



Title	モルタル及びコンクリートの乾燥収縮と龜裂防止に関する研究
Author(s)	大野, 和男; Ohno, Kazuo
Citation	北海道大學工學部研究報告, 9, 49-110
Issue Date	1953-12-10
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/40522
Type	departmental bulletin paper
File Information	9_49-110.pdf



モルタル及びコンクリートの乾燥収縮と 龜裂防止に関する研究

大野 和 男

(昭和28年9月30日受理)

Drying Shrinkage and Cracking of Mortar and Concrete

KAZUO OHNO

Synopsis

This paper includes the results of four series of laboratory tests on the shrinkage and cracking of mortar and concrete. Tentative conclusions for these results and my previous reports are given.

1. Shrinkage of rich mortar during the firstday after mixing.

Rich mortar mixed with a kind of portlandcement shows a remarkable shrinkage during its setting period in the air. Sometimes it is larger than the shrinkage which will occur after the second day, but it will be controlled by careful moist-curing. When this first day shrinkage is constrained, 80% of which vanishes as plastic deformation and only 20% remains as elastic. The specimens which are constrained their shrinkage for the first day, show some decrease of their strength and elasticity.

2. Quantitative study of expansion and shrinkage of mortar.

Varying the water-cement ratio, proportion and curing conditions, 201 specimens were tested. Following formula for mortar is derived for expansion in the water:

$$\text{Expansion} = a \log (1+bD) \times 10^{-4}, \quad a = k_1(c+m)^{-k_2}$$

where, D is period in water, days, m is number of parts of fine aggregate to one of cement by weight, b , c , k_1 and k_2 are numerical constants. The volume change is scarcely effected by the water-cement ratio.

It is more complicated for drying shrinkage, Some charts showing contours of the equal shrinkage are given in this paper. And a relation between shrinkage of mortar and shrinkage of cement paste is derived as follows:

$$\epsilon_m = \frac{\epsilon_p - \epsilon_a}{1 + \frac{E_a}{E_p} \frac{A_a}{A_p}} + \epsilon_a$$

where, ϵ_m , ϵ_p and ϵ_a are the drying shrinkage of mortar, cement paste and fine aggregate respectively; E_p and E_a are the elastic modulus of cement paste and aggregate, A_p and A_a are the cross-sectional area of cement paste and aggregate.

From this formula we can suppose how to decrease the shrinkage of mortars.

3. Effects of silt on drying shrinkage.

Silt contained in aggregates accelerates and increases the drying shrinkage of mor-

tar and concrete. Specimens of a new type of constraining shrinkage are proposed, and the states of cracking of mortar and of concrete are observed. It is confirmed that the value of critical shrinkage, which occurs cracking, is about 400 millionths.

4. Shrinkage of concrete in dry and medium consistency.

Drying shrinkage and cracking of concrete having four kinds of water-cement ratio (40, 50, 60 and 70% by weight) and with five kinds of proportions (1:3, 1:4, 1:5, 1:6 and 1:7 by weight) are observed. Above-mentioned formula for shrinkage of mortar can be also applied for shrinkage of concrete. The result obtained by constraining shrinkage of concrete shows that, if the shrinkage is less than 400 millionths, concrete will be free from deep cracking, although some hair cracks at its surface are inevitable.

目 次

序	2
I. セメントモルタルの凝結時に於ける特異収縮	2
第1節 収縮の性状	2
第2節 収縮拘束の影響	8
II. 各種モルタルの膨脹率と収縮率	11
III. 骨材微粒部がモルタル及びコンクリートの収縮に及ぼす影響	32
IV. 中練り及び硬練りコンクリートの収縮	43
V. 總 括	55

序

ポルトランドセメントを使用した場合のモルタルの水中膨脹並びに乾燥収縮について、著者は先に二三の實驗的研究の成果を發表したが¹⁾、茲には材齡1日迄のモルタルに見られる特異収縮性、モルタルの水中膨脹率及び乾燥収縮率と材齡、調合、水セメント比との關係、骨材中の微粒部が乾燥収縮に及ぼす影響、中練り及び硬練りのコンクリート乾燥収縮等について報告し最後に現在までの研究成果の總括を記述する。

I. セメントモルタルの凝結時に於ける特異収縮

第1節 収縮の性状

1. 概 説 著者が先に行つた實驗によれば、ポルトランドセメントを使用したモルタルの中には材齡1日迄の間の自由収縮に於て特異な性質を示すものがあつた。此の収縮は概ねモルタルの凝結開始に伴つて起るものであるが、本文に於ては同一社の製品たる3種のセメントを使用した砂入モルタルについてセメント成分、水セメント比、養生等の影響を檢討した。

1) 大野和男： コンクリートの膨脹収縮に関する研究 (1) 建築學會大會論文集 昭10年4月。
 " (2) " 昭12年3月。
 " (3) " 昭14年8月。
 " (4) 日本建築學會研究報告 第7號 昭25年8月。

2. 材 料, 其の他

(1) セメント 次の3種とする。

某社製早強ポルトランドセメント 1種 (市販 記號 V)
 同 上普通ポルトランドセメント 2種 { (市販 記號 A)
 (同社の寄贈, 記號 A.)

之等3種のセメントの強度, 比重, 凝結時間及び化學分析試験結果は次表の如くである。

第 1 表 セメントの強度*

セメント	水セメント比 %	材 齢 1 週			材 齢 4 週		
		フ ロー %	曲げ破壊係数 kg/cm ²	壓縮強度 kg/cm ²	フ ロー %	曲げ破壊係数 kg/cm ²	壓縮強度 kg/cm ²
A	45	193	59.1	289	202	80.6	456
	65	173	36.6	147	170	54.6	222
A。	45	194	79.9	469	192	89.7	564
	65	198	51.9	232	192	64.3	355
V	45	168	99.0	521	173	104.0	629
	65	170	59.2	276	172	73.7	403

* フローテストの落下数は15回とした。

第 2 表 セメントの比重

セメント	比 重 I	比 重 II	平 均
A	3.124	3.117	3.12
A。	3.129	3.123	3.13
V	3.127	3.118	3.12
砂 粉	2.67	2.67	2.67

第 3 表 凝 結 試 験 成 績

種 別	セメント	水セメント比 %	稠 度 mm	始 發	平 均	終 結	平 均	備 考
規 格 (セメント ペースト)	A	{ 30 30	4.0	時 分 1.38	1.32	時 分 3.11	3.08	セメント 400gr に水を加えて3 分間練る
			6.0	1.25		3.05		
	A。	{ 30 29	5.0	0.50	0.50	1.35	1.43	
			6.0	0.50		1.50		
	V	{ 30 29.5	6.5	1.50	1.55	3.05	3.10	
			6.0	2.00		3.15		
1:1 モルタル (川 砂)	A	{ 45 45	3.0	1.55	1.58	4.35	4.35	セメント 400gr
			3.5	2.00		4.35		
	A。	{ 45 45	1.0	1.37	1.38	2.40	2.44	
			2.0	1.38		2.48		
	V	{ 45 45	3.5	2.08		4.30		

第4表 セメントの化学分析表

セメント	灼熱減量	不溶解残渣	可溶性珪酸	礬土	酸化鉄	石灰	苦土	硫酸	合計	水硬率	活動係数	珪酸率	鉄率	石灰飽和比
A	1.45	0.22	22.40	5.28	2.72	64.50	1.65	1.38	99.60	2.09	4.24	2.80	1.94	0.88
A。	1.05	0.20	22.00	5.68	2.72	64.70	1.68	1.50	99.53	2.09	3.87	2.62	2.09	0.89
V	1.00	0.24	21.76	4.84	2.91	66.00	1.15	1.58	99.48	2.20	4.50	2.81	1.66	0.93
砂粉	2.00	—	74.50	16.63	4.37	1.20	0.90	—	99.60	—	4.48	3.55	3.81	—

(註) 活動係数 = $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$, 珪酸率 = $\text{Si}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$, 鉄率 = $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Fe}_2\text{O}_3$.

(2) 砂粉。玉川産砂をセメントとほぼ同粉末度に粉砕したものを使用した。其の比重及び化学組成は第2表及び第4表に記した。

(3) 砂。玉川産とし、8番篩で篩つたものを使用した。篩分析試験結果は第5表に示す。

(4) 水セメント比及び調合。水セメント比は45%及び65%の2種とし、調合はセメントについて各々フロー200%となるような調合比の平均として次の如く定めた。

水セメント比

45% 調合(重量比) 1:1.4

65% 調合(重量比) 1:2.9

此の調合による各モルタルのフローは第6表の如くである。

(5) 試験体。試験体の大きさは $4 \times 4 \times 20$ cm³の柱状体とする。

試験体の数は各種別に3箇宛とした。

(6) 型枠。型枠は鐵製とし、其の内面へ次のような2種の層を作つて、モルタルの収縮膨脹の妨げにならない様にした。(第1圖)

I 試験体の膨脹を可及的に自由ならしめるため、パラフィン紙二枚の中間に厚さ約1mmのグリース層を挟み、之を鐵製型枠中に貼りつけたもの。

II 單にパラフィン紙のみを型枠中に貼り、膨脹は不可能なるも、収縮は可能なもの。

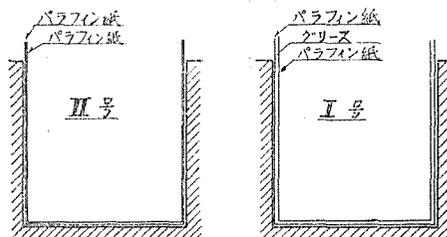
(7) 試験体の製作。モルタルの容積變化に対する温度の影響を除くため材料は豫め室温と等しい温度にしておいた。製作は1練から1箇とし、砂にセメント(又は砂粉)を加えて1分半、水を加えて2分間練つた。

第5表 砂の篩分析表

	8番	14番	28番	48番	100番
通過率 %	100.0	67.9	32.8	7.9	1.4

第6表 モルタルの軟度

記號	水セメント比 %	フロー	水セメント比 %	フロー
A	45	191	65	207
A。	45	192	65	206
V	45	186	65	200
砂粉	45	218	65	214



第1圖 型枠

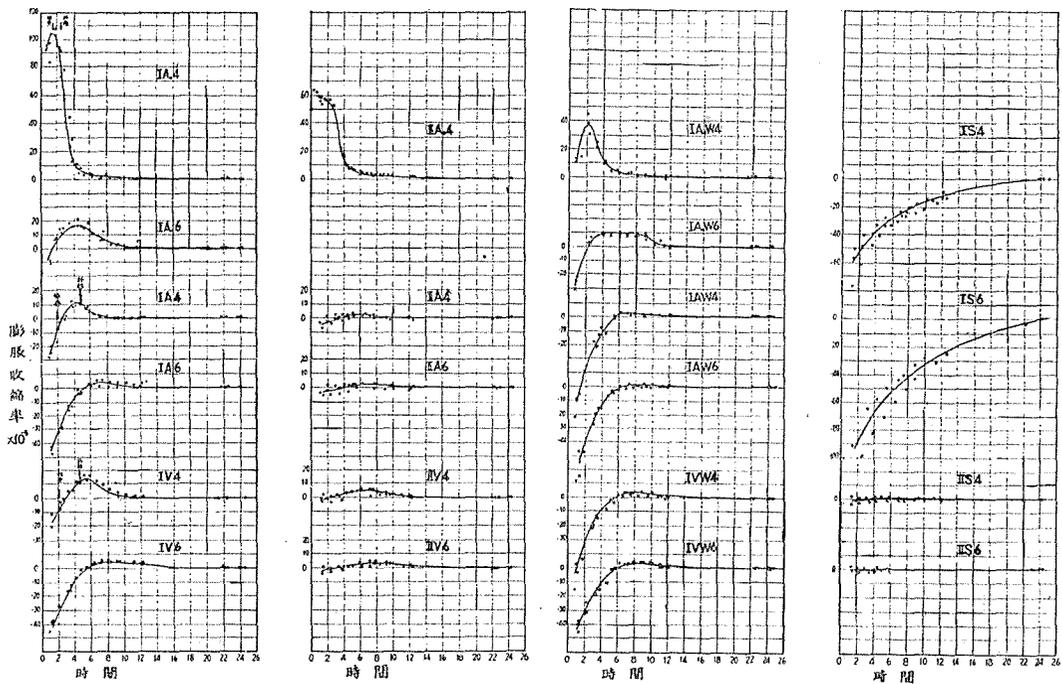
(8) 養生。一部は製作より脱型まで、室内空气中(温度 25.4~27 °C 湿度 84~88%) に置き、一部は製作直後より型枠の上面を密閉して水分の蒸発を防ぐ。兩者とも材齡 1 日以後は室内空气中に曝す。

(9) 檢長, 標點, 試驗法。前回實驗¹⁾に同じ。

3. 實驗の結果 本實驗に依つて得た收縮曲線は第 2 圖に掲げる通りである。

第 7 表

記 號	型 枠	セメント	養生條件	水セメン ト 比	記 號	型 枠	セメント	養生條件	水セメン ト 比
I A4	I 號	A	室内空气中	45	I A。W4	I 號	A。	室内空气中	45
I A6	〃	〃	〃	65	I A。W6	〃	〃	〃	65
I A。4	〃	A。	〃	45	I VW4	〃	V	〃	45
I A。6	〃	〃	〃	65	I VW6	〃	〃	〃	65
I V4	〃	V	〃	45	II A4	II 號	A	〃	45
I V6	〃	〃	〃	65	II A6	〃	〃	〃	65
I S4	〃	砂粉	〃	45	II A。4	〃	A。	〃	45
I S6	〃	〃	〃	65	II A。6	〃	〃	〃	65
I AW4	〃	A	型枠中密閉	45	II V4	〃	V	〃	45
I AW6	〃	〃	〃	65	II V6	〃	〃	〃	65



第 2 圖 收 縮 曲 線

1) 大野和男: コンクリートの膨脹收縮に関する研究 (2) 建築學會大會論文集 昭 12.

4. 材齢初期に於ける膨脹と其の原因 上掲の収縮曲線の中 I 號型枠を使用したものは、何れも製作後數時間に亘つて檢長距離の増加即ち膨脹を示した。此の原因としてはセメントの石膏分の作用とセメント水和熱による熱膨脹とが考えられるが、檢長距離の増加は發熱作用を起さないと思われる砂粉モルタル (砂粉+水) についても認められ、且つ砂粉モルタルの場合には材齢 1 日を経ても尙収縮の傾向が表れない。(材齢 1 日を経ても、砂粉モルタルは尙泥狀を呈している。)

此の兩者を比較すれば、上記の様な檢長距離の増大はモルタルの眞の容積増加のみを正確に表すものではなく、其の一部分は型枠の性質に基く機械的現象に依るものと考えられる。此の型枠は試験体の膨脹をも自由ならしめようとする意味から、鐵製型枠中に更にグリースの層を設けたものであつたが、此のグリース層が液狀モルタルの側壓に依つて幾分押し出され、モルタルが液狀である間は試験体の檢長に變化を來たす事が考えられる。砂粉モルタル (砂粉+水) は液狀セメントより比重が軽いから、型枠に與える側壓も稍小さいであろうが、概ね前記液狀モルタルの膨脹量から砂粉モルタルの膨脹量を差引いたものが液狀モルタルの膨脹量であると考えて良い。従つて眞の膨脹量は極めて僅少となるが、一般にセメント量の大きいモルタルの方が此の膨脹量が大きい傾向があるのは當然である。

5. 収縮性の差異

(1) 型枠に依る差異。今室内空氣中に曝した試験体について、I 號型枠と II 號型枠による収縮曲線を比較すると、一般に I 號型枠のものが II 號型枠のものより収縮が顯著である。特にセメント比 45% の場合に於いて然りとする。I 號型枠と II 號型枠の相違する所は前者がグリースの層を有する點のみであるが、I 號型枠の方が自由収縮に對する抵抗が少いと考えられる。以下収縮曲線の比較に當つては、主として I 號型枠の試験体を考慮するものとし、且つ前述の理由に依つて其の見かけの膨脹性には言及せず、單に収縮性のみを検討することとする。

(2) 収縮量。本實驗に使用したセメントは何れも同一社製品たるポルトランドセメントであつたが、其の収縮曲線は 3 種 3 様の傾向を示した。

前節に掲げた曲線から収縮開始時、同終了時、収縮量等を求めれば、略第 8 表の様な數値を得る。(I 號型枠のもの)

之を先に掲げたセメント試験結果と比較對照すれば次の如くである。

i) 強度と特異収縮性。茲に使用したセメントの強度は V が最大であつて、A。が之に次ぎ A が最小である。之に對し特異収縮量は A。が最も顯著であつて、A 及び V は遙かに小さい。上記中普通セメント A 及び A。について、A。セメントの強度が特に大きく且つ早強的傾向があることから、A。セメントの粉末度が高く、其の影響が表われていると思われるが、本實驗では粉末度の試験を缺いたので確論出來兼ねる。

第 8 表

養生	セメント	水セメント比 %	凝結時間 (規格)		凝結時間 (1:1モルタル)		収縮開始	収縮終了	特異収縮量	材齢1日の全収縮量率 $\times 10^{-5}$
			始發	終結	始發	終結				
室内 空气中	A	45 65	時分 1.32	時分 3.08	時分 1.58	時分 4.35	時分 4.20	時分 7.30	10 不明瞭	11 4
	A。	45 65	0.50	1.43	1.38	2.44	1.40 4.30	5.00 10.30	100 16	104 18
	V	45 65	1.55	3.10	2.08	4.30	5.30 8.00	10.00 不明瞭	13 不明瞭	15 5
密 閉	A	45 65					6.00 8.00	不明瞭 "	不明瞭 "	2 0
	A。	45 65					2.20 4.30	5.00 不明瞭	32 不明瞭	37 9
	V	45 65					7.00 8.00	不明瞭 "	不明瞭 "	4 3

ii) 凝結時間と特異収縮量。凝結現象と特異収縮性との間には密接な関係がある。前回の研究に於て、凝結時間の早いセメントは長期材齢の収縮が大であることを述べたが、特異収縮性についても全く同様なことが認められる。即ち始發及び終結の最も早い A。セメントの特異収縮量が最大であつて、他の 2 セメントは凝結時間が比較的長く収縮も亦小さかつた。

iii) 化學成分と特異収縮量。A。セメントはアルミナ量及びマグネシヤ量が最大で A セメントは之に次ぎ V セメント最小である。又酸化鐵量は V セメントが最大であつて A, A。セメントは等量である。之によれば収縮量はアルミナ、マグネシヤ、酸化鐵の量に依つて影響されるものの如くで、アルミナとマグネシヤの量のなる程収縮量が大きく、酸化鐵量は其の抑制劑として作用する様に考えられる。之は前回實驗の長期材齢の収縮に對して推論した成分の影響とも一致している。

iv) 水セメント比に依る差異。前記の様な特異収縮は水セメント比 45% の場合に明瞭に表われるが、水セメント比 65% の場合には特異収縮の起る時期が遅れて其の量も小となり、セメントによつては全く不明瞭となる。本實驗の測定では全然消失したものと見られるものもあつた。

v) 養生に依る差異。前掲の表に明らかなる如く、特異収縮は養生の如何によつて其の發生時期及び大きさを著しく異にする。此の現象は特に A。セメントの場合明瞭に認められる。即ち水分の蒸發を防げば恰も水セメント比を大にした場合と同様な性状を示す。

6. 結 語 上記の如く水セメントの少いモルタルは、凝結の前後に於いて僅かな膨脹を示した後、特異な収縮性を示すが、本實驗に使用した 3 種のセメントの成績から言えば、其の収縮は凝結時間の特に早いものが最も大きく、 10×10^{-4} 以上に達し、セメント成分についてはアルミナ、マグネシヤの成分の多いもの程、酸化鐵分の少いもの程、此の収縮が顯著である。但し此の特異収縮は水セメント比が 65% 程度となれば著しく不明瞭となり、又水セメント比の

小さいものでも、試験体の成型後型枠を密閉し、水分の蒸発を阻止すれば軽減する傾向を有する。従つて此の特異収縮は成型後の養生に注意すれば之を消滅せしめることが可能であると考えられ、之を考慮すれば、モルタルの収縮としては1日以後の収縮のみが問題となる。尙凝結時に特異収縮の大きいセメントと、長期材齢の収縮率の大きいセメントとは、アルミナ、マグネシヤ、酸化鐵等の成分比率の傾向が同一であると推定される。

第2節 収縮拘束時の影響

1. 概説 前節の實驗によれば、材齢1日までに生ずる特異収縮率の大きいものは 10×10^{-4} を超えている。著者の之までの實驗によれば収縮を拘束した場合龜裂を發生する限度の自由収縮率の大きさは $4 \sim 5 \times 10^{-4}$ であるから、上記の大収縮を拘束すれば収縮龜裂を生ずる危険がある筈であるが、實際には上記の特異収縮を生ずる状態ではモルタルは未だ硬化を初めたばかりであるから、幾分共組織が流動し龜裂には至らないであろう。但し此の場合モルタルの強度及び弾性は如何になるか。以下之等の點についてモルタルの曲げ並びに壓縮試験により若干の考察を行つた¹⁾。

2. 材料, 其の他

(1) 材料。セメントは前節の實驗に於いて最も明瞭な特異収縮性を示した A。セメント(普通ポルトランドセメント)を選んだ。

砂は前節の實驗と同様玉川産8番以下の砂とする。

(2) 水セメント比及び調合。水セメント比は45%とする。調合は重量比にて1:1.4とする。

(3) 試験体及び型枠。試験体は次の2種とする。

自由収縮 (前節 II 號型枠使用)

収縮拘束 (枠形ラーメン状型枠使用)

試験体の大きさは何れも $4 \times 4 \times 20 \text{ cm}^3$ とする。

(4) 製作及び養生。製作法は前節の實驗に同じ。但し全試験片を同一日に製作した。養生については試験体は何れも全然被をすることなく室内空氣中に曝し、材齢1日に於いて脱型の上、徑約3cmの木製ローラ2個にて支えて室内空氣中に置き、一様に乾燥する様に努めた。室内温度は $16 \sim 18^\circ \text{C}$ 、湿度は平均約70%であつた。

3. 収縮量の測定。本實驗のモルタルは前實驗に使用したものと全く同一物であるが、實驗温度及び湿度が若干異なるので改めて自由収縮を測定し、又同時に収縮拘束試験体の歪も測定した。測定の器具方法等は前節の實驗と同一であつた。測定の結果は次に掲げる通りである。

本實驗に於ては、1日間の収縮拘束に依つて100mmに付き約 $90 \text{ mm} \times 10^{-3}$ (収縮率 90×10^{-5})以上の自由収縮が拘束されたこととなるが、試験体に収縮龜裂は認められない。而して此の拘束された収縮量の中直接應力に關する部分を明らかにする爲に、材齢1日に於いて

1) 本文の實驗は昭和11年度東大工學部建築學科卒業論文として當時の學生石倉邦造氏が努力された。

拘束を解除した瞬間に起る収縮量を測定すると第9表の如くであつた。

即ち 90×10^{-5} 以上の自由収縮率の内、約 70×10^{-5} 以上の収縮率が拘束の爲に残留歪となつて消滅したこととなる。尙若し上記の瞬間収縮の歪度が實際に弾性歪となつて試験体に作用するものとすれば、拘束解除直後の曲げ試験の最大伸率 (22×10^{-5}) を考慮して、拘束試験体は間もなく破断すべき筈であるが、事實は之に反し、拘束のまま材齡3日を経るも尙破断の現象を示さなかつた。之は恐らくは収縮拘束に依る引張應力度の増加の速度は一般の曲げ試験に於ける應力度の増加の速度に比して著しく緩かであり、所謂匍匐の現象が起つているものと思われる。之の究明には尙多方面よりの検討が必要である。

4. 強度試験及び弾性試験の方法。試験体はすべて養生中の下側面を側面としてスパン18cm、荷重點間隔10cmの4點荷重に依つて曲げ試験を行い、引張側の伸をMartensの鏡装圖に依つて測定した。尙此の時の檢長は荷重點間隔10cmに一致せしめ、試験体の何れの部分に破壊を生じても之を檢長間に捕捉して、破壊時の伸を測定し得るようにした。上記の曲げ試験を行つた折片は更に $4 \times 4 \text{ cm}^2$ の加壓板に依つて壓縮し、壓縮強度を求めた。

5. 試験の結果。

(1) 強度。斯くして得た強度成績は第10表の如くである。之を見るに、成型後1日間収縮を拘束した試験体は、自由収縮試験体に比して5~13%強度が小である。材齡7日の曲げ破

第9表 拘束解除時の収縮

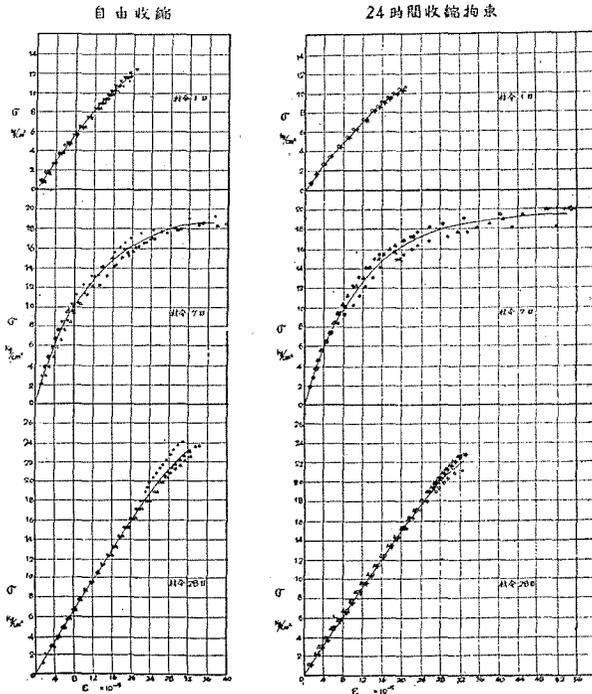
試験体番 號	拘束解除時の瞬間収縮率 $\times 10^{-5}$	備 考
I	21.0	歪量測定用試験体につき
II	20.0	
1	20.0	強度試験用試験体につき
2	18.5	
3	21.5	
4	19.5	
5	18.5	
6	22.5	
7	19.0	
8	24.0	
平均	20.5	

第10表 強度試験成績

種 類	曲げ破壊係数 kg/cm^2			壓縮強度 kg/cm^2					
	1日	7日	28日	1日		7日		28日	
自由収縮	11.7	18.2	47.8	44.2	46.3	218	173	242	246
	11.3	18.2	44.9	42.8	42.2	205	200	243	243
	11.3	18.5	47.3	42.1	42.5	197	227	253	229
	12.5	19.0		46.6	46.8				
平均	11.7	18.5	46.7	44.3		202		243	
拘束	10.5	20.2	45.6	42.2	40.5	188	186	219	182
	10.9	18.5	42.0	41.2	44.3	200	218	216	203
		20.4	45.3			180	175	219	215
平均	10.7	19.7	44.3	41.8		191		211	

壊係数が比較的伸びないのは表面の乾燥収縮に基づく収縮応力の影響によるものと推定されるが、此の材齢の曲げ破壊係数のみは拘束試験体の方が稍大であつた。

(2) 曲げ引張側応力度歪度曲線。上記の曲げ試験に於ける曲げ破壊係数と引張側伸率との關係は次圖に示す如くであつて、材



第3圖 應力度歪度曲線

齢1週の場合を除き、特異収縮を拘束したものは自由収縮のものより曲線の傾斜が幾分緩やかであるが、一般的な傾向は兩者共類似している。材齢1週のは低応力時の曲線の傾斜が特に急であつて、上記と同様に収縮応力の影響によるものと説明されるが、それにも拘わらず最大伸は著しく大きい。

(3) ヤング係数。同圖から曲げ破壊係数の最大値並びに其の1/2の點に於けるヤング係数を求めるに第11表を得る。此處にヤング係数は Secant modulus とする。尙同表には最大伸率をも記入した。

之によれば一般に最大荷重に對す

第11表 彈性係數

種類	材 齢 1 日				材 齢 7 日				材 齢 28 日			
	曲げ破壊係數 kg/cm ²	最大伸 × 10 ⁻⁵	E _{max} × 10 ⁴ kg/cm ²	E _{1/2} × 10 ⁴ kg/cm ²	曲げ破壊係數 kg/cm ²	最大伸 × 10 ⁻⁵	E _{max} × 10 ⁴ kg/cm ²	E _{1/2} × 10 ⁴ kg/cm ²	曲げ破壊係數 kg/cm ²	最大伸 × 10 ⁻⁵	E _{max} × 10 ⁴ kg/cm ²	E _{1/2} × 10 ⁴ kg/cm ²
自由収縮	11.7	19.5	6.1	7.4	18.2	37.2	4.9	11.8	47.8	30.4	15.7	16.0
	11.3	17.4	6.6	7.6	18.2	35.0	5.2	12.5	44.9	32.0	14.0	15.4
	11.3	19.2	5.8	7.2	18.5	37.9	4.9	14.0	47.3	33.9	13.9	16.2
	12.5	20.5	6.1	7.6	19.0	37.6	5.1	13.9				
平均	11.7	19.1	6.2	7.5	18.5	36.9	5.0	13.1	46.7	32.1	14.5	15.9
拘 束	10.5	22.4	4.7	6.3	20.2	55.0	3.7	13.2	45.6	33.2	13.7	15.5
	10.9	21.8	5.0	6.1	18.5	52.0	3.6	11.9	42.0	32.8	12.8	14.8
					20.4	55.0	3.7	13.5	45.3	33.5	13.5	14.8
平均	10.7	22.1	4.9	6.2	19.7	54.0	3.7	12.9	44.3	33.2	13.3	15.0

るヤング係數、及び曲げ破壊係數の 1/2 に相當する應力度に於けるヤング係數は、自由収縮試験體の方が収縮拘束試験體よりも幾分大きい。但し其の差は材齡 1 日のものについて最も著しく、其の他の材齡についてはかなり接近している。尙破壊時の最大伸は一般に収縮を拘束したもののほうが若干大きい。殊に材齡 1 週の試験では此の傾向が著しかった。

6. 結 語

1. 本文では材齡 1 日迄の自由収縮に特異性を示す普通ポルトランドセメントを用いた試験體 (水セメント比 45% 調合 1:1.4) について、収縮を拘束した場合之の強度に及ぼす影響を研究した。即ち材齡 1 日目迄収縮を拘束した試験體を 1 日、7 日、28 日の各材齡に於いて曲げ試験並びに壓縮強度試験に附し、自由収縮のものと比較對照した。

2. 先ず収縮性を見るに、自由収縮の試験體は成型後材齡 3~8 時間の間に於いて極めて急激に収縮率 90×10^{-5} に達する収縮を起す。収縮拘束試験體では斯かる収縮は起らない。

3. 収縮を拘束した試験體に就いて材齡 1 日目に拘束を解除すれば瞬間的に収縮率、 20×10^{-5} の収縮を生ずるのみであつて、約 70×10^{-5} なる収縮は殘留歪となつて仕舞う。尙上記収縮拘束を解除した直後に行つた曲げ試験によれば、曲げ引張側の最大伸は、 22×10^{-5} 程度に過ぎない。

4. 強度については曲げ破壊係數、壓縮強度の何れも収縮を拘束したものが自由収縮のものに比して小であつて、収縮拘束の影響を示す様であるが、材齡 1 週の曲げ破壊係數のみは例外的な結果を示した。

5. 曲げ試験に於ける引張側のヤング係數についても略同様であるが、一般に収縮を拘束したもののほうが破壊時の最大伸が大きい傾向がある。

II. 各種モルタルの膨脹率と収縮率¹⁾

1. 概 説 本文に於てはポルトランドセメントモルタルの収縮膨脹に及ぼす水セメント比、調合比期間水中養生の變化の影響について稍廣範圍の實驗を行い、軟練り乃至中練りの砂入モルタルの自由収縮膨脹について之を定量的に究明しようとした。既に指摘した様にモルタルの収縮を拘束した場合に収縮龜裂を生ずる材齡に對應する自由収縮率が 4×10^{-5} 程度であるので、今回の實驗成績から自由収縮率が上記の限界以内である様なモルタルの水セメント比と調合を定めることとする。

尙セメントの品種に依る収縮性並びに収縮率には大きい差がないから²⁾、茲にはセメントを 1 種に限り、且つ從來の實驗で最も収縮率の大きかつたセメントを使用した。

1) 本文の概要は先に日本建築學會研究報告第 7 號 (昭 25.8) に發表した。大野和男：コンクリートの膨脹収縮に関する研究 (4)。

2) 前出著者文献

2. 実験の計画

- (1) セメント。 浅野ポルトランドセメント。前述のセメント A を使用。
- (2) 砂。 玉川産。原砂を篩別して 0.6 mm 以下, 2.5 mm 以下, 5 mm 以下の 3 種の砂を作った。実験に際しては 0~0.6 mm, 1.2~2.5 mm の各段階に篩別けたものを原砂の粒度に従って配合したものを使用したのが, 其の粒度分布は第 1 表の通りである。

第 1 表 砂の粒度 (原砂は 6 回の平均) (配合砂は計算)

砂の種類	記号	篩の大きさ							
		0	0.15	0.3	0.6	1.2	2.5	5.0	
原砂	—	2.4	7.7	25.9	27.7	23.7	11.4	1.2	
配合砂	0.6mm以下	F	6.8	21.3	71.9	—	—	—	—
	2.5mm以下	M	2.8	8.8	29.6	31.8	27.0	—	—
	5mm	G	1.4	4.4	14.8	15.9	13.5	—	—

- (3) 水セメント比及び調合比。水セメント比は, 40, 50, 60, 70% の 4 種にえらび, 調合比はフロー 130 mm 程度以上として重量比にて 1:0, 1:1, 1:2, 1:3, 1:4 の範囲で水セメント比と組合せた。但し (F) 砂, 並びに (G) 砂は極小範囲に止めた。尙實際の水セメント比及び調合比は遊離水を分離するため第 2 表の様なものとなる。茲に眞の水セメント比とは脱型の際試験体の上に溜っている遊離水の量を差引いた値を示す。

第 2 表 水セメント比, 調合, 軟度 (括弧内はフロー値)

砂の大きさ	設計水セメント比 (%)	眞の水セメント比とフロー (%)					
		1:0	1:1	1:2	1:3	1:4	1:5
M	40	39.6 (236)	39.2 (232)	— (137)	—	—	—
	50	45.5 (—)**	47.1 (292)	48.1 (230)	— (167)	—	—
	60	49.5 (—)**	53.1 (350)	54.9 (260)	57.9 (174)	—	—
	70	54* (—)**	57.8 (—)	62.1 (300)	65.6 (237)	70.0 (133)	—
F	60	—	—	56.7 (—)	—	—	—
	70	—	—	65.6 (—)	—	—	—
G	70	—	—	—	65.0 (236)	66.9 (198)	70.7 (142)

* 推定値 ** フロー大に過ぎ測定不能

- (4) 養生。次の 3 種とする。

A. 2 日型枠中密閉, 1 箇月水中, 以後室内空気中 7 箇月

C. 2日型枠中密閉, 5日間水中, 以後室内空气中7箇月

D. " , - , "

以上の他, 小範圍に亘つて次のものを實施した。

B, 2日型枠中密閉, 11日水中, 以後室内空气中

E, " , 以後水中

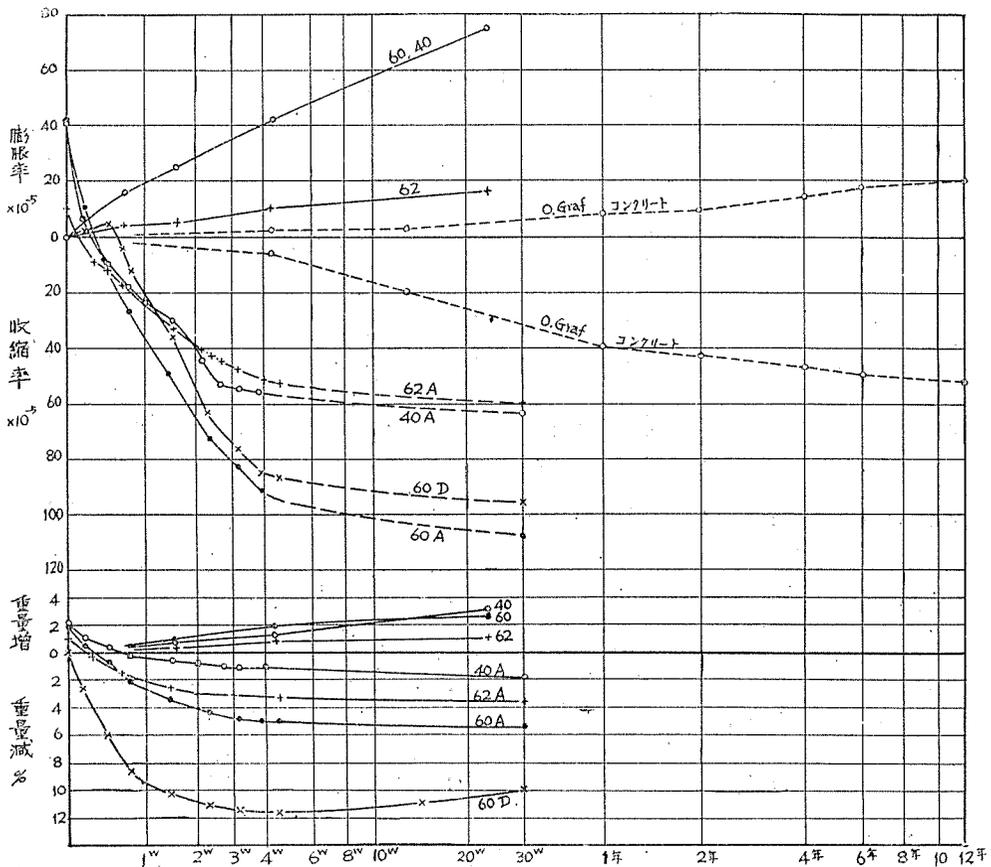
室温及び湿度は初めの約2箇月間は $20 \pm 1^\circ\text{C}$, $80 \pm 2\%$, 次の3箇月間は $25 \pm 1^\circ\text{C}$, $85 \pm 2\%$, 其の後再び $22 \pm 1^\circ\text{C}$, $80 \pm 2\%$ とした。

試験体の製作に當つては上記各種のモルタルの水中養生が同一の日に終了する様に成型日を選定し, 各試験体が同一條件の室内空气中で乾燥収縮を生ずる様にした。

(5) 試験体。 $4 \times 4 \times 20 \text{ cm}^3$, 軸の位置に標點を埋設。

前回實驗と同一型式のもので, 各種モルタルにつき3箇宛製作した。

(6) 成型, 測定法。著者従來の實驗に同じ。尚軟度の少いモルタルは $3 \times 3 \text{ cm}^2$ の面を有する鐵棒でつきしめ空氣空隙の除外に努めた。



第1圖 収縮曲線の一例

3. 実験の成績

各材齢に於ける膨脹率及び收縮率の測定値は第3表の如くである。尙試験体の乾燥による重量の變化は第4表に示した。

(1) 長さの變化の圖示法。上記を圖示する方法として横軸に材齢の函數の對數をとり、縦軸に長さの變化を普通座標でとつたセミログ座標を使用すると第1圖の様になる。此の圖示法は從來の收縮に關する研究に於ては試みられなかつたものであるが、之に依り長期間後の收縮膨脹の量を推定することが容易となつた。尙表示の都合上、膨脹と收縮とは夫々別個の座標によるのがよい。

第1圖には O. Graf 教授の10年以上に亘る實驗成績をも併記した。此の成績と對比し本實驗の試験体の長期收縮率を推定することが出來よう。

第3表 各種モルタルの膨脹率と收縮率

番 號	w/c %	調合比	水中養生期間 (日)	水中膨脹 ×10 ⁻⁵	收 縮 ×10 ⁻⁵			
					空中1週	空中2週	空中4週	空中30週
40A	40	1:0	31	+42.6 +41.0 41.9 +42.0	-23.4 -21.1 23.0 -24.4	-45.7 -43.3 44.7 -45.1	-54.0 -55.1 55.6 -57.8	-62.4 -62.8 63.1 -64.2
40B	"	"	11	+24.6 +26.4 24.5 +22.6	-51.9 -50.6 50.5 -49.1	-70.9 -69.8 69.3 -67.3	-85.0 -80.2 81.7 -80.0	-85.8 -80.2 81.3 -78.0
40C	"	"	5	+15.1 +15.8 15.4 +15.3	-47.1 -47.2 47.2 -47.3	-67.3 -71.6 70.2 -71.7	-82.7 -87.0 85.5 -86.8	-77.8 -84.4 80.7 -79.8
40D	"	"	0	— — —	-35.2 -37.7 35.8 -34.6	-61.0 -65.9 62.6 -61.0	-75.7 -80.4 77.8 -77.3	-69.5 -72.4 70.7 -70.2
40E	"	"	163	+73.3 +77.4 75.2 +74.8		水中130日	+68.2 +73.3 70.2 +69.0	
41A	"	1:1	31	+17.2 +17.3 17.3	-14.8 -14.5 14.7	-27.7 -28.8 28.3	-36.5 -37.9 37.2	-41.2 -44.1 42.7
41C	"	"	5	+ 5.3 + 6.4 5.9	-27.1 -25.0 26.1	-38.6 -36.0 37.3	-46.9 -46.2 46.6	-47.0 -48.5 47.8
41D	"	"	0	— —	-21.4 -19.2 20.3	-33.3 -29.8 31.6	-42.5 -38.7 40.6	-43.7 -40.3 42.0
50A	50	1:0	31	+43.2 +43.8 43.9 +44.8	-29.6 -29.5 29.4 -29.0	-57.4 -58.2 57.0 -55.3	-71.3 -76.1 73.7 -73.7	-85.2 -90.6 88.3 -89.0
50B	"	"	11	+27.6 +23.5 24.6 +22.8	-47.7 -52.8 49.2 -47.2	-73.2 -78.8 75.3 -74.0	-93.0 -92.4 92.1 -91.0	-101.0 - 98.8 100.0 -100.3

番 號	w/c %	調 合 比	水中養生 期間 (日)	水中膨脹 ×10 ⁻⁵		收 縮 ×10 ⁻⁵							
						空中1週	空中2週	空中4週	空中30週				
50C	50	1:0	5	+16.1 +15.2 +14.8	15.4	-32.5 -41.1 -36.6	36.7	-58.3 -70.2 -63.3	63.9	-81.6 -89.0 -84.6	85.1	-92.6 -99.8 -96.8	96.4
50D	"	"	0	— — —	—	-25.6 -25.8 -23.2	24.9	-60.0 -59.4 -52.8	57.4	-81.4 -81.2 -77.2	79.9	-86.6 -85.7 -80.6	84.3
50E	"	"	163	+75.4 +77.2 +78.0	76.9			水中130日		+70.4 +71.4 +73.4	71.7		
51A	"	1:1	31	+17.2 +18.7 +16.7	17.5	-27.5 -26.2 -28.0	26.3	-43.0 -44.2 -44.2	43.8	-56.9 -55.0 -55.4	55.8	-61.0 -63.4 -60.8	61.7
51C	"	"	5	+ 5.7 + 5.9 + 5.7	5.8	-28.0 -27.8 -27.2	27.7	-44.2 -44.3 -46.2	44.9	-55.3 -55.3 -54.9	55.2	-59.0 -58.8 -58.8	58.9
51D	"	"	0	— — —	—	-26.3 -26.2 -25.8	26.1	-44.7 -43.7 -44.6	44.3	-52.4 -53.7 -52.9	53.0	-55.5 -54.2 -55.4	55.0
51E	"	"	163	+30.2 +31.3 +32.0	31.2			水中130日		+28.1 +29.6 +30.2	29.3		
52A	"	1:2	31	+10.3 +10.7 +10.9	10.6	-27.6 -27.2 -28.3	27.7	-38.6 -38.9 -37.9	38.5	-45.6 -46.1 -45.4	45.7	-50.9 -51.0 -50.2	50.7
52B	"	"	11	+ 5.9 + 6.2 + 5.1	5.7	-24.5 -25.6 -27.4	25.8	-36.2 -36.7 -38.9	37.3	-45.5 -44.7 -48.4	46.2	-47.4 -47.3 -50.0	48.2
52C	"	"	5	+3.6 +3.8 +4.0	3.8	-25.4 -25.4 -22.4	24.4	-40.2 -43.3 -38.6	40.7	-44.3 -43.3 -41.9	43.2	-45.0 -44.0 -43.2	44.1
52D	"	"	0	— — —	—	-25.6 -25.7 -25.7	25.7	-35.9 -37.0 -36.7	36.5	-41.5 -42.4 -41.1	41.7	-44.5 -44.0 -44.0	44.2
52E	"	"	163	+17.3 +17.6 +17.8	17.6			水中130日		+16.4 +16.7 +17.1	16.7		
60A	60	1:0	31	+42.5 +43.9 +43.5	43.3	-32.2 -35.5 -34.6	34.1	-62.2 -64.2 -64.4	63.6	-93.2 -90.8 -92.0	92.0	-109.8 -106.1 -108.2	108.0
60B	"	"	11	+25.0 +24.1 +24.6	24.6	-40.1 -39.6 -37.6	39.1	-70.4 -69.0 -68.4	69.3	-95.3 -95.3 -95.6	95.4	-104.0 -104.7 -104.4	104.4
60C	"	"	5	+15.8 +15.3 +16.1	15.7	-31.0 -31.1 -29.9	30.7	-60.5 -62.0 -62.0	61.5	-89.0 -90.3 -92.0	90.4	-95.0 -98.9 -102.7	98.9
60D	"	"	0	— — —	—	-22.2 -23.8 -22.2	22.7	-54.6 -58.8 -57.4	56.9	-85.5 -89.0 -88.8	87.8	-94.9 -96.8 -98.9	96.9

番 號	w/c %	調合比	水中養生期間 (日)	水中膨脹 ×10 ⁻⁵		收 縮 ×10 ⁻⁵							
						空中 1 週		空中 2 週		空中 4 週		空中 30 週	
60E	60	1:0	163	+75.6 +78.5 +72.0	75.4				水中 130 日	+71.4 +74.3 +69.0	71.6		
61A	"	1:1	31	+16.4 +19.2	17.8	-18.5 -15.6	17.1	-37.5 -32.3	34.9	— —	—	-68.3 -68.6	68.5
61C	"	"	5	+ 7.2 + 8.0	7.6	-12.9 -12.9	12.9	-35.4 -34.0	34.7	— —	—	-62.3 -62.2	62.3
61D	"	"	0	— —	—	-11.6 -13.9	12.8	-31.5 -32.6	32.1	— —	—	-59.8 -60.6	60.2
62A	"	1:2	31	+ 9.2 +10.6 +10.8	10.2	-21.3 -20.8 -23.1	21.7	-38.0 -38.6 -39.6	38.7	-51.6 -51.0 -50.6	51.1	-60.9 -61.2 -59.3	60.5
62B	"	"	11	+ 5.2 + 4.9 + 5.4	5.2	-20.6 -22.9 -22.1	21.9	-34.3 -38.5 -37.2	36.7	(-42.9) (-47.1) (45.0) (-47.0)	(45.0)	-53.3 -57.3 -56.2	55.6
62C	"	"	5	+ 4.1 + 3.6 + 3.8	3.8	-16.3 -15.8 -15.8	16.0	-32.9 -31.5 -31.2	31.9	(-40.2) (-40.2) (40.0) (-39.5)	(40.0)	-48.2 -48.2 -47.9	48.1
62D	"	"	0	— — —	—	-21.9 -19.6 -20.7	20.7	-34.7 -30.5 -33.8	33.0	-42.9 -39.9 -44.0	42.3	-47.5 -46.0 -48.4	47.3
62E	"	"	163	+17.8 +16.1 +16.4	16.8				水 130 中日	+15.3 +14.8 +15.3	15.1		
63A	"	1:3	31	+ 6.3 + 7.2 + 6.5	6.7	-19.4 -17.9 -15.5	17.6	-29.8 -28.6 -27.6	28.7	-40.1 -39.0 -38.7	39.3	-51.8 -50.4 -51.6	51.3
63C	"	"	5	+ 2.3 + 2.5 + 2.3	2.4	-19.0 -19.6 -18.6	19.1	-29.7 -32.2 -30.6	30.8	-36.4 -39.7 -37.8	38.0	-41.9 -46.7 -44.0	44.2
63D	"	"	0	— — —	—	-20.1 -22.0 -22.9	21.7	-32.6 -34.7 -35.2	34.2	-38.4 -40.1 -41.0	39.8	-41.4 -43.8 -45.9	43.7
63E	"	"	163	+10.7 + 9.0 + 9.1	9.6				水中 130 日	+10.2 + 8.3 + 8.1	8.9		
70A	70	1:0	31	+43.5 +42.6 +42.6	42.9	-19.4 -24.5	22.0	-51.8 -60.7	51.3	— —	—	-116.2 -132.2	124.2
70B	"	"	11	+24.3 +24.3 +23.9	24.2	-25.0 -24.6 -27.2	25.6	-65.8 -62.0 -63.6	63.8	— — —	—	-126.3 -123.4 -120.3	123.3
71A	"	1:1	31	+19.3 +20.6	20.0	-17.6 -18.6	18.1	-39.5 -42.1	40.8	— —	—	-83.2 -84.4	83.8

(註) 空空中 4 週の欄の数字の中 () 内のものは空空中 3 週を示す。

番 號	w/c %	調合比	水中養生期間 (日)	水中膨脹 ×10 ⁻⁵		收 縮 ×10 ⁻⁵							
						空中 1 週		空中 2 週		空中 4 週		空中 30 週	
71C	70	1:1	5	+ 7.8 + 7.3	7.6	- 8.2 -10.8	9.5	-37.8 -40.5	39.2	—	—	-73.0 -73.4	73.2
71D	"	"	0	—	—	-18.1 -12.6	15.3	-38.7 -32.2	35.5	—	—	-68.4 -62.2	65.3
72A	"	1:2	31	+ 8.0 + 9.1 +10.1	9.1	-23.2 -20.0 -20.3	21.2	-40.9 -39.4 -40.7	40.3	-47.6 -48.1 -50.8	48.8	-56.6 -58.8 -61.8	59.1
72B	"	"	11	+ 5.4 + 6.2 + 5.9	5.8	-16.8 -15.2 -15.2	15.7	-38.5 -35.2 -34.7	36.1	(-47.0) (-43.7) (44.9) (-44.0)		-61.2 -57.6 -57.6	58.8
72C	"	"	5	+ 4.6 + 3.1 + 4.4	4.0	-10.5 -11.3 -10.6	10.8	-31.0 -30.9 -29.0	30.3	(-40.5) (-40.9) (40.2) (-39.2)		-56.0 -55.4 -54.6	55.3
72D	"	"	0	—	—	-14.5 -11.1 -12.5	12.7	-29.4 -27.6 -28.4	28.5	-41.3 -39.8 -39.2	40.1	-49.7 -50.2 -50.1	50.0
73A	"	1:3	31	+ 6.3 + 5.9 + 6.5	6.2	-18.8 -16.4 -15.8	17.0	-34.9 -30.6 -31.5	32.3	(-41.4) (-37.3) (38.7) (-37.5)		-54.7 -51.8 -51.3	52.6
73C	"	"	5	+ 2.1 + 3.1 + 2.8	2.7	-11.9 -14.5 -13.6	13.3	-29.6 -34.5 -31.9	32.0	(-34.8) (-39.8) (37.5) (-37.8)		-45.6 -49.2 -47.3	47.4
73D	"	"	0	—	—	- 9.3 - 9.3 - 9.3	9.3	-26.7 -26.4 -27.1	26.7	(-32.8) (-33.6) (33.6) (-33.4)		-43.4 -45.0 -45.6	44.7
74A	"	1:4	31	+ 3.9 + 4.7 + 4.7	4.4	-14.0 -12.0 -13.0	13.0	-23.0 -23.0 -28.6	28.2	(-36.2) (-35.9) (35.3) (-33.8)		-49.3 -49.3 -48.5	49.0
74C	"	"	5	+ 1.8 + 1.5 + 1.5	1.6	-10.8 -11.8 -12.9	11.8	-27.9 -28.6 -30.6	29.0	(-31.6) (-33.3) (32.9) (-33.8)		-40.1 -41.5 -42.9	41.5
74D	"	"	0	—	—	-12.8 -13.6 -11.8	12.7	-28.5 -28.9 -29.0	28.8	(-31.8) (-31.3) (32.0) (-32.9)		-39.7 -40.7 -41.2	40.5
G 73A	70	1:3 G砂	31	+ 6.9 + 7.2	7.0	-16.6 -16.2	16.4	-29.9 -29.4	29.7	—	—	-44.2 -42.6	43.4
G 73C	"	"	5	+ 3.4 + 2.6	3.0	-11.4 -12.8	12.1	-27.3 -27.1	27.2	—	—	-41.6 -41.6	41.6
G 73D	"	"	0	—	—	-13.9 -13.3	13.6	-26.4 -24.5	25.5	—	—	-40.3 -39.0	39.7
G 74A	"	1:4 G砂	31	+ 6.5 + 6.2	6.4	-15.6 -15.0	15.3	-27.2 -27.2	27.2	—	—	-41.3 -41.2	41.3

番 號	w/c %	調合比	水中養生期間 (H)	水中膨脹 ×10 ⁻⁵		收 縮 ×10 ⁻⁵							
						空中1週		空中2週		空中3週		空中30週	
G 74C	70	1:4 G砂	5	+ 2.6 + 2.6	2.6	-11.8 -11.9	11.9	-25.8 -26.6	26.2	—	—	-38.6 -39.6	39.1
G 74D	"	"	0	—	—	-14.2 -13.4	13.8	-26.3 -26.4	26.4	—	—	-38.8 -39.5	39.2
G 75A	"	1:5 G砂	31	+ 5.9 + 5.2	5.6	-13.1 -12.3	12.7	-23.3 -24.2	23.8	—	—	-35.2 -36.7	36.0
G 75C	"	"	5	+ 1.5 + 1.3	1.4	-11.8 -11.6	11.7	-24.0 -25.6	24.8	—	—	-34.9 -36.7	35.8
G 75D	"	"	0	—	—	-10.8 -13.1	12.0	-21.5 -23.3	22.4	—	—	-32.0 -34.0	33.0
F 62A	60	1:2 F砂	31	+ 9.5 + 9.8 + 9.1	9.5	-17.5 -15.4 -14.5	15.8	-35.0 -32.7 -31.3	33.0	-44.0 -41.7 -42.5	42.7	-69.3 -66.8 -71.2	69.1
F 62C	"	"	5	+ 3.8 + 3.1 + 4.4	3.8	-18.0 -18.8 -18.0	18.3	-41.3 -41.9 -41.6	41.6	-48.7 -48.8 -49.4	49.0	-60.2 -60.4 -60.9	60.5
F 62D	"	"	0	—	—	-20.4 -18.4 -18.0	18.9	-39.8 -39.3 -38.3	39.1	-46.6 -46.0 -44.5	45.7	-55.6 -54.8 -53.7	54.7
F 72A	70	1:2 F砂	31	+11.1 +11.3 + 9.3	10.6	-17.2 -18.2 -15.8	17.1	-38.2 -39.4 -35.4	37.7	-48.2 -48.0 -46.0	47.4	-72.4 -71.2 -70.0	71.2
F 72C	"	"	5	+ 4.4 + 5.4 + 4.8	4.8	-13.8 -13.7 -16.1	14.5	-38.6 -38.6 -42.7	40.0	-48.6 -48.6 -51.6	49.6	-64.4 -65.4 -68.2	66.0
F 72D	"	"	0	—	—	-16.8 -15.8 -17.5	16.7	-41.9 -38.2 -40.6	40.2	-51.2 -46.9 -49.7	49.3	-66.0 -61.9 -65.0	64.3

第 4 表 各種モルタルの重量變化 (%)

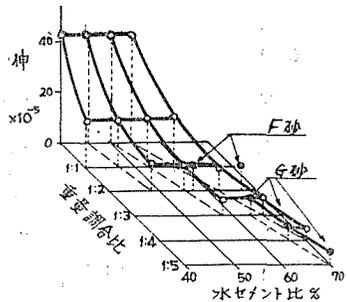
3 箇又は 2 箇の平均, 脱型時を基準とする。

番 號	w/c %	調合比	水中養生 (H)	重量増加	重 量 減 少			
					空中5日	空中2週	空中10週	空中30週
40A	40	1:0	31	+0.9	-0.1	-0.7	-1.6	-2.0
40B			11	+1.0	-2.7	-3.8	-4.7	-4.9
40C			5	+0.7	-3.7	-5.4	-6.2	-6.1
40D			0	—	-6.4	-8.1	-8.1	-7.0
40E			163	+3.0		130日水中	+2.7	
41A	40	1:1	31	+0.4	0	-0.4	-1.1	-1.4
41C			5	+0.5	-2.5	-3.0	-3.6	-3.6
41D			0	—	-3.4	-4.4	-4.6	-4.2

番 號	w/c %	調合比	水中養生 (日)	重量増加	重 量 減 少			
					空中 5 日	空中 2 週	空中 10 週	空中 30 週
50A	50	1:0	31	+2.3	-0.9	-2.2	-3.4	-3.7
50B			11	+0.9	-4.1	-5.9	-7.1	-7.1
50C			5	+0.6	-5.3	-7.2	-8.4	-8.0
50D			0	—	-7.4	-9.6	-10.1	-8.8
50E			163	+2.9		130日水中	+2.6	
51A	50	1:1	31	+1.3	-1.2	-2.2	-2.9	-3.1
51C			5	+0.3	-4.2	-5.5	-5.9	-5.6
51D			0	—	-6.4	-7.4	-7.3	-6.2
51E					163	+1.6		130日水中
52A	50	1:1	31	+1.0	-1.2	-1.9	-2.3	-2.5
52B			11	+0.4	-2.5	-3.3	-3.7	-3.8
52C			5	+0.3	-3.0	-4.0	-4.2	-4.3
52D			0	—	-5.0	-5.6	-5.5	-4.8
52E			163	+1.2		130日水中	+1.1	
60A	60	1:0	31	+2.1	-2.1	-4.0	-5.3	-5.5
60B			11	+0.9	-4.6	-7.3	-8.6	-8.1
60C			5	+0.4	-6.1	-8.4	-9.4	-8.8
60D			0	—	-8.6	-10.8	-11.4	-10.0
60E			163	+2.5		130日水中	+2.3	
61A	60	1:1	31	+1.0	-1.3	-2.7	-3.9	-4.0
61C			5	+0.3	-5.0	-6.7	-7.6	-6.9
61D			0	—	-6.0	-8.1	-8.3	-7.2
62A			60	1:2	31	+0.9	-1.6	-3.0
62B	11	+0.3			-3.7	-4.7	-5.1	-5.1
62C	5	+0.2			-3.9	-5.0	-5.4	-5.1
62D	0	—			-5.5	-6.5	-6.5	-5.7
62E			163	+1.0		130日水中	+0.9	
63A	60	1:3	31	+1.0	-1.6	-2.5	-3.1	-3.2
63C			5	+0.2	-3.7	-4.4	-4.6	-4.5
63D			0	—	-5.3	-5.8	-5.7	-5.0
63E					163	+1.1		130日水中
70A	70	1:0	31	+1.9	-1.8	-4.4	-6.0	-6.2
70B			11	+0.8	-5.1	-8.0	-9.5	-9.7
71A	70	1:1	31	+1.0	-2.4	-4.5	-5.7	-5.7
71C			5	+0.2	-5.7	-8.6	-9.2	-8.2
71D			0	—	-7.3	-9.8	-10.0	-8.7
72A			70	1:2	31	+0.7	-3.0	-4.4
72B	11	+0.1			-4.8	-6.5	-6.8	-6.4
72C	5	+0.1			-5.0	-6.9	-7.9	-6.5
72D	0	—			-5.9	-7.8	-7.7	-6.6
73A	70	1:3	31	+0.7	-2.6	-4.0	-4.3	-4.4
73C			5	+0.2	-4.1	-5.5	-5.6	-5.2
73D			0	—	-5.0	-6.4	-6.4	-5.6
74A			70	1:4	31	+0.8	-2.2	-3.5
74C	5	+0.2			-3.7	-5.0	-5.1	-4.7
74D	0	—			-4.3	-5.3	-5.2	-4.7

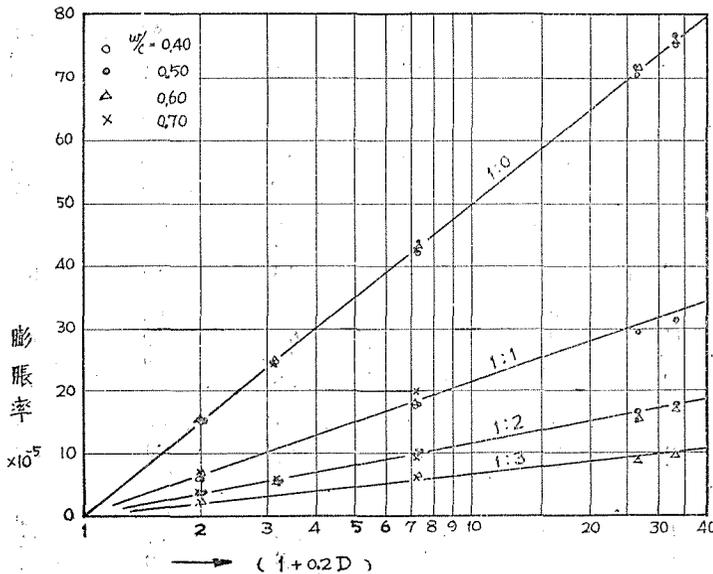
番 號	w/c %	調合比	水中養生 (日)	重量増加	重 量 減 少			
					空中 5 日	空中 2 週	空中 10 週	空中 30 週
G 73A	70	1:3 G砂	31	+0.5	-3.1	-4.1	-4.3	-4.4
G 73C			5	+0.1	-4.5	-5.6	-5.7	-5.2
G 73D			0	—	-5.3	-6.5	-6.4	-5.6
G 74A	70	1:4 G砂	31	+0.4	-3.0	-3.7	-3.8	-4.0
G 74C			5	+0	-4.1	-5.0	-5.1	-4.8
G 74D			0	—	-4.6	-5.5	-5.5	-4.9
G 75A	70	1:5 G砂	31	+0.5	-2.3	-3.2	-3.4	-3.5
G 75C			5	+0.1	-3.5	-4.2	-4.3	-4.0
G 75D			0	—	-4.2	-4.9	-4.7	-4.5
F 62A	60	1:2 F砂	31	+0.8	-0.8	-2.6	-3.3	-3.6
F 62C			5	+0.3	-3.9	-5.5	-5.7	-5.5
F 62D			0	—	-5.1	-6.5	-6.4	-5.8
F 72A	70	1:2 F砂	31	+0.9	-2.3	-4.6	-5.0	-5.2
F 72C			5	+0.2	-4.6	-6.8	-7.1	-6.6
F 72D			0	—	-6.4	-8.0	-7.9	-7.1

4. 水中に於ける膨脹。水中養生の場合には各モルタル共膨脹する。此の量は水セメント比の如何に拘わらず同一調合比については殆んど相等しく、且つ砂の粒大にも無関係であるといつてよい。各モルタルの膨脹率をまとめて示せば、例えば第2圖の如くであるが、之等の膨脹率はセミログ座標上では第3圖の如く略一直線上にあつて次の式を以て表わすことが出来る。

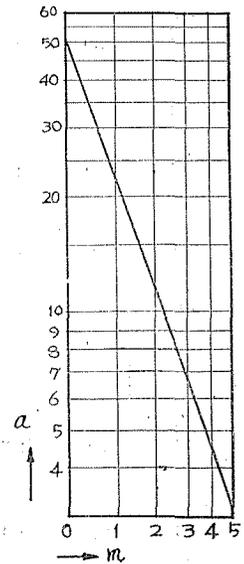


第2圖 膨 脹 率

$$\epsilon = a \log (1 + bD) \quad a = k_1 (c + m)^{-k_2}$$



第3圖 材 齡 と 膨 脹 率



第4圖 a の 値

茲に

D : 水中材齢

ϵ : 其の材齢に於ける膨脹率

m : モルタルの砂 / セメント重量比

b, c, k_1, k_2 : 係數

水中の材齢 160 日に及ぶ本實驗の測定値から上記の係數を求めれば $b = 0.2$ となり a は次の式又は第 4 圖で表わされる。

$$a = 0.012 (3+m)^{-2.82}$$

5. 空氣中に於ける收縮

(1) 收縮の時間的経過。空氣中に於ける乾燥收縮の時間的變化の狀況は、第 1 圖乃至第 3 表から明かな様に、從來の諸實驗と較べて大差のないものであるが、水中養生のないものの收縮の進行が比較的ゆるやかであるのに對し、水中養生期間が長くなる程、乾燥初期の收縮が急激である。又調合が富である程、全收縮量が大きいため、一般に初期の收縮量も大きい。水中養生終了時の長さを基準として空中材齢 1 週及び 2 週の收縮率の平均値を示せば第 5 表の如く、

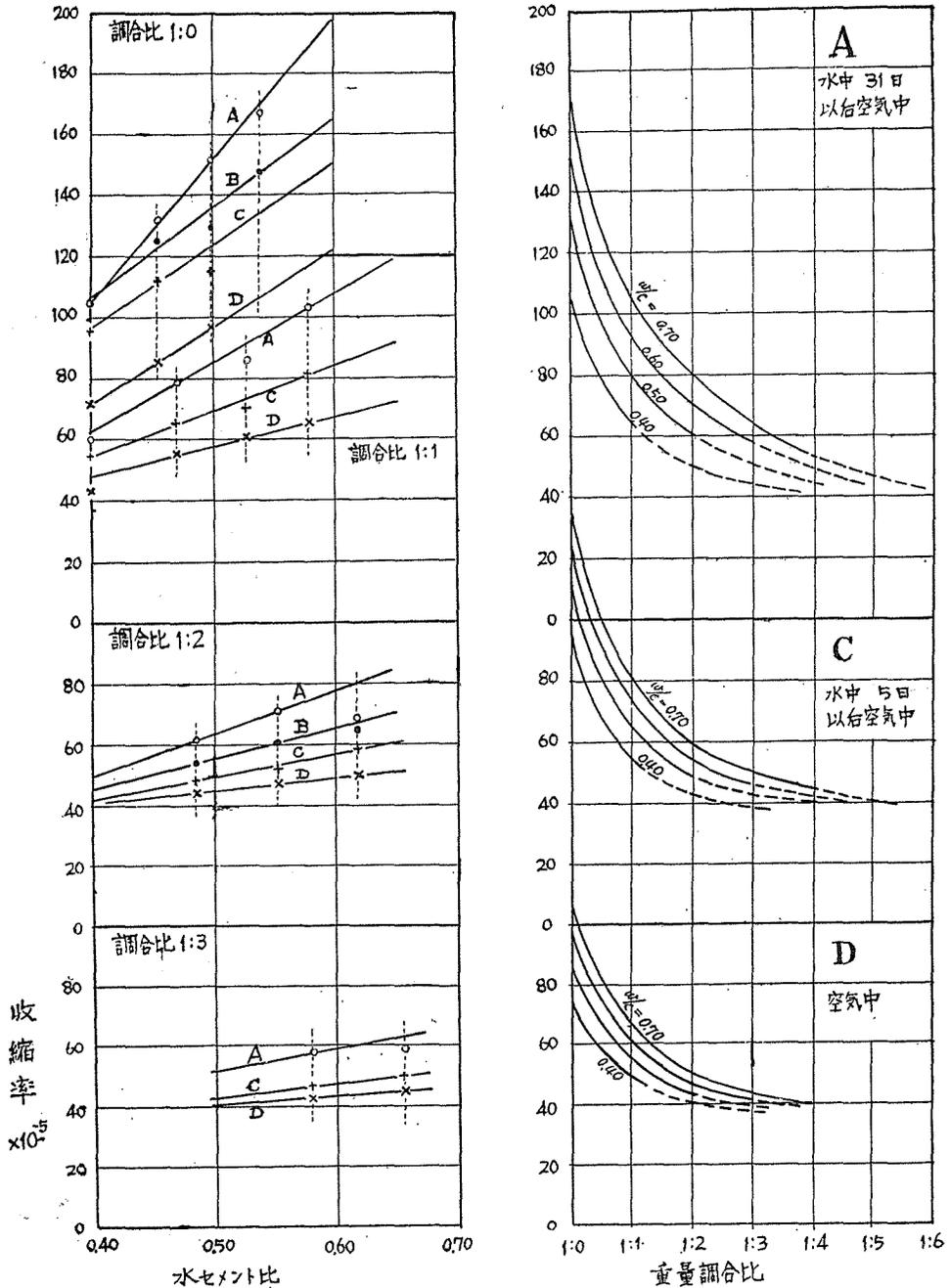
第 5 表 空氣中材齡初期の收縮比率

水中養生終了時基準

水中養生期間 (日)	w/c %	1:0		1:1		1:2		1:3		1:4		
		最大 收縮率 $\times 10^{-5}$	1W 2W 比率比率									
A 31日	40	105.0	0.62 0.82	60.0	0.53 0.76							
	50	132.2	0.55 0.76	79.2	0.55 0.77	61.3	0.63 0.81					
	60	151.3	0.51 0.71	86.3	0.41 0.61	70.7	0.45 0.69	58.0	0.42 0.61			
						F62A	78.6	0.32 0.54				
	70	167.1	0.38 0.56	103.0	0.37 0.59	68.2	0.44 0.72	58.8	0.39 0.65	53.4	0.33 0.61	
						F72A	81.8	0.34 0.59	(50.4)	(0.46 0.73)	(47.7)	(0.46 0.71)
B 11日	40	105.8	0.71 0.89									
	50	124.6	0.59 0.80			53.9	0.58 0.80			G75A	41.6	0.34 0.64
	60	129.0	0.49 0.73			60.8	0.45 0.69					
	70	147.5	0.34 0.60			64.6	0.33 0.65					
C 5日	40	96.1	0.65 0.89	53.7	0.60 0.80							
	50	111.8	0.47 0.71	64.7	0.52 0.78	47.9	0.59 0.93					
	60	114.6	0.41 0.67	69.9	0.29 0.60	51.9	0.38 0.69	46.6	0.46 0.71			
						F62C	64.3	0.34 0.70				
	70			80.8	0.21 0.58	59.3	0.25 0.58	50.1	0.32 0.69	43.1	0.31 0.71	
						F72C	70.8	0.27 0.63	(44.6)	(0.34 0.68)	(41.7)	(0.34 0.64)
D 0日	40	70.7	0.51 0.89	42.0	0.48 0.75					G75C	37.2	0.35 0.67
	50	84.3	0.30 0.68	55.0	0.47 0.81	44.2	0.58 0.83			G75D	33.0	0.36 0.68
	60	96.9	0.23 0.59	60.2	0.21 0.53	47.3	0.44 0.70	43.7	0.50 0.78			
						F62D	54.7	0.35 0.71				
	70			65.3	0.23 0.54	50.0	0.25 0.57	44.7	0.21 0.60	40.5	0.31 0.71	
						F72D	64.3	0.26 0.62	(39.7)	(0.34 0.64)	(39.2)	(0.35 0.67)

() 内は G 73 及び G 74

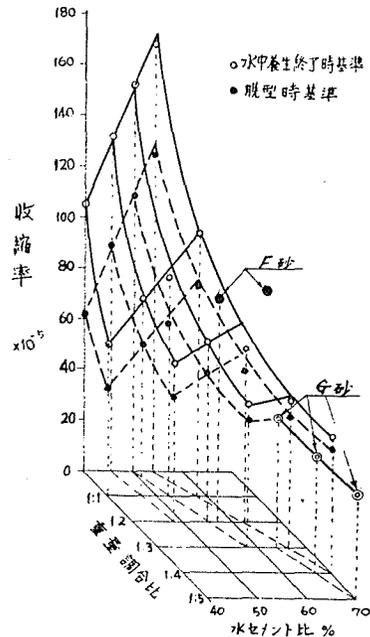
上記の傾向が判然とする。尙水中養生を行わないモルタルに於ては、脱型後 1~2 日間の収縮が著しく不活潑であつて、純セメントモルタル並びに水セメント 60%、70% の 1:1 モルタルは、此の時期に寧ろ若干の膨脹を示した。第 5 表には各モルタルの最大収縮 (空中材齢 30 週) をも併記した。



第 5 圖 各種モルタルの自由収縮率

収縮量の増加の経過は、上記の様な水中養生期間の大小の他に、室温並びに空気湿度によつて變化するものと思われるが、同一條件で引續き乾燥せしめる場合には、第1~2日目を除き、全収縮量の80~90%の収縮量に達する迄の期間について、収縮率と乾燥材齡との間に、前掲の水中膨脹に對する算式と同型の式が成立する様に思われる。但し前記の如く條件が複雑であるから、係數の決定は困難である。

(2) 空中材齡30週に於ける収縮率。本實驗のモルタルに於ては、此の材齡で、試験温度並びに湿度に對應する全収縮を略々完了したものと見ることが出来るが、其の數値は、第3表及び第5表の如くであつて、之を整理すれば第5圖の様になる。尙第6圖は水セメント比と調合比と収縮率の關係を立體的に示した一例である。同圖中の破線の曲面は試験体脱型時の長さを基準とした収縮率、實線の曲面は水中養生終了時の長さ基準とした収縮率を表わす。



第6圖 水中養生31日

(1) 水セメント比の影響。純セメントモルタルに就ては、水セメント比の大きいもの程収縮率が大きく、水セメント比40~60%の範圍では、試験体の實際の水セメント比に略々正比例して變化している。同一調合比の砂入モルタルでも此の傾向が見られるが、調合が貧になるに従い、水セメント比の差異に基く収縮率の數値の差は少くなる。

(2) 養生の影響。水中養生終了時の長さを基準として考えると、収縮率は發生期間の長いもの程大きい。脱型時の長さを基準として考えても、水セメント比50%以上のモルタルでは同じ傾向があるが、水セメント比40%附近のモルタルでは、上記の脱型時の長さを基準とする収縮が長期(31日)の水中養生によつて減少する。之等の點は既に報告した處¹⁾と一致している。

(3) 調合比の影響。モルタル中の砂の割合が増加する場合の収縮率の減少の性状は前掲の第5圖、第6圖に依つて明かであるが、更に之を比率で示せば第6表の様になる。

この表によれば、水セメント比を一定とした各モルタルの収縮率と純セメントモルタルの収縮率の比率は略々一定の低減率を示しているが、貧調合となるに従い、水セメント比の少ないものは低減率が稍鈍る傾向が見られる。此の原因としては骨材自身の収縮が考えられ、骨材を増加して調合を貧にしても、モルタルの収縮量には一種の最低限度があることが豫想される。

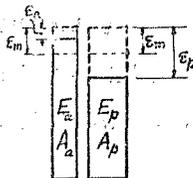
1) 前出著者報告

第6表 モルタルの調合と収縮比率

養生条件	調合比	脱型時基準				水中養生終了時基準			
		w/c 40%	50%	60%	70%	40%	50%	60%	70%
31日水中 以後空気中	1:0	100	100	100	100	100	100	100	100
	1:1	68	68	68	67	60	59	60	60
	1:2	(62)	58	56	56	(47)	46	47	47
	1:3		(52)	47	44		(40)	39	37
5日水中 以後空気中	1:0	100	100	100	100	100	100	100	100
	1:1	60	61	62	59	56	58	60	61
	1:2	(46)	46	46	44	(43)	43	43	44
	1:3		(43)	41	38		(43)	38	38
2日型枠 以後空気中	1:0	100	100	100	100				
	1:1	67	65	62	61				
	1:2	(57)	52	49	47				
	1:3		(49)	45	42				

(註) 第5圖の修正による。()内数字は第5圖による推定値。

(2) 収縮率の計算値。さてモルタルの収縮の機構を考えるのに、セメントペーストの硬化物部分と骨材實質部に分けて、両者が夫々相異つた収縮率を示し乍ら一体として収縮するものと假定しよう。



第7圖

セメントペースト硬化物部分と骨材實質部を何れも単位長さの柱状体と考えて、其の断面積を夫々 A_p 及び A_a 、ヤング係数を E_p 及び E_a (E_p は引張、 E_a は壓縮ヤング係數)、セメントペースト硬化物部分の自由収縮率を ε_p 、骨材の乾燥収縮率を ε_a 、モルタルの収縮率を ε_m とする。両者が一体となつて収縮するために骨材部は $(\varepsilon_m - \varepsilon_a)$ だけ壓縮され、セ

メント硬化物部は $(\varepsilon_p - \varepsilon_m)$ だけ引張を受けると考えると

$$(\varepsilon_m - \varepsilon_a) E_a A_a = (\varepsilon_p - \varepsilon_m) E_p A_p$$

$$\therefore (E_a A_a + E_p A_p) \varepsilon_m = \varepsilon_p E_p A_p + \varepsilon_a E_a A_a$$

$$\varepsilon_m = \frac{\varepsilon_p E_p A_p + \varepsilon_a E_a A_a}{E_p A_p + E_a A_a}$$

$$= \frac{\varepsilon_p + \varepsilon_a \frac{E_a A_a}{E_p A_p}}{1 + \frac{E_a A_a}{E_p A_p}}$$

或は

$$\varepsilon_m - \varepsilon_a = \frac{\varepsilon_p - \varepsilon_a}{1 + \frac{E_a A_a}{E_p A_p}}$$

モルタルの調合が定まれば、上式中の A_a/A_p は計算出来るから ε_p 、 ε_a 、 E_a/E_p が分れば

ϵ_m は求められる。

今 ϵ_p には實驗値 (第5圖による修正を行つたもの) を使用し, ϵ_a (骨材の収縮率) には O. Graf 教授の實驗値¹⁾ を参考として $\epsilon_a=20 \times 10^{-5}$ と假定する。 E_a/E_p の大きさについては水セメント比によつて變動する筈であるが, 本實驗のモルタルは, 既に第2表に示した様に, 出來上り後の水セメント比が設計水セメント比と相違しているから, 先ず第5圖から同一水セメント比に該當する各調合モルタルの収縮量を誘導した上, 31日水中養生の場合の 1:0 モルタルと 1:1 モルタルの収縮率から逆算に依つて E_a/E_p を求めることとすると, 第7表の様な數値となる。今の場合出來るだけ實驗値に近い點をとるために, 水セメント比を 50%, 55%, 60% の3種としてみた。

之等の ϵ_p (1:0の収縮率), ϵ_a , E_a/E_p を用いて 1:2, 1:3, 1:4 の調合比のモルタルの収縮率を計算した結果は, 第8表に示す如くであつて, 單に水中養生31日のもののみでなく,

第7表 E_a/E_p の計算 その1

w/c %	50		55		60	
① $\epsilon_p \quad \epsilon_p - \epsilon_a$	152	132	175	155	200	180
② $\epsilon_{1:1} \quad \epsilon_{1:1} - \epsilon_a$	85	65	96	76	108	88
③ $\epsilon_p - \epsilon_a/\epsilon_{1:1} - \epsilon_a$	2.03		2.04		2.05	
④ ③-1	1.03		1.04		1.05	
⑤ A_a/A_p	$\frac{0.315}{0.685} = 0.460$		$\frac{0.302}{0.698} = 0.434$		$\frac{0.291}{0.709} = 0.411$	
$E_a/E_p = ④/⑤$	2.34		2.40		2.56	

第8表 モルタルの収縮率の計算値 その1 (収縮率は $\times 10^{-5}$)

項 目	$w/c=50\%$		$w/c=55\%$		$w/c=60\%$		
	A 水中31日	D 水中0日	A 水中31日	D 水中0日	A 水中31日	D 水中0日	
$\epsilon_p, \quad \epsilon_p - \epsilon_a$	152, 132	97, 77	175, 155	109, 89	200, 180	121, 101	
E_a/E_p	2.34	2.34	2.40	2.40	2.56	2.56	
1:1 モルタル	A_a/A_p	0.460	0.460	0.434	0.434	0.411	0.411
	$1 + \frac{E_a A_a}{E_p A_p}$		2.03		2.04		2.05
	ϵ_m 計算		57.9		63.7		69.3
	ϵ_m 實驗	85	58		63		68
1:2 モルタル	A_a/A_p	0.915		0.868		0.820	
	$1 + \frac{E_a A_a}{E_p A_p}$	3.14		3.08		2.90	
	ϵ_m 計算	62.0	44.5	70.3	48.9	78.0	52.6
	ϵ_m 實驗	64	44	71	47	78	49

1) Versuche zur Ermittlung der Raumänderungen von Zement und Zementmörtel beim Abbinden. (Mitt. aus der Materialprüfungsanstalt der Techn. Hochschule, Stuttgart.) C. () ()

1:3 モルタル	A_a/A_p	1.38		1.30		1.22	
	$1 + \frac{E_a A_a}{E_p A_p}$	4.24		4.12		4.13	
	ϵ_m 計算	51.2	38.2	57.8	41.6	63.5	44.4
	ϵ_m 実験	52	40	56	42	60	44
1:4 モルタル	A_a/A_p	1.84		1.73		1.63	
	$1 + \frac{E_a A_a}{E_p A_p}$	5.31		5.15		5.18	
	ϵ_m 計算	44.8	34.5	50.1	37.3	54.7	39.5
	ϵ_m 実験					50	40

水中養生を行わない系列のモルタルについても、計算値と実験値は良く一致している。

以上の如く、実際の水セメント比一定の場合の収縮を誘導するのは些か面倒であるから、実際の水セメント比に關係なく、單に設計水セメント比一定の場合について、上記と全く同じ

第 9 表 E_a/E_p の計算 その 2 (水中養生 31 日の 1:0, 1:1 より)

項 目	$w/c=40\%$		50%		70%		70%	
① $\epsilon_p - \epsilon_p - \epsilon_a$	105	85	132	112	152	132	170	150
② $\epsilon_{1:1} - \epsilon_{1:1} - \epsilon_a$	63	43	79	59	91	71	103	83
③ $\epsilon^p - \epsilon_a/\epsilon_{1:1} - \epsilon_a$	1.98		1.90		1.85		1.81	
④ ③ - 1	0.98		0.90		0.85		0.81	
⑤ ④/ $\frac{A_a}{A_p} = E_a/E_p$	1.87		1.96		2.06		2.19	

第 10 表 モルタルの収縮率の計算値 その 2 (収縮率は $\times 10^{-5}$)

項 目		$w/c=40\%$		50%		60%		70%	
		水中31日	水中0日	水中31日	水中0日	水中31日	水中0日	水中31日	水中0日
ϵ_p		105	72	132	85	152	97	170	106
E_a/E_p		1.87		1.96		2.06		2.19	
1:1 モルタル	A_a/A_p	0.524		0.460		0.411		0.370	
	ϵ_m 計算		46.2		56.8		62.1		67.6
	ϵ_m 実験	63	48	79	55	91	60	103	66
1:2 モルタル	A_a/A_p	1.05		0.915		0.820		0.740	
	ϵ_m 計算	48.6	37.5	60.1	43.3	69.2	48.6	77.2	52.9
	ϵ_m 実験	(50)	(41)	61	44	71	47	81	50
1:3 モルタル	A_a/A_p	1.58		1.38		1.22		1.10	
	ϵ_m 計算	41.4	33.1	50.2	37.5	57.6	41.9	64.0	45.2
	ϵ_m 実験			(50)	(40)	58	43	63	45
1:4 モルタル	A_a/A_p	2.09		1.84		1.63		1.47	
	ϵ_m 計算	37.3	30.6	44.2	34.1	50.3	37.7	55.6	40.4
	ϵ_m 実験					(50)	(39)	54	41

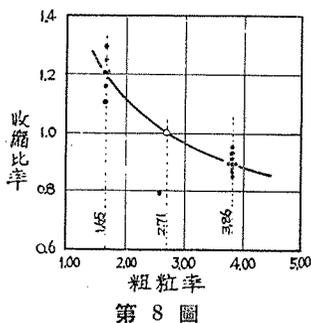
(註) () 内は実験値からの擴張推定値

方式の計算を行つて見ると第9表及び第10表の様になつて、此の場合も亦、計算値は實驗値と概ね一致した。尙茲には A_a/A_p の値も實際の水セメント比を考慮せずに、設計水セメント比について計算してある。

此の第二の方法は理論的には若干の無理があるが、元來 E_a/E_p は A_a/A_p を假定して實驗値から誘導したものを使用しているの、誤差が相殺されて、結果的には上記の如く、實驗値と比較的良く一致するのであろう。

以上から、初めに假定した収縮の機構の假説は、本實驗の範圍では、概ね妥當であると言ふことが出来る。

㊦ 砂の粒度の影響。第3表のG砂、M砂、F砂の各モルタルについて見ると、従來唱へられていた様に、砂の粒大の小さいもの程、大きな収縮率を示した。今M砂モルタルの収縮率を基準として、G砂モルタル及びF砂モルタルの収縮率の比率を求めれば第11表の如く、G砂の場合には約10%収縮が減少し、F砂の場合には約20%収縮が増大している。之等と砂の粗粒率の關係を圖示すれば第8圖の様になつて、點の散布はかなり甚しいが、大体に於て粗粒率の小さい程稍急激に収縮が増大する傾向が見られる。今回の實驗した各粒度の砂は、一種類の原砂から篩別によつて作製したため、粗粒率の小さい砂は必然的に異常に多量の0.15mm以下の微粒部を含有していた。細砂モルタルの上記の様な収縮性を斯様な微粒部のみの影響と斷ずることは困難であるが、元來粘土粉末を水練りしたものの乾燥収縮は極めて大きく、例えば、セメントと同程度の粉末度の砂粉を水練りしたものは、乾燥に際し大収縮を示し、又昭和22年9月の洪水時のヘドロの乾燥の際に起つた大龜裂の幅の觀測によれば、其の乾燥が充分でなかつたに



第11表 砂の粒大とモルタルの収縮比率

水中養生期間(日)	砂の粒大	重量調合比と水セメント比				
		1:2 60%	1:2 70%	1:3 70%	1:4 70%	1:5 70%
A 31日	M	70.7 (1.00)	68.2 (1.00)	58.8 (1.00)	53.4 (1.00)	48* (1.00)
	G	—	—	50.4 (0.86)	47.7 (0.89)	41.6 (0.87)
	F	78.6 (1.10)	81.8 (1.20)	—	—	—
C 5日	M	51.9 (1.00)	59.3 (1.00)	50.1 (1.00)	43.1 (1.00)	40* (1.00)
	G	—	—	44.6 (0.89)	40.9* (0.95)	37.2 (0.93)
	F	64.3 (1.24)	70.8 (1.20)	—	—	—
D 0日	M	47.3 (1.00)	50.0 (1.00)	44.7 (1.00)	40.5 (1.00)	39* (1.00)
	G	—	—	39.7 (0.89)	36.4* (0.90)	33.0 (0.85)
	F	54.7 (1.15)	64.3 (1.29)	—	—	—

* 第5圖からの推定値

も拘わらず、収縮率は約 1/10 に近く、純セメントモルタルの収縮率の 50~100 倍に達していた。以上から砂中の粘土分の量がモルタルの収縮率にかなりの影響を持つことが想像される。

6. 重量の變化

(1) 水中に於ける重量の増加。各試験体は脱型の際に殆ど飽湿の状態にあつたので、之を水中に養生した場合にも、重量の増加は、通常の吸水試験の場合に比して餘り顯著でなく、水中養生 23 週で最大 3.0% に止まつた。一般には第 12 表の様に水セメント比の少いもの程、同一期間内の重量増加が多い。水中材齢から言えば 31 日までの増加量は 23 週目の増加量の約 80% に達して、約 19 週に於て 90% となつている。之等は第 4 項に述べた水中膨脹の性状と幾分相違しているが、調合が貧になる程重量の増加が少いことは膨脹の例に類似している。

第 12 表 水中に於けるモルタルの重量増加 (%)

水セメント比 %	水中 163 日	水中 31 日	水中 11 日	水中 31 日	水中 5 日	水中 163 日	水中 31 日
	1:0	1:0	1:0	1:1	1:1	1:2	1:2
40	+3.0	+0.9(?)	+1.0	+0.4(?)	+0.5	+1.2	—
50	+2.9	+2.3	+0.9	+1.3	+0.3(?)	+1.0	+1.0
60	+2.5	+2.1	+0.9	+1.0	+0.4	—	62A F62A +0.9 +0.8
70	—	+1.9	+0.8	+1.0	+0.2	—	72A F72A +0.7 +0.9

(2) 乾燥時の重量減少。一般に乾燥時の重量減少は、(1) 水セメント比の多い程、(2) 調合が富である程、(3) 水中養生期間が短い程、大きく、本実験の範囲で言えば、水セメント比 40%、調合比 1:1、水中養生 31 日のモルタルの減量 1.8% であるのに對し、水セメント比 60%、調合比 1:0、水中養生なしのもの減量最大 11.4% に達した。尙水中養生を行わないモルタルは空氣中材齢 4 週附近を最低として、其の後の材齢では、幾分其重量を増加する傾向があり、水中養生 5 日のものについても、其の傾向がうかがわれる。

上記の影響因子中、(1) 及び (2) は収縮についても同じく適用されることであるが、(3) の水中養生期間の影響については、既に前回報告に於ても指摘した様に、水セメント比 40% 附近の場合を除き、収縮に對しては逆の効果がある。

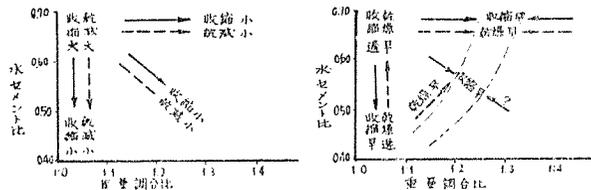
又乾燥と収縮の速度の關係を検するために、各モルタルについて、水中養生終了時を基準とした重量減少量の最大値と、之に對する空氣中材齢 2 週に於ける重量減少量の比率を示せば第 13 表の様になる。

之に依れば、水中養生を行わない場合の乾燥減量の絶対値が最大であることは既に述べた通りであるが、乾燥速度 (重量減少の速度) から言えば、此の場合が最も早く、空氣中材齢 2 週に於て、既に全乾燥減量の 95~100% に進行している。同様な比率は、水中養生 5 日のものでは 85~98%、水中養生 31 日のものでは 44~92% と低下し乍ら、各モルタルについての差異

第13表 重量減少の最大値と材齡初期の減少比率 (水中養生終了時基準)

水中養生期間 (日)	w/c (%)	1:0		1:1		1:2		1:3		1:4	
		最大重量減 %	5日 14日 比率 比率								
A 31日	40	2.9	0.35 0.55	1.8	0.22 0.44	—	— —	—	— —	—	— —
	50	6.0	0.53 0.75	4.4	0.57 0.80	3.5	0.63 0.83	—	— —	—	— —
	60	7.6	0.55 0.80	5.0	0.46 0.74	4.6	0.54 0.85	4.2	0.62 0.83	—	— —
	70	8.1	0.46 0.78	6.7	0.51 0.82	5.6	0.66 0.91	5.1	0.65 0.92	4.8	0.63 0.90
B 11日	40	5.9	0.63 0.81	—	— —	—	— —	—	— —	—	— —
	50	8.0	0.63 0.85	—	— —	4.2	0.69 0.88	—	— —	—	— —
	60	9.5	0.58 0.86	—	— —	5.4	0.74 0.93	—	— —	—	— —
	70	10.5	0.56 0.84	—	— —	6.9	0.71 0.96	—	— —	—	— —
C 5日	40	6.9	0.65 0.89	4.1	0.73 0.85	—	— —	—	— —	—	— —
	50	8.6	0.69 0.91	6.2	0.73 0.94	4.6	0.72 0.93	—	— —	—	— —
	60	9.8	0.66 0.90	7.9	0.67 0.89	5.6	0.73 0.93	4.8	0.81 0.96	—	— —
	70	—	— —	9.4	0.63 0.94	7.1	0.72 0.99	5.8	0.74 0.98	5.3	0.74 0.98
D 0日	40	8.1	0.91 1.00	4.6	0.74 0.96	—	— —	—	— —	—	— —
	50	10.1	0.73 0.95	7.4	0.87 1.00	5.6	0.89 1.00	—	— —	—	— —
	60	11.4	0.75 0.95	8.3	0.72 0.97	6.5	0.85 1.00	5.8	0.91 1.00	—	— —
	70	—	— —	10.0	0.73 0.98	7.8	0.76 1.00	6.4	0.78 1.00	5.3	0.81 1.00

が顯著になつて来る。後者の場合について言えば、水セメント比の大きい程、乾燥の速度が早い。又調合の貧である程乾燥が早いが、水セメント比40%の1:1モルタルは例外となつて居り、且つG砂



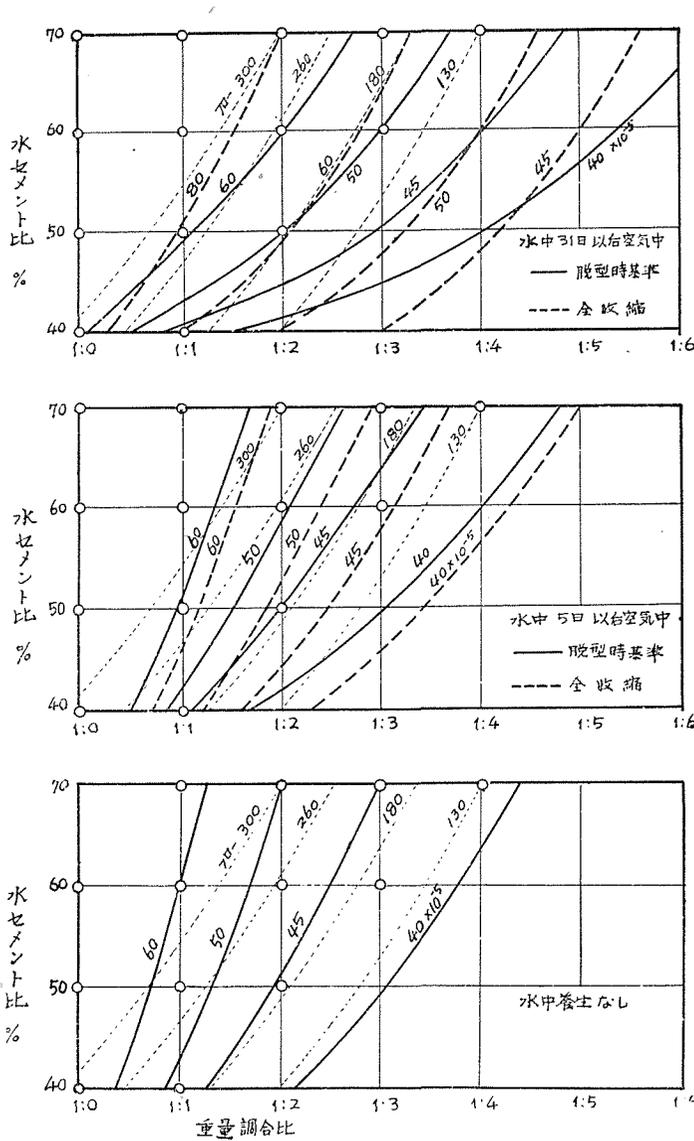
第 9 圖

モルタルについて調べると調合比 1:3 附近を頂點として乾燥速度が餘り變らなくなる様にも思われる。

上記と収縮の性状を圖解すれば第9圖の様になり、収縮の大小と乾燥減量の大小は、其の傾向が一致しているけれども、収縮の速度と乾燥の速度の傾向は必ずしも一致しない。

6. 収縮龜裂防止の可能性

第5圖から各種のモルタルについて収縮率が相等しい様な水セメント比と調合比を求めれば、第10圖の様な収縮率分布圖が得られる。同圖中の實線は脱型時の長さを基準とする収縮率であり、破線は水中養生終了時の長さを基準とするものであるが、一般に収縮を拘束される様な場合は、膨脹も阻止されるのが普通であるから、實際に収縮應力に關與する収縮率は、前者の脱型時の長さを基準とした収縮率であると考えてよい。同圖には軟度の目安として、フロ



第 10 圖

比 40% に近い部分は實用に供し得る。但し既に述べた様に此の領域のモルタルは乾燥に際し、収縮の進行が比較的早いから、特に此の乾燥を出来るだけゆるやかに起させる様な注意が必要である。このことは収縮力によるモルタルのプラスチックフローを極力大ならしめる意味からも考慮すべき点と考えられる。尙水中養生を行わない場合の自由収縮が比較的小さいために上記の限界収縮率以内の領域が広いことは興味がある。

上記何れの場合にも、砂の粒大を大とし、微粒部を少くすれば、約 10% の収縮減少が見込まれるから、安全帯の範囲はかなり擴張される。

一の傾向をも記入してあるが、之に依れば、同一軟度の場合については、水セメント比の少ないモルタルの方が自由収縮が小さい傾向が見られる。特に長期水中養生のモルタルの脱型時の長さ基準とした収縮には此の傾向が強い。尙通常施工の際使用されるモルタルの軟度は、フロー 140~150 である。

さて既に著者のこれまでの実験から推して、収縮龜裂を生ずる材齢に對應する自由収縮率の大きさは $40 \sim 45 \times 10^{-5}$ と考えられるから、假りに収縮龜裂發生の限界収縮率を 40×10^{-5} と假定すると、第 10 圖の同線より右側の部分では収縮龜裂が起きないことになる。斯様な安全帯の調合は、一般に著しく硬練であるが、水中養生を行う場合、膨脹が可能ならば、水セメント

7. 要 約

本文に於ては、水セメント比 40, 50, 60, 70% の 4 種の場合について、種々の調合比のモルタルを作製し、其の水中膨脹と乾燥収縮の性状を實驗觀測した。材料は淺野セメント 1 種と玉川産砂 3 種 (0.6mm 以下, 2.5 mm 以下, 2.5 mm 以下の部分 50% と 2.5~5 mm の部分 50% を混合したもの)、試験体の大きさは $4 \times 4 \times 20 \text{ cm}^3$ の角棒状とし、材齡 2 日以後の軸長の變化を測定した。各試験体は材齡 2 日迄型枠中に密閉とし、以後水中養生 31 日, 11 日, 5 日の後、溫度 $23 \pm 2^\circ \text{C}$ 濕度 $80 \pm 2\%$ の室内空氣中に置いたが、別に水中養生を全然行わないもの及び水中に浸した儘のもの二系列をも試験した。各試験体は同一の日に所定の水中養生を完了する様に豫め製作日を廻らせてあつたが、試験体總數は 201 個である。

(1) 水中の膨脹は水中材齡と共に増大するが、同一重量調合比については、水セメント比に無關係に略相等しく其の膨脹率は logarithmic の式で書き表わすことが出来る。尙此の膨脹率は、砂の粒大にも殆ど無關係と考えてよい。

(2) 空氣中の乾燥に際しては、水セメント比の少いもの程収縮が早く起る。

(3) 空氣中の材齡 30 週の収縮率については、水セメント比の大きいもの程収縮率が大きく、概ね水セメント比に直線的に比例する。水中養生が長期間 (31 日まで) となる程水セメント比 50% 以上のモルタルは収縮率が増加する。調合が貧になれば収縮率は減少する。細砂モルタルは収縮が大きいが、其の原因の一つとして微粒分が考えられる。

(4) モルタルの組成をセメントペースト硬化物の部分と骨材の實積部分とに分けて考え兩者の實積比とヤング係数の比を考慮し、骨材の乾燥収縮量を假定して、骨材は壓縮を、セメントペースト硬化物の部分は引張を受けていると考えて誘いた計算式の結果は、良く實驗値と一致した。

(5) 水中に於ける試験体重量の増加は最大 3% 以下で水セメント比の少い程稍大きく、調合が貧になる程小さい傾向があるが、水中材齡の比較的初期に大部分を終了する。

乾燥時の重量減少の量は水セメント比の少い程、調合の貧である程、又水中養生期間の長いもの程小さい。乾燥の早さは水セメント比の大きい程、調合が貧である程早い。重量減少の速度と収縮の速度とは必ずしも一致しない。

(6) 40×10^{-5} を収縮龜裂の限界収縮率と考えれば、本實驗の結果から、龜裂に對して安全な調合の範圍を決定することが出来る。此の場合水中養生が行われ、且つ膨脹が可能であるとすれば、水セメント比 40% 附近のものが、軟度が比較的實用範圍内にあつて有利である。砂の粒大が大であれば、斯様な安全領域は廣くなる。

III. 骨材微粒部がモルタル及びコンクリートの収縮に及ぼす影響

1. 概説 前回の実験からモルタルの自由収縮に對しては、骨材の微粒部分の及ぼす影響が比較的大きいことを推論したが、本章に於ては此の點を確めるために行つた実験の成果について記述する。尙今回は、砂入モルタルの他に、軟練コンクリートについても実験を行つた。使用骨材は凡て相模川産であつて、後に述べる様に微粒部分の比較的小さいものであるが、之を水洗した場合、自由収縮性に及ぼす影響を究明すると共に、水洗骨材に少量のローム粉末を添加した場合の収縮性状を試験し、又新しく収縮拘束用試験体を考案作製して此の自由収縮を拘束した場合に於ける龜裂發生の状況を觀察した。

2. 実験の計畫

(1) セメント。淺野セメント1種(北海道上磯工場製)

セメントの試験成績は第1表¹⁾及び第2表²⁾に示す如くである。又セメントの強度試験成績は第3表に掲げた。

第1表 セメント試験成績表 その1

種別	灼熱減量 %	不溶解殘滓 %	可溶性珪酸 %	アルミナ %	酸化第二鐵 %	石灰 %	苦土 %	硫酸 %	合計	水硬率	活動係數	珪酸率	鐵率	石灰飽和比
淺野セメント	0.64	0.61	22.51	5.58	3.08	63.66	1.72	1.51	99.31	2.01	4.03	2.60	1.81	0.85
ローム粉末	200#以下	13.51	49.43	11.96	18.79	5.67	0.39	0.63	100.48					
	100~200#	6.08	74.21	4.15	10.25	4.88	0.51	0.42	100.50					

第2表 セメント試験成績表 その2

種別	比重	細度 (4900孔)	凝結				
			室溫	濕度	水量	始發 時分	終結 時分
淺野セメント	3.16	3.6	19.8	83	25.7	2.18	4.10

第3表 セメントの強度試験成績 (4週)

水セメント比	調合比	曲げ強さ kg/cm ²	壓縮強さ kg/cm ²
45%	1:1	94.1	529
65%	1:1	57.6	277

(註) 水溫 15°C

(2) 骨材。砂、砂利共に相模川産。砂は5mm篩を通過するもの。砂利は5~20mm、砂は豫め5~2.5mmの部分と2.5mm以下の部分とに篩別し、原砂の粒度に倣つて調合して使用した。篩分析試験の成績並びに推定粒度分布は第4表の通りである。砂、砂利共に比較的大の小さい部分が不足して良好なものと言ひ難いが、本実験では此の儘使用した。上表から原砂中に含まれる泥分は0.3%と考える。

1) 日本セメント株式会社上磯工場検査課の資料による。

第 4 表 砂, 砂利の比重, 容重, 粒度 (3回の平均)

種 別	比重	容重 kg/l	粒 度 分 布 %											
			0	0.15	0.3	0.6	1.2	2.5	5	7	10	15	20	
原 砂	2.63	1.672	0.9	5.1	25.6	35.5	21.6	11.3*						
水 洗 砂	—	1.675	0.6	5.0	26.8	35.7	21.4	11.3*						
原 砂 利	2.67	1.678								1.8	15.8	40.4	42.0*	
水 洗 砂 利	—	1.676							(推定)	1.8	15.8	40.4	42.*	

* 計量に際し一定率におさえた。

(3) ローム粉末。北海道十勝更別ローム。之を粉末とし、100番篩及び200番篩によつて篩別し、100~200番27%、200番以下の部分73%の比に混合して使用した。ローム粉末の化学分析試験成績は第1表中の第2欄に掲げた通りであつて、之は一般に骨材中に含まれる恐れのある粘土分の代用として使用したものである。

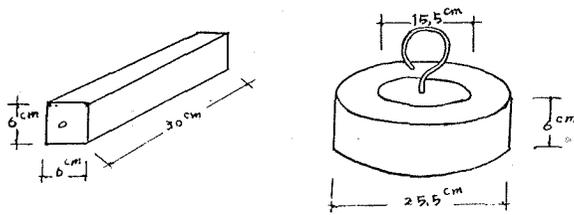
(4) 水セメント比, 調合, 施工軟度。

水セメント比は45%及び70%の2種。

調合比は、水セメント比45%のものについて重量調合比1:2.2のモルタル並びに容積調合比1:1.5:2.0のコンクリート、水セメント比70%のものについて重量調合比1:1.3、1:3.8のモルタル並びに容積調合比1:2.2:2.9のコンクリートとしたが、使用骨材を水洗したものゝと水洗しないものの2種とし、且つ水セメント比70%のモルタル及びコンクリートには水洗骨材にローム粉末を添加したものも作製したので、第5表に示す様に、モルタルに於て8種、コンクリートに於て5種、計13種となつた。尚モルタルのフロー、コンクリートのスランプ水中養生時の4週強度は同表中に掲げた通りである。

第 5 表 モルタル及びコンクリートの種類

番 號	水セメント比	調 合 比	骨 材	施 工 軟 度	4週曲げ強 kg/cm ²	4週壓縮強 kg/cm ²
45MO	45%	重量 1:2.2	砂, 水洗	フロー 130	87.1	550
45MN	"	" "	砂, 水洗せず	127	88.3	582
73MO	70%	" 1:3.0	砂, 水洗	215	63.9	257
73MN	"	" "	砂, 水洗せず	212	65.0	263
73M5	"	" "	水洗砂95%+ローム5%	200	53.5	259
74MO	"	" 1:3.8	砂, 水洗	114	52.9	243
74MN	"	" "	砂, 水洗せず	113	54.1	250
74M5	"	" "	水洗砂95%+ローム5%	107	51.6	259
45CO	45%	容積 1:1.5:2.0	砂及び砂利, 水洗	スランプ 15.1 ^{cm}	—	432
75CN	"	" "	水洗せず,	12.7	—	425
7CO	70%	" 1:2.2:2.9	砂及び砂利, 水洗	22.0	—	179
7CN	"	" "	水洗せず,	21.8	—	167
7C5	"	" "	水洗砂95%+ローム5% 水洗砂利95%+ローム5%	—	—	—



第1圖 試験体の形状寸度

(5) 試験体の形状寸度。

a) 自由収縮試験体。モルタル及びコンクリートに共通な寸度とするために、 $6 \times 6 \times 30 \text{ cm}^3$ の角柱状とし、成型の際に両端面の軸心の位置に $6 \text{ mm } \phi$ 鋼鉄を埋設して検長用の

標点とした。(第1圖)

b) 収縮拘束試験体。直径 15.5 cm 、厚 6 cm の鋼製圓盤の周圍に幅 5 cm のリング状に成型する。試験体の外周の長さは約 80 cm となる。但し此の型式は試験体の膨脹を阻止するに乏しい缺點をもつ。

c) 曲げ試験体。微粒部分が強度並びに弾性に及ぼす影響を見るために、モルタルについてのみ $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$ の試験体を作成した。

d) 試験体の數。自由収縮試験体は各モルタル及びコンクリートについて3個宛を標準とし、拘束試験体は2個宛、曲げ試験体は3個宛とした。

(7) 観察及び測定の方法。自由収縮は $1/1000 \text{ mm}$ ダイヤルゲージを取付けた測長器を使用し、拘束試験体に生ずる龜裂は10倍の讀取顯微鏡を用いて観察した。自由収縮試験体は検長約 300 mm であるから収縮率に於ける最小讀みは約 0.3×10^{-5} であつて、収縮率の大きさ約 40×10^{-5} に對し1%以下の誤差となる。尙曲げ試験には手動式 4 ton 萬能試験機を使用した。

(8) 養生條件。室温 $16 \pm 2^\circ \text{C}$ 、湿度 $77 \pm 3\%$ の室内でモルタル又はコンクリートの打込成型後1日にて脱型し、次で7日間水中養生を行い、以後室内空氣中に置いた。本實驗は4月中旬に着手したものであるが、空氣中に於ける材齡8週~10週の2間週間は、室温を $23 \pm 2^\circ \text{C}$ に高め、湿度を $68 \pm 3\%$ に下げ、其の後再び湿度のみ $76 \pm 2\%$ に戻した。

(9) 拘束型枠の収縮拘束度の検討。本實驗では資材の都合上、圓盤状拘束型枠を使用した。本型枠の収縮拘束度は次の如くなる。

今モルタル又はコンクリート試験体の部分を厚内圓筒と考え、内壓に依つて其の外周に生ずる接線方向の應力度を σ_t とすれば、内徑を $2r_1$ 、外徑を $2r_2$ 、内壓を p_1 とする時

$$r = r_2 \text{ に於て} \quad \sigma_t = \frac{2p_1 r_1^2}{r_2^2 - r_1^2}$$

$$\text{今の場合} \quad r_1 = \frac{15.5}{2} \text{ cm} \quad r_2 = \frac{25.5}{2} \text{ cm} \quad \sigma_t = 20 \text{ kg/cm}^2$$

$$\text{と考えれば} \quad p_1 \doteq 17 \text{ kg/cm}^2$$

即ちモルタル又はコンクリート外周部の龜裂直前の状態で圓盤は約 17 kg/cm^2 の外壓を受けることを意味する。之による圓盤の半径方向の歪は

$$\xi = -\frac{p_2}{E} \frac{(m-1)}{m} r_1 \quad (\text{厚内圓筒の式にて } r_1 \doteq 0 \text{ とおく})$$

上式に於て $m = 3.5$ $E = 2,100,000 \text{ kg/cm}^2$ とすれば

$$\xi = -2.64p_2 \times 10^{-6} \text{ cm}$$

$p_2 = 17 \text{ kg/cm}^2$ とすれば

$$\xi = -4.5 \times 10^{-5} \text{ cm}$$

さて収縮龜裂發生の限界収縮を 4×10^{-4} と假定すれば (前章の實驗による) 内徑 15.5cm の試験体リングの半徑に於けるモルタル又はコンクリートの自由収縮量は, S を収縮率として

$$\delta = \frac{2\pi r_1 S}{2\pi} = r_1 S = \frac{15.5}{2} \times 4 \times 10^{-4} = 31 \times 10^{-4} \text{ cm}$$

従つて概略的に考へて, 拘束型柱は自由収縮量の 1.5% 程度の變形を起すに過ぎない。

尙試験体の乾燥が一樣でないために生ずる應力の影響を検査するために, 溫度應力の算式を引用すれば, リングの内周の溫度 t_1 , 外周の溫度 t_2 溫度膨脹係數を α とし $t_2 < t_1$ の場合, リング外周の引張應力度は

$$\sigma_t = \frac{\alpha m E}{2(m-1)} (t_1 - t_2) \beta_2$$

今の場合 $r_2/r_1 = 1.65$ なる故 $\beta_2 = 0.836$

コンクリート又はモルタルのポアソン數を $m = 6$ とし $E = 140,000 \text{ kg/cm}^2$ とすれば

$$\sigma_t = 7 \times \alpha (t_1 - t_2) \times 10^4$$

コンクリート又はモルタルが破斷する状態では $\sigma_t \doteq 20 \text{ kg/cm}^2$ として

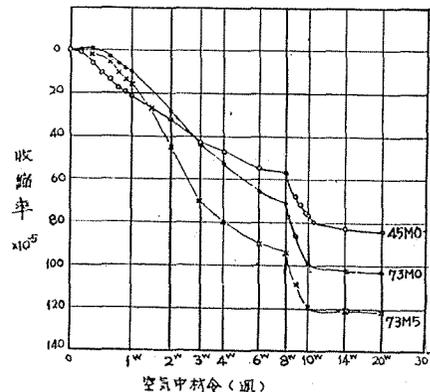
$$\alpha (t_1 - t_2) = 2.9 \times 10^{-4}$$

乾燥による収縮率の變化が直線的であると假定すれば, 左邊の溫度差による變形率の項を, 其のまま収縮率の差異と考へることが可能であるから, 内外の収縮率の差が上記の數字以下であれば, 此のために試験体が破斷する恐れがないことが分る。尙収縮拘束の場合の破壊伸率を 4×10^{-4} 程度と推定すれば, 上式中の E は約 $50,000 \text{ kg/cm}^2$ 位となり, 最後の式の右邊は 10×10^{-4} に近くなるので, リング内周, 外周の収縮率の相違は殆ど考慮を要しない。

3. 實驗の結果

A. 自由収縮

(1) 収縮曲線並びに収縮率。角柱狀試験体の軸長の變化は例えば第圖 2 の如くであつて, 各モルタル又はコンクリートは, 空氣中の材齡約 7 週で略一定の収縮率に達したが, 茲で室内溫度が下降したため新たに稍急激な収縮を生じた。此の収縮は其の後の溫度上昇に際しても顯



第 2 圖 自由収縮曲線の例

第6表 自由収縮率 $\times 10^{-5}$

番號	水セメント比 %	調 合	摘 要	水中膨脹 7日間	空 氣 中 材 齢							
					1週	2週	3週	4週	6週	8週	14週	20週
40MO	40	重量 1:1.8 モルタル	水洗砂使用	+3.0	23.5	30.4	34.7	37.9	—	—	72.3	76.5
				+4.9	28.1	35.7	40.1	43.9	—	—	74.4	78.1
				+4.0	25.7	33.0	37.9	41.1	—	—	75.5	79.3
45MOA	45	1:2.2	水洗砂使用 1日型枠以 後空氣中	—	17.3	33.3	45.7	53.4	61.9	63.1	80.5	81.7
				—	19.9	33.0	45.6	52.3	59.7	60.5	74.5	74.8
				—	18.3	29.5	40.9	46.8	52.9	54.7	69.8	71.2
45MO	"	"	水洗砂使用	+4.0	22.2	32.0	45.0	48.8	55.3	57.0	78.3	80.2
				+3.0	20.5	32.9	43.5	48.0	54.9	55.9	87.4	87.7
				+4.3	19.5	31.1	40.6	46.1	53.0	53.6	81.3	84.1
45MN	"	"	原砂使用	+3.6	22.7	31.9	44.5	48.5	56.1	58.2	81.9	85.1
				+4.0	20.9	34.0	45.2	50.1	57.7	58.9	88.9	90.3
				+4.0	20.8	34.0	43.0	48.7	55.8	57.2	86.4	89.1
73MO	70	1:3.0	水洗砂使用	+3.3	12.0	28.2	45.9	54.2	68.1	73.8	100.0	101.5
				+3.0	9.0	29.7	46.0	54.7	67.9	73.1	108.7	108.9
				+3.0	8.4	27.0	40.8	50.2	62.9	66.7	98.4	100.3
73MN	"	"	原砂使用	+3.3	12.7	29.5	47.3	54.9	67.9	73.2	101.2	103.7
				+3.0	9.4	28.9	44.6	53.0	65.5	69.5	104.1	103.7
				+3.3	9.1	27.9	42.7	52.7	65.0	69.7	107.3	108.3
74MOA	"	1:3.8	水洗砂使用 1日型枠以 後空氣中	—	10.1	28.3	43.6	51.9	59.9	63.1	77.1	77.9
				—	11.0	30.6	44.6	52.2	58.9	62.5	76.5	77.3
				—	10.1	29.9	46.3	54.2	61.8	65.1	77.0	77.9
74MO	"	"	水洗砂使用	+2.0	11.7	25.9	41.7	47.5	58.1	61.2	—	—
				+2.3	9.1	25.7	40.7	48.3	58.0	62.2	84.5	83.4
				+2.0	7.8	26.3	40.5	49.3	59.3	62.9	90.8	90.3
74MN	"	"	原砂使用	+3.0	12.1	27.3	45.5	52.5	63.7	67.7	86.7	88.4
				+2.0	9.7	29.1	44.2	51.6	62.3	66.4	95.3	94.4
				+3.3	10.5	29.2	43.5	50.9	59.7	62.7	90.3	90.1
73M5	70	1:3.0	水洗砂使用 ローム末混入	+5.0	17.9	45.3	72.3	79.3	89.7	93.4	117.9	120.3
				+4.7	13.8	43.5	67.2	77.1	88.1	92.3	122.7	121.0
74M5	"	1:3.8	"	+2.3	20.2	46.3	70.1	76.0	84.4	87.6	107.1	107.5
				+4.0	16.3	45.5	66.7	73.9	83.0	85.4	112.9	111.4
45CO	45	容積 1:1.5:2.0 コンク リート	水洗砂使用 水洗砂利用	+2.3	17.8	24.7	34.1	36.4	41.6	42.7	56.1	56.6
				+1.7	16.3	25.9	33.1	35.5	41.1	41.8	57.4	58.9
				+2.0	15.1	23.2	28.8	32.5	36.0	37.3	52.4	53.0
45CN	"	"	原砂, 原砂 利使用	+1.3	18.8	25.9	35.1	37.6	42.5	43.9	56.4	57.8
				+2.0	16.3	25.6	32.7	34.9	40.2	41.3	59.6	58.9
				+2.3	16.3	26.4	31.6	35.3	38.7	39.9	54.3	54.5
7CO	70	1:2.2:2.9	水洗砂, 水 洗砂利使用	+2.3	9.3	19.7	30.3	35.0	41.8	45.1	56.9	57.1
				+2.7	9.1	22.8	31.3	36.1	42.6	46.1	65.1	64.3
				+1.7	9.9	22.5	30.6	35.9	41.5	43.4	58.7	57.9
7CN	"	"	原砂, 原砂 利使用	+1.7	9.5	20.1	31.1	35.7	43.5	46.9	61.5	62.3
				+1.3	7.1	18.5	26.7	30.9	36.7	39.0	56.3	55.4
				+1.3	8.5	22.3	28.8	34.1	39.3	42.4	—	—
7C5	"	"	水洗骨材使用 ローム末混入	+1.7	19.4	35.9	49.7	52.5	55.9	58.1	68.2	68.4
				+1.7	16.0	33.4	41.9	45.7	49.3	49.7	66.3	66.5

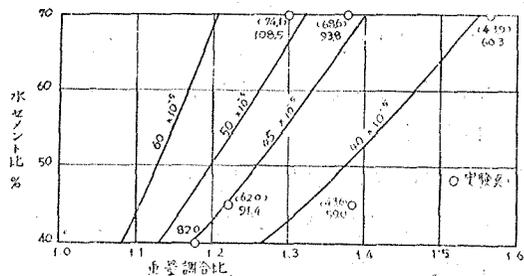
(註) 摘要欄に特記したものを以外は型枠中密閉1日, 水中7日間, 以後室内空気に放置した。膨脹曲線は一般に誤差が大きいので平均曲線から推定した。

著な回復をしない。本実験は材齡 20 週まで計測を継続しているが、第 11 週以後の収縮率の變化は極めて微少である。即ち硬化乾燥収縮途上の急激な濕度低下は収縮を著しく促進することを示している。尙材齡別自由収縮率は第 6 表に掲げた。

(2) 前回実験との比較。一般に本実験の結果は、前回の実験に於て材齡 7 箇月について得た収縮率に比して相當大である。其の原因の一つは、本実験の場合の室内濕度が前回実験の場合に較べて低かつたことにあるが、最近のセメントの粉末度が、戦前のものに比して、實質的に微細であることによるものではないかと考えられる。セメントの粉末度が収縮に及ぼす影響については、先に著者の指摘した處であるが、Carlson¹⁾の報告や日本セメント中央研究所の報告に於ても明かにされている。

(3) 微粒部分及びローム粉末の影響。此の実験では自由収縮に對する骨材水洗の影響は餘り顯著ではない。之は使用砂が偶々 0.3 mm 以下の部分、特に 0.15 mm 以下の部分が少いものであつて、水洗の有無によつて兩者に大きな差異がなかつたことに基くものとする。大体に於て水洗を行つたものの方が、水洗をしないものよりも自由収縮率が稍小さい程度に過ぎなかつたが、水洗骨材の重量の 5% をローム粉末 (0.15 mm 以下) で置換したものについては、顯著な収縮率の増大を認めた。此の傾向は材齡の若い時期に於て特に著しく、例えば空氣中 28 日後の状態では、水洗骨材を使用した水セメント比 70% の 2 種のモルタル (重量調合比 1:3. 及び 1:3.8) 並びに 1 種のコンクリート (容積調合比 1:2.2:2.9) に對して、ローム粉末を添加した同一調合のモルタル及びコンクリートは夫々 48%, 55%, 38% の収縮率の増大を來すにも拘らず、材齡 5 箇月に於ては此の増大量は夫々 17%, 25%, 8% に過ぎなくなる。即ち水洗骨材を使用した場合に比して、ローム粉末を添加したものは、材齡の初期に於て急激な収縮を起す。従つて斯る泥分に近い微粒部分を多量に含有する骨材を使用したモルタル又はコンクリートは、材齡の若いうちに容易に龜裂し、以後は自由収縮の形で収縮が進行する可能性があることを推定出来る。

(4) モルタルとコンクリートの収縮性狀の比較。本実験の成果を前章に示したモルタル組成と収縮率の關係圖の上に記入すれば第 3 圖の様になる。茲にコンクリートは砂、砂利を混合骨材として取扱ひセメントに對する骨材の重量比に換算した。之に依れば、自由収縮率の各絕對値は、既に述べた如く著しく大きいけれども、モルタル又はコンクリートの組



第 3 圖 収縮率分布圖

(註) 斜線は前回実験から推定したもの、數字は今回の実験値を示す。尙 () 内は空氣中 8 週、() 外は 20 週に於ける収縮率を示す。

1) Carlson: Drying Shrinkage of Concrete as affected by many factors. Proc. of A. S. T. M. 1938. Vol. II.

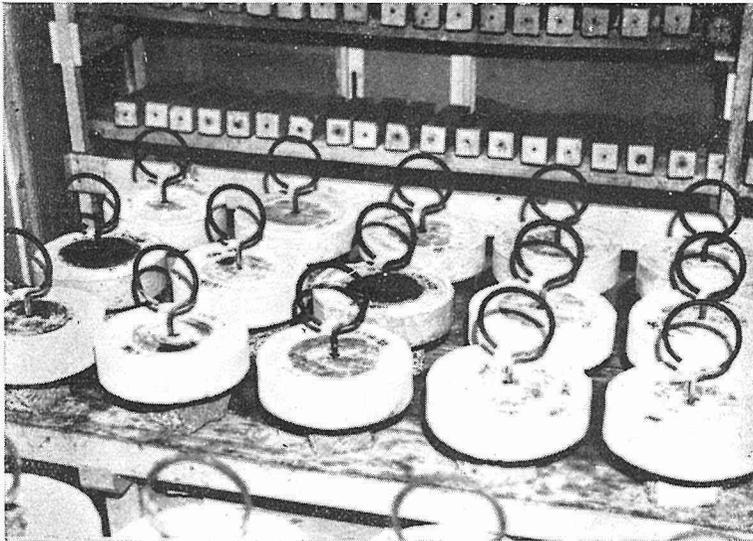
成と収縮率の關係は前回實驗と略平行的である。但しコンクリートはモルタルより全般的に収縮率が小さい傾向を示す。之は粗骨材の混入に依つて當然豫想される所であろう。

B. 収縮を拘束した場合

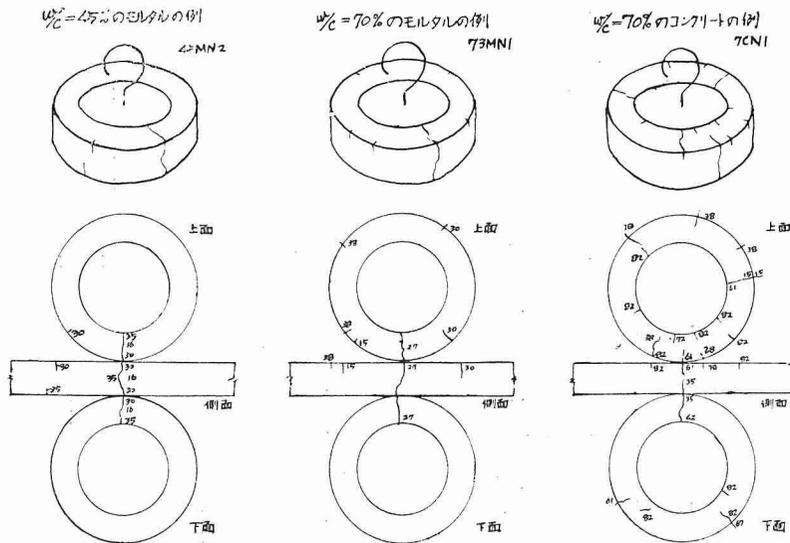
(1) 収縮龜裂發生の狀況。収縮拘束試験体は前記の如く、リング状のものであるが、モルタルもコンクリートも、其の大部分は、乾燥材齡の増大に伴い、龜裂を發生し破斷した。此の場合、水セメント比45%のモルタルでは、略平面に近い一斷面で破斷するのに對し水セメント比70%のモルタルでは、先ず試験体の外周に近い上面數箇所に微龜裂を生じ、其の中の一が成長して全斷面を横斷するに至ることが多い。又コンクリートは第5圖に示す様に、斯様な微龜裂を生じた後に、外周下縁部にも微龜裂を生じ、兩者が上下連絡して一つの龜裂に發達する場合もあるが、多くは上下の微龜裂が各別に成長して、上下喰違つた儘で止まつている。斯様な微龜裂の分散に依り、龜裂幅は極めて微細であるから、10倍の顯微鏡による觀察の程度では果して試験体が破斷したか否か、判別の困難なものがある。此の傾向は水セメント比70%のコンクリートでは特に著しい。尙上記の様に水セメント比の多いモルタルやコンクリート試験体の上面に見られる初期微龜裂は、何れもレイタンス狀物理質乃至過大水セメント比のペースト部に發生するものであつて、此の部分は特に泥分に富むことに基くと考えられる。

(2) 龜裂發生並びに破斷の材齡。之は第7表に示す如くであつて、同表には、其の材齡に對應する自由収縮試験体の収縮率をも併記した。尙既に述べた様に、収縮拘束試験体は斷面 $6 \times 5 \text{ cm}^2$ のリング状、自由収縮試験体は斷面 $6 \times 6 \text{ cm}^2$ の角柱であつて、兩者の乾燥度には大きな差異はないと考えてよい。

之に依れば、モルタルに於ては水セメント比の大小に拘らず、原砂を使用したものは骨材の水洗を行つたものより早期に龜裂を生じ、又ローム粉末の影響は極めて明瞭に認められ、斯様な微粒部分の多いものは収縮龜裂を發生し易いことを示す。コンクリートに於てもローム粉末の影響は顯著であつたが、骨材水洗の効果は明瞭ではなかつた。之はローム粉末は全骨材量の5%を混入したの對し、原骨材中の泥分及び微粒部分は、全骨材量の0.5%未滿に過ぎなかつたことに依る。又前記の如く破斷材齡の認定が困難であることも一因となつている。尙同表の自由収縮率は水中養生終了時の長さを基準としたものであるが、本實驗に使用した拘束型枠の性質から膨脹に對する拘束が不完全であると考えられるので、材齡1日目の長さを基準とせず之を掲げた。膨脹拘束が充分ならば、収縮應力に關與する収縮は上記より稍少い。興味あるのは、破斷時に對應する自由収縮率の大きさが何れも 4×10^{-4} 前後であることで、之については著者の既往の實驗から既に推論した所と一致している。詳細に見れば、此の龜裂限界収縮率は水洗骨材を使用したものの方が稍大きい。但し水セメント比70%のコンクリートの表面微龜裂の發生する材齡について言えば、限界収縮率は上記の數字より相當小さい。尤も此の微龜裂は表面的なもので、直接龜裂破斷には關係が少い。



第 4 圖 収縮拘束試験体



第7表 収縮拘束試験体の龜裂材齡

番 號	水セメント比 %	調合比	摘 要	破斷材齡 日 時	此の材齡に對 應する自由收 縮 $\times 10^{-5}$	
45MOA	45	1:2.2	型枠中1日以後空氣中 砂水洗	上面に微龜裂を生じ之 が大龜裂となる	22~13 22~7	47.7 47.9 44.7
45MO	"	"	7日水中以後空氣中 砂水洗	"	20~13 19~13	44.5 44.2 41.0
45MN	"	"	養生上に同じ 原砂使用	"	17~13 16~2	37.2 34.9 35.8
73MO	70	1:3.0	養生上に同じ 砂水洗		25~2 22~20	48.4 48.7 45.5
73MN	"	"	養生上に同じ 原砂使用		17~3 25~19	37.6 36.1 34.3
73M5	"	"	養生上に同じ 水洗砂95%+ローム5%		11~18 12~22	38.9 38.1
74MO	70	1:3.8	養生上に同じ 砂水洗	17日~6時上面に微龜裂 を認めた	30~15 27~19	48.5 48.3 49.3
74MN	"	"	養生上に同じ 原砂使用		21~8 27~19	45.2 44.2 42.5
74M5	"	"	養生上に同じ 水洗砂95%+ローム5%	17日~0時微龜裂	17~3 12~12	44.5 40.2
4CO	45	1:1.5:2.0	養生上に同じ 砂, 砂利水洗		36~0 34~1	40.1 40.1 —
4CN	"	"	養生上に同じ 原砂, 原砂利	19日~21時微龜裂 18日~20時 " (收縮)	34~21 34~20	41.9 40.3 38.7
7CO	70	1:2.2:2.9	養生上に同じ 砂, 砂利水洗	15日~0時微龜裂 18日~20時 " (19.7)	36~0 *—	40.8 41.1 40.8
7CN	"	"	養生上に同じ 原砂, 原砂利	15日~2時微龜裂 (19.7) 32日~0時 " (18.5)	*— 61~0	53.1 47.5 49.7
7C5	"	"	養生上に同じ 水洗骨材95% +ローム5%	14日~0時微龜裂 13日~0時 " (36.7)	27~10 18~12	48.2 41.3

* 微龜裂を多数生じているが破斷したと認められない。

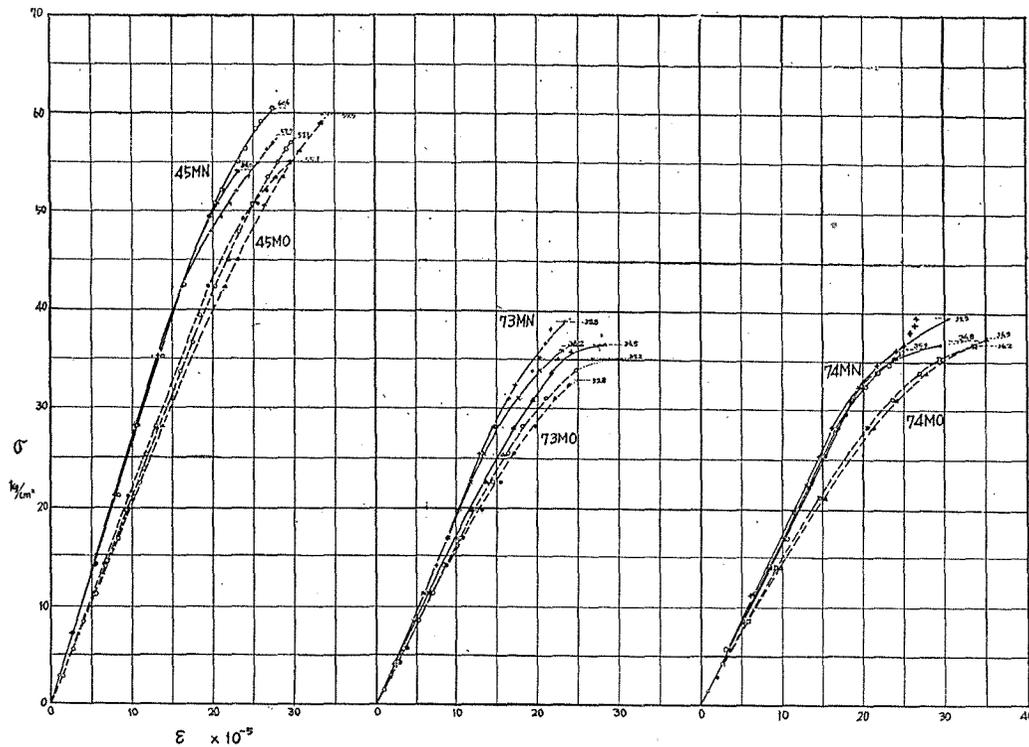
C. 曲げ試験に於ける曲げ引張側の弾性と最大伸

水セメント比45%及び70%のモルタルについて空中材齡28日で行つた曲げ試験によれ

第 8 表 収縮龜裂の幅

番 號	破断材齡 (空中)	材齡 2 箇月に於ける 龜裂幅 mm			番 號	破断材齡 (空中)	材齡 2 箇月に於ける 龜裂幅 mm		
		外周 上部	中部	下部			外周 上部	中部	下部
45MOA	II 22~13 22~7	0.50	0.52	0.50	74MN	II 27~19 21~8	0.30	0.30	0.28
45MO	20~13 19~13	0.30	0.30	0.28	74M5	17~3 12~12	0.30	0.40	0.46
45MN	17~13 16~2	0.20	0.22	0.22	4CO	36~0 34~1	0.06	0.06	0.06
73MO	25~2 22~20	0.38	0.30	0.36	4CN	34~21 34~20	0.18	0.20	0.18
73MN	17~3 25~19	0.38	0.30	0.38	7CO	36~0	0.04	0.02	0.02
73M5	11~18 12~22	0.50	0.56	0.56	7CN	61~0	0.02	0.02	0.04
74MO	30~15 27~19	0.16	0.18	0.30	7C5	27~10 18~12	0.20	0.16	0.14
		0.14	0.14	0.20			0.50	0.20	0.20

(註) 試験体の周長約 800 mm



第 6 圖 應力度歪度曲線

ば、曲げ引張側の應力度歪度曲線は第6圖の如くであつて、骨材の水洗を行つた場合、曲げ強度、曲げ引張側ヤング係數、及び壓縮強度は原砂を使用した場合より稍減少する傾向が見られるにも拘らず、其の破壊時の最大伸は僅か乍ら寧ろ増加の傾向を示している。此の傾向はモルタルの單純引張の場合にも豫想されるので、收縮龜裂防止上有利な現象と言わねばならぬ。

4. 要 約

本文に於てはモルタル並びにコンクリートの收縮量輕減に及ぼす骨材水洗の効果を主として實驗した。之は骨材中の粘土分乃至泥分が、收縮を増大するとの推論に基くものであるが、特に水洗骨材の重量の5%をローム粉末で置換した場合についても實驗を行つた。供試材料は淺野セメントと相模川産砂、砂利であつて、之等による水セメント比45%、重量調合比1:2.2、水セメント比70%、重量調合比1:3、及び1:3.8のモルタル、並びに水セメント比45%容積調合比1:1.5:2.0、水セメント比70%容積調合比1:2.2:2.9のコンクリートについて、自由收縮の測定、收縮拘束時の龜裂の狀況等を検討した。尙試験体の形狀は自由收縮につき $6 \times 6 \times 30 \text{ cm}^3$ 角柱、收縮拘束につき直徑15.5 cm、厚6 cmの鋼製圓盤を中心とするリング狀試験体を選んだ。養生は1週水中以後空中。實驗の結果を要約すれば次の如くである。

A. 自由收縮

(1) 骨材水洗の効果は僅少乍ら認められた。

(2) コンクリートの收縮は、水セメント比及び調合に關してモルタルと類似の傾向を示す様であるが、粗骨材の存在するため收縮率が一般に稍小さく、且つ骨材の水洗の影響は不明瞭であつた。

(3) 水洗骨材にローム粉末を混入したものは、空中乾燥材齡4週頃までの收縮が特に著しく、水セメント比70%の1:3、1:3.8モルタル及び1:2.2:2.9のコンクリートでは、水洗骨材を使用した同調合のものに比し、夫々48%、55%、38%も收縮率が大きい。但し、材齡5箇月に於ては此の差異は減少して、夫々17%、25%、8%大に過ぎなくなる。

(4) 濕度は收縮率に大きな影響を及ぼす。收縮進行途上の濕度の低下は收縮を著しく促進する。

(5) 本實驗に於ける收縮率は前回の實驗に比して一般に相當大であつたが、其の理由は養生室濕度の低いことの他に、今日のセメントが戦前のセメントより收縮性が強いことに依るものと思ふ。

B. 收縮龜裂

(1) 空中乾燥材齡8週までに、殆ど全試験体が龜裂破斷したが、モルタルに於ては骨材水洗の効果が比較的明瞭に認められ、破斷の材齡が延長した。

(2) コンクリートでは骨材水洗の影響は明瞭でない。

(3) モルタルの龜裂は單純で、略一斷面で龜裂破斷する。

(4) コンクリートでは先ず試験体の上面の各所に微龜裂を生じ、次で外周下縁部にも微龜

裂を生じ、両者が一つの龜裂線に發達する場合もあるが、多くは上下の龜裂が各別に生長して喰違ひ、破斷の認定が困難である。此の傾向は水セメント比70%のものでは特に著しい。

(5) 収縮龜裂を生じた後も龜裂の幅は餘り増大せず、同材齡の自由収縮の50%以下である。之は微龜裂の發生により収縮が分散することの他に、拘束中央圓盤とモルタル又はコンクリートの附着により、龜裂後も拘束を受けていることが主なる原因と考える。

(6) 拘束試験体が収縮龜裂を生ずる材齡に對應する自由収縮率の大きさは、著者の既往の實驗と大差なく、概ね 4×10^{-4} 前後である。水洗骨材を使用したモルタルでは此の限度は幾分大きい。

C. 最大伸

モルタルの試験に依れば、曲げ強度、壓縮強度及び曲げ引張側のヤング係数は骨材の水洗により稍減少の傾向があるが、曲げ引張側の最大伸は稍増加の傾向がある。之が單純引張の場合にも適用出来るとすれば、収縮龜裂防止上有利となる。

5. 結 語

収縮龜裂を發生する限界の自由収縮率は著者の既往の實驗に於ても本實驗に於ても概ね 4×10^{-4} となつた。従つて収縮龜裂の防止策としては、自由収縮率が之より低いものを作るか、或は引張の破壊最大伸を大ならしめて、之に耐えしめるか、すればよいことになる。

IV. 中練り及び硬練りコンクリートの収縮

1. 概 説 貧調合のモルタル又はコンクリートの収縮率が比較的小さいことは既に知られているが、著者の實驗に依れば、比較的富調合のものでも水セメント比が少いものは自由収縮率が小さく、主としてモルタルについては軟度を一定として考えた場合、寧ろ水セメント比40~50%のものの方が有利となる傾向がある。

茲では水セメント比40~70%の中練り及び硬練りコンクリートについて定量的な収縮實驗を行つた。

使用した材料は淺野セメント及び相模川産砂、砂利であつて前章の實驗に採用したものと全く同一のものである。

擬て硬練りのコンクリートの調合比については現在の日本建築學會には未だ標準となるべきものが示されていないが、一方米國 A.C.I. 規準若しくは之に準據した土木學會の示方書に示されたものは砂利量に對する砂量が建築用中練り軟練りコンクリートに比して相當大きく、單に収縮輕減の立場から見ると多少の疑問を残している。依つて此の實驗に於ては上記米國式調合比のコンクリートと現在の日本建築學會標準調合表を基として之を擴張して得た調合比のコンクリートとの2系列について自由収縮の測定を行うこととした。尙後者のコンクリートについては収縮拘束試験体を作成して収縮龜裂發生の狀況を調査した。

2. 実験の計畫

(1) セメント。浅野セメント（日本セメント上磯工場製）成分，粉末度，凝結，強度，性状等は前章参照。

(2) 砂及び砂利。何れも相模川，砂 2.5 mm 以下，砂利 20~5 mm。前回實驗に於ては此の骨材の泥分がかなり小さく，コンクリートの收縮に及ぼす其の影響は無視し得る程度であつたので，此の實驗では骨材の水洗を省略した。尙コンクリート 1 練り分毎に次の如く豫め篩別けした部分を計量混合し，原材料に近い一定の粒度分布を得ると共に軟度の偏差を出来るだけ少くする様に努めた。

第 1 表 砂及び砂利の粒度別混合比

種 別	0~1.2mm	1.2~2.5mm	2.5~5.0mm	5~7mm	7~10mm	10~15mm	15~20mm
砂	67%	23%	10%	—	—	—	—
砂 利	—	—	—	2%	16%	40%	42%

(3) 水セメント比。40, 50, 60, 70% の 4 種とする。

(4) 調合比及び施工軟度。調合比の決定に際しては次の二つの方法に依る。

A. 米國 A.C.I. Standards¹⁾ に依る方法

同書第 5 表中 3/4" 砂利に相當する欄の数値に，同表修正法に依る修正を加えれば，次表の左欄の様な調合例が求められる（但しスランプ 3"）ので，之から所定水セメント比に相當する調合比を定める。

第 2 表 調 合 比 決 定 資 料

A.C.I. 調合例		撰 定 調 合			A.C.I. 調合例		撰 定 調 合		
水セメント比	S/S+G	水セメント比	S/S+G	G/S (重量比)	水セメント比	S/S+G	水セメント比	S/S+G	G/S (重量比)
37	42%	40%	42.5%	1.35	57*	46*	60%	46.5%	1.14
42	43				62	47			
47	44	50	44.5%	1.23	67	48	70	48.5%	1.06
52	45				72	49			

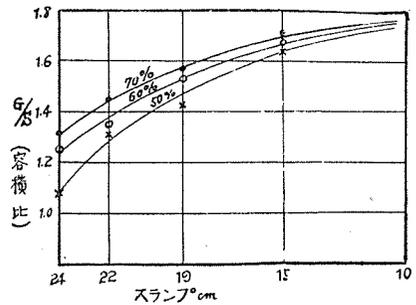
* A.C.I. 基準調合

B. 日本建築學會標準調合表の擴張に依る方法

同表 25 mm 以下砂，20 mm 砂利の調合比に於ける砂利量對砂量の比 G/S を求め，之をスランプについて記録すれば第 1 圖を得る。此の圖に依れば G/S はスランプが小となるに従つて漸増すると共に，50%，60%，70% の水セメント比の場合の G/S が接近してスランプ 15

1) A.C.I. Standards-1951, Recommended Practice for the Design of Concrete Mixes (A.C.I. 613-44) Table 5.

cm について平均 1.67 となる。同圖からスラブ 10 cm 程度の場合を推定し、水セメント比如何に拘わらず G/S 容積比を 1.7 とする。尙本實驗に使用した砂及び砂利は容積比重共に近似しているので、G/S 重量比も 1.7 と抑えると全骨材量絶對容積に對する砂量の百分比は約 37% となる。簡單のため以上 2 種の方法に依つて得た G/S をスラブに關係なく一定としたままセメントに對する骨材重量比を變化せしめ、第 3 表の如く 24 種のコンクリートの調合比を決定した。同表にはコンクリートのスラブも併記したが、スラブの面では明かに米國式のものが少い値を示している。



第 1 圖 日本建築學會標準調合表に於ける G/S

第 3 表 試驗用コンクリート調合表 (スラブは 2 回の平均)

番 號	水セメント比	A 系列 調 合 (米國式)			B 系列 調 合				
		重量 調 合 比	(1:6.0)	容積調合比	スラブ	重量 調 合 比	容積調合比	スラブ	
76	70	1:2.91:3.09	(1:6.0)	1:2.61:2.76	14.8	1:2.22:3.78	1:6.0	1:1.99:3.38	19.8
77*	70	1:3.40:3.60	(1:7.0)	1:3.05:3.22	2.9	1:2.59:4.41	1:7.0	1:2.32:3.95	11.3
78	70	1:3.88:4.12	(1:8.0)	1:3.49:3.69	0.5	1:2.96:5.03	1:8.0	1:2.66:4.51	0.6
65	60	1:2.34:2.66	(1:5.0)	1:2.10:2.38	17.7	1:1.85:3.15	1:5.0	1:1.66:2.82	20.5
66*	60	1:2.80:3.20	(1:6.0)	1:2.51:2.86	3.7	1:2.22:3.78	1:6.0	1:1.99:3.38	13.7
67	60	1:3.27:3.73	(1:7.0)	1:2.94:3.34	0.1	1:2.59:4.41	1:7.0	1:2.32:3.95	0.2
54	50	1:2.02:2.48	(1:4.5)	1:1.82:2.22	13.0	1:1.66:2.84	1:4.5	1:1.49:2.54	15.8
55*	50	1:2.46:3.04	(1:5.5)	1:2.21:2.72	0.2	1:2.04:3.46	1:5.5	1:1.83:3.10	4.5
56	50	1:2.91:3.59	(1:6.5)	1:2.61:3.12	0	1:2.41:4.09	1:6.5	1:2.17:3.66	0
43	40	1:1.49:2.01	(1:3.5)	1:1.34:1.80	3.3	1:1.30:2.20	1:3.5	1:1.17:1.97	7.2
44*	40	1:1.91:2.59	(1:4.5)	1:1.72:2.32	0	1:1.66:2.84	1:4.5	1:1.49:2.54	0
45	40	1:2.34:3.16	(1:5.5)	1:2.10:2.83	0	1:2.04:3.46	1:5.5	1:1.83:3.10	0

尙本實驗に附隨して水セメント比 30% の場合の収縮を確かめるため、水セメント比 30% と 40% の純セメントモルタル及び富調合モルタル 1 種宛を製作した。

(5) 試驗体の種類と個數。自由収縮測定用試驗並びに収縮拘束試驗体は前章の實驗と同型とする。即ち前者は 6×6×30 cm³ 角柱とし、第 3 表中 * 印のものは 1 種につき 2 個宛、他は 3 個ずつ製作し、後者は斷面 6×5 cm² 内徑 15.5 cm のリング状 (鐵製圓

第 4 表 試驗用モルタル

番 號	水セメント比	重量調合比	フ ロー
40	40%	1 : 0	250
41	40	1 : 0.5	222
30	30	1 : 0	168
31	30	1 : 0.5	134

第5表 コンクリーターの収縮率 (水中養生終了時基準)

コンクリートの種類	番号	W/C	割合		収縮率 ×10 ⁻⁵									
			重量比	容積比	空中1週	空中2週	空中3週	空中4週	空中5週	空中8週	空中11週			
	76	70%	1:6.0	1:2.61:2.76	12.8 11.3 12.5	24.4 20.7 22.9	22.7 22.9	31.8 27.0 29.4	29.4	36.3 32.4 35.6	34.8	43.7 40.5 43.3	42.5	43.8 40.8 44.0
	77	"	1:7.0	1:3.05:3.22	13.5 12.3	23.8 22.6	23.2	30.8 28.7	29.8	36.0 34.2	35.1	40.7 40.2	40.5	40.8 40.4
	78	"	1:8.0	1:3.49:3.69	13.4 12.9 13.5	23.4 21.7 22.4	22.5	28.6 27.3 27.5	27.8	33.8 32.2 32.9	33.0	35.9 34.9 35.1	35.3	36.5 35.9 36.7
A系列	65	60%	1:5.0	1:2.10:2.38	16.1 16.8	24.5 25.5	25.0	30.0 31.1	30.6	35.2 36.9	36.1	41.0 43.3	42.2	41.0 44.3
	66	"	1:6.0	1:2.51:2.86	14.0 14.9	23.6 23.5	23.6	28.3 28.9	28.6	33.5 34.3	33.9	38.2 38.4	38.3	38.5 39.3
	67	"	1:7.0	1:2.94:3.34	14.5 14.5 14.9	22.1 22.8 20.1	21.7	25.3 27.4 25.5	26.1	29.1 32.0 30.3	30.5	30.6 34.7 33.2	32.9	31.3 35.9 35.0
コンクリート	54	50%	1:4.5	1:1.82:2.22	17.3 16.4 18.5	25.3 24.4 26.3	25.3	29.9 29.3 30.7	30.0	35.5 34.5 35.9	35.3	42.0 39.7 41.0	40.9	43.3 40.3 41.7
	55	"	1:5.5	1:2.21:2.72	17.4 17.9	24.7 25.5	25.1	29.5 29.7	29.6	34.0 33.5	33.8	37.7 36.9	37.3	39.4 37.3
	56	"	1:6.5	1:2.61:3.12	17.4 17.3 16.7	24.7 24.7 23.2	24.2	28.6 27.8 27.3	28.1	32.7 31.3 31.8	31.9	35.7 33.1 34.5	34.4	37.5 33.7 35.5
	43	40%	1:3.5	1:1.34:1.80	22.0 20.5 19.2	28.3 27.1 25.7	27.2	30.7 31.6 29.4	30.6	37.9 36.1 33.7	35.9	43.0 41.7 38.4	41.0	43.9 42.0 38.2
	44	"	1:4.5	1:1.72:2.32	19.4 19.5	26.3 25.9	26.1	29.5 28.8	29.2	33.1 32.8	33.0	35.5 36.1	35.8	37.0 36.5
	45	"	1:5.5	1:2.10:2.88	17.9 17.3	23.1 22.2	22.7	25.7 25.1	25.4	29.4 28.3	28.9	30.7 29.6	30.2	32.6 30.0

76	70%	1:6.0	1:1.99:3.38	12.3 11.5 12.6	12.1	22.5 22.0 22.6	22.7	30.8 29.2 29.5	29.8	38.7 36.2 36.7	37.2	43.7 44.5 42.3	44.4 44.5 42.2	43.7
77	"	1:7.0	1:2.32:3.95	13.5 12.1	12.8	24.1 22.8	23.5	30.1 29.0	29.6	33.5 33.7	34.6	39.9 40.0	40.8 40.9	40.9
78	"	1:8.0	1:2.66:4.51	11.7 11.1 11.3	11.4	20.5 20.2 19.8	20.2	26.3 24.9 24.4	25.2	32.0 31.2 29.7	31.0	34.6 34.0 32.2	35.6 35.6 32.7	34.6
65	60%	1:5.0	1:1.66:2.82	13.5 13.5 15.4	14.1	24.0 23.0 24.9	24.0	30.8 32.2 30.9	31.3	38.9 35.9 38.3	37.7	45.3 42.6 44.1	46.1 43.3 44.1	44.5
66	"	1:6.0	1:1.99:3.38	13.3 13.0	13.2	22.3 23.6	23.0	27.6 29.3	28.5	35.1 36.0	35.6	39.5 40.3	40.1 41.3	40.7
67	"	1:7.0	1:2.32:3.95	12.5 13.4 13.2	13.0	20.8 22.4 22.2	21.8	25.5 27.6 26.2	26.4	31.1 33.9 31.5	32.2	33.7 36.5 33.8	34.5 37.8 34.5	35.6
54	50%	1:4.5	1:1.49:2.54	17.2 16.1	16.7	25.1 25.0	25.1	30.2 30.0	30.1	36.5 36.5	36.5	41.1 41.0	41.4 41.9	41.7
55	"	1:5.5	1:1.83:3.10	16.9 16.6	16.8	25.3 24.9	25.1	30.2 29.5	29.9	36.9 35.2	36.1	39.8 38.2	40.4 39.3	39.9
56	"	1:6.5	1:2.17:3.66	13.9 15.1 14.3	14.4	20.9 23.2 21.8	22.0	25.4 27.4 23.7	26.2	31.2 32.9 31.0	31.7	33.4 34.2 33.1	34.2 35.0 34.9	34.7
43	40%	1:3.5	1:1.17:1.97	17.6 20.9 18.7	18.9	24.8 28.3 27.5	26.9	28.7 32.6 31.9	31.1	35.5 38.2 38.9	37.5	40.1 42.7 43.4	40.5 42.9 44.9	42.8
44	"	1:4.5	1:1.49:2.54	16.5 16.5	16.5	24.3 24.0	24.2	27.8 28.0	27.9	33.9 33.6	33.8	36.7 36.5	37.5 36.7	37.1
45	"	1:5.5	1:1.83:3.10											

B系列

コンクリート

盤を芯とする)とし第3表B系列配合のコンクリートのみについて1種につき2個宛製作した。尙之はB系列のコンクリートはスランプが出易い他に砂量が稍少いので、収縮軽減上有利であることを豫期したと型枠數に制限があることに依る。

(6) 成型。試験用のコンクリートは硬練りのものが多いので、成型に際しては三層に分けて充填し、各層毎に突固めの上小型電気振動器を用いて型枠の底面及び側から振動を加えた。之に依ると充填は比較的良好に行われ成型に要する材料所要量は計算量と大差なく、内部の空隙は概ね3%以下となつた。殊に底面と側面の仕上り状況は良好であるが、B系列コンクリート(砂量の少いもの)は振動詰に際し水分の多いセメント液の分離上昇が目立つて、試験体上部に水セメント比の大きいセメント液に富む部分を生じ易い傾向がある。A系列(米國式調合)のものは此の點優秀であることが判つた。

(7) 養生。試験室室温を $23 \pm 2^\circ\text{C}$ とし、成型後1日型枠中密閉、7日水中養生を行い、以後湿度 $76 \pm 2\%$ の室内空氣中に放置した。

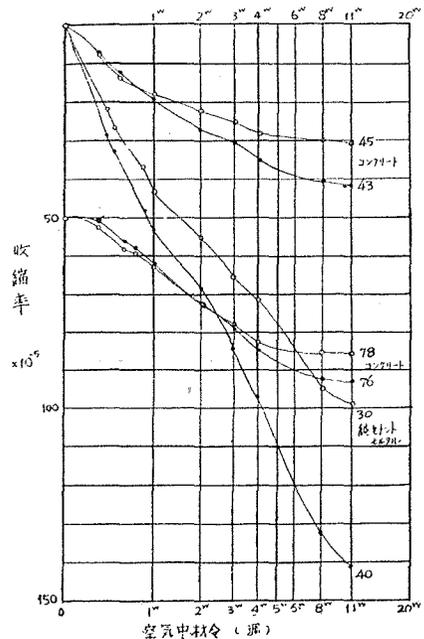
3. 實驗の結果

A. 自由収縮

自由収縮率と乾燥材齡の關係は、例えば第2圖の如くであつて、モルタルの場合と大差なく、水セメント比の大きいコンクリートでは水中養生終了後約10時間を経て漸く収縮を開始するに對し、水セメント比の小さいコンクリートでは水中養生後2~3時間にして収縮を始める。尙前者の場合、水中養生終了後、稍膨脹の傾向があるが、之は水温と気温の差に基く温度膨脹によるものと解した。

尙空氣中の材齡2箇月に至る収縮率を、水中養生終了時の長さを基準として表わせば第5表及び第6表の様になる。長さの基準を此の様にとつたのは水中養生中の膨脹率が微少で、計測の誤差が比較的大きく影響していることと、本實驗に使用した収縮拘束型枠が膨脹阻止の能力に乏しいため、収縮率のみを考慮する方が其の拘束性の眞に近いと思われたからである。

(1) モルタルの収縮率。此の實驗は、既に第7章に述べたモルタルの實驗の補足として行つたものであるが、今、水セメント比40%のモルタルの収縮率を1.0として、前回の實驗に依つて得られた數値と本實驗の數値とを比較すれば第7表の様になつて、水セメント比30%の純セメントモルタル及び1:0.5モルタルの収縮比率は、本文II章の實驗から推定される比率と略一致している。但しモルタルの収縮率の絶對値について、水セメント比40%の場合を比



第2圖 自由収縮曲線の例

第 6 表 モルタルの収縮率

番 號	水セメント比 (%)	重量調合比	収 縮 率 $\times 10^{-5}$					
			1 週	2 週	3 週	4 週	5 週	6 週
40	40	1 : 0	55.5	70.9	86.9	100.3	136.3	144.5
			52.6	67.9	84.1	95.8	128.7	137.9
			50.7	65.7	82.9	94.5	—	—
41	40	1 : 0.5	42.9	58.2	69.9	80.2	101.9	109.3
			45.9	60.8	71.4	81.8	105.1	108.7
30	30	1 : 0	41.7	53.4	65.3	70.2	96.9	100.3
			43.6	57.0	67.2	73.6	95.9	99.9
			45.1	54.8	64.3	69.7	92.7	97.4
31	30	1 : 0.5	38.4	50.3	57.0	63.2	79.6	81.7
			38.0	49.3	55.0	60.4	74.9	76.7

第 7 表 モルタルの収縮比率 (水中養生 7 日)

種 別		設計水セメント比	30%	40%	50%	60%	70%
1 : 0 モルタル	前実験	實際の水セメント比	30	40	46	50	54
		収縮率 $\times 10^{-5}$ 比 率	推定 73 0.72	101 1.00	116 1.15	125 1.24	137 1.36
	本実験	収縮率 $\times 10^{-5}$ 比 率	99 0.70	141 1.00	推定162 *	推定175 *	推定191 *
		實際の水セメント比	30	40	46.5	51.5	56
1 : 0.5 モルタル	前実験	實際の水セメント比	30	40	46.5	51.5	56
		収縮率 $\times 10^{-5}$ 比 率	推定 54 0.74	72 1.00	83 1.15	90 1.25	98 1.36
	本実験	収縮率 $\times 10^{-5}$ 比 率	79 0.73	109 1.00			
		實際の水セメント比	30	40	46.5	51.5	56

較すると、今回の実験結果の方が40~50%だけ大きい。兩者の差の原因としては、先ず実験湿度と試験体の寸度の相違が考えられるが、湿度の差は今回の方が4~5%程度低いのみであり、又文献¹⁾に依れば、試験体の寸度が大きくなれば、寧ろ収縮は減少する傾向にあるとされているので、本実験に使用したセメントはIIの実験(戦前)に使用したセメントよりも収縮性の強いものであつたことが想像される。

(2) コンクリートの収縮率。第5表に依れば、當初の豫期に反して、A系列コンクリート(砂量の多いもの)とB系列コンクリート(砂量の少ないもの)の収縮率は、相對應する調合について殆ど相等しく、一部には寧ろA系列の方が稍小さい場合もあつて、砂量と砂利量の割

1) 本文末尾 文献 (61), (62), (63).

合が上記の範囲で變化しても、收縮率には殆ど影響がないと見ることが出来る。

收縮率の一般的傾向はモルタルの場合(本文 II 章)と同様に、水セメント比の小さい程、調合比の貧なる程小さいが、中練りコンクリートと硬練りコンクリートの收縮率の差は、比較的僅少である。

本實驗に於ては、試験室の湿度を $76 \pm 2\%$ に保つたのであるが、各種コンクリートの自由收縮量は、乾燥材齡 6~7 週にて概ね一定値に達し、且つ其の收縮率は何れも既に述べた收縮龜裂發生の限界收縮率と假定される 4×10^{-4} の附近に止つて、試験用コンクリートの約半数は、僅か乍ら 4×10^{-4} 以内の値を示した。

(3) コンクリートの收縮率と純セメントモルタルの收縮率の關係。先に述べた様に、水セメント比 30% と 40% のモルタルの收縮率の比率は本文 II 章の實驗からの推定比率と大体一致したので、逆に今回の水セメント比 40% の純セメントモルタルの收縮率から、水セメント比 50, 60, 70% の場合の純セメントモルタルの收縮率を推定すると、第 7 表中は * 印を附した様な數値となる。之等の數値と II 章で推算した E_a/E_p ¹⁾ (骨材とセメントペースト部とのヤング係數比) を用い、II 章に於て誘導した式²⁾

$$\epsilon_m = \frac{\epsilon_p - \epsilon_a}{1 + \frac{E_a A_a}{E_p A_p}} + \epsilon_a$$

に依つて本實驗のコンクリートの收縮率を計算すると第 8 表の様になる。更に此の計算値は

第 8 表 コンクリートの收縮率の計算値と實測値 (10^{-5})

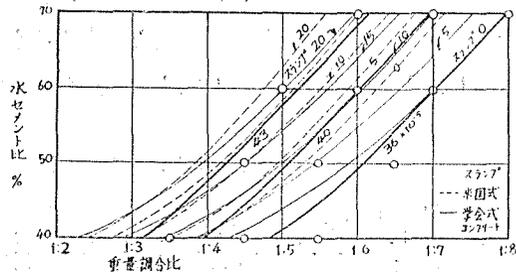
水セメント比	40 %			50 %			60 %			70 %		
ペースト部の收縮 ϵ_p	141			162			175			191		
E_a/E_p	1.87			1.96			2.06			2.19		
重量調合比	1:3.5	1:4.5	1:5.5	1:4.5	1:5.5	1:6.5	1:5.0	1:6.0	1:7.0	1:6.0	1:7.0	1:8.0
A_a/A_p	1.85	23.6	2.87	2.06	2.52	2.98	2.05	2.47	2.86	2.22	2.59	2.96
算式の分母	4.46	5.42	6.38	5.04	5.94	6.84	5.23	6.10	6.90	5.86	6.68	7.48
ϵ_m ($\epsilon_a=20$ とす)	4.71	42.3	38.9	48.2	43.9	40.7	49.6	45.4	42.5	49.1	45.6	42.9
$0.9 \times \epsilon_m$	42.4	38.0	35.0	43.4	39.5	36.6	44.6	40.8	38.2	44.2	41.0	38.5
實驗値 (A, B の平均)	42.1	36.9	31.3	41.7	38.3	35.1	43.9	39.8	34.8	43.3	40.7	35.5

2.5 mm 以下の砂に對應するものであるから、コンクリートでは粗骨材が存在することを考慮して、收縮率が約 10% 小さくなるものとすれば (II 章第 5 項 (※), 27 頁参照), コンクリートの收縮率の計算値は第 8 表の下欄に示す様な數値となつて、本實驗の測定値に近接し、且つ水セメント比、調合比に對する收縮率の傾向が、兩者について極めて良く一致している。従つてコンクリートも亦、モルタルと同様な收縮機構を有するものであると考えることが出来る。

1) 本文 25 頁参照。 2) 本文 24 頁参照。

尚何れの水セメント比の場合にも、最硬練りのコンクリートの収縮率の實測値は計算値依り目立つて小さいが、之等は何れもスランプ 0 であるから、骨材が多過ぎるためにセメントペーストが不足して、前記計算式の A_u/A_p が増大している結果であると考えられることも可能であつて、若し然りとすれば、収縮減少の方策として興味あるものと言えよう。

(4) コンクリートの調合と収縮率の關係圖。第 5 表の成果から、自由収縮率の等しいコンクリートを求めると、第 3 圖の様になつて、水セメント比と調合比がコンクリートの収縮に及ぼす影響を把握することが出来る。同圖中の細破線及び細實線は夫々 A 系列及び B 系列のコンクリートのスランプ一定の線を示すもの



第 3 圖

であるが、モルタルの同様な収縮分布圖に比して著しく異なる點は、水セメント比 40% 附近のコンクリートは比較的富調合でもスランプが小さく、従つてスランプを施工取度の尺度とする場合、同一取度については、水セメント比が 50% 以上である方が収縮の小さいコンクリートを得やすいことである。尚水中養生期間が更に長くなる場合には、モルタルに関する實驗結果から推定して、水セメント比 40% 附近のコンクリートも有利になるであろう。

扱て著者の従來の推論に依れば、前掲の収縮率分布圖中、概ね自由収縮率 4×10^{-4} の線から右側の領域の配合のコンクリートは、収縮龜裂に對して安全であることになる。

B. 収縮拘束時の性状

前記の B 系列コンクリートについて、圓盤狀拘束型枠に依り収縮拘束の實驗を行つた結果は次に述べる如くであつた。觀察は約 10 倍の讀取顯微鏡に依るものである。

(1) 乾燥中の経過。

(a) 水セメント比 60% 及び 70% の比較的富調合のコンクリートに於ては、乾燥材齡 1 週頃に試験体の上面及び外周上縁部に顯微鏡的な短い毛髮龜裂を生じた。之は水セメント比の小さいコンクリートには發生しない。又比較のため製作した A 系列の水セメント比 70% 調合比 1:8 のコンクリートに於ても殆ど發生しないもので、レイタンス狀物質に富む部分に起ると考えられる。

(b) 乾燥材齡 2 週頃になると、此の毛髮龜裂は肉眼で認め得る様になり、又其の數も若干増大した。之は實驗室の溫度が低下した場合に、短時間のうちに發生するものであるらしい。水セメント比 40% のものには未だ殆ど表われない。

(c) 乾燥材齡 3 週前後には、富調合のコンクリートは外周下縁部にも少數の毛髮龜裂が發生した。

(d) 上記の外周上下縁の微龜裂は、夫々獨立に漸次發達するが、試験体の高さ (6 cm) の

中央部では消滅しているものが大部分であつて、上下の龜裂が接続して1本の龜裂となるものは極めて少い。

(2) 龜裂破斷の認定。上記の様な微龜裂は其の發達の状態から見て、比較的表面的なものであると思われる。前章に於ても述べた様にコンクリートでは龜裂が全断面に及んでいるか否かの判定は甚だ困難であるが、上下の龜裂が各1本に接続し上下面に於て其の龜裂が試験体の中心部に達している様な場合に破斷と認定するものとする。斯くすれば本實驗のコンクリート中破斷したものは第9表に示したものに限られていて著者の推論と略一致する。

第9表 乾燥材齡11週に於ける龜裂狀況

番號	水セメント比 %	重量 調合比	龜裂の數					微龜裂發 生材齡 (日)	破斷材齡 (日)
			上面中心 より生ず るもの	外周上縁 部にある もの	外周下縁 部にある もの	下面中心 に達する もの	接続して 1本とな つたもの		
76 —1 —2	70	1:6.0	3 1	12 12	3 4	4 0	1(?) 0	5 5	41(?) —
77 —1 —2	70	1:7.0	0 5	12 35	1 1	1 0	0 0	5 5	— —
78 —1 —2	70	1:8.0	12 3	30 9	1 0	0 0	0 0	8 8	— —
65 —1 —2	60	1:5.0	0 3	5 8	2 2	0 0	0 0	5 5	— —
66 —1 —2	60	1:6.0	0 0	5 1	3 4	1 2	1 1	5 7	33 33
67 —1 —2	60	1:7.0	0 1	8 20	0 1	0 0	0 0	5 5	— —
54 —1 —2	50	1:4.5	1 1	4 3	3 0	1 0	1 0	8 8	33 —
55 —1 —2	50	1:5.5	1 1	4 9	0 0	0 0	0 0	5 5	— —
56 —1 —2	50	1:6.5	4 1	5 3	0 0	0 0	0 0	14 8	— —
43 —1 —2	40	1:3.5	4 1	5 5	2 1	1 0	0 0	12 24	— —
44 —1 —2	40	1:4.5	5 4	6 4	1 0	0 0	0 0	24 10	— —
45 —1 —2	40	1:5.5							

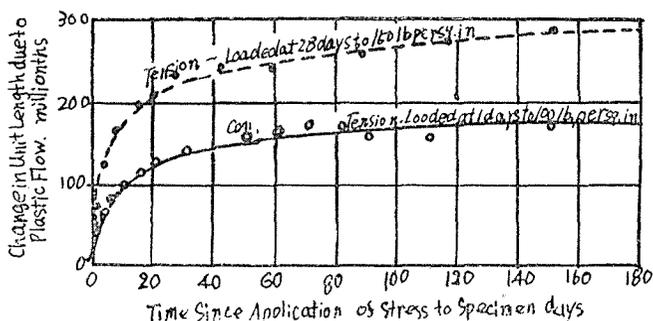
之等の龜裂は何れも微細であつて、太い部分でも幅 0.08 mm をこえるものなく、大部分は 0.02 mm 以下である。又其の 1/2 程度は肉眼に依る發見が困難であるといつてよい。比較的貧調合のものに於て、外周上縁部の龜裂數が多いのは、成型の際使用した小型振動器を主として型枠外周から作用せしめた結果、此の部分にセメントペースに富む部分が集結したためと考えられる。水セメント比の大きいコンクリートでは此の現象が特に顯著であつた。

上記の様な微龜裂は自由収縮試験体には發見されない。之等の微龜裂の發生は表面部の乾

乾燥収縮に基くことは明かであるが、自由収縮試験体では、未だ乾燥収縮を初めない中心部の壓縮ヤング係数が、拘束試験体の鋼製圓盤のそれに比べて1/20~1/30に過ぎないであろうから、表面層の部分が龜裂するに至らないものと考えられる。

(3) 附着力の影響。上記の様に拘束試験体が其の表面に數多くの微龜裂を生じ乍ら破斷しなかつたことには、コンクリートと型枠との附着力の影響も含まれていると思われる。元來型枠のコンクリート接觸面は平滑に作つてあるから、其の附着力は餘り大きくないものと考えられ、例えば前章のモルタルの試験に際しては、モルタルの龜裂破斷に際して、附着の切れたものもあつた程度であるが、實際の鐵筋コンクリート造構造物では、鐵筋とコンクリートの間に遙かに大きな附着力を期待することが出来る。此の實驗の拘束試験体では、試験体の表面から鋼芯までの距離が5 cmであつて、通常の鐵筋コンクリート造構造部材ではコンクリートの被りは之より稍小さい。従つて鐵筋數が多いか、又は鐵筋の太い場合には、此の拘束試験体と類似の傾向を示すであろうから、コンクリートは表面微龜裂を生じて、破斷の状態にはならないことが想像される。勿論収縮の拘束度が低い様な構造部材では、収縮龜裂の怖れが減少する筈であるが、實際の建築物の調査例¹⁾に於ても、梁等の鐵筋の多い部材には龜裂は殆ど認められなかつた事實は、龜裂破斷に對する附着力の効果を示すものと見る事が出来る。

(4) 収縮の拘束とプラスチックフロー。モルタル又はコンクリートの収縮拘束試験体に於て、乾燥の進行に伴つて生ずる引張應力は、通常の引張試験の應力に比べて著しく其の増大速度が遅いから、當然プラスチックフローの現象が起つて來る筈である。コンクリートの引張に関するプラスチックフローの實驗的研究は非常に其の例が少ないが、R. E. Davis 教授等の報告²⁾に依れば第4圖の様な性状を示す。



第 4 圖

之は普通ポルトランドセメント

ト 1: 粗粒率 4.57 粒大 3/4" 以下の普通骨材 6 (重量比) の調合比を有する水セメント比 63% のコンクリートに関するものであつて、水中養生 7 生目の後 100 lb/in² (7 kg/cm²) の繼續應力をかけた場合と、水中養生 28 日の後 150 lb/in² (10.5 kg/cm²) の繼續應力をかけた場合との 2 種についての結果である。之に依れば負荷後相當長期に亘つてプラスチックフローは増大しつづけ、後者の場合にはフロー率 3×10^{-1} に達せんとしている。収縮應力の場合には引張應力は徐々に増大するから、収縮應力の増加速度の低下、即ち乾燥速度を緩かにするならば、上記の數

1) 前出著者報告

2) R. E. Davis, H. E. Davis, E. H. Brown: Plastic flow and volume change of concrete A.S.T.M. 1937.

字以上のフロー率が期待出来よう。尤も既に指摘した 4×10^{-4} なる限界収縮率の中にも相当量のプラスチックフロー率が見込まれているかも知れないが、破断材齢が30~40日であるから収縮の速度を更におくられれば限界収縮率の数値も幾分共増大するものと考えられる。

4. 要 約

本章に於ては、浅野セメント（普通ポルトランドセメント）と相模川産骨材に依る申練り及び硬練りコンクリートの収縮率を計測し、又同盤状拘束型枠に依つて其の収縮を拘束した場合の龜裂発生状況を観察した。同時に水セメント比30%及び40%の軟練りモルタルの自由収縮についても実験を行つた。

(1) 上記の水セメント比の軟練りモルタルの収縮率の比率は、本文II章の実験成績から推定される比率と殆ど等しい。但し水セメント比40%の純セメントモルタルの収縮率の絶対値を比較すると、今回の方が40%だけ大きい。此の原因としては試験温度の相違も一因であるが、今回のセメントの収縮性が稍強いことにも依るのではないかと思われる。

(2) 今回の水セメント比40%の純セメントモルタルの収縮率とII章の実験に於ける水セメント比40%、50%、60%、70%の純セメントモルタルの収縮率の比率とを用いて、今回のセメントに依る上記各水セメント比の純セメントモルタルの収縮率を推定し、之等に依つてII章で誘導した収縮率の算式について計算を行うと、コンクリートの収縮實測値と良く一致する。従つてコンクリートの収縮機構はモルタルの収縮機構と全く同様な關係にあると見なすことが出来る。

(3) 本実験に依つて、湿度 $76 \pm 2\%$ の状態では、硬練りコンクリートの大部分は、其の自由収縮率が 4×10^{-4} 以内に止まることを認めた。同一軟度の場合について言えば、水セメント比が50%より多い方が、斯様な収縮の小さいコンクリートを得やすい。

(4) コンクリートの配合に於ける砂と砂利の比率が變化しても、全骨材量(重量)が變らなければ、収縮率は殆ど變化しない。

(5) 自由収縮率が概ね 4×10^{-4} 以内である様なコンクリートは、収縮を殆ど完全に拘束した場合に於ても、龜裂破断はしないと見ることが出来る。但し其の上表面には比較的多くの毛髮龜裂を發生する。此の毛髮龜裂は湿度が稍下つた時短時間のうちに發生するものであるらしい。

(6) 鋼材とコンクリートとの附着力は龜裂破断防止に役立つものと思われる。

(7) 乾燥を極力緩かにし、収縮速度を遅くすれば、プラスチックフローに依つて龜裂發生の限界収縮率は 4×10^{-4} より幾分共増大すると思われるから、斯様な養生法を講ずることは龜裂防止上有効であると考えられる。

V. 總 括

1. 概 説 モルタル及びコンクリートの水中膨脹並びに空氣中に於ける乾燥収縮については、諸外國に於て既に多數の研究が發表され、其の性狀の大要が明かにされて來ているが、我國に於ては此の種の研究が餘り行われていない。之等内外の研究は主としてモルタル又はコンクリートの自由膨脹若しくは自由収縮を取扱つたものであつて、収縮を拘束した場合のモルタル又はコンクリートの性狀についての報告は比較的少い。

上記の収縮の拘束については、古くは O. Graf 教授の鐵筋埋没に依る方法¹⁾ (1921年) があり、比較的新しいものには R. Grün, H. Beckmann, K. Obenauer 氏等に依る特殊棒狀鐵芯、埋設用鋼塊及び薄肉圓環による方法²⁾ (1939年)、米國 Carlson 教授の中央部布卷鐵筋埋設法³⁾ (1940年) 並びに同教授の圓盤狀鐵芯による法⁴⁾ (1942年) が發表されている。上記の中、鐵筋埋設に類する方法は、實際の構造物の狀態に比して収縮の拘束度が著しく弱いものであり、又 Carlson 教授の最後の方法は拘束法としては優れた着想であるが、底版が附屬するため、空氣中の乾燥に際し、均一な乾燥を妨げること及び膨脹に對する拘束力に乏しいこと等の弱點がある。尙此の型枠は収縮龜裂防止というよりは寧ろ収縮龜裂の檢出に用いられている。

2. 著者の研究。著者は混和劑を混入しない場合のポルトランドセメントに依る砂入モルタル及び普通コンクリートに關し、次の諸點について實驗的研究を行つた。

(a) 實在鐵筋コンクリート造建築物の龜裂の實態を調査した⁵⁾。

(b) 閉鎖ラーメン型収縮拘束型枠 (1935年) を提案し、之に依り砂入モルタルの収縮拘束時の龜裂性狀を調べ、龜裂發生の限界自由収縮率を求めた⁵⁾。

(c) 國産ポルトランドセメントの品種、水セメント比、水中養生期間等が収縮性に及ぼす影響を検討し⁵⁾、又凝結前後の収縮性並びに其の収縮の拘束がモルタルの強度彈性に及ぼす影響を考究した⁶⁾。

(d) 水セメント比と調合を異にする各種モルタルについて等収縮線圖を作つて、龜裂に對して安全な調合の範圍を推定し、且つモルタルの収縮率とセメントペーストの収縮率の關係式を誘導した⁶⁾。

(e) 各種水セメント比のコンクリートについて上記と同様な研究を行い、濕度 76% 以上の場合には硬練りコンクリートの自由収縮率が前述の限界収縮率以内に納まること、及び別の収縮拘束型枠 (1952年、前記 Carlson 型を改造したもの) に依つて、此のコンクリートでは龜裂破斷を防止し得ることを確めた⁶⁾。

1) B.u.E. 1921 Heft V. S. 49.

6) 本文 I. II. III. VI.

2) 末尾文献 (75)

3) " (75)

4) " (77)

5) 前出の既發表報告

3. 現在までの研究成果の總括

A. 収縮龜裂發生の限界収縮率

モルタル及びコンクリートの収縮を完全に拘束した場合、普通の乾燥速度で常温乾燥を受けるときは、同寸度の部材の自由収縮率が 4×10^{-4} 附近に達すると、収縮龜裂を發生する。水洗した砂を使用したモルタルでは、此の限界収縮率は上記依り稍大きい。又プラスチックフローを考慮すれば、乾燥収縮を極めて徐々に進行せしめれば、限界収縮率を幾分共増大せしめることが可能であると考えられる。

B. 収縮龜裂の防止策の目標。

上記からモルタル又はコンクリートの自由収縮率を此の限界収縮率以下に保つか、又は収縮の拘束程度を緩かにして、拘束収縮率が上記の限界以内にある様にすれば、収縮龜裂を防止することが可能であろう。従來の硬練りコンクリートでも構造物が2スパン、スパン10m程度の小規模のものであれば龜裂を生じない。

C. モルタル又はコンクリートの収縮率。

モルタル又はコンクリートの自由収縮率は次の式で支配されることが出来る。

$$\epsilon_m = \frac{\epsilon_p - \epsilon_a}{1 + \frac{E_a A_a}{E_p A_p}} + \epsilon_a$$

茲に ϵ_m : モルタル又はコンクリートの収縮率

ϵ_p : セメントペースト部の収縮率

ϵ_a : 骨材の乾燥収縮率

E_a : 骨材の壓縮ヤング係數

E_p : ペースト部の引張ヤング係數

A_a : モルタル又はコンクリートに於ける骨材實積部の斷面積

A_p : モルタル又はコンクリートに於けるペースト部の斷面積

D. モルタル又はコンクリートの自由収縮率の減少法。

混和劑其の他によつて膨脹を起させる場合や収縮を減少せしめる場合は一應別問題として、上式及び前記の實驗成績から次の方法が推奨される。

(1) ペーストの収縮率の減少

(イ) 水セメント比の少いペーストは収縮が小さい。

(ロ) 水中養生期間が長くなると、水セメント比50%以上のものでは収縮率が増大する傾向があるが、水セメント比40%附近のものは長期の水中養生に依つて収縮が減少する傾向がある。

(ハ) セメント自身について言えば、凝結時間の遅いセメントは収縮が小さい。之はセメント成分から言えば C_2A が少いか、或は C_3A に適當した石膏分が含まれていることを意味し

よう。又粉末度の粗いセメントは収縮が比較的少い。

(2) 骨材の収縮率の減少

(1) 粗砂は収縮率が小さい。

(2) 泥分があると収縮率が増大する。

(3) 収縮率の小さい骨材を使用する場合 (例えばスラッグ碎石の如きもの), 特に貧調合ではモルタル又はコンクリートの収縮を一段と小さくすることが出来よう。

(3) 其 の 他

貧調合とすれば, 前記の式の A_a/A_p が大きくなるから, 収縮は小さくなる。此の場合モルタル及びコンクリートは, 何れも硬練りとなる。従つて出来るだけウォカピリティの良いセメント, 骨材型式が望ましい。

E. 現在のセメントを使用したモルタル及びコンクリート。

同一軟度のモルタル及びコンクリートについて考察すると, モルタルでは水セメント比 40% 附近で, 水中養生を出来るだけ長くしたものが限界収縮率以内に納まり易く, コンクリートでは水セメント比 50% 以上で水中養生をなるべく短くしたものが限界収縮率以内に納まり易い。

F. 収縮の速度。

水セメント比の少ないモルタルは初期の収縮が早い。之は水中養生期間の長い程, 顯著であるから, 此の収縮を出来るだけ緩かに起させる様な考慮を拂えば, プラスチックフローの特性から考へて, 龜裂防止に有利である。このことはコンクリートにも適用出来ると考えられる。

G. 材齢 1 日迄の収縮。

アルミナ分の多い凝結の特に早いセメントを用いた, 水セメント比 40% のモルタルの實驗では, 凝結時に 10×10^{-4} にも及ぶ急激な収縮が起る。之を拘束すると, 材齢 1 日で 2×10^{-4} 程度のみが弾性歪として残り, 他は消滅するが, 此の弾性歪の量は, 前記の限界収縮率の 1/2 に達し, 収縮龜裂防止上甚だ不利である。併し此の収縮は, 凝結時の水分の乾燥を防止すれば, 著しく小さくすることが出来, 又水セメント比が大であれば, 表われて來ない。斯様な凝結の早いセメントを使用する場合には, 特に此の時期の乾燥防止が重要である。又斯るセメントは究極の収縮も大きいから, 好ましくない。

H. 水中膨脹。

水中養生の際のモルタルの膨脹率は, 水セメント比に關係なく, 同一調合比については略等しく, 砂の粒大の影響も殆ど受けなくて, 材齢と調合比の函数として表わすことが出来る。茲では次の式を與えた。水中材齢 160 日までの範圍で

$$\epsilon = a \log(1 + bD)$$

$$a = k_1(c + m)^{-k_2}$$

茲に ϵ : 材齢 D 日に於ける膨脹率

k_1, k_2, b, c , 常數 (著者の實驗では $k_1 = 0.012, k_2 = 2.82, b = 0.2, c = 3$.)

m : セメント 1 に對する砂量重量比

4. 文 献

モルタル及びコンクリートの收縮膨脹並びに之に關連する研究文献¹⁾については、1930年以降に於ても極めて多數發表されているので、茲に其の主なるものを集録する。

(イ) 先ず 1929 年以前の研究を總括したも²⁾としては、收縮と溫度膨脹を含めて

- 1) R. E. Davis: A summary of investigations of volume changes in cement mortars and concretes produced by causes other than stress. A.S.T.M. 1930, Part I.
- 2) R. E. Davis: A summary of the results of investigations having to do with volumatic changes in cement mortars and concretes due to causes other than stress. A.C.I. 1930, p. 407. (上記と略同内容).

其の後の此の種文献としては

- 3) W. H. Rabe: Neuere Untersuchungen in U.S.A. über Volumenänderungen des Betons in Staumauern unter dem Einfluss von Temperatur, Abbindewärme und Schwinden. Zement. 1933.
- 4) G. E. Troxell: Proper method of design and construction of concrete structures to prevent damage from volumetric changes of the concrete. Rep. of committee 102-Volume changes in concrete. A.C.I. 1934, p. 209.

(ロ) 自由收縮の測定法に關するものとしては

- 5) A. Guttman: Zur Bewertung von Schwindzahlen. Zement. 1930, S. 267, S. 305. (これは簡単な實驗結果の報告も含む).
- 6) R. E. Davis: Report of committee C-9, Methods of test for determining volume changes in concrete. A.S.T.M. 1935, Part I. p. 298.
- 7) O. Graf: Bemerkungen und Feststellungen zur Prüfung der Strassenbauzemente. Zement. 1937, S. 759.
- 8) DINE 1165, Einrichtungen für die Herstellung und Prüfung von Prismen 4.4. 16 cm aus weich angemachtem Mörtel. Zement. 1938, S. 592. (軸長變化の測定法を規定).
- 9) R. C. Valore Jr.: Volume changes in small concrete cylinders during freezing and thawing. A.C.I. 1950, p. 417. (水銀使用).

(ハ) モルタル又はコンクリートの自由收縮の一般的研究としては

- 10) G. Katherin: Zur Bedeutung der Auslagung von Mörtel-versuchskörpern bei wasserlagerung. Zement. 1930, S. 2. (1:1モルタル, 15種の砂).
- 11) E. R. Dawley: Volume changes of an early-strength concrete. A.S.T.M. 1932, Part. II.
- 12) R. E. Mills: Volumetric changes in neat cements and mortars. A.C.I. 1933, p. 344. (8年に亘る實驗).
- 13) R. W. Carlson: The chemistry and physics of concrete shrinkage. A.S.T.M. 1935, Part. II. (大部材の收縮についても觸れている).
- 14) I. Lyse: Shrinkage of concrete. A.S.T.M. 1935, Part. II. p. 383.
- 15) F. E. Richart, J. E. Keranen: Shrinkage of Haydite and sand-gravel concrete. A.S.T.M. 1936, Part. I.

1) 1930年迄の主な文献については、著者の前出報告(昭10.4)に若干集録した。

- 16) A. Frank: Raumänderungen von Portlandzementbeton bei Wechselerhärtung. Zement. 1937, S. 138.
- 17) R. W. Carlson: Dry shrinkage of concrete as affected by many factors. A.S.T.M. 1938. (収縮を減少するのに骨材粒間に微小なる龜裂を起させることを着想した).
- 18) E. Gruenwald: Lean concrete mixes;—Study of the effect of cement content, cement fineness on compressive strength, durability and volume change of concrete. A.S.T.M. 1939.
- 19) 坂 静雄: 大氣湿度の變化によるコンクリートの伸縮. 建築雑誌 昭11~8月.

尙伸びの大きいものの方が龜裂の防止上有利であることを主張したものととして

- 20) O. Graf: Über das Schwinden und Quellen sowie über die Dehnungsfähigkeit von Beton mit verschiedenen Zuschlagstoffen. B.u.E. 1933, S. 120.

(二) セメントの化學成分や粉末度の影響を主とした研究には

- 21) O. Goffin, G. Mussgnug: Beitrag zur Frage der Quellung und Schwindung der Zemente. Zement. 1933, S. 549. (逆離石灰, 石膏 CaCl_2 量並びに粉末度につき).
- 22) R. W. Carlson, G. E. Troxell, J. W. Kelly: Cement investigation for Hoover Dam. A.C.I. 1933, p. 413. (C_3A , C_2S , C_3S 等につき).
- 23) R. W. Carlson, G. E. Troxell, J. W. Kelly: Cement investigation for Boulder Dam. A.C.I. 1934.
- 24) O. Graf: Über die Prüfung, Auswahl und Abnahme der Zemente für der Strassenbau. B.u.E. 1935, S. 89. (粉末度につき).
- 25) O. Graf: Über Zement für Betonstrassen. Zement. 1935, S. 363.
- 26) M. Spindel: Über die Schwindung von Zement und Beton. B.u.E. 1936, S. 247.
- 27) O. Graf: Einheitliche Feststellung des Schwindmasses von Strassenbauzementen. Zement. 1936, S. 317.
- 28) F. Weise: Untersuchungen über den Einfluss von 9 Zementen auf das Schwinden, auf die Elastizität und auf die Festigkeit von Strassenbeton. Zement. 1937, S. 39.
- 29) O. Graf: Eigenschaften amerikanischer und deutscher Strassenbauzemente. Zement. 1937, S. 389. (ドイツの方が収縮が小さい).
- 30) H. E. Schwiete, H. Berchem: Über der Verbesserung des Schwindmessverfahren für Strassenbauzemente. Zement. 1938, S. 815.
- 31) O. Graf, K. Walz: Vergleichende Prüfungen von Strassenbauzementen in der Versuchsanstalt und in der Strasse. Zement. 1939, S. 505.
- 32) H. E. Schwiete, H. Berchem: Über der Prüfung auf Schwindung von Zementmörteln. Zement. 1938, S. 655. (粉末度と水分減量と収縮の關係につき).

と、米國では主としてダム用セメントに、ドイツでは國有自動車道路のためのセメントの研究に重點があつた事を示す。米國では當然凝結時の發熱量が問題となり、上記論文の他に例えば

- 33) L. H. Tuthill: Control of Cracking in concrete dams. Westen Constr. News. Apr, 10, 1930. (32種のセメントの發熱をしらべた).

セメントの成分の量と収縮量の關係式を誘導したものととしては

- 34) 中條金兵衛: セメントの伸縮現象に就いて. 大日本建築會雜誌, 昭15-7月, 8月, 昭17-9月, 10月.
- 35) H. F. Gonnermann: Study of cement compositions in relation to strength, length changes resistance to sulfate waters and to freezing and thawing, of mortars and concrete. A.S.T.M. 1934, Part. II.
- 36) 中條金兵衛・關野眞司・近藤實: 道路用セメントの研究. 昭26, セメント技術年表, 149頁.

セメントの化合水又は吸着水と収縮の關係については

- 37) D. Werner, S. G. Hedström: Die Abhängigkeit der technisch wichtigen Eigenschaften des Betons von den physikalisch-chemischen Eigenschaften des Zementes. Zement. 1931, S. 1000.
- 38) 吉田彌七: Length changes of cement paste in relation to combined water. A.C.I. 1937, p. 25.

- 39) H. E. Schwiete: Über die Schwindung und die Wasserabgabe von Zementen. Zement. 1933. S. 769, S. 788.
- 40) T. C. Powers, T. L. Brownard: Studies of the physical properties of hardend cement paste-Part. 4, A.C.I. 1947, p. 549.
- 41) C. A. Hughes, A. S. Levens: Strength and shrinkage of mortars made with blend of portland-cement and pozzolanic materials. A.C.I. 1931, p. 317.
- 42) R. W. Carlson, G. E. Troxell: The effect of adding a siliceous material to portlandcements upon volume changes, compressive strength and heat generation. A.S.T.M. 1933, Part. II. (calcinated silica は収縮減少に効あり).
- 43) W. Dyckerhoff: Bituminierte Zemente. Zement. 1933, S. 400, S. 413. (Bitumen を4%加えると収縮が減少する).
- 44) R. E. Davis, R. W. Carlson, J. W. Kelly, G. E. Troxell: Properties of mortars and concretes containing high-silica cement. A.C.I. 1934, p. 369.
- 45) Haegermann: Beton mit Bitumenzusatz. Zement. 1934, S. 159, S. 190. (präparierter Teer を5%入れると収縮は49%になる).
- 46) G. Mussgnug: Beitrag zur Frage der Quellung und Schwindung der Zemente. Zement. 1935, S. 717. (トラス Hochofenschlack の影響).
- 47) R. E. Davis, J. W. Kelly, G. E. Troxell, H. E. Davis: Properties of mortars and concretes containing portland-puzzolan cements. A.C.I. 1936, p. 80. (収縮大, 燃焼したものは稍小).
- 48) R. E. Davis, R. W. Carlson, J. W. Kelly: Properties of cement and concrete containing fly ash. A.C.I. 1937. (多くは収縮大, 但し plastic deformation 大となる).
- 49) A. Steopoe: Über der Einwirkung von Mineralpulvern und von Kalziumchlorid auf das Volumen und die Schwindung der Zementpaste. Zement. 1939, S. 141.

特に石膏の影響については

- 50) G. Mussgnug: Brengrad und Klinkerqualität. Zement. 1937, S. 1.
- 51) G. Pickett: Effect of gypsum content and other factors on shrinkage of concrete prisms. A.C.I. 1948, p. 149. (C₃A に對し適量の石膏を用いざれば収縮大).

(チ) 蒸氣養生の影響については

- 52) H. F. Gonnerman: Report of working committee on volume change and soundness of portland-cement. A.S.T.M. 1934, Part. I.
- 53) C. A. Menzel: Strength and volume change of steam-cured portlandcement mortar and concrete. A.C.I. 1935, p. 125. (収縮小となる).
- 54) R. N. Young: The autoclave test and interpretation. A.C.I. 1937, p. 13.

(リ) 特に凝結硬化時の収縮測定に重點をおいたものには

- 55) C. H. Scholar, E. R. Dawley: Volume changes of concrete. A.S.T.M. 1930, Part. II.
- 56) M. A. Swayze: Early concrete volume changes and their control. A.C.I. 1942, p. 425.

(ヌ) 収縮量検出の促進法乃至短期推定法に關するものとしては

- 57) O. Schwachheim: Zur Frage eines Schnellverfahrens für Schwindmessungen und der Räumständigkeitermittlung. Zement. 1937, S. 658.
- 58) G. Mussgnug: Versuche zur Ermittlung eines Schnellverfahrens für die Schwindprüfung. Zement. 1938, S. 605.
- 59) G. E. Troxell: A short-time test for effect of type of cement on concrete shrinkage. A.S.T.M. 1939, p. 73, A.C.I. 1938, Nov. p. 73.
- 60) G. Hägermann: Versuche über ein Schnellprüfungs-verfahren auf Schwinden. Zement. 1939, S. 637.

(ル) 更に大部材の収縮が小試験片の収縮より小さいことを示したものに

- 61) O. Graf: Über den Einfluss der Gröss der Betonkörper auf das Schwinden in trockenen Räumen und im Freien. B.u.E. 1934, S. 117.
- 62) R. W. Carlson: Dry shrinkage of large concrete members. A.C.I. 1937, p. 327.
- 63) H. E. Davis: Autogenous volume changes of concrete. A.S.T.M. 1940, p. 1103.

(ヲ) 特殊なものとしてブロックの収縮については

- 64) W. D. M. Allan: Shrinkage measurement of concrete masonry. A.C.I. 1930, p. 699.
 65) W. D. M. Allan: Shrinkage measurement of concrete block masonry. A.C.I. 1932, p. 177.

(ワ) 本研究とは直接の関係はないが、化学作用による容積変化についての研究の1例とし

- 66) H. Kayser, G. R uth: Das Verhalten von Betonkörpern bei verschiedenen Lagerungsbedingungen ermittelt mit Hilfe von feinnmessungen die Längenänderungen. B.u.E. 1936, S. 169. (石膏液と N_2SO_4 溶液).
 67) G. Hägermann: Die Beeinflussung des Schwindens von Portland-zement durch Sulfate. Zement. 1939, S. 599.

所謂アルカリ性骨材反応に関するものとしては

- 68) T. E. Stanton, O. J. Porter, L. C. Meder, A. Nicol: California Experience with expansion of concrete through reaction between cement and aggregates. A.C.I. 1942, p. 209.
 69) H. S. Meissner: Cracking in Concrete due to expansive reaction between aggregates and high-alkali cement as evidenced in Parker Dam. A.C.I. 1941, p. 549.
 70) H. A. Kammer, R. W. Carlson: Investigation of causes of delayed expansion of concrete in Buck hydroelectric Plant. A.C.I. 1941, p. 665.
 71) B. Tremper: Evidence in Washington of deterioration of concrete through reactions between aggregates and high alkali cements. A.C.I. 1941, p. 673.
 72) W. C. Hansen: Studies relating to the mechanism by which the alkali-aggregate reaction produce expansion in concrete. A.C.I. 1944, p. 213.
 73) R. F. Blanks, H. S. Missner: The expansion test as a measure of alkali-aggregate reaction. A.C.I. 1946, p. 517.
 74) T. M. Kelly, L. Schuman, F. B. Hornibrook: A Study of alkali aggregate reactivity by means of mortar bar expansion. A.C.I. 1949, p. 57.

(カ) 次に収縮を拘束することに關する研究としては前掲の如く

- 75) R. Grün, H. Beckmann, K. Obenauer, H. Schlegel, R. Tiemeyer: Schwinden von Mörtel und Beton. Zement. 1939, S. 345, S. 376.
 76) R. W. Carlson: Attempts to measure the cracking tendency of concrete. A.C.I. 1940, p. 533.
 77) R. W. Carlson: Cracking of concrete. Journ. of Boston Society of Civil. Eng. Apr. 1942.
 78) H. W. Brewar, R. W. Burrows: Coarse-ground cement makes more durable concrete. A.C.I. Jan. 1951.

(ヨ) 之に關連して収縮應力についての實驗的研究は

- 79) A. Hawranek: Die Wahl des Beiswertes n für die Berechnung von Eisenbeton-balken. B.u.E. 1932.
 80) Suguet: Versuche über das Schwinden von Beton und Eisenbeton. B.u.E. 1932, Heft 2.
 81) H. Kayser: Anfangsspannungen im Eisenbeton. B.u.E. 1933, S. 116, 1936, S. 14.
 82) F. Gebauer: Berchnung der Eisenbalken unter Berücksichtigung der Schwindspannungen im Eisen. B.u.E. 1934, S. 137.
 83) P. M. Pfl r: Messung der Schwindkraft von Beton. Zement. 1937, S. 657.
 84) W. Schink:  ber Gef gespannungen im Beton infolge Schwindens und die Art ihrer Messung. Zement. 1939, S. 528.
 85) G. A. Maney, M. B. Lagaard: Stress increases in compressive steel under constant load caused by shrinkage. A.C.I. 1940, p. 541.
 86) G. Pickett: Shrinkage stress in concrete. A.C.I. 1946, p. 165, p. 361.
 87) F. R. Beyer: Stress in reinforced concrete due to volume change. A.C.I. 1949, p. 713.

此の問題は當然プラスチックフローにまで發展して兩者を論じたものには

- 88) W. Gehler: Die technischen Lehren beim Bau der Moselbrücke in Koblenz. B.u.E. 1934, S. 245. (コンクリートアーチ橋の變形測定と應力檢定).

- 89) A. Freudenthal: Die Änderung des Spannungszustandes weitgespannter, flache Eisenbetonbogen durch die plastische Dauerverformung des Betons. B.u.E. 1935, S. 176.
- 90) R. E. Davis, H. E. Davis, E. H. Brown: Plastic flow and volume change of concrete. A.S.T.M. 1937. (引張フローの試験を含む).
- 91) C. T. Moris: Effect of plastic flow and volume change on design. Rep. of Com. 313, A.C.I. 1937, p. 123.
- 92) H. S. Thalborn: Schwinden und Kriechen des Betons. B.u.E. 1938, S. 219.
- 93) J. R. Shank: Bond creep and shrinkage effects in reinforced concrete. A.C.I. 1939, p. 81.
- 94) G. Pickett: The Effect of change in moisture content on the creep of concrete under sustained load. A.C.I. 1942, p. 333.
- 95) H. R. Staley, D. Peabody Jr.: Shrinkage and plastic flow of pre-stressed concrete. A.C.I. 1946, p. 229.

(ク) 最後に龜裂實測の方法としては

- 96) R. B. Young: A device for determining the depth of surface cracks in concrete. A.C.I. 1944. p. 401. (染料を吹きこみ穿孔して調べる道具).
- 97) J. R. Leslie, W. J. Cheesman: An ultrasonic method of studying deterioration and cracking in concrete structure. A.C.I. 1949, Sept. 17.

等がある。

以上

本研究は前記既発表報告に引続き東京大學工學部建築學科材料研究室並びに北海道大學工學部建築工學科研究室に於て行つたものであつて、この間東大内田祥三先生、濱田稔教授、武藤清教授の諸先生に種々御懇篤なる御指導を賜つた。茲に厚く御禮申上げると共に、研究上種々御援助を得た舊淺野セメント社湯目甫氏、日本セメント上磯工場増井工場長、同木村課長、札鐵中澤課長、榊原課長、並びに實驗に協力された三澤澤之助君、増田文雄君、平田逸郎君、新井健一君の諸氏に深く謝意を表します。尙本研究は昭和25年度並びに昭和26年度文部省科學研究費の交付を受けたものであることを附記する。