

コンクリートの溫度傳導率に就て (其のI)

島 田 八 郎

目 次

緒 言	I 章
	熱傳導率に就て
	1 節 序 説
	2 節 コンクリート熱傳導に關する二、三の結果
	II 章 土木試験所に於ける試験結果
	序 説
	1 節 試験法の概要
	2 節 試験結果

緒 言

土木工學に使用されてゐるコンクリートの強度に關する研究は可成り進み各異る視野より強度の變化が論ぜられてゐる材料の性質上未だ總での特性を適確に指定する事能はざるも實驗的資料は餘多發表されてゐる。其の技術的に曖昧な部分を施工による差異として一部其の論究を避けをる如く推測するゝ點あるも將來期かゝる方面にも科學的表示法が定められ

る事と思ふ。今強度耐鹹性の如き化學抵抗力、耐水性、乾燥による膨脹性等土木構造物用コンクリートとして重要なものもあるも斯かる主として化學的性質を基礎とする變化の外に熱による膨脹收縮の爲め大なる熱應力龜裂崩壊を來す。堰堤の如きマスコンクリートの場合は各部よりの發生する硬化熱の發散不充分なる時は其の中心に蓄積される異常に大なる熱の爲め溫度傳高率の小なる時には各部の膨脹傾度が増大し龜裂崩壊を伴ふマスコンクリートの場合でなくとも異なる配合のコンクリートを密着接合し打つ時にも同様の熱應力の不連続が生ず。例へば道路鋪裝用コンクリートの基層用上層用兩コンクリートの組合せは其の一例である。

上記の例によるも熱的性質としてはセメント發熱量同様其の溫度傳導等は重要なものである極端なる議論をすれば若し發熱量大なるも溫度傳導度が實用上無限大に近く大なれば所謂マスコンクリートの中心蓄積熱による膨脹影響の如きものを考慮するにも其の取扱ひが變る。熱應力の分布の重要性を考慮する時吾人は

(1) セメント發熱量の研究

(2) コンクリート、セメントペーストの溫度傳導度

……の兩性質を明かにする必要がある、實驗方法によつては勿論兩者の混ぜるものを測り理論的推論により構造物として必要な特性の判定を爲し得るも、兩者を分離し其の數値を明かにする事が望ましい。(1)のセメント發熱量に関しては従來とも餘多の研究により資料の採り方異なるも試験研究され大堰堤會議等に於ても常に議題になしをり其の傾向は明かにされてゐる、然るに(2)の部門に関しては從來試験研究されたものは少く Illinois 大學の A. P. Garman, R. A. Nelson, 東京帝國大學建築科の濱田博士のものが此方面の必要な資料であつた。最近東京工業大學木下、清水兩博士がコンクリー

トモルタル等の熱伝導に關しての試験結果を發表されてゐる、其の外筆者が土木試験所に於て鋪裝用コンクリートを對照として溫度傳導率に關する二、三の試験研究をした。濱田、木下、清水諸博士のもの、筆者のものは資料の採り方に夫々特長あるも相互に密接な關係を有するものである。今此等の三論文を主とし二、三論じ特に筆者の試験結果に就て記述したい。

1 章 熱 傳 導 度 に 就 て

1 節 序 説 溫度傳導度の熱應力研究上必要な事は茲に特に記述する必要なきも最も簡單なる場合に就き考察するに例へば一方、方向の變化のみを考慮すればよき如きコンクリートの構造物あり、變化の方向を α とし表面の溫度變化を (1) 式の如く

$$\theta = A \cos\left(\frac{2\pi}{T}t\right) \dots\dots\dots (1)$$

T なる週期 A なる振幅を有するものとすれば距離 x なる所では (2) 式の様な振幅も減少し最高最小溫度を示す時間にも相の變化 $\frac{x}{h} \sqrt{\frac{\pi}{T}}$ がある。

$$\theta_x = A e^{-\frac{x}{h} \sqrt{\frac{\pi}{T}}} \cos\left(\frac{2\pi}{T}t - \frac{x}{h} \sqrt{\frac{\pi}{T}}\right) \dots\dots\dots (2)$$

上式の h^2 は溫度擴散率又は溫度傳導率と稱せられてゐるもので……比重 ρ 密度 ρ との間 (3) 式で示す關係のある事は周知の事である。

$$k^2 = k(C\rho) \dots\dots\dots (3)^*$$

但し、 k = 熱傳導度、 C = 比重、 ρ = 密度を示す、單に振幅の範圍のみを考慮に入れる場合には

$$T = Ae^{-\frac{x}{h}} \sqrt{\frac{\pi}{T}}$$

の如く變化し外氣の日、及び年變化を内部に及し一つの熱應力の原因となる第一回國際堰堤會議の報告論文中石井氏の小牧堰堤に於ける實測結果をみるも氣溫日變化振幅 $25^{\circ}C$ 年氣溫變化振幅を $24.5^{\circ}C$ とし (4) 式の如きもので實測値が示されてゐる。

$$T = 24.5e^{-0.07x} + 25e^{-1.34x} \dots\dots\dots (4)$$

但し x = 表面よりの距離を呎……で示したもので第一項は年變化によるもの第二項は日變化によるものである。前者

* 溫度傳導率 k^2 、熱傳導度 k に関し補足すれば、今面積 A なる 2 平方面あり互々だけ離れ且つ溫度を夫々 t_1, t_2 とすれば時間 t 間に低溫部に ($t_2 < t_1$ とす) 流れ込む熱量 Q は下式で示さる

$$Q = k \frac{t_1 - t_2}{x} At.$$

Q カロリー、 t_1, t_2 攝氏溫度 $^{\circ}C$ 、 A cm^2 、 x cm 、 t 秒……と單位をとれば k 係數は $O. G. S$ にて示された熱傳導度を表はす、一方、物體內に溫度差により流れ込む熱のため物體の密度比熱に應じて溫度上昇を來すもので其の關係は熱傳導方程式により示さる今一方のみの熱流れを考察すれば方程式は

$$CS \frac{\partial \theta}{\partial t} = k \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2}$$

にて常に溫度變化 $\frac{\partial \theta}{\partial t}$ は $k/[CS]$ の値によるもので之を h^2 なる文字にて書換え溫度傳導率 (擴散率) と稱す。

は…… $x = 4$ 呎、後者は…… $x = 55$ 呎附近で外氣の影響は殆んど消へてゐる、即ち $T = 0$ となる、又同論文に硬化に際しての壞堤溫度上昇と題して打込後 10~15 日の平均氣温を基準にとり連續に打繼けたコンクリート内部の最高溫度の測定一様を示すに、

$$T = 30 - \frac{42}{2+x} \dots\dots\dots (5)$$

の如き式を得てゐる、今此等の例を引用するも d の小なる部分即ち表面の近くに於て溫度傾度は大となる事は溫度の距離微分例へば…… $\frac{dT}{dx}$ ……を求むればよい。若し溫度傳導率 (k^2) 大となれば最も不利な時期に於て即ち同じ初期に於て $\frac{dT}{dx}$ は小なる値となる従て應力の分布は急劇とならず又熱の蓄積も減少され土木構造物としては必要な條件である事情が許すなら必要な強度及び發熱量の範圍に於て溫度傳導率を増加する様配合 W/O 比等を定める事が必要である溫度傳導率の研究の必要な事が分る。

2 節 コンクリート熱傳導度に関する二、三の結果 其の第一歩として、コンクリートの溫度傳導度とは如何なる要素により定るか其の傾向を明かにし特に含水率材齡等の影響をも明かにし骨材の影響は如何なる要素として取扱ふべきか——應吟味しをく必要がある。斯かる諸點よりコンクリートの溫度傳導度を論ぜん。

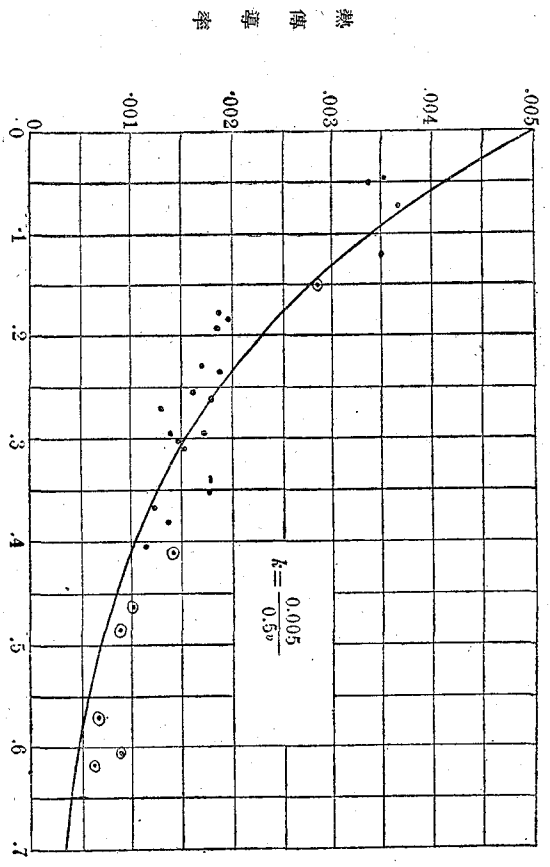
先づ濱田、木下、清水諸博士のコンクリート熱傳導度試驗結果を記述し然る後筆者の土木試驗所にて試みたものを述べ二、三の必要な結果を要約せん。

試驗條件は共に「試料狀態——養生後充分乾燥せるもの——にて材齡は——濱田博士約 4 週間以後、木下、清水博士 5 週間後のもの——に就き試驗したものである。其の内コンクリート製作に関するものを見るに

主として

配合 濱田博士の場合 : 1:2:4; 1:1.5:3; 1:1:2

1:0.5:1, スマヤコンクリート (Smearred Concrete)



第 1 圖 コンクリートの熱傳導率と空隙率との關係 (濱田博士)

主として

木下、清水兩博士の場合 : 1:2:4; 1:2:1.5, スメヤーコンクリート

但し Smeared concrete とは砂の含有せざるもので空疎率頗る大なる輕量のものである。

W/C 比 : 前者~スランプを約 20 cm なる様定む

後者~60~75% 間にとる

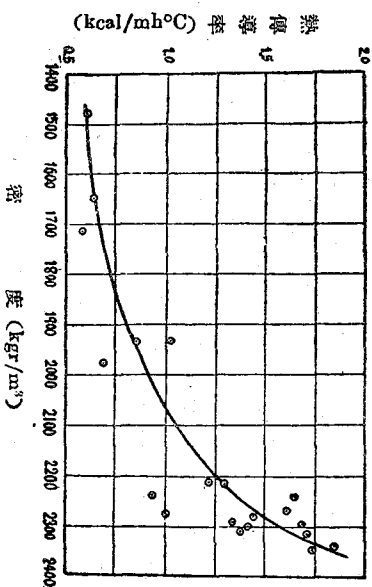
實驗條件は共に異なるもので濱田氏は與へられた大きさの圓筒を一定温度に保ちつつ急劇に他の温度の恒温槽に浸し、中心温度の時間的増加する程度より直接に温度傳導度 (k°) を測定したもので、木下、清水兩博士は加熱器と恒温水槽を使用し直接に熱傳導度 (k) を測定したものである。熱傳導度を求める時は (3) 式 $k/(c\rho)$ によつてゐる。

骨材としては、

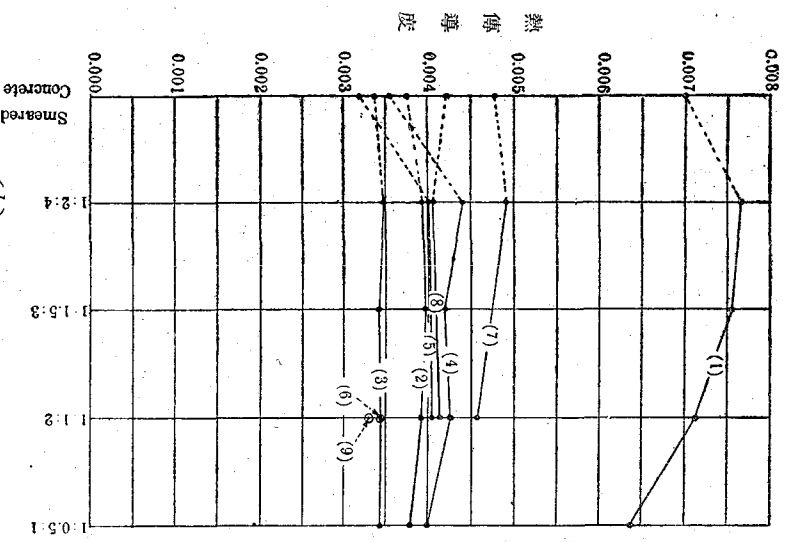
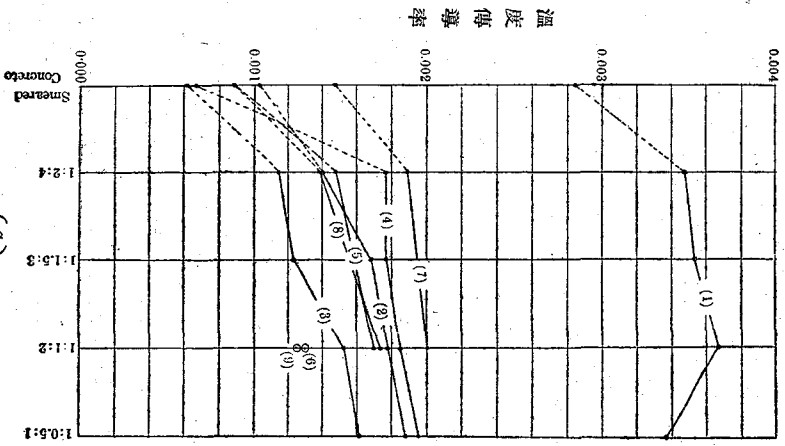
骨材種別 濱田博士の場合 : 多摩川産砂砂利、抗火石、火山岩鑛碎

木下、清水兩博士の場合 : 抗火石煉瓦層、花崗岩等

である。實驗結果に就きても種々研究方法あるも試料コンクリートを一つのマクロスコピックに考察せる空氣固體不均質系として其の結果を列擧せるものが實驗誤差範圍内で最も確實なものである。W/C 比、骨材種別による影響骨材大きさによ



第2圖 コンクリートの熱傳導率と密度 ($k/g/m^3$) との關係 (木下、清水兩博士)



番號	細骨材	粗骨材
1	普通砂	普通砂利
2	抗火岩(密)	抗火石(密)
3	抗火石(粗)	抗火石(粗)
4	普通砂	シオンズ
5	〃	火山砂利
6	火山砂	火山砂利
7	普通砂	火山砂屑
8	〃	火山砂利
9	火山砂	火山砂利

(a) コンクリート温度傳導率 (b) 熱傳導度 (b) 圖表 (濱田博士) 13 週乾燥のもの
 第 3 圖

る影響等は更に詳細な研究を要するものである今コンクリートを空隙率又は密度 kg/m^3 で肥別し熱傳導率 (k) との関係の圖示を見るに第1圖、第2圖の如きものがある。

溫度傳導率 (h^2) と熱傳導率とを比較する爲めに第3圖 (a) (b) を引用す、(a) 圖は溫度傳導率 (h^2) (b) 圖は熱傳導率 (k) を示すもので單位は勿論、C.G.S. cal. cm 秒 C° である。

第1圖の熱傳導率 k は cal/cm. sec. C の單位にて第2圖のものは K cal./m. h. C の單位で後者による數値を前者にて示すには $\frac{1}{360}$ を乗じてをけばよい、見掛密度 (ρ_a) と空隙率 (V_a) の關係は眞比重 (ρ) が同一なれば

$$V_a = 1 - \frac{\rho_a}{\rho} \dots\dots\dots (6)$$

の如く簡單なれども ρ_a は同一セメントにても W/C により異なる等殊に骨材の種類により 2.60~2.20 程度の範圍には變るものである。第一圖は $h^2 \sim V_a$ の關係であるが濱田氏の論文には別に密度 2,300~1,400 kg/m^3 とあるを以て第2圖のものと殆んど同程度のものである。兩曲線によるに實測點は可成り不規則的に分布してゐるが大體の傾向は空隙又は密度により支配されてゐるがマクロスコピックに考察せる時空隙以外の影響例へば

- (1) W/C 比の差異によるセメント硬化物固體部の組織の差異
- (2) 空隙其のものゝ分布形狀に關する差異
- (3) 骨材の差異

……の如きものが列擧される、骨材の差異と稱するも主に熱傳導率上より考察せるもので内部の空隙分布實質部分の差異を大別し得るものである詳細な資料を得んには少くとも骨材の篩分析の外吸水率滲透率等を測定しをく必要がある。

W/C 此の差異による影響は眞比重の實測に於ても明瞭に現れてゐる。従つて熱傳導率に於ても必ず其の影響がある此方面の研究には筆者の二、三試みたものもあるも別の機會に述べる。

第1圖の實測點範圍に引れた實際式は

$$k = \frac{0.005}{0.5v} \dots\dots\dots(7)$$

但し k = 熱傳導度、 v = 空隙を示すもので空隙 v は空間部分(空間部分+固體部分)……を示すものなれば固體部分)……の容積濃度 v_2 との間には、 $v = 1 - v_2$ ……の關係あり今 (7) 式を書換れば

$$k = C k_2^{v_2} \dots\dots\dots(8)$$

の形式となる、但し k_2 は固體部分の比熱傳導度、 C は修正係數とす今骨材等の影響をも分離し (9) 式の形式で

$$k = C k_1^{v_1} k_2^{v_2} \dots\dots\dots(9)$$

としてコンクリートの熱傳導度を形式的に論じ C 項に種々の影響を表示する事も必ず有効な手段を興ふものである *C.H. Loos* は一般分散系の電氣傳導度等に斯かる方針をとつた。其の外舊くより有名な式としては、*Lord Rayleigh*, *Maxwell*, *Clausius-Mosotti* の分散系電導率に關するものがあるが餘り専門的になり多岐に渉るから省略するも斯かる方面の試験研究を技術的に行んとする人士は必讀すべきものである。

熱電導 (k_t) を圖示するには其の目的により異り平均密度をとる事も一法なれども (9) 式の如く各要素の容積濃度にて表示するも各要素の影響を判別するに便である。

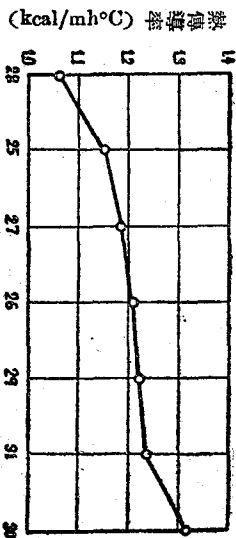
緒言に述べし如く熱的特性として發熱量の事は可成り重要視されてゐる例へば周知の事なれども Boulder Dam のセメントの水和熱暫定規格を見るも中庸熱、低熱セメントに對して7日水和熱として $<70 \text{ cal/gr}$, $<60 \text{ cal/gr}$ とあるも試験方法として斷熱法によるか、一定外部溫度法によるかに従つて全く其の意義が變る。例へば Newton の式を使用し後者より前者の値を換算するも其の溫度標準として單に中心溫度のみを採る時は兩者の値の一致しない事が當然である、兎角にも現代は發熱量をも規格化せんとするは一般的傾向である。

一方モルタル (1:3, W/C 比 65%) の試験結果をみるも、セメントを……

淺野、盤城、小野田、秩父、豊國、日本、小野田白各セメントと變じた實驗した木下、清水兩博士の結果は第4圖に示す。測定番號 25~35 は上述せしセメントの引摺順に (25) より附したものである。出来上りモルタルの空際の記述なき故空際の視野より論じ得ざるも最大最小のものゝ差異は最小のもの 20%以上にも至る。

筆者はセメントペーストに就き斯かる見地より實測したものがあ

る近日土木試験所報告にて斯かる方面の特性を論ずる事とする。實際上は溫度傳導度が重要なものであるが一般に比熱が固験の性質により溫度の函數となり更に更に複雑になる。第4圖より見るもセメントの種類により 20%程度の差異は容易に生ず斯かる理由により若し發熱量の問題を直接熱應力に關連せしめて取扱ふものなれば下記の如き提言をなし得。



第4圖 セメントの種類にする熱傳導度の變化

(1) 断熱的強熱量測定には温度傳導率を同時に測定するを合理的とす。

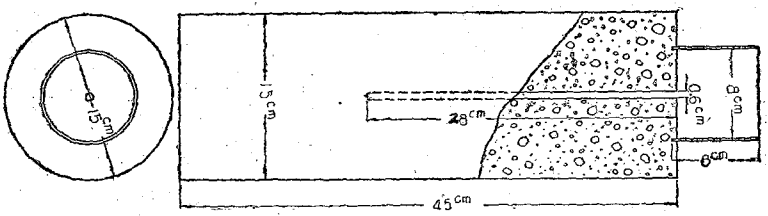
(2) 發熱量温度傳導度が適當に含まれマスコンクリートの場合の熱應力判定に資する事の出来る機資料の大きさ共に邊周條件を定むべき事。

上記の二研究によるもコンクリートの熱傳導度は可成り材質の變化により急激に變化するものなる事が分り其の傾向をも明かに知り得。其の外コンクリートでは吸水状態のものゝの實驗値が必要である。殊に實際問題に於ては含水状態にあるものが多く又年齢小なる期間の値が發熱を擴散せしむる點よりするも重要である筆者が土木試験所にて試験せしものは斯かる方面の問題にも備れてゐる以下補足的に記述せん。

II 章 土木試験所に於ける試験結果

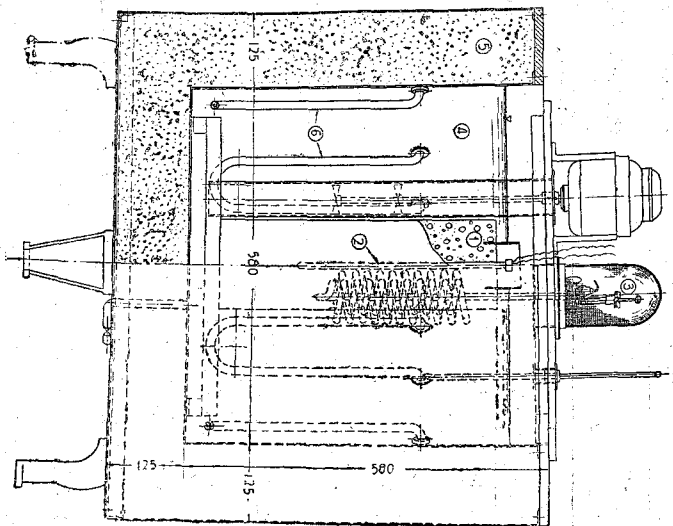
序 説 本試験の目的重要性は緒言第1章に既に述べたから試験條件及び結果のみを述べる配合は道路

名 稱	配 合	W/C 比
基層用コンクリート	1 : 3 : 7	0.8
上層用コンクリート	1 : 1.5 : 3	0.41-0.4
モ ル タ	1 : 3 : 0	0.8
セメントペースト	1 : 1.5 : 0	0.41-0.4
セメントペースト	1 : 0 : 0	0.4
セメントペースト	1 : 0 : 0	0.3



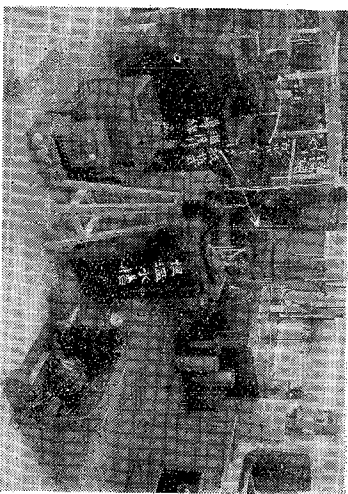
第5圖 供試體の形狀

鋪設用コンクリートを基準として行つたものである。



第6圖 實驗用水槽

淺野ポータラントセメント、砂利、砂共に鬼怒川産のもので配合、 W/O 比は上記表の如きものとす供試體は直径 15 cm、高さ 45 cm の圓筒にその中心部の溫度變化を測る實驗は過渡法により淺田博士のものと全く類似の方法で行つた但し本實驗は含水状態に於て行つたものもあるから溫度傳導率測定値に含水の移動の影響が表れ來らざるや實驗法に週期的法を



寫眞 1

使用するべきは吟味すべき問題あるも一方温度傳導率には比熱の項、ある骨材を含む場合には必ず温度による影響あるを以て透明法を採用する時には平均温度を種々變じ行ふ必要あり、五に一長一短あるも、便宜上過度法を用ひた幸にも水の移動による影響は實驗上表れて來てゐない様で二、三の特性を明かにし得た。

1 節 試驗法の概要 第5圖は供試體の圖面で中心部にサーモカツプルを挿入した。第6圖の如き恒温水槽を2個備へ其の1の温度を常に 18°~20°C 附近の低温度に保ち他の1を 60°C 程度の比較的高温度に保ちつ試料は型枠外し後直ちに低温恒温水槽に常に浸けつつ大略二日毎に高温恒温槽に急に入換へ、温度上昇を抵抗式溫度計にて「ホーキーストン」にて温度を讀む。寫眞第11は全裝置による實驗状態を示すものである、實驗式は至極簡單なもので第7圖の如き標準軸をとりZ軸を圓筒の長さの方向とし其の影響を度外視し得る如く試驗條件を規定すれば、試料初温度を θ_0 とし外部の温度 θ_a なる場合、任意の點(中心より r の距離)の時間 (t) 温度は

$$\theta = \theta_a - (\theta_a - \theta_0) \sum_1 (r) \dots\dots\dots (10)$$

$$\text{の如き式で示される、但し } \sum_1 (r) = \sum_{s=1,2,3}^{\infty} \frac{2}{\lambda_s J_0(\lambda_s)} J_0\left(\frac{\lambda_s r}{a}\right) e^{-h^2 \frac{\lambda_s^2 t}{a^2}}$$

$2a$ = 圓筒の直径 λ_s ; $J_0(\lambda_s) = 0 \dots\dots 1, 2, 3 \dots\dots$ 次の根とす $J_0, J_1 \dots\dots$ は $0, 10 \dots\dots$ 次のベッセル函数 h^2 温度傳導度 $\dots\dots$ を示す。(10) 式より $r = a$ の場の θ の變化を (11) 式の如く示す。

$$u = \frac{\theta_a - \theta}{\theta_a - \theta_0}$$

を求め温度減衰係數と稱し、 $\frac{h^2}{a^2} = h'^2$ との關係を $t = 60$ 秒、 $\dots\dots 6000$ 秒に對し計算しをけば實驗結果を利用する上

に便利である、第 7 圖は例へば

600"秒後には中心温度と外部との差異は $a = 1 \text{ cm}$, $h^2 = 0.00030 \dots$ のものでは 0.56 に減少する。

時間 t と a 半径、温度伝導率 h^2 は $\frac{h^2}{a^2} - t$ の関係にあるから互の單位の採り方で利用範圍は可成り廣汎である。

試験中は常に重

量をも測定して吸

水程度を明かにし

たもので後含水量

の影響を調べた。

2 節 試験結果

約材齡 28 日まで

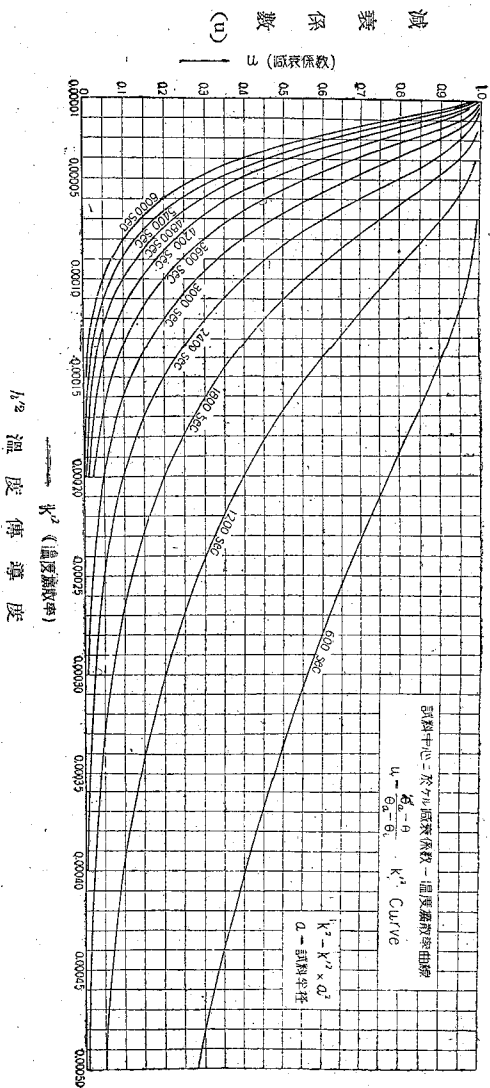
は常に水中養生を

繼續しつつ實驗し

たが28日以後は可

及的一定温度の室

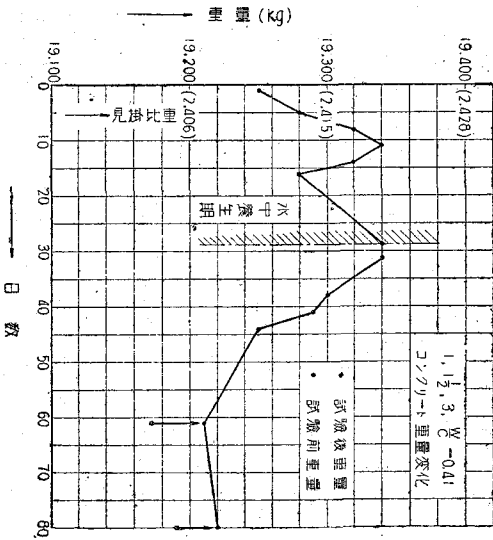
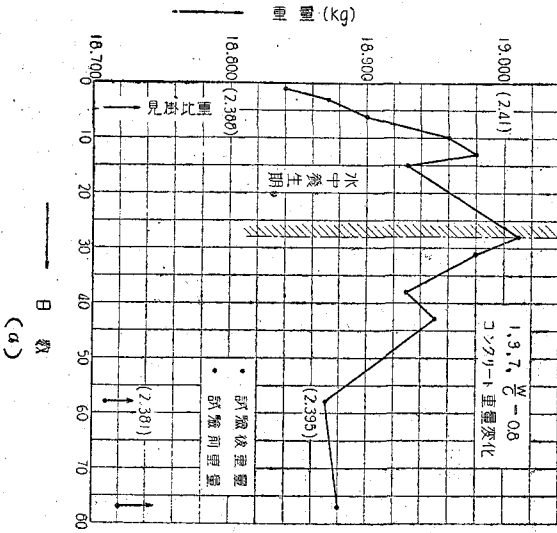
内に放置し高温恒温水槽のみ使用した、従て實驗中に可成り吸水現象を伴ふものである即ち嚴密に云へば外周には一定温度の水が存在するのみならず又高温水が浸入するものである従つて或る意味に於て曖昧なものである、總ての試験の結果



第 7 圖 $u \sim h^2 \dots$ 曲線、但し $h^2 = h^2 \times a^2$

を列挙する事は繁雑になるから、三のもののみを挙げる。

試験期中の重量変化 第8圖 (a) はコンクリートの試験期に於ける重量変化を見掛比重と材齡に關し圖示したもので水中養生期に於ては



第 8 圖

1:3:6, $W/C = 0.8$ のものにては見掛比重 2.389~2.41 程度まで増加し其の後は徐々に減少してゐる、1:1.5:3 W/C

0.41 のものにて、2.41~2.425 程度に増加してゐる、然るに第9圖 (a) (b) のセメントペーストの場合は傾向同様なも其の變化程度は可成り激しく、吸水も著しい様である。第9圖はセメントペーストのものである。

温度傳導率と中心温度の關係 計算法

等は省略するも實驗結果を圖示すれば

第 10 圖 (a) 基層用コンクリート水

中養生期

(b) 室内自然乾燥期

第 11 圖 (a) 上層コンクリート水中

養生期

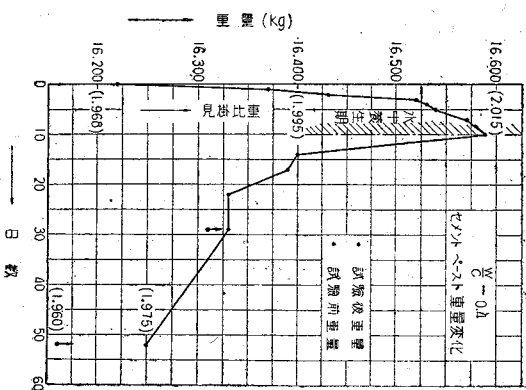
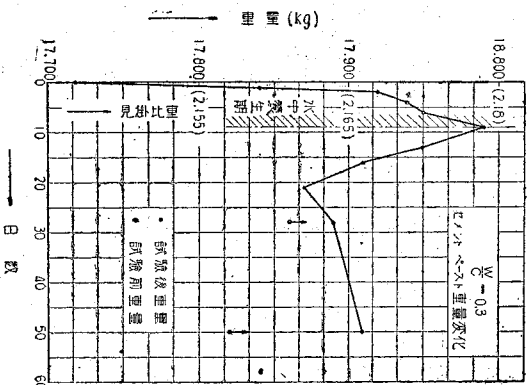
第 12 圖 (a) モルタル水中養生期

(b) " 室内自然乾燥期

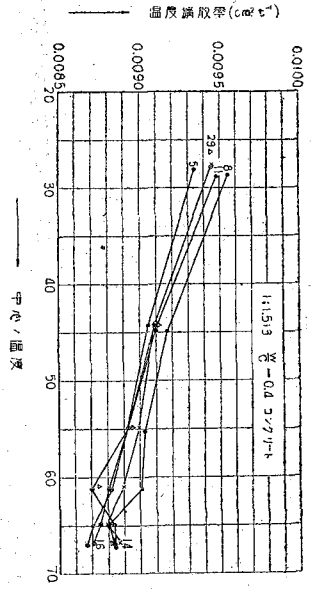
第 13 圖 (a) セメントペースト水中

養生期

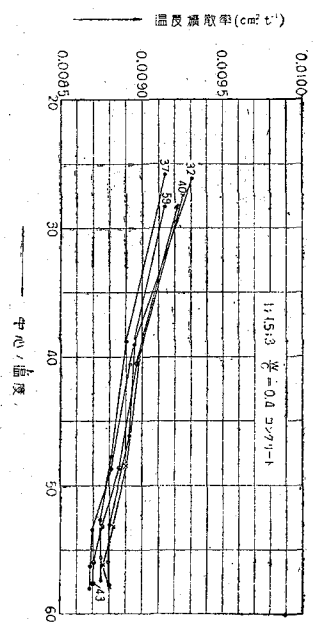
(b) " 室内自然乾燥期



第 9 圖

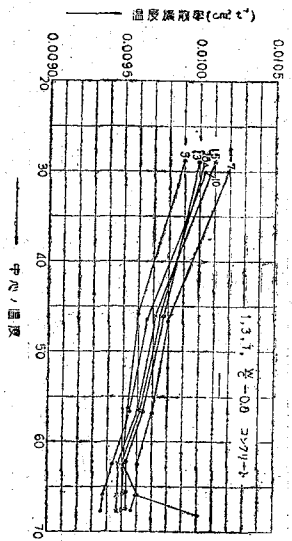


(a)



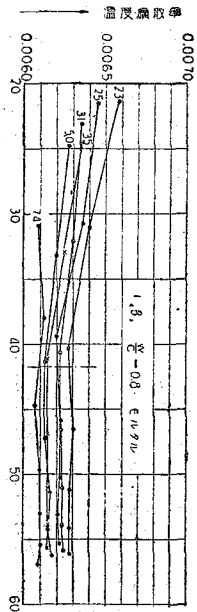
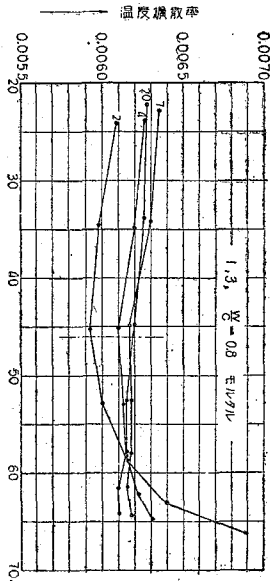
(b)

第 10 圖



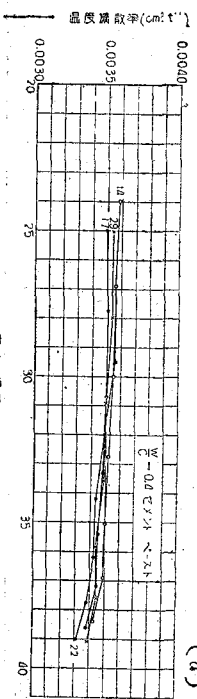
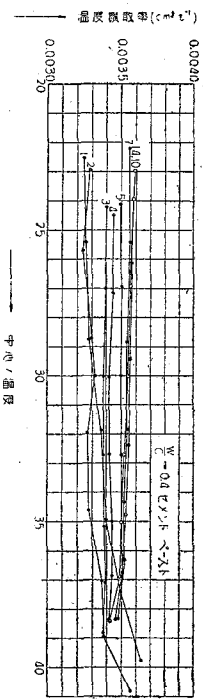
第 11 圖 (a)

の如し
 圖面により中心温度により温
 度傳導率が變る有様が分る。又
 モルタル、コンクリート本資料
 です。k²が増加してゐる。



第 13 圖

以上の圖示せる結果よりコンクリート、モルタルセメントペーストの温度傳導率に關する相互關係を明かにし得るものである。次回に此等に就き述べんとす。



第 13 圖

(b)