がコンクリートの圧縮強度に影響するものと思われる。実験の計画にあたって考慮した要因は、膨張材の種類、養生温度、養生期間、後養生である。

型わくは、セメント強度試験用型わくを改造して密閉型わくとしたもので、強度試験はセメント強度試験に準じて行った。重量変化、膨張率も測定したが、ここでは圧縮強度試験結果のみを要約して述べる。

各養生条件の場合の圧縮強度試験結果を **Table 6~9** に示した。膨張材の効果の比較を **Fig. 13~14** に示した。図中の記号は ㊸ が CSA, ㊹ が Expan および ㊺ が Zipcal の略号である。密閉型わくによる高温促進養生によって普通セメントコンクリート、膨張セメントコンクリートともに圧縮強度が著しく増加し、特に養生温度が高い場合に効果がある。高温養生の場合は早期脱型

**Table 6** Compressive Strength of Expansive Cement Concrete Cured in Closed Form (Denka CSA)

Mixture	Expansive agent		Curing condition			Age (days)	Compressive strength	Mixture	Expansive agent		Curing condition			Age (days)	Compressive strength																																		
	Brand	Admixture (%)	Tem. (°C)	Time (hr)	Later				Brand	Admixture (%)	Tem. (°C)	Time (hr)	Later																																				
Denka CSA	Denka CSA	0	75	2-1/2	Air	imm.	62	Denka CSA	10	20 (water)	24	Air	1	80																																			
						1	176						3	264																																			
						28	389						7	426																																			
						89	367						27	444																																			
						imm.	60						"	10	20 (water)	24	Water	1	101																														
						1	467											3	278																														
						28	542											7	433																														
						89	411											27	474																														
						imm.	165											"	15	20 (water)	24	Air	1	99																									
						1	234																3	243																									
						28	424																8	325																									
						89	411																28	384																									
						imm.	170																"	15	20 (water)	24	Water	1	102																				
						1	239																					3	216																				
						28	569																					8	236																				
						89	571																					28	399																				
						imm.	204																					"	0	90	2	Air	imm.	63															
						1	272																										28	411															
						28	454																										imm.	63															
						89	474																										28	514															
						imm.	234																										Denka CSA	10	90	2	Air	imm.	27										
						1	250																															28	354										
						28	466																															imm.	27										
						89	488																															28	494										
						imm.	94																															"	10	90	2	Water	imm.	28					
						1	210																																				28	437					
						27	493																																				imm.	196					
						90	445																																				28	437					
						imm.	90																																				"	0	90	4	Air	imm.	196
						1	212																																									28	473
27	518	imm.	144																																														
90	614	28	416																																														
imm.	254	Denka CSA	10	90	4	Air	imm.	144																																									
1	340						28	416																																									
27	584						imm.	194																																									
90	549						28	472																																									
imm.	237						"	0	90	6	Air	imm.	251																																				
1	355											28	429																																				
27	584											imm.	251																																				
90	639											28	483																																				
imm.	287											Denka CSA	10	90	6	Air	imm.	238																															
1	364																28	491																															
27	609																imm.	238																															
90	580																28	494																															
imm.	255																"	0	75	5	Air	imm.	166																										
1	269																					28	457																										
27	516																					imm.	166																										
90	625																					28	444																										
imm.	69																					Denka CSA	10	75	5	Air	imm.	155																					
1	218																										28	450																					
28	485																										imm.	155																					
90	419																										28	516																					
imm.	65																										"	0	60	3	Air	imm.	52																
1	180																															28	378																
28	505																															imm.	52																
90	609																															28	466																
imm.	214																															Denka CSA	10	60	3	Air	imm.	29											
1	283																																				28	406											
28	542																																				imm.	29											
90	496																																				28	508											
imm.	231																																				"	0	60	6	Air	imm.	122						
1	300																																									28	453						
28	602	imm.	122																																														
90	627	28	491																																														
imm.	256	Denka CSA	10	60	6	Water																																				imm.	187						
1	326																																									28	500						
28	546						imm.	187																																									
90	556						28	507																																									
imm.	292						"	10	60	6	Water																															imm.	187						
1	337																																									28	507						
28	512											imm.	172																																				
90	585											28	443																																				
imm.	83											"	0	60	9	Air																										imm.	172						
1	213																																									28	463						
7	370																imm.	225																															
28	527																28	528																															
imm.	100																Denka CSA	10	60	9	Water																					imm.	225						
1	214																																									28	528						
3	342																					imm.	225																										
7	342																					28	524																										
28	369																					imm.	225																										

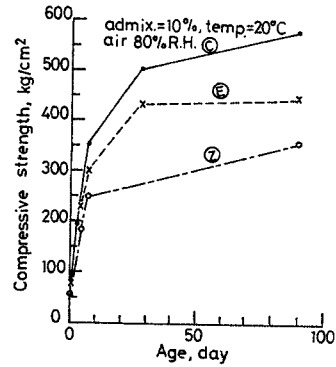
ができ、後養生によって長期材令強度が改善される。脱型時強度（記号 imm.）が小さくても、後養生として 80% R.H. 空中養生、20°C 水中養生を行えば、材令 28 日、90 日で著しい強度増加が見られる点に特徴がある。90°C 2 時間養生で脱型強度 27 kg/cm<sup>2</sup>、後養生が 3 日間 20°C 水中、その後 80% R.H. 空中の場合、材令 28 日で 624 kg/cm<sup>2</sup>、材令 89 日で 716 kg/cm<sup>2</sup> で、脱型強度に対する比は材令 28 日で 22 倍、材令 89 日で 27 倍になっている。この強度増加はセルフプレストレスの効果もあるが、大部分がセメントペーストの性質、セメントペーストと骨材との附着が改善されるためと考えられる。

**Table 7** Compressive Strength of Expansive Cement Concreted Cure in Closed Form(Denka CSA)

Mixture : Normal Portland Cement;  $g_c=3.15$ , Max. size of coarse agg. 10 mm, Slump=5 cm,  $W/C=50\%$ ,  $s/a=57\%$   
 Sand;  $g_s=2.64$ , F.M.=3.26, Absorption=2.0%,  $C=400$  kg,  $W=200$  kg,  $S=1013$  kg,  $G=761$  kg  
 Expansive agent replaced by cement

Admixture CSA (%)	Curing condition			Age (days)	Strength (kg/cm <sup>2</sup> )
	Temp. (°C)	Time (hr)	Later		
0	20	24	Air, RH 80%	1	73
				28	492
				90	494
10	20	24	"	1	51
				3	192
				7	353
				28	503
				90	578
10	20	24	Water, 20°C	1	51
				3	192
				7	353
				28	491
				90	558
0	60	3	3 days 20°C water-Air	imm.	52
				28	488
				91	530
10	60	3	"	imm.	29
				28	528
				91	541
0	60	6	"	imm.	122
				28	586
				91	559
10	60	6	"	imm.	187
				28	611
				91	634
0	60	9	"	imm.	172
				28	531
				91	551
10	60	9	"	imm.	225
				28	634
				91	666
0	75	5	"	imm.	166
				28	499
				90	556
10	75	5	"	imm.	155
				28	566
				90	578
0	90	2	"	imm.	63
				28	598
				89	667
10	90	2	"	imm.	27
				28	624
				89	716
0	90	4	"	imm.	196
				28	586
				89	589
10	90	4	"	imm.	144
				28	564
				89	566

密閉型わくを用いて養生する場合は、膨張材の混和率を小さくしても、その効果が期待できる。しかし、それぞれの膨張材の化学組成は Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO, SO<sub>3</sub> などの差異があるので、最適混和率、最適養生条件および相互作用の影響を考慮しなければならない。一般にいえることは、拘束養生で大切なことは、初期に促進養生して安定



**Fig. 13** Development of Compressive Strength of Expansive Cement Concrete (Principal curing; 20°C-24 hr in closed form, Additional curing; in air 20°C-80% R.H.)

**Table 8** Compressive Strength of Expansive Cement Concrete Cured in Closed Form (Asano Zipcal)

Mixture :  $W/C=50\%$ , Slump=5 cm,  $C=400$  kg,  $W=200$  kg,  $S=1013$  kg,  $G=761$  kg

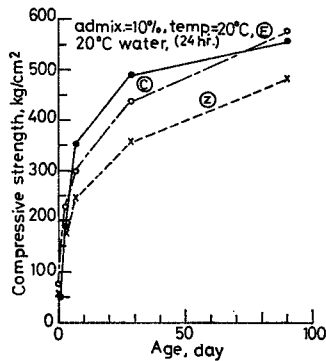
Admixture Asano Zipcal (%)	Curing condition			Age (days)	Strength (kg/cm <sup>2</sup> )
	Temp. (°C)	Time (hr)	Later		
10	20	24	6 days in 20°C water-Air	1	55
				4	182
				7	248
10	20	24	"	91	392
				1	55
				4	182
10	20	24	"	7	248
				28	358
				91	481
10	60	6	Air	imm.	129
				28	393
10	60	6	Water	imm.	129
				28	497
10	60	6	3 days in 20°C water-Air	imm.	129
				28	490
				90	541
10	75	5	Air	imm.	170
				28	454
10	75	5	Water	imm.	170
				28	507
10	75	5	3 days in 20°C water-Air	imm.	170
				28	557
				90	594
10	90	4	Air	imm.	134
				28	422
10	90	4	Water	imm.	134
				28	519
10	90	4	3 days in 20°C water-Air	imm.	184
				28	545
				90	566

Note : Cement=Normal portland cement (Sumitomo cement),  $g_c=3.15$ , Specific surface area=3200 cm<sup>2</sup>/gr  
 Sand (Kinu River sand);  $g_s=2.64$ , F.M.=3.26, Absorption=2.0%  
 Coarse aggregate (Kinu River sand); 5~10mm



したコンクリートの組織をつくり、早期脱型して後養生として湿潤養生、あるいは水中養生を行うことである。

膨張材の種類によって多少の差異があるが、密閉型わくによる適切な養生条件は **Table 10** にあげたようになる。この表はプレキャスト部材を対象としたものである



**Fig. 14** Development of Compressive Strength of Expansive Cement Concrete (Principal curing; 20°C-24 hr in closed form, Additional curing; in water 20°C)

**Table 9** Compressive Strength of Expansive Cement Concrete Cured in Closed Form (Onoda Expan)

Mixture : W/C=50%, Slump=5 cm, C=400 kg, W=200 kg, S=1 013 kg, G=761 kg

Admixture Onoda Expan (%)	Curing condition			Age (days)	Strength (kg/cm <sup>2</sup> )
	Temp. (°C)	Time (hr)	Later		
10	20	24	6 days in 20°C Water-Air	1	76
				4	228
				7	299
				28	435
				91	447
10	20	24	"	1	76
				4	228
				7	299
				28	437
				91	578
10	60	6	Air	imm.	120
				28	373
10	60	6	Water	imm.	120
				28	479
10	60	6	3 days in 20°C Water-Air	imm.	120
				28	489
				90	527
10	75	5	Air	imm.	162
				28	403
10	75	5	Water	imm.	162
				28	497
10	75	5	3 days in 20°C Water-Air	imm.	162
				28	517
				90	575
10	90	4	Air	imm.	140
				28	383
10	90	4	Water	imm.	140
				28	438
10	90	4	3 days in 20°C Water-Air	imm.	140
				28	491
				90	543

Note : Cement=Normal portland cement (Sumitomo cement),  $g_c=3.15$ , Specific surface area=3 200 cm<sup>2</sup>/gr Sand (Kinu River sand);  $g_s=2.64$ , F.M.=3.26 Coarse agg. (Kinu River sand); 5~10 mm, Absorption=2.0%

から、常温養生の場合は **Table 6~9** を参考にして決めればよい。最適養生条件は (養生温度) × (養生温度) のマチュリティで評価することはできず、(最大膨張率に到達する時間) × (養生温度) のマチュリティで評価するほうが強度、ヤング係数ともに推定し易い。

**Table 10** Suitable Accelerate Curing Condition (in Closed Form)

Type of agent		Curing condition	
Brand	%	Principal	Additional
Denka CSA	10	60°C-9 hr	3 days in 20°C water, thereafter 80% R.H. air
		90°C-2 hr	
Asano Zipcal	10	70°C-5 hr	"
		90°C-4 hr	
Onoda Expan	10	75°C-5 hr	"
		90°C-4 hr	

## 8. 結 論

膨張セメントコンクリートの優れた性質を利用するには混和材の種類、混和率、膨張拘束、初期養生温度、拘束時間、拘束解除後の養生、これらの相互作用など、多くの要因の影響を受けるので、この点に注意が必要である。コンクリートの性質には多くの要因の総合された影響が現われるので、それぞれの要因の影響を分離して検討することは困難である。要点を要約すれば次のとおりである。

密閉型わく養生は膨張セメントコンクリートの長期材令強度、ヤング係数からみてきわめて有効な養生方法である。膨張拘束時間は膨張量が最大値に到達する時間以上がよい。マチュリティ (最大膨張に到達する時間) × (養生温度) によって初期強度が推定できる。養生温度は 20~90°C の範囲で、いずれも有効であるが、20°C の場合は最少 12 時間、できれば 24 時間の膨張拘束が必要である。

拘束解除に湿潤養生、水中養生を施すことが長期材令強度からみて重要である。高温養生によって短時間内に最大膨張率に到達させ、ただちに湿潤養生、水中養生を行えば、長期材令強度の伸びがよい。

拘束養生によってコンクリートの組織が改善されることは、拘束圧力によって、圧力養生と同じ効果が得られるため、強度、動ヤング係数にその影響に顕著に現われる。

セルフプレストレスは、膨張、ヤング係数の発現速度に関連があり、膨張材による差異があると思われるが、膨張拘束応力の大部分はリラクセーションによって失わ

れ、コンクリートの組織が安定した硬化体となったときのセルフプレストレスは約  $10\sim 12\text{ kg/cm}^2$  である。

最適養生条件は膨張材の種類で差異があるが、最大膨張率に到達するまで、変形拘束することが原則である。高温促進養生の場合の養生条件として **Table 10** の条件が適当と思われる。

密閉型わくによって拘束養生する場合は、膨張材混和率を多少小さくしても、その効果は低下しない。高温促進養生の場合はこの傾向が著しく現われる。

乾燥収縮促進試験、重量変化その他については別の機会に報告する。

付 記：助言を載いた R. Malinowski 教授、実験に協力された 鈴木啓允、松本初昭、瀬尾有一、平辻千春、勝井 優の諸兄に厚くお礼申し上げます。

#### 参 考 文 献

- 1) 中条金兵衛博士(元日本セメント中央研究所長)がセメントペーストの収縮測定に用いて良好な結果を得た。
- 2) Malinowski, R.: Accelerated Heat Curing of Concrete in Closed Form Applied to Prestressed Plate, Institution För Byggnadsteknik, Chalmers Tekniska Högskola, Nov. 1963  
Malinowski, R.: Einige Wärmehärtungsmethoden des Hochfesten Betons und ihre Anwendung im Betonwerk, Chalmers Tekniska Högskola, 1963  
Berntsson, L., Hedberg, B. and Malinowski, R.: Structure, Solid Mechanics and Engineering Design, The Proceedings of the Southampton 1969 Civil Engineering Materials Conference, Part 1
- 3) Upendra Counto, J.: Magazine of Concrete Research: Vol. 16, No. 48: Sept. 1964
- 4) 神山・鈴木：セメント技術年報，昭和 45 年 XXIV，セメント協会
- 5) 神山：膨張性セメント混和材を用いたコンクリートに関するシンポジウム（講演概要），土木学会，1972.8.24  
(1973.9.17・受付)