

コンクリートの乾燥収縮に及ぼす諸因子 (一)

川 畑 健 雄 抄 譯

本論文は米國 Massachusetts 洲 Cambridge, 工學研究所員 Roy W. Carlson 氏の發表に係るもので A. S. T. M. Proc. 1938 年 Part II より紹介せるものである。

著者は 1935 年 “コンクリート収縮の化學及び物理” に関しての報告以來引續き廣範圍に變化する所のコンクリートの収縮への影響諸因子を研究する爲多數の實驗を行つて來た。殆ど限り無い影響諸因子は相結合し研究の範圍及び有益な結果の可能性を高め、1,000 本以上にも及ぶコンクリート供試體に就て試驗を行つたが此の研究は未完成状態にある。

本報告は乾燥収縮の終局的調節に關係する或る特定の試験結果を示し、コンクリートの収縮に及ぼす諸因子に就て論じたものである。勿論本報告は従來の研究を僅かに一歩進めたものと考へ得られ、更に將來の研究に依つて収縮に關する研究は改良されるものと信ずる。

〔1〕 試 験 方 法

本試験はコンクリート供試體を溫度 74°F、湿度 50% の空氣中に貯藏した時に起る収縮の測定に限定せるものである。供試體は凝固後規定期間濕養生を行つた後一定溫度並に一定湿度の室内に貯藏して収縮せしめた。収縮の測定には供試體

の両端に不銹鋼のフラツグを埋込み、1/10,000時に自盛つたエツクスソクマターを使用した。エツクスソクマター一體の長さの變化の影響は一定長の鋼製角柱を同時に測定して補正した。而して讀みの精度は6吋圓筒型の長さの約10/100萬である。普通に使用した供試體は3×6吋圓筒型コンクリートであつて、兩端フラツグ間の寸法は5吋である。又或る少數の場合には1 $\frac{1}{2}$ ×1 $\frac{1}{2}$ ×12吋角柱コンクリートをも使用した。最初は同一條件で2本の供試體を使用した。後の試験では3本の供試體を使用した。2本の供試體は殆ど相等しき收縮を示したが、然しコンクリートに内部龜裂が起つて居ると考へられる場合には一致した測定値を示さなかつた。本文中收縮値は長さの1/100萬で示されて居る。而して收縮測定定の最小誤差は100呎に付0.01吋より小なる10/100萬であるが、然しながら供試體に内部龜裂が生じて居ると考へらるる多くの場合は、此の誤差を50/100萬以下には爲し得なかつた。殆ど總ての骨材は一旦標準篩で篩分けた後目的に應じて適當に再混合して使用した。一般的な骨材粒度は所謂理想型 (Ideal Type) のものであつて、順次に小さな寸法の骨材を系統的に變化せしめたものである。

〔1〕 純セメントの收縮

1. 純セメントの一般的性状

セメントが水和した場合普通の乾燥に對して無關係な結晶質、即ち未水和セメント粒子及び水酸化石灰の結晶と、非常に多孔質で濕潤並に乾燥に對して大なる容積變化を起す膠狀物質 (gel) とを生ずる。もし一般コンクリートの如き水比の場合には膠狀物質は結晶質物質より遙かに大なる容積を占むるものである。ポルトランド・セメントの純粹な膠狀物質の乾燥に依る長さの收縮は平均状態に於て1%以上に及ぶと評價されて居る。又もし水比が非常に大なる場合には、膠狀物質は

更に粗大組織となり、現在に於て純粋セメントの膠狀物質の收縮は測定されて居ないが、斯かる膠狀物質の乾燥收縮は恐らく數%に及ぶものと豫想される。純セメントの供試體には乾燥によつて觀察し得ざる龜裂を生ずる爲に實際の收縮測定は困難である。本試験では $1\frac{1}{2} \times 1\frac{1}{2} \times 12$ 吋の供試體を使用したか、ある少數の場合は辛うじて細かい龜裂を見出し得た。而して他の場合は龜裂が察はれたが觀察し得なかつた。斯かる龜裂は充分なる收縮を起さしめぬものであるから、茲に報告された收縮は非常に小さいものである。

II. 純セメントの代表的收縮

次表は水比 30% の場合に於ける各種純セメントの代表的收縮例を示したものである。早強セメントは普通セメントより收縮小なる事は注目すべき事であり、又早強セメントから 5μ 以下の細粒子の大部分を風篩にて分離せしめたものは收縮を増大した。低熱セメント及び混合セメントは大なる收縮を示して居るが、之は水和時に於ける膠狀物質の生成量が大である爲と信ぜられ此の種セメントの特性である。

ニート・セメントの空氣中收縮 (材齡 1 箇年)

セメントの種類	收縮 (I/100 萬)
標準セメント: 7% C ₃ A, 1400 gr/cm ²	2150
早強セメント: 5μ 以下 29% を含む	2335
早強セメント: 5μ 以下 5% まで風篩分離	2670
低熱セメント: 5% C ₃ A, 1900 gr/cm ²	2870
ゾルゾラン・ポルトランド・セメント	3150

II. 濕養生期間の影響

初期濕養生期間の變化がすべての收縮研究を錯雜せしめる因子である。混合物を硬化せしめる爲に長期に亘つて、濕養生を行ふ事は當然の事であつて、斯くして收縮を減少せしめ得る。然し又硬化を繼續する事はセメントの膠狀物質を強固ならしめ、收縮を増す事にもなる。従つて長期に亘つて濕養生を行ふ事は、之の2つの正反對な影響が相殺して、夫々異なる度合に收縮を減少せしめて居るものと考へられる。コンクリートに於ては特に骨材粒子間に龜裂を生じ易い場合には、濕養生期間を延長すれば龜裂は減少し收縮を増すものと考へられる。一方純セメントの場合には一般に濕養生期間の延長は幾分收縮を減少せしむる。次表は各種純セメントの收縮が濕養生期間の延長に依つて、如何に影響を受けるかを示したものである。

純セメントの收縮に及ぼす養生期間の影響

セメントの種類	水セメント比 (1/100萬)	
	2日間 濕養生	28日間 濕養生
A (標準セメント)	0.40	0.40
B (75% A, 25% 粉末白雲石)	0.40	0.40
C (50% A, 50% 粉末白雲石)	0.40	0.40
D (改良セメント, 6% C ₂ A)	0.30	0.30
D (改良セメント, 6% C ₃ A)	0.60	0.60

本表を見るに濕養生期間延長の影響が標準セメント A の場合明らかに現はれて居る。然るに A セメントに 25% の不活性な粉末白雲石を混合すれば此の影響は減少し、更に 50% も混合すれば收縮に及ぼす濕養生期間の影響は全くない。又改良セメントの場合は単味セメントでさへ濕養生期間延長の影響は僅少であるか、或は全く收縮に無影響である。

IV. 水セメント比の影響

セメント混合物の收縮に對して水量は最も重要な因子であつて、此の影響に就て知識を得ておく事はコンクリートの收縮を諒解する上に大いに役立つものである。セメントが水和した時其の空隙は原則として、混捏水と水和生成物、主として膠狀物質に依つて占められる。故に生成された水和生成物の容積は、水の容積と水和で消費せられたセメントの容積との和である。今假にセメントが完全に水和したものと考へる時、水和ペーストの容積中に收縮しない水和生成物の一定量が形成せられ其の殘餘物が膠狀物質である。而して今水量が増加すると收縮に無關係な結晶質の容積は其の儘残り、膠狀物質の容積のみが増加した水量だけ増加しなければならない。斯くして水量が 1% 増加すれば一定容積のペーストの膠狀物質は 1% だけ増加する事になる。更に此の場合膠狀物質は粗大組織となり、より大なる收縮傾向を示す事になる。一般にセメントの完全水和の假定は成立しないのであるが、不完全水和の場合でも完全水和の場合と大差は無い。

コンクリートに於て有り餘な水比の比較的大なる場合の純セメントの收縮を知る事は望ましい事である。然し水比の大なる場合は乾燥期間に龜裂を生じ眞の收縮測定は困難である。第 1 圖は 2 種のセメントに就て水量を變じせしめた場合の收縮結果を圖示せるものである。セメント N は水比 0.50 から 0.60 に増加しても收縮増加を示さない。之は水量が増加した時供試體の龜裂が増加した事を暗示するものであつて、斯かるセメントは後述の實驗値に示される如く低收縮のコン

クリートを生ずる。一方セメントPは之に反し理論的に水量の増加と共に収縮も増加し、斯かるセメントは比較的収縮大なるコンクリートを生ずる。

V. セメントの単一構成化合物の影響

セメントの構成化合物たる純粋な礬土酸三石灰 (C_3A)、珪酸三石灰 (C_2S)及び珪酸二石灰 (C_2S)を夫々セメントの粉末程度に粉碎して供試體を作り、収縮試験を行つた結果次の事が明らかになつた。 C_3S : 濕養生期間僅かに膨張し、後空氣中ではポルトランド・セメント平均収縮の約70%収縮する。 C_2S : 濕養生中は變化がなかつたが、空氣中ではポルトランド・セメントの平均収縮の約2倍収縮した。然し供試體は間も無く龜裂を生じ信頼すべき収縮値は得られなかつた。

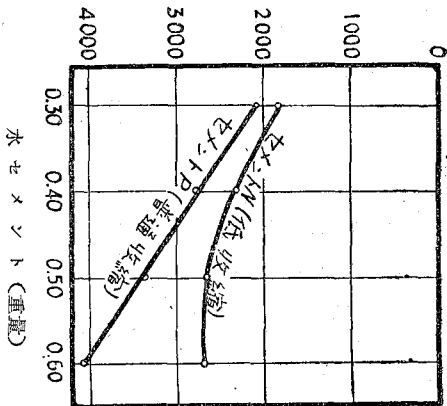
C_3A : 濕養生中は大きな膨張を示し、後空氣中では急速に収縮して龜裂を生じ、後期の収縮測定値は何等の價値を有しなかつた。

之等の結果は Woods 及び Bogue 兩氏の研究結果と一致するものである。

〔II〕 コンクリートの収縮

I. 純セメントとコンクリートとの相異

(風 100/T 湿度 60% 及び 平均 1 湿度)



第I圖 純セメントの収縮

コンクリートは骨材を以て稀釋した純セメントである。もしコンクリートから骨材を取り去り、純セメント部分を分離し得れば、其の收縮は夫に相當する純セメント供試體と同一收縮を示すであらう。又同様にもし骨材が容易に壓縮せらるるものであれば、コンクリートは純セメントと同様な收縮を示すであらう。此の事實は多孔質且つ吸水性のないゾルの如きものを骨材として、コンクリートを作る事に依つて證明し得る。此のコンクリートは夫に相當する純セメントと殆ど相等しき空中收縮を示し、普通コンクリートの約8倍である。然るに一般コンクリートの如く容易に壓縮されない骨材で純セメントを稀釋した時、此のコンクリートの收縮は純セメントの收縮の1部分に過ぎないものであつて、明らかに骨材粒子はセメント・ペーストを制限して、收縮に對して抵抗して居る事を示す。而して之の性能は次の如き重要な因子に依據するものである。

- (1) ペーストの伸張性と骨材の壓縮性
- (2) ペーストと骨材間の結合或は接觸
- (3) ペーストの可塑性
- (4) セメント・ペーストの龜裂の程度
- (5) 乾燥に依る骨材粒子の容積變化

或る簡単な試験の結果、骨材の收縮に及ぼす影響は甚だ大なるものであつて、且つ總ての骨材は同一影響を與へるもので無い事が知られた。次表はセメントを單一寸法 ($3/8$ 吋~No. 4) の性質砂利及び石灰石碎石で夫々稀釋した供試體の收縮と純セメントの收縮とを比較せるものである。

骨材の稀釋がセメント・ペーストの收縮に及ぼす影響

骨材の種類	セメント 骨材	水 w/c	水 %(容積)	ペースト %(容積)	材齢 2年	
					空中收縮 L/100 萬	
純セメント・ペースト	1	0	0.40	56	100	2705
混合 砂 利	1	2.5	0.40	24	44	725
石 灰 石 (碎石)	1	2.6	0.40 *	24	44	417

此の場合水、セメント及び骨材の容積關係のみではペーストとコンクリート間の收縮の差を説明するのに不十分であつて、骨材粒子間の龜裂が之を解決する因子である様に考へられる。此の影響は同一骨材を使用して龜裂を示さない場合から明らかに龜裂を示す状態まで順次に試験を行ふ事に依つて明瞭に知り得る。次表は此の關係を知るために行つた試験結果を示すものである。即ち各種寸法の白雲石骨材で純セメントを稀釋した場合の收縮結果を示す。此の場合配合は1:1(重量)、水比は0.40である。

各種寸法の白雲石骨材でセメント・ペーストを稀釋した場合の影響

骨材の寸法	セメント・ペースト	材齢 1年の收縮 L/100 萬	材齢 2年
			空中收縮 L/100 萬
No. 48 ~ No. 23 篩	2710	1190	1240
No. 28 ~ No. 14 篩		1240	1220
No. 14 ~ No. 8 篩		1220	1160
No. 8 ~ No. 4 篩		1160	949
No. 4 ~ 3/8 吋 篩		949	690
3/8 吋 ~ 3/4 吋 篩		690	

此の表で明らかなる如く、小骨材の場合に於ける収縮は總て相等しく、此の範囲内の寸法の骨材は収縮には影響が無い事は注目すべき事である。即ち此の場合には内部龜裂が起らず、骨材の壓縮とベーストの引張とが均衡状態にあるものと豫想される。而して此の材料並に試験條件では骨材寸法約 $1\frac{1}{4}$ 吋以上になると内部龜裂が始まり、収縮が減少した事を示して居る。此の試験には龜裂を助長する如き特定のセメント及び骨材を使用したのであるが、然しベーストと骨材粒子間の内部龜裂の可能性は、コンクリートの収縮に對して重要な因子である様に考へられる。此の事實が常に認められるならば、外觀上矛盾した結果の或ものは簡単に詭解し得るであらう。

II. コンクリートのセメント量及び水量の影響

純セメントの場合と同様にコンクリートに於ても水量は、収縮に影響する最も重要な單一因子である、如何なる状態でも混捏水を減すれば非常に収縮を減するものである。コンクリートの混捏水 1% 増す毎に収縮は約 2% を増す。之に就ては多數の實驗が行はれて居るが、水量増加に伴つて膠狀物質の生成量が殆ど 1% 増加し、同時に此の収縮傾向は過剰の水に依つて更に約 1% 増すと説明されて居る。

一方セメント量は少くとも普通の砂利の場合では収縮に及ぼす影響は比較的僅少である。一般に過剰のセメントは収縮を増加せしめるが、其の影響は骨材の種類に依つて可成異なるものである。Boston 附近で一般に使用される砂利では、單位容積中の水量及び最大骨材寸法を一定に保つならば、セメント含有量は實際的に収縮に無影響である事が解つた。収縮小なるコンクリートを生ずる骨材として注目される花崗岩及び白雲石砕石骨材は、セメント量が増すと収縮も大となる事が認められた。第 2 圖は普通の混合砂利と花崗岩砕石に就て収縮に及ぼすセメント量の影響を比較せるものである。本圖に

曲線	セメント	骨材	養生(日)
曲線 1	セメントN	混合砂利	14
曲線 2	セメントN	混合砂利	14
曲線 3	低熱	花崗岩(碎石)	2
曲線 4	標準セメントA	花崗岩(碎石)	28
曲線 5	低熱	花崗岩(碎石)	28
曲線 6	標準セメントA	混合砂利	28
曲線 7	標準セメントA	花崗岩(碎石)	2
曲線 8	標準セメントA	混合砂利	2

依りて花崗岩骨材を使用した低熱セメントの含有量大なるコ

ンクリートは(28日間養生)、セメント含有量小なるコンク

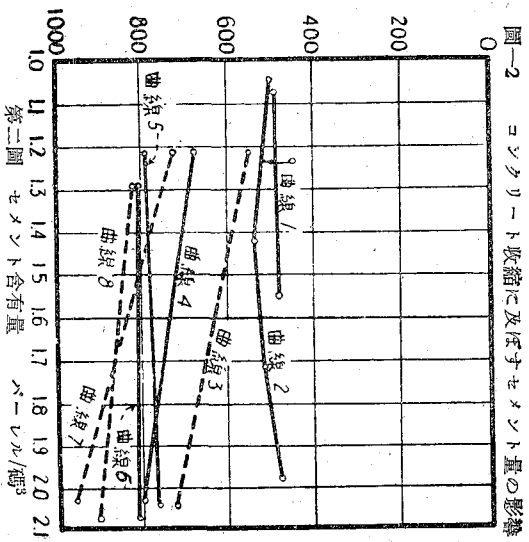
リートよりも小なる収縮を示した事は注目すべき事である。

コンクリアートの収縮に對してセメント含有量よりも水量が大なる影響を及ぼす事は(特に普通の砂利の場合に於て)、開拓局の Denver 實驗室における Vidal 及び Ehrenburg 兩氏の實驗によつて明らかになされて居る。

III. 骨材粒度の影響

最大寸法 $3/4$ 吋までの骨材に就て系統的に廣範圍に粒度を變化せしめた時、コンクリアートの収縮の變化は僅少なものであつた。表一はセメント量及びスランプ(3吋)を一定とし、粒度を廣範圍に變へた場合のコンクリート収縮結果を示し

(號0017) 標準の尺種 9 臺



第二圖 セメント含有量パーセント

たものである。最初の欄の骨材は (No. 1 ~ No. 5) 所謂 “理想 (ideal)” 粒度のものであつて、順次に大なる寸法の骨材に對して小なる寸法の骨材の百分率は一定である。之等5種の連続的粒度に於ける收縮は單に含有水量の異なる爲に變化を來たして居る事が認められる。又實際に適用し得る粗粒率の範囲内では收縮の變化は大なるものでない。次に第2欄に示した不連続粒度 (Gap Gradation) の場合は (No. 7 ~ No.12)、粗粒率を一定にした爲に水比亦一定とし、従つてスランプの僅少な相異は之を許した。斯く粒度を變へたにも拘らず其の收縮變化は、實驗上の誤差を超えるものは稀であつた。

第3欄目には過剰粒子の妨害的影響を示した (No. 14 ~ No.16)。之は系統的連続粒度のものに比較して、單一寸法の骨材を特に多量に含有せしめた粒度のものである。従つて3時スランプを保つ爲に水比が幾分大となつたが、然し過剰の骨材粒が No. 16 の粒度の如く、No. 8 ~ No. 4 篩の間にあつた場合を除いては實質的に收縮には大なる影響を及ぼさなかつた。No. 16 の配合の場合收縮が増加したのは恐らく空隙率が大きとなつた爲であらう。

表一I コンクリートの收縮に及ぼす骨材の粒度の影響
(セメント量一定なる場合)

	篩分折 (殘留%)						水セメント比 (重量)	粗粒率 收縮	6箇月 收縮 (1/100萬)		
	3/8時	No.4	No.8	No.14	No.28	No.48				No.100	通過
No. 1	40.7	24.4	14.6	8.8	5.3	3.2	1.9	1.1	0.62	5.6	650
No. 2	36.6	23.8	15.1	9.8	6.3	4.1	2.6	1.7	0.64	5.4	680
No. 3	31.6	22.1	15.6	11.0	7.8	5.4	3.8	2.7	0.66	5.1	710

不 連 續 粒 度

No. 4	26.4	20.3	15.6	11.9	9.2	7.0	5.5	4.1	0.69	4.8	740
No. 5	21.2	17.9	15.0	12.6	10.0	8.9	7.5	6.3	0.74	4.4	840
No. 6a	29.7	21.6	15.6	11.4	8.2	6.0	4.3	3.2	0.65	5.0	590
No. 7	34.4	22.4	14.7	9.5	0	0	11.6	7.4	0.65	5.0	690
No. 8	37.2	24.2	15.7	0	0	0	14.0	8.9	0.65	5.0	620
No. 9	33.2	21.6	14.1	9.1	0	10.6	6.9	4.5	0.65	5.0	630
No. 10	35.7	23.2	15.1	0	0	12.6	8.2	5.2	0.65	5.0	620
No. 11	41.1	28.8	0	0	0	13.7	9.7	6.7	0.65	5.0	560
No. 12	64.8	0	0	0	0	16.0	11.2	8.0	0.65	5.0	590

粒子妨害を考慮せる粒度

No. 13a	26.4	20.3	15.6	11.0	9.2	7.0	5.5	4.1	0.69	4.8	630
No. 14	28.6	20.0	14.1	9.9	7.0	14.6	3.4	2.1	0.72	4.8	620
No. 15	27.3	19.2	13.5	9.5	20.3	4.6	3.3	2.3	0.73	4.8	650
No. 16	24.1	16.9	35.6	8.4	5.9	4.1	2.9	2.1	0.71	5.1	790

細骨材を除去した粒度

No. 17a	21.2	17.9	15.0	12.6	10.6	8.9	7.5	6.3	0.74	4.4	740
No. 18	22.6	19.1	16.0	13.5	11.3	9.5	8.0	0	0.72	4.7	730

No.19 24.6 20.8 17.4 14.6 12.3 10.3 0 0 0.72 5.0 720

a. 連續的粒度

表-II コンクリートの收縮に及ぼす骨材粒度の影響

(セメント量不定なる場合)

3/8吋	篩分					配合 (重量)	セメント比 (重量)		水の容積 a (%)	粗粒率 (L/100磅)			
	No.4	No.8	No.14	No.28	No.48		No.100	通過			残留 (%)		
No. 1	36.1	23.4	15.4	9.9	6.5	4.2	2.7	1.8	1:8.5	0.77	18	5.4	500
No. 2	36.8	23.8	15.6	10.1	6.6	4.3	2.8	0	1:7.4	0.64	16	5.5	440
No. 3	37.8	24.6	16.0	10.4	6.8	4.4	0	0	1:6.2	0.52	17	5.6	520
No. 4	39.5	25.7	16.7	10.9	7.2	0	0	0	1:5.0	0.44	17	5.8	520
No. 5	42.5	27.7	18.1	11.7	0	0	0	0	1:4.2	0.38	17	6.0	480
No. 6	48.4	31.3	20.3	0	0	0	0	0	1:3.5	0.37	19	6.3	450
No. 7	60.6	39.4	0	0	0	0	0	0	1:3.0	0.36	20	6.5	430
No. 8	100.0	0	0	0	0	0	0	0	1:2.5	0.36	20	7.0	390
不連續粒度													
No. 9a	29.7	21.6	15.6	11.4	8.2	6.0	4.3	3.2	1:6.7	0.65	19	5.0	590
No.10	34.4	22.4	14.7	9.5	0	0	11.6	7.4	1:12.7	1.15	19	5.0	450
No.11	38.7	25.2	16.5	10.6	0	0	5.5	3.5	1:7.6	0.72	19	5.5	550

最小寸法を變へた粒度

No.12	37.2	24.2	15.7	0	0	14.0	8.9	1:12.7	1.20	19	5.0	490	
No.13	41.6	27.0	17.5	0	0	8.5	5.4	1:7.6	0.67	18	5.5	540	
No.14	35.7	23.2	15.1	0	0	12.6	8.2	1:12.7	1.24	20	5.0	450	
No.15	40.6	25.4	17.0	0	0	7.7	5.0	3.3	0.69	18	5.5	600	
No.16	46.0	0	27.6	0	16.5	0	9.9	0	1:10.0	1.00	20	5.1	490
No.17	53.3	0	26.6	0	13.4	0	6.7	0	1:7.7	0.71	18	5.5	600
No.18	51.0	0	0	0	30.6	0	18.4	0	1:10.0	0.94	19	5.0	620
No.19	57.1	0	0	0	28.6	0	14.3	0	1:9.1	0.87	19	5.3	560

a. 水の容積はコンクリートの単位容積に對する百分率

b. 連續的粒度

表一Iの最後の欄には連續的粒度を持つ骨材から、最小寸法の骨材の1つ或は2つを除去した場合の影響を示したものである (No. 18, No. 19)。斯かる粒度に於ては屢々粗粒率を増す爲に水比を減じ、僅かに收縮も減少する。細粒を除く事なく粗粒率を増せば同様に收縮の減少を期待し得るであらう。一定の骨材及びセメントを使用して、極端なる空隙を作る事無く施工し得る貧配合のコンクリートは、最小の收縮を示すものと期待される。斯かる配合の收縮に及ぼす影響は表一IIに示した。即ち同表はスラゾフ3時で空隙率2%を越えざる様辛うじて充分なセメント量を含む、各種配合のコンクリートの收縮結果を示したものである。極端な配合ではスラゾフの精確な測定は困難である爲に、水比は必ずしも比較し得る數値では無い。又總ての配合は數度が同一とは云へなかつた。本表の最初の欄には最小骨材寸法のみを異にする不完全

な粒度の收縮を示した。而して空際率を2%に保つ爲に其の配合は1:8.5から1:2.5までの範圍に及び、従つて水比は夫々0.77~0.36に變化した。斯く配合並に骨材の最小寸法を廣範圍に亘つて變化せしめたにも拘らず、No. 4篩を通過する骨材を含まぬ粒度の場合 (No. 8) を除いては收縮變化は僅少であつた。No. 8の配合でさへ其の收縮減少率は完全粒度 (No. 1) の收縮の僅か22%に過ぎなかつた。又第2欄には中間寸法の骨材を除いた不連續粒度の收縮を示したものである。完全粒度 (No. 9) の收縮に比較して最大23%の收縮低下を示したものは、水比1.0以上の最貧配合の場合であつた。之等の實用的ならざる配合を除いては、此の骨材を使用した場合不連續粒度は收縮低下に對して大なる改良を示さなかつた。

上記に報告した粒度の研究には特殊のセメント及び骨材を使用したものである。即ちセメントは大なる龜裂傾向を示す事なくして可成大なる收縮を興へる標準型であり、又同様に骨材も稍高剛度にも拘らず、大なる收縮を示す種類であり、且つ骨材粒間に外見上龜裂を生じない性質のものである。もしも骨材粒間に龜裂が生じなかつたとすれば、各種配合間に生じた僅少な收縮變化は、水量の僅かな相異に依つて起つたものと考へられる。然しもし廣く龜裂が起つたとするならば、此の結果の均一性は容易には説明し得ない。