

乾燥によるコンクリートの龜裂に關する主要性質の

實驗的研究* (其の一)

正會員 工學博士 吉 田 彌 七**

梗概 本論文はコンクリート及び鐵筋コンクリートの收縮龜裂に關する著者の研究の一部を爲すものにして、乾燥によるコンクリートの收縮、並に之による龜裂に密接なる關係ありと思はるゝ主要性質即ちクリープ、伸、引張強度、彈性係數等に就ての實驗的研究を記せるものである。

乾燥せる空氣中に在りては、コンクリート及び鐵筋コンクリート構造物に屢々龜裂の生ずる事は普く人の識る所である。此の龜裂の由つて來る所以は未だ充分に解明されてゐないが、併しセメント糊中に含まるゝ非結合水の逸散に基因する乾燥收縮がその主なる原因の一つであることは否み難い。乾燥せる空氣中に於けるコンクリート又は鐵筋コンクリート部材からの水分の逸散はその部材内に於て均齊に行はれない。従つて茲にコンクリート内に固有元應力を生ずる。更に不靜定構造物に於ける兩端固定の部材又は鋪裝等に於ては、コンクリートの收縮が全體として自由ならざるため茲に構造物全體としての元應力が誘起される。是等二つの元應力は夫々獨立に、或は共同してコンクリートに龜裂を生ぜしめる主役を演ずるものと考へ得よう。元來、コンクリートに龜裂の生ずるのは、溫度の變化、自生收縮 (autogenous shrinkage) 其他の素因にもよることは勿論であるが、特に乾燥による水分逸散による收縮が龜裂と深い關係に在ることは否み難い事實である。

本研究の基礎を爲す實驗は著者が 1935 年 6 月より 1936 年 12 月までの 1 ヶ年半に亙りて行つたものである。本實驗に使用せしセメントは第一編の實驗に供せるものと同様普通ポルトランドセメントにして、骨材は最大寸法 3/4 in (約 20 mm), 粗粒率 4.88 なる砂及び砂利の細粗粒混合骨材である。又コンクリートはセメントと細粗粒混合骨材との重量配合比 1:6, 水セメント重量比 0.566, スランプ 3 in (約 7.5 cm), 標準養生せる 6×12 in (約 15×30 cm) 圓碁供試體の材齡 28 日に於ける壓縮強度 3750 lb/in (約 260 kg/cm²) なるものを使用した。而して收縮及び壓縮用供試體は直径 6 in (15 cm), 高さ 12 in (30 cm) の標準圓碁, また引張用供試體は直径 6 in (15 cm), 高さ 33 in (84 cm) の圓碁にして、其等の供試體は型より取外したる後 70°F (21°C) にて次の 4 通りに分ちて夫々保存した。

材齡	7 日	28 日	28 日	湿度	100 %	の室中、	其以後	湿度	95 %	の室中
"	7 日	"	"	"	"	"	"	50 %	"	"
"	28 日	"	"	"	"	"	"	95 %	"	"
"	28 日	"	"	"	"	"	"	50 %	"	"

本研究に於て行へる實驗の種類は次の如くである。

- (1) 乾燥による收縮
- (2) 壓縮強度及び引張強度
- (3) 壓縮及び引張に對する彈性係數
- (4) 定持續荷重の下の壓縮クリープ及び引張クリープ
- (5) 等變遞増荷重の下の延伸能力

結論に於ては本研究によつて明瞭にされたる事項の主なるものを記せる外、是等の事項と乾燥による收縮應力及び之に基づく龜裂との關係に就て論述した。

* 本論文の初稿 (英文) は 1937 年 1 月之を書上げ、其の後堆稿久しきに亙り漸く 1941 年 6 月英文にて脱稿し、今回初めて邦文にて公表するものであることを特記して置く。

** 熊本高等工業學校教授

目 次

- 第1章 緒論——概説, 研究の目的, 實驗の豫定
 第2章 實驗の方法——材料, コンクリート配合の設計, 供試體の選定, 供試體の製作, 養生及び貯蔵, 試験の準備, 載荷, 變形測定の方法, 實驗資料の整理
 第3章 實驗の結果及び其の考察——概説, 乾燥による收縮, 壓縮強度, 引張強度, 壓縮強度と引張強度との關係, 壓縮彈性係數, 引張彈性係數, 壓縮彈性係數と引張彈性係數の關係, 定持續荷重の下の壓縮クリープ及び引張クリープ, 等變遞増荷重の下の延伸能力及び延伸比
 第4章 結 論 ——實驗結果の概括, 結言

第1章 緒 論

1. 概 説

コンクリートの乾燥收縮に関する夥多の文獻を通覽するに、龜裂の原因は未だ充分に明白にされてゐないが、併し龜裂が主として非結合水の逸散による收縮によることは實際上確認されてゐる。従つて、他の條件が變らなければ、コンクリートの龜裂は概ねコンクリート中に於ける逸散性水分濃度 (moisture concentration) の分布が一樣ならざることのために生ずる固有元應力、又は部材の長さの變化が全體として控制されるために生ずる構造物全體としての元應力、或は前二者の共同作用に基因するものと本質的に思考される。

事實上、收縮應力に基づく龜裂の發生は、勿論コンクリートの置かるゝその周圍の空氣の溫度及び濕度並にコンクリートが乾燥する以前の組織に關することは言ふ迄もないが、猶ほ次に掲げる事項に支配される。

(1) 供試體又は部材の寸法——コンクリートの乾燥、換言すればコンクリートの水分逸散は乾燥時間及び部材の函數であるから、供試體又は部材に於ける收縮應力及び之に基づく龜裂の發生はその寸法に、特に兩端固定の部材のときは、頗る影響されるものである。

(2) 長さの變化に對する控制の程度——コンクリート部材がその軸の方向に自由に收縮し得る場合には龜裂の原因は逸散性水分濃度の不齊等分布による固有元應力がその主なるものであらう。併し、部材がその兩端に於て固定され或は他の原因で收縮が全體として控制されるときは、その結果構造物全體としての元應力が誘起される。此の元應力は大きな龜裂の發生を誘致する。

(3) 引張強度——引張強度はコンクリートに龜裂の生ずるのに抵抗する重要な事項である。従つて、引張強度が大きい程龜裂の發生が妨げられるのは論を俟たぬ。

(4) 引張荷重の下のクリープ、延伸能力、及び延伸比——茲に言ふ延伸能力* (extensibility) とはコンクリートが引張られた場合の伸び得る能力、即ち破壊の際の極限伸を意味する。延伸比 (extensibility ratio) とは等變遞増荷重 (uniformly and gradually increasing load) を加へた場合の伸と普通の材料試験に於けると同程度の急速なる速度で載荷せし時の伸との比を言ふ。

壓縮の場合に準じ、コンクリートに繼續して續張引力を加へて置けば至は漸次増加する。斯かる性質即ち引張性クリープ (プラスチックフロー) のため、非常に緩い速度で引張力を加へると急速に載荷する場合に比し、コンクリートは破壊に達するまでに多量に伸び得るものである。實際、大氣中に於てはコンクリートの乾燥は緩慢に進展するのが普通である。従つてコンクリートの龜裂は時間的に考察する必要がある。敘上の如くであるから、コン

* 極限伸率, 伸張能力, 或は伸能力と言つた方がよいかも知れぬ。

クリートの引張クリーブ、延伸能力或は延伸比の諸性質は夫々乾燥せる空氣中に於けるコンクリートの龜裂の究明に當り之と密接なる關係がある事項である。

以上述べたる事項の外、コンクリートの龜裂に關係渺からざる性質が夥多ある。就中、壓縮強度、引張彈性係數及び壓縮彈性係數、壓縮クリーブは考究に値する大切なる事項である。

コンクリートの壓縮強度は其の他の機械的性質の基準と看做されるものである。

引張及び壓縮に對する彈性係數はコンクリート部材に生ずる收縮應力と密接なる關係があり、從つてクリーブに關係する。他の條件が一定ならば、收縮應力はコンクリートの有效彈性係數に正比例する。

表-1. 實驗の梗概 (1935~1936年度)

實驗の種類	試器の型式	標準養生の期間、日	貯藏室の湿度、%	載荷の種類
クリーブ (持續載荷)	基準(收縮)	7	50	無荷重
			95	無荷重
		28	50	無荷重
			95	無荷重
	壓縮	7	50	定持續荷重, 100 lb/in ²
			95	定持續荷重, 100 lb/in ²
		28	50	定持續荷重, 150 lb/in ²
			95	定持續荷重, 200 lb/in ²
	引張	7	50	定持續荷重, 100 lb/in ²
				等變速増荷重, 28日間: 25~150 lb/in ² に増加す
			95	定持續荷重, 100 lb/in ²
				等變速増荷重, 28日間: 25~225 lb/in ² に増加す
28		50	等變速増荷重, 83日間: 25~225 lb/in ² に増加す	
			定持續荷重, 150 lb/in ²	
		95	等變速増荷重, 90日間: 50~150 lb/in ² に増加す	
			等變速増荷重, 180日間: 50~150 lb/in ² に増加す	
強度及び彈性 (急速載荷)	壓縮	連續	100	材齡 3, 7, 28, 90, 180, 及 365 日に於て試驗
		7	50	材齡 90, 180, 及 365 日に於て試驗
			95	材齡 90, 180, 及 365 日に於て試驗
		28	50	材齡 90, 180, 及 365 日に於て試驗
	95		材齡 90, 180, 及 365 日に於て試驗	
	引張	連續	100	材齡 7, 14, 及 28 日に於て試驗
		7	50	材齡 14, 28, 35, 60, 及 90 日に於て試驗
			95	材齡 14, 28, 35, 60, 及 90 日に於て試驗
		28	50	材齡 60, 90, 120, 150, 及 365 日に於て試驗
			95	材齡 60, 90, 120, 150, 及 365 日に於て試驗

注: 養生室及び貯藏室は凡て定温 70°F (21°C) に保つ。
 試器の数は上記の各條件に對し 3 箇とす。
 急速載荷とは無荷重の後の試器に約 0.05 in/min を速く行ふ材力試験とす。

壓縮クリーブは壓縮に對する有效彈性係數に密接なる關係がある外、自由水及びコロイド水の滲逸 (seepage) と深い關係があり、延いては部材内部の乾燥の進度に顯著なる影響を及ぼす。

2. 研究の目的

本研究の目的は、乾燥によるコンクリートの容積變化並に乾燥收縮に基づく龜裂と密接なる關係を有するクリーブ、伸、引張強度、彈性係數等の諸性質を明白にするため、コンクリートを標準養生後温度 21°C、湿度 50% 及び 95% の空氣中に置ける場合の實驗的研究を行ふて、略々 95% 程度以下の湿度の空氣中に於ては強度及び伸の何れの點より見るも、コンクリート内に於ける逸散性水分の濃度の分布が一樣ならざるか或は部材が全體として自由に收縮し得ざるときは當然龜裂の生ずる所以を解明することに重點を置き、猶ほ併せて本實驗の結果に則

せる龜裂防止に關する見解を披瀝するにある。

1. 實驗の豫定

1925 年以來、米國カリフォルニヤ大學工學部工業材料研究所に於には専門的にコンクリートの容積變化並にクリープに關する廣汎なる實驗的研究が繼續實施され、我々に貴重な文獻¹⁾を提供し來つた。然も猶ほ、本問題に就て更に此の上研究を必要とする重要な事項は限りなく残されてゐる。而して此處に報告する本研究は其の一つを取扱つたものである。

本研究の基礎をなす實驗の梗概は表-1 に示す通りである。

第 2 章 實驗の方法

1. 材 料

本實驗に供せし骨材は河砂及び河砂利であつて、砂及び砂利の混合の割合は、齎等にしてプラスチックなコンクリートを作るため、豫備試験によつて重量比で 48:52 と決定した。此の細粗粒混合骨材の粗粒率は 4.88 にして、骨材は凡て洗滌後使用前迄に充分大氣中で乾燥し、然る後標準篩で篩分け、其等を所定の篩分曲線に従つて再度調合して用ゐた。

セメントは第一編に於ける實驗に使用せしものと同様にして、普通ポルトランドセメントであつた。其の諸性質は既に第一編表-1 に示せる通りである。

2. コンクリート配合の設計

本研究の實驗に供せしコンクリートはスランプを 3 in (約 7.5 cm) とし、粘性に富み且つ施工確實且つ容易なるが如き混合物を得るやう、豫備實驗によりて骨材の粒度、配合比及び水セメント重量比を定めた。而して骨材は第 1 節に於て述べたものを使用し、配合はセメントと細粗粒混合骨材の重量配合比即ち眞實重量配合比が 1:6 にして、又其の水セメント重量比が 0.566 なるものを探つた。此のコンクリートを標準養生し、材齡 28 日に於て試験せしにその壓縮強度は 3750 lb/in² (約 260 kg/cm²) であつた。

各種の引張試験に用ゐし供試體の兩端部に在りては、眞實重量配合比 1:4、水セメント重量比 0.48 なるコンクリートを用ゐ、試験の際供試體がその端部で破壊すること等の不都合がないやうに配慮した。

3. 供試體の選定

コンクリートの荷重による歪を計算するに當り、それに必要な收縮量を測定する所謂基準供試體* (control specimen)、及び壓縮に關する凡ての試験に用ゐたる供試體は 6×12 in (約 15×30 cm) なる標準圓礮であつて、又引張に關する凡ての供試體は 6×33 in (約 15×84 cm) 圓礮であつた。強度及び弾性係数の試験用以外の供試體には、凡てその中央に 10 in (約 25 cm) 標點線を圓周面上軸に並行に 120° の間隔を置いて 3 箇所設けた。

1) Davis, Raymond E., and G. E. Troxell, "Volume Change in Portland Cement Mortars and Concretes," Advance Print of Proc. A. C. I., 1929.

Davis, Raymond E. and Harmer E. Davis, "Flow of Concrete under the Action of Sustained Load," Proc. A. C. I., Vol. 27, 1931, pp. 837~901.

Davis, Raymond E., H. E., Davis, and J. S.* Hamilton, "Plastic Flow of Concrete under Sustained Stress," Proc. A. S. T. M., Vol. 34, Part II, 1934, pp. 334~386.

上記の外未發表の貴重な論文が夥多ある。

* 引合供試體は無載荷供試體と言ふ方がよいかも知れぬ。

標點線は、豫めコンクリート中に埋込みたる眞鍮製の標點栓受に、頭部に變形測定器の標點針の尖端を受ける錐孔を穿てる特殊不銹鋼製の標點栓 (第一編附圖-1 参照) をネジ込みて之に當てた。標點栓は變形測定器の標點針を屢々挿入しても磨損しないやう肌焼を爲したるものを使用した。引張試験に用ひし供試體の兩端部には引張力を加へるに便するため、一端にネジを切り、他端に補強釘を針金にて巻立てたる 椀狀の籠を熔接せる 1in 丸鋼を、その軸が供試體の軸と一致するやうに供試體コンクリート中に埋込んだ。

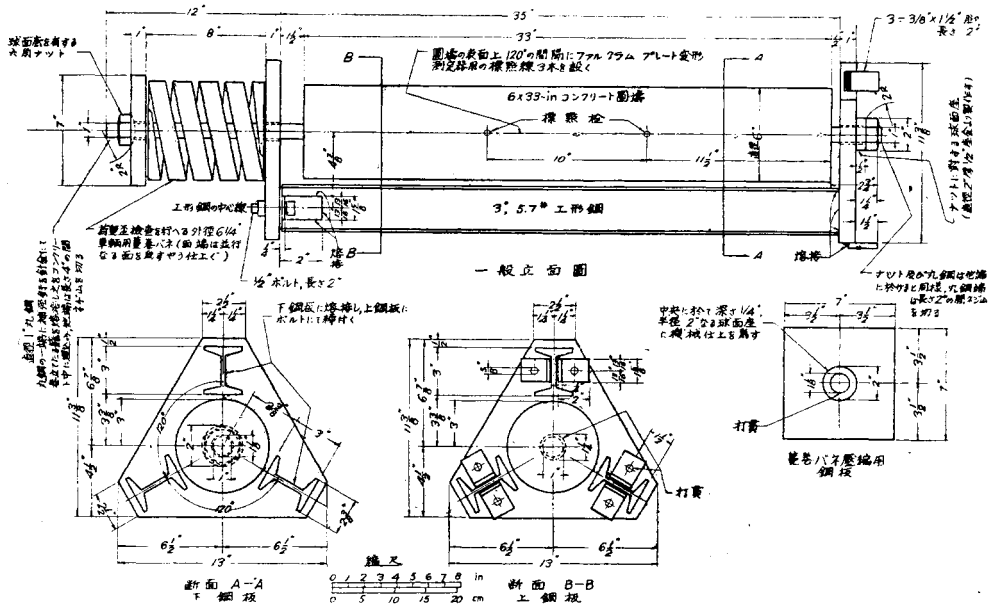
圖-1 (a) は引張クリープ試験装置、圖-1 (b) は壓縮クリープ試験装置にして、何れも供試體を取付けたる状態を示してある。

強度及び彈性係數の試験用供試體には凡て標點栓は之を挿入しなかつた。

4. 供試體の製作

供試體の製作は凡てカリフォルニヤ大學工學部工業材料研究所の標準方法に據つた。供試體の數は各條件に對し 1 組 3 箇とした。而して表-1 に示せるクリープ試験に於ては標準養生及び貯藏の同一條件に對し乾燥による

圖-1 (a). 引張クリープ試験装置



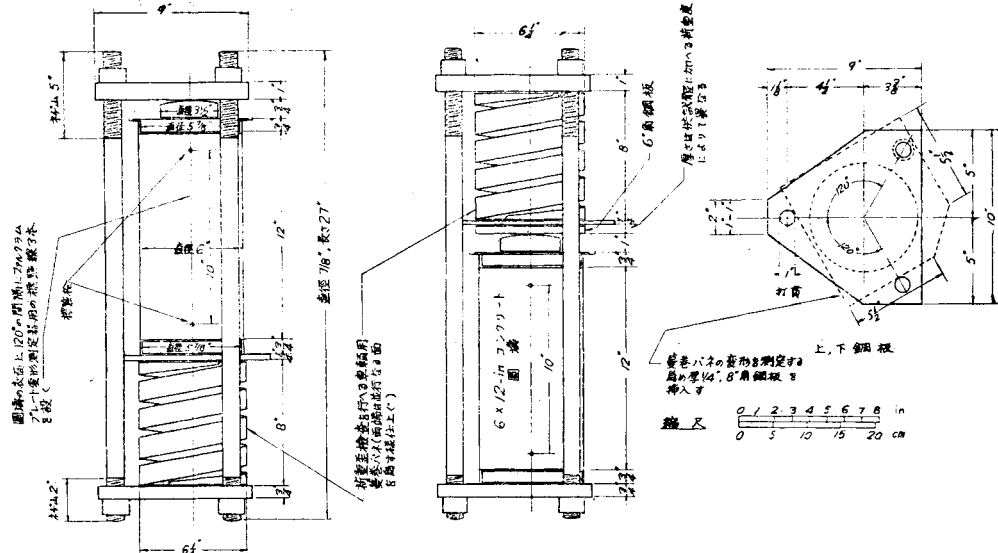
收縮、定持續荷重による壓縮クリープ、定持續荷重による引張クリープの各試験に對して夫々 1 箇、及び延伸能力試験用 2 箇、合計 5 箇の供試體を一時に成形した。強度及び彈性係數の試験に於ては、連續に標準養生せる場合を除き、壓縮及び引張試験何れも、同一材齡の試験用供試體各 1 箇を同時に成形した。

供試體の成形には、豫めパラフィンに浸せる、錫板底を有する纖維板製の圓筒型を使用し、又コンクリートの混合には通稱半切練りの Landcaster 式鉢型ミキサを採用した。

コンクリートを造るには、ミキサにセメントと豫め細粗粒を混合したる骨材を入れ、之を先づ 1 分間空練りをなしたる後、水を加へて更に 3 分間混合するものとす。コンクリートは練上げ後直ちに型に填充する。填充は 6 in (約 15 cm) の層に分ちて行ひ、每層は不撓式棒型振動機を以て締固めた。引張試験用供試體の成形に當つては

先づ下部に既述の籠付 1 in 丸鋼を挿入し、その位置が狂はない様特殊な装置を以て保持しつゝ 10 in (25 cm) だけ 1:4 の富配合のコンクリートを填充したる後、中央部の基準コンクリートを前記の如くして詰め、更に上部

圖-1 (b). 壓縮クリープ試験装置



は下部同様にして富配合のコンクリートを填充した。

6×12 in (約 15×30 cm) 供試體は、型にコンクリートの填充を終りたる後直ちに上面を平滑に仕上げ、其の後型の取外し迄 24 時間濕れる麻布にて覆ひ養生をなした。

5. 養生及び貯藏

コンクリートの填充後 24 時間を経て型を切裂き供試體より剝除した。供試體は型の取外し直後、收縮及び壓縮試験用供試體は其の兩端面に道路用ラッカ*を塗布し、其の他の供試體は脱型せる儘温度 70°F (21°C) にて表-1 に示すやうに次の 4 通りに分ちて保存した。

養 生			貯 藏		
材齡	7 日	迄湿度 100% の室中、	其以後	湿度 95% の室中	
"	7 日	" " "	"	50% "	
"	28 日	" " "	"	95% "	
"	28 日	" " "	"	50% "	

6. 試験の準備

荷重を持続的に加へ置く装置は圖-1 (a) 及び (b) に示せる通りであつて、之が設計に當りては充分なる強度を有すると同時に荷重を均等に供試體に加へ、更に荷重力度の調節が自由に出来るやうに配慮してある。即ち引張クリープ或は延伸能力試験用供試體に使用する框は圖示の通り厚さ 1 in (約 25 mm) なる上下の鋼板を高さ 3 in 重さ 5.7 lb/ft の工形鋼 3 本を以て作り、接手は凡て熔接したものである。又壓縮用供試體に使用する框は厚さ 1 in なる上下の鋼板を單に直径 7/8 in、長さ 27 in なる丸鋼製の長いボルトの引張棒 3 本を以て締付けたもの

* 鋪裝の表面に車線の境界線其の他を書く場合に使用する 1 種の塗料で防濕には可成り有效なるものである。

である。引張用供試體に埋込める籠付 1 in 丸鋼の締付ナットは之に接する鋼板の蓋板と球面接觸をなし、又壓縮用試験に使用する装置に於ては供試體に接して鋼板を置き更にその上に球面を有する支持ブロックを挿入し、是等によつて供試體に均等に荷重が傳はるやう配慮した。荷重は凡て豫め壓縮力と歪との關係を材力試験によりて確めたる鐵道車輛用蔓卷バネを締付けて加へた。

壓縮クリープ試験用供試體の上面仕上げをセメント糊又は硫黃混合物を以て行ふときは、此處に生ずるクリープ度がコンクリートに生ずるクリープ度と異なるため試験の結果に誤差を伴ふ惧あるに鑑み、本研究に於ては供試體は載荷直前その上面を研磨盤にて平滑に仕上げた。斯くして上面仕上げを終りたる後直ちにその兩端面上に特別のアスファルト乳劑を塗布し、以て供試體よりの水分の逸散がなるべく供試體の軸と直角の方向にのみ行はるゝ様にした。

所定期間の標準養生を終りたる後乾燥による收縮、定持續荷重による壓縮及び引張クリープ、並に延伸能力の各試験用供試體を他の貯藏室に移すに先立ち、其等の標點徑受けに標點徑を、時日の経過に伴れ弛まないやう、確かとネヂ込むた。

本研究に於ける供試體は、湿度 100% の標準養生室より取出し之を他の貯藏室に移し所定の試験を開始するに先立ち、壓縮クリープ試験用供試體以外の供試體は凡てその兩端面上にコールタールを塗布し、以て供試體よりの水分の逸散がなるべく供試體の軸と直角の方向にのみ行はるゝやうにした。

7. 載 荷

壓縮及び引張に對するクリープ並に延伸能力の試験用供試體は凡て 3 箇を以て 1 組とせるを以て、載荷の方法は之を一定して變形の觀測の際生ずる誤差を出來得る限り小さくするやう配慮した。又供試體を標準養生室より他の貯藏室に移すに當つては、各供試體の收縮量に違ひがないやう 10 分以内の時間で行つた。載荷に當つては(1) 基準供試體の標點距離を讀み、(2) 未だ載荷せざる供試體の標點距離を讀み、(3) 直ちに供試體に載荷し、(4) 再び基準供試體の標點距離を讀む。斯くすることにより載荷中の乾燥收縮量を知ることが出来る。

引張クリープ及び延伸能力の試験用供試體の載荷は特別なる框に取付けたジャッキを使用して行つた。又壓縮クリープ試験用供試體の載荷は載荷框の引張棒のナットを單に締付ければよい。

引張強度及び引張彈性係数供試體の試験に當つては、其の上下兩端に摩擦獨具 (friction grip) を取付けて試験機にかけた。引張試験中の伸は標點距離が 2 in (約 20 cm) なる伸計を用ゐて測定した。

壓縮強度及び壓縮彈性係数の試験に當つては、試験直前供試體の兩端面の防水塗布工を除き、その上端面は之を硫黃混合物を以てキャッピングをなした。

8. 變形測定の方法

壓縮及び引張クリープ並に延伸能力の試験用供試體或は乾燥による收縮試験用の基準供試體に設けた標點間の距離の測定は 1 萬分の 1 in 讀みのアメス式ダイヤル・ゲージを取付けたるカリフォルニヤ大學型 10 in (約 25 cm) ファルクラム・プレート變形測定器に依つた。此の測定器を用ゐれば見込みで 10 萬分の 1 in まで讀取ることが出来る。長さの基準としてはアンバ鋼 (Invar steel) の標準棒を用ゐた。ダイヤル・ゲージの狂其の他による讀みの誤差を避くるため、測定の数毎にゲージの讀みを標準棒によりて照査した。長さを測居するに當つては、第一に標準棒の標點距離を讀み、次に供試體の標點距離を讀む。

9. 實驗資料の整理

變形測定器の讀みから歪を計算するには先づ供試體の讀みと標準棒の讀みとの差を求める。供試體の或材齡に

於ける基準時よりの全歪を求むるには、其の材齡に於ける上記兩讀みの差から基準時に於ける兩讀みの差を引いた値である。基準時としては便宜上供試體の載荷直前又は直後の何れかに據つた。

斯くして種々の材齡に於ける基準時からの全歪が得らるれば、直角座標の縦座標に全歪を取り、又横座標に基準時よりの日數を取り、各實驗値をグラフに描いて連ねると全歪と荷重の持續日數との關係を明瞭に表すことが出来る。全歪の實驗値としては凡て供試體 3 箇の平均値を採る。

基準供試體には荷重をかけないから、その全歪は乾燥收縮である。載荷せる供試體の全歪と基準供試體の收縮歪とから、クリープを計算する方法は後章で論述する。

第 3 章 實驗の結果及び其の考察

1. 概 説

本章に於ては本研究の實驗結果及び之に對する著者の考察を詳細に記述した。本研究に於ける實驗は 1 種の普通ポルトランドセメントを以つて造れる水セメント重量比 0.566 なるコンクリートに關するもので養生及び貯藏の條件は溫度 70°F (21°C) にて第 2 章第 5 節に記せる如く通りであつた。

本研究に於て行へる實驗は次の 5 項目に就てある。

- (1) 乾燥による收縮
- (2) 壓縮強度及び引張強度
- (3) 壓縮及び引張に對する彈性係數 (ヤング係數)
- (4) 定持續荷重の下の壓縮クリープ及び引張クリープ
- (5) 等變遞増荷重の下の延伸能力

2. 乾燥による收縮

(a) 實驗の結果

本研究の實驗に於ては乾燥による收縮を自生收縮又は溫度の變化による收縮と區別して取扱ふことは出来なかつた。本質的に見て、今日實施されてゐ普通のコンクリートに於ける自生收縮は水分の逸散による收縮に比べて著しく小さく²⁾、又溫度の變化による容積變化は、直徑 6 in (約 15 cm) の左迄大きくない供試體を廣い定溫試驗室に保存して試験する場合には、實際上無視し得る程度のものであるから、本實驗に於けるコンクリートの收縮現象は主として乾燥による水分の逸散に因るものと考へても大した支障はあるまい。

本研究に於て乾燥による收縮或は單に乾燥收縮 (drying shrinkage) と言ふ用語は、本質的に言へば 100% 未滿の濕度の空氣中に於てコンクリートが硬化する場合、凡有る原因に基づく所謂硬化收縮を意味するが、併し既述の如くこの收縮はコンクリート中に含まるゝ水分の逸散による非結合水量の變化に基づく收縮と考へて實際上差支へない。

本實驗は乾燥收縮の現象を明瞭にするため、且つはまたクリープ及び延伸能力を求めるに必要な資料を得るため、無荷重の基準供試體に就て長時間に亙つて行つた長さの變化に關するものである。

本實驗に供せる試験體は 6×12 in (約 15×30 cm) の標準圓筒供試體であつた。供試體よりの水分の逸散が單にその軸と直角の方向にのみ行はれるやうに、供試體の兩端面にはコールタルピッチを 2 回塗布して此處からの

2) Davis, Harmer E., "Autogenous Volume Changes of Concrete," Proc. A. S. T. M., Vol. 40, 1940, pp. 1103~1110.

水分の逸散が行はれないやうに手配した*。收縮量の測定は乾燥期間に對して行つた。

圖-2, 3 は供試體を夫々温度 21°C にて材齡 7 日及び 28 日迄飽和湿度の空氣中に標準養生したる後、之を湿度 95% 及び 50% の試験室に移して貯藏せし場合の供試體の收縮率と乾燥日數との關係を示せるものである。

圖-4 に於ては材齡 7 日及び 28 日迄標準養生したる後湿度 50% の室に貯藏せし場合の收縮率と乾燥日數との關係を何れも對數縮尺で示して置いた。又收縮率と標準養生期間及び貯藏室の空氣湿度との關係、並に同一期間標準養生せし後湿度 50% 及び 95% の貯藏室に保存せし場合の同一材齡に於ける收縮量の比を示したのが表-2 である。

圖-2 及て圖-3 から瞭るやうに、最初の標準養生後空氣に曝せしコンクリート圓壩の收縮歪は空氣が乾燥せる

表-2. 6×12 in (約 15×30 cm) 標準圓壩供試體の平均收縮率と養生及び貯藏條件との關係 (温度 21°C)

(1) 6×12 in コンクリート圓壩供試體の收縮率								
標準養生期間, 又は空氣に曝されし時の材齡, (日)	標準養生後に於ける貯藏中の空氣湿度, (%)	收 縮 率 10 ⁻⁶						
		貯 藏 中 の 乾 燥 期 間 (日)						
		7	14	28	60	90	120	180
7	50	124	216	355	552	649	708	764
7	95	35	52	77	120	147	162	170
28	50	220	328	456	616	713	783	845
28	95	75	90	103	120	132	142	160

(2) 6×12 in コンクリート圓壩供試體を標準養生後湿度 50% 及び 95% の空氣中に貯藏せし場合の收縮率の比

標準養生期間又は空氣に曝されし時の材齡 (日)	湿度 50% の空氣中に於ける收縮率と、湿度 95% の空氣中に於ける收縮率との比							
	貯 藏 中 の 乾 燥 期 間 (日)							
	7	14	28	60	90	120	180	
7	3.5	4.3	4.6	4.6	4.4	4.4	4.5	
28	2.9	3.6	4.4	5.1	5.4	5.5	5.3	
				平均 4.5				
				平均 5.2				

程大にして、又其の増加量は何れの場合を問はず材齡が大きくなるに伴れ減少する。本實驗の結果からコンクリートの乾燥による水分の消失量が大きい程乾燥收縮歪も亦大きいことが言へる。

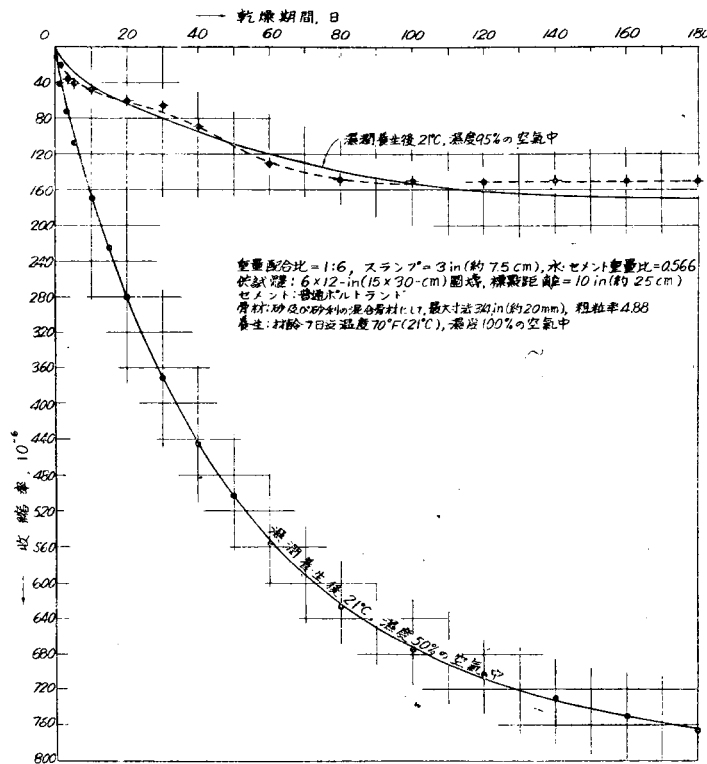
圖-4 に依れば、本實驗の範圍内に於ては、同一湿度の空氣中では最初の標準養生期間が長い程同一期間の乾燥に對する收縮歪が幾分か大きい。之は、興味ある現象にして第一編の小型丸棒及び角棒の實驗結果から考へると

* 著者が 1/2×6 in (約 1.3×15 cm) なるセメント糊丸棒供試體に就て各種の防水塗布工の效力を確めんがため、温度 21°C、湿度 50% の空氣中に於て供試體の全面に塗布液を塗りその收縮量を材齡 1 年迄試験せしに、コーラルピッチを 2 回塗るとによりセメント糊からの水分の逸散は殆んど防止し得ることを確め得た。

一見矛盾のやうにも思はれるが、併し本實驗の直徑 6 in (約 15 cm) の供試體に於てはそのコンクリート中に於ける逸散性コロイド水の量は、最初の標準養生期間が長くなる程減少するも、その反面コロイド水によりて占められる毛細間隙はセメントの加水分解及び水和作用の進展に伴れ漸次小さくなり、従つて同一量の水分の逸散による收縮歪は最初の標準養生期間が特別に長期に互らざる限り養生期間が長い程大きくなると考へれば、上期の現象は必ずしも奇異なものではない。猶ほ又、本實驗に於ける標點径の設定その宜敷を得ざるため、換言すれば標點径の位置及び其の埋込み其の他に就てカリフォルニア大學乃至は米國で普通に標準とされてゐる試験方法に根本的に妥當を缺く點があるため、斯かる現象を呈するとも想像される。何れにしてもこの現象は今後根本的に研究を要する興味ある問題である。

尤も、圖-4又は表-2 に就てよく吟味すると同一乾燥状態の空氣中に貯藏せし場合收縮率に及ぼす最初の標準養

圖-2. 定温度、定湿度の空氣中に於けるコンクリートの收縮歪



生期間の長短の影響は、それが 7~28 日の範囲内では、實際上數量的には大したものではないことが分る。又表-2 から、7~28 日間の標準養生後湿度及 50% 及び 95% の空氣中に貯藏せし場合の同一材齡に於ける夫々の收縮率の比は大略 5 にして、之は貯藏中の空氣の飽差の比の約 1/2 に相當する。是等二つの結果は實用的に見て注意を喚ぶに値する事項である。

(b) 乾燥收縮歪を求むる實驗式

前記實驗の結果から、水分逸散の現象並にそれによる乾燥收縮の理論的考察に資し、或は收縮歪を數理的に取

圖-3. 定温度、定湿度の空氣中に於けるコンクリートの收縮歪

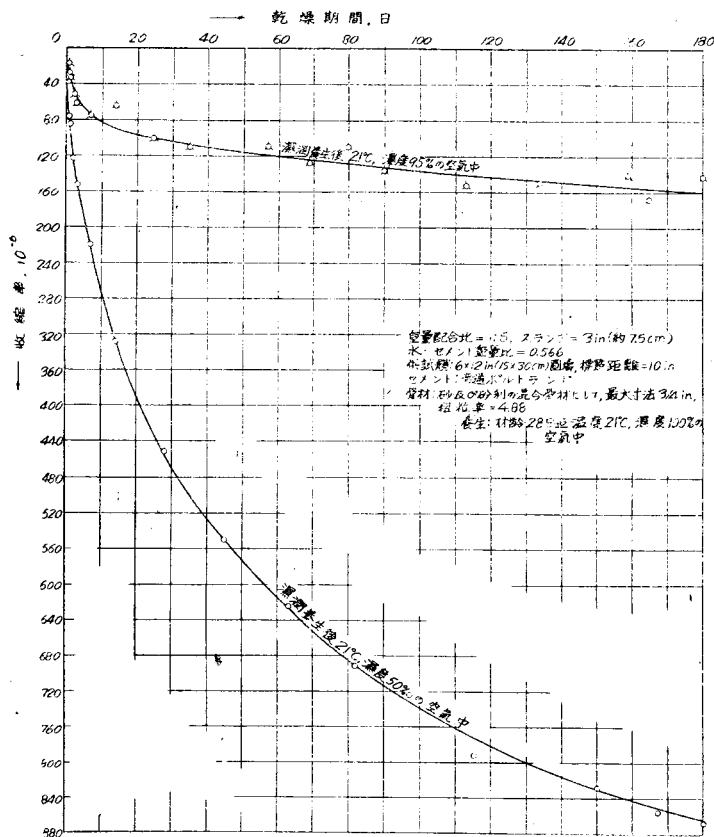
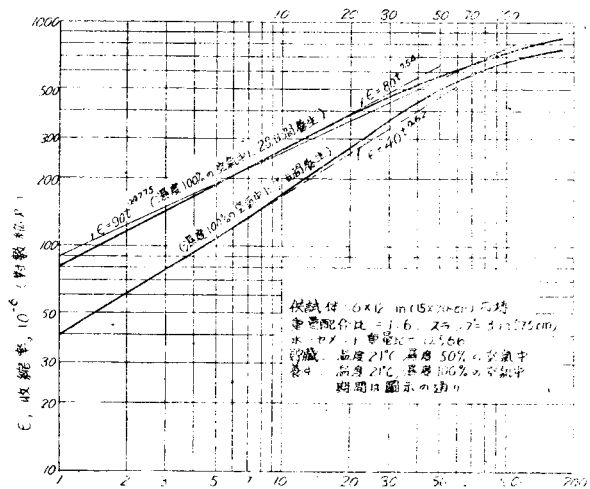


圖-4. 標準養生後温度21°C, 湿度50%の空氣中に置かれたる標準コンクリート圓筒供試體の收縮歪



扱ふ便宜上、湿度 50% の空氣中に保存せし 6×12in (約 15×30 cm) コンクリート圓筒供試體の收縮に關する實驗の結果を公式化して見よう。

圖 4 から判るやうに、乾燥の早期に於ては低湿度 (50%) の空氣中に貯藏せる 6×12in (約 15×30 cm) コンクリート標準圓筒の收縮歪の對數は略々乾燥日數の對數に比例して増加する。此の事實から、乾燥による收縮歪は乾燥期間の冪函數にて示し得ることが言へる。

7 日及び 28 日間の標準養生後直ちに溫度 21°C、湿度 50% の比較的乾燥せる空氣中に貯藏せる 6×12in コンクリート圓筒に關する前記實驗の結果を公式化すれば、次に示す諸冪公式による計算値が實測値とよく一致することを知り得た。即ち、

材齡 28 日迄湿度 100% の室に標準養生せし場合には、

$$\epsilon = 80 t^{0.51} \dots \dots \dots (1)$$

なる式が乾燥の早期に於ては最も實驗値に近い値を與へ、又乾燥 6 ヶ月間に就て言へば、

$$\epsilon = 90 t^{0.4775} \dots \dots \dots (2)$$

なる式が總體的に實驗値に近い値を示すことが判る。上式に於て

$$\epsilon: \text{收縮率 (10}^{-6}\text{)}, \quad t: \text{乾燥期間 (日)}$$

材齡 7 日迄湿度 100% の室に標準養生せし場合には、

$$\epsilon = 40 t^{0.62} \dots \dots \dots (3)$$

なる式が與へる値は、乾燥期間が 6 ヶ月迄は、略々實驗の結果と一致する。

圖 4 には上記 3 公式の計算値をも圖示してある。圖から判る様に乾燥の早期即ち乾燥日數約 50 日迄は (1) 及び (3) 式による計算値は夫々實驗の結果と實際上一致する。是等の式は次の (c) に於て述べる理論公式から誘導せし近似式 (f) と同形である。猶ほ、極めて近似的に收縮量と乾燥期間との關係を現すには、

$$\epsilon = \alpha \sqrt{t} \dots \dots \dots (4)$$

茲に α : 實驗定數

なる式を用る得よう。此の式は (c) に於て述べる (g) 式と同形である。

(c) 非結合水の逸散に因るセメント糊、モルタル及びコンクリートの乾燥收縮に關する數理物理學的私見

(i) 硬化せるセメント糊、モルタル及びコンクリート中の非結合水の逸散と之に基づく乾燥收縮

セメント糊乃至はコンクリートの乾燥による水分逸散の現象並に其の逸散に基づく乾燥收縮の理論に關しては、從來多くの研究者によりて物理學的に或は化學的に検討され、種々の學説が提唱せられて來たが、而も猶ほ未だ定説と認むべきものに到達し居らざるものゝ如く、又其等の諸説は必ずしも理論的に一致してゐない。之は本問題の性質上實にやむを得ないことである。

歸納的に見て、セメント糊乃至コンクリートの收縮は、硬化現象の進行に伴ふ、自生收縮並に水和熱の影響もあらうが、普通の大さの部材に於ては主として其等の中に包含される非結合水即ち自由水及びコロイド水の消失によることは否み難い事實である。理論的に考察すれば、硬化せるセメント糊乃至コンクリート中の水分の消失は、擴散及び蒸發乃至は放散 (負吸着, negative adsorption) の理論を應用して解決が出来るやうにも思はれる。併しながら、凝固せるセメント糊の構造は甚だ複雑であり、それが膠質、ゲル (凝膠, Gel), 結晶及び自由水から成

次の頁註: 3) Freissinet. E.: "Principle of a Theory of Shrinkage," Annales des Ponts et Claussées, May-June, 1932 (Translated by Lt. Comdr. Ben Moreell).

り、從つてその材質は均等性を缺き、爲めに上記理論の適用は一見非常に難しいが、或程度の假定が實際上許容されるならば、敘上の企は必ずしも不可能ではなからう。例へば、佛國の E. Freissinet 氏³⁾は凝固せるセメント糊を偽固体 (pseudo-solid) と考へ、之を固体、液體及びガス體から成るものと考へた、而してセメントの凝固の初期に於ては、密度の小なる微分子 (corpuscles) が生じ、之が互に接觸し、硬化の進展に伴ひ益々微分子が發生して相互に集結し、遂に夫等が互に纏がり合つて茲に蜂窩狀の組織を形成することを主張した。猶ほ、同氏はセメント糊中の非結合水を毛管水と考へ、Lord Kelvin の熱力學理論を適用して水分の逸散理論を樹て、又それに基づく收縮の理論は弾性理論を應用して之を誘導してゐるが、この理論の實驗的檢討は何等加へられてゐない。又米國ポルトランドセメント聯合會の T. C. Power 氏⁴⁾は、上記 Freissinet 氏の理論を承認し注意深く之を應用して、セメント糊中の相對蒸氣壓と水分の逸散量及び非結合水の濃度との關係を論じてゐる。

元來、セメント糊乃至はコンクリート中の非結合水の濃度分布は甚だ複雑で、物理化學特に Kapillarchemie の發達見るべきものある今日に於ても、この濃度分布に關しては未だ定説に達してゐない。而して既往の文獻を檢するに、木材中の水分逸散現象の數理論的取扱に就ては、Lord Kelvin の熱力學理論が應用されてゐるのを散見する。又多くの膠質化學專攻學者の手によつて、珪酸ゲルの容積變化の問題の解決に當つても Lord Kelvin の理論が引用されてゐる。猶ほ、粗鬆なる固体による凝結性蒸氣の吸着、白土の吸着或は軟ガラス中の毛管水の蒸氣壓等に關する既往の實驗的或は理論的研究に就て檢討するに、セメント糊又は之に類似の材料に於ける水分の逸散に關する現象は Lord Kelvin の熱力學理論を應用して説明し得る場合が多いやうであるが、又その反面説明に困難なることも尠くない。

既述の如く、セメント糊乃至はコンクリートの組織は甚だ複雑であり、且つ水分の逸散なる消失現象が明瞭を缺くの故を以て、其等の水分逸散の現象を簡單なる理論で片付けることは相當の難點が存する。併しながら、應用科學の部門に屬する工學の領域に於ては、セメント糊乃至はコンクリートよりの乾燥による水分の消失を假りに逸散なる單一現象と看做し、この現象を單一理論で説明し得るやう近似的の取扱を爲すことが許容されるならば、斯くして得たる理論は實際應用上甚だ便利である。尤も斯く取扱ふことの當否は精確且つ妥當適切な實驗的研究によりて檢討さるべきである。著者は敘上の實用的見地に立ち、實驗の結果に則したるセメント糊乃至はコンクリートの水分逸散理論の樹立を試み、更に乾燥による水分の逸散に基づく收縮理論をも假に提唱して本問題の概念的解決に資したいと思ふ。

(ii) 非結合水の逸散理論

既述の如く、硬化せるセメント糊乃至はコンクリートの乾燥による水分の消失を逸散なる單一現象と看做し得るとせば、之は次の三つの理論から説明することが出來よう。即ち、

- (1) ガス體の空中に於ける擴散に基づく理論、即ち濕分の空中に於ける擴散に關する理論
- (2) 毛管説に基づく逸散理論、
- (3) 逸散性水分の物體内に於ける擴散の理論、即ち熱傳導説に類似の理論、

の三つの理論によりて乾燥による水分逸散の現象を數理的に處理し得られる筈である。所が之が實際上の取扱ひはなかなか簡單には行かぬ。即ち、硬化せるセメント糊乃至はコンクリートの組織が甚だ複雑して居り、更に部材又は供試體の表面條件並に其等の置かれる場所の空氣の状態が明瞭を缺く點が多いから、(1) のガス體の空氣中

4) Powers, T. C.: "Preliminary Report on a Study of the Capillarity of Hardened Portland Cement-Series 245," Appendix 9, Semi-Annual Report of Research Lab., P.C.A. (Oct. 1935).

に於ける擴散理論を應用して逸散現象を説明するには、種々の假定を必要とし、又理論の實用價值を判斷すべき準據となる實驗的研究が困難なる嫌がある。

次に(2)の毛管説に基づく逸散理論の樹立は、硬化せるセメント糊乃至はコンクリート中に於ける非結合水の占める間隙を毛管と看做し、その分布を實驗的根據から想定することが出来れば、Lord Kelvinの熱力學理論を應用することにより近似的には成功するであらう。著者はセメント糊の場合に就て研究を進め、此の理論によりてセメント糊からの水分の逸散現象を説明することは、歸納的に見て決して不可能ではないことを確むることを得たが、併し之には實驗的照査に當り種々の困難が存する。従つてコンクリートに此の説を適用することは實用上不便が尠くない。

最後に、(3)の逸散性非結合水分の物體內に於ける擴散の理論を應用して硬化せるセメント糊乃至はコンクリートの水分逸散現象を説明することは、結果がら言つて實驗的照査が割合に簡單であり、又實用上の數理的取扱が容易である。既に F. Tuttle 氏⁵⁾は木材の乾燥現象を此の理論を用ゐて説明してゐる。更に、著者の研究と相前後して、本理論を適用して、H. E. Schwiете及び H. zur Strassen 兩氏⁶⁾は軟練モルタルの水分逸散による收縮現象を、又 R. W. Carlson 教授⁷⁾はコンクリートの乾燥收縮の現象を説明してゐる。尤も是等の論文の何れに於ても、定量的に實驗的研究檢討が加へられて居らない。

上述の3説の中、コンクリートの乾燥による水分逸散の極く初期に於ては(2)の毛管説がよく適合し、又水分逸散の極く初期を除き其以後に於ては(3)の擴散理論の適用が妥當であり又便利であることが言へるものと思ふ。著者の實驗的研究に依れば、水セメント重量比 0.30~0.60 なるセメント糊を以て作れる直徑 5~15 cm なる標準圓壩を材齡 7~28 日迄標準養生し、その後直ちにその上下端面にアスファルト塗布工を施し、之を溫度約 21°C、濕度約 90% の空氣中に保存せしに、水分の逸散が初まつてから概ね 3, 4 日乃至 10 日内外にして圓周面上に龜裂が生じ、その後龜裂は漸次大きくなり、次で或る期間を經過すれば却つて縮まることが確認された。而して數週間の乾燥後供試體をその軸に直角に割つてその破面を觀察せしに、逸散を非結合水分の濃度が圓周附近で著しく低く内部に進む程多いことが、破面の色が帯綠灰白色から漸次帯綠灰黒色に變化して居ることによつて如實に示されてゐた。然るに約 14 年間水中養生せし水セメント重量比 0.30 なるセメント糊の 15×30 cm 圓壩供試體を溫度約 21°C、濕度約 50% の試験室内で約 3 ヶ月間自然乾燥せしめ、又其の後も同室内に繼續保存せしに既に 1 年以上を經過せる今日未だ一本の毛狀龜裂をも認めない。彼上の如き事實もあり、猶ほ更コンクリートはセメント糊と細粗粒混合の骨材から成る複雑な組織をなすものであるから、供試體たると部材たるとを問はず、如何なる條件の下にても當嵌るやうな一般的な水分逸散理論の樹立は不可能に近いことは明白である。併しながら材齡 1~4 週迄標準養生し、其の後定温定濕の空氣中に貯養せる場合の普通コンクリートの特定供試體或は部材の乾燥現象は、その極めて初期を除きコンクリート中のセメントの化學變化が事實上完了する迄の間に於ては、2, 3 の合理的假定を爲すことにより、水分の物體內に於ける擴散理論を應用して數理論的に取扱ひ得るであらうことは、理論上は或は妥當性を缺く譏もあらうが、實際上は、著者の研究から檢討して、必ずしも不可能ではなからう。

5) Tuttle, Fordyce: "A Mathematical Theory of the Drying of Wood," Jour. of Franklin Institute, 200, pp. 609-614.

6) Schwiете, H. E. und H. zur Strassen: "Ueber Schwindung und die Wasserabgabe von Zement," Zement, 27, 1938, S. 769 und 788.

7) Carlson, Roy W., "Drying Shrinkage of Large Concrete Members," Proc. A. C. I., Vol. 33, 1937, pp. 327~336.

(iii) 粗鬆なる固體内に於ける逸散性水分の擴散理論*

セメント糊乃至はコンクリート片の各部に於ける水分即ち非結合水分の濃度が異なるときは、水分は濕れる部分から乾ける部分に向つて移動する。今、セメント糊乃至はコンクリートが齎等なる組織から成り、セメント糊乃至はコンクリート中の微細直六面體の 1 面に對し直角に移動する速さが移動の方向に於ける水分勾配に正比例するものと考へ得るときは、セメント糊乃至はコンクリートの水分の逸散を、物體内に於ける熱傳導の場合に準じて物體内に於ける擴散現象と看做すことが出来る。然らば、擴散する物質の濃度即ち逸散性水分を以て熱傳導のときの温度に置換へるときは、水分逸散の一般微分方程式は次の如くなる。

直角座標に對しては、

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = a \left\{ \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} \right\}, \dots\dots\dots (a)$$

圓柱座標に對しては、

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = a \left\{ \frac{\partial^2 \theta}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \theta}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \theta}{\partial \phi^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} \right\}, \dots\dots\dots (b)$$

茲に θ : 逸散性水分濃度 (moisture concentration),

t : 時 間,

a : 水分傳播率† (thermo-hygrometric or hygral diffusivity, moisture diffusion constant).

θ , t 及び a の實用單位は、夫々、物體の單位容積中の逸散性水分の容積比 (容積含水率)、日及び $\text{ft}^2/\text{日}$ 、(又は $\text{cm}^2/\text{日}$) で示すが便利である。

猶ほ、粗鬆なる物體内に於ける逸散性水分が水蒸氣となりて物體内の空隙を擴散するものとし、空隙内の水蒸氣の濃度を ρ を以て示すときは (a) 又は (b) 式と同型の式を得る。而して ρ と θ の一次代數式で表はし得るものと考へるときは近似的に (a) 又は (b) 式が得られる。

普通我々が遭遇するコンクリート及び鐵筋コンクリート部材又は構造物或はセメント糊乃至はコンクリートの供試體に於ては、多くは複對稱軸を有する斷面を持ち、又材質が齎等であり且つ水分の逸散が部材或は供試體の軸と直角の方向にのみ行はれるものと近似的に考へ得るにより、(a) 及び (b) 式の特解は容易に解決せられる。今、圓壩供試體に於てその兩端面に防水塗布工を施し水分逸散の方向を供試體の軸と直角の方向のみに制限せる場合には、(b) 式は

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = a \left\{ \frac{\partial^2 \theta}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \theta}{\partial r} \right\}, \dots\dots\dots (c)$$

となる。此の式に於て、供試體又は部材の圓周面上の逸散性水分の濃度を 0 と考へ得るときは、(c) 式の解は次式で示される。

* 本理論は 1935~1936 年に於ける 1/2×6 in 丸棒 (セメント糊及びモルタル)、1 1/2×1 1/2×12 in 角棒 (セメント糊、モルタル及びコンクリート) 及び 6×12 in コンクリート圓壩の 3 種類の供試體を標準養生後温度 21°C、湿度 50% の試験室 (室の容積略々 200 m³) に保存して行へる實驗の結果から歸納的に誘導せしものにして、其の大意は既に日本ポルトランドセメント業技術會報告第 25 號第 14 册、昭和 14 年 (1939) 11 月、に未定稿のまま發表し、其の後更に検討を加へ昭和 16 年 (1941) 英文にて書き上げたも、猶ほ、今後の研究に待つべき夥多の事項が殘されてゐる。従つて、著者は本理論を今直ちに實用に供することを強いて主張するものではない。これ本研究に於て本項を私見として取換へる所以である。

† 濕分擴散率と言つてもよからう。

$$\theta = \theta_c \sum_{k=1}^{\infty} \frac{2}{\mu_k} \frac{J_0\left(\mu_k \frac{r}{R}\right)}{J_1(\mu_k)} e^{-\mu_k^2 \frac{at}{R^2}}, \dots\dots\dots (d)$$

及び $\frac{Q}{(W_0)} = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{4}{\mu_k^2} \left(1 - e^{-\mu_k^2 \frac{at}{R^2}}\right),$

又は $\frac{Q}{(W_0)} = 1 - \sum_{k=1}^{\infty} \frac{4}{\mu_k^2} e^{-\mu_k^2 \frac{at}{R^2}},$ } $\dots\dots\dots (e)^*$

茲に R : 與へられたる圓柱の半徑 (cm)

θ_c : 全逸散性水分の濃度,

Q : 柱の單位長さに對する乾燥開始後 t 日に逸散せる水分の量 (cm³)

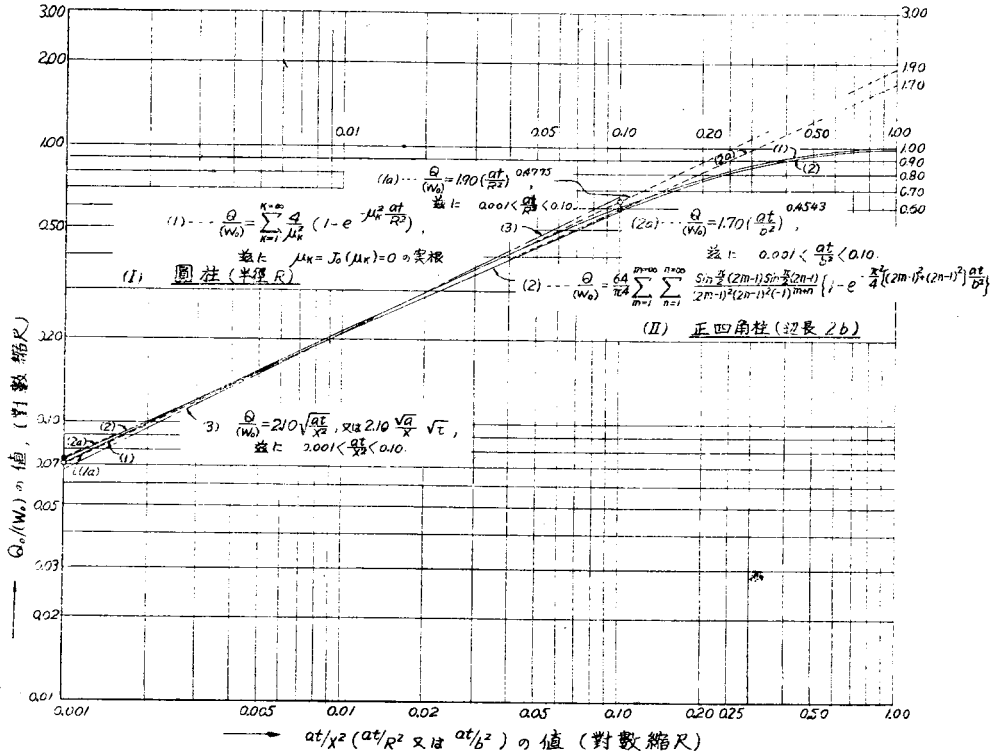
(W_0) : 柱の單位長さに含まるゝ全逸散性水分の量 (cm³)

$Q/(W_0)$: 乾燥開始後 t 日に於ける乾燥率 (水分逸散比),

J_0 , 及び J_1 : 0 次及び第 1 次第 1 種 Bessel 函數.

k : 1~∞ の正の整數, 或は $J_0(\mu_k)=0$ の正根の 0 の番數,

圖-5. $Q/(W_0)$ と at/X^2 との關係



* 數値計算に當つては、下式を用ゐた方が便利である。上式より下式を誘導するに當つては、 $\sum_{k=1}^{\infty} \frac{4}{\mu_k^2} = 1$ なることを證明することを要する。之は容易で、任意の函數 $f(x)$ を $0 < x < 1$ の變域に於て $CI_0(\mu_k x)$ の級數に展開し、 $J_0(\mu_k x)$ の係數 C を直交條件より Lommel の積分定理を應用して求め、次に特に $f(x)=1$ と置いて計算を進めればよい。

μ_k : $J_0(\mu_k)=0$ の k 番目の正根,

a : 水分傳播率 (濕分擴散率), (cm²/日)

(e) 式は Bessel 函數を含んでゐるから計算に手數がかかる。依つて $Q/(W_0)$ の値を at/R^2 の種々なる値に對して計算し、之を圖表に示して置けば計算上便宜が多い。圖-5 は是等の關係を對數縮尺を以て示したものである。此の操作に當り、 at/R^2 が 0.001~1.00 の變域に於て 0 次第 1 種 Bessel 函數の根を 20 番までとつて計算してもなほ $Q/(W_0)$ の値は約 0.02 だけ眞値より小さい。依つて圖-5 を畫くに際してはその點を考慮して充分精確なる計算を行つた。

猶ほ、圖-5 から判るやうに (e) 式は次の簡單なる冪公式で示しても實用上は大した支障はない。

$$\left. \begin{aligned} \frac{Q}{(W_0)} &= 1.90 \left(\frac{at}{R^2} \right)^{0.4775} \\ \text{茲に} \quad 0.001 &< \frac{at}{R^2} < 0.100 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (f)$$

更に計算の簡易化を目的とする場合には、近似的ではあるが、次式によつてよい。

$$\left. \begin{aligned} \frac{Q}{(W_0)} &= 2.10 \sqrt{\frac{a}{R}} \sqrt{t}; \\ \text{茲に} \quad 0.001 &< \frac{at}{R^2} < 0.100 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (g)$$

(g) 式は正四角柱の場合にも略々成立する。よつて、コンクリート圓柱又は正四角柱の長さが長い或はそれからの水分の逸散がその軸と直角の方向にのみ行はれる場合には、柱の乾燥度即ち水分逸散比は乾燥時間の平方根に比例することが近似的に言へる。

圖-5 には圓柱との比較のため正四角柱に對する乾燥度と at/R^2 の關係をも示して置いた。

(iv) セメント糊, モルタル及びコンクリート内の非結合水の逸散による乾燥收縮

既述の如く、セメント糊乃至はコンクリートを以て造れる供試體或は部材を乾燥せる空氣中に曝すときは、時間の経過に伴れ水分が逸散し、物體内に於ける逸散性水分の濃度分布が一樣でなくなる。従つて茲に收縮歪を伴ひ延ては固有元應力を生じ、遂には逸散平衡即ち逸散性水分が全く消失し盡して定常状態に達する。今圓柱に就て考ふるに、全體として軸方向の伸縮が自由であり、然も水分の逸散に對する兩端面の影響がなければ、柱の中央附近では柱軸に直角なりし斷面は收縮もなほ軸に直角なる平面の爲すものと考へ得べく、更に物體が彈性體として取扱ひ得るものと假定すれば、彈性理論を應用して理論的に收縮率と乾燥率との關係を求むることが出来る。即ち

$$\frac{\partial w}{\partial z} = \epsilon_z + \beta \delta, \dots\dots\dots (h)$$

及び
$$E_c = \sigma_z - \frac{\sigma_t + \sigma_r}{m}, \dots\dots\dots (i)$$

- 茲に w : 或點の z 軸方向の變位,
- ϵ_z : z 軸方向の收縮應力度 σ_z による歪度,
- $\delta = \theta - \theta_c$: 逸散性水分濃度の變化 (常に負數),
- σ_t 及び σ_r : 夫々圓形斷面に於ける接線及び半徑方向の收縮應力度,
- E_c' : 物體の有效彈性係數, m : Poisson 數,

$\beta = \beta_0 / \theta_0$: 收縮係數, β_0 : 極限收縮率, θ_0 : 全逸散性水分の濃度

次に靜力學の理論から,

$$\frac{\partial w}{\partial z} \int_0^R r dr = \int_0^R \beta \theta r dr, \quad \text{及び} \quad \frac{\partial w}{\partial z} = -\beta_0 \frac{Q}{(W_0)},$$

なる關係が成立つ。今、上式に於て $\partial w / \partial z$ を ϵ を以て置換へると次式を得る。

$$\epsilon = -\beta_0 \frac{Q}{(W_0)} \dots \dots \dots (j)$$

上式に於て (-) は收縮を意味する。長い正四角柱の場合に於ても (j) 式と同様の關係が成立する。

彼上の數理論的考察から判斷するときは、普通の複對稱斷面を有するコンクリート柱の水分逸散による乾燥收縮は、その彈性係數及び Poisson 數を夫々定數と考へ得る場合に於ては、その乾燥度に正比例することとなる。

(v) セメント糊乃至はコンクリート圓嚢に生ずる乾燥收縮による固有元應力

水分逸散が閉まつてから停止する迄の不定常乾燥状態の下では、圓嚢内に於ける逸散性水分の不齊等分布に基因して茲に收縮應力が生ずる。斯かる應力を乾燥による固有元應力と稱する。今セメント糊乃至はコンクリートに於ける水分の逸散が嚢軸と直角なる方向にのみ行はれる場合、嚢軸に直角なる斷面が收縮後もやはり嚢軸に直角なる平面を爲すものと考へることが出來、又圓嚢の彈性係數及び Poisson 比が夫々定數であると假定し得るならば、乾燥に基因して圓嚢内に生ずる半徑方向、圓周の接線方向、及び軸方向の各應力度は次の (k) 式から求められる。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r &= \frac{2mE_c'\beta_0}{m-1} \sum_{k=1}^{\infty} e^{-\mu_k^2 \frac{at}{R^2}} \left\{ \frac{1}{\mu_k^2} - \frac{1}{\mu_k^2} \frac{R}{r} \frac{J_1\left(\mu_k \frac{r}{R}\right)}{J_1(\mu_k)} \right\}, \\ \sigma_\theta &= \frac{2mE_c'\beta_0}{m-1} \sum_{k=1}^{\infty} e^{-\mu_k^2 \frac{at}{R^2}} \left\{ \frac{1}{\mu_k^2} + \frac{1}{\mu_k^2} \frac{R}{r} \frac{J_1\left(\mu_k \frac{r}{R}\right)}{J_1(\mu_k)} - \frac{J_0\left(\mu_k \frac{r}{R}\right)}{\mu_k J_1(\mu_k)} \right\}, \\ \sigma_z &= \frac{2mE_c'\beta_0}{m-1} \sum_{k=1}^{\infty} e^{-\mu_k^2 \frac{at}{R^2}} \left\{ \frac{2}{\mu_k^2} - \frac{J_0\left(\mu_k \frac{r}{R}\right)}{\mu_k J_1(\mu_k)} \right\}, \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (k)^*$$

茲に σ_r : 半徑方向收縮應力度, σ_θ : 接線方向收縮應力度,
 σ_z : 軸方向收縮應力度.

上式から判るやうに、軸方向及び接線方向の 2 應力は圓嚢の圓周面附近では引張性であり、又その内部では壓縮性である。又半徑方向の應力は常に壓縮性である。従つて收縮龜裂は圓周面近くに限られ、又半徑方向及び軸方向の壓縮應力の作用と圓周面附近の乾燥のため、圓嚢内部の非結合水は半徑の方向に外方に向つて滲逸することを強いられることとなる。猶ほ、是等の應力は乾燥が平衡状態に達すれば消滅するものである。

(d) 乾燥收縮に擴散理論を應用するの可否

前掲の圖-2, 圖-3, 及び圖-4 から判るやうに、本研究に使用せし水セメント重量比 0.566, 眞實重量配合比 1:6 なるコンクリートを以て作れる 6×12 in (約 15×30 cm) 圓嚢供試體を 21°C にて最初の 7 日及び 23 日間標準養生し、其以後湿度 50% の空氣中に貯藏せし場合の極限收縮率は之を夫々 100 萬分の 800 及び 1000 と看

* 乾燥による元應力は、圓嚢の中央部では此等の式から求め得るが、兩端面に近づくに伴て其の絶対値が減減して行くことは言ふ迄もない。

做し得る。

今前項に於て論述したる水分逸散による收縮に関する數理論を實驗によりて検討するため、水分傳播率を7日及び28日間標準養生しその後湿度50%の空氣中に貯藏せしときの1:6コンクリート供試體に對し夫々0.12及び0.10 cm²/日と看做して求めた收縮歪と、本研究に於ける實驗値とを比較對照すれば表-3の如くである。

表-3. コンクリート標準圓筒供試體を標準養生後湿度50%の空氣中に貯藏せる場合の平均收縮歪

供試體-6×12 in (約15×30 cm) 圓筒, 標點距離=10 in (約25 cm), 重量配合比=1:6, 水セメント重量比=0.566, セメント-普通ポルトランド, 骨材-地方産の砂及び砂利, 細粗混合骨材の粗粒率=4.88, 溫度-70°F (21°C) の定温

標準養生期間, 又は空氣に 曝されし時の材齡 (日)	乾燥期間 (日)	乾燥率 (Q/W ₀) 計 算 値	收 縮 歪 度 (ε), 10 ⁻⁶	
			計 算 値	實 驗 値
7	10	0.300	255	170
7	50	0.610	519	500
7	100	0.790	672	675
7	150	0.890	757	740
28	10	0.275	275	270
28	50	0.570	570	585
28	100	0.740	740	740
28	150	0.830	830	830

表-3によれば、直徑6 in (約15 cm) 程度の供試體の收縮歪度は、供試體コンクリートの極限收縮歪度並にコンクリートの水分傳播率の値が知られてゐるときは、前項(e)に於て論述せし數理論を適用して計算によつて近似的に求むることが出来ることとなる。即ち定性的に考へるときは、コンクリートに於ける水分逸散の現象は擴散理論を應用し、又乾燥收縮は更に彈性論を應用して、本研究の範圍内に於ては近似的に、少くとも概念的には解決し得べきものと思はれる。

(e) 鐵筋コンクリート工に普通使用されるコンクリートの水分傳播率の値

1 1/2 × 1 1/2 × 12 in (約3.8 × 3.8 × 30 cm) 角棒供試體に就て行へる著者の實驗的研究⁸⁾によれば、水セメント重量比0.56, 眞實重量配合比1:5.6なるコンクリートを21°Cにて7~28日間標準養生したる後湿度50%の空氣中に貯藏せる場合の水分傳播率αの値は、大凡そ、乾燥の早期に於ては0.10 cm²/日なる値を示し其の後漸次小さくなり、遂には乾燥期間が100日を超へるに至れば0.01 cm²/日以下の値となることが瞭つた。之に對して本編に於て行へる6×12 in (約15×30 cm) 圓筒の實驗に依れば、水セメント重量比0.566, 配合1:6なるコンクリートの水分傳播率の値は、角棒の場合と同様な養生及び貯藏の條件の下に於て、乾燥期間の極初期即ち數日を除きそれ以後約半年に就て言へば略一定にして、約0.10 cm²/日を示した。此の値はR. W. Carlson 教授⁹⁾が私案として提唱せる0.0001 ft²/日なる値と偶然にも殆んど一致してゐる。

8) 拙著: “水分の逸散に因るコンクリートの收縮理論に関する私見並に其の應用的數例,” 日本ポルトランドセメント業技術會報告第25號第14冊, 昭和14年(1939)11月, pp. 147~172 參照

9) Carlson, Roy W.,: “Drying Shrinkage of Large Concrete Members,” Proc. A.C.I., Vol. 33, 1937, pp. 327~336.

以上述べたる所から推論するに、普通の鉄筋コンクリート工に用ゐられるコンクリートに關しては、平均温度が 20°C 内外にて湿度が 70~50% 程度の條件の地方に於ては、その水分傳播率の値として 0.10 cm²/日を採用せば妥當且つ安全の様と思はれる。併しカリフォルニア大學で行へる大型の試供體に就ての實驗の結果(未發表)に依れば本問題に關し猶ほ考究を要すべき多くの疑問の點が残されてゐる。従つて、水分傳播率に關する適確なる數値(少くとも實用的に價値ある値)を得るには、今後實驗室及び現場に於ける定量的の大規模の實驗に俟つよりほか途はなからう。

(f) 乾燥によるコンクリート圓嚢内の逸散性水分濃度分布並に收縮應力の數理論的近似解法

圖-6 は水分傳播率が 0.10 cm²/日なるコンクリートを以て造れる半徑 3 in (7.62 cm) の圓嚢に於ける逸散性水分濃度の分布状態、並に非結合水の消失による軸方向、半徑方向及び接線方向の各種應力の値を著者の提唱せる理論を用ひて計算せる數例を示せるものである。即ち圖-6 (a) は乾燥期間 95 日迄に至る間の水分濃度分布状態の變遷を示せるものである。圖から想像される如く、此の場合乾燥が柱の中心部に及ぶには 1ヶ月以上を要する。圖-6 (b) は乾燥期間 95 日迄に至る軸方向收縮應力の分布状態が如何に變化して行くかを示せるものにして、之

圖-6 (a). 逸散性水分濃度の分布

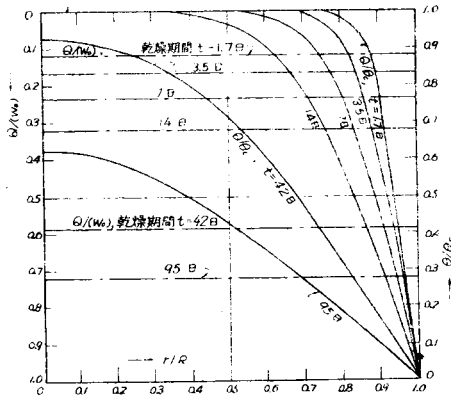
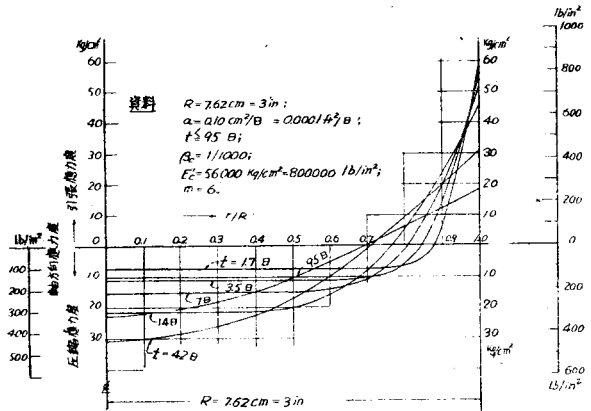


圖-6 (b). 非結合水の消失による軸方向收縮應力

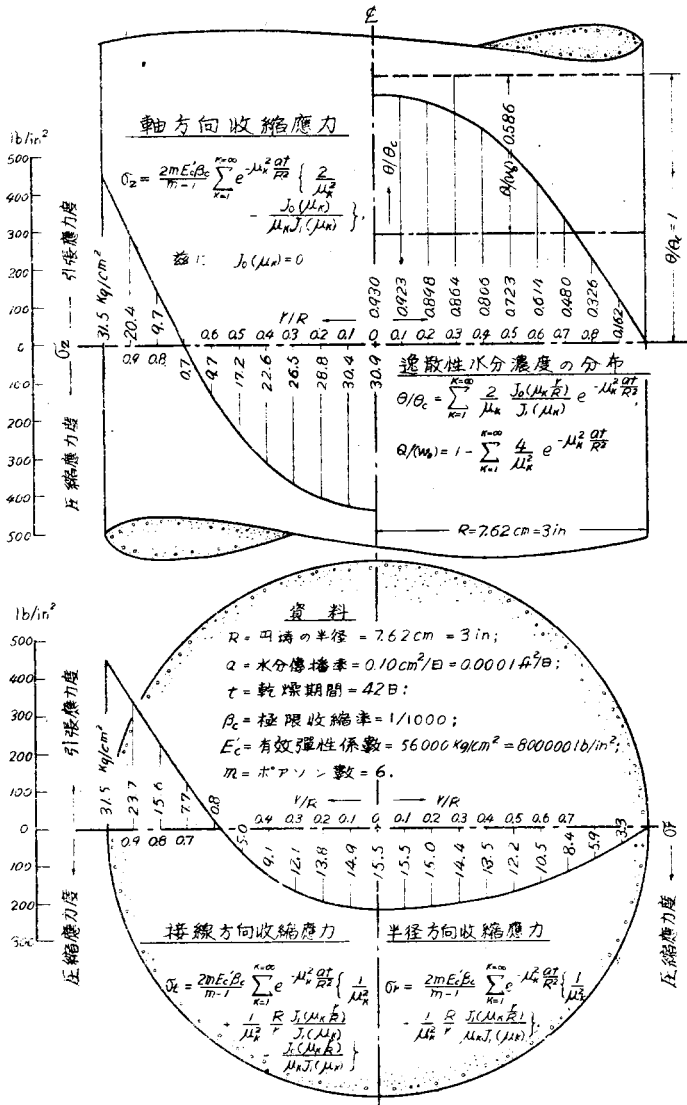


から分るやうに、嚢軸附近の内部に生ずる軸方向收縮壓縮應力の値は或時期(乾燥約 2ヶ月)迄は乾燥時間の経過に伴ひ漸次増加するが、其以後に於ては上記と反對に却つて減少し遂には消滅する。之に對し、嚢の圓周面上及びそれに極めて接近せる部分に於ける軸方向收縮引張應力は乾燥の頭初に於て最大で、それ以後その値は漸減する。又圖-6 (c) は乾燥 42 日目に於ける逸散性水分濃度の分布、並に乾燥收縮に基づく軸方向、接線方向及び半徑方向の 3 應力の分布状態を示せるものである。圖から判るやうに接線方向收縮應力は圓周面附近では引張應力で、又嚢軸附近では壓縮應力である。猶ほ半徑方向收縮應力は凡て壓縮性で、圓周面上では 0 にして、柱軸に近づくに伴れ力度が漸次大きくなる。

本計算に當つては、逸散性水分濃度は (d) 式、乾燥度(水分逸散比)は (e) 式、乾燥による收縮應力は (k) 式を用ひて夫々計算によつて求めた。猶ほ計算に必要な定數 α (水分傳播率)、 β_0 (極限收縮率)、 E_c' (有效彈性係數) の値は本研究の實驗の結果を考慮して決定した。

圖から明瞭なる如く、嚢軸附近のコンクリートは軸方向、半徑方向及び接線方向の 3 方向の壓縮應力を受け、従つてコンクリートに含まれるセメント糊の海绵状毛狀間隙中の非結合水は圓周面に向つて搾り出される傾向が

圖-6 (c). 非結合水の逸散による收縮應力



著しい。之が同一コンクリートを用いても大型供試體の水分傳播率が小型供試體に比し大きな値を示す理由の一つであり、又一旦生じたる龜裂が自ら癒着する原因の一つと思はれる。

上記の計算によれば、圓筒の圓周表面近くの部分には乾燥の頭初からコンクリート引張強度以上の引張元應力が作用し、従つてその表面には龜甲状の毛狀龜裂を生ずべきことになる。此の現象は既述のセメント糊圓筒及び $15 \times 30 \text{ cm}$ コンクリート圓筒に関する著者の實驗¹⁰⁾に於ては認め得たるが、本研究の場合に於ては明確には認め得なかつた。本研究の實驗頭初に於ては殆んど圓筒表面上に龜裂を認め得なかつたことは多分、圓筒面上附近

10) 拙著：“コンクリート標準圓筒供試體の抗壓強度及び蒸發減と養生室より取出後の經過時間との關係” 土木學會誌第 20 卷第 5 號，昭和 9 年 (1934) 5 月，pp. 385~390.

に於ける逸散性水分濃度が 0 でなく、又圓壩面上附近に於けるコンクリートは乾燥のためその彈性係數の値が著しく低下し従つて其處に於ける引張應力度を (k) 式によりて計算することが妥當を缺き、更に前記の如く圓壩の中心部には壓縮應力が働くため非結合水が水酸化カルシウムを溶かし含んで押出され來り、之が圓壩の表面附近で空氣中の炭酸ガスを吸ひ此處に炭酸石灰となりて龜裂を埋めること、或は龜裂が著しく狭淺にして肉眼にて見出すことが困難であつたこと、等に基因するのであつたらう。併し乾燥の進展につれ毛狀龜裂が生じた供試體もあつた。

圖-6 から推知される如く、圓壩に引張元應力の生ずるのは圓周面から約 1 in (2.5 cm) の深さの殻部に限られ又龜裂の生ずるのはコンクリートの引張強度から推斷すれば精々表面から 1/4 in (約 6.5 mm) 位の部分に限られる。而も此の龜裂は乾燥の後期に至ると漸次癒着するものであることも計算の結果及び實情から言へる事柄である。

以上論述せる所は、乾燥せる空氣中に保存せるコンクリート圓壩の強度、彈性係數及び其他の特性を論ずるに當りても大切な事項である。

(g) 今後の研究に對する卑見

前記詳論せし所から明な如く、コンクリート供試體乃至は部材の乾燥並にそれに因る收縮の問題に就ては、今後更に研究を要すべき多くの問題が残されてゐる。このことに關し以下に少しく著者の意見を開陳しようと思ふ。

先づ理論的研究に就て論ぜんに、著者の提唱せし理論は著者の行へる實驗の結果と大凡そ一致するが猶ほ本質的に考へて研究を要すべき事項が残されて居り、又その實際應用の點に就ても吟味の要がある。従つて著者は前記の理論を直ちに實用に供することを強いて主張する考はないが、併し現在の所、本理論はコンクリート部材に生ずる乾燥收縮並に之による應力の概念を計算によりて窺知し、更に龜裂に對する用意乃至はその防止法を研究するに當り何等かの參考になるものと信ずる。

次に實驗的研究に就て論じよう。第一編で述べた著者の行へる $1\frac{1}{2} \times 1\frac{1}{2} \times 12$ in (約 $3.8 \times 3.8 \times 30$ cm) 角棒供試體は、 $\frac{3}{4}$ in (約 20 mm) 以下の骨材を使用するコンクリートのときは、長さと斷面の幅との比大きく且つ斷面が小さいから乾燥の進展が速であり、又標點の設計も良好であり、従つて極限收縮率を求めるに適する方法である。併し、水セメント比の大なる軟練のコンクリートに於ては供試體製作の際材料の分離を來し、従つて乾燥の進展に伴れ供試體が曲る傾向がある。尤も斯る場合には練直しコンクリートを使用すれば幾分たりとも絛上の不都合は避け得られよう。

次に本編實驗に於ては 6×12 in (約 15×30 cm) 圓壩を用ゐたが、コンクリートの平均收縮率を定量的に求めるためには、標點距離が 10 in (約 25 cm) のときは、供試體の乾燥のため其の兩端面が凸狀となり、従つて標點が兩端面に近いときは標點格受けが圓壩の中央に向つて拜む傾向があるやうである。従つて定量的に正確を期するためには、本實驗に使用せるが如き標點受及び径を使用するときは、收縮率の試験に限らず、クリープ、彈性係數、強度等と乾燥の關係を知る實驗に於ては、直徑 15 cm 長さ 60~90 cm 程度の寸法の供試體を用ゐる標點を中央 25 cm に設くれば、端面の影響を除去し得られよう。

猶ほ、實際構造物に於ける收縮量を定量的に正確に判斷する資料を得るためには、實物大の相當長い供試體に就き、其の各部の水和熱及び供試體内各部の乾燥の狀態並に其の機械的性質の吟味と相俟つて乾燥收縮量の實驗的研究が、人工的に溫度及び濕度を自由に調節し得る試験室及び自然の儘の現場に於て、實情に即應して大規模に實施せられることを希望する。若し斯る實驗的研究が完成された曉には、コンクリートの乾燥收縮の問題に就て

の定性的のみならず定量的の明確なる概念が得られるであらう。

3. 壓縮強度¹¹⁾

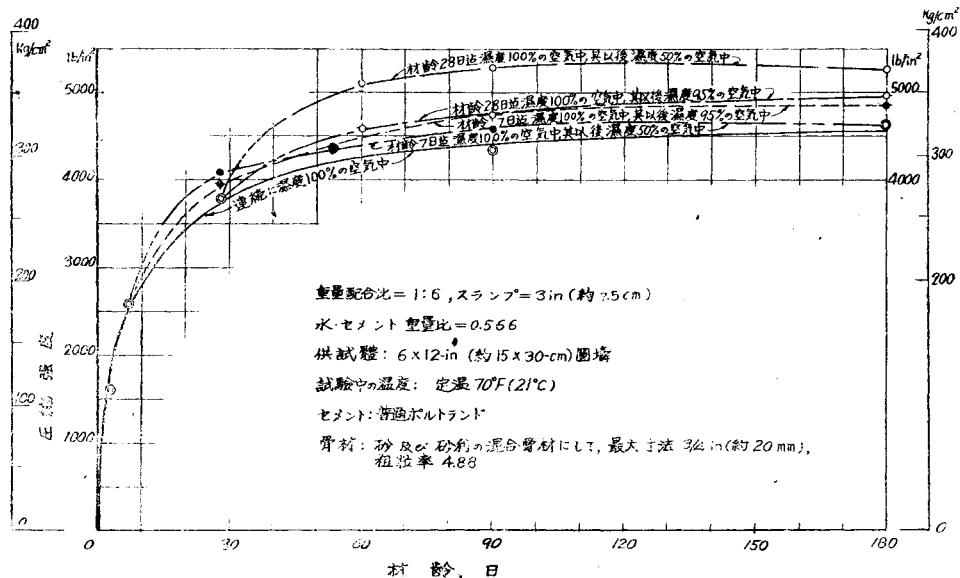
本節に於ては、6×12 in (約 15×30 cm) 標準圓筒供試體コンクリートの壓縮強度が、定温度 70°F (21°C) の下に於て、養生期間の長短及び養生後に於ける供試體の置かるゝ場所の空氣濕度の高低により如何なる影響を蒙るかに就ての實驗的研究の結果を掲げ、且つこれに就て理論的考察を加へたいと思ふ。

第一編に於て詳論せる所から明瞭なる如く、100% の飽和濕度の空氣中に繼續的に標準養生し或は或期間標準養生したる後濕度 95% の空氣中に貯藏せしコンクリートに於ては、其の中に含まるゝセメント糊の水和水量は漸次増加するものにして、その増加率は材齡が大きくなるに伴れ減少するとは言へ、この増加の現象は少くとも1年間は實驗上認められる。反之、標準養生後、例へば濕度 50% の如き、相當に乾燥せる空氣中に貯藏せし場合に於ては、乾燥が進展するに伴れて事實上水和水量は殆んど變らなくなる。

既に第2節(c)に於て與へたるコンクリートの乾燥による收縮應力度及びその分布に関する概念に従へば、乾燥せる空氣中に貯藏せしコンクリート圓筒の圓周面近くの部分に生ずる軸方向又は接線方向の固有元引張應力の總量は一定の時期迄は漸次増加するが、其の時期以後に於ては漸次減少し、遂にはコンクリートが逸散釣合に達するに及んで全く消滅する。

飽和濕度に達せざるまでも95%程度の高濕度の空氣中に保存せるコンクリートに在りては、その中に含まれるセメント糊中のセメントの水和作用及び加水分解の兩化學反應は材齡の増加に伴ひ増進し、更に是等の作用によるセメント糊の組織の硬化が並行して行はれるが、セメントの加水分解の際生ずる水酸化カルシウムの炭酸鹽化の進度は相當の材齡に達するも猶ほ些少である。之に反し、50%程度の低濕度の比較的乾燥せる空氣中に於ては、セメントの水和作用及び加水分解は殆んど時間の推移に無關係であるが、水酸化カルシウムの炭酸鹽化の進

圖-7. 壓縮強度



11) 本問題に関する乾燥の極めて初期に於ける研究として著者の文献がある。脚註 10) 参照

展は實に目覺しく、且つセメント糊の水分の消失に基因する收縮のためコンクリートの組織は漸次硬結するのである。

6×12in (約 15×30 cm) の標準圓碁供試體を夫々温度 21°C にて材齡 7 日及び 28 日迄飽和湿度の空氣中に標準養生したる後、之を湿度 95 % 及び 50 % の試験室に移して夫々貯藏せし場合の供試體コンクリートの壓縮強度と材齡との關係に就ての本實驗の結果を圖示すれば、圖-7 の如くである。猶ほ同圖には、連續に標準養生せし場合の實驗結果をも、参考のため示して置いた。本實驗の結果から次の事項が瞭つた。

材齡 7 日迄標準養生したるコンクリートを其以後 100 % 以下の湿度の空氣中に移すときは、コンクリートの壓縮強度は最初は 供試體の置かるゝ場所の空氣の湿度低き程大きいが、併しこの傾向は長續するものではない。即ち本實驗に於ては、材齡約 45 日迄は如上の傾向を認むるも、其以後には反對の傾向を呈してゐる。更に詳細に圖-7 を吟味すれば、湿度 50 % の空氣中に貯藏せしコンクリートに於ては材齡約 3 ヶ月にて、又湿度 95 % の場合に於ては材齡約 5 ヶ月にして壓縮強度は夫々最大値に達し、其以後は漸次減少の傾向を示すことが判る。又供試體を湿度 50 % 及び 95 % の空氣中に保存せし場合の夫々の強度の比を求めると、乾燥の頭初約 7 日より約 6 ヶ月迄の間に於て、約 1.03 から 0.95 に遞減することを知るであらう。

次に、材齡 28 日迄標準養生したるコンクリートを其以後 100 % 以下の湿度の空氣中に移して保存せし場合に於ては、材齡約 250 日迄は、供試體の貯藏されし場所の空氣の湿度低き程壓縮強度は大である。而して、湿度 50 % の空氣中に貯藏せし場合には、材齡約 4 ヶ月にして、又湿度 95 % の空氣中に在りては材齡約 6 ヶ月にして供試體コンクリートの壓縮強度は最大値に達する。又試みに、供試體を湿度 50 % 及び 95 % の空氣中に保存せし場合、同一材齡に於ける夫々の壓縮強度の比を求めると、其の比は乾燥約 2 ヶ月半にして 1.10 なる最大値に達し、其の後遞減するも猶ほ材齡 250 日迄は依然として 1 以上の値を示してゐる。

上述の實驗の結果から推斷されるやうに、コンクリートの壓縮強度は其の周圍空氣の湿度の影響を蒙るものであり、従つて次の 3 項即ち (イ) セメントの水和水量、(ロ) コンクリートの乾燥に因る逸散性水分濃度の不齊等分布に基づく固有元應力の發生狀況、及び (ハ) セメント糊の物理變化及び化學變化に基因するその組織の硬結の程度如何、によつて變化するものであることは合理的に承認されるであらう。

更に具體的に説明を加へんに、飽和湿度乃至は 95 % 程度の高湿度の空氣中に保存せるコンクリート圓碁の壓縮強度が材齡に伴ひ増加する事象、並に同一湿度の空氣中に於て同一期間乾燥する場合、材齡 28 日迄標準養生せしコンクリートの強度が材齡 7 日迄標準養生せし場合に比して大なるのは明にセメントの水和作用及び加水分解の進行度が高いことに因る。又、セメントの水和水量が少いのにも拘らず、約 1 ヶ月間標準養生したる後低湿度の空氣中に移して保存せしコンクリートの壓縮強度が連續に標準養生せし場合の強度より相當長期に涉つて大なるのは、主として、コンクリートの乾燥による收縮應力の發生すること、並に乾燥によるコンクリート組織の硬結及び圓碁供試體の圓周面近くの部分の水酸化カルシウムが空氣中の炭酸ガスを吸つて炭酸カルシウムに變ることに關聯する現象であることが合理的に了解し得られよう。而して、標準養生後乾燥空氣中に保存せしコンクリート圓碁の壓縮強度が或時期に於て最大値に達するのは、乾燥による收縮に基づく固有元引張應力の時間的變化の特性に基因する爲である。

以上論述せる所より推論するゝ如く、コンクリートの壓縮強度は其の中のセメント糊の化學變化のみならず、更にコンクリート中の非結合水分の消失に基づく物理變化即ち容積變化にも關することは明白である。併しながら、數量的に見て、標準養生後に於けるコンクリートの置かるゝ場所の空氣湿度の高低が標準圓碁の壓縮強度に及ぼ

す影響は左程著しいものではない。

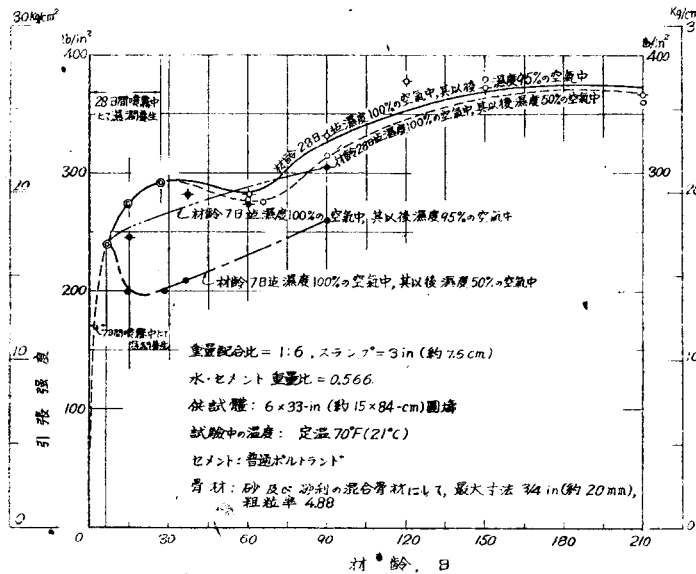
4. 引張強度

定温度 21°C の下に於けるコンクリートの引張強度が、最初の標準養生期間及び其の後の貯藏中の空氣湿度の高低の影響を蒙ることは、壓縮強度の場合に就て論述せる所から見て、自ら明白なる事柄である。

6×33 in (約 15×84 cm) の圓筒供試體を夫々温度 21°C にて材齡 7 日及び 28 日間飽和湿度の空氣中に標準養生したる後、之を別々に湿度 95% 及び 50% の試験室に移して貯藏せし場合のコンクリートの引張強度と材齡との關係に就ての本實驗の結果は、圖-8 に示す通りである。本實驗によつて次の事項が明瞭となつた。

7 日間標準養生したるコンクリートを其以後 100% 以下の湿度の空氣中に移して保存するときは、供試體の置かるゝ場所の空氣の湿度高き程コンクリートの引張強度は大きい。即ち供試體を湿度 50% の空氣中に移すとき

圖-8. 引張強度



は、其の後直ちにコンクリートの引張強度は減少し、乾燥約 3 週間にして極小値に達し、其の後は時間の経過に伴ひ再び増加する。猶ほ、湿度 95% の空氣中に貯藏する場合に於ても上記と同一傾向の現象を呈すべきことが理論的に推斷されるが、本實驗に於ては試験上何等かの不備の點ありし爲めならんか、乾燥の初期に於ける引張強度の一時的低下の傾向は、事實上明瞭に認め得なかつた。又、供試體を 7 日間の標準養生後湿度 50% 及び 95% の空氣中に保存せし場合の夫々の引張強度の比を求めると、乾燥約 3 週間にして約 0.78 に達し、其以後は漸次に材齡の増加に伴ひ増加の傾向を示してゐる。之によつて明瞭なる如く、直徑約 15 cm なる寸法の圓筒コンクリートの引張強度は、標準養生期間が 7 日程度の短期間のときは、其の後に於ける空氣中の湿度の影響を相當に蒙るものであることが判る。

次に、28 日間標準養生したるコンクリートを其以後 100% 以下の湿度の空氣中に移して保存せし場合に於ても、上述の 7 日間標準養生せし場合と同一傾向の現象を呈することは實驗上認められるが、併し貯藏中の空氣の湿度の引張強度に及ぼす影響は、數値的に見るときは極めて僅少にして、實際上は考慮の要なき程度である。

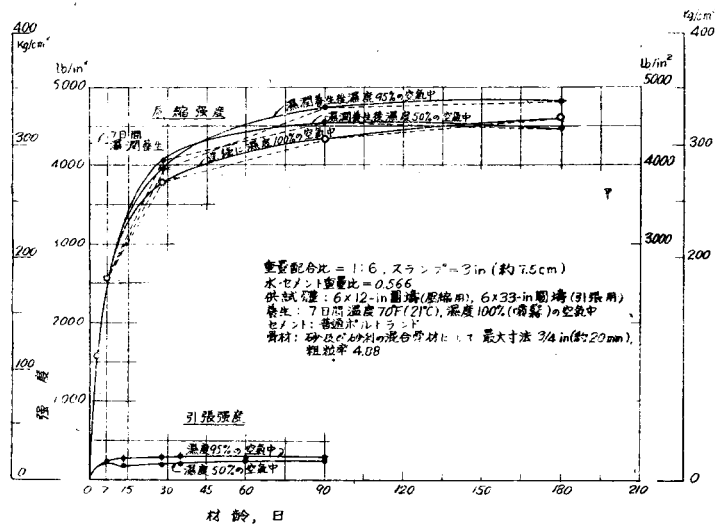
本實驗結果の趨勢から推斷すれば、コンクリートの引張強度の値は、最初の養生期間及び其の後供試體の保存される場所の空氣湿度の高低に關せず、終局に於ては略々一定値例へば 350 lb/in^2 (約 25 kg/cm^2) 程度に到達するものゝ如くである。斯くの如くコンクリートの引張強度が終局に於て相當大きな値に達することは結構な事柄に相違はないが、併しそれに達する途中で、特に材齡が小さい時に於て、乾燥による悪影響を蒙ることは、注意を喚ぶに値する事項である。

彼上の實驗結果の由つて來れる所以は、壓縮強度の場合に準じて、合理的に鮮明し得られるであらう。

5. 壓縮強度と引張強度との關係

定溫度 21°C の下に於てコンクリートを 7 日間標準養生し、其以後湿度 95% 及び 50% の空氣中に保存せる場合の壓縮及び引張の兩強度が材齡の増加に従ひ如何に變化して行くかの實驗結果は圖-9 に、又 28 日間標準

圖-9. 引張及び壓縮強度



養生したる供試體の兩強度の時間的變化の狀況は圖-10 に別々に圖表し、以て一定期間標準養生したる後に於ける周圍の空氣湿度が壓縮及び引張の兩強度に如何なる影響を與へるかを一見して比較窺知せしむるに便ならしめた。猶ほ、同一の養生及び貯藏條件の下に於ける壓縮強度と引張強度との比を實驗の結果から計算によつて求めると表-4 の如くなる。在來の研究に於ては、標準養生せしコンクリート圓筒の壓縮強度と引張強度との比の値は略々 8~12 とは言はれて來たが、本研究に於ては、標準養生期間短く且つ其の後に於けるコンクリートの置かるゝ場所の空氣が乾燥せる程兩強度の比の値は大きくなる傾向を示し、特に湿度低き空氣中では乾燥の初期に於て 20 又はそれに近い數値を示すことが明となつた。このことは、コンクリートの乾燥のため圓筒供試體の圓周表面附近のコンクリート部に固有元引張應力が生ずることに基因することは論を俟たない。而して、コンクリートの乾燥のため逸散性の非結合水が漸次消失し、遂に水分の逸散約合に達する迄に此の比の値は一旦極大値に達し、然る後漸次減少してゆくことは理論的に想像される事柄であり、亦實驗の結果もそれを裏書してゐる。

圖-10. 引張及び壓縮強度

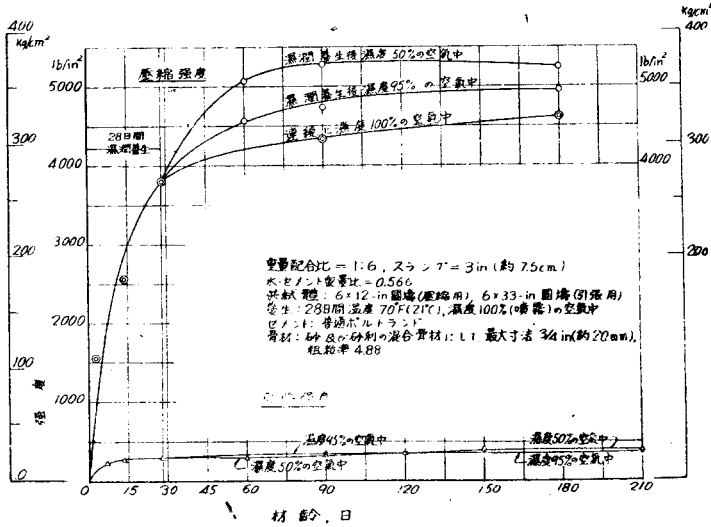


表-4. 直径 6 in (約 15 cm) 圓筒供試體の壓縮強度と引張強度との關係 (溫度 21°C)

(1) 7 日間濕度 100% の空氣中に養生, 其以後濕度 95% 及び 50% の空氣中に貯藏

材 齡 (日)	乾 燥 期 間 (日)	縮壓強度と引張強度との比	
		標準養生後に於ける貯藏中の空氣の濕度	
		50%	95%
7	0	11	11
14	7	17	13
21	14	19	14
35	28	20	15
67	60	19	15
97	90	17	16
127	120	—	—
187	180	—	—

(2) 28 日間濕度 100% の空氣中に養生, 其以後濕度 95% 及び 50% の空氣中に貯藏

7	濕 潤	11	11
14	濕 潤	11	11
28	0	13	13
35	7	15	14
42	14	16	15
56	28	18	16
88	60	17	15
118	90	16	14
148	120	15	13
208	180	—	—

6. 壓縮彈性係數

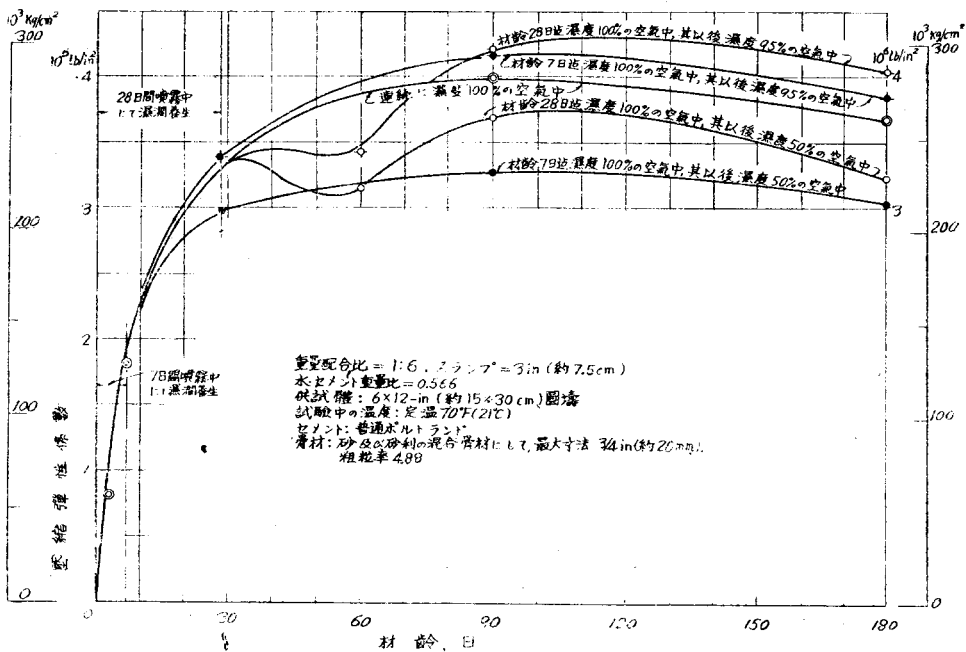
米國コンクリート學會の 105 委員會の依頼によつて Lehigh 大學に於て實施された鐵筋コンクリート柱の研究に從へば、最初の壓縮試験に於ける 500 lb/in² (約 35 kg/cm²) なる應力度に對する接線係数を以て最も合理的の壓縮彈性係數と看做してゐる¹²⁾。此の係數は、普通の場合、米國の無筋及び鐵筋コンクリート標準示方書に關する聯合委員會の 1940 年報告に規定されてゐる基準帶鐵筋柱に於ける許容應力度に對する割線係數に殆んど一致する。

本研究に於ては、6×12 in (約 15×30 cm) なる標準圓筒供試體の初回壓縮試験に於ける應力度と標點距離 8 in (約 20 cm) に對する平均歪度との關係を應力歪圖に描き、その曲線に於ける應力度 500 lb/in² (約 35 kg/cm²) なる點の接線係數を以て壓縮彈性係數即ち壓縮ヤング係數と看做した。

論ずる迄もなく壓縮彈性係數は壓縮應力度と歪度との函數であるから、此の係數の値は (イ) セメントの水和作用及び加水分解の進度、(ロ) コンクリートの乾燥による收縮に基づく元應力の發生狀況、及び (ハ) コンクリートの組織又は構造の硬結の程度如何に關するものであることは明白である。

本研究に於ける實驗の結果は圖-11 に示す通りである。本實驗の結果から次の事項が明瞭となつた。

圖-11. 壓縮彈性係數



材齡 7 日迄標準養生し其以後 100% より低き湿度の空氣中に保存せし圓筒供試體のコンクリートに在りてはその彈性係數は、材齡 3 ヶ月半迄は材齡の増加に伴れ増加するが、それ以後は漸次減少するものゝ如くである。而して、標準養生後供試體の置かるゝ場所の空氣湿度が高い程彈性係數の値は大きい。

12) Slater, W. A., and Inge Lyse: "First Progress Report on Column Tests at Lehigh University," Proc. A. C. I., Vol. 27, 1931, p. 702.

次に、材齡 28 日迄標準養生し其以後 100% より低き湿度の空氣中に保存せし場合に於ても、大體に於て材齡 7 日迄標準養生せしときと同一傾向の現象を呈する、但し乾燥の頭初に於て彈性係數が一時低下の傾向を示す特異性は注目し得る事柄である。

既に多くの研究者によりて論證され來れる如く、標準養生せしコンクリート供試體の壓縮試験に於ける彈性係數と極限強度との間には或る關係が存する。本研究の實驗の範圍内に於ても、標準養生期間及び養生後に於けるコンクリートの置かるゝ場所の湿度の條件が種々なる場合に於ても、壓縮彈性係數と壓縮強度との比は一般に、大約、一定値を示してゐる。即ち材齡 7 日及び 28 日迄標準養生せし後々々湿度 95% 及び 50% の空氣中に貯藏せしコンクリート圓筒に在りては、材齡 28 日~6 ヶ月の範圍内に於て彈性係數強度比は約 670~870 なる値を示してゐる。尤も精細に論ずるときは、一定期間標準養生せしコンクリートに於ては其の後に於ける供試體の置かるゝ場所の空氣湿度低き程、又標準養生後一定の湿度の空氣中に供試體を貯藏せしときは養生期間が長い程、此の比の値は小さい。又、標準養生期間の長短及び養生後の空氣湿度が 100% 以下のときはその高低に關せず、壓縮に對する彈性係數強度比は乾燥約 2 ヶ月にして最大値に達し、其以後は遞減する。此等の現象はコンクリートの乾燥收縮の爲め圓筒供試體の圓周表面附近に引張元應力が生ずることに基因して起るものであらう。

一定期間養生せしコンクリートの同一材齡に於ける壓縮彈性係數は養生後に於ける湿度高き程大きい、壓縮強度は、特に乾燥の頭初に於て、養生後の空氣の湿度が低い程大きい。而して、壓縮に對する彈性係數強度比の値は、養生期間が一定のときは養生後の空氣湿度が高い程大きく、又養生後の空氣湿度が一定のときは此の比の値は養生期間短き程大きいことは既述の通りである。猶ほ、此の實驗結果から得た彈性係數と壓縮強度との比の値を比較することにより、コンクリートの壓縮に對する歪、特に普通の壓縮試験に於ける急速載荷の際の非彈性歪は、標準養生期間が長い程、又養生後の空氣の湿度が 50% 以上のときは湿度高き程、減少することが概念的に判るであらう。

7. 引張彈性係數

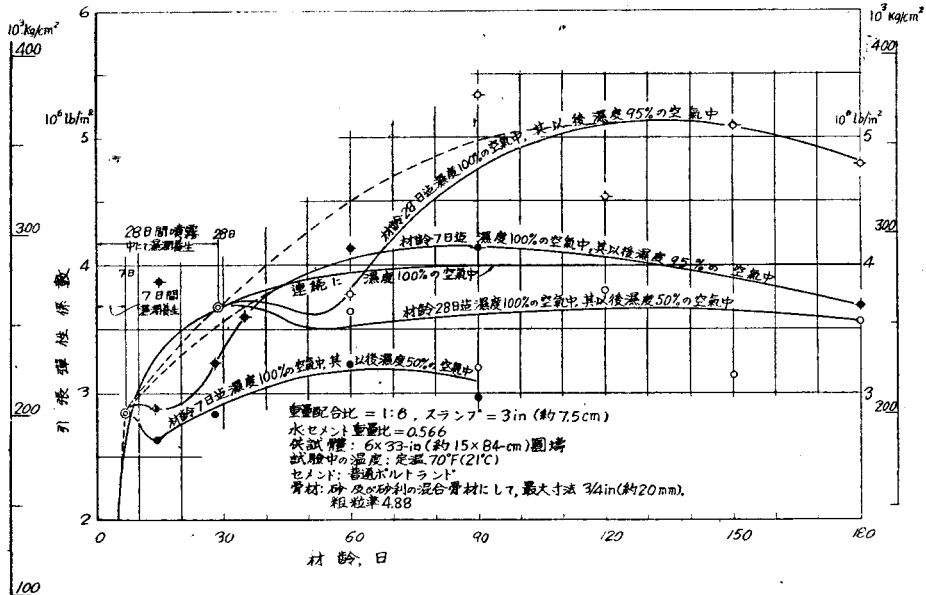
本研究に於ては、初回の引張試験に於て得られたる應力度と全伸との關係を表す應力歪圖の原點に對する接線係數を以つて引張彈性係數と看做した。このことは引張試験に於ける應力歪圖の特性から觀て妥當であらう。元來、コンクリートの引張試験には種々の困難が伴ふもので、本實驗の場合に於ても、供試體の設計及び製作、並に試験の方法其の他の點に就て出來得る限りの注意を拂つたにも拘らず、やはり、伸計のダイヤルゲージの目盛の誤差、供試體に力を加へる摩擦摺具の滑り、或は力が供試體に一樣に懸らない等の缺陷なきを保證し難く、多分その爲でもあらうか應力歪圖に於て異常の箇所を認めたるものも 2,3 あつた。斯る場合に於ては、圖に就て合理的の推斷に基づいて修正を施し、係數を決定した。従つて、本實驗には多少遺憾の點なきにしもあらざれども、引張彈性係數の概念的な特性を窺知する上から論ずれば、本研究の結果と雖も少くとも實用上何等かの役割は演ずるものと思はれる。

壓縮彈性係數の場合に準じ、引張に對する彈性係數がセメントの加水分解及び水和作用の進度、乾燥收縮による元應力の發生狀況、及びコンクリートの組織の硬結の程度に密接なる關係がある事は論ずる迄もない。

6×33 in (約 15×84 cm) 圓筒供試體の引張試験を所定の諸材齡に於て行ふに當り、諸應力度に對する供試體の中央 8 in (約 20 cm) の平均伸率を求め、これから應力歪圖を作つて彈性係數を計算によつて求めた本實驗の結果を、5通りの養生及びその後の貯藏條件に對して夫々圖表すれば圖-12 の如くである。而して、本研究の結果から次の事項が瞭つた。

材齡 7 日迄標準養生し、其以後 100% より低き湿度の空氣中に保存せし圓筒供試體のコンクリートに在りては、引張彈性係數は材齡約 3 ヶ月にして最大値に達する迄の途中に於て、空氣の湿度が 95% 及び 50% の何れの場合を問はず、一旦低下の傾向を示すものであり、又材齡約 3 ヶ月以後に於ては漸次其の値の減少を來す。而して、標準養生後に於ける貯藏に就て言へば、空氣の湿度高き程彈性係數の値は大きい。

圖-12. 引張彈性係數



次に、材齡 28 日迄標準養生し、其以後湿度 100% 以下の空氣中に供試體を保存せし場合に於ても敘上と同様の傾向が認められる。

本實驗の結果に就て特に注目し値する事項は、充分なる標準養生を行はずして直ちに乾燥せる空氣に曝せしコンクリートの引張彈性係數の値が乾燥中殆んど増加しないことである。此の事實から、斯かる條件の下に於ては、コンクリートの全歪或非弾性歪は、コンクリートを相當長期間濕潤状態に保つ場合に比して、かなり大きな値を示すことが判る。

引張彈性係數と引張強度との比に就て吟味せんに、低湿度の空氣中に供試體を保存する場合に於ては、標準養生期間が長き程此の比の値は小さい傾向が、可成り濃厚に認められる。今、數量的に此の傾向を説明せんに、標準養生後湿度 50% の空氣中に於けるコンクリート圓筒供試體に就ては、材齡 7 日及び 28 日迄標準養生せし場合の此の比は乾燥約 1~4 ヶ月に對し、大約、夫々 13 100 及び 11 200 であつた。而して、湿度が 95% の空氣中に保存せし場合に就ては、それ以前の標準養生期間が 7~28 日の範圍内に於て、その比の値は略々一定で約 14 000 であつた。又、標準養生期間を一定にせる場合に就て觀れば、其以後に於ける供試體の置かるゝ場所の空氣の湿度が低い程、この比の値は小さい。

猶ほ、本實驗結果から得た彈性係數と引張強度との比の値を比較することにより、急速載荷の際のコンクリートの引張に對する全歪或非弾性歪の量は、標準養生期間が長く且つ供試體の置かるゝ空氣の湿度が高い程、小

さい事が概念的に推斷されるであらう。

8. 壓縮彈性係數と引張彈性係數との關係

壓縮彈性係數と引張彈性係數とを比較検討するに便利なやうに、材齡 7 日及び 28 日迄標準養生したる後湿度 95% 及び 50% の空氣中に夫々保存したるコンクリート圓筒供試體の壓縮及び引張に對する彈性係數の諸材齡

圖-13. 壓縮及び引張彈性係數

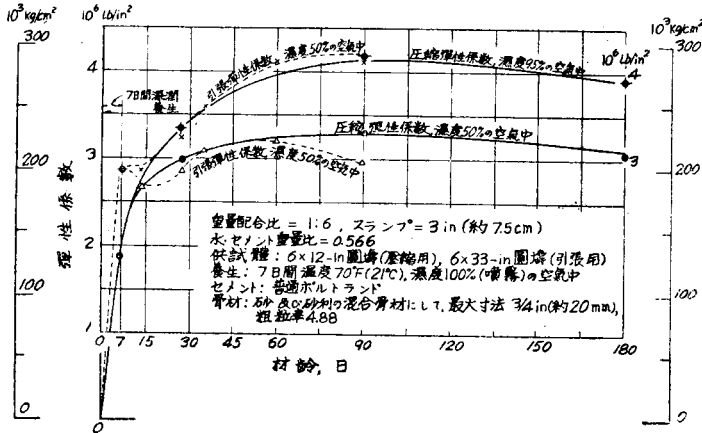
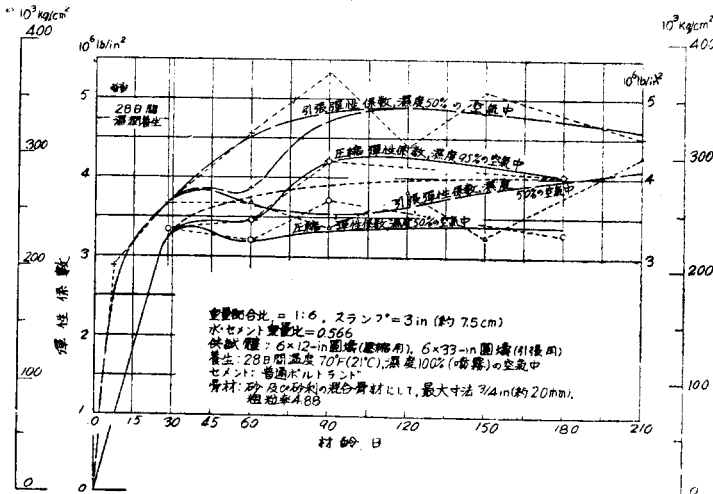


圖-14. 壓縮及び引張彈性係數



に於ける値を 7 日及び 28 日の標準養生期間に就て別々に圖表すると圖-13 及び圖-14 の如くである。

E. Mörsch 博士¹³⁾ 及び Otto Graf 教授¹⁴⁾ 等の研究に従へば、養生及び其の後の貯藏の條件を一定とせる場合

13) Mörsch, Dr. E., "Der Eisenbetonbau," Bd. I, 1 Hälfte, 1923, S. 62 (此の研究に於ては彈性係數を求むるに當り歪を基準としてゐる。)

14) Graf, Otto: "Druck- und Zugelastizität des Betons," Mitt. Über Forschungsarbeiten aus dem Gebiete des Ingenieurwesens, Heft 227, 1920. (此の研究に於ては彈性歪を用ゐて彈性係數を計算してゐる。)

に於ては、或應力度に對する壓縮彈性割線係數は、應力度が頗る小さい場合を除き、同一力度に對する引張彈性割線係數より多少大きいことが判つてゐる。又、在來の夥多の研究結果から推斷される如く、同種のコンクリートの壓縮試験及び引張試験に於て得られた應力歪曲線を検討すれば、應力度が零の所では兩接線係數は略々同値を示すものであることが想像される。更に、F. E. Richart 教授¹⁵の實驗的研究に就て見れば、材齡約 2 ヶ月の標準圓壩供試體の壓縮試験に於ては、壓縮強度の略々 1/4 の應力度迄は應力歪圖は直線をなすことが提唱されてゐる。著者の本實驗に在りては割合に低應力度の場合に於てさへも F. E. Richart 教授が實驗せし如き關係は認められなかつた。此の理由の一つとしては、供試體内に於けるセメント糊の硬化が不充分であつたことを挙げ得よう。即ち、本實驗に於ては、壓縮試験に於ける初接線係數は 500 lb/in² (約 35 kg/cm²) の應力度に對する接線係數より可成り大きく、時には後者の 50% も大きいことがあつたが、總括的に言へば、大約 20% 位大きいものと考えても大した支障はないやうである。

圖-13 及び圖-14 に就て觀るに、引張に對する初接線係數は 500 lb/in² (約 35 kg/cm²) なる壓縮應力度に對する接線係數より幾分か大きい、特に 7 日間標準養生せし場合に比し 28 日間標準養生せしコンクリート圓壩の場合に於て上記の傾向が著しい。彼上の如く本研究に於ては實用上の目的から、引張に對しては初接線係數を採り、壓縮に對しては或應力度に對する接線係數を採つて比較研究を行つたが、今若し、壓縮試験に於ける初接線係數が壓縮應力度 500 lb/in² に對する接線係數よりその約 20% だけ大きいものと假定することが許されるならば、引張並に壓縮に對する初接線係數は、本實驗の範圍内に於て、略々同じ値を有するものと考えても大した差支へはないことになる。

(昭. 19. 1. 22. 受付)



15) Richart, Frank E., and Rex L. Brown: "An Investigation of Reinforced Concrete Columns," Bulletin No. 287, Eng. Exp. Station, University of Illinois, June 5, 1934, p. 47.

昭和19年 5月25日印刷 昭和19年 6月 1日發行(定價金2圓)

編輯兼發行者 東京都牛込區南町 33番地
中 村 孫 一

印刷者 東京都神田區美土代町 16番地
(東京 31) 倉 澤 直 男

印刷所 東京都神田區美土代町 16番地
株式會社 三 秀 舍

東京都麴町區丸ノ内 3丁目 6番地

發 行 所 社 團 土 木 學 會
法 人

電 話 丸ノ内 (23) 3945番, 振替口座東京 16828番

昭和十九年五月二十五日印刷
昭和十九年六月一日發行

本學會誌 論文集・第2號