

土木試験所報告

第六十五號

勢力式に依る變断面桁の固有振動數を求むる計算法	内務技師 村上 永一	(1)
天然凝結材に關する調査並びに試験 (鹿兒島縣)	内務技手 松本 榮	(15)
二層張り鋪板の載荷試験並に之に 基く下層板の有効幅計算基準	福岡 正己	(43)
指數實驗式の對數を用ふる最小自乘法計算に伴ふ數學的誤差に就いて	内務技手 八木 龜助	(51)
土壤特に黃土の熱的特性に 關する實驗的研究	内務技師 島田 八郎	(69)

昭和十七年三月

內務省土木試験所

土木試験所報告第六十五號正誤表

頁	行	誤	正
1	上ヨリ 10	變化すの曲げモーメント	變化する桁の曲げモーメント
3	上ヨリ 12	重力が速度	重力加速度
13	下ヨリ 8	敘桁	叙桁
著者 村上 永一			

頁	行	誤	正
表紙	上ヨリ 10	(51)	(61)
63	下ヨリ 12		(1)
65	下ヨリ 23	$\varphi(u)\sqrt{\frac{I}{\pi}} \operatorname{he}^{-h^2 u^2}$	$\varphi(u)=\sqrt{\frac{I}{\pi}} \operatorname{he}^{-h^2 u^2}$
著者 八木 龜助			

頁	行	誤	正
1	下ヨリ 4	する影響を 明かにする	よる..... 明かにする.....
1	下ヨリ 14	...られた事...	...られる事...
5	上ヨリ 14	破壊	破壊
19	下ヨリ 2	16 委員会	33 委員会
著者 島田 八郎			

勢力式に依る變断面桁の固有振動數を 求むる計算法

内務技師 村 上 永 一

要 旨

桁の中央に於て對稱的である断面二次率、桁端に向ふに従つて一次的或は二次的に減少する様な實際的な變断面桁の固有振動數の計算法を、剪斷力及び回轉運動の影響を考慮して勢力式に依り求めた。實際の數値を入れた計算は、剪斷力及び回轉運動の影響が極めて小さいから、之を無視した場合に就いて行つた。この結果は、本所横田技師の嚴密解と非常に良く一致してゐる。之に依り本例の近似解の精度が良好なることが分つた。

目 次

I. 緒 言	(1)
II. 勢力式に依る桁の固有振動數の解法	(2)
III. 断面二次率が變化する桁の固有振動數の算定法	(4)
(1) 断面二次率が一次的に變化する場合	(5)
(2) 断面二次率が二次的に變化する場合	(8)
IV. 断面二次率が變化する曲げモーメントのみに依る固有振動數の計算	(10)
(1) 断面二次率が一次的に變化する場合	(10)
(2) 断面二次率が二次的に變化する場合	(11)
(3) 横田技師の計算値との比較	(13)
V. 結 言	(13)

I. 緒 言

橋梁は衝撃を伴ふ移動荷重を受けるに依り靜力學的應力計算に比して遙かに大なる應力を生ずるものであるから、橋梁設計には之等の動力學的條件を考慮して活荷重に衝擊係數を加へたものに依り、動力學的應力を包含せしめんとしてゐる。然るに之の衝擊係數も過大に取れば不經濟となり、過小にとれば危險となる。

橋梁の衝撃に關する問題はその先行荷重に基く強制振動の研究に依つて、その目的の一半を達し得るものであり強制振動の研究に際し、先づその固有振動に關する研究より出發しなければならぬ。即ち強制振動の効化はその固有振動の振動週期と密接なる關係を保つものである。

一方橋梁は振動學的に相當に複雑な構造物であるが、多くの大膽なる假定すれば断面二次率の變化する桁と見做し、回轉慣性及び剪斷力の影響を考慮すればよいことになる。而して死荷重の分布は床部死荷重が桁死荷重に比して大であり(道路橋に於て)、等間隔なる横桁により床部死荷重は桁に傳達せられるに依り振動學的には等分布と近似的に見做しうる。

斯くの如く單化した橋梁もその走行荷重に依る強制振動を取扱ふ上に於て更に一段と簡易化する必要がある。即ち断面二次率の一定なる桁としなければならぬ。茲に断面二次率の變化する桁と振動學的に等値である一定断面二次率の桁を求むる必要が生じた。

振動學的に等値なる一定断面二次率桁は固有振動數の等しい桁であらねばならぬ。依つて變断面二次率の固有

振動数を求めることがその第一歩として必要となつた。

茲に述べる變斷桁の固有振動数は勢力式に依り求めたものであり、勢力式の使用に於ては先づ振動の模型を假定しなければならず、振動の總勢力を最小値ならしめることにより嚴密解に很なく近づきうるが、勢力式に依る解は尙く近似解たるの性質を失はない。

然し適當なる函数を選ぶことにより案外容易に嚴密解に近きうことは、本所横田技師の行はれた基礎微分方程式の嚴密解の結果と比較して明かである。

II. 勢力式に依る桁の固有横振動数の解法

振動する桁の横は、桁が正規型振動を行ふときは時間的に正弦波に變化し次の型で表はし得る。

$$y = X \cos \omega t$$

X は今考へてゐる正規振動の形狀を決定する座標 x のみの函数であり、振動中の各點の最大の横を與へる。但し ω は圓振動数であるから、1 秒間の振動数は $\frac{\omega}{2\pi}$ である。

振動する桁が單純桁の場合はその總勢力は次の 4 個の勢力より成立する。(1) 曲げモーメントに依る變形仕事の勢力。(2) 剪斷力に依る變形仕事の勢力。(3) 垂直機振動に依る運動の勢力。(4) 回転運動の勢力。

この内 (1), (2) は位置の勢力であり、(3), (4) は運動の勢力である。(2) 及び (4) の勢力は (1) 及び (3) の勢力に比して小さいもので、之らの關係を實際上に於て考慮しない場合もある。然し橋樑の如く剪斷剛性を無視し得ないもの、及び桁の細長比の小さいものにあつては、(2) 及 (4) の勢力の役割も大きくなつて来る。

桁の振動の横の内曲げモーメントに依るものを ξ 、剪斷力に依るものを ζ とすれば

$$X = \xi + \zeta$$

として與へられる。

(1) 曲げモーメントに依る變形仕事の勢力。

$$A_1 = \frac{1}{2} \int_{-l}^{+l} EI(x) \left(\frac{d^2 \xi}{dx^2} \right)^2 dx = \frac{EI}{2} \int_{-l}^{+l} I_{\infty} \left(\frac{d^2 X}{dx^2} - \frac{d^2 \zeta}{dx^2} \right)^2 dx \dots \dots \dots (1)$$

E : 材料の彈性係數

I_{∞} : x 點の斷面の斷面二次率

(2) 剪斷力に依る變形仕事の勢力。

$$A_2 = \int_{-l}^{+l} \alpha \frac{S^2(\omega)}{2GA_{\infty}} dx \dots \dots \dots (2)_1$$

$$\alpha = \frac{A_{\infty}}{S^2(\omega)} \int_{(A)} \tau^2 dA$$

$S(\omega)$: x 點の剪斷力。

τ : 剪斷應力。

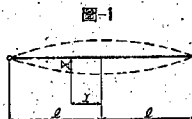
A_{∞} : x 點の斷面積。

G : 剪斷彈性係數。

剪斷應力と剪斷歪との間には次の式が成立する。

$$\frac{d\zeta}{dx} = \frac{1}{S_{\infty} G} \int_{(A)} \tau^2 dA \dots \dots \dots (2)_2$$

(2)



剪断力と剪断歪との間には次の式が成立す。

$$S = k_{(\omega)} A_{(\omega)} G \frac{d\zeta}{dx} \quad (2)_3$$

この兩式を (2)₁ に使用すれば

$$A_2 = \int_{-1}^{+1} \frac{k_{(\omega)} A_{(\omega)} G}{2} \left(\frac{d\zeta}{dx} \right)^2 dx \quad (2)_4$$

桁の微小部分の縦方向の直線運動に對する微分方程式は

$$\frac{\partial S}{\partial x} dx = -\frac{m}{g} \left(\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} \right)_{\max} dx \quad (2)_5$$

(2)₃, (2)₅ より

$$\frac{d\zeta}{dx} = \frac{m}{g} \frac{1}{k_{(\omega)} A_{(\omega)} G} \int_0^x \left(\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} \right)_{\max} dx \quad (2)_6$$

$y = X \cos \omega t$ なるにより,

$$\frac{d\zeta}{dx} = -\frac{m}{g} \frac{\omega^2}{k_{(\omega)} A_{(\omega)} G} \int_0^x X dx \quad (2)_7$$

m : 桁の單位當りの荷重, この場合常数とす。

g : 重力加速度。

$$\frac{1}{k_{(\omega)} A_{(\omega)} G} = \beta_{(\omega)} \quad \text{とすれば}$$

$$(2)_4 \text{ は } A_2 = \int_{-1}^{+1} \frac{1}{2\beta_{(\omega)}} \left(\frac{d\zeta}{dx} \right)^2 dx \quad (2)$$

$$(2)_7 \text{ は } \frac{d\zeta}{dx} = -\frac{m}{g} \beta_{(\omega)} \omega^2 \int_0^x X dx \quad (3)$$

3. 垂直撓振動に依る運動の勢力。

$$A_3 = -\frac{m}{2g} \int_{-1}^{+1} \omega^2 X^2 dx \quad (4)$$

4. 振動に依る回轉運動の勢力。

$$A_4 = -\frac{m}{2g} \omega^2 \int_{-1}^{+1} i_{(\omega)}^2 \left(\frac{d\zeta}{dx} \right)^2 dx = -\frac{m}{2g} \omega^2 \int_{-1}^{+1} i_{(\omega)}^2 \left(\frac{dX}{dx} - \frac{d\zeta}{dx} \right)^2 dx$$

$i_{(\omega)}$: x 點の斷面の回轉半徑。

回轉運動による影響は小さいから $\frac{d\zeta}{dx}$ は $\frac{dX}{dx}$ に對して無視し得る。

$$A_4 = -\frac{m}{2g} \omega^2 \int_{-1}^{+1} i_{(\omega)}^2 \left(\frac{dX}{dx} \right)^2 dx \quad (5)$$

振動する桁の總勢力は

$$A = A_1 + A_0 + A_3 + A_4 = \frac{J^2}{2} \int_{-1}^{+1} I_{(\omega)} \left(\frac{d^2 X}{dx^2} - \frac{d^2 \zeta}{dx^2} \right)^2 dx + \int_{-1}^{+1} \frac{1}{2\beta_{(\omega)}} \left(\frac{d\zeta}{dx} \right)^2 dx$$

$$- \frac{m}{2g} \omega^2 \int_{-1}^{+1} i_{(\omega)}^2 \left(\frac{dX}{dx} \right)^2 dx - \frac{m}{2g} \omega^2 \int_{-1}^{+1} X^2 dx \quad (6)$$

振動する系はその総勢力が極小なる様に振動する。今振動変型に $X = a_1 f_1(x)$ なる函数を與ふれば、(3) の関係式より $\frac{d\mathcal{L}}{dx}$ も決まり総勢力を求められる。総勢力極小なる條件より

$$\frac{\partial A}{\partial a_1} = 0$$

未知数として ω のみを含む方程式を得るに依り ω の最小根はこの系の第一次基本型振動数を與ふ。

而して $f_1(x)$ が實際の振動変型と一致したものであるならば、斯くして求め得た ω は眞の振動数を與へる。 $f_1(x)$ が實際の振動変型と一致しない場合には振動の総勢力は常に實際の総勢力より大きくなり、振動数は實際のものより大きく出る。即ち振動変型をパラメーター一個を含む式に假定することは自由度一個を含む振動系とすることである。然るに弾性體の振動は無限個の自由度を有する振動系であるから、無限個のパラメーターを含む式を振動変型に與へねばならぬ。然し適當なる函数（眞の振動変型に早く収斂するもの）を選べば、數個のパラメーターを含む式により實用上充分正確なる近似解をうる。

$$x = a_1 f_1(x) + a_2 f_2(x) + a_3 f_3(x) + \dots$$

と假定し、総勢力 A を計算し

$$\frac{\partial A}{\partial a_1} = 0 \quad \frac{\partial A}{\partial a_2} = 0 \quad \frac{\partial A}{\partial a_3} = 0 \dots\dots$$

より n 個の聯立方程式を得る。これより $a_1 a_2 a_3 \dots$ を消去し ω のみを含む式より ω を決定し得る。

剪斷力及び回轉運動の影響を無視した場合の定斷面二次率桁の振動変型は、坐標の原點を桁中央に取つた時

$$X = a_1 \cos \frac{\pi x}{2l}$$

である。變斷面二次率の場合も之を基本として考へれば、右左對稱形の振動に對して

$$X = a_1 \cos \frac{\pi x}{2l_1} + a_3 \cos \frac{3\pi x}{2l_1} + a_5 \cos \frac{5\pi x}{2l_1} + \dots\dots\dots (7)$$

とおきうる。この振動変型は單桁としての境界條件を滿足する。

兩支點で撓は零

$$(X)_{x=\pm l} = 0$$

兩支點で曲げモーメントが零

$$\left(\frac{d^2 x}{dx^2} \right)_{x=\pm l} = 0$$

III. 斷面二次率が變化する桁の固有横振動數の算定法

桁の斷面二次率が變化する桁は、理論上剪斷剛性及び斷面の回轉半徑も變化するものであるが、剪斷剛性及び斷面の回轉半徑の影響は全體として小さく、而も鉸桁の如き場合には變化も著しくないから定數として計算を進める。

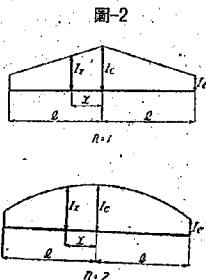
斷面二次率の變化は桁中央を中心として右左對稱的に變化するものとし、中央斷面二次率を基準として一次的或は二次的に減少する場合について算定法を導く

圖-2 の如く坐標を取れば

$$I_x = I_c - (I_c - I_0) \left(\frac{x}{l} \right)^n$$

I_x : 中央より x なる距離の斷面二次率

I_c : 中央の斷面二次率



I_e : 桁端の断面二次率

n : 1 又は 2

$1 - \frac{I_1}{I_e} = \alpha$ とおけば

$$I_x = I_e \left\{ 1 - \alpha \left(\frac{x}{l} \right)^n \right\} \dots \dots \dots (8)$$

依つて振動の總勢力は次の如くなる。

$$A = \frac{EI_e}{2} \int_{-1}^{+1} \left\{ 1 - \alpha \left(\frac{x}{l} \right)^n \right\} \left(\frac{d^2 X}{dx^2} - \frac{d^2 \zeta}{dx^2} \right) dx + \frac{1}{2\beta} \int_{-1}^{+1} \left(\frac{d\zeta}{dx} \right)^2 dx - \frac{m}{2y} \omega^2 \int_{-1}^{+1} X^2 dx$$

$$- \frac{m}{2g} \omega^2 \int_{-1}^{+1} X \left(\frac{dX}{dx} \right)^2 dx$$

$$\text{但し } \frac{d\zeta}{dx} = -\frac{m}{g} \beta \omega^2 \int_0^x X dx$$

[1] 断面二次率が一次的に変化する場合

(8).....より.

$$I_x = \left(1 - \alpha \frac{x}{l} \right) I_e$$

(7).....より

$$X = a_1 \cos \frac{\pi x}{2l} + a_3 \cos \frac{3\pi x}{2l} + a_5 \cos \frac{5\pi x}{2l} + \dots$$

$$\frac{d\zeta}{dx} = -\frac{m}{g} \beta \omega^2 \int_0^x X dx$$

$$= -\frac{m}{g} \beta \omega^2 \left(\frac{2l}{\pi} a_1 \sin \frac{\pi x}{2l} + \frac{2l}{3\pi} a_3 \sin \frac{3\pi x}{2l} + \frac{2l}{5\pi} a_5 \sin \frac{5\pi x}{2l} + \dots \right)$$

$$\frac{d^2 \zeta}{dx^2} = -\frac{m}{g} \beta \omega^2 \left(a_1 \cos \frac{\pi x}{2l} + a_3 \cos \frac{3\pi x}{2l} + a_5 \cos \frac{5\pi x}{2l} + \dots \right)$$

$$\frac{d^2 X}{dx^2} = -\frac{\pi^2}{4l^2} \left(a_1 \cos \frac{\pi x}{2l} + a_3 \cos \frac{3\pi x}{2l} + a_5 \cos \frac{5\pi x}{2l} + \dots \right)$$

$$A_1 = \frac{EI_e}{2} \int_{-1}^{+1} \left\{ 1 - \alpha \left(\frac{x}{l} \right) \right\} \left\{ \left(\frac{d^2 X}{dx^2} - \frac{d^2 \zeta}{dx^2} \right)^2 \right. \\ \left. = EI_e \int_0^{+1} \left(1 - \alpha \frac{x}{l} \right) \left[\left\{ \left(\frac{\pi^2}{4l^2} - \frac{m}{g} \beta \omega^2 \right) a_1 \cos \frac{\pi x}{2l} \right. \right. \right. \\ \left. \left. + \left(\frac{9\pi^2}{4l^2} - \frac{m}{g} \beta \omega^2 \right) a_3 \cos \frac{3\pi x}{2l} + \left(\frac{25\pi^2}{4l^2} - \frac{m}{g} \beta \omega^2 \right) a_5 \cos \frac{5\pi x}{2l} \right\}^2 dx \right. \\ \left. + \left(\frac{3\pi^2}{4l^2} - \frac{m}{g} \beta \omega^2 \right) a_1^2 + \left(\frac{9\pi^2}{4l^2} - \frac{m}{g} \beta \omega^2 \right) a_3^2 + \left(\frac{25\pi^2}{4l^2} - \frac{m}{g} \beta \omega^2 \right) a_5^2 + \dots \right] dx$$

$$B_1 = \frac{\pi^2}{4l^2} - \frac{m}{g} \beta \omega^2 \quad \text{とおけば}$$

$$A_1 = EI_e \int_0^{+1} \left(1 - \alpha \frac{x}{l} \right) \left(B_1 a_1 \cos \frac{\pi x}{2l} + B_3 a_3 \cos \frac{3\pi x}{2l} + B_5 a_5 \cos \frac{5\pi x}{2l} + \dots \right)^2 dx$$

$$A_2 = \frac{1}{2\beta} \int_{-1}^{+1} \left(\frac{d\zeta}{dx} \right)^2 dx$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{m^2}{g^2} \beta \omega^4 \int_0^l \left(\frac{2l}{\pi} a_1 \sin \frac{\pi x}{2l} + \frac{2l}{3\pi} a_3 \sin \frac{3\pi x}{2l} + \frac{2l}{5\pi} a_5 \sin \frac{5\pi x}{2l} + \dots \right)^2 dx \\
A_3 &= -\frac{m}{2g} \omega^2 \int_{-1}^{+1} \lambda^2 dx \\
&= -\frac{m}{g} \omega^2 \int_0^{+1} \left(a_1 \cos \frac{\pi x}{2l} + a_3 \cos \frac{3\pi x}{2l} + a_5 \cos \frac{5\pi x}{2l} + \dots \right)^2 dx \\
A_4 &= -\frac{\omega^2 m}{2g} \int_{-1}^{+1} i^2 \left(\frac{dX}{dx} \right)^2 dx \\
&= -\omega^2 \frac{m}{g} i^2 \int_0^{+1} \left(\frac{\pi}{2l} a_1 \sin \frac{\pi x}{2l} + \frac{3\pi}{2l} a_3 \sin \frac{3\pi x}{2l} + \dots \right)^2 dx \\
\frac{\partial A}{\partial \alpha_n} &= 2EI_c \int_0^l \left\{ B_n B_1 a_1 \left(\cos \frac{n\pi x}{2l} \cos \frac{\pi x}{2l} - \frac{\alpha}{l} x \cos \frac{n\pi x}{2l} \cos \frac{\pi x}{2l} \right) + B_n B_3 a_3 \left(\cos \frac{n\pi x}{2l} \cos \frac{3\pi x}{2l} \right. \right. \\
&\quad \left. \left. - \frac{\alpha}{l} x \cos \frac{n\pi x}{2l} \cos \frac{3\pi x}{2l} \right) + B_n B_5 a_5 \left(\cos \frac{n\pi x}{2l} \cos \frac{5\pi x}{2l} - \frac{\alpha}{l} x \cos \frac{n\pi x}{2l} \cos \frac{5\pi x}{2l} \right) + \dots \right\} dx \\
&+ 2 \frac{m^2}{g^2} \omega^4 \beta \int_0^l \left(\frac{2l}{n\pi} \cdot \frac{2l}{\pi} a_1 \sin \frac{n\pi x}{2l} \sin \frac{\pi x}{2l} + \frac{2l}{n\pi} \frac{2l}{3\pi} a_3 \sin \frac{n\pi x}{2l} \sin \frac{3\pi x}{2l} \right. \\
&\quad \left. + \frac{2l}{n\pi} \frac{2l}{5\pi} a_5 \sin \frac{n\pi x}{2l} \sin \frac{5\pi x}{2l} + \dots \right) dx - 2 \frac{m}{g} \omega^2 \int_0^l \left(a_1 \cos \frac{n\pi x}{2l} \cos \frac{\pi x}{2l} + a_3 \cos \frac{n\pi x}{2l} \cos \frac{3\pi x}{2l} \right. \\
&\quad \left. + a_5 \cos \frac{n\pi x}{2l} \cos \frac{5\pi x}{2l} + \dots \right) dx - 2 \frac{m}{g} i^2 \omega^2 \int_0^l \left(\frac{n\pi}{2l} \frac{\pi}{2l} a_1 \sin \frac{n\pi x}{2l} \sin \frac{\pi x}{2l} \right. \\
&\quad \left. + \frac{n\pi}{2l} \frac{3\pi}{2l} a_3 \sin \frac{n\pi x}{2l} \sin \frac{3\pi x}{2l} + \dots \right) dx \dots \dots \dots (9)
\end{aligned}$$

茲に於て

$$\begin{aligned}
\int_0^l \cos \frac{n\pi x}{2l} \cos \frac{\pi x}{2l} dx &= \int_0^l \sin \frac{n\pi x}{2l} \cos \frac{n\pi x}{2l} dx = \frac{1}{2} \left[x + \frac{l}{2n\pi} \sin \frac{n\pi x}{l} \right]_0^l = \frac{l}{2} \\
\int_0^l \cos \frac{m\pi x}{2l} \cos \frac{n\pi x}{2l} dx &= \int_0^l \sin \frac{m\pi x}{2l} \cos \frac{n\pi x}{2l} dx = 0 \quad \text{但し } m \neq n \\
\int_0^l x \cos \frac{n\pi x}{2l} \cos \frac{\pi x}{2l} dx &= \left[\frac{x^2}{4} + \frac{1}{2} x \frac{l}{n\pi} \sin \frac{n\pi x}{l} + \frac{1}{2} \frac{l^2}{n^2 \pi^2} \cos \frac{n\pi x}{l} \right]_0^l = \frac{l^2}{4} - \frac{l^2}{(n\pi)^2} \\
\int_0^l x \cos \frac{m\pi x}{2l} \cos \frac{n\pi x}{2l} dx &= \left[\frac{x}{2} \frac{2l}{(m-n)\pi} \sin \frac{(m-n)\pi x}{2l} + \frac{2l}{(m+n)\pi} \sin \frac{(m+n)\pi x}{2l} \right. \\
&\quad \left. + \frac{1}{2} \left\{ \frac{2l}{(m-n)\pi} \right\}^2 \cos \frac{(m-n)\pi x}{2l} + \frac{1}{2} \left\{ \frac{2l}{(m+n)\pi} \right\}^2 \cos \frac{(m+n)\pi x}{2l} \right]_0^l
\end{aligned}$$

$\frac{m-n}{2}$ が奇数なれば、 $\frac{m+n}{2}$ は偶数となり、

$$\int_0^l x \cos \frac{m\pi x}{2l} \cos \frac{n\pi x}{2l} dx = - \left\{ \frac{2l}{(m-n)\pi} \right\}^2$$

$\frac{m-n}{2}$ が偶数なれば、 $\frac{m+n}{2}$ は奇数となり、

$$\int_0^l x \cos \frac{m\pi x}{2l} \cos \frac{n\pi x}{2l} dx = -\left\{ \frac{2l}{(m+n)\pi} \right\}^2$$

を利用すれば

$$\begin{aligned} \frac{\partial A}{\partial a_1} = & 2EI_c \left[B_1^2 a_1 \left\{ \frac{l}{2} - \frac{\alpha}{l} \left(\frac{l^2}{4} - \frac{l^2}{\pi^2} \right) \right\} + B_1 B_3 a_3 \frac{\alpha}{l} \frac{l^2}{\pi^2} + B_1 B_5 a_5 \frac{\alpha}{l} \frac{l^2}{3^2 \pi^2} + \dots \right] \\ & + 2 \frac{m^2}{g^2} \beta \omega^4 \frac{4l^2}{\pi^2} \cdot \frac{l}{2} a_1 - 2 \frac{m}{g} \omega^2 \frac{l}{2} a_1 - 2 \omega^2 \frac{m}{g} i^2 \left(\frac{\pi}{2l} \right)^2 \frac{l}{2} a_1 = 0 \\ \left\{ EI_c B_1^2 \left(1 - \frac{\alpha}{2} + \frac{2\alpha}{\pi^2} \right) + \frac{m^2}{g^2} \beta \frac{4l^2}{\pi^2} \omega^4 - \frac{m}{g} i^2 \frac{\pi^2}{4l^2} \omega^2 - \frac{m}{g} \omega^2 \right\} a_1 & + B_1 B_3 \frac{2\alpha}{\pi^2} a_3 \\ & + B_1 B_5 \frac{2\alpha}{3^2 \pi^2} a_5 + B_1 B_7 \frac{2\alpha}{3^2 \pi^2} a_7 + \dots = 0 \quad \dots \dots \dots (10) \end{aligned}$$

同様に

$$\begin{aligned} \frac{\partial A}{\partial a_3} = 0 \quad \text{より} \\ B_3 B_1 \frac{2\alpha}{\pi^2} a_1 + \left\{ EI_c B_3^2 \left(1 - \frac{\alpha}{2} + \frac{2\alpha}{3^2 \pi^2} \right) + \frac{m^2}{g^2} \beta \frac{4l^2}{3^2 \pi^2} \omega^4 - \frac{m}{g} i^2 \frac{3^2 \pi^2}{4l^2} \omega^2 - \frac{m}{g} \omega^2 \right\} a_3 \\ + B_3 B_5 \frac{2\alpha}{\pi^2} a_5 + B_3 B_7 \frac{2\alpha}{5^2 \pi^2} a_7 + \dots = 0 \quad \dots \dots \dots (11) \end{aligned}$$

$$\frac{\partial A}{\partial a_5} = 0 \quad \text{より,}$$

$$\begin{aligned} B_5 B_1 \frac{2\alpha}{3^2 \pi^2} a_1 + B_5 B_3 \frac{2\alpha}{\pi^2} a_3 + \left\{ EI_c B_5^2 \left(1 - \frac{\alpha}{2} + \frac{2\alpha}{5^2 \pi^2} \right) + \frac{m^2}{g^2} \beta \frac{4l^2}{5^2 \pi^2} \omega^4 - \frac{m}{g} i^2 \frac{5^2 \pi^2}{4l^2} \omega^2 \right. \\ \left. - \frac{m}{g} \omega^2 \right\} a_5 + B_5 B_7 \frac{2\alpha}{\pi^2} a_7 + \dots = 0 \quad \dots \dots \dots (12) \end{aligned}$$

$$\frac{\partial A}{\partial a_7} = 0 \quad \text{より}$$

$$\begin{aligned} B_7 B_1 \frac{2\alpha}{3^2 \pi^2} a_1 + B_7 B_3 \frac{2\alpha}{3^2 \pi^2} a_3 + B_7 B_5 \frac{2\alpha}{\pi^2} a_5 + \left\{ EI_c B_7^2 \left(1 - \frac{\alpha}{2} + \frac{2\alpha}{7^2 \pi^2} \right) + \frac{m^2}{g^2} \beta \frac{4l^2}{7^2 \pi^2} \omega^4 \right. \\ \left. - \frac{m}{g} i^2 \frac{7^2 \pi^2}{4l^2} \omega^2 - \frac{m}{g} \omega^2 \right\} a_7 + \dots = 0 \quad \dots \dots \dots (13) \end{aligned}$$

上式より $a_1, a_3, a_5, a_7, \dots$ を消去すれば

$$\begin{vmatrix} \Delta_{11} & B_1 B_3 \frac{2\alpha}{\pi^2} & B_1 B_5 \frac{2\alpha}{3^2 \pi^2} & B_1 B_7 \frac{2\alpha}{3^2 \pi^2} & \dots \\ B_3 B_1 \frac{2\alpha}{\pi^2} & \Delta_{33} & B_3 B_5 \frac{2\alpha}{\pi^2} & B_3 B_7 \frac{2\alpha}{5^2 \pi^2} & \dots \\ B_5 B_1 \frac{2\alpha}{3^2 \pi^2} & B_5 B_3 \frac{2\alpha}{\pi^2} & \Delta_{55} & B_5 B_7 \frac{2\alpha}{\pi^2} & \dots \\ B_7 B_1 \frac{2\alpha}{3^2 \pi^2} & B_7 B_3 \frac{2\alpha}{3^2 \pi^2} & B_7 B_5 \frac{2\alpha}{\pi^2} & \Delta_{77} & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \end{vmatrix} = 0 \quad \dots \dots \dots (14)$$

$$\text{但し} \quad B_n = n^2 \frac{\pi^2}{4l^2} - \frac{m}{g} \beta \omega^2$$

$$\Delta_{nn} = EI_c B_n^2 \left(1 - \frac{\alpha}{2} + \frac{2\alpha}{(n\pi)^2} \right) + \frac{m^2}{g^2} \beta \frac{4l^2}{(n\pi)^2} \omega^4 - \frac{m}{g} i^2 \frac{(n\pi)^2}{4l^2} \omega^2 - \frac{m}{g} \omega^2$$

(14) 式は未知数として ω のみを有する方程式であるから、(14) 式の解として ω は求められる。このより小なる ω が第一次基本振動数と與へるものである。

断面二次率²が一定である桁の剪断力、及回転運動の影響を無視した場合の振動数は、(14)式に於て

$$\alpha=0 \quad \beta=0 \quad i=0 \quad \text{とおけば}$$

$$(1^4-k^2)(3^4-k^2)(5^4-k^2)(7^4-k^2)=0$$

但し

$$k^2 = \frac{m}{y} \omega^2 \frac{(2l)^2}{\pi^4} \cdot \frac{1}{EI_c}$$

となり、第一次基本振動数は $k=1$ にして即ち次の如くなる。

$$\omega = \frac{\pi^2}{(2l)^2} \sqrt{\frac{EI_c}{m/g}}$$

$k=3^2, 5^2, 7^2$ は振動型が中央に對し左右對稱なる高次の基本振動数と與へる

[2] 断面二次率²が二次的に變化する場合

(8) より

$$I_x = \left(1 - \alpha \frac{x^2}{l^2}\right) I_0$$

(7) より

$$X = a_1 \cos \frac{\pi x}{2l} + a_3 \cos \frac{3\pi x}{2l} + a_5 \cos \frac{5\pi x}{2l} + \dots$$

$$\frac{d^2 X}{dx^2} = -\frac{m}{y} \beta \omega^2 \left(\frac{2l}{\pi} a_1 \sin \frac{\pi x}{2l} + \frac{2l}{3\pi} a_3 \sin \frac{3\pi x}{2l} + \dots \right)$$

$$\frac{d^2 X}{dx^2} = -\frac{m}{y} \beta \omega^2 \left(a_1 \cos \frac{\pi x}{2l} + a_3 \cos \frac{3\pi x}{2l} + a_5 \cos \frac{5\pi x}{2l} + \dots \right)$$

$$\frac{d^2 X}{dx^2} = -\frac{\pi^2}{4l^2} \left(a_1 \cos \frac{\pi x}{2l} + a_3 \cos \frac{3\pi x}{2l} + a_5 \cos \frac{5\pi x}{2l} + \dots \right)$$

$$A_1 = \frac{EI_0}{2} \int_{-l}^{+l} \left\{ 1 - \alpha \left(\frac{x}{l} \right)^2 \right\} \left(\frac{d^2 X}{dx^2} - \frac{d^2 X}{dx^2} \right) dx$$

$$= EI_0 \int_{-l}^{+l} \left\{ 1 - \alpha \left(\frac{x}{l} \right)^2 \right\} \left\{ \frac{\pi^2}{4l^2} - \frac{m}{y} \beta \omega^2 \right\} a_1 \cos \frac{\pi x}{2l} + \left\{ 3^2 \frac{\pi^2}{4l^2} - \frac{m}{y} \beta \omega^2 \right\} a_3 \cos \frac{3\pi x}{2l} + \left\{ 5^2 \frac{\pi^2}{4l^2} - \frac{m}{y} \beta \omega^2 \right\} a_5 \cos \frac{5\pi x}{2l} + \dots \right)^2 dx$$

$$B_n = n^2 \frac{\pi^2}{4l^2} - \frac{m}{y} \beta \omega^2 \quad \text{とおけば}$$

$$A_1 = EI_0 \int_{-l}^{+l} \left\{ 1 - \alpha \left(\frac{x}{l} \right)^2 \right\} \left(B_1 a_1 \cos \frac{\pi x}{2l} + B_3 a_3 \cos \frac{3\pi x}{2l} + B_5 a_5 \cos \frac{5\pi x}{2l} + \dots \right)^2 dx$$

$$A_2 = \frac{1}{2\beta} \int_{-l}^{+l} \left(\frac{d^2 X}{dx^2} \right)^2 dx = \frac{m^2}{g^2} \beta \omega^4 \int_{-l}^{+l} \left(\frac{2l}{\pi} a_1 \sin \frac{\pi x}{2l} + \frac{2l}{3\pi} a_3 \sin \frac{3\pi x}{2l} + \dots \right)^2 dx$$

$$A_3 = -\frac{m}{g} \omega^2 \int_{-l}^{+l} \left(a_1 \cos \frac{\pi x}{2l} + a_3 \cos \frac{3\pi x}{2l} + a_5 \cos \frac{5\pi x}{2l} + \dots \right)^2 dx$$

$$A_4 = -\frac{\omega^2 m^2}{g} \int_{-l}^{+l} \left(\frac{\pi}{2l} a_1 \sin \frac{\pi x}{2l} + \frac{3\pi}{2l} a_3 \sin \frac{3\pi x}{2l} + \dots \right)^2 dx$$

$$\frac{\partial A}{\partial a_n} = 2EI_0 \int_{-l}^{+l} \left\{ B_n B_1 a_1 \left(\cos \frac{n\pi x}{2l} \cos \frac{\pi x}{2l} - \alpha \left(\frac{x}{l} \right)^2 \cos \frac{n\pi x}{2l} \cos \frac{\pi x}{2l} \right) \right.$$

$$\begin{aligned}
 & + B_n B_{2n} \left(\cos \frac{n\pi x}{2l} \cos \frac{3\pi x}{2l} - \alpha \left(\frac{x}{l} \right)^2 \cos \frac{n\pi x}{2l} \cos \frac{\pi x}{2l} \right) \\
 & + B_n B_{4n} \left(\cos \frac{n\pi x}{2l} \cos \frac{5\pi x}{2l} - \alpha \left(\frac{x}{l} \right)^2 \cos \frac{n\pi x}{2l} \cos \frac{3\pi x}{2l} \right) \\
 & + \dots \left\{ dx + 2 \frac{m^2}{g^2} \omega^4 \beta \int_0^l \left(\frac{2l}{n\pi} \frac{2l}{\pi} a_1 \sin \frac{n\pi x}{2l} \sin \frac{n\pi}{2l} + \frac{2l}{n\pi} \frac{2l}{3\pi} a_3 \sin \frac{n\pi x}{2l} \sin \frac{3\pi x}{2l} \right. \right. \\
 & \left. \left. + \dots \right) dx - 2 \frac{m}{g} \omega^2 \int_0^l \left(a_1 \cos \frac{n\pi x}{2l} \cos \frac{\pi x}{2l} + a_3 \cos \frac{n\pi x}{2l} \cos \frac{3\pi x}{2l} \right. \right. \\
 & \left. \left. + a_5 \cos \frac{n\pi x}{2l} \cos \frac{5\pi x}{2l} + \dots \right) dx - 2 \frac{m}{g} i^2 \omega^2 \int_0^l \left(\frac{n\pi}{2l} \frac{\pi}{2l} \sin \frac{n\pi x}{2l} \sin \frac{\pi x}{2l} \right. \right. \\
 & \left. \left. + \frac{n\pi}{2l} \frac{3\pi}{2l} \sin \frac{n\pi x}{2l} \sin \frac{3\pi x}{2l} + \dots \right) dx \dots \dots \dots (15)
 \end{aligned}$$

茲に

$$\begin{aligned}
 \int_0^l \cos \frac{n\pi x}{2l} \cos \frac{n\pi x}{2l} &= \int_0^l \sin \frac{n\pi n}{2l} \sin \frac{n\pi x}{2l} = \frac{l}{2} \\
 \int_0^l \cos \frac{n\pi x}{2l} \cos \frac{m\pi x}{2l} &= \int_0^l \sin \frac{n\pi x}{2l} \sin \frac{m\pi x}{2l} = 0 \quad \text{但し } m \neq n \\
 \int_0^l x^2 \cos \frac{n\pi x}{2l} \cos \frac{n\pi x}{2l} &= \frac{l^3}{6} + (-1)^n \frac{l^3}{(n\pi)^2} \\
 \int_0^l x^2 \cos \frac{m\pi x}{2l} \cos \frac{n\pi x}{2l} &= (-1)^{\frac{m-n}{2}} \frac{l^3}{\left(\frac{m-n}{2} \pi \right)^2} + (-1)^{\frac{m+n}{2}} \frac{l^3}{\left(\frac{m+n}{2} \pi \right)^2}
 \end{aligned}$$

を用ふれば

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial A}{\partial a_1} = 0 \quad \text{より} \\
 \left\{ EI_0 B_1 \left(1 - \frac{\alpha}{3} + \frac{2\alpha}{\pi^2} \right) + \frac{m^2}{g^2} \beta \frac{4l^2}{\pi^2} \omega^4 - \frac{m}{g} i^2 \frac{\pi^2}{4l^2} \omega^2 - \frac{m}{g} \omega^2 \right\} a_1 + 2B_1 B_3 \left(\frac{1}{\pi^2} - \frac{1}{2\pi^2} \right) \alpha a_3 \\
 + 2B_1 B_5 \left(-\frac{1}{2\pi^2} + \frac{1}{3\pi^2} \right) \alpha a_5 + 2B_1 B_7 \left(\frac{1}{3\pi^2} - \frac{1}{4\pi^2} \right) \alpha a_7 + \dots = 0 \quad \dots \dots \dots (16)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial A}{\partial a_3} = 0 \quad \text{より} \\
 2B_3 B_1 \left(\frac{1}{\pi^2} - \frac{1}{2\pi^2} \right) \alpha a_1 + \left\{ EI_0 B_3 \left(1 - \frac{\alpha}{3} + \frac{2\alpha}{\pi^2} \right) + \frac{m^2}{g^2} \beta \frac{4l^2}{3\pi^2} \omega^4 - \frac{m}{g} i^2 \frac{3\pi^2}{4l^2} \omega^2 - \frac{m}{g} \omega^2 \right\} a_3 \\
 + 2B_3 B_5 \left(\frac{1}{\pi^2} - \frac{1}{4\pi^2} \right) \alpha a_5 + 2B_3 B_7 \left(-\frac{1}{2\pi^2} + \frac{1}{5\pi^2} \right) \alpha a_7 + \dots = 0 \quad \dots \dots \dots (17)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial A}{\partial a_5} = 0 \quad \text{より} \\
 2B_5 B_1 \left(-\frac{1}{2\pi^2} + \frac{1}{3\pi^2} \right) \alpha a_1 + 2B_5 B_3 \left(\frac{1}{\pi^2} - \frac{1}{4\pi^2} \right) \alpha a_3 + \left\{ EI_0 B_5 \left(1 - \frac{\alpha}{3} + \frac{2\alpha}{5\pi^2} \right) \right. \\
 \left. + \frac{m^2}{g^2} \beta \frac{4l^2}{5\pi^2} \omega^4 - \frac{m}{g} i^2 \frac{5\pi^2}{4l^2} \omega^2 - \frac{m}{g} \omega^2 \right\} a_5 + 2B_5 B_7 \left(\frac{1}{\pi^2} - \frac{1}{6\pi^2} \right) \alpha a_7 + \dots = 0 \quad \dots \dots \dots (18)
 \end{aligned}$$

$$\frac{\partial A}{\partial \alpha_i} = 0 \quad \text{より}$$

$$2B_1B_3\left(\frac{1}{3^2\pi^2} - \frac{1}{4^2\pi^2}\right)\alpha a_1 + 2B_1B_3\left(-\frac{1}{2^2\pi^2} + \frac{1}{5^2\pi^2}\right)\alpha a_3 + 2B_1B_5\left(\frac{1}{\pi^2} - \frac{1}{6^2\pi^2}\right)\alpha a_5 + \left\{E I_c B_2^2\left(1 - \frac{\alpha}{3} + \frac{2\alpha}{7^2\pi^2}\right) + \frac{m^2}{g^2}\beta \frac{4l^2}{7^2\pi^2}\omega^4 - \frac{m}{g}l^2 \frac{7^2\pi^2}{4l^2}\omega^2 - \frac{m}{g}\omega^2\right\}\alpha_7 + \dots = 0 \quad (19)$$

上式より $a_1, a_3, a_5, a_7, \dots$ を消去すれば

$$\left| \begin{array}{cccc} \Delta_{11} & 2B_1B_3\left(\frac{1}{\pi^2} - \frac{1}{2^2\pi^2}\right)\alpha & 2B_1B_5\left(-\frac{1}{2^2\pi^2} + \frac{1}{3^2\pi^2}\right)\alpha & 2B_1B_7\left(\frac{1}{3^2\pi^2} - \frac{1}{4^2\pi^2}\right)\alpha \\ 2B_3B_1\left(\frac{1}{\pi^2} - \frac{1}{2^2\pi^2}\right)\alpha & \Delta_{33} & 2B_3B_5\left(\frac{1}{\pi^2} - \frac{1}{4^2\pi^2}\right)\alpha & 2B_3B_7\left(-\frac{1}{2^2\pi^2} + \frac{1}{5^2\pi^2}\right)\alpha \\ 2B_5B_1\left(-\frac{1}{2^2\pi^2} + \frac{1}{3^2\pi^2}\right)\alpha & 2B_5B_3\left(\frac{1}{\pi^2} - \frac{1}{4^2\pi^2}\right)\alpha & \Delta_{55} & 2B_5B_7\left(\frac{1}{\pi^2} - \frac{1}{6^2\pi^2}\right)\alpha \\ 2B_7B_1\left(\frac{1}{3^2\pi^2} - \frac{1}{4^2\pi^2}\right)\alpha & 2B_7B_3\left(-\frac{1}{2^2\pi^2} + \frac{1}{5^2\pi^2}\right)\alpha & 2B_7B_5\left(\frac{1}{\pi^2} - \frac{1}{6^2\pi^2}\right)\alpha & \Delta_{77} \end{array} \right| = 0 \quad (20)$$

但し $B_n = n^2 \frac{\pi^2}{4l^2} - \frac{m}{g} \beta \omega^2$

$$\Delta_{nn} = E I_c B_n^2 \left(1 - \frac{\alpha}{3} + \frac{2\alpha}{3^2\pi^2}\right) + \frac{m^2}{g^2} \beta \frac{4l^2}{(n\pi)^2} \omega^4 - \frac{m}{g} l^2 \frac{(n\pi)^2}{4l^2} \omega^2 - \frac{m}{g} \omega^2$$

(20)式は未知数として ω のみを有する方程式であるから、(20)式の解として ω が求められ、その内で最小なる ω がこの振動系の第一次基本振動数と與へる。

IV. 断面二次率が變化する桁の曲げモーメントのみに依る

横振動数の計算

[1] 断面二次率が二次的に變化する場合

曲げモーメントのみに依る振動を考へれば、前章の(14)式に於て $\beta=0, i=0$ と置いた場合であるから、(14)式は次の如くなる。

$$\left| \begin{array}{cccc} 1 - \frac{\alpha}{2} + \frac{2\alpha}{\pi^4} - k^2 & 2 \cdot \frac{3^2}{\pi^2} \alpha & 2 \cdot \frac{5^2}{3^2\pi^2} \alpha & 2 \cdot \frac{7^2}{3^2\pi^2} \alpha \\ 2 \cdot \frac{3^2}{\pi^2} \alpha & 3^4 - \frac{3^4}{2} \alpha - \frac{2 \cdot 3^2}{\pi^2} \alpha - k^2 & 2 \cdot \frac{5^2 \cdot 3^2}{\pi^2} \alpha & 2 \cdot \frac{7^2 \cdot 3^2}{5^2\pi^2} \alpha \\ 2 \cdot \frac{5^2}{3^2\pi^2} \alpha & 2 \cdot \frac{5^2 \cdot 3^2}{\pi^2} \alpha & 5^4 - \frac{5^4}{2} \alpha + \frac{2 \cdot 5^2}{\pi^2} \alpha - k^2 & 2 \cdot \frac{7^2 \cdot 5^2}{\pi^2} \alpha \\ 2 \cdot \frac{7^2}{3^2\pi^2} \alpha & 2 \cdot \frac{7^2 \cdot 3^2}{5^2\pi^2} \alpha & 2 \cdot \frac{7^2 \cdot 5^2}{\pi^2} \alpha & 7^4 - \frac{7^4}{2} \alpha + \frac{2 \cdot 7^2}{\pi^2} \alpha - k^2 \end{array} \right| = 0 \quad (21)$$

茲に

$$k^2 = \frac{m}{g} \omega^2 \frac{(2l)^2}{\pi^4} \cdot \frac{1}{B I_c}$$

(21)式より k の値を求めれば、變断面桁の固有振動数は

$$\omega = \frac{\pi^2 k(\alpha)}{(2l)^2} \sqrt{\frac{EIe}{m/g}} \dots \dots \dots (22)$$

に依り與へられる。

α が小さい範圍では桁の振動の型は一定断面桁の振動の型に非常に近く、従つて (7) 式に依つて示される振動振型は項数を多く取らなくても充分正確である結果を得る。然るに α が 1 に近づくに従つて (7) 式の收斂は遅くなり、厳密解を得るには多くの項を取る必要がある。

茲に求めた近似解は、(7) の展開式の第 8 項迄を取つて計算した。

(21) 式の 8 項迄を取れば次の如く書き改められる。

$$\begin{vmatrix} A-k^2 & D & E \\ D & B-k^2 & F \\ E & F & C-k^2 \end{vmatrix} = 0 \dots \dots \dots (23)$$

従つて

$$k^6 - c_1 k^4 + c_2 k^2 + c_3 = 0$$

の最小根を求めれば、右左對稱なる振動振型をなす第一基振動数は (22) 式に依つて與へられる。 $\alpha = 0.1 \sim 1.0$ に就いて計算すれば表-1 の如し。

表-1

$\alpha = \frac{I_e - I_s}{I_c}$	A	B	C	D ²	E ²
0.1	0.970264	77.182278	594.256606	0.03322	0.003168
0.2	0.940528	73.264556	563.513212	0.132901	0.012674
0.3	0.910793	69.390834	532.709818	0.299028	0.028516
0.4	0.881057	65.529113	502.026424	0.531605	0.050696
0.5	0.851321	61.661391	471.283029	0.830633	0.079213
0.6	0.821585	57.794269	440.539630	1.197424	0.114066
0.7	0.791849	53.926647	409.796241	1.629827	0.155257
0.8	0.762114	50.059025	379.052847	2.128754	0.202785
0.9	0.732379	46.191403	348.309453	2.694204	0.256649
1.0	0.702643	42.323781	317.566059	3.326178	0.316851

表-1 (つゞき)

F^2	C_1	C_2	C_3	(23)式の最小根 k
20.788631	672.359148	46466.975369	44433.319080	0.9848
83.164623	687.718297	41801.152922	38676.946011	0.9689
187.097676	603.087445	37333.562595	33345.142118	0.9521
332.618091	568.436593	33064.194337	28427.151109	0.9343
519.715768	533.795741	28993.043180	23912.262676	0.9153
748.390105	499.155400	25120.388348	19789.055759	0.8947
1018.642087	464.514738	21445.708776	16049.259209	0.8722
1330.471298	430.404986	17909.246159	12678.016015	0.8473
1683.877736	396.233234	14680.997063	9697.891425	0.8182
2078.361403	360.592484	11610.966537	7007.180120	0.7843

[2] 断面二次率が二次的に變化する場合

曲げモーメントのみに依る振動を考へれば、前章の(20)式に於て $\beta=0$, $i=0$ と置いた場合であるから(20)式は次の如くなる。

$$\left| \begin{array}{cccccc} 1 - \frac{\alpha}{3} + \frac{2\alpha}{\pi^2} - k^2 & 2 \cdot 3^2 \left(\frac{1}{\pi^2} + \frac{1}{2^2 \pi^2} \right) \alpha & 2 \cdot 5^2 \left(-\frac{1}{2^2 \pi^2} + \frac{1}{3^2 \pi^2} \right) \alpha & 2 \cdot 7^2 \left(\frac{1}{3^2 \pi^2} - \frac{1}{4^2 \pi^2} \right) \alpha & \dots & 0 \dots (24) \\ 2 \cdot 3^2 \left(\frac{1}{\pi^2} - \frac{1}{2^2 \pi^2} \right) \alpha & 3^4 - \frac{3^2 \alpha}{3^2} + \frac{2 \cdot 3^2 \alpha}{\pi^2} - k^2 & 2 \cdot 3^2 \cdot 5^2 \left(\frac{1}{\pi^2} + \frac{1}{4^2 \pi^2} \right) \alpha & 2 \cdot 3^2 \cdot 7^2 \left(-\frac{1}{2^2 \pi^2} + \frac{1}{5^2 \pi^2} \right) \alpha & \dots & \\ 2 \cdot 5^2 \left(\frac{1}{2^2 \pi^2} + \frac{1}{3^2 \pi^2} \right) \alpha & 2 \cdot 3^2 \cdot 5^2 \left(\frac{1}{\pi^2} - \frac{1}{4^2 \pi^2} \right) \alpha & 5^4 - \frac{5^2 \alpha}{\pi^2} + \frac{2 \cdot 5^2 \alpha}{\pi^2} - k^2 & 2 \cdot 5^2 \cdot 7^2 \left(\frac{1}{\pi^2} - \frac{1}{6^2 \pi^2} \right) \alpha & \dots & \\ 2 \cdot 7^2 \left(\frac{1}{3^2 \pi^2} - \frac{1}{4^2 \pi^2} \right) \alpha & 2 \cdot 3^2 \cdot 7^2 \left(-\frac{1}{2^2 \pi^2} + \frac{1}{5^2 \pi^2} \right) \alpha & 2 \cdot 5^2 \cdot 7^2 \left(\frac{1}{\pi^2} - \frac{1}{6^2 \pi^2} \right) \alpha & 7^4 - \frac{7^2 \alpha}{3} + \frac{2 \cdot 7^2 \alpha}{\pi^2} - k^2 & \dots & \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \end{array} \right| = 0 \dots (24)$$

次に

$$k^2 = \frac{m}{g} \omega^2 \frac{(2l)^2}{\pi^4} - \frac{1}{EI_0}$$

(24)式より k の最小値を求めれば、二次的に變化する變斷面桁の第一次振動数は

$$\omega = \frac{\pi^2 k(\alpha)}{(2l)^2} \sqrt{\frac{EI_0}{m/g}}$$

に依り與へられる。

この場合は斷面二次章が一次的に變化する場合に較べて(17)式の收斂が早いから、第3項迄取つて計算すれば充分正確値に近いものが得られる。前節と同じ如く計算したものは表-2に示す。

表-2

$\alpha = \frac{I_0 - I_e}{I_0}$	A	B	C	D ²	E ²
0.1	0.986931	78.482378	604.673272	0.018689	0.004951
0.2	0.973862	75.964756	584.346545	0.074757	0.019803
0.3	0.960793	73.447135	562.019818	0.168203	0.044557
0.4	0.947724	70.929513	543.698090	0.299023	0.079213
0.5	0.934654	68.411891	523.366363	0.467231	0.123770
0.6	0.921585	65.894269	503.036636	0.672813	0.178229
0.7	0.908516	63.376647	482.712908	0.915773	0.242539
0.8	0.895447	60.859026	462.386182	1.196111	0.316851
0.9	0.882378	58.341404	442.059453	1.513828	0.401015
1.0	0.869309	55.823782	421.732726	1.868924	0.495080

表-2 (つゞき)

K_2	C_1	C_2	C_3	(23)式の最小根 k
13.271243	672.359148	46466.975369	46806.182622	0.9933
73.084871	637.718297	41801.152922	43112.454076	0.9863
164.441186	603.037445	37333.562695	39402.295903	0.9790
292.339385	568.436503	33004.194337	36097.384238	0.9713
456.781070	533.796741	28993.048180	32774.603677	0.9629
657.764741	499.165490	25120.388348	29573.403144	0.9539
895.290893	464.514738	21445.708776	26494.952936	0.9444
1169.359540	430.404986	17969.245159	23536.043040	0.9340
1479.970667	395.233234	14690.997663	20698.384593	0.9225
1827.124281	360.592485	11610.066537	17979.457665	0.9095

[3] 横田技師の計算値との比較

曲げモーメントに依る振動の微分方程式は $Z_{(x)}$ を振動変型を興へるのみの函数とすれば

表-3

$\frac{I_e - I_0}{I_0}$	斷面二次率が一次的に 變化する場合		斷面二次率が二次的に 變化する場合	
	h (横田)	h (村上)	h (横田)	h (村上)
0.1	0.9848	0.9848	0.9933	0.9933
0.2	0.9088	0.9089	0.9863	0.9863
0.3	0.9520	0.9521	0.9789	0.9790
0.4	0.9342	0.9343	0.9711	0.9718
0.5	0.9151	0.9153	0.9627	0.9629
0.6	0.8946	0.8947	0.9537	0.9539
0.7	0.8717	0.8722	0.9440	0.9444
0.8	0.8462	0.8473	0.9331	0.9340
0.9	—	0.8182	—	0.9225
1.0	—	0.7843	—	0.9095

$$\frac{d^2}{dx^2} \left(EI(x) \frac{d^2 z}{dx^2} \right) - \frac{m \omega^2}{g} z = 0$$

である。この I_0 が一次的又は二次的に變化する場合に就いて、内務省土木試験所横田技師が報告第 61 號に於て基礎微分方程式を累級數に展開して厳密解を鮮かに求められたが、茲に示した勢力法による近似解と比較すれば表-3 の如くである。

これにより兩者の計算値を比較すれば、 $\alpha = \frac{I_e - I_0}{I_0}$ の小さい範圍に於ては非常に良く一致する。即ち著者の方法に依り項數を少く取つて計算してもその收

斂性が早いから誤差はほとんどないことを示してゐる。然し $\frac{I_e - I_0}{I_0}$ が 1 に近づくとき本例の如く 3 項のみを計算したのでは相當の誤差はまぬかれぬ。 $\frac{I_e - I_0}{I_0} = 0.8$ の場合を見るに、斷面二次率が一次的に變化する場合の誤差は 0.13%，二次的に變化する場合の誤差は 0.096% で、この場合に於ても非常に小さいものであつた。然し $\frac{I_e - I_0}{I_0} = 1.0$ の場合には更に誤差は増大すると思はれるが、厳密解の數字が分らないから具體的に示すことが出来ない。

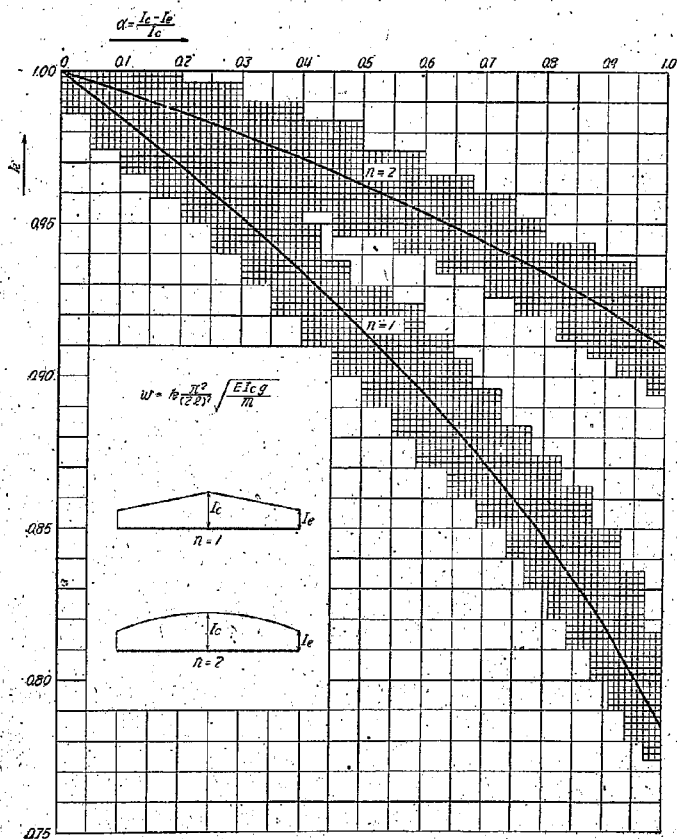
要するに横田技師の厳密解に比して大した誤差を有することなき近似解であることが分つた次第である。

V. 結 言

此の計算結果を要約すれば次の通りである。

1. 鉋桁の如き桁に於ては剪斷力の影響及び回轉運動の影響は非常に小さいから、斷面二次率の變化する桁の曲げモーメントのみに依る振動を考へれば良い。然し樑橋の如きものにあつては、剪斷力の影響及回轉運動の影響も相當に考慮すべきものであると考へる。
2. 曲げモーメントのみに依る變斷面桁の計算値は、横田技師の厳密解と比較して著者の勢力法による近似解は相當によく合致し、兩者の計算値に大なる誤りなりことを實證すると同時に、斯くの如き固有値問題に於て最少次數のものを計算した結果であることを證明してゐる。
3. 計算結果をグラフで示したものが圖-3 であり、これにより振動學的に等値なる定斷面桁を逆に求めることは容易である。

圖-3



天然凝結材に關する調査並びに試験

(鹿兒島縣產火山灰砂及び 各種凝結材の利用に就いて)

内務技手 松 本 榮

目 次

[I] 緒 言	(1)
[II] 火山灰砂の調査並びに成分、性質に關する試験	(2)
(1) 分 布	(2)
(2) 賦 存 狀 態	(3)
(3) 成分及び性質	(6)
[III] 火山灰砂の利用方法に關する試験	(10)
(1) 天然凝結材としての試験	(10)
(2) セメント混和材としての試験	(11)
(3) コンクリート用細骨材としての試験	(14)
[IV] 天然凝結材の調査並びに成分、性質に關する試験	(17)
(1) 利用狀況並びに利用工法	(17)
(2) 産地及び賦存狀態	(20)
(3) 成分及び性質	(23)
(4) 石灰混合物の強度	(25)
[V] 要 約	(27)

[I] 緒 言

霧島火山脈の走る南九州地方の一部の地域、即ち鹿兒島縣の大部分、熊本縣の南部、宮崎縣の西南部等の各地には、地質構造上特異なる存在をなすとともに地質學上の分類からも特別の部門をなすものとして取扱はれてゐる火山灰砂層の廣大なる分布が見られる。鹿兒島縣では、島嶼部には全く存在しないが、本土部内の分布は極めて廣大であつて、本土部過半の地域が火山灰砂によつて覆はれてゐると稱するも過言ならざる程である。

この火山灰砂を鹿兒島縣では俗に「シラス」と呼び且つ白砂なる文字を當てゐるが、シラスはその文字の示す如く白色乃至灰色又は黃褐色を帶びた細砂狀乃至微砂狀の火山灰と火山砂を主要部分とする火山噴出物であつて、屢々これには拳大乃至頭大の火山礫、浮石塊、安山岩塊等を雜へてゐる。多くは粗鬆、脆弱にして層理の稍々不明瞭なる軟岩層を形成し、厚さ 20~250 m の層をなして各地の丘陵斷崖に分布してゐるが、代表的なものにあつては主として高距 100~200 m にして上部の概ね平坦なる臺地を構成するものと如くである。

シラスは、縣内に斯く廣大にして豊富なる賦存を示すに拘らず、これが利用の途は殆んど殆んど殆んど、たゞ僅かに農家に於て堆肥の混用土砂として利用し或は比較的良質のものを磨砂に利用する等の例あるのみで、工業的には殆んど利用せられず、全く價值なきものとさへ考へられてゐる。

更に土木工學の立場から見ると、土木工用には特に適當なる土質とは認め難きものゝ如くであつて、透水性大にして凝聚力に乏しき特性は切取、盛土等の一般土工に於けるは勿論、陸道、堰堤等の施工に於ても取扱ひの困難なる土質とせられ、寧ろ厄介視され來つたものゝ如くも見られるのである。

鹿児島縣土木課に於ては、これが土木工用材料として利用し得るや否やを質し、これを利用する地方的特殊土木施工法の有無を検討せんがため、縣内各地に亘るシラスの代表試料3種を採取してこれを本試験所に送付し、上記目的の試験研究を依頼し來つた。偶々本試験所に於ては岩石又は火山拋出物等を主とする天然凝結材の調査並びに試験を進めてをり、その目的に於て前記の依頼と一致するところがあつたので双方の目的を兼ね、シラスの調査並びに試験を実施することとした。

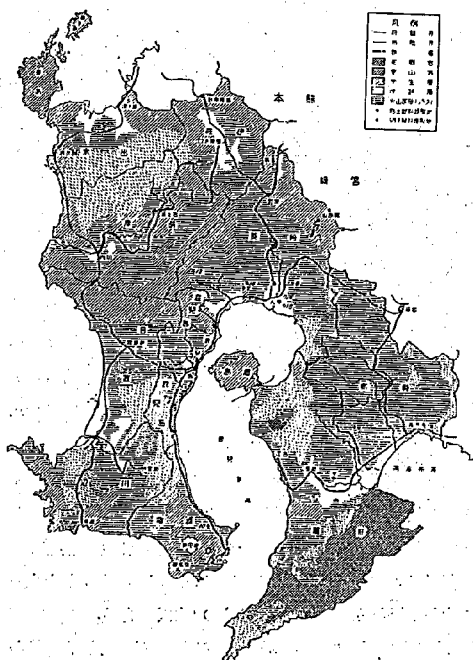
なほシラスとは別箇の立場から、縣内に亘る粘土その他の天然凝結材に関する調査を行ひ且つその成分、性質等を明かならしむることとした。

〔 II 〕 火山灰砂の調査並びに成分、性質に関する試験

(1) 分 布

圖一に示した地質概要圖から鹿児島縣本土部の地質別分布面積を推測すると表一の如くなる。表一によ

圖一 鹿児島縣本土部地質概要圖



ると、シラスの分布面積は 3427 km² となり、本土部總面積 6064 km² の凡そ 40% に相當する領域を領することになる。なほ圖一及び表一は鹿児島縣土木課の好意になる 20 萬分の 1 地質概要圖をもととし、地質調査所作製の 20

表一 鹿児島縣本土部の地質別面積

地 質	面積	百分率	備 考
	km ²	%	
中生層(砂岩, 頁岩)	1195	17.1	シラスに類する他層をも含む
シラス層(火山灰砂)	3427	49.2	
沖積層	435	6.3	
花崗岩	486	7.0	
安山岩	1421	20.4	湖沼面を含む
合 計	6064	100.0	

萬分の 1 地質圖を參考として作圖並びに面積の測定を行つたものである。従つて地質別分布状態及び分布面積には實際と幾分の相違ある如くも認められるのであるが、その大要を知るには差支へないやうに考へたのでその儘掲出した例へば鹿児島縣本土部の實際面積は 7192 km² であるにも拘らず、圖一による測定面積は 6064 km² であつて、實際の面積に比し約 8% の不足を示してゐる。又圖一に於てはシラス

層及びシラスに類する他の地層例へば沖積層地に生成せる火山灰砂の沈積層、第三紀層中の凝灰質砂岩又は凝灰

質頁岩の風化分解せるものもシラス層として取扱つてあるやうに見受けられたが、これ等は一般にシラスと見做されてゐるもので、ここではその儘シラス層として取扱つた。

シラスの分布は圖-1 に見るやうに縣内各地に及んでゐるが、特に薩摩半島の基部即ち鹿児島市の西方より南方に亘る一帯の地域、大隅半島の中央部、霧島火山の西麓より南麓に及ぶ一帯の山地、川内市の東方一帯の地域等には何れも極めて廣大なる賦存が見られ、これ等の地域では山地原野のすべてがシラスを以て埋め盡されたるかの感を懐かしむるものがある。

(2) 賦存状態

シラス層は多くの場合、高距 250 m 以下の高峻ならざる臺地を形成して賦存する。層の基盤は灰石と稱せられる脆弱な紫蘇輝石粗面安山岩よりなる場合が比較的多いが、時には中生層又は第三紀層の砂岩、頁岩等を不整合的に被覆し、これを基盤となすものも見られる。

層厚、層位、シラス層と互層する他層の種類及び層序、混在する浮石礫及び火山岩塊の大きさ及び含有量等は、場所によつて著しく異り一定でない。層厚は 20~250 m の範圍で種々異り、層位は一般に水平に近く、礫層又は粘土層等と整合的に成層し互に移過する例が多い。互層する他種の岩石層としては浮石礫層、火山岩質砂層、粘土層、褐鐵礦の薄層等があり、これらは概ね層序、層厚等を種々異にしてシラス層と互層してゐる。シラス中に混在する礫としては浮石礫最も多く、輝石安山岩の片塊、火山礫等これに次ぎ、花崗岩塊の混在は極めて稀である。礫の大きさは時に徑 1 m 以上に及ぶものも見られるが、拳大乃至頭大を最大となすのが普通であり、その含有量もところによつて大なる相違ある如くである。

現地調査を行つた箇所の地層見取圖數例をあげ、シラスの種々異りたる賦存状態を説明すれば以下の如くである。

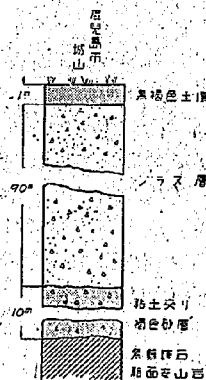
(i) 鹿児島市城山 城山は圖-1 に於て・點1を以て示した地點にあり、東に鹿児島灣を距て・櫻島に相對した上部の概ね平坦な臺地の東端に位置する丘陵であつて、海拔約 100 m の本丘陵はすべてシラスによつて構成されてゐる。

本丘陵の一部に現れた地層の見取圖を示すと圖-2 の如くである。地表に近き凡そ 1 m の部分は黒褐色の火山灰質土壌よりなり、その下部凡そ 90 m の間は浮石礫及び安山岩塊を雜へたシラスの厚層よりなる。シラス層の下部では次第に粘土分を雜へた淡黄色の火山灰層に移過し、この火山灰層は厚さ約 10 m にして基盤の紫蘇輝石粗面安山岩層に到達する。

紫蘇輝石粗面安山岩は俗に灰石と稱せられ、暗灰色乃至黝灰色を帯びた泥熔岩であつて柱狀節理を有し、時に緻密堅硬なものもあるが多くは多孔質、脆弱で分解し易い。灰石はシラスと成因を同じくする火山熔出物で、前者は熔岩流として噴出しその儘凝固して泥熔岩となつたと見られるのに對し、後者は一旦空中に抛出された後、水中に落下し急冷して火山灰砂となつたと見られてゐる。

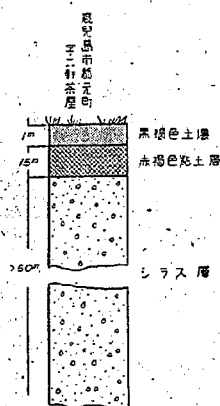
城山をはじめ鹿児島市附近に見られるシラス層には、他種岩石の互層するもの比較的小く、代表的なシラス層として取扱はれる。

(ii) 鹿児島市郡元町字二軒茶屋 二軒茶屋地先に、埋立工事用土砂として現在盛に切取採掘中の場所がある。その場所の地層見取圖を示せば圖-3 の如くである。



圖—3 シラス層見取圖—(2) 本地域のシラスは灰白色を帯びた細粒に属する火山灰砂で、礫の混入量が比較的多い。礫としては大きさ 5 cm 以下の輝石安山岩角礫と大きさ 20 cm 以下の浮石礫とが見られ、前者は極めて少く、後者の混入量は可成り多い。

本地域で採取した試料には郡元シラスなる名稱を附し、これを以下に於て行はれる各種試験の代表試料とした。



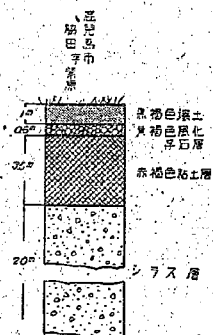
(iii) 鹿児島市脇田字紫原 この附近一帯は海拔 80~100 m にして上面の概ね平坦なる臺地によつて構成せられる。上部の平坦面は主として畑地に造成せられ、周囲の傾斜面は松林その他の樹林をなしてゐる。

臺地の東端に露れた地層の見取圖を示すと圖—4 の如くである。地表に近き部分は厚さ約 1 m の黒褐色土壌によつて覆はれ、その下位には充分風化褐腐し殆んど原形を失ふまで粘土化せる黄褐色の浮石が厚さ約 0.5 m の薄層をなして横たはり、更にその下位には赤褐色を呈し著しく粘潤なる粘土質土壌が厚さ約 3.5 m の層をなして存在する。

シラス層はこれら各層の下部に厚層をなして横たはる。地上に露れたシラス層の厚さは約 20 m に及んでゐるが、その下部に於ける厚さ及びシラス層の基盤をなす岩石等は全く不明である。

本地域に産するシラスは稍々褐色を帯び細粒に富むもので、礫分の混入は比較的少い。

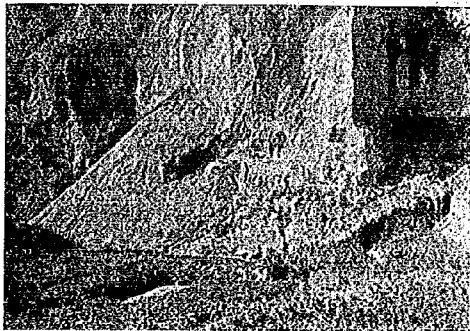
圖—4 シラス層見取圖—(3)



(iv) 鹿児島市谷山町宇和田 谷山町宇和田地内の予地附近に於ける海拔 50 m 内外の丘陵の東端切取部に露はれたシラス層を見ると、厚さ 0.5 m の黒褐色表土の下位に代表的な成層が窺はれる。地上に露れた部分の層厚は約 40 m で、それ以下の層厚及び基盤岩石の性質等は一切不明である。

圖—5 には、本地域に於けるシラス層切取箇所の崩壊状況を示す寫眞を掲げたが、この種の崩壊事故は本例のみならず、縣内各地のシラス層切取箇所に於て屢々見られるところである。

圖—5 谷山町宇和田に於けるシラス層の崩壊状況



シラス層は一般に粗鬆、脆弱であつて鋤等
の器具で容易に切崩すことが可能であり、而も
含水量が一定限度に達するまでは、これを垂直
近くまで切取つても比較的安定である。然る
にシラス層は稜角に富んだ粒子の弛やかな堆積
に過ぎず、固結性極めて低く粒子相互の摩擦
力によつて安定性を保持するのみで、その安定性
が粘着性又は凝集力に依存することが比較的少
いため、一度降雨によつて含水量が増加し粒子
相互の間に滑性が増はると、安定性が著しく減
じて寫眞に示すやうな崩壊が惹起するのである。

本地點より採取した試料には和田シラスなる名稱を附し、以下に行はれる各試験の代表試料となした。

(v) 鹿兒島郡谷山町字平川 谷山町字平川地内の新設縣道の切取箇所に露はれたシラス層の見取圖を示すと圖-6 の如くである。

圖-6 に示す如く、この附近のシラス層中には褐鐵礦の薄層の挟存するのが屢々見受けられる。褐鐵礦の層は、2~10 cm 程度の薄い層であるが、堅硬緻密で殆んど水を透さないため自然の隔水層をなしてをり、褐鐵礦層の直上部附近には常に多量の水が滲えられてゐる。圖-7 はシラス層の切取箇所を示した寫眞であつて、寫眞の中央に於て略々水平に横たはる黒色の部分が褐鐵礦の薄層で、層の直上部のシラスは滲水によつて常に濕されてゐるため、地表に近い部分よりも幾分濃色の層となつて見える。

この附近のシラスは一般に稍赤味を帯びた褐色を呈し、灰及び砂分に富み礫分に乏しき組成を有する如くである。

(vi) 給良郡加治木町小山田字堀切 堀切附近に於けるシラス層は、西國の情況より判斷すると、紫蘇輝石粗面安山岩を被覆して厚さ 20~60 m の水平層をなして存在するものと如く認められる。

このシラスは一般に微細なる部分に乏しく、砂分に富む如く觀察せられ、又礫の混入量比較の少く特に火山岩質片塊の混在は著しく少いやうである。

(vii) 給良郡霧島村重久 霧島村重久地内の縣道切取箇所に露々として露出するシラス層は主として高距 20~50 m の丘陵をなして存在するものと如くである。層の基盤は主として安山岩質岩石よりなるものと如くであるが、一部には凝灰質岩石を基盤となすものも見受けられる。

本地域内にひろく發達する凝灰質岩石は、灰白色乃至灰綠色を呈する粗鬆、脆弱な岩石であつて、礦物的成分としては斜長石、輝石、玻璃質破片、粘土質物質等が認められ、屢々浮石の片塊を伴ふ。本岩石はシラス層によつて被覆せられてその基盤をなす場合と、獨立して地表に露はれる場合とがあるが、地表に露はれたものは比較的容易に弛解溶溜して細砂又は土砂狀を呈するため、やゝもするとシラス層と混同して取扱はれる。

シラス層は既に述べたやうに火山灰、火山砂、火山礫、浮石礫等を主要なる構成物質とする地層であつて、地質的には現世層以前に生成したすべての地層の中で最も新しき層と見做されてゐる。鹿兒島縣下のシラス層の賦存狀態を通して見ても、シラス層はそれより古い時代に生成した他の地層、例へば中生層、第三紀層の砂岩、頁岩の類を被覆して存在することが明かであり、この事實によつてもシラスが比較的新しい時代の生成層に属することが分る。

而して浮石礫を比較的多量に含むシラス層にあつては時に層理の明瞭ならざるものも見受けられるが、全體的には不明瞭ながら層理の存在が確認されるのであるから、この一事實から推測しても多くのシラス層は水成岩の

圖-6 シラス層見取圖-(4)

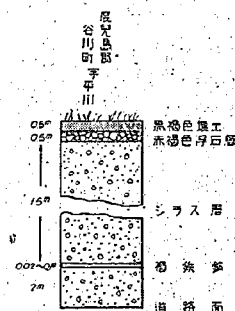
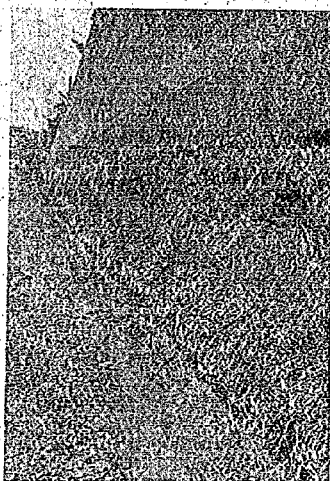


圖-7 谷山町字平川地内のシラス層



一種と見られる地層であり、水の作用により沈積した火山灰砂の層と見るのが至當であらう。又シラス層中には
 厩々 *Bulla* sp., *Tapes* sp., *Fusus* sp., *Cardium muticum* Rvo, *C. retusum* L., *Dosinia troscheli* lise-
 like その他各種の海産貝化石の埋蔵することが明かになってゐる點から見ても、シラス層が氷成岩であるといふ
 事實は疑ふ餘地のないところである。

更にシラス層を構成する物質即ち火山灰砂の岩石學的性質は、シラス層の基盤を構成する灰石即ち紫蘇郡石粗
 面安山岩と略同質であり化學的成分に於ても互によく類似してゐる事實から推すと、シラスと灰石とは全く同一
 の岩漿より誘導せられた生成物と見ることが出来る。なほシラスと灰石とは地質的にも概ね相伴つて出で、而も前
 者が後者を被覆して存在する場合の多い事實から推すと、兩者は同一火山に於ける同時噴出物であつて、熔岩流と
 して噴出したものが灰石となり、噴出後水中に落下して急冷したのがシラスをなしたと考へるのが至當である。

(3) 成分及び性質

縣内各地を實地調査した際、圖—1 中に・印を附した地點から試料を採取し、これを鹿児島縣産シラスの代表
 試料と見做して、それぞれに就き性質並びに成分を明かにするため以下に記す如き試験を行つた。

採取試料の略名、圖—1 中に示した採取地點(番號を以て示す)、採取地點の地名等を示せば表—2 の如くであ
 る。

表—2 シラス試料の產地

略 名	圖—1 中の番號	採 取 地 名
郡元シラス	・ 2	鹿児島市郡元町字二軒茶屋
勝田シラス	・ 3	鹿児島市勝田字紫原
和田シラス	・ 5	鹿児島郡谷山町字和田
平川シラス	・ 6	鹿児島郡谷山町字平川
加治木シラス	・ 7	始良郡加治木町小山田字堀切
霧島シラス	・ 8	始良郡霧島村重久
始良シラス	・ 9	始良郡國嶺古江線始良驛附近

(1) 外觀 よく乾燥して水分を除いたシ
 ラスは多くは白色乃至灰白色を呈し、時に淡
 黄色乃至淡褐色を呈す。シラスの色は、シラ
 スの成分たる長石、雲母、角閃石等の有色礦
 物の分解程度により異なる如くであつて、風化
 分解が進み微細分を多量に含むシラスは一般
 に黄色乃至褐色を帯びてゐる。

乾燥試料は細砂狀乃至微砂狀を呈し、これ

に含まれる浮石礫中には多孔質組織にして水中に投ずるときは浮遊する部分が多い。

表—3 シラス試料の一般的性質

項 目	郡元シラス	勝田シラス	和田シラス	平川シラス	加治木 シラス	霧島シラス	始良シラス
外 觀	灰白色	淡褐色	灰白色	赤褐色	灰白色	暗灰色	灰白色
比 重	2.42	2.40	2.37	2.36	2.39	2.47	2.33
含 水 量 %	1.17	17.51	0.84	29.58	9.00	12.02	0.61
粒 度 %							
30mm~25mm	0	0	2.1	0	0	0	1.1
25"~20"	2.0	5.2	3.4	0	0	0	0.7
20"~15"	4.0	4.8	4.9	0	1.1	0	1.3
15"~10"	3.8	10.1	2.6	0	2.5	1.6	0.8
10"~5"	6.8	7.3	4.4	1.1	1.6	2.4	1.2
5"~2"	9.4	11.0	5.1	1.9	5.6	4.1	2.7
2"~0.42"	23.3	17.4	25.5	32.9	37.0	27.4	19.7
0.42"~0.177"	10.9	13.8	14.0	10.7	4.1	17.4	18.5
0.177"~0.075"	16.5	12.4	21.2	26.9	30.1	31.7	21.6
0.075"以下	18.3	19.0	16.8	26.6	17.8	15.4	32.4
計	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
機械的分析 %							
砂	35.0	81.9	85.9	70.9	—	86.2	70.3
泥	11.1	13.1	11.7	19.0	—	11.0	27.8
結 土	3.9	5.0	2.4	4.1	—	2.8	1.9

表-3 に示す粒度 (篩分試験結果) に於て、粒子の大きさ 0.075 mm 以下を火山灰、 $2.0 \sim 0.075 \text{ mm}$ の範囲を火山砂、 2.0 mm 以上を浮石礫及び火山岩塊と見做すときは、火山灰の量は $15.4 \sim 32.4 \%$ 、平均 20.90% 、火山砂の量は $48.6 \sim 70.5 \%$ 、平均 62.6% 、浮石礫及び火山岩塊の量は $3.0 \sim 37.4 \%$ 、平均 16.0% となり、シラスの主體は火山砂であることが分る。

淘汰分析及篩分析及併用して機械的分析を行ひ、各シラス試料の機械的成分割合を土としての組成を求めると表-3 下欄及び圖-8 の如くなる。なほ本試験では、 2.0 mm を砂と礫との境界と見做し、 2.0 mm 篩に止る礫分を除いて試験を行つた。

圖-8 に示す三角圖により分類すれば、シラスはその主體が砂であり、これに $11.0 \sim 27.8 \%$ の沈泥と $1.4 \sim 5.0 \%$ の粘土を含むもので、三角圖上に於ける位置は砂土 (Sand) 又は洗泥質砂土 (Silty Sand) の範圍に入る。

(ii) 比重 比重は $2.33 \sim 2.47$ 、平均 2.39 を示し、最大最小の間に於て約 0.14 の僅少な差違が見出される。これはシラスの礦物的成分の相違によつて來るところも大であるが、なほシラス中の浮石の量及び性質、粘土及び洗泥分の含有量等によつても差違を來するものゝ如く考へられる。

なほシラスの比重は、通常の川砂又は海砂に比し稍小であるが、これはシラス中に含まれる多孔質組織なる粒子に原因するところが多いやうに思はれる。

(iii) 含水量 含水量は試料採取時の氣後狀態、採取後の保存方法等によつて異なり、從つて表-3 に見られるやうな廣範圍の差違が現れるため、含水量の大小から、シラスの多孔質組織の程度を推定することは困難である。

(iv) 礦物的成分 試料を篩分けて大きさ 0.075 mm 以上の火山砂分と 0.075 mm 以下の火山灰分となし、それぞれを顯微鏡下に檢すると、圖-9 の i~iii (火山砂) 及び iv~vi (火山灰) の寫眞に示すやうに、何れのシラスにも多量の玻璃質が見られる。

玻璃質は火山灰の部分にも火山砂の部分にも存在するが火山砂の部分に特に多い。一般に扁平且つ細長で稜角の鋭きもの多く、玻璃質粒子の外観は宛も白雲母の薄片を破碎せるものゝ如くである。シラスの礦物的成分は賦存箇所により著しく異なる場合もあり一定せざるものゝ如くであるが、その主要成分は常に玻璃質で $70 \sim 90 \%$ の含有量を示す如く推定される。

圖-8 シラスの機械的成分

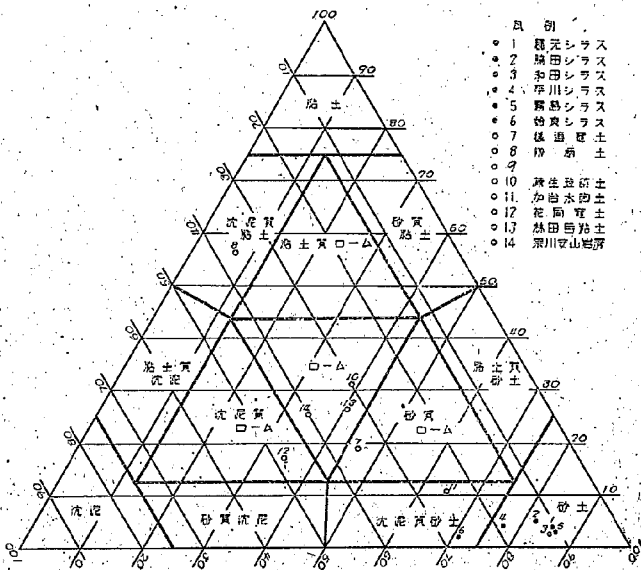
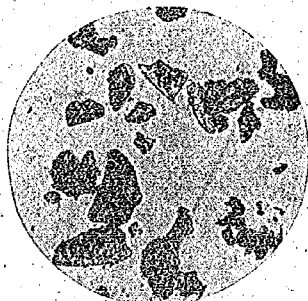
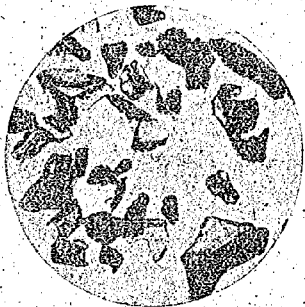
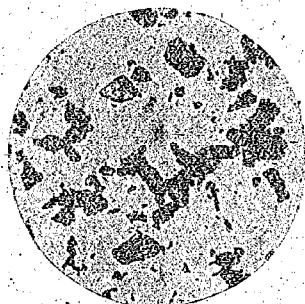
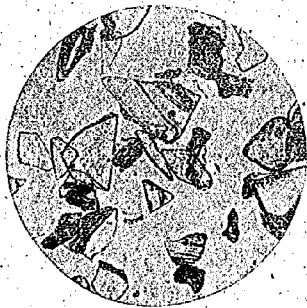
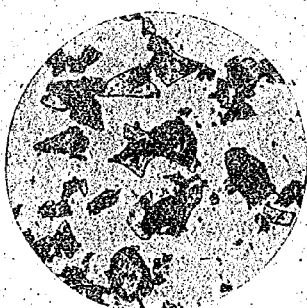


図-9 火山灰砂の顕微鏡寫眞

i 和田シラスの火山砂部分(徑0.075mm以上)
×50iv 和田シラスの火山灰部分(徑0.075mm以下)
×111ii 郡元シラスの火山砂部分(徑0.075mm以上)
×50v 郡元シラスの火山灰部分(徑0.075mm以下)
×111iii 始良シラスの火山砂部分(徑0.075mm以上)
×50vi 始良シラスの火山灰部分(徑0.075mm以下)
×111

鑛物的結晶をとる成分としては長石、雲母、輝石及び角閃石等の存在が見られるが、その量は概して少く且つ風化分解せるものが多い。特に火山灰部分に於ては玻璃質は概ね堅牢で原形を保持するが、他の鑛物は概ね風化分解して土状となり結晶形を採らざるものゝ如く觀察された。

(v) 化學的成分 採取試料 7 種に就て行つた化學分析試験 (全分析及び可溶分析) の結果を示すと表—4 の如くである。

全分析試験の結果によりシラスの化學的成分を見ると、灼熱減は 1.91~6.41% 平均 3.27% であつて、これを

表—4 シラス試料の化學的成分 (全分析及び可溶分析)

成 分	郡元シラス	脇田シラス	和田シラス	平川シラス	加治木シラス	篠島シラス	始良シラス
(全分析)%							
灼熱減	2.48	6.41	1.96	5.18	2.32	2.62	1.91
珪 酸	68.66	60.11	69.44	68.11	63.41	66.05	72.04
礬 土	17.50	25.19	16.35	12.87	17.05	20.42	16.43
酸化鐵	2.19	3.59	2.80	2.52	2.29	2.12	2.00
石 灰	4.31	2.67	4.58	2.88	3.05	2.96	3.88
苦 土	0.43	0.51	0.82	0.44	0.61	0.39	0.65
そ の 他	—	—	—	—	—	—	—
(可溶分析)%							
不溶部分	64.64	57.39	65.80	65.60	64.72	—	70.21
可溶部分							
珪 酸	22.08	21.97	20.02	18.05	24.91	—	20.34
礬 土	7.72	14.34	8.00	9.68	5.45	—	5.10
酸化鐵	0.56	1.46	0.91		1.13	—	0.57
石 灰	0.89	0.50	2.08		1.04	—	1.00
苦 土	微量	0.18	0.42	微量	0.20	—	微量

普通の岩石風化物たる粘土類の灼熱減 7~15% に比較すると著しく少い。特に代表的シラス試料と目される郡元シラス、和田シラス、始良シラス等に於てその傾向が顯著で、これ等試料の灼熱減は何れも僅々 2% 程度である。

灼熱減即ち 800°~1000°C 程度の灼熱による減少量は、試料中に含まれる有機質物質、二酸化炭素、化學的結合水等の多寡を示すもので、一般に風化分解の進んだ岩石ほど、換言すれば土に近い性質の試料ほど灼熱減が多いと見て差支へない。勿論炭酸鹽や有機質物質を多量に含む互に相異つた種類の試料の間ではこのような推測を下し得ないが、シラスには炭酸鹽や有機質物質の含有量が比較的少いから、灼熱減の多寡から風化分解の程度を推測しても差支へないと思ふ。このやうにして推測すると、シラスは一般に風化分解が不充分で原岩石に近い性質の土砂と稱し得る。

珪酸はシラスを構成するための主要なる化學的成分であつて、その量は 60.11~72.04%、平均 67.53% の多きに上つてゐる。郡元シラス、和田シラス、始良シラス等は特に珪酸含有量が 70% 前後を示してゐる。

礬土及び酸化鐵の含有量は一般に低く、礬土は 12.87~25.19%、平均 17.97%、酸化鐵は 2.00~3.69%、平均 2.50% を示すに過ぎない。又石灰量は郡元シラス、和田シラス、始良シラス等に於て比較的多く他は概して少ない。

可溶成分即ち 10% NaOH 及び 6% HCl に溶解する各成分の量は表—4 下欄に示す如くである。尚可溶成分と石灰混合物の強度との關係に就ては文章 [III] の (1) に於て考察する。

〔Ⅲ〕 火山灰砂の利用方法に関する試験

(1) 天然凝結材としての試験

シラスは表-8に示したやうに、砂分に富み粘土分に乏しい組成の土砂で、いはゞ砂とも見られる性質を多分に有する材料であつて、單に粘土分の量から判斷してもこれが天然凝結材として適當であるとは認められない。更に表-4に示した可溶分析試験結果によつて見ても明かなやうに、天然凝結材として重要な可溶性の苛性、礆土、酸化鐵等の含有量も概して少く、從來天然凝結材の價值判定の基準となした可溶性苛性 25% 以上、同礆土及び鐵の含量 80 % 以上の規定に合致するもの殆んどなく、活性成分が極めて貧弱であり、この點から判斷してもシラスが良質の天然凝結材であるとは認め難いのである。

試みにシラスと石灰との混合物を以て供試體を作り、その強度を測定すると以下の如くなり、これによつてシラスが良質の天然凝結材たり得ざることが一層明瞭になる。

(1) 配合、水量を異にするシラス・石灰混合物の強度

20 mm 篩を通過したシラス試料に一定量の消石灰を加へ、所要量の水を添加してよく混捏し、これを軟線モルタル試験用型に2層に分けて詰め、各層を25回宛撾棒にて突き固め、 $4 \times 4 \times 16$ cm の羊蹄形供試體を作製する。供試體は所要期間、空氣中に靜置して養生した後、曲げ強及び壓縮強を測定する。なほ本試験では試料として和田シラスを用ひた。

試験結果は表-5に示す如くであつて No. 1~4 は配合割合を變へ施工軟度（フローを以て表す）を略同じくせる混合物の試験、No. 5~7 は配合割合を一定にし施工軟度を變へた混合物の試験結果である。表-5より、配合割合、水量、施工軟度等とは無關係に曲げ強の最大値及び最小値をとつて見ると、材齡 7 日に於て $0.3 \sim 1.8$ kg/cm²、材齡 28 日に於ては $3.5 \sim 7.0$ kg/cm² となり、又壓縮強は材齡 7 日に於て $3.7 \sim 6.6$ kg/cm²、28 日に於

表-5 シラス混合物の曲げ強及び壓縮強 (20°C 恒溫, 空氣中養生)

No	配 合 石 灰 : シラス	水 量 %	フ ロー	曲げ強 kg/cm ²		壓縮強 kg/cm ²	
				7 日	28 日	7 日	28 日
1	1 : 2	35	118	0.9	5.0	4.3	20.7
2	1 : 5	33	114	0.8	4.3	3.7	16.0
3	1 : 8	31	112	1.0	4.2	3.8	14.7
4	1 : 12	30	112	1.2	3.5	4.9	12.3
5	1 : 5	33	114	0.8	4.3	3.7	16.0
6	1 : 5	29	108	1.4	6.4	6.2	23.4
7	1 : 5	25	101	1.8	7.0	6.6	25.0
新川礫土	1 : 5	20	102	23.8	33.8	91.9	127.6
新川礫土	1 : 12	17.5	101	18.7	15.9	82.4	87.6
大塚礫土	1 : 5	21	101	10.2	15.5	29.0	41.2

ては $12.3 \sim 25.0$ kg/cm² となり、これは從來天然凝結材として使用された礫土（花崗岩の風化物）の石灰混合物の同一條件に於ける強さ（表-5 下欄）に比し著しく劣ることが分る。少くとも礫土と同一程度の強さを有するものでなければ良質の天然凝結材とは認められず、この意味に於てシラスは天然凝結材として利用の可能性に乏

しき材料と見て差支へないと思はれる。

(ii) シラスの種類を異にする石灰混合物の強度

郡元シラス、和田シラス、始良シラスを代表的試料とし、それぞれのシラスと消石灰との混合物をつくり、壓縮強を測定した結果を示すと表-6及び圖-10の如くである。なほ本試験には高さ2.5cm、直徑2.5cmの

表-6 シラス・石灰混合物の壓縮強 (20°C恒溫、空氣中養生)

配合 石灰:シラス	郡元シラス		和田シラス		始良シラス	
	水量%	壓縮強 kg/cm ²	水量%	壓縮強 kg/cm ²	水量%	壓縮強 kg/cm ²
1:1	45.0	13.9	40.2	18.0	55.7	17.0
1:2	33.0	15.8	39.5	19.1	45.4	14.4
1:3	35.3	20.3	37.3	21.6	44.0	11.4
1:4	31.4	18.2	32.3	20.2	42.1	11.4
1:5	32.0	17.9	31.3	14.1	40.5	11.2
1:7	23.8	15.9	31.3	13.0	40.5	9.9
1:10	27.8	14.4	26.3	12.0	41.0	6.1

圓錐形供試體を用ひ、混合物の混捏に要する水量は混合物を15 kg/cm²の威形壓力を以て壓縮成形するとき僅少量の水分の浸出する程度を以て標準とした。

表-6によると混捏に要する標準水量は、シラスの種類によつて異り、又配合の如何によつても著しい相違が見られる。即ち大體の傾向として、微細なる部分に多量を含むシラス及び石灰の多量なる配合の混合物は、然らざるものに比して常に多量の混捏用水を必要とすることが明かになつた。

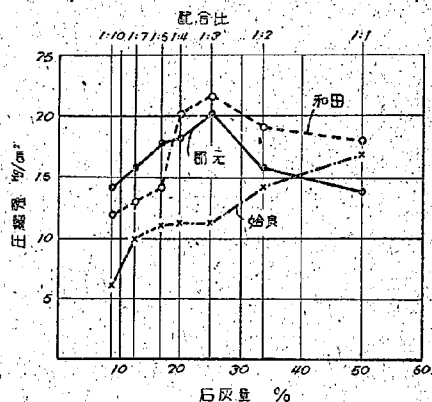
壓縮強も亦、シラスの種類及び配合割合によつて異り、特に配合割合は壓縮強に比較的大なる影響を與ふることが分る。圖-10によると郡元シラス、和田シラス等の如く比較的粗粒の試料にあつては、配合比を1:3程度に定めたとき壓縮強が最大となり、始良シラスの如く細粒に富む試料にあつては石灰量のより大なる配合比、例へば1:1或はそれ以上となしたとき壓縮強が最大を示す傾向を見ることが出来る。

然しながら全般的に見てシラスの種類、配合比、水量等の相違による強度の變化は何れも大同小異であり、これ等の條件を如何に變ふるとも混合物の強度の増大は期待し得ざる如く見られ、要するところシラスはその儘では天然凝結材としての價值に乏しきものと稱し得るのである。

(2) セメント混和材としての試験

コンクリートの混合に際して二次的にセメントに混和する天然産の材料としては、砂、白土、可溶白土、火山灰等といはれる可溶性珪酸を多量に含む岩石風化物が従来主として使用されてゐる。この種の岩石風化物は火山灰、火山砂の類が水により運搬されて第三紀層又は第四紀更新層中に沈積し、風化作用をうけて幾分粘土化した

圖-10 シラス石灰混合物の壓縮強に及ぼす石灰量の影響



所謂凝灰質砂に属する軟岩である。

シラスも亦その成因から見れば凝灰質砂の一種に属するものであるが、その生成は凝灰質砂に比して幾分新しき時代に属する如くで、概して風化の程度が不十分である。そのため、シラス中に含まれる可溶性成分は概して少量であり、セメント混和材として特に良質ならざることとは了解出来るのであるが、シラスの混用によるセメント・モルタルの強度を測定し、その結果から正當の判斷を下すこととした。

(i) シラスの粉碎 郡元シラス、和田シラスを及び始良シラスの3種を代表試料としてとり、更に比較試験の試料としては三重縣安濃郡鈴戸村牛田産の凝灰質砂（以下、三重凝灰質砂と稱す）、山形縣南山形郡元山村産の凝灰質砂（山形火山灰）及び長野縣上水内郡産の凝灰質砂製品（長野産白土）等を選び、長野産白土以外はいづれもこれを一旦 $110^{\circ}\sim 120^{\circ}\text{C}$ の乾燥爐で恒溫になるまで乾燥した後、ボール・ミルを用ひて微粉碎して試料となした。ボール・ミルの回轉数は 5000 回を以て標準とし、何れの試料に對しても同一條件で粉碎を行つた後、粉末度を測定してその結果から試料粉碎の難易を比較することとした。

粉碎試料の粉末度を 4900 孔殘渣の多寡を以て比較すると表-7 の如くなり、原試料の粒子の大きさ、形狀乃至硬さ等に支配されることが多いために種々粉末度の異つた結果が得られた。シラスの粉碎試料は凝灰質砂のそれに比して著しく粉末度が大きであつて、シラスは一般に粒子が堅硬で粉碎の稍々困難なるを思はしむるものがあつた。又シラス相互の間でも産地や種類の異なるに従つて粉碎に難易ある如くで、例へば始良シラスは3試料中で粉末度が最も小で粉碎が比較的容易なる如く見られたが、郡元シラスと和田シラスは比較的少量の粗粒分を残し粉碎稍困難なる如く認められた。

本試験では、これ等の粉碎試料をそのままで用ひることとし、特にこれを篩分けてそれぞれの粒度を一定させるやうな方法を採らなかつた。勿論混和材としての機能は、その粉末度に關係するところ極めて大であつて、混和材としての適否、優劣等を判定するには少くとも粉碎試料の粒度を一定にした上で比較試験を行ふのが妥當と考へるが、こゝでは混和材としての比較よりも、寧ろ混和材の原料としての適否、優劣を比較するのが目的なので、以上の如き方法を採用することとした。

この意味よりすれば、シラスは通常の凝灰質砂に比し一般に粉碎が困難であり容易に微粉となし得ざるものが多いが、後者よりも混合材としての價值は著しく劣るものと見て差支へない。

(ii) シラス粉碎試料を混用せるセメント・モルタルの強度 シラス粉碎試料を混用せるセメント・モルタルの強度は次の如くして測定した。モルタル供試體の作製方法、養生方法、曲げ強及び壓縮強の測定方法等はすべて臨時日本標準規格の軟練モルタルによるセメント試験方法に準據した。使用セメントは秩父普通セメントで、粉碎試料の混合量はセメントと粉碎試料との合量に對しそれぞれ 10%、20% 及び 30% の3種となし、セメントと粉碎試料との混合には乳鉢を用ひ5分間攪拌して双方を完全に混合せしめた。供試體は約 20°C の水槽中で養生をなし、3日、7日及び28日の各材齡に於ける曲げ強及び壓縮強を測定した。但しセメント・モルタルの配合はセメント+粉碎試料：九味浦標準砂=1：2と定め、水量は65%を標準とした。

(a) 施工軟度 水量を一率に 65% と定めた場合、フローによつて表される施工軟度に及ぼす粉碎試料の種類及び混合量の影響に就いて行つた試験の結果を示すと表-7 の如くである。表-7 に示すやうに、混和材の混用即ち粉碎試料の一定量を以てセメントの一部を置換へたことにより、セメント・モルタルのフローは例外なく減少の傾向を示してをり、特に凝灰質砂の粉碎試料を混用したモルタルではその傾向が著著である。微細な粒子を多量に含む混和材が、混合に多量の水を要するのは當然のことで、一定のフローを與へるためには混合材を用ひざるモルタルに比し常に多量の水を必要とする譯である。

表-7 セメント・モルタルのフローに及ぼす混合材の種類及混合量の影響

粉 碎 試 料 種 類	粉 末 度 (4900孔残量)	施 工 軟 度 (フロー)		
		10%	20%	30%
郡元シラス	10.82%	156	144	142
和田シラス	8.02	149	127	124
給良シラス	3.77	143	128	124
三重炭灰質砂	0.31	140	122	119
山形火山灰	0.18	134	119	116
長野珪酸白土	40.42	130	116	111

備考: 混合材を使用せざるセメント・モルタル(配合 1:2, 水量 65%)
のフローは 160 である

粉碎試料の混合量によるフローの

變化は、粉碎試料を 10~20% 程度
混合せるとき最も著しく、混合量を
増加して 20~30% となすときには、
フローの變化が漸次小さく現れてく
る。フロー試験の特性から見て、こ
れは當然の結果と考へられる。

(b) 曲げ強及び壓縮強 粉碎試
料を混合してつくつたセメント・モ

ルタルの曲げ強及び壓縮強測定結果
を示せば表-8 の如くである。なほ

表-8 を簡約して、粉碎試料を混用せるモルタルの強度を、同一材齢に於て測定せる混和材を用ひざる純セメン

表-8 シラス及び炭灰質砂の粉碎試料を混用せるセメント・モルタルの強度(配合 1:2, 水量 65%)

粉碎試料の 混合量(%)	材 齢 (日)	郡元シラス kg/cm ²		和田シラス kg/cm ²		給良シラス kg/cm ²		三重炭灰質砂 kg/cm ²		山形火山灰 kg/cm ²		長野珪酸白土 kg/cm ²	
		曲げ強	壓縮強	曲げ強	壓縮強	曲げ強	壓縮強	曲げ強	壓縮強	曲げ強	壓縮強	曲げ強	壓縮強
10	3	13.9	48.7	13.7	49.8	10.7	51.0	18.7	67.7	16.2	69.2	15.3	53.2
	7	26.9	104	26.8	96.9	22.0	94.8	26.7	116	27.3	102.7	26.5	96.2
	28	44.7	177	45.9	184	44.9	180	56.9	222	52.5	193	47.8	175
20	3	11.0	40.8	12.2	48.0	8.7	44.7	16.4	56.7	14.3	60.7	12.9	42.5
	7	22.0	82.5	23.6	98.5	18.6	85.1	24.0	100	23.7	98.0	20.8	72.6
	28	33.3	136	40.2	173	39.7	176	53.2	195	50.6	182	43.7	150
30	3	9.2	32.0	11.8	45.2	7.2	35.1	12.4	53.8	12.9	53.5	9.4	23.5
	7	18.6	71.1	22.5	88.4	15.1	67.3	22.5	93.1	19.8	87.6	14.6	50.1
	28	32.3	112	39.2	161	30.8	141	50.7	172	40.3	153	34.7	113

表-9 粉碎試料を混用せるセメント・モルタルの純セメント・モルタルに對する強度比率

粉碎試料の 混合量(%)	材 齢 (日)	壓縮強 の 強 度 比 率 (%)									曲 げ 強 の 強 度 比 率 (%)								
		シラス粉碎試料			炭灰質砂試料			シラス粉碎試料			炭灰質砂試料			シラス粉碎試料			炭灰質砂試料		
		最大	最小	平均	最大	最小	平均	最大	最小	平均	最大	最小	平均	最大	最小	平均	最大	最小	平均
10	3	75.7	71.4	73.4	101.5	78.0	92.9	59.7	45.9	54.8	80.2	65.7	71.8						
	7	92.0	83.9	87.3	102.7	85.1	92.9	84.6	69.3	79.4	85.8	93.8	84.4						
	28	84.4	81.6	83.0	102.3	80.6	90.6	81.7	79.5	80.4	101.2	85.1	93.2						
20	3	70.4	59.8	65.2	89.0	78.0	78.1	52.4	37.3	45.6	70.4	55.4	62.4						
	7	82.7	73.0	77.0	88.5	85.1	78.3	74.2	58.5	68.2	75.5	65.4	71.8						
	28	80.6	62.7	74.3	80.8	80.6	81.0	71.5	59.3	67.1	94.7	77.8	87.5						
30	3	66.3	46.9	54.9	85.8	62.3	67.9	39.5	30.9	35.8	55.4	40.3	49.6						
	7	78.2	59.6	66.9	82.4	64.2	68.1	70.8	47.5	53.9	70.8	45.9	60.0						
	28	74.1	51.6	63.6	79.3	69.1	67.3	69.3	54.3	60.7	90.2	61.7	74.5						

ト・モルタルの強度を100とするときの比率によつて表し、且つシラス粉砕試料と凝灰質砂粉砕試料とに分けてそれぞれの平均値、最大値及び最小値を求めると表-9の如くなる。なほ粉砕試料を混用せざる純セメント・モルタルの3日、7日及び28に於ける強度を示せば表-10の如くである。

表-9により明かなやうに、セメント・モルタルの強度は粉砕試料の混合によつて概ね低下する如く見られ、特にシラス粉砕試料を混合せるものに於てその傾向が顕著である。少くとも本試験の範圍では、この種粉砕試料の混用により強度の増大を期待し得ざるものゝ如く見て差支へない。

勿論混合材の使用目的が、これによつて強度の増大を図るにあるばかりでなく、混合材中に含まれる可溶性珪酸とセメントの水和作用によつて生成せる遊離石灰とを互に化學的に結合せしむることにより、セメント混合物の耐水性並びに耐鹼性の増大を図るとともに、セメント使用量を節約せんとする經濟上の目的も含まれてゐるのであるから、その混用による強度の低下も取る程度は容認されて然るべきと思ふ。表-9に見られるやうに、凝灰質砂粉砕試料10%の混合により壓縮強度は混用せざるものゝ90.6~92.9%に低下し、又20%の混用により78.1~81.0%に低下し、曲げ強度は材齢によつて著しく異なるが10%の混用で71.8~93.2%に又20%の混用により62.4~87.5%に低下したが、その混用によつて上記目的の双方又は一方がよく満足されるならば、時としてこの程度の強度低下は許されて然るべきであらう。

粉砕試料の混合による強度の低下は圖-11に見られる如く、材齢によつても異り更に粉砕試料の種類によつても異なるが、混合量の増加は常に強度の低下を招致する如くであつて、要するところ粉砕試料の混用によつて得られる強度の上の利益は殆んど認められず、混合量の増加はこれを混用せるセメント・コンクリート構造物に時として重大なる危険を發生せしむる原因をなす如く考へられる。

以上を要するシラス粉砕試料の混用は、混合量の少なる場合は別とし、特に推奨せられるべきでないことが明かになつた。

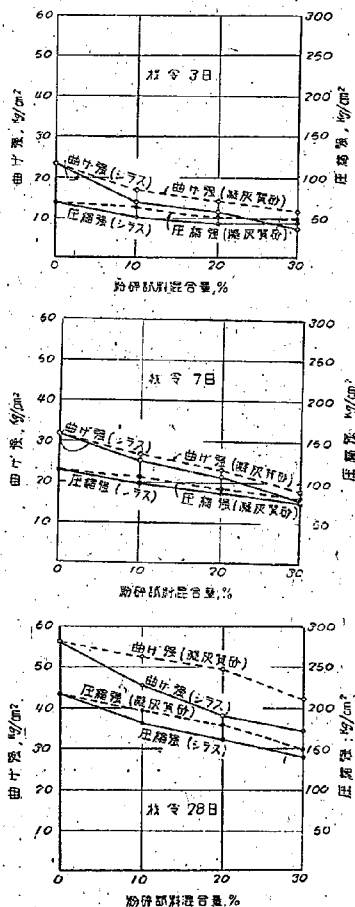
(3) コンクリート用細骨材としての試験

既に述べたやうにシラスには、粗鬆、脆弱な浮石が多量に混在し、且つ土とも見做し得る火山灰を多量に含み、而も砂粒子の形状は圖-9の顯微鏡寫眞に見るやうに偏平且つ細長で

表-10 純セメント・モルタルの強度(1:2)

材 齢 (日)	曲げ強 kg/cm^2	壓縮強 kg/cm^2
3	23.3	68.2
7	31.8	113
28	56.2	217

圖-11 セメント・モルタルの強度に及ぼす粉砕試料混合量の影響



稜角鋭きに過ぎるため、コンクリート用細骨材としては適当な材料ではないやうに思はれる。従来これをコンクリート用細骨材に利用した例は極めて乏しく、僅かに國鐵指宿線の一部で側溝コンクリートに利用しあるを見、又用水の小堰堤工事に利用せる例を聞く程度である。

若しシラスがコンクリート用細骨材として利用し得るならば、その廣大なる分布を見る縣下の土木工事に極めて大なる利便を與へるものであり、その經濟的價值は至大なる如く思はれる。この意味に於てシラスを細骨材とするセメント・モルタルの強度を測定し、コンクリート用細骨材としての適否を判斷することとした。

(i) 細骨材としての一般性質

コンクリート用細骨材としての一般性質を明かならしむるため、通常の細骨材に對すると同様の試験を行ひ表—11の如き結果を得た。シラス試料には郡元シラス、和田シラス、始良シラスの3種を選び、2.0mm 篩を以て篩分け篩通過部分を集めて試料とした。なほ比較試料には東京附近産の代表的川砂として多摩川砂、荒川砂の2種を選び、又強度試験の基準を得るため九味浦砂を使用した。

比重 ルシャテリ—比重法によるシラスの比重は表—11に示すやうに2.33~2.42であり又見掛比重は1.05~1.24となつてをり、普通に用ひられる川砂の比重2.60~2.70に比すれば、何れも極めて小である。セメント及

表—11 シラス及び川砂のコンクリート用細骨材としての試験

項 目	郡元シラス	和田シラス	始良シラス	多摩川砂	荒川砂	九味浦砂	土木學會鐵筋コンクリート細骨材規格
比 重	2.42	2.37	2.33	2.63	2.66	2.66	—
見 掛 比 重	1.24	1.20	1.05	1.65	—	1.50	—
空 隙 率 %	48.8	49.4	55.0	37.3	—	43.6	—
吸 水 率 %	—	—	—	—	—	—	—
有機不純分	合 格	合 格	合 格	合 格	合 格	合 格	標準色以下
粒 度 %							
10mm 篩通過	100	100	100	100	100	100	100
5" ク ク	100	100	100	100	100	100	85~100
1.2" ク ク	98.8	95.9	97.2	84.2	94.0	100	45~80
0.3" ク ク	40.0	47.8	72.4	50.2	27.9	98.4	10~30
0.15" ク ク	32.1	34.9	51.5	7.2	16.0	32.5	0~5
洗試験損失	19.2	17.5	38.0	4.0	2.2	0.4	0~3

び粗骨材に比し細骨材のみ比重が小なるときは、コンクリートの混合にあたり混合物に分離現象を惹起せしむる惧れが多い。シラス中に含まれる浮石分には尙更その懸念が多く、この種輕微骨材の使用に當つては特に混合物の分離現象に就き深い注意を要するものである。

粒度 土木學會規定の鐵筋コンクリート示方書の細骨材試験方法に準據し、2.0mm 篩通過のシラス試料の粒度を測定すると表—11 下欄の如くなり、何れも微細に過ぎるためコンクリート用細骨材として不適當なる如くである。特に洗試験による損失即ち 0.075mm 篩通過部分の量を土壤と見做すときは、何れのシラスも20%以上の土壤を含むこととなるため、このまゝ通常の川砂と同じ取扱によつたものではコンクリート用細骨材として利用し得ざるものとも解される。

有機不純分 苛性曹達溶液の呈色反應によつて表される細骨材中の有機不純分は、3 試料ともこれを無視するも差支へない程度に僅少である。一般にシラスは地表以下 1m 以下の下層に成層してをり、川砂、海砂の如く

有機不純分の混入し来る機会が極めて少く、から有機不純分に對する特別の考慮は必要ないやうである。

(ii) セメント・モルタルの試験

セメント・モルタル供試體の作製方法、養生方法並びに強度測定方法はすべて臨時日本標準規格の軟練モルタルによるセメント試験方法に準據した。秋田普通セメントを用ひ、配合比 1:1 及び 1:2 の軟練モルタル供試體をつくり、成形後 7 日及び 28 日に於ける強度を測定した。混合に要する水量はシラスによつて著しく異なる如く想像されたので、これを同一配合の九味浦標準砂使用のモルタルが標準水量によつて與へられるフローと等しくなる如く定めた。即ち本試験では配合 1:1、水量 45% の九味浦標準砂モルタルはフロー 172、又配合 1:2、水量 65% のモルタルはフロー 160 を與へたので、シラスを細骨材とするモルタルに於てもこの程度のフローが與へられるやうに水量を調節した。

試験結果は表—12 及び 圖—12 の如くである。

シラスを細骨材とせるモルタルの壓縮強及び曲げ強は表—12 及び 圖—12 に見られるやうに、同一配合、同一材齡では常に九味浦標準砂

や川砂を用ひたモルタルよりも弱く、

1:1 モルタルにあつては、壓縮強も曲げ強もシラスの種類とは關係なく殆んど同程度の強さを表してゐる。これを同一材齡の九味浦標準砂モルタルの強度に對する比率を以て比較すると、材齡 7 日の曲げ強は 70.2~72.9%，平均 71.3% となり互に近似した結果を示し、材齡 28 日でも 81.6~87.3%，平均 84.0% で、これ又互に一致した結果が現れてゐる。壓縮強にも亦同様の傾向が見られ、材齡 7 日の強度比率は 66.1~66.8%，平均 66.4%，材齡 28 日には 78.1~84.0%，平均 80.7% となり、比較的一致した結果が現はれてゐる。

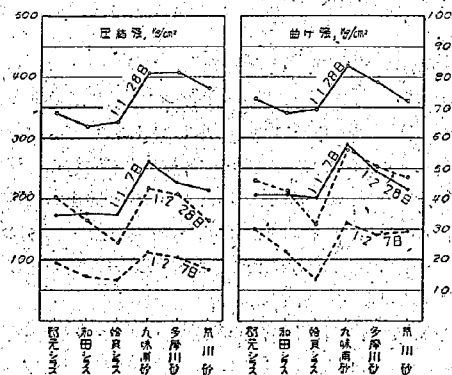
然るにセメント量の少い 1:2 モルタルになると、シラスの相違による強度の相違が極めて明瞭に現れてくる。例へば曲げ強 7 日の強度比率は郡元シラス 94.0%，和田シラス 71.1%，始良シラス 42.6% と互に廣汎な強度の相違を示してをり、郡元シラスの如く九味浦標準砂に近い強さを示す例が見られるとともに、始良シラスの如く九味浦標準砂による強度の 50% にも達し得ぬものもある。このやうな傾向は、材齡が變つても同様であり又壓縮強に於ても同様である。

以上の試験結果を綜合判斷すると、シラスを

表—12 シラスを細骨材に用ひたセメント・モルタルの強度

細骨材	試験条件			曲げ強 kg/cm ²		壓縮強 kg/cm ²	
	配合	水量	フロー	7 日	28 日	7 日	28 日
郡元シラス	1:1	68	165	41.2	72.8	173	342
和田シラス	ク	50	171	41.8	68.1	175	318
始良シラス	ク	72	162	40.2	60.1	174	326
九味浦砂	ク	45	172	57.3	83.3	202	407
多摩川砂	ク	46	156	48.8	78.0	226	408
荒川砂	ク	56	152	43.0	71.9	215	382
郡元シラス	1:2	88	158	29.9	45.9	95.0	202
和田シラス	ク	92	167	22.6	42.6	70.2	165
始良シラス	ク	115	153	13.5	31.8	67.7	128
九味浦砂	ク	65	160	31.8	58.2	113	217
多摩川砂	ク	66	153	28.0	50.4	104	206
荒川砂	ク	70	150	28.9	47.0	83.1	164

圖—12 シラスを細骨材に用ひたセメント・モルタルの強度



コンクリート用細骨材として用ひる場合には、材節、配合、水置等の如何に關らず、常に混合物の強度低下の免れぬことを考慮して混合物の設計をなすべきであり、特にセメント量の少い配合の混合物ではシラスの種類によつて強度の低下率が極端に異なるから、シラスの選定に特に深甚な注意を要するものと認められる。

〔IV〕 天然凝結材の調査並びに成分、性質に関する試験

シラスの調査及び試験と併行し、天然凝結材として利用し得る粘土、珪藻土その他各種の岩石風化物に就き、分布及び賦存状態、既往及び現在に於ける利用状況並びに利用工法等を調査し、且つ採取試料に對しては以下に記載する如き試験を行ひ成分並びに性質を明かならしめた。

(1) 利用状況並びに利用工法

鹿児島縣では古くから各種の天然凝結材が各種土木工事に利用されてゐた。明治以後ポルトランド・セメントの普及するに及んで、その使用は著しく衰退したが、今尚縣内各地の民家では古來の習慣に従つて小規模の土木建築工作物に可成り廣く利用してゐるやうである。

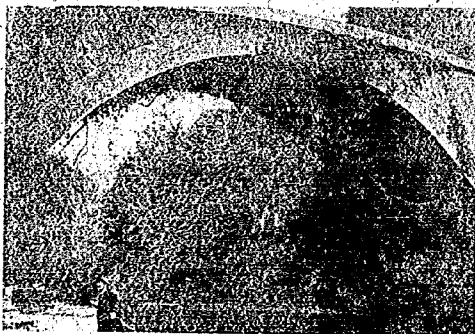
明治以前に築造された土木工作物の中、天然凝結材を利用したものに就き調査した結果をあげれば (i)~(iv) の如くである。

(i) 指宿港潟口船溜の護岸 指宿郡指宿町潟口温泉附近に往時設けられた漁港船溜の石積護岸は高さ 10 尺、延長 110 間、信玄壘と稱する練法工法により石灰と粘土との混合物を石積の裏込め及び目地に用ひた堅牢な石垣であつたといふ。天保 14 年 (紀元 2503 年) 岩永三五郎なる工人によつて築造されたと傳へられるが、現在この附近は全く改修せられたため、その遺址を察することは出来ない。たゞその面影を残すのは、この船溜に流入する温泉排水溝の護岸やこれに架した石橋等の目地に使用された赤褐色の粘土と石灰との混合物であつて、この混合物を利用する工法は古く維新前より傳はり來つたこの地方固有のものであるといふ。これに用ひた赤褐色の粘土は俗に辨柄土と稱する重粘な土壤で、現在でもなほ各種用途に利用されてゐる。辨柄土に就ては後述する。

(ii) 伊敷村の太鼓橋 岩永三五郎なる工人は肥後熊本藩の人で、天保年間招かれて薩摩島津藩に來り、前記指宿港の外、鹿児島港の波止場 (三五郎波止として現存) 工事、鹿児島市附近に於ける石拱橋の架設、川内川下流高江村の干拓工事等に盡心し偉大な功績を遺してゐる。

太鼓橋も岩永三五郎の手になる石拱橋の一で、鹿児島市外伊敷村にあり、甲突川に架した單連の石橋で、下流に架せられた西田橋その他とともに甲突川の 6 大橋として著名である。

圖—13 伊敷村の太鼓橋



圖—13 の寫眞に見られる如き構造で、有効幅員約 2m、徑間約 35m、平水面よりの高さ約 6m、輝石安山岩と鑑定される石材を巧みに積み上げ、石積目地の各部には粘土と石灰よりなる灰色の混合物が填充されてゐる。

この石灰・粘土混合物の中、常に水と接觸してゐる橋脚部分に施したものは水に侵蝕されて脆弱化し一部脱落せる箇所も見られたが、大部分は極めて堅牢で今猶目地としての機能を充分果してゐる。

太鼓橋より採取せる粘土・石灰混合物の化學

分析試験結果を示せば表-13の如し。

(iii) 西田橋 西田橋は甲突川の下流、鹿兒島市内に架せられた幅員 4m、4 連の石拱で、圖-14 に示す如き構造の石橋である。高欄の擬寶珠には慶長 17 年 6 月吉日と記してあるが、實際は天保年間に太鼓橋と同機岩永三五郎が架設せるものといはれる。

使用した石材の孔隙、缺落箇所等には他物を填充した形跡が明かに遺つてゐるが、これは珪藻土と松脂との混合物であるといはれ、些細な部分にまで遺憾なき注意の拂はれたことが想像せられる。

(iv) 新川尻の干拓工事 島津藩では前記の如き各種の土木工事に相前後して始良郡新川尻の海面を埋立て、こゝに廣大なる干拓地を設けたと傳へられる。古老の言によると、干拓地臨岸の石積工事には、附近の沖積層地に賦存する粘土を採取し來り、これに石灰を混合したものを用ひて目地及び裏込めを施したといふ。附近一帯は明治中期に至り全面的に改修工事が行はれたよゝで、現在その趾を遺すものは無い。

次に明治以降に施工された天然素材利用の土木工作物に就き略述する。

(v) 鹿兒島港の岸壁 鹿兒島港の第 1 期改修工事は明治 35 年に起工、同 38 年に竣工を見たのであるが、俗に洲崎海堡と稱せられる海岸の護岸工事及び附近の橋梁工事には粘土・石灰混合物を利用したことが鹿兒島港修築誌に記載されてゐる。

圖-15 洲崎海堡略圖

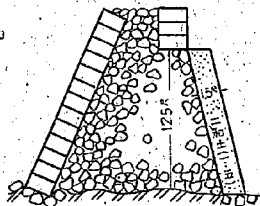
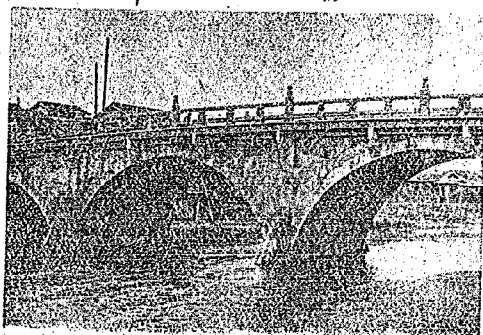
同誌によると洲崎海堡の構造は圖-15 の如くであつて、厚さ 1.5 尺、高さ 12.5 尺の裏面には割合 1:5 の粘土・石灰混合物を使用せる如く記されてゐる。然しその施工方法、材料等に關する記載がなく、又洲崎海堡は最近、内務省直轄の改修工事に際し取除かれたため、本工事の詳細を知ることは出来なかつた。

(vi) 新川尻の干拓工事 島津藩の干拓工事に次ぎ明治以後、鹿兒島灣に面した始良郡下の各地では砂洲、海面等を埋て、農耕地となす干拓工事が屢々實施された。

新川尻左岸の干拓工事はその代表的なものといはれる。工事は最初明治 25、6 年頃に行はれたが、護岸低く且つ脆弱であつたため明治 40 年に熊本縣の人吉澤菊次郎氏がこれを改修補強し現在に至つてゐる。

干拓地の護岸、防潮堤等には古く施された二和土又は三和土形式の粘土・石灰混合物による目地、裏込め等が隨處に見出される。特に干拓地の略中央に海岸線と平行して設けられた高さ約 3m の間知石積段の防潮堤には代表的な天然素材利用の趾が見出される。この防潮堤は櫻島大爆発（大正 8 年）の直後に完成したとのことであるから、既に約 30 年の星霜を経た譯であるが、この石積みに施された淡褐色の粘土・石灰混合物の目地は極めて堅牢で今日に至るも殆んど損傷を見ず、ポルトランド・セメントに於けるが如き優秀なる耐久性を保持してゐる。

本工事の粘土・石灰混合物に使用した粘土は國分町大字野口、同大字松木等に於ける沖積層の畑地の下部に成層せる赤褐色重粘土であるといひ、又一部には始良郡霧島村重久附近に産する第三紀層の粘土を採取使用せ

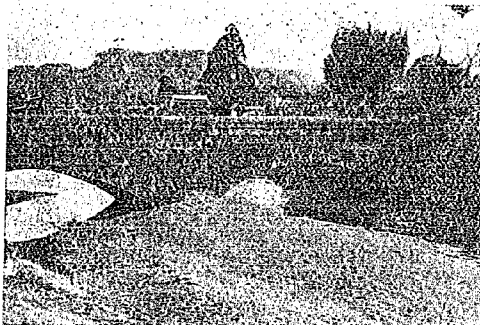


りといふ。

粘土・石灰混合物は長崎市附近で行はれてゐる天川澁倉及び天川混泥土工法とよく似た混練法によつて調製される。石灰と粘土との配合比は1:8程度を普通とし、これに適度の水を加へ、俵に入れて足にて踏み練りを行ひ充分粘調性が現れてから使用する。混捏に要する水量は、混合物を目地として石材を積み重ねた時、混合物が甚だしく逸出せざる程度を標準となすといふ。

- (vii) 國分町の水路橋 國分町字化向には、新川を横斷する用水路のために架した「めがねばし」と稱する有効幅員4m、延長約25m、2連の石拱の水路橋がある。

圖一16 國分町の水路橋



圖一16の寫眞に見られるやうな構造で、水路の上には石盛を施し土砂を覆つて土道となし道路橋の用も兼ねさせてゐる。橋邊の石積をはじめ石積水路の側壁には、目地として黄褐色の粘土・石灰混合物を填充してある。

この附近の灌漑用工作物を見ると、或は用水路石積みの目地とし或は樋門、開門の漏水止め等の目的を以てこの種の混合物を盛んに使用してをり、現在でも必要に應じ採掘利用するといふ。

- (vii) 國分町枝宮神社の石塀 國分町字野口地内の村枝宮神社境内の一部に巡らされた石塀(高さ4尺、方10尺)の目地には、灰色を帯びた粘土・石灰混合物が施されてある。石塀の建設は明治6年1月で、その後補修せずとのことであるが、この目地が極めて堅牢で少しも損傷のないところから見ると、この粘土・石灰混合物は極めて大なる耐久性を有するものと思はれる。

國分町附近には古くから石垣、石塀、石造倉庫等に粘土・石灰混合物の目地を施工する風習が傳へられ、民家に於ては附近の山地より採掘せる凝灰質砂岩又は頁岩等の軟質石材を用ひて石積み工事を用ひ、その目地、裏込めとして粘土・石灰混合物を填充する工法が今もなほ盛に行はれてゐる。

これに用ひる粘土は主として新川流域に廣く分布する沖積層地の粘土層より採取する。この種の粘土は先にも述べたやうに各種土木工事の凝結材としてひろく利用され、又石塀、石垣の目地、泉水池、肥料溜等の築造にも用ひられ、或は家根瓦、植木鉢、煉瓦等の窯業原料ともなり更に煙草葉乾燥用甕の築造に供する等、極めて廣汎なる用途を有するもので、甕土又は瓦土ともいはれ地方的材料として極めて重要なものとなつてゐる。

表一13 天然凝結材・石灰混合物の化學的成分

成 分	湯口温泉排水溝の石積目地	湯口温泉排水溝の石積目地	新川尻左岸干拓地護岸の目地	國分町枝宮神社石垣の目地	伊敷村太鼓橋石積の目地
灼熱減%	21.00	24.75	25.02	29.51	25.03
珪酸%	29.72	28.67	35.16	22.25	30.12
礬土%	23.33	23.14	9.16	9.94	12.36
酸化鐵%	10.12	19.36	26.05	23.42	25.90
石灰土%	0.60	1.42	0.17	0.17	2.80

表—13は上に述べた天然凝結材利用の工作物より採取した石灰混合物の化学的成分を定置した結果である。石灰含有量は 19.12~28.42%, 平均 23.80% を示し、何れの試料にも石灰の含有は明瞭である。こゝで石灰とは生石灰=酸化石灰 (CaO) をいふのであるから、これを普通に使用される消石灰=水酸化石灰 ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) に換算すると消石灰含有量は 24.26~37.53%, 平均 31.56% となり、これによつて粘土・石灰混合物の配合割合を推定することが出来るのである。

(2) 産地及び賦存状態

上に述べたやうに鹿児島県では古くから天然凝結材を利用してゐた關係で、縣内にはその賦存の明かにされてゐるところが多い。

又セメント混和材として利用の可能な珪藻土、火山灰の類も古くから採掘されてをり、その賦存も山川阿その他縣内數箇所知られてゐる等、土木材料として利用の可能な岩石風化物の豊富な埋藏が推定されるのである。

表—14 天然凝結材試料の採取地

略 名	圖-1に於ける位置	採 取 地 名	備 考
後 迫 筋 土	○ 9	鹿兒島郡谷山町後迫(上場の茶屋)	
辨 柄 土	○ 10	指宿郡指宿町湊字南(上溜)	
珪 藻 土 (i)	○ 11	指宿郡山川町成川字山神通り	珪藻質植物遺骸
火 山 灰 (ii)	○ 12	指宿郡山川町成川、火山灰會社林	向 上
珪 藻 土 (iii)	○ 13	始良郡龍里村大字重富字火字都	同 上
陶 土	○ 14	始良郡國分町字野口	冲積層粘土
野 口 粘 土	○ 15	始良郡國分町字野口	冲積層粘土
花 向 筋 土	○ 16	始良郡國分町字花向	冲積層粘土
林 田 白 粘 土	○ 17	始良郡牧園村林田温泉	
栗川安山岩層	○ 18	始良郡牧園村栗川	安山岩質堆出物
横岳火山灰	○ 19	始良郡霧島村横岳	火山灰

表—14は實地調査を行つた

場所の地名、圖-1 の地質圖

上に於ける大體の位置、採取

試料の成因より見た種類等を

示したものである。勿論表—

14にあげた程度では縣内に産

するこの種材料のすべてを網

羅したものとは云ひ得ないが、

これによつて代表的な天然凝

結材の産地、賦存状態を明か

ならしめ、又各種試料の大體

の性質、成分等を明かにし

得たものと思ふ。

各産地に於ける天然凝結材の賦存状態、現在に於ける利用状況等を概説すれば以下の如くである。

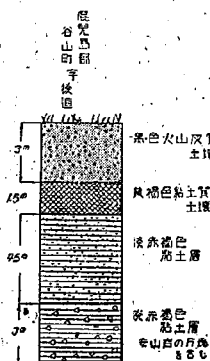
(i) 鹿兒島郡谷山町後迫(上場の茶屋) 圖-17に示した見取圖に於て、地表下 3 m の下部に賦存する黄褐色の粘土質土壤並びに更にその下層の淡赤褐色土壤は、著しく粘潤性に富み乾燥するも龜裂を生ぜざるため、附近では古くから竈築造用土に用ひ又現在では赤煉瓦の製造原土に供してゐる。

利用し得る粘土層の厚さは、黄褐色の上部層に於て 1.5 m 内外、下部の淡赤褐色粘土層に於て 4.5 m 内外とし、その下部層に於ても粘土の性質は概ね同様なる如く見られるが、安山岩質の片塊を含むため使用に稍困難を伴ふものゝ如くである。

(ii) 指宿郡指宿町湊字南(上溜) 指宿町附近の民家でひろく利用してゐる辨柄土と稱する赤褐色の粘土は、同町の西方 2~4 km に位置する高距 50~160 m の山地の背部乃至中腹部から採掘される。特に良質なりとし好んで使用されるものは同町湊字南地内の俗に上溜と稱せられる部落の附近より採掘される。

上溜地内に於ては高距 50 m 内外の丘陵の中腹部一帯に辨柄土の豊富な賦

圖-17 後迫地内の地層見取圖



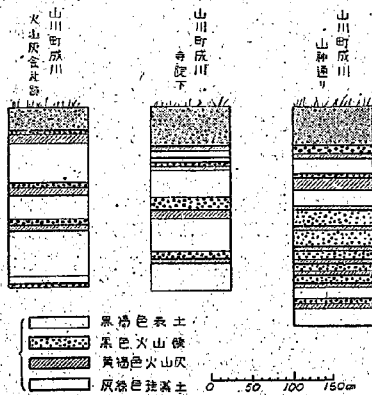
存が見られ、上部に厚さ 1~5 m のシラス層又は風化凝結せる浮石の層を頂き厚さ 2~10 m を以て成層する如く推測される。

指宿町附近では辨柄土を各種石積み工事の目地及び裏込め等に利用する外、コンクリート又は陶器製井戸側の継目、樋門開門の類の漏水止め、温泉導水管及び排水管の継目等、多種多様の目的に利用してゐる。

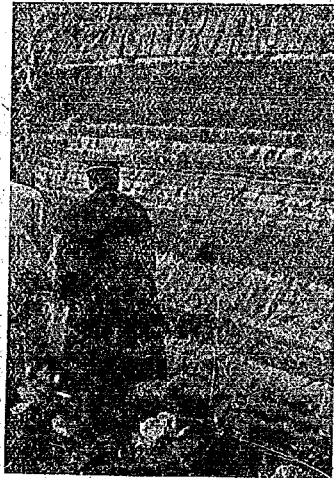
辨柄土はその儘でも硬化するが、これに石灰又はセメントを重量比にて 3:1 程度混用すると硬化は特に迅速且つ良好であるといふ。混合作業は爪を用ひて踏み練りによつて行ふ場合が多く、粘土塊がよく破碎せられ充分粘稠性を生じてから用ひるのである。

(iii) 指宿郡山川町成川、山川町成川地内一帯に亘る盆地には珪藻土の極めて豊富な埋蔵が知られてゐる。珪藻土は含水状態に於て灰緑色を呈し、圖一18に見るやうに黒色多孔質の火山礫層、黄褐色又は赤褐色の火山灰

圖一18 山川町地内に於ける地層見取圖



圖一19 山川町の珪藻土火山灰層



層と互層し、圖一19の寫眞に見られるやうな美しい層理を示してゐる。又圖一18の見取圖のやうに各層の厚さ、層序、層位等は場所によつて幾分異つてゐるが、火山礫、火山灰、珪藻土等の性質は何れの場所でも略同質なる如く見受けられた。

大正9年頃、こゝに山川珪藻土火山灰株式会社(起りローラー・ミルを有する工場を設けて附近の珪藻土及び火山灰を採掘粉砕して製品となし、縣下各地及び臺灣方面に移出したといふ。當時この事業に携りたる者の談によると、先づ灰緑色の珪藻土と黄褐色の火山灰とを別箇に分けて採掘し數日間天日乾燥に附した後粉砕する。粉砕後、火山灰 30 : 珪藻土 70 の割合に混合し、100 斤宛に詰めて製品となす。1 町の價格約 1 圓、1 日の生産高は 100 斤収入凡そ 800 町、即ち 80,000 斤 (18,000 kg) に上つたといふ。

珪藻土の製品は主として河川、海岸等に於けるセメント・コンクリート工事にセメント混和材として利用せるよしで、使用量はセメント量の 1/4 程度を限度とし、一般には 1/2 内外の混用を以て標準としたといふ。この事業は昭和初期に至つて中止の陰儀なきに至り、現在ではこゝに埋存する豊富な珪藻土に一顧を與ふるものもない。

(iv) 始良郡蒲生村西浦字火字都 本地域にも亦珪藻土の豊富な埋蔵が見られ、現在採行中である。

珪藻土層は、茶褐色を呈する厚さ 0.5 m の表土の下位に、他層を挟存せざる厚さ 20 m 以下の厚層をなして賦

存する。採掘せる原土は始良郡重富村字脇下の粉砕工場に送り粉砕加工して製品となす。製品の主たる販路は熊本縣八代、水俣方面であり、主として保温材料等に用ひられるといふ。

(v) 始良郡加治木町小山田字茶碗屋 この地には古くから傳はる龍門寺焼と稱する陶器の窯元が數戸あり、家内工業として小規模に食器、植木鉢等を製造してゐる。これに用ひる陶土には同地内の丘陵の麓部に成層する黄褐色の粘土を充てゐるが、産量十分でなため熊本縣天草方面より供給を仰ぐ状態にあるといふ。その成分及び性質は後述する如くであつて天然凝結材として利用の可能性は多いが、産量より見て土木材料としての利用價值は極めて乏しきものである。

(vi) 始良郡鵜分町字野口及び同町字花向 新川流域の沖積層地に成層する粘土は、古くから鵜分町附近で各種工作物の凝結材に利用されてゐることを既に述べた。その代表的産地として鵜分町字野口及び同町字花向に於ける採掘地を調査した。

野口に於ける採掘地は同部落の東南隅にあり、粘土は厚さ 0.5~1.0 m の灰褐色砂質表土の下位に成層する。同部落の民家に於て石積みの目地材料乃至は建築造用土として随時使用する程度で、その採掘量は僅少である。

花向に於ける採掘地では現在、瓦原料土を採掘してゐる。粘土は畑地をなす厚さ 0.3~1.0 m の黒色表土の下位に成層する。粘土層の上部凡そ 0.4 m は粘潤な赤褐色粘土よりなり、下部は幾分黄味を帯びた灰白色の砂質粘土よりなる。瓦原料には兩種の粘土を混用してゐるが、土木工作物に用ひるには下部の灰白色砂質粘土を以て適當とするものと如く觀察された。

(vii) 始良郡牧園村林田温泉附近 林田温泉は霧島國立公園内の所謂霧島温泉地帯に在る一温泉である。林田温泉附近の山地一帯では、地表近くに露はれたすべての岩石（主として安山岩）が完全に分解して白色粘潤な粘土化した地層が隨處に見られる。部分的には幾分黄色を帯び或は赤味を帯びた粘土も見られるが、純白に近い色の粘土が極めて廣い地域に亘つて分布してゐる。

この粘土の成因が氣象作用に基づくものか、或は原岩石噴出後に於ける二次的火山作用によるものか或は又温泉水の影響によるものであるか、乃至はこれら諸原因の綜合的作用に起因するものであるか、その何れに歸するかには就ては地質學的研究に俟つところが多いのであるが、林田温泉の温泉湧出量の豊富なる事實、粘土の性質乃至成分の類似せる點等よりして別府温泉に於ける別府白土の成因と同様、温泉又は温泉水の影響に起因するところも亦極めて大なるものと如く推測せられる。

(viii) 始良郡牧園村栗川 霧島火山の中腹には、隨處に安山岩質拋出物の風化生成物たる安山岩屑の賦存が見られるが、牧園村栗川地内には代表的な露出箇所が多數存在する。

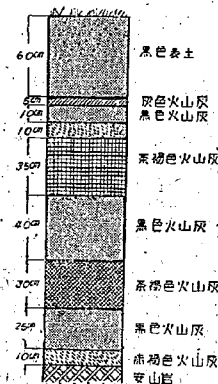
この附近に於ける安山岩屑は濃赤褐色重粘な粘土質土塊と化してをり、凝結の程度は天然凝結材として利用するに十分なるを思はしむるものがある。粘土中には稍に大きさ 50 cm 以上に達する新鮮堅硬な安山岩質岩塊を含み且つ少量の浮石を雜へてゐる。

(ix) 始良郡霧島村横岳 霧島火山の南面から東面にかけての中腹から山麓に至る一帯の傾斜面には 圖-20 に例示したやうな、多様の色彩を帯びた火山灰の美しい累層が見られる。火山灰の累層は下盤岩石の高低起伏に應じて起伏し美しい波形を描いてゐて、常に明瞭な層理を示し下盤の岩石を整合的に被覆してゐる。火山灰層の厚さは頂上に近きほど厚く山麓に向ふに従つて漸次薄くなり、終に消失する。

横岳附近に於ける各火山灰層の厚さは 圖-20 の如くで、地表より下盤岩石までの火山灰層全厚は約 4 m に及ぶが、山麓近くの日豊本線霧島神宮驛附近まで下ると、僅か 0.5 m 内外の薄層となる。

本層は、霧島火山活動時の火山拋出物即ち火山灰の堆積層たることは疑ひを容れざるところである。而も比較

図—20 横居附近の地層見取図



的新しき時代に於ける抛山物であつて、少くとも前述栗川附近に於ける安山岩層に比して新しき生成層であることは、栗川附近の安山岩層と同質と認められる安山岩層を混有する岩石を下盤とする事實より推測して極めて明瞭である。

(3) 成分及び性質

上記の各地より採取した試料に對しては、以下の各項に示す如き物理的試験及び化學的試験を行つて、性質並びに成分を明かならしめ、天然凝結材としての品質の優劣、使用の適否等を判断することとした。

物理的試験の結果を總括すれば表—15 の如くなり、化學的試験の結果を示せば表—16 の如くである。

(i) 外觀 野外に存在する状態では、表—15 に示す如く 著量の水分を吸収してゐて、一般に重粘で可塑性の大なる粘土質土壌の状態を保つてゐるものが多い。後迫鹽土、辨柄土、林田白粘土、栗川安山岩層等は特に粘潤性が大きい。

試料の色は濕潤時と乾燥時により異り、乾燥すると色の淡くなるものが多い。

採取せる儘の試料の色は表—15 に示す如く、赤味を帯びたものと白色系統のものに分けることが出来るが、一般に鐵分含有量の多きものは赤色を帯び、然らざるものは白色又は灰白色を呈する如くである。

試料を乾燥せしめて水分を除くと、その色の次第に淡らぐものが多い。蒲生珪藻土、林田白粘土等は水分が除かれると、殆んど純白になる。

(ii) 比重 乾燥破砕した試料の比重は表—15 に見られる如く廣範圍の相違がある。山川珪藻土、山川火山灰、蒲生珪藻土の如く、珪藻質で植物生遺體を含む試料は一般に比重が小であり、後迫鹽土、栗川安山岩層の如

表—15 天然凝結材試料の物理的性質

試験項目	後迫鹽土	辨柄土	山川珪藻土	山川火山灰	蒲生珪藻土	加治木陶土	野口粘土	花向鹽土	林田白粘土	田栗川安山岩層	横山火灰	番
外觀	赤褐色粘稠	赤褐色粘稠	灰綠色粗糲	黃褐色	灰白色	黃褐色	灰白色粗糲	黃白色	白色粘稠	赤褐色粘稠	黑褐色粗糲	
比重	2.70	2.45	2.38	—	2.46	2.50	2.46	2.43	2.22	2.64	—	
含水量%	43.7	43.2	82.3	—	14.6	5.4	12.1	56.7	48.1	48.7	48.7	
機械分析%												
砂	46.1	7.2	15.6	—	38.4	64.1	—	84.9	40.3	34.2	—	
沈泥	35.0	86.8	42.1	—	30.4	24.6	—	48.4	33.3	40.4	—	
粘土	18.9	56.0	42.3	—	31.2	11.3	—	16.7	26.4	25.4	—	
收縮限界	46.0	19.2	50.9	85.7	95.3	—	53.2	47.3	48.3	46.0	—	
液性限界	120.3	189.5	300.5	222.2	120.7	64.1	62.4	83.2	135.5	58.8	163.2	
塑性限界	33.6	171.3	135.1	146.5	87.0	—	35.2	39.3	34.2	71.2	104.3	

く岩石風化物又は火山抛山物と推定される試料にあつては比重は概ね大である。

(iii) 含水量 採取せるまゝの試料の保持する水分の量は表—15 に示す如く 43.2—82.3% (蒲生珪藻土及び加治木陶土は乾燥試料に就き例外とす) の範圍にあり、野外に於ては常に多量の水分を保有することが分る。勿論含水量は試料採取時の氣象状態、採取箇所、試料保存方法等によつて異なるから、表—15 に示した含水量を以て各試料の常に吸着する水分と見ることは出来ないが、これにより野外に於ける實際の含水量の大體を想像し得る。

ものと思ふ。

(iv) 機械的成分 機械的分析試験によつて求めた各試料中の砂、沈泥及び粘土の含有量を示せば表—15 の所収欄の如くであり、これを土質分類三角圖に挿入して示せば圖—8 (7 頁参照) の如くである。圖—8 により、各試料の所屬を見ると、

沈泥質粘土に属するもの	辨 柄 土
ロームに属するもの	蒲生珪藻土
	林田白粘土
	栗川安山岩層
沈泥質ロームに属するもの	花 向 礫 土
砂質ロームに属するもの	後 迫 礫 土

となる。

(v) 土としての性質 参考として收縮限界、液性限界、塑性限界等を測定し、各試料の土としての特性を明かならしめた。試験結果は表—15 下欄の如くである。

(vi) 化學的成分 各試料に對する全分析及び可溶分析試験の結果を示せば表—16 の如くである。

既に述べたやうに本試料は、原岩石の種類、成因、風化分解の程度等を互に異にするため、その化學的成分(全分析)が著しく異つてゐる。表—16 に示す如く、山川珪藻土、山川火山灰、蒲生珪藻土、野口及び花向礫土、林田白粘土、栗川安山岩層、川根火山灰

表—16 天然凝結材試料の化學的成分(%)

成 分	後迫礫土	辨 柄 土	山 川 山 川 蒲 生 加 治 木 野 口 粘 土 花 向 礫 土 林 田 白 粘 土 栗 川 安 山 岩 層 川 根 火 山 灰								
全 分 析	%										
灼熱減	10.36	15.40	14.46	16.11	4.90	—	7.91	7.20	12.68	10.28	—
珪 酸	49.29	49.95	70.82	72.18	80.72	—	56.69	58.04	57.10	44.36	—
礬 土	28.55	24.42	5.61	8.10	8.40	—	24.12	23.99	28.99	20.25	—
酸化鐵	6.04	4.51	2.55	2.92	2.05	—	3.09	3.71	0.90	8.45	—
石 灰	0.57	0.82	0.84	1.09	0.66	—	1.37	1.38	痕 跡	2.30	—
苦 土	微 量	0.28	0.68	0.18	微 量	—	1.10	0.98	0.19	1.66	—
可 溶 分 析	%										
不 溶 部 分	27.88	44.01	53.10	—	59.48	—	—	52.69	53.05	37.40	—
可 溶 珪 酸	33.40	21.02	26.74	—	30.18	—	—	18.25	26.90	19.87	—
礬 土	20.20	17.51	3.60	—	4.01	—	—	16.24	8.62	25.73	—
酸化鐵	1.65							—	1.54		
石 灰	0.30	0.35	0.56	—	0.30	—	—	1.01	痕 跡	1.12	—
苦 土	微量	0.19	0.40	—	微量	—	—	0.21	0.04	0.63	—

田白粘土等は比較的多量の珪酸を含み、後迫礫土、辨柄土、栗川安山岩層等は珪酸分比較的少く、礬土及び鐵量に富む。化學的成分と外觀の間には著しい關聯性はないが、大體に於て鐵分の乏しきものは白色又は灰色を帯び、鐵含有量の多きものは赤味を帯び一般に黃褐色乃至赤褐色を呈するものと見て差支へない。

全分析試験によるのみでは天然凝結材としての優劣、適否を推定し得ないので、可溶分析試験を併せ行ふのを普通とする。可溶分析試験によれば、石灰と化學的結合の比較容易な可溶性の諸成分例へば可溶性珪酸、可溶性礬土、可溶性鐵等の含有量を知り、その多寡から優劣、適否等を推定することが可能となる。

既に述べたやうに、可溶分析試験結果による天然凝結材の價值判定は、可溶性珪酸 25 % 以上、同礫土及び鐵の含量 30 % 以上の基準によつて行はれ、それぞれの成分が上記の限度に達せぬものは天然凝結材としての價值に乏しきものと見て差支へない。

(4) 石灰混合物の強度 (豫備的試験)

豫備的試験として小形供試體による石灰混合物の壓縮強を測定し、天然凝結材としての使用の適否、品質の優劣等を判斷した。即ち上記試料の中から、

- i 成分及び一般的性質より判斷して良質の天然凝結材と見られるもの
- ii 比較的容易に而も多量に入手し得るもの
- iii 古くより天然凝結材として利用しつゝあるもの

等の各條件を概ね満足する試料として後追礫土、辨柄土、花向礫土、林田白粘土、栗川安山岩屑の 5 種を選び、これにつき強度試験を行ふこととし、なほ參考試料として従來天然凝結材としてひろく利用されつゝある敵土及び天川粘土の代表的試料各 1 種及び關東ローム 1 種を選び同様の試験を行ひ、前記の 5 試料とその品質を比較した。

(i) 試料

上記 5 試料及び愛知縣新川産敵土、長崎市蓮天川粘土をそれぞれ乾燥して水分を除いた後、鐵乳鉢を以て粉碎し 80 番篩 (0.177 mm 篩) を用ひて篩分け、篩通過部分を集めて試料となす。

(ii) 供試體

石灰混合物の強度は、天然凝結材と消石灰との混合割合によつて異なるとともに、天然凝結材・消石灰混合物と骨材との配合比によつても當然異なるわけであるが、試料の量が不十分でこれ等諸條件を種々に變へた試験を行ひ得なかつたので、天然凝結材と消石灰との混合割合は一率に 0.4 とし、又この混合物と骨材との配合割合は 1:1 及び 1:2 の 2 種と定めた。

供試體の大きさは直徑 2.5 cm、高さ 2.5 cm の圓筒とし、供試體は既に述べたシラス・石灰混合物の場合と同様にして作製した。先づ所要量の天然凝結材試料と消石灰とを秤取し、鐵乳鉢にて攪潰しながら混合して充分均等な混合物となす。いふまでもなく、この混合物はセメント・モルタルに於けるポルトランド・セメントに相當するものである。

次にこの混合物 1 に對して 1 又は 2 の割合に九味浦標準砂を秤取し、混合物と標準砂とを蒸發皿に入れ金屬製匙を以て 5 分間空練りを行つて均等になるまで混合した後、所要量の水を加へて更に 5 分間混合する。混練に要する水量は、試料全量に對して 88 % と定めたが、この程度の水仕を以てすれば、混合及び壓縮に當つても何ら不都合は見られなかつた。

混合物を型に詰め 15 kg/cm² の成形壓力を以て壓縮成形し、成形せる供試體は濕氣箱中に保存して、所定期間後に壓縮強を測定した。

(iii) 試験結果

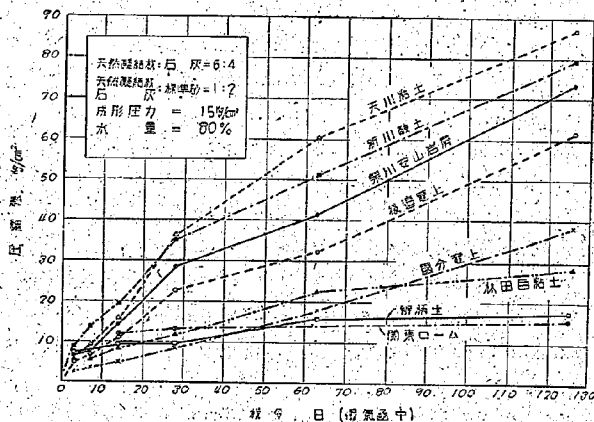
配合割合 1:2、材齡 3 日—120 日 (4 箇月) に於ける混合物の壓縮強を示せば表—17 及び圖—21 の如くなる。表—17 によつて明かなやうに、この種天然凝結材は早期強度が著しく小であつて、各混合物とも同一配合割合のセメント・モルタルの有する強度の 1/2 内外を示すに過ぎない。材齡の増加による強度の増大傾向は圖—21 によつて明かなやうに、栗川安山岩屑、後追礫土の如く材齡 120 日 (約 4 箇月) 以内に於ては未だ急激なる上昇曲線を示して強度の増大するものと、辨柄土、林田白粘土の如く材齡 63 日 (約 2 箇月) 以内に於て既に強度の増大傾向の停止せるものとがある。

表-17 天然凝結材石灰混合物の圧縮強

	後迫岱	辨柄土	野口粘土	林田白粘土	栗川安山岩屑	天川粘土	新川粘土	關東ローム	セメント
水量%	88	88	88	88	88	88	88	89	—
フロー	132	102	135	101	132	111	106	146	—
圧縮強 kg/cm^2									
3日	5.3	5.6	2.9	6.5	6.3	6.4	8.8	6.9	57.9
7日	6.8	6.5	3.7	6.8	7.3	9.2	13.5	9.3	63.9
14日	11.0	9.0	5.1	8.2	14.4	15.7	19.1	11.2	82.9
28日	22.9	9.3	9.0	11.2	28.6	36.6	35.4	13.5	107.0
63日	32.6	16.0	18.2	22.6	41.4	61.0	51.3	—	—
126日	61.6	17.1	33.7	28.1	73.5	86.8	79.8	15.8	—

天然凝結材と石灰との混合物の有する強度は天然凝結材と石灰との混合割合に支配されることが大であるから、上に示した同一混合割合の混合物による強度を比較したのみでは、天然凝結材としての適否、優劣を判断することは出来ない。例へば 圖-21 によると辨柄土、林田白粘土等は混合物の示す強度が極めて小で天然凝結材としての使用価値の乏しきものと見られるのであるが、天然凝結材・石灰

圖-21 各種天然凝結材石灰混合物の圧縮強



の混合比を 6:4 より 4:6 の比較的石灰量の豊富なものとなすときは、表-18 に示す如く強度は著しく改善せられて、他の試料と略同等の値を有するものとなる。

表-18 天然凝結材・石灰混合物の圧縮強 (kg/cm^2)

材 齢	辨 柄 土		林田白粘土	
	6:4	4:6	6:4	4:6
7 日	6.5	5.0	6.5	6.0
28 日	9.3	14.7	11.2	20.4
63 日	16.0	38.0	22.6	40.1

従つて、この種天然凝結材の優劣、適否は、天然凝結材と石灰との混合割合、水量、混合及び成形条件等を種々に變へて試験を行ひ、更に比較的長期に亘る試験を行つた上でなければ適正なる判断を下すことは出来ないと思はれる。

配合割合 1:1、材齢 7 及び 28 日に於ける混合物の圧縮強を示せば表-19

表-19 配合 1:1 の混合物の圧縮強

試 料	圧縮強 kg/cm^2	
	7 日	23 日
後 迫 岱 土	18.0(2.6)	51.2(2.2)
辨 柄 土	8.0(1.2)	14.3(1.5)
野 口 粘 土	7.5(2.0)	19.5(2.2)
林 田 白 粘 土	7.3(1.1)	14.2(1.4)
栗川安山岩屑	12.4(1.7)	50.9(1.8)
天 川 粘 土	14.0(1.5)	48.4(1.3)
新 川 粘 土	22.1(1.6)	59.9(1.7)
關 東 ロ ー ム	15.8(1.5)	27.8(2.1)

備考：括弧内の数字は、同一材齢の 1:2 混合物の強度に對する比率である

の如くである。骨材使用量を減じ天然凝結材・石灰混合物を増すことにより即ち富配合混合物となすことにより、混合物の強度の増大は當然期待し得られる譯であるが、表—19により明かな如く辨納土、林田白粘土の2試料にあつては強度増大の傾向が殆んど見られず、他の試料は配合1:2の混合物に比し1.3~2.6倍の強度増大を示してゐる。

以上を要するに、本試験に供した試料は何れも、その使用方法を適當に選べば天然凝結材として利用し得ることが分り、特に後迫礫土、栗川安山岩層等は天川粘土と略同等の品質を有し、天川粘土と同様の施工方法により土木材料として利用し得ることが分つた。なほ林田白粘土はその成分より判斷し、天然凝結材としてよりは、寧ろセメント混和材又は珪酸質混合セメントの混合原料として適當なるものゝ如くである。

〔V〕 要 約

(1) 火山灰砂

鹿児島縣の本土部に於て、その面積の凡そ49%に達する廣域を領して成層する火山灰砂(シラス)の土木材料としての利用如何に就き調査並びに試験を行ひ次の如き結果を得た。

(i) これを石灰と混用することにより天然凝結材として利用し得るや否やを檢せるに、本火山灰砂は一般に風化未だ不十分で、混合物の硬化作用に與つて力あるべき活性成分の含有量僅少なため、その儘使用したのでは、古くより我國に於て利用されてゐる敵土、天川粘土等による如き良好なる結果の期待し得ざることが明かになつた。なほ火山灰砂を微粉砕し、或は灼熱することにより天然凝結材としての品位を向上せしめ得ることも考へられたが、經濟的にこの企てが成立し得るや否やは大いに疑問とするところである。

(ii) これを粉砕して微粉となし、セメント混和材として利用し得るや否やを檢せるに、從來本目的に利用しつつある煖灰質砂に比し、粉砕稍々困難にして且つ混合物の強度も幾分劣るところあるものゝ如く認められた。

(iii) コンクリート用細骨材としての使用の適否を考慮し火山灰砂を細骨材とするセメント・モルタルをつくり、その強度を檢せるに、九味浦標準砂に比し1:1配合に於ては、火山灰砂の種類とは關係なく平均して20%内外の強度減を示し、1:2配合に於ては10~45%の強度減を示し、發配合に於ては火山灰砂の種類乃至性質がモルタルの強度に大なる影響を與ふることが明かとなり、火山灰砂の選擇、配合割合、施工方法等宜しきを得れば、川砂、海砂等に代りコンクリート用細骨材として利用し得ることが分つた。

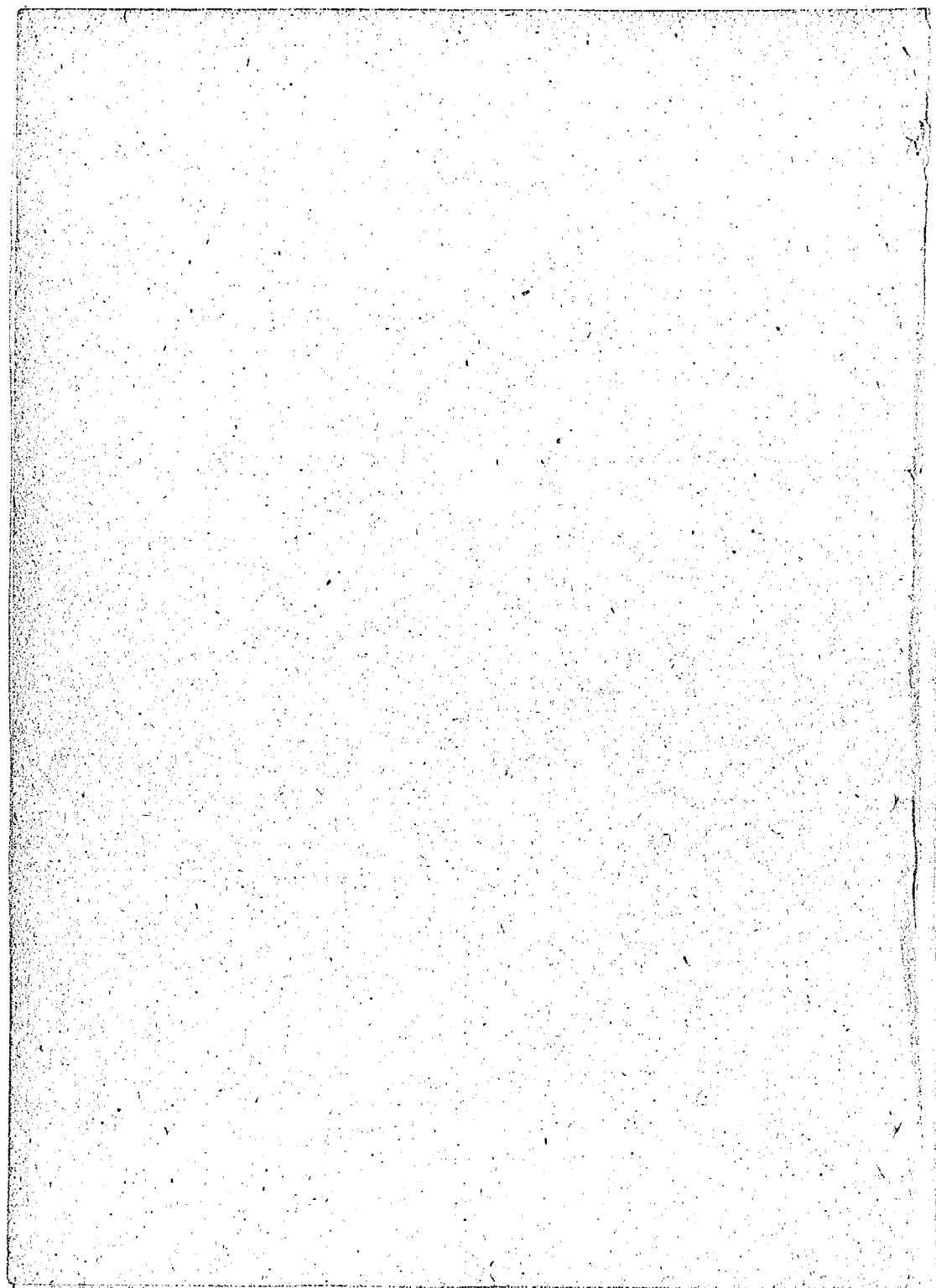
(2) 天然凝結材

縣内各地に産し古くより土木建築工事に利用され或は將來利用の可能な各種天然凝結材に就き調査並びに試験を行ひ次の如き結果を得た。

(i) 後迫礫土、辨納土、栗川安山岩層等は、何れもこれと石灰とを混合することにより、從來我國に於て利用されてゐる敵土、天川粘土等によると略同等の強度を有する混合物が得られ、土木材料中に道路材料、擁壁材料として利用し得ることが明かとなつた。

縣内各地には、これら3試料のみにとゞまらず、天然凝結材として利用し得る各種の岩石風化物の豊富な賦存が推測せられる。この種有用材料の調査探求並びにこれを利用する施工方法の試験研究は、地方的材料の適切なる利用、埋藏資源の新たな活用といふ意味よりして極めて必要である。

(ii) 山川珪藻土及び火山灰、蒲生珪藻土、林田白粘土等は、その成分より判斷して天然凝結材としてよりは、寧ろセメント混和材として適當と解せられ、この方面に於ける利用が期待せられる。



二層張り鋪板の載荷試験並に之に基く 下層板の有効幅の計算基準

福岡正巳

要 旨

本稿に於て二層張り鋪板を施した場合、動輪荷重の應力分布の度合を試験し、上層鋪板並びに上層鋪板上に更に上置層を施工した場合の下層鋪板の最大曲げ應力度を求め、下層鋪板の有効幅に關する計算の基準を導出した。又破壊荷重を求めて實際の安全度を明かにした。

本實驗は青木技師の指導をうけた。村上技師は設計を、鈴木技手は實驗を擔當し、又石井靖丸君の援助を受けた。

目 次

I 試験の目的	(1)
II 試験に用いたる床部の構造	(2)
III 試験方法	(3)
〔1〕 使用木材	(3)
〔2〕 載荷方法	(3)
〔3〕 撓み測定方法	(3)
〔4〕 破壊試験	(4)
IV 鋪板の撓みに關する試験結果	(4)
〔1〕 床版試験機に於ける荷重と壓力計のよみとの關係	(4)
〔2〕 一層張り鋪板	(4)
〔3〕 二層張り鋪板	(5)
〔4〕 二層張りの上に上置層として厚さ4cmのアスファルト層を置いた場合	(7)
〔5〕 破壊試験	(9)
V 試験結果に對する考察	(11)
〔1〕 下層鋪板の曲げ應力度に關する考察	(11)
〔2〕 各部材の撓みに關する考察	(14)
〔3〕 鋪板の應力分布の近似的計算	(14)
〔4〕 破壊試験の結果に對する考察	(16)
VI 下層鋪板の有効幅に就いて	(17)
VII 結 語	(17)

I. 試 験 の 目 的

従來木橋の鋪板の設計計算に際して、鋪板の有効幅の決定に關する何等の基準もなく、從つて有効幅は設計者に依り全く任意にとられて居た。よつて國土局に於て提案された標準設計案に基いて設計された二重鋪板に就いて實際如何様に應力が分布して居るかを實驗し、木道路橋設計示方書案により「鋪板を單純桁と假定し、支間をその純徑間に10cmを加算」せる場合下層鋪板の有効幅を如何程にとればよいかを明かならしめんとする目的を

以て試験を行った。又破壊荷重を實驗的に求め實際の安全度を明にした。

II. 試験に用ひたる床部の構造

床部構造の設計は国土局に於て作成せられたる木道路橋標準設計案に基いた。床部構造の設計は圖-1、各材の材種・形状・寸法配置は表-1 に示す。

圖-1 二重張鋪板設計圖

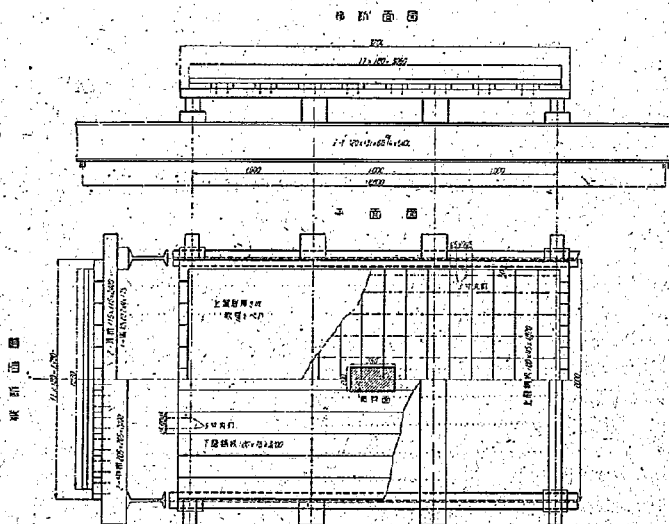


表-1

名 稱	材 種	寸 法 (mm)	数 量	備 考
横 中 耳 載	I 型 鋼		2	中心間隔 2 米
下 層 鋪 板	杉	20.5 × 20.5 × 240	2	各桁の中心間隔 1 米
上 層 鋪 板	杉	11.5 × 11.5 × 240	2	
上 置 層	杉	9 × 20.2 × 17.5	4	
下層鋪板に使用せる釘	軟質トベカ	7.5 × 18 × 320	11	中桁に釘付けする
上層鋪板に使用せる釘	軟質トベカ	4.5 × 18 × 182	17	下層鋪板に釘付けする
		厚さ 4 cm	1 枚	註 1 参照
		5 寸	88	註 2 参照
		3 寸	188	

註 1. 軟質トベカの配合。

註 2. 試験は三段にわけ、順次一層張り二層張り及び二層張りの上に更にアスファルト鋪装を施したものに就いて各々載荷試験を行ったのであるが、釘の打ち方は下層板は中桁及び耳桁上に一枚の板に就いて二本（釘の間隔は端より 4.5 cm 相互の間隔 9 cm にとる）宛打った。又上層板は下層板の中心線上に下層板と同様の間隔を以て打った。（圖-1 参照） 中桁と I 型鋼との間には石膏を用いた。

碎石径 1.27 cm 以下	28 %	75.6 kg
砂	55 %	148.5 kg
石 粉	9 %	24.3 kg
アスファルト針入度 100°	8 %	21.6 kg
計	100 %	270.0 kg

施工方法は鍍製手動ローラー（ローラーの直径 30 cm，ローラーの幅 30.5 cm，重量 73 kg）を用ひ十分軋壓した。

Ⅲ 試 験 方 法

〔1〕使用木材

鋪板に使用せる杉材の曲げ試験の結果は次の如くである。

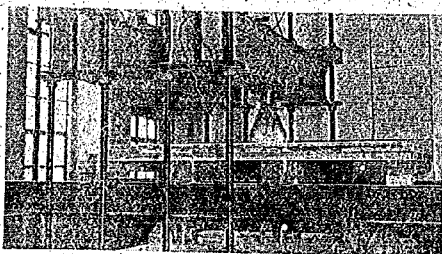
平均年輪幅 2.2~4.0 mm，含水率 13.2%，比重 0.39，ヤング率 73,000 kg/cm²。

曲げ破壊強度最大 695 kg/cm²，最小 406 kg/cm²，平均 510 kg/cm²。

〔2〕載荷方法

試験は三段にわけて順次一層張，二層張及び二層張り上に軟質トベカの上置層をおいた場合に就いて，各荷重と撓みの関係を測定する。

写真-1 鋪板試験装置



試験機は 75 ton 床版試験機を使用した。載荷面を鋼道路橋第二種自動車荷重の後輪と一致せしめるため圖-2 に示す如く，20cm × 36 cm の底面を有するコンクリート塊を用いた。（写真-1）

〔3〕撓み測定方法

鋪板の下に圖-3 に示す如く測點を設け，ダイヤルゲージ（ $\frac{1}{100}$ mm 読み）及びデフレクトメーター（ $\frac{1}{10}$ mm 読み）を取付けて各荷重に應ずる版

の撓みを測定した〔即ちデフレクトメーターは $A_0, B_0, C_0, D_0, E_0, B_0'', C_0'', D_0'', E_0''; A_1, B_1, C_1, D_1, E_1, B_1'', C_1'', D_1'', E_1'', A_1', B_1', C_1', D_1', E_1', B_1'', C_1'', D_1'', E_1''$ の諸點に取付けた〕。

〔4〕破壊試験

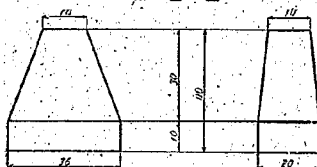
荷重を漸次増加して，龜裂が生じ破壊状態に達して荷重の上昇がやむ迄載荷を続け，撓みを測定した。撓みの測點は圖-3 中○を附せる諸點である。

Ⅳ 鋪板の撓みに關する試験結果

縦筋上中央に唯一枚の鋪板を張り，豫備試験を行つた結果，荷重限度は中央(A_0 點)の撓みが 7 mm 迄にあるのが適當であることが認められた（この範囲では荷重取除後に各部分がもとの状態にかへる）ので，以下の試験に於ては載荷試験の荷重限度は之を標準とした。

圖-2 加壓用コンクリート塊
(配合 1:2:4 重量 49.5 kg)

側面圖



平面圖

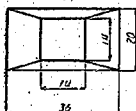
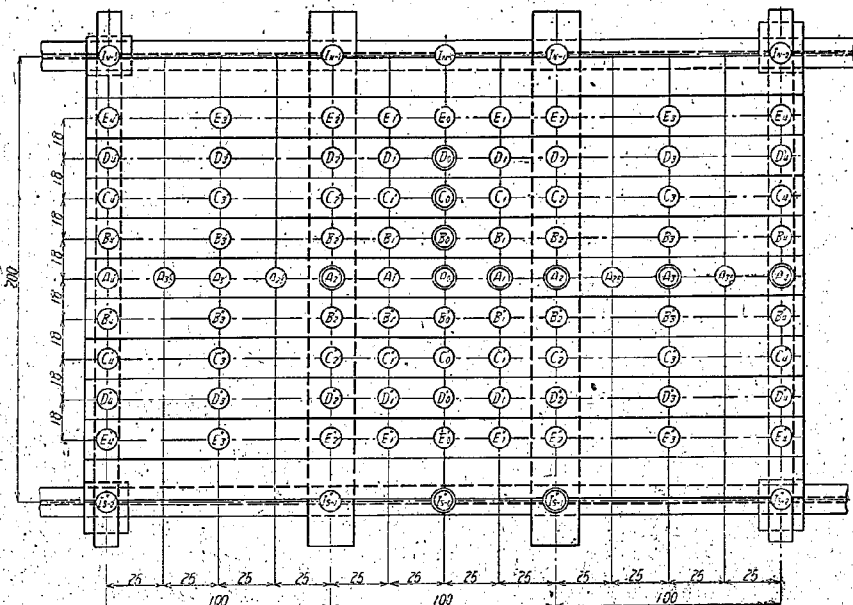


図-3 測点配置図



破壊試験は最後にアスファルトの上置層をおいた場合についてのみ行つた。

〔1〕 床版試験機に於ける荷重と壓力計のよみとの關係

昭和14年8月23日検定の結果壓力計 (50 kg/cm² No. 82551) と No. 1 壓力筒を使用せる場合の荷重との間には次の如き關係がある。

$$P = 174.0 G \text{ (kg)}$$

但し P : 荷重 (kg), G : 壓力計の示度 (kg/cm²), 之を表示すれば表-2 の如し

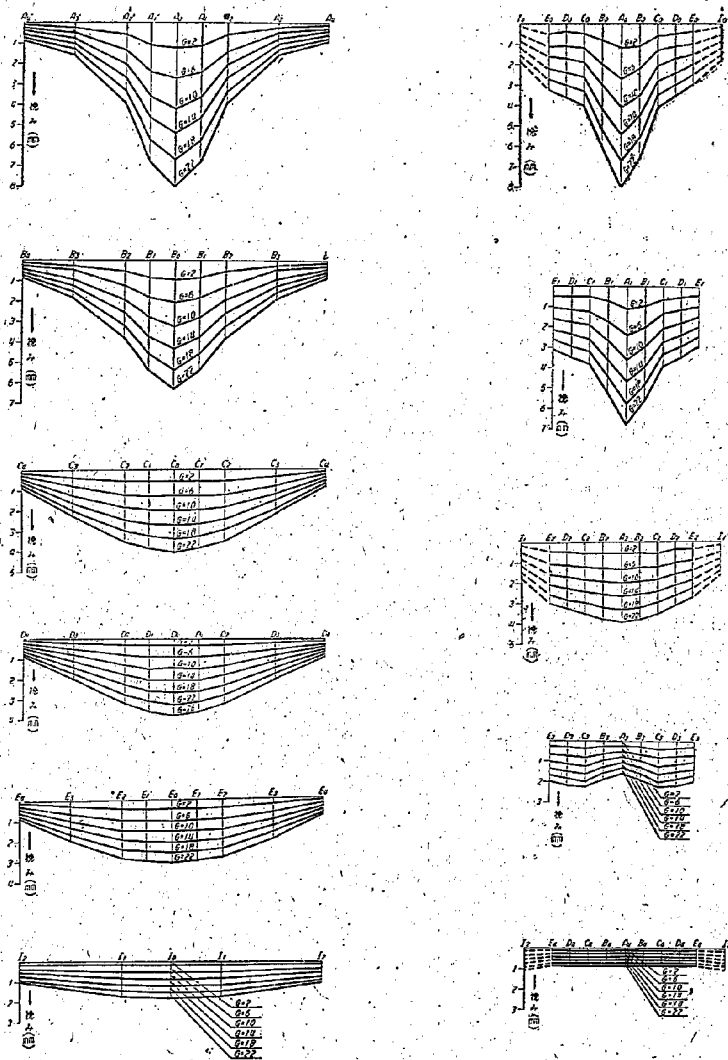
表-2

G(kg/cm ²)	P(kg)	G(kg/cm ²)	P(kg)	G(kg/cm ²)	P(kg)
1	174	11	1,914	21	3,654
2	348	12	2,088	22	3,828
3	522	13	2,262	23	4,002
4	696	14	2,436	24	4,176
5	870	15	2,610	25	4,350
6	1,044	16	2,784	26	4,524
7	1,218	17	2,958	27	4,697
8	1,392	18	3,132	28	4,871
9	1,566	19	3,306	29	5,045
10	1,740	20	3,480	30	5,219

〔2〕 一層張り鋪板

各断面に於ける荷重と撓みとの關係は圖-4 の如くである。

圖-4 一層張り鋪板に於ける荷重と撓みの關係



〔3〕 二層張り鋪板

- (a) 上層鋪板の中で中央に唯1枚の鋪板を張つた場合の荷重と撓みの關係は圖-5に示す。
- (b) 上層鋪板の中で中央の3枚を張つた場合の荷重と撓みの關係は圖-6に示す。

圖-5 上層鋪板の中で中央に唯1枚の鋪板を張つた場合の荷重と撓みとの關係

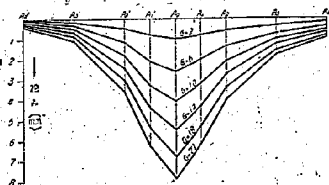
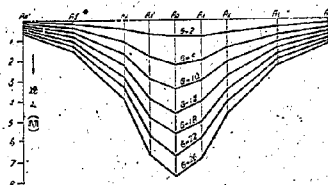
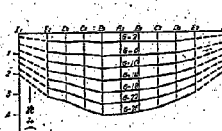
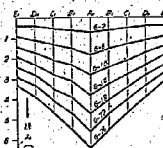
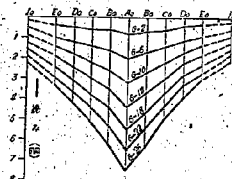
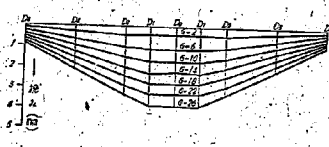
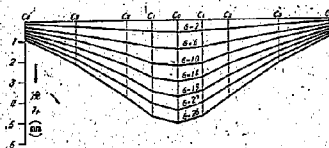
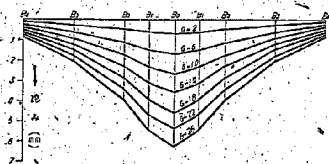
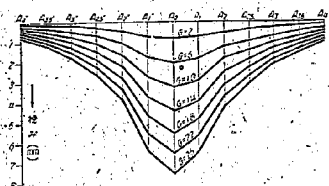


圖-6 上層鋪板の中で中央の3枚を張つた場合の荷重と撓みとの關係



(c) 上層板全部 (17枚) を張り、二層張りとした場合荷重と撓みとの關係は圖-7 に示す。

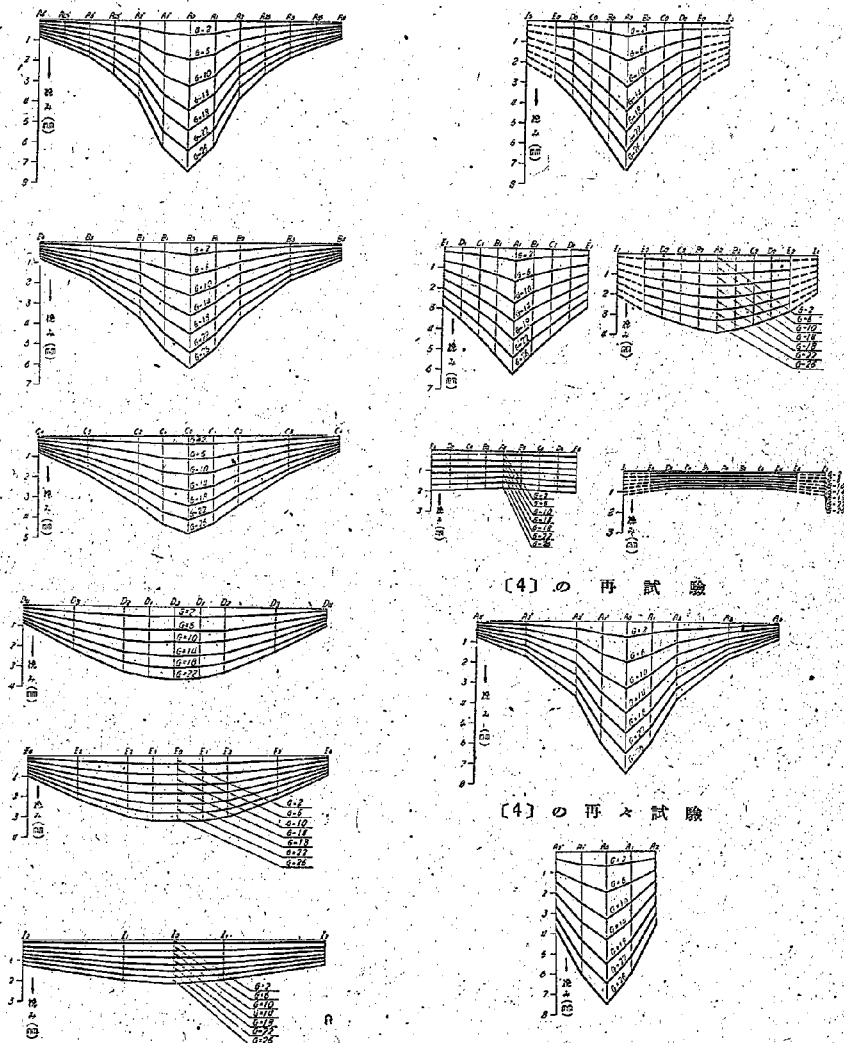
圖-7 上層板全部 (17枚) を張り二層張りとした場合荷重と撓みとの關係



〔4〕 二層張りの上に上置層として厚さ 4 cm のアスファルト層を置いた場合

二層張りの上に上置層として厚さ 4 cm の軟質トベカを施工せる場合の荷重と撓みとの關係の試験結果は圖-8に示す。

圖-8 二層張りの上に上置層を施せる場合の荷重と撓みとの關係(4)の再試験

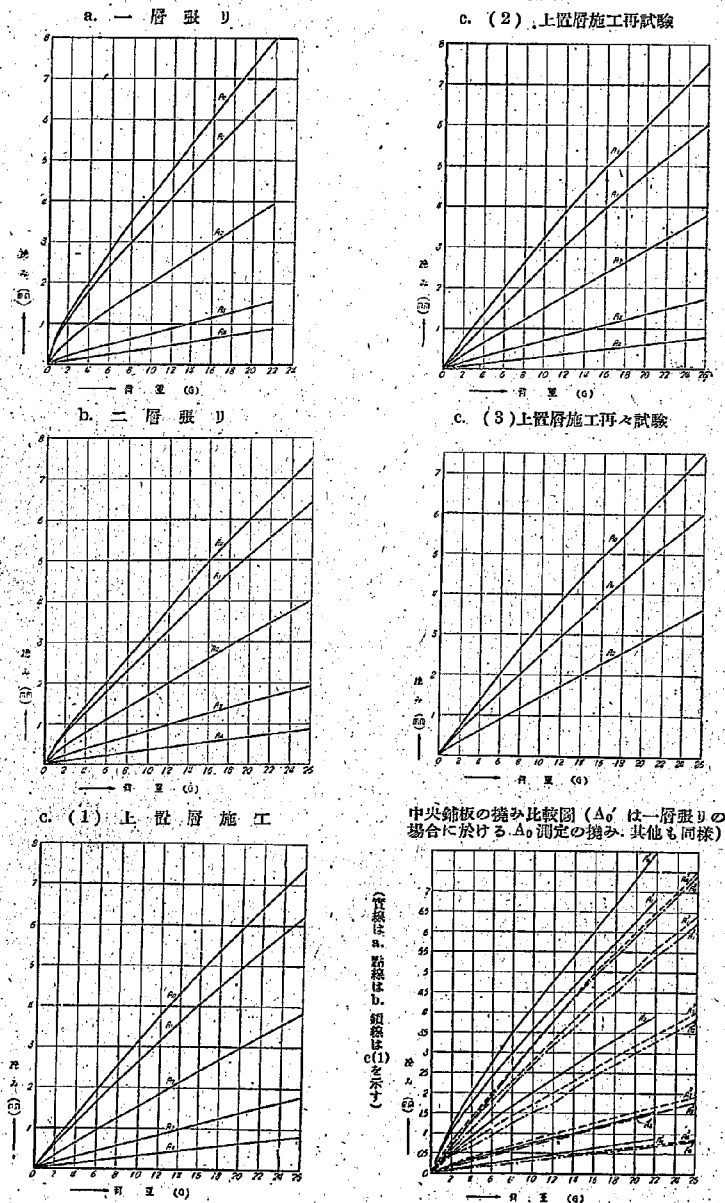


〔4〕の再試験

〔4〕の再々試験

圖-9 は中央鋪板の荷重と撓みとの關係を示すものである。

図-9 中央鋪板の荷重と撓みとの関係



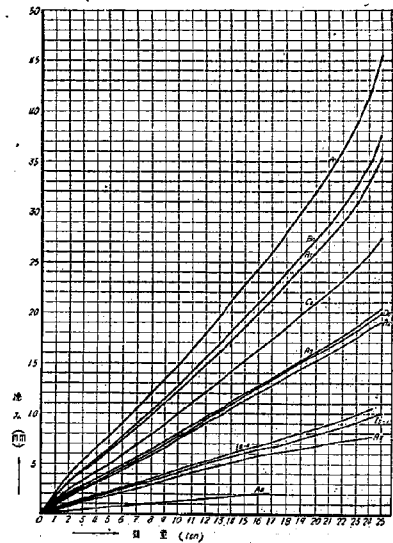
〔5〕破壊試験

昭和16年8月28日破壊試験を行つた。

載荷前の上層層の間みは2mmであつた。荷重を増すにつれて撓みは増加し、その状態は圖-10に示す。試験に費された時間は55分間である。

荷重7tより荷重増加に伴ひ小管嚙を發する様になり、之と同時に中央の下層板の中心線附近にあつた微かな乾割が現れ初めた。16.7tに達したときその巾が約2mmとなり、上層層にはA₂側に中心線から30cm附近に寫眞-2に見る如く多數の毛髪狀龜裂が發生し初め續いてA₂側にも發生するに到つた。19tに達すれば乾割は巾3mmとなり、22tに於ては中央の板に中桁方向の引張龜裂が生じた。寫眞に示す如く以後引續き上下面に盛んに龜裂の發生を見る様になつた。B板に於ても23.4tで破壊を初めた。尚引續き25t迄載荷を續行した。この時上層鋪板中央の三枚は特に撓曲甚しく、兩端に於て下層板との間に1~9mmの間隙を生じた。又耳

圖-10 破壊試験に於ける荷重と撓みとの關係



寫眞-2 上 面 の 龜 裂

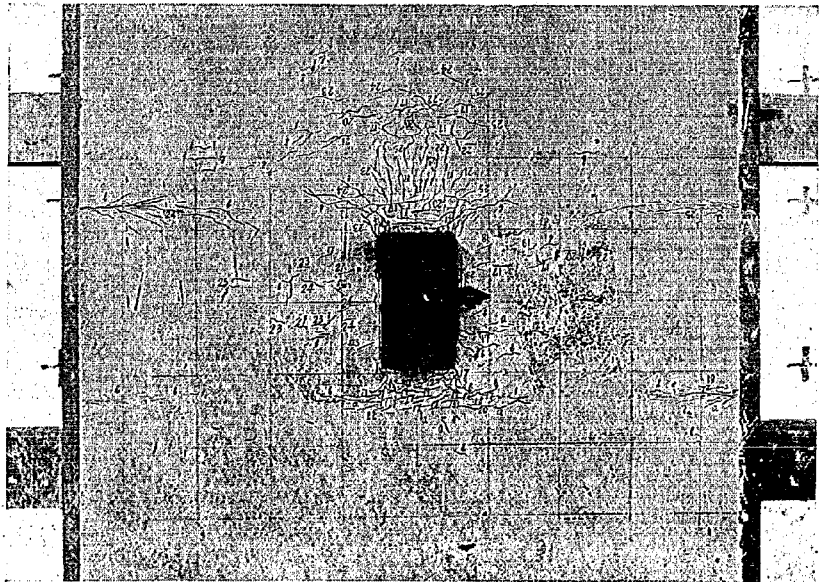
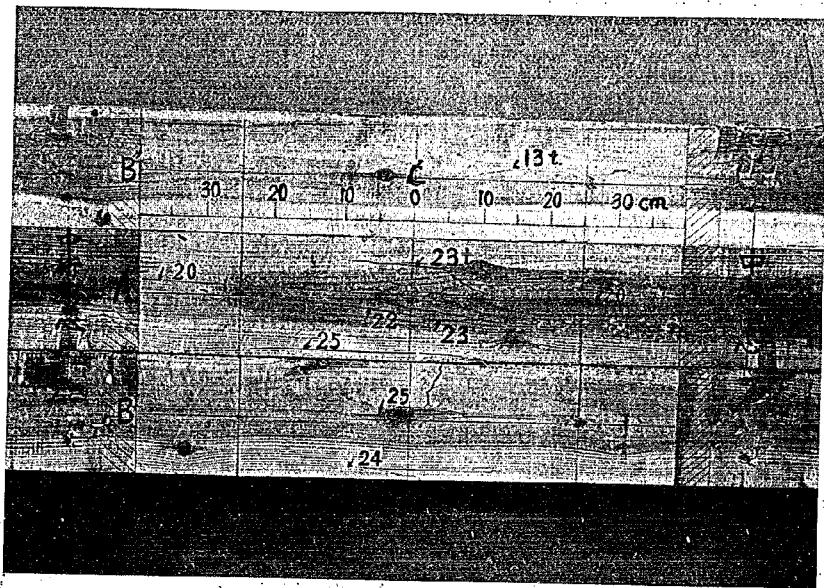


写真-3 a. 下層鋪板の破壊状況(下面)最中央の三枚を示す



b. 下層鋪板の破壊状況(側面)

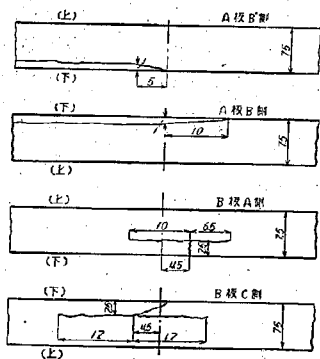


写真-4 破壊状況



桁の支點はI桁と3-6mmの間隙を生じた。寫眞に於てa示すのは25tの載荷のまゝ30分間、bは20時間放置せる間に發生せる龜裂を示すものである。試験終了後の上層層の凹み、及び上層板の凹みは圖-12の如くである。上層板にはこの凹み以外に何等特別な變化は見られなかつた。

V. 試験結果に對する考察

〔1〕 下層鋪板の曲げ應力度に關する考察

一層張鋪板を施した場合に於ては、鋪板と中桁、耳桁及びI形鋼よりなる一種の Rost として圖く。Rost の格點の構造は完全なる絞でもなく、又ラーメン式に固定されても居ない。二層張に於ては尙その上に鋪板が下層鋪板に直交して並べられる。

先づ實驗結果より中央鋪板の最大曲げ應力度を求め、簡單なる假定をした場合の曲げ應力度とを比較する。荷重の大小と最大曲げ應力度との關係は數値微分法に依つて求める。

M ……中央鋪板の最大曲げモーメント

σ ……中央鋪板の最大曲げ應力度

E ……ヤング弾性率

I ……断面慣性モーメント

x ……($x_0, x_1, x_2, x_3, \dots$) A_0 を原點とする場合測點の位置

y ……($y_0, y_1, y_2, y_3, \dots$) 各 x に應ずる撓み

λ …… $x_1 - x_0 = x_2 - x_1 = x_3 - x_2 = x_4 - x_3 = \dots = x_{n-1} - x_{n-2} = x_n - x_{n-1} = \lambda$ 測點の間隔とすれば(圖-12)

$$M = -EI \left(\frac{d^2 y}{dx^2} \right)_{A_0}$$

$$\sigma = \frac{M}{I} \cdot \frac{h}{2}$$

$$\text{之より } \sigma = -\frac{Eh}{2} \left(\frac{d^2 y}{dx^2} \right)_{A_0} \dots \dots \dots (1)$$

又數値微分法により

$$\left(\frac{d^2 y}{dx^2} \right)_{A_0} = \frac{1}{\lambda^2} \left[\lambda^2 y_{-1} - \frac{1}{12} \lambda^4 y_{-2} + \frac{1}{90} \lambda^6 y_{-3} - \dots \right] \dots \dots \dots (2)$$

(1), (2) より

$$\sigma = -\frac{Eh}{2} \cdot \frac{1}{\lambda^2} \left[\lambda^2 y_{-1} - \frac{1}{12} \lambda^4 y_{-2} + \frac{1}{90} \lambda^6 y_{-3} - \dots \right] \dots \dots \dots (3)$$

(3)に於て

$$E = 73,000 \text{ kg/cm}^2, h = 7.5 \text{ cm}, \lambda = 25 \text{ cm} \text{ と置けば}$$

$$\sigma = 44 \left[\lambda^2 y_{-1} - \frac{1}{12} \lambda^4 y_{-2} + \frac{1}{90} \lambda^6 y_{-3} - \dots \right] \dots \dots \dots (4)$$

但し、 σ は最大曲げ應力度 kg/cm^2

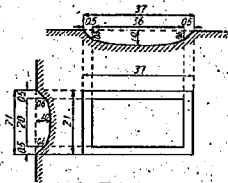
y は各測點の撓み mm

スパン $l = 90 \text{ cm}$ の單純梁と假定した場合の下層鋪板中央に於ける最大曲げ應力度を算出すれば、 $W(\text{kg})$ を荷重の大小として、

$$\left. \begin{array}{l} \text{一層張鋪板に就いては} \quad \sigma_0 = 0.0662 W (\text{kg/cm}^2) \\ \text{二層張鋪板に就いては} \quad \sigma_0 = 0.0466 W (\quad) \\ \text{上置層施工後のものに就いては} \quad \sigma_0 = 0.0358 W (\quad) \end{array} \right\} \dots \dots \dots (5)$$

圖-11

a 上置層の図み



b 上層鋪板の図み

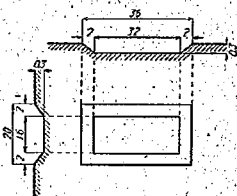


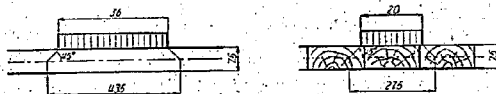
圖-12



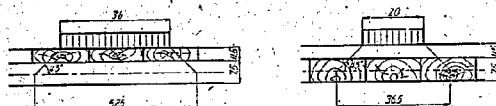
但し荷重の分布は本道路橋設計方針に示されたる如くであると假定した(図-13)

圖-13 荷 重 の 分 布

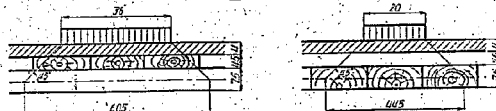
a - 一 層 梁



b - 二 層 梁



c - 三層梁



(4), (5)式によつて計算せる結果を表示すれば表-3となる。

表-3 a. 一層張り鉛板の曲げ應力度(kg/cm^2) 比較表

G (壓力計)	W (荷重 kg)	スパン 90cm の埋込梁	スパン100cm の三スパン 連続梁	スパン 90cm の單純梁 σ_0	測 定 値 σ	$\sigma_0 : \sigma$
2	348	9.0	23	23	7	3.3
4	696	18.1	45	46	15	3.1
6	1,044	27.1	68	69	25	2.8
8	1,392	36	91	92	36	2.6
10	1,740	45	114	115	44	2.6
12	2,088	54	136	138	58	2.4
14	2,436	63	159	161	68	2.4
16	2,784	72	182	184	77	2.4
18	3,132	81	205	207	87	2.4
20	3,480	90	227	230	97	2.4
22	3,828	100	250	253	111	2.3
						平均 2.6

表-3 b. 二層張り鉛板の下層板の最大曲げ應力度(kg/cm^2) 比較表

G (壓力計)	W (荷重 kg)	スパン 90cm の單純 梁 σ_0	測定値 σ	$\sigma_0 : \sigma$	G (壓力計)	W (荷重 kg)	スパン 90cm の單純 梁 σ_0	測定値 σ	$\sigma_0 : \sigma$	G (壓力計)	W (荷重 kg)	スパン 90cm の單純 梁 σ_0	測定値 σ	$\sigma_0 : \sigma$
2	348	16.2	5.7	2.8	12	2,088	97	45	2.2	22	3,828	178	89	2.0
4	696	32	12.6	2.7	14	2,436	113	54	2.1	24	4,176	104	96	2.0
6	1,044	49	18.5	2.6	16	2,784	129	64	2.0	26	4,524	211	107	2.0
8	1,392	65	26	2.5	18	3,132	146	75	2.0					
10	1,740	81	34	2.4	20	3,480	162	82	2.0					平均 2.3

表-3 c. 二層張り鋪板上置層を施せる場合下層中央鋪板の最大曲げ應力度(kg/cm^2)比較表

G (壓力計)	W (荷重 kg)	スパン90cm の單純梁 σ_0 (kg/cm^2)	(1) 實測値 σ (kg/cm^2)	$\sigma_0:\sigma$	(2) 實測値 σ (kg/cm^2)	$\sigma_0:\sigma$	(3) 實測値 σ (kg/cm^2)	$\sigma_0:\sigma$
2	348	12.5	8.8	1.4	15	.83	11.5	1.09
4	696	25	18.5	1.4	26	.96	30	.83
6	1,044	37	23	1.3	43	.96	51	.72
8	1,392	50	43	1.15	56	.89	69	.72
10	1,740	62	53	1.15	69	.90	81	.77
12	2,088	75	63	1.2	83	.85	90	.83
14	2,436	87	72	1.2	103	.89	100	.87
16	2,784	100	82	1.2	103	.93	106	.94
18	3,132	112	8.6	1.3	115	.97	112	1.00
20	3,480	125	92	1.4	121	1.03	119	1.05
22	3,828	137	93	1.4	131	1.04	128	1.07
24	4,176	150	106	1.4	138	1.09	138	1.09
26	4,524	162	116	1.4	144	1.12	148	1.09
				平均 1.3		平均 0.95		平均 0.93

中央の下層鋪板の荷重と最大曲げ應力度との關係は圖-14 の如くである。

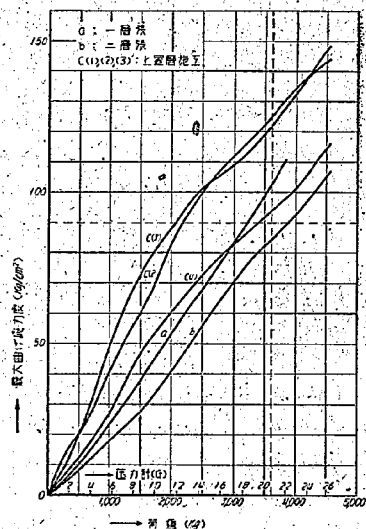
上の結果より次の事が言へる。

(i) 荷重の分布を木造路橋示方図案に示された如くであると假定し、鋪板のスパンを経路間の純徑間に 10 cm を加へたる如き單純梁 (即ちスパン 90 cm の單純梁) と假定した場合の最大曲げ應力度の大きさ ($\sigma_0 \text{ kg/cm}^2$) と實測せる最大曲げ應力度 ($\sigma \text{ kg/cm}^2$) との此の値は一層張り、二層張り、上置層施工によつて順次小となつてゐる。

(ii) 荷重の大きさと曲げ應力度との關係をあらはす圖-14 をみると、同一の大きさをもつた荷重に對して、一層張りの場合は二層張りの場合よりも曲げ應力度は大である。之は上置層による荷重の分布の影響である。

(iii) 而るに上置層を施工した場合、曲げ應力度が一層張り、二層張りの場合よりもかへつて大となるのは釘の緩みに最大の原因があると思はれる。尚その他の原因をあげると、コンクリートブロックに依つて載荷した場合には載荷面が板の場合は接觸面の周圍に應力が集中し、載荷面が敷置トベカの場合にはむしろ中心部に應力が集中する結果、中央下層鋪板には敷置トベカ施工によつてかへつて大きな荷重がかかるためである。又中桁と鋪板との接觸部分が壓縮によつて多少凹む事も一原因となりうると思ふ。此の他材質の多少の變化等も考へられるであらう。

圖-14 中央の下層鋪板の最大曲げ應力度と荷重の大きさとの關係をあらはす線圖



下層鋪板の最大曲げ應力度が一層張、二層張上置層施工に依つて如何様に變化してゆかかを調べる。 $G=22$ ($W=3,828 \text{ kg}$) の場合をえらぶときは次表の如くなる。

表-4 一層張り、二層張り、上置層施工の場合に於ける下層鋪板の最大曲げ應力度比較表(単位は kg/cm^2)

測 點	A_0	B_0	C_0	D_0	E_0
一 層 張	111	88	20	7	6
二 層 張	89	75	31	3	1
上 置 層	95	75	40	16	6

上の表及び圖に示された如く一層張りよりも二層張り、二層張りよりも上置層施工の場合の方が縦桁方向の荷重の分布状態がよくなって居る。しかしながら前述の如く、こゝに於ても較荷面の状態、釘の緩み、其他による影響がみられる。

〔2〕 撓みに關する考察

簡單なる假定を設けて撓みの比較を行ふ。荷重 $W=3,828 \text{ kg}$ ($G=22$)、一層張りの場合計算値に依る撓みの量は、單純梁として 0.72 cm 、埋込梁としては 0.17 cm である。之に對して實測値では 0.41 cm となつて居る。

表-5 中 桁 の 撓 み

ρ	撓み (cm)
一 層 張	0.22
一層張に一枚加ふ	0.20
一層張に三枚加ふ	0.19
二 層 張	0.16
二層張に上置層施工	0.16

表-6 I 形鋼の撓み

	撓み (cm)
一 層 張	0.167
一層張に一枚加ふ	0.182
一層張に三枚加ふ	0.182
二 層 張	0.185
二層張に上置層施工	0.171

中桁に於てはI形鋼に支へられた單純梁として中央の撓みは 0.25 cm となる。

然るに實測値は表-5 の如くなる。

之に依つて撓みは次第に減少すること、即ち縦桁上の荷重はだんだん廣く分布される事を知る。

I 形鋼に於ては中桁ののる點を荷重點とした單純梁として中央の撓みを出せば 0.183 cm となり、實測の結果は表-6 の如くなる。

上の比較に依つて知りうる事は(i)鋪

板は不完全埋込の梁として考へるべきで

ある。(ii)中桁にかかる荷重は耳桁の荷

重に比して比較にならぬ程大きく、鋪板

の數を増してゆくと中桁方向の荷重の分布がよくなり中桁の撓みは小

となる。二層張りと上置層施工では殆んど撓みに變化がない。(iii) I

形鋼の撓みは前述の如く假定せる場合と實測値と殆んど變化がない。

之によつても中桁にかかる荷重は耳桁にかかる荷重よりもはるかに大きく、又上置層を置く事によつて耳桁にかかる荷重の幾分増大する事推知される。上述の事は前に示した撓みの實驗結果、及び破壊試験の結果によつて益々確實となる。

〔3〕 鋪板の應力分布の近似計算

上層板が下層板に及ぼす力の分布の概念をうる爲に無数の下層板が平行せる二本の不動なる中桁上に單純支承され、下層板上に之を直交して一本の上層板が載つて居ると假定し、彈性床上の梁の理論を用ひて近似計算を行ひ本實驗の結果を檢討してみよう。

圖-15 下層鋪板最大曲げ應力度比較圖

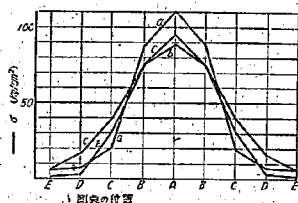


圖-16

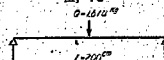
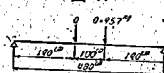


圖-17



上層鋪板にて荷重點より距離 x のところの反力 p_x と撓み y との關係を(圖-18参照)

$$p_x = -ky \quad (k \text{ は比例常数})$$

であらば、弾性床上の梁の理論により

$$y = \frac{P\alpha}{2k} e^{-\alpha x} (\cos \alpha x + \sin \alpha x) \dots\dots\dots (6)$$

$$p_x = -ky = -\frac{P\alpha}{2} e^{-\alpha x} (\cos \alpha x + \sin \alpha x) \dots\dots\dots (7)$$

$$M = -\frac{P}{4\alpha} e^{-\alpha x} (\sin \alpha x - \cos \alpha x) \dots\dots\dots (8)$$

k, α は次の如き常数である。

$$k = \frac{3E_1 J_1 l}{\lambda a^2 b^2}, \quad \alpha = \sqrt{\frac{k}{4E_2 J_2}} \dots\dots\dots (9)$$

反力と距離との關係を圖示すれば次の如し。(圖-19)

上層鋪板中最中央のもの(之をZの板とする)に就いては $k=169 \text{ (kg/cm}^2\text{)}, \alpha=0.045 \text{ (cm}^{-1}\text{)}$ となり、中央の板に接した二枚の板(之をSの板とする)に於ては何れも $k=238 \text{ (kg/cm}^2\text{)}, \alpha=0.049 \text{ (cm}^{-1}\text{)}$ となる。Zの板及Sの板に就いて αl の値は夫々 0.257π 及び 0.282π となる。 αl に従つて圖-19を分割する事によつて撓み

及び反力の概略の値を知る事ができる。中央の波長はZの板はSの板より多少長くなるが、撓み及び反力は兩方の板について殆んど相似であると見做してよい。圖-20の(ZA)點に全體の荷重 W の半分即ち $\frac{W}{2}$ がかかり(SA)點に夫々 $\frac{W}{4}$ がかゝると假定すれば各點に作用する反力はほぼ圖-20及び表-7の如くなる。

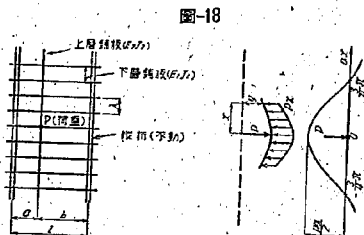


圖-19

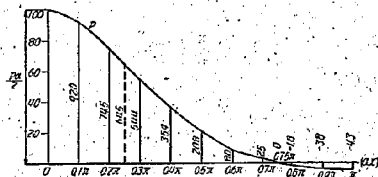


圖-20 反力の分布圖

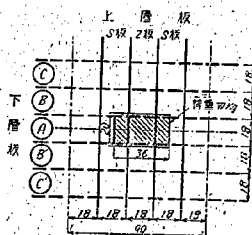


表-7 反力の分布

	S	Z	S
C	0.01 W	0.04 W	0.01 W
B	0.06 W	0.13 W	0.06 W
A	0.11 W	0.20 W	0.11 W
B	0.06 W	0.13 W	0.06 W
C	0.01 W	0.04 W	0.01 W

撓みに依つて近似計算値と實例とを比較する。圖-21は上層施工後の鋪板の載荷試験結果により、下層鋪板中點の中桁に對する撓み(中桁より測つた)を各荷重に對する中央鋪板の最大撓みを100%としてあらはしたものである。實驗値と略算値とを比較すれば相當よく一致して居る事がわかる。

上層板と下層板との最大曲げモーメントの比較を近似計算に依つて行ふ。

上層板の最大曲げモーメントは(8)式より

殆んど同時に破壊状態に陥る。今の場合には下層板が弱點を有して居たがために下層板が破壊し、上層板は何等變化を受けなかつたと見るのが至當であらう。下層板の龜裂の状態より明かに曲げ破壊であり最大縦線應力による單純引張破壊である事がわかる。

(iii) 指は中央二本のみが働き、耳指は荷重を横筋に殆んど傳へない。

(iv) 上面の龜裂は床部構造全體としての境によつて起るのではなくして、主として個々の鋪板が不均等に撓むために起るものである。今の場合上層鋪板の中央の三枚が特に甚しく彎曲したために中央三枚の板と他の板との境界線に沿つて龜裂が特に著しく發生した。

VI. 下層鋪板の有効幅に就いて

圖-24に示す如く下層板に荷重 W が $a \times b$ の範圍に分布されたものとする。單純梁としてのスパンを l 、最大曲げモーメントを單位幅につき M_0 、最大曲げ應力度を σ_0 とする。實測によつて得られた最大曲げモーメントは單位幅について M 、最大曲げ應力度の有効幅を B とする。然るときは次の關係式が成立する。(圖-24 参照)

$$MB = M_0 b$$

$$\text{よつて} \quad \frac{B}{b} = \frac{M_0}{M} = \frac{\sigma_0}{\sigma} = n$$

表-8 は實測の結果より板の有効幅 B を求めたものである。

上層層を置いた篇に有効幅が減じたのは一見奇妙であるが、之は

表-8 有 効 幅

	$n = \sigma_0 / \sigma$	$b(\text{cm})$	$B(\text{cm})$
一 層 張	2.0	27.5	71
二 層 張	2.3	36.5	84
上層層施工(1)	1.3	44.5	58
〃 (2)	0.95	44.5	42
〃 (3)	0.93	44.5	41.5

壓へ述べた際に加壓に用いたコンクリートブロックが板とアスファルトに依つて接觸状態を異にする事、實験中釘に緩みを生じた事等に依ると思はれる。

VII. 結 語

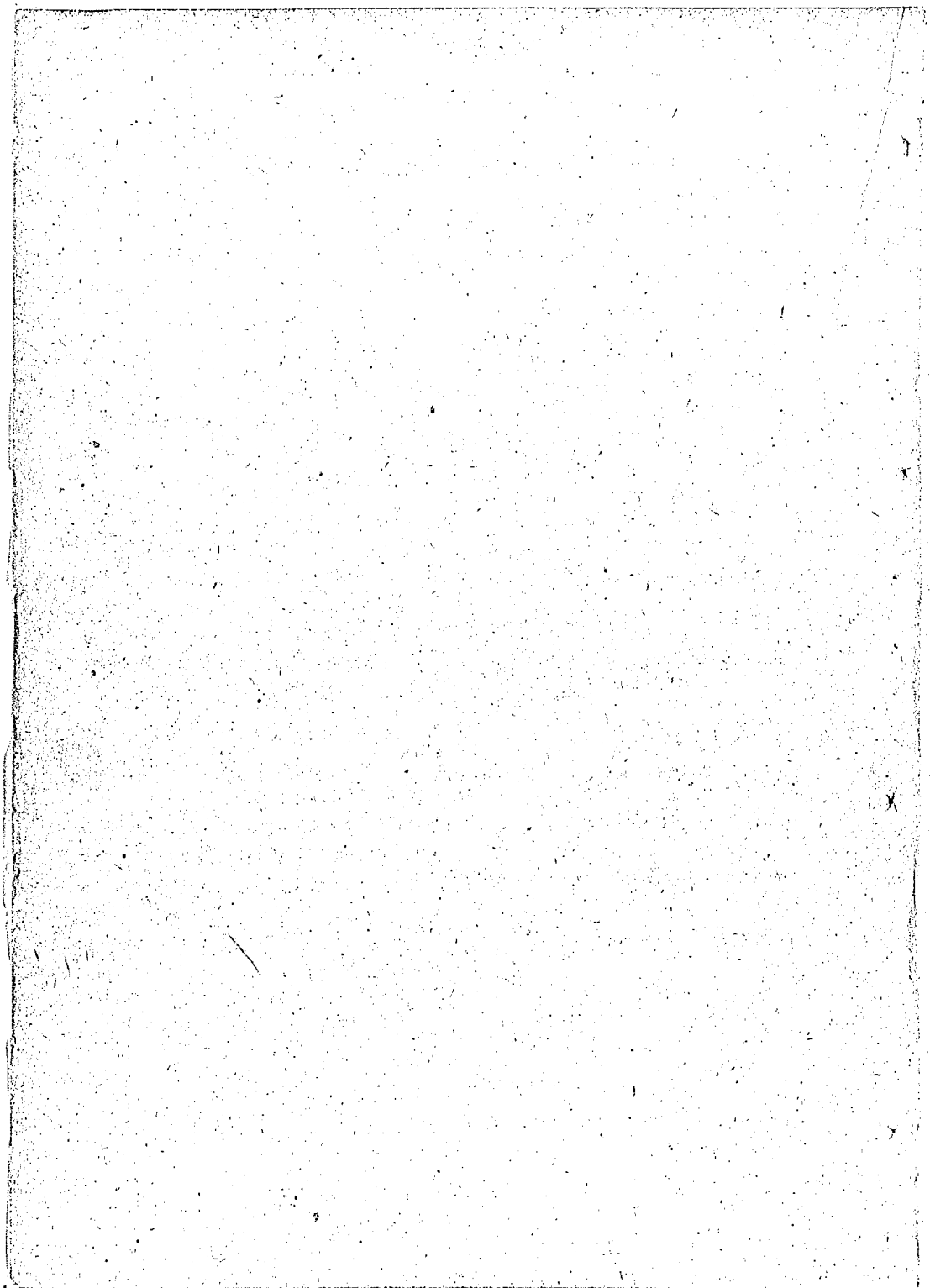
以上の實験によつて得られた結果を總括すると次の如くなる。

(i) 本試験に用いたる如き構造の床部を有する鋪板に於ては内務省土木局昭和 15 年 11 月制定木道路橋設計示方書案に基いて荷重の分布、鋪板の支承條件を定めた場合、下層板に生ずる最大曲げ應力度と實測による最大曲げ應力度との比は表-7 の如くである。此の場合最大應力度は上層鋪板、上層層等によるよりもむしろ釘によつてより大きな影響をうける。

有効幅は荷重の分布を示方書の通りと假定した場合下層板の中心に於ける荷重の分布幅としてよい。

(ii) 破壊荷重は龜裂發生に對して 16.7t、最大荷重に對して 25t である。

よつて荷重が 3,600 kg (道路橋標準活荷重、自動車、第二種 (9t) 荷重の後輪の重量) に達し、計算及び實験に依る木材の應力度が許容應力度を超過した場合でも尚ほ破壊に對して 4.0 の安全率を有する。



指數實驗式の對數を用ふる最小自乘法計算に伴ふ數學的誤差に就いて

内務技手 八 木 龜 助

要 旨

指數實驗式を多數の觀測値から算定する際一般に觀測値の對數をとり最小自乘法計算を行ふが、此方法には一つの法則的誤差を必ず伴ふことを指摘し、之に對する注意を述べたものである。

目 次

I 最小自乘法計算による多數の觀測値の最確値	(1)
II 觀測値の對數をとつて最小自乘法計算を行ふ爲に生ずる誤差	(2)
〔1〕 觀測値の對數をとつて最小自乘法計算を行ふことの不合理な點	(2)
〔2〕 二點一組、各正負同量の觀測誤差を含むとき	(3)
〔3〕 觀測誤差が所謂正常分布をなすとき	(5)
III 結 言	(7)

I 最小自乘法計算による多數の觀測値の最確値

直接觀測のもの、今或る一つの量を n 回觀測して n 個の觀測値 $l_1, l_2, \dots, l_n$ を得たとき (各觀測値の信用度を同一とす、以下同じ) その確からしい値として

$$\text{算術平均}(A) = (l_1 + l_2 + \dots + l_n) \cdot \frac{1}{n}$$

$$\text{幾何平均}(G) = (l_1 l_2 \dots l_n)^{\frac{1}{n}}$$

$$\text{調和平均}(H) = \frac{1}{\left(\frac{1}{l_1} + \frac{1}{l_2} + \dots + \frac{1}{l_n}\right) \frac{1}{n}}$$

等種々考へられるが、最小自乘法の原理を適用すれば

$$\frac{d}{dA} \left\{ (l_1 - A)^2 + (l_2 - A)^2 + \dots + (l_n - A)^2 \right\} = 0$$

として A を求め上の算術平均の式を得、從て最小自乘法に依つて多數の觀測値から算出した値が求め得る最確値だとすれば、上の如く幾つかの確からしいと考へられる値のうち算術平均が最確値だといふことになる。而して算術平均の場合は殘差の代數和は零である。即ち

$$(A - l_1) + (A - l_2) + \dots + (A - l_n) = 0$$

間接觀測のもの

$$Y = aX + b$$

なる直線式で表はせる様な一序列の觀測値 $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)$ に對し最小自乘法で計算し a 及び b の常數を出す場合は

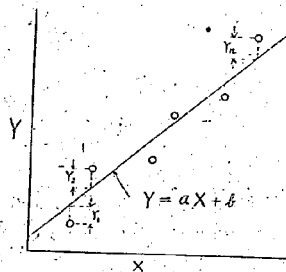
$$(ax_1 + b - y_1)^2 + (ax_2 + b - y_2)^2 + \dots + (ax_n + b - y_n)^2$$

を最小ならしめる a 及び b を求めるのであるから a 及び b が最小自乗法で算出されたとき $r_1 = ax_1 + b - y_1$ とすれば図-1 に於て $r_1^2 + r_2^2 + \dots + r_n^2$ が最小であり、 $r_1 + r_2 + \dots + r_n = 0$ (但し $r_1 + r_2 + \dots + r_n = 0$ を満足するだけの直線は他に無数に存在し得る) となる。即ち多数の観測値 $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots$ 等の y の値を

$$Y = aX + b$$

なる直線又はこれと並行な任意の直線を基準として測つた値に換算し、此の n 個の値を一つの量の直接観測値の如く算術平均して得た値は、 $Y = aX + b$ なる直線と前記任意の基準線との Y 軸の方向での距たりを表はす、換言すれば最小自乗法で $Y = aX + b$ なる直線を算出したとき、此線の附近に散つてゐる観測値を直線の方に並行に移動して X の或る任意の値の一線上に集めれば、それ等の観測値とそこでの直線の位置との関係は一つの量の直接観測値に對する算術平均値と同様に考へられ、間接観測のときでもその残差だけに着目すれば直接観測と同じ理論で扱へることを示す。

図-1



II 観測値の對数をとつて最小自乗法計算を行ふ爲に生ずる誤差

〔1〕 観測値の對数をとつて最小自乗法計算を行ふことの不合理な點

$$Y = aX^b$$

なる曲線で表はし得る様な多数の観測値から最小自乗法に依り a 及び b を決める場合は

$$(ax_1^b - y_1)^2 + (ax_2^b - y_2)^2 + \dots + (ax_n^b - y_n)^2$$

を最小にする a と b とを求めればよいので、若しこの條件を満足する a 及び b が何等かの方法で得られたならば、図-2 に就いて見ればその曲線 $Y = aX^b$ の上下に散在する多数の観測値の残差即ちその曲線からの距たり、 $r_1, r_2, \dots, r_n$ の自乗の和が最小となり、 $r_1 + r_2 + \dots + r_n = 0$ となる筈である。然るに此様な指數型の實験式の場合は常數 a 及び b を決定する爲めの正常方程式が一次とならぬ爲め一般に

$$\log Y = b \log X + \log a$$

と置き替え、 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 及び $y_1, y_2, \dots, y_n$ 等の對数を先づ求め、此對数を観測値の如く扱い直線式として b 及び $\log a$ を求め

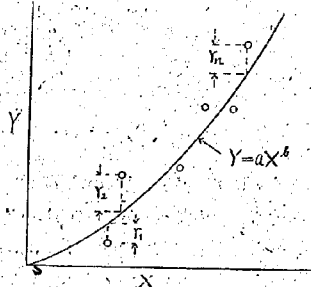
$$Y = aX^b$$

を決める方法が行はれるが、此如く観測値の對数をとつて直線式を決めた場合を圖示すれば圖-3 の如くなり、その直線と各観測値(の對数) y_i との距たりは

$$\log y_i - (b \log x_i + \log a) = \log y_i - \log ax_i^b = \log \frac{y_i}{ax_i^b}$$

となり、最小自乗法で直線を決めた場合この自乗の和が最小にはなつてはゐるもこれは後に説明する如く眞數に引換し曲線ととしたとき最小自乗法の原理である所の「残差の自乗の和が最小」といふ條件には適合しなくなる。

図-2



此關係を簡單な例で示せば、 $\log y_1$ 及び $\log y_2$ なる二つの數の中點を $\log y_2$ とすれば、

$$\log y_1 - \log y_2 = \log y_2 - \log y_3$$

ではあるがその眞數に對しては

$$y_1 - y_2 \neq y_2 - y_3$$

となり、對數での二數の中央の値は眞數に直したとき二數の中央ではなくなることからも判る。尙他の例で示せば

$$Y = aX$$

なる直線で表はし得る或る觀測値 $y_1, y_2, \dots, y_n$ に對し夫々

$x_1, x_2, \dots, x_n$ を得たとき最小自乗法で a を求むれば

$$a = \frac{(x_1 y_1 + x_2 y_2 + \dots + x_n y_n)}{(x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_n^2)}$$

となるが、 $Y = aX$ を

$$\log Y = \log a + \log X$$

なる形に書き替へ、各觀測値の對數を直接の觀測値と見做して最小自乗法により a を求むれば

$$-\log a = \frac{\left(\log \frac{y_1}{x_1}\right) + \left(\log \frac{y_2}{x_2}\right) + \dots + \left(\log \frac{y_n}{x_n}\right)}{n}$$

故に

$$a = \sqrt[n]{\frac{y_1 y_2 \dots y_n}{x_1 x_2 \dots x_n}} \quad (2)$$

となり、 a の値は(1)とは異つたものとなる。指數公式算定の場合に對數に依るのは後者と同じ意味のこゝを行つてゐるのである。

〔2〕二點一組、各組正負同量の觀測誤差を含むとき

直接觀測のもの、今 y なる量を二回直接觀測して $+py$ 及び $-py$ なる誤差を含む二つの値即ち、 $y+py$ 及び $y-py$ を得たとき、最小自乗法の原理に適合する最確値は前述の如くその算術平均

$$\frac{(y+py) + (y-py)}{2} = y \quad (3)$$

となるが、觀測値の對數をとり最小自乗法の條件を滿足する最確値を求むれば

$$\begin{aligned} y &= \log^{-1} \frac{\log(y+py) + \log(y-py)}{2} \\ &= \sqrt{(y+py)(y-py)} = y \sqrt{1-p^2} \end{aligned} \quad (4)$$

即ち二つの觀測値の幾何平均となり、(3)の場合に比し $\sqrt{1-p^2}$ を乗じただけ異つて来る。茲に p は觀測誤差の最確値に對する比である。

(3)の y と (4)の $y \sqrt{1-p^2}$ との差の y に對する比を作り之を K とすれば

圖-3

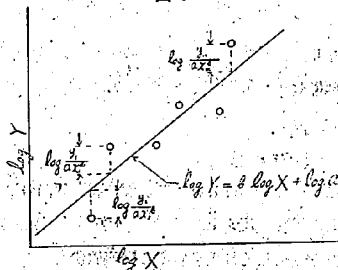
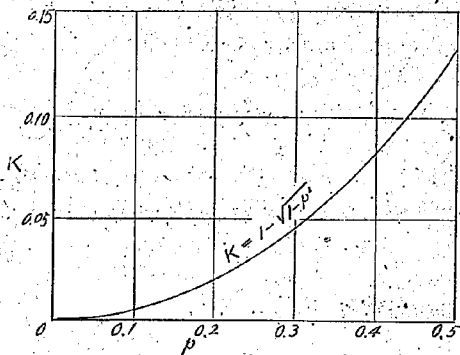


圖-4



$$K = \frac{y - y\sqrt{1-p^2}}{y} = 1 - \sqrt{1-p^2}$$

となり、之を圖示すれば圖-4の如く p の増加に従ひ K は急速に増大する。

間接観測のもの、間接観測のものに就いて上述の如き關係を論ず

れば、今こゝに

$$y = x^2$$

なる曲線にて表はされる各眞値に對し正負各 py なる誤差を含む

幾組かの観測値を得たとき、眞數のまゝ圖示すれば圖-5の如く

なり $+py$ なる誤差を有する観測値群は

$$y_+ = (1+p)x^2$$

なる曲線上にあり、又 $-py$ の誤差を含む方は

$$y_- = (1-p)x^2$$

なる曲線上にある。然るに各観測値の對數を採つて作圖すれば圖

-6の如く $y = x^2$ なる曲線は

$$\log y = 2 \log x$$

なる直線となり、 $+py$ なる誤差を含む観測値

の對數は

$$\log y = 2 \log x + \log (1+p)$$

なる直線上にある事となり、此直線は $\log y =$

$2 \log x$ なる直線より $\log (1+p)$ だけ上を通

る並行線であることを示し、 $-py$ なる誤差を

含む観測値の對數は

$$\log y = 2 \log x + \log (1-p)$$

なる直線上にあり、 $\log y = 2 \log x$ より $\log (1-$

$p)$ だけ下を通る並行線中にあることを示す。

そこで観測値の對數から最小自乗法計算で直線

式を決めれば、その直線は當然前記二直線に

並行且つその中央を通るべき故

$$\log y = \frac{2 \log x + \log (1+p) + 2 \log x + \log (1-p)}{2} = 2 \log x + \frac{1}{2} \log (1-p^2)$$

となり、 $\log y = 2 \log x$ に並行にしてこれより $\frac{1}{2} \log (1-p^2)$ だけ下を通ることを表はす。即ち斯の如き場合

観測値の對數を採つて最小自乗法計算で曲線を決めればこれを眞數に戻したとき最小自乗法の原理である「殘差の自乗の和を最小ならしめる」べき最確曲線と一致せず y の値が常に $\sqrt{1-p^2}$ だけ小さくなる曲線となつてしまふのである。

間接観測の一例、今こゝに

$$y = x^2 \dots \dots \dots (5)$$

といふ曲線に就いて次表の如く任意の x の値 7 個に對し各々 y の値を算出し、

圖-5

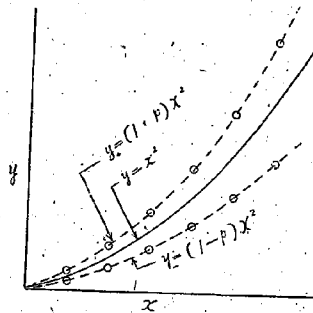
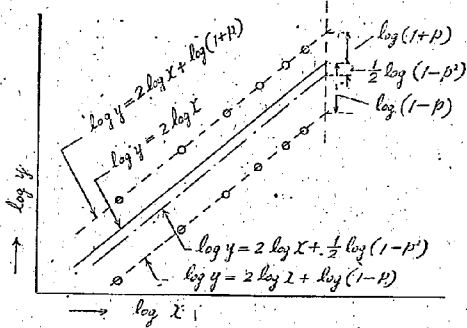


圖-3



x	y	x	y
0.03	0.0009	0.15	0.0225
0.07	0.0049	0.18	0.0324
0.10	0.0100	0.20	0.0400
0.12	0.0144		

之等を觀測値と考へその對数をとつて最小自乗法計算を行へばこれ等の點は曲線上の正確な點で誤差を含まないから

$$y = ax^b$$

と假定して計算すれば

$$a=1, \quad b=2$$

を得て(5)に一致する。所が之に對し前表の各 x に對し y の觀測値として夫々

$$y+0.1y, \quad y-0.1y$$

なる二個宛の値を得たものとし、これより最確曲線を求むる爲めに此の對数をとつて前同様最小自乗法計算を行へば

$$a=0.995, \quad b=2$$

となり、此結果觀測値そのまゝの殘差の自乗の和を最小ならしめる曲線 $y=x^2$ に比し y は常に 0.005 だけ小さくなる。これは圖-4 の K 即ち

$$1 - \sqrt{1-p^2} = 1 - \sqrt{1-0.1^2} = 0.005$$

に相當する。

〔3〕觀測誤差が所謂正常分布をなすとき

ガウスの誤差曲線、之は次式で示される

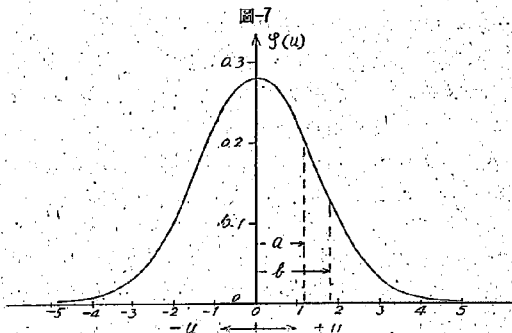
$$\varphi(u) = \sqrt{\frac{1}{\pi}} h e^{-h^2 u^2}$$

但 π 圓周率 h 常數 e 自然對数の底 u 眞差

$\varphi(u)$ u の函數で $h = \frac{1}{a}$

とすれば圖-7 の如し

一般に觀測誤差は圖-7 の如く分布するとされてゐる。之は所謂正常分布で此の詳しい説明は略すがこれは $u=0$ を中心に左右對稱で、此曲線内の面積は $u=+\infty$ より $u=-\infty$ まで集めると 1 になり、 $u=+a$ と $u=+b$ との間の面積は誤差の大きさが $+a$ と $+b$ との間にある觀測數の全觀測數に對する割合を表はす。



直接觀測のもの、誤差が正常分布して居れば正負共に同量誤差のものが同回数宛あるといふことになり、結局前に述べた正負同量の誤差を含む二個宛の觀測値を多數組合せたものであることが判る。従つて正常分布のものでも觀測値の對数をとつて最小自乗法を行ふことの不合理は免れ得ず、斯の如き狀態に誤差の分布する多數の觀

測値を算術平均したもの（之は對稱形なる故に $u=0$ と一致する）と幾何平均したものとの差だけの誤差を生ずる。而して算術平均と幾何平均との差は、正負同量誤差の場合圖-4の如く算術平均値（最確値）と觀測値との差（殘差）の算術平均値に對する比（ p ）の函數で表はされる故に、圖-7の如く觀測誤差 u の分布狀態が定つても $u=0$ なる點の位置に依り、即ち測定されるものゝ眞値の大小に依り、誤差の大きさの眞値に對する割合（ p ）が異り従つて算術平均と幾何平均との差も異なることになる。

直接觀測のものゝ一例、眞値 10 なる量を觀測して圖-7 の如き誤差を生じたものと假定し、觀測値を K 、 $K-10$ なる誤差の生ずる比較確率を $\varphi(K)$ とすれば

$$\varphi(K) = \sqrt{\frac{1}{\pi}} \cdot \frac{1}{2} \cdot e^{-\frac{1}{2}(K-10)^2}$$

なる曲線は圖-8 の如くなり、これは圖-7 の誤差曲線と同様な誤差の正常分布曲線である。

此の如く誤差の分布せる觀測値 K のそのまゝの算術平均と、觀測値 K の對数の算術平均を求めたものゝ眞値とを比較するに、そのまゝの算術平均は圖-8 に於て Δa に相當する斜線區域の面積にその點の觀測値即ち K を乘じたものを曲線内全域に互り集め之を曲線内全面積で除したものである。然るに $K=-\infty$ より $K=+\infty$ までの面積は 1 なる故結局

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \varphi(K) \cdot K dK$$

となり、之は左右對稱なる爲當然 10 となる。

之に對し觀測値の對数の算術平均は

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \varphi(K) \cdot \log K dK$$

となり、圖-8 に對し Δa を約 80 個に分ち近似計算を行ひ（ $K < 5$ 及び $K > 15$ の部分を省略）觀測値の對数の平均値 0.9044 を得た。之を眞數に直せば $K=9.87$ となり算術平均より 1.3% 小さくなる。

間接觀測のもの、間接觀測のものでもその殘差だけに着目すれば直接觀測のものと同様に考へられることは前に述べた通りであるが實際問題として圖-9 の如く x の方を或る間隔に區分して各 x に對し y を多數回觀測する場合もあり、此場合各 x に對する多數の y の觀測値は一つの量の直接觀測の如く誤差の分布もガウスの誤差法則に従ふものと考へられる。若し又一般の場合の如く x の任意の値に對し各 x y を觀測する場合でも圖-10 の如く Δx の間にある y の値を考へるとき觀測數を非常に多くし Δx を小さくとつて行けば結局前同様に考へられ、間接觀測のときでも對數をとつて最小自乗法計算を行つた爲めの誤差は直接觀測のときと同じ程度に起ることが判る。但し以上は觀測誤差が觀測される量の大小に従つて増減するものと考へた場合で觀測誤差が觀測される量の大小に無關係であつたり又は無關係の部分を含んでゐるときは、觀測値の對數を採つて最小自乗法で指數實驗

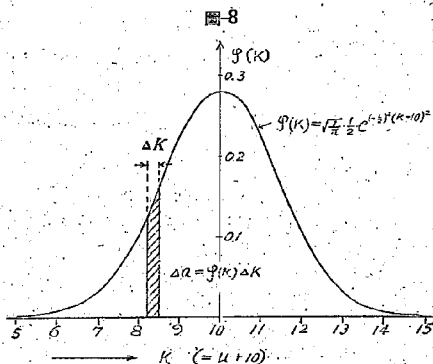
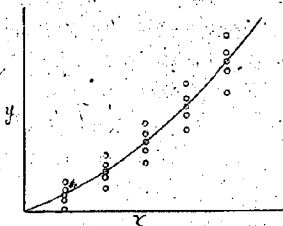


圖-9

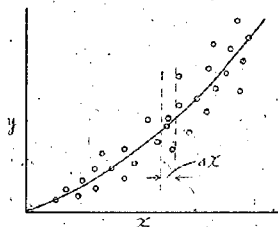


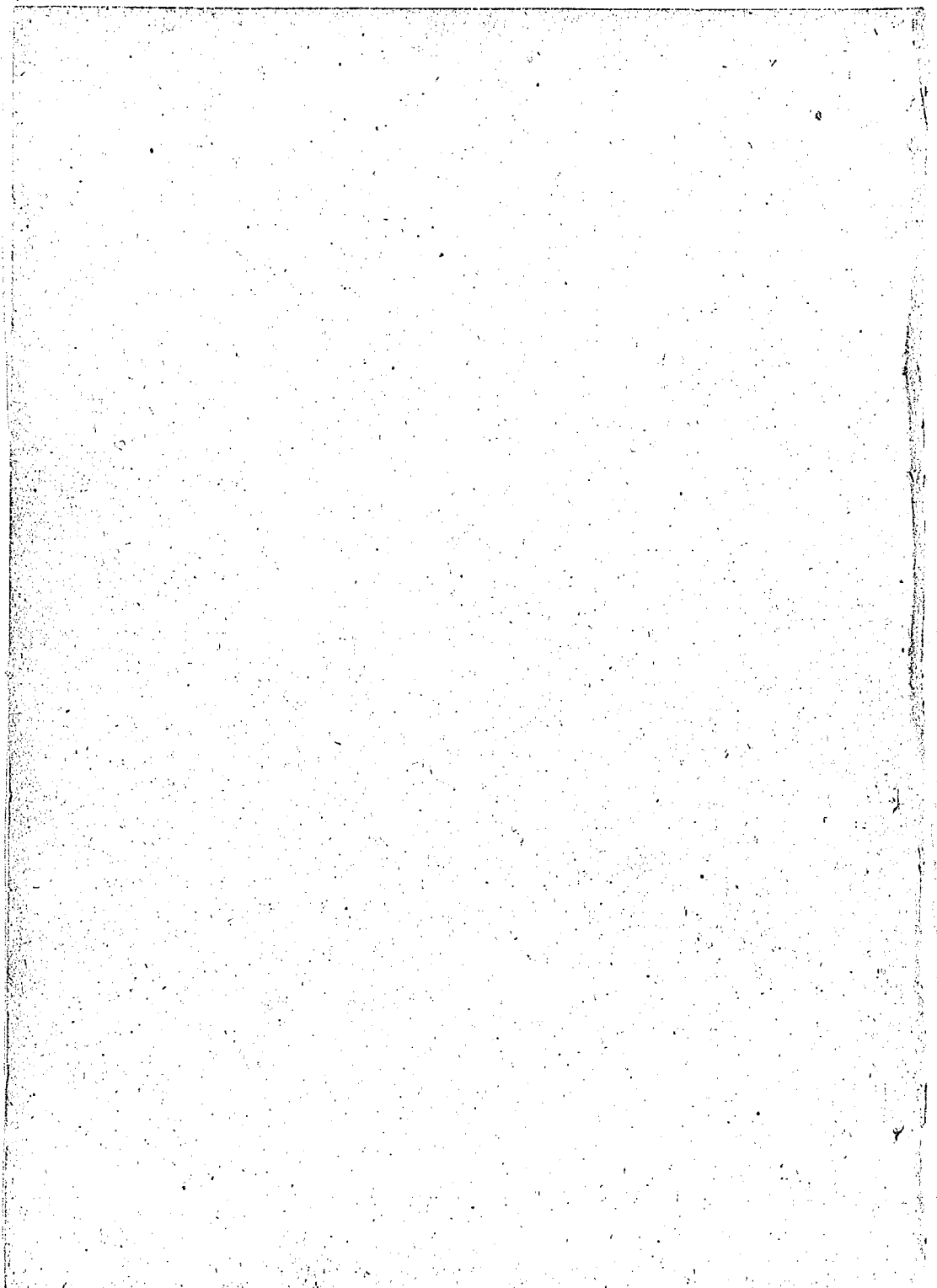
式を計算した爲めの誤差がその曲線の全體に亘り一定比で含まれるといふ簡単な關係でなくなるが、その様な場合の検討はこゝには省いた。

圖-10

III 結 言

斯の如く指數式を對數で直線式として計算し之を眞數に引直す方法は觀測値に誤差を伴ふ限り理論的には最小自乗法の原理に對し不合理な點が存在するもので、此計算法の爲めに入つて來る誤差は觀測誤差の眞値に對する比が大きい時特に大きくなるものであるから、觀測の性質上あまりに觀測値が飛び離れてゐる場合は一應此點を考へ適當な法則の下に棄却法を行ふ等の手段をとり、尙算定曲線に對して最小自乗法による結果なるが故に過信する傾向を避けねばならない。





土壤特に黃土の熱的特性に 關する實驗的研究

内務技師 島 田 八 郎

目 次

緒 言	(1)
I 試料に就いて	(2)
II 實驗方法	(3)
III 實驗結果に就いて	(3)
[1] 比熱試驗	(3)
[2] 溫度傳導率並に熱傳導度	(5)
(1) L_A 試驗結果	(6)
(2) L_B 試驗結果	(9)
(3) O 試驗結果	(10)
(4) 赤土 試驗結果	(12)
IV 溫度傳導率及び熱傳導度に及ぼす間濕率及び含水量の影響に就いて	(15)
V 要 約	(18)

緒 言

土壤の熱的性質は土木工事的分野に於ては從來顧みられた事少く寧ろ等閑に付せられてゐた。蓋し力學的性質の如く直接な影響を建築物に及ぼす事少く、一般の關心を喚起するに至らなかつた爲である。一方農業關係の分野に於ては熱的特性も可成り重視され、其の他の特性と共に土壤判別の資料に常に供せられてゐる。然るに最近土壤地盤の凍上融解の諸問題に關聯し地中溫度分布、並に地下凍結深度等土壤の熱的特性との關係が研究され始めて來た。其の他地下埋設輸送管の保温に對する影響を始め壁體原料として使用せる場合には、寒暑の影響に對する感應性少く且つ遮熱性の大きなるを必要とする等土壤の熱的特性が重視考慮さるゝに至つた。斯かる現状なれば單に漫然と數表の數値を使用する事なく、一處地方により土壤の熱的特性を吟味し、其の特性を明かにしをく必要がある。滿洲國、中華民國等に於ては壁體を見るも資材の關係上土造壁構固め壁抑降壁土造等土壤を直接利用せるもの多く、其の熱的特性に順じ其の構造が考察され定められるべきである。元來土壤の熱的特性は熱容量熱傳導度溫度散散率により判別されるが、此等は土壤の構成要素なる例へば礦物的要素によるも土壤の如き生熟過程を有する物質に就ては頗る複雑曖昧の點多く、寧ろ構造的要素即ち空隙含水量等にする影響を明かにする方が直截的であり同等に實用上必要である。本報告は主として後者との關係を明かにせるものである。

建築材料としての熱的特性の熱容量熱傳導度溫度散散率には互に密接な關係あるは勿論三者共に各々別個の重要な意義を有するもので例へば寒暑の差異に關する感應度、保温體の熱貫流抵抗地中氷結深度の研究に於ける溫

度波長等に於ては三者夫々直接に關係を有するも*此等三者の値に就き夫々測定されしもの少し。本報告は二三の土壤に就き此等の値を測定し、其の熱的特性を明かならしむると共に基礎的資料を提供し、使用上の一基準に資せんとするものである。

I. 試 料 に 就 い て

本實驗に使用せるもの4種の中3種は所謂黄土(塋塋)と稱せられてゐるもので、1種は關東ローム(塋塋)

資 料 名	記 號
1) 山西省并縣黄土	L _A
2) 北京郊外黄土(主として煉瓦製造用)	L _B
3) 北京郊外黄土	O
4) 東京關東ローム	赤土

である。4種共濃淡異なるも共に黃褐色の土壤にて、前者は風積土の代表的のものであり後者は洪積層の上部に屬するものである。兩者は機械分析値の外其の組成要素に可成りの差異がある。黄土資料は(福島技師の御配慮によるもので本機會に謝意を表す)左記の3種である。其の詳細は福島技師報告を参照されたい。

各資料に就きて本實驗に必要な特性並に土壤(土性)判定値としての二三の特性を測定す。主なるもの下記の如し。

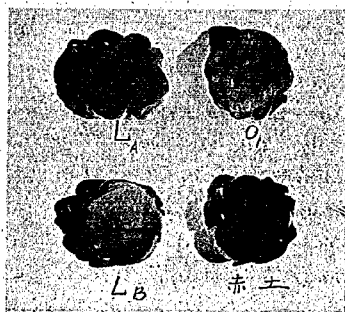
眞比重、液性限界、可塑性限界、收縮限界、遠心力含水等量、水素イオン濃度(PH値)**

此等の測定法は一般に使用されてゐるもので特筆すべきもの無きも、PH値は指示薬法(Merck社製 Universal Indicator を使用す)によりしもので、資料取扱ひは國際土壤學會法式に據る。赤土の場合キンヒドロソ電極、水素電極法にて測定せしめ略 PH 5.5 の近くの値を示せり。實測値は取極め表—1に示す。

表—1

	L _A	L _B	O	赤土 (ローム質)
眞 比 重 ρ_s	2.63	2.04	2.60	2.42
可 塑 性 限 界(%)	16.1	19.0	18.2	49.3
液 性 限 界(%)	37.1	55.8	37.4	83.3
收 縮 限 界(%)	23.5	13.0	20.4	63.0
遠心力含水等量(%)	8.98	21.6	6.27	56.2
PH 値	7.6~8.0	7.7~7.6	8~8.5	5.5

寫眞—1 遠心力含水等量試験後の試料状況



寫眞—1 は遠心力含水等量試験直後の試料状況を示すもので表—1に於ける同當量%値と比較する事により黄土系のもものと關東ロームとは可成り異なる成熟過程にある土壤なる事を推測し得べし。

* 寒暖に對する感應度としては熱容量 $[W] = [\rho c]$ 、熱貫流抵抗としては直接 $1/\lambda$ 、地下水結には温度波長 $\lambda = k \sqrt{2\pi \tau}$ が利いて来る。但し ρ : 密度、 c : 比熱、 λ : 熱傳導度、 $k^2 = \frac{\lambda}{[\rho c]}$ 温度傳導率、 τ : 周期(日又は年)を示す。

** 機械分析結果は一應福島技師報告(土木試験所報告第61號)を参照され度し(L_A, L_B, 赤土)。後日別に筆者記述する機會あるべし。

II. 實驗方法

比熱及び温度傳導率測定に就き簡単に記述す。兩者共に既に詳細に報告せるものである。比熱は混合法により温度約 90°C~20°C の平均比熱を測定せるもので測温にはサーモカップルを使用す。資料は常に第 30 番以下の風乾状態より絶對乾燥に近きもので毎回 60~70 gr. を採つた。温度傳導率測定には直接温度傳導率を測定する過渡法をとり、恒温槽温度として θ_i は水道水を循環せる水槽にて室温近く、 θ_a は 35°C~40°C の範圍に一定に保す。通常最初低温水槽に浸し中心温度一定となれる後素早く試體を高温水槽に移し中心温度上昇度を測定し、温度一定となれる後更に素早く低温水槽に移し同様の測定を爲す。一般に二法より算定される温度傳導率の値 (k^2) は異なるものである。供試體は内徑 5 cm, 高さ約 12.1 cm, 厚さ 0.05 cm の真鍮中空圓筒に適當に含水せる試料を三層に分ち、一定の壓力にて填充し中央部に直徑約 2 mm の硝子管に 0.9~0.5 gm 程度の水銀の封入せるものを挿入し、銅コンスタン熱電對にて測温す。中心温度の時間的變化より温度傳導率 (k^2) を算定せるに下記の如し。即ち兩端影響を度外視すれば温度は中心より r の位置に於ける時間 t に對する温度は

$$\theta = \theta_a - (\theta_a - \theta_i) \Sigma I(r)$$

である。

但し

$$\Sigma I(r) = \sum_{s=1,2,3,\dots}^{\infty} \frac{2}{\lambda_s J_0(\lambda_s)} J_0\left(\frac{\lambda_s}{a} r\right) e^{-k^2 \left(\frac{\lambda_s}{a}\right)^2 t}$$

$J_0, J_1, \dots; 0, 1, \dots$ 次ベッセル函数 $\lambda_s; J_0(\lambda_s) = 0 \dots$ の 1, 2, ... 次根, $2a$; 圓筒直徑, k^2 ; 温度傳導率を示す。 $\frac{\theta_a - \theta}{\theta_a - \theta_i} \sim k^2$ 關係を圖示すれば、一定の時間に對し圖—1 に示すが如き曲線を得。同圖の k^2 は半徑 $a=1$ cm に相當する場合で便宜上 k^2 とす。各曲線は k^2 一定にして同一なれば資料の大きさに應じ適宜適當な時間を基準とす。

III. 實驗結果に就いて

(1). 比熱試驗

土壤の比熱は其の含水量の影響は勿論大なるも組成により著しく異なるものである。例へば砂土質、粘土質にては重量當り後者が 40% も大なる値をとる事は一般に認められてゐる。更に腐植土等の混入する事により値を増大するものである。即ち該土壤の成因並に地方により異なるも、其の範圍は約 0.19~0.4 cal/gr. のもの様である。

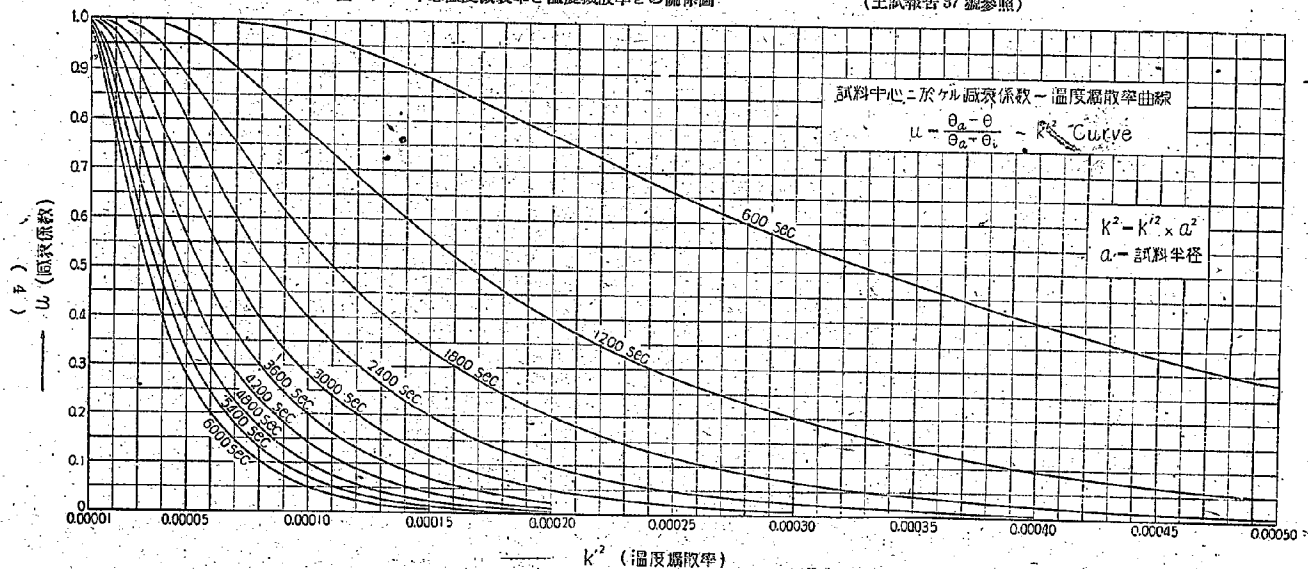
本實驗は風乾乃至絶對乾燥に近き 0.5% 以下の含水せる資料の粉末を同心環筒を有する直徑 30 mm, 高さ 72 mm, 厚さ約 0.33 mm のアルミニウム製圓筒形容器に入れ、温度範圍 90°C~20°C 程度に於ける平均比熱を混合法により求めたもので、カロリメーター内にて温度が一定に達するに 7~8 分を要した。カロリメーター温度は外水槽共に室温に近く且つ實驗中温度上昇は $\Delta t = 1 \sim 2^\circ\text{C}$ 程度なれば實驗中に於ける輻射等による熱損失は度外視した。測温には銅—コンスタン熱電對を使用し感度は 74.0 mm 振れ/ 1°C 程度とした。攪拌器同轉速度其他測定操作は従來通りとす。

熱量計の温度變化は圖—2 に其の一例を示す如く資料にて個々異なるも、7~8 分程度にて一定平衡に達すれば容

(*) 二三の土木材料の比熱測定結果に就いて、島田八郎、土屋直、土木試驗所報告第 34 號昭和 11 年。コンクリートの熱的性質に関する研究、第 1~2 報、島田八郎、土木試驗報告第 37 號、第 59 號、昭和 12 年、16 年。

圖-1 中心温度減衰率と温度消散率との関係圖

(土試報告 97 號参照)



易に温度上昇差を求め得、各試料に就き數回實測す、下記に其の平均値を表示す、

表-2 比 熱 表 (cal./gr.)

資料名	L _A	L _B	O	赤 土	標準砂
比 熱	0.281	0.289	0.274	0.44	0.202

但し測定温度範圍約 90°~20°C

従つて一般に含水量及び見掛比重の與へられた土壤の熱容量は加算法により容易に其の値を求め得、關東赤土(ローム質)の熱容量は北支の黄土に比較するに可成り大なるものである。

(2) 温度傳導率並に熱傳導度

實驗方法は簡単に既に述べしを以て省略し、先づ資料製作の概要を述べる。含水量 1% 以下の風乾土壤の所謂團粒組織の充分破壊せるものを、真鍮線内徑 5 cm、内高 12.1

cm の容器に可及的一様に填充せんと試みしも種々異なる空隙状態を得る事は困難であつた。乾燥資料の場合には落下高を略一定に定め所謂輕装程度の填充を爲す場合と三層に分ち、各層毎に加壓力 (64 kg) 3.27 kg/cm² にて壓縮した。重量及び容積より見掛比重 (ρ_a) を求め、空隙率 (空隙率) P 等を計算し實驗結果を判定す。各層に於ける見掛比重 ρ_a は可成り異なる事もある其の一例として、L_A 及び L_B の含水状態に於ける結果を示すに表-3 の如し、斯る程度の一様性である水の混和には特に細心の注意を拂ふ。後章に平均値を以て示す。L_A, L_B の常所到達當時の空隙率並に含水量は夫々 50.29%, 37.38% 並に 2.68%, 6.79% との報告あり、且つ本試験の製作供試體にも略々上記程度の構造を有するものが存在してゐる。實驗方法並に取扱は既に説明せるを以て省略するも、含水状態の空隙率の計算は便宜上、下式

$$P = \left[1 - \frac{\rho_a}{\rho_t} \left(1 - \frac{W_w}{W_s + W_w} \right) \right], \quad (\text{但し, } \rho_a: \text{見掛比重, } \rho_t: \text{眞比重, } W_s: \text{土の眞味重量, } W_w: \text{含水重量等を示す}) \dots$$

により計算せるもので、上式計算方式より明かなる如く水が單に客観的に加算されし場合には斯かる状態に於ける水分と空隙部の容積の和を基準とせるもので空隙部のみを取扱ふ場合には更に上式の P より下式

$$P' = \rho_a \frac{W_w}{W_s + W_w} \dots \text{と與へられる含水容積に相當する } P' \text{ を減ずる}$$

必要がある。兩者共に便宜上の式なる事を當に留意し、試驗結果を批判する事とする。後章 $P-P'$ を特に空隙率と稱へた。實驗結果は總て

圖-2 カロリメーター温度上昇曲線

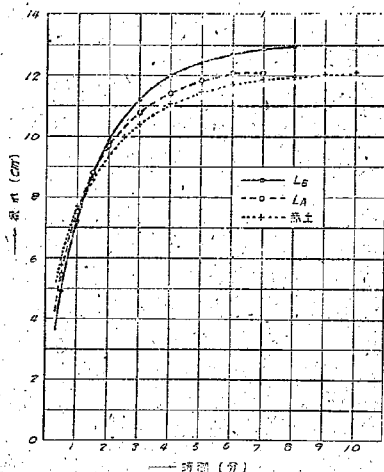


表-3 資料見掛比重

資料名	含水量%	填充層	見掛比重
L _A	5	1	1.43
		1-2	1.43
		1-2-3	1.43
	10	1	1.50
		1-2	1.51
		1-2-3	1.52
L _B	15	1	1.86
		1-2	1.80
		1-2-3	1.88
	5	1	1.38
		1-2	1.38
		1-2-3	1.39
	10	1	1.53
		1-2	1.56
		1-2-3	1.57
	15	1	1.50
		1-2	1.61
		1-2-3	1.61

備考 O₁ の場合見掛比重 ρ_a は填充層位により可成り異り未だ載荷重の不充分な場合は最後の値を以て平均見掛比重とす (後節参照)

* 福島技師: 黄土路床土の固結安定に関する基礎試験及び調査, 土木試験所報告第 61 號, 昭和 16 年 p. 4.

C. G. S. 単位で記述す。

サーモカップルは外部抵抗接續を調節しガルバノメーター振れ 20 mm/1°C 程度のものを使用す。

(1) L_A 試験結果

資料とし風乾状態のもの並に含水量重量比にて 5, 10, 15% のものを揃にも述べし如く測定用容器に填充した。資料平均密度等の種類は表—4 の如し。

熱容量 [W] は固體部及び水量より $\rho_s C(1-P) + P \dots$ より計算す。 L_A 供試體の場合は 表—5 に示す如し。

表—4 L_A 供試體表

番 號	含水量 %	見掛け比重 ρ_a	間隙率 P	含水容積 P	空閑率 P-P
1	0	0.93	0.05		0.05
2	0	1.06	0.59		0.59
3	5	1.43	0.48	0.068	0.41
4	10	1.50	0.47	0.137	0.34
5	15	1.78	0.41	0.23	0.18

表—5 L_A 熱容積 [W] g. cal/cm³.

番 號	含水量 %	見掛け比重 ρ_a	[W] g. cal/cm
1	0	0.93	0.25
2	0	1.06	0.292
3	5	1.43	0.37 + 0.07 = 0.44
4	10	1.50	0.375 + 0.14 = 0.515
5	15	1.78	0.42 + 0.23 = 0.65

備考 真比重 (ρ_s); 2.6

以下試験には既に述べし如く二個の恒温水槽を使用す。兩者の温度を夫々 θ_h, θ_c にて示す。最初低温槽にて温度一定となれる資料を高温槽 (θ_h) に移し、中心温度の變化を測定し後更に高温槽より低温槽 (θ_c) に移し同様の事を繰返す。時間的變化を示すに風乾試料に就き 圖—3 (a)(b) の如きものを得。

圖面の横軸には時間を取り、縦軸にはガルバノメーターの振れ即ち温度差 $\theta_c - \theta_h$ をとる。低温→高温又は高温→低温と移動順位により異なるも、温度差 $\theta_h - \theta_c$ との比をとれば縦軸は正負を度外視すれば $\frac{\theta_c(\text{又は}\theta_h) - \theta}{\theta_h - \theta_c}$ に比例する。同圖中には時刻に相當する此等の値を記入し、同時に該座標點で與へられる單位溫度傳導率 k^2 の値をも記入す。但し單位溫度傳導率 k^2 とは單位長半徑の場合として算定せる値である。 k^2 は含水量殆ど零に近い場合は低温→高温移動、並に其の逆の場合も實驗の誤差範圍内で表—6 の如く同一と見做し得る。

表—6 $k^2 \times 10^{-4}$

時間 min.	2	4	6	8	10
試驗名					
1 號 $\theta_c \rightarrow \theta_h$	2.9	2.8	2.8	2.7	2.8
$\theta_h \rightarrow \theta_c$	2.9	2.9	2.8	2.7	2.7
2 號 $\theta_c \rightarrow \theta_h$	3.4	3.3	3.1	3.0	3.1
	3.1	2.9	3.1	3.4	3.1

且つ大體供試體が一樣溫度に達するまでも

溫度傳導率が不變の様である。後述含水量の多き場合と大いに趣を異にせるものである。

更に同様の試験を 5, 10, 15% 含水量せるものに就き行ふ。略同様の傾向を示すも算定される溫度傳導率 k^2 は溫度變化の順位により著しく異なるもので、低温より高温に移せし場合が一般に大きく測定されてゐる。圖—3 c, d

は此等の溫度傳導の一例を示すもので、表—7 に其の傾向を示す。約 20 分程度で供試體全體の溫度が同様となる。

* C. G. S. 単位とメートル實用單位との關係式を示し置く。

熱傳導度率 ; $\lambda \left(\frac{\text{K. cal.}}{\text{sq. in. } ^\circ\text{C.}} \right) = \lambda (\text{C.G.S.}) \times 10^2 \times 3.6$

溫度傳導率 ; $k^2 \left(\frac{\text{m}^2}{\text{hr.}} \right) = k^2 (\text{C.G.S.}) \times 3.6 \times 10^{-4}$

圖-3 (a)

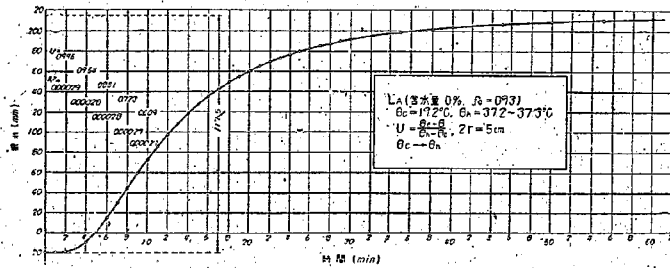


圖-3 (b)

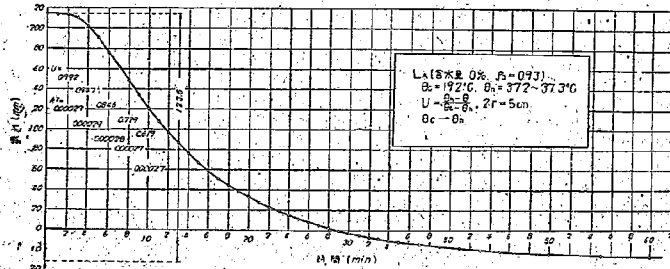


圖-3 (c)

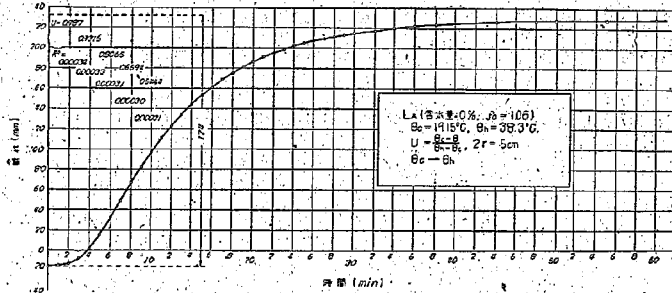


圖-3 (d)

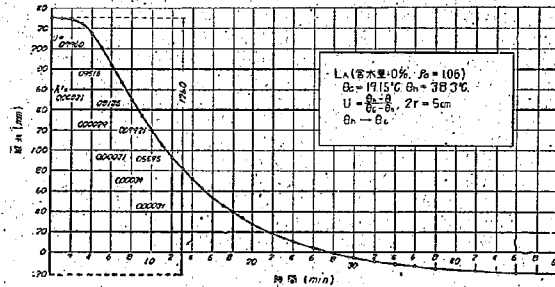


表-7 $k^2 \times 10^{-4}$

時間 min.	2	4	6	8	10
試験名					
3 號 $\theta_c \rightarrow \theta_h$	6.7	7.1	7.3	7.0	7.0
$\theta_h \rightarrow \theta_c$	6.8	6.4	6.2	6.0	6.0
4 號 $\theta_c \rightarrow \theta_h$	7.9	8.0	8.3	8.3	8.2
$\theta_h \rightarrow \theta_c$	7.2	7.3	7.4	7.4	7.4
5 號 $\theta_c \rightarrow \theta_h$	8.0	8.3	8.6	8.6	8.7
$\theta_h \rightarrow \theta_c$	7.2	7.3	7.3	7.3	7.3

表-8 k^2 表 (C.G.S.)

番 號	k^2 (C.G.S.)
1	0.0018
2	0.0021
3	0.0045 ~ 0.00395
4	0.0053 ~ 0.00455
5	0.00515 ~ 0.00455

表-9 λ 表 (C.G.S.)

番 號	λ (C.G.S.)
1	0.00045
2	0.00061
3	0.00199 ~ 0.00175
4	0.00274 ~ 0.00235
5	0.00334 ~ 0.00295

各試験値の平均値より温度伝導率 (k^2) を算定す ($k^2 = k^2 \times \pi r^2$)。表-8:

に此等の結果を示す。含水状態に於ける二様の値は其の一應記載す。

同表値の二様記載せるは温度変化方向の異なるに従つて異なる温度伝導率を示す場合にて、前者は低温より高温に移す ($\theta_c \rightarrow \theta_h$) 場合で、後者は其の逆の場合である。表-8 の値と表-5 に示す熱容量 [W] より k^2 [W] 即ち熱傳導度 (λ) を容易に算定し得。表-9 に此等を示す。同表中二様の値あるものは細に述べしものと同じ意味である。表-8、表-9 の結果と空間隙率 $P-P$ 、及び間隙率 P との關係を圖-4 (a), (b) に示す。此等 $k^2 \sim P$, $\lambda \sim P$ の關係はセメントペースト等の如き場合に比較するに可成り複雑せるものである。勿論既に暫く述べし如く、間隙率、含水量算定にも考慮すべき點あるも、傾向に對する一應の解明は之を爲し得。元來土壌含水量状態にて資料を製作する場合、製作方法により其の密度傾向等異なるも安定なる供試體としては自ら含水量間隙率相互には關係がある。

全く同様の試験を他の資料 L.B, O, 赤土に就いても行ふ。温度伝導率、熱傳導度の試験操作、温度其の他間隙

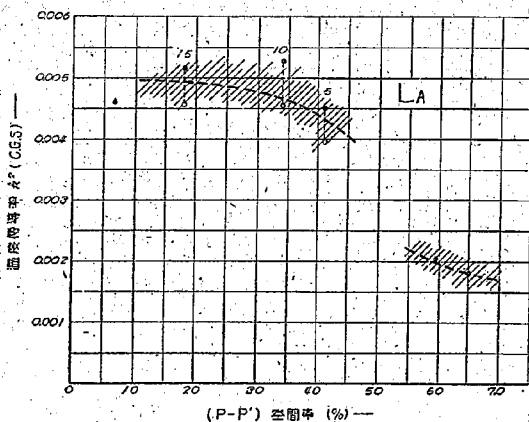
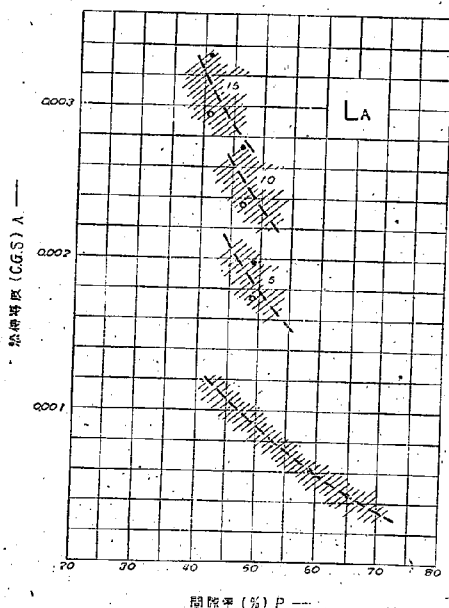
圖-4 (a) 温度伝導率 k^2 と空間率 ($P-P'$) との關係

圖-4 (b) 熱傳導率 λ と間隙率 P との関係


率に對する影響も類似せるもの多し。簡単に結果のみ記述す。

2) L_B 試驗結果

供試體の見掛比重 ρ_a , 間隙率 P , 空間率 $P-P'$, 含水率は表-10に示す。

更に熱容量 $[H]$ は土壤固體部比熱 $C=0.29\text{cal/gr.}$ を下式 $\rho_s C(1-P) + P'$ に代入し容易に計算し得。(表-11) 各記號に就ては上述参照。

表-11 熱容量表

番 號	含水量 %	熱 容 量 $[\text{cal/cm}^3]$
1	0	0.287
2	0	0.297
3	5	0.45
4	10	0.555
5	15	0.612
6	18	0.718

測定されし單位溫度傳導率 k^2 を表-12に示す。

 表-10 L_B 供 試 體 表

番 號	含水量 %	見掛比重 ρ_a	ρ_a/ρ_s	間隙率 P	含水率 P'	空間率 $P-P'$
1	0	0.84	0.311	—	—	—
2	0	1.35	0.517	0.68	—	0.68
3	5	1.38	0.521	0.488	—	0.517
4	10	1.55	0.595	0.50	0.066	0.434
5	15	1.60	0.62	0.46	0.142	0.358
6	18	1.81	0.685	0.47	0.206	0.264
				0.42	0.274	0.146

備考 但し見掛比重 $\rho_s=2.64$ 全加壓力 64 kg.

 表-12 k^2 溫度傳導率表 ($k^2 \times 10^{-4}$, C.G.S.)

番 號	實 驗 條 件	時 間 (min)				
		2	4	6	8	10
1	$\theta_c \rightarrow \theta_h (21.7 \rightarrow 35.4^\circ\text{C})$	—	—	—	—	—
	$\theta_h \rightarrow \theta_c (35.4 \rightarrow 21.7^\circ\text{C})$	—	2.9	2.8	2.8	2.75
2	$\theta_c \rightarrow \theta_h (22.0 \rightarrow 35.3^\circ\text{C})$	—	3.3	3.2	3.0	2.7
	$\theta_h \rightarrow \theta_c (35.2 \rightarrow 22.0^\circ\text{C})$	—	3.8	3.2	3.0	3.0
3	$\theta_c \rightarrow \theta_h (21.3 \rightarrow 33.8^\circ\text{C})$	4.6	4.0	4.8	4.3	3.1
	$\theta_h \rightarrow \theta_c (33.8 \rightarrow 21.3^\circ\text{C})$	4.7	4.3	4.3	4.3	4.9
4	$\theta_c \rightarrow \theta_h (20.5 \rightarrow 41.3^\circ\text{C})$	6.1	5.8	5.6	5.5	4.3
	$\theta_h \rightarrow \theta_c (41.3 \rightarrow 20.5^\circ\text{C})$	—	5.8	5.6	5.2	5.5
5	$\theta_c \rightarrow \theta_h (21.1 \rightarrow 39.7^\circ\text{C})$	5.8	6.2	6.2	6.2	5.2
	$\theta_h \rightarrow \theta_c (39.7 \rightarrow 21.1^\circ\text{C})$	5.8	5.7	5.5	5.3	6.2
6	$\theta_c \rightarrow \theta_h (27.0 \rightarrow 40.4^\circ\text{C})$	6.8	6.7	6.7	6.7	5.4
	$\theta_h \rightarrow \theta_c (40.4 \rightarrow 27.0^\circ\text{C})$	6.5	6.2	6.0	6.1	7.0
						6.1

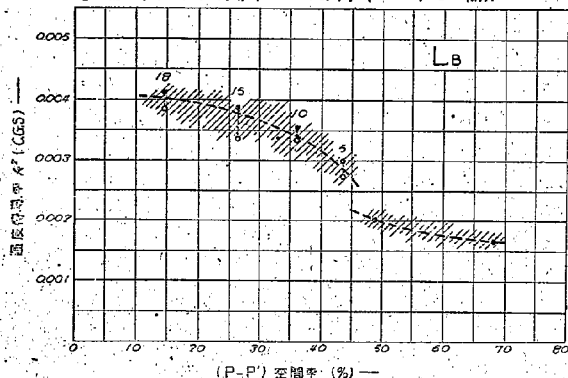
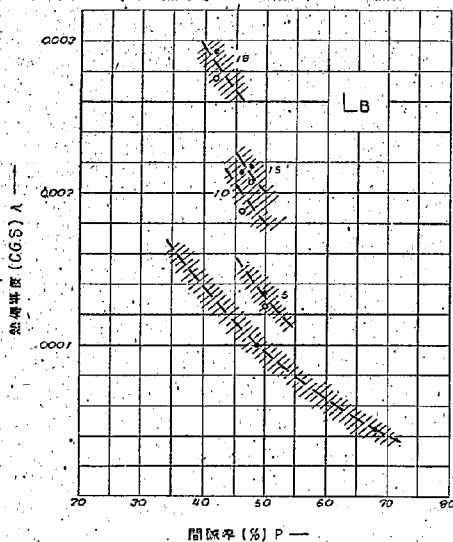
表-13 L_B 温度傳導率 k^2 及び熱傳導度 λ 表

番 號	含水量 %	溫度傳導率 k^2 (C.G.S.)	熱傳導度 λ (C.G.S.)
1	0	0.00172	0.000406
2	0	0.00203	0.000090
3	5	0.0030 ~ 0.00275	0.00135 ~ 0.00125
4	10	0.00336 ~ 0.00336	0.00215 ~ 0.00188
5	15	0.00355 ~ 0.0034	0.00217 ~ 0.00208
6	18	0.00415 ~ 0.00386	0.00295 ~ 0.00276

k^2 ~ 測定時間の關係をみるに其の移動初期に於て稍々、大なる値を示す傾向あるも略々一線と見做して取扱ふ、平均値をとり溫度傳導率 k^2 並に熱傳導度を算定する事 L_A の場合と同じ。

表-13 に此等の結果を取纏め示す。

此等の値と間隙率 P の關係を圖示するに圖-4 (a), (b) の如く、其の傾向は L_A の場合と類似してゐる。

5-圖 (a) 溫度傳導率 k^2 と空閑率 ($P-P'$) との關係圖-5 (b) 熱傳導度 λ と間隙率 P との關係

(3) O 試驗結果

供試體製作其他取扱ひ等は總て前回と同じ。先づ見掛け比重 ρ_a 、間隙率 P 、空閑率 $P-P'$ 、含水量等を一纏めとし表-14 に示す。

更に熱容量 $[W]$ は、土壤固體部比熱 $c=0.274 \text{ cal./gr.}$ を下式 $\rho_s C(1-P) + P \dots$ に代入し容易に計算し得、記號の説明は上述參照の事。表-15 に此等を示す。

表-14 O 供試體表

番 號	含水量 %	見掛け 比重 ρ_a	間隙率 P	空閑率 $P-P'$
1	0	0.955	0.353	0.65
2	0	1.20	0.446	0.54
3	5	1.46	0.545	0.069
4	10	1.57	0.585	0.144
5	15	1.48	0.545	0.19

但し見掛け比重 $\rho_t = 2.69$ 。
全加壓力 64 kg

表-15 熱 容 量 表

番 號	含 水 量 %	熱容量 [cal/cm ³]
1	0	0.256
2	0	0.337
3	5	0.449
4	10	0.478
5	15	0.43

温度伝導率 k^2 は前者に
 比し可成り大なる値を示す
 ものゝ如く、其の他の傾向
 には特に異なるもの無く、含
 水試料に於ては低温より高
 温に移動せる場合が約 10
 % 大なる値を示す事 λ_A の
 場合と似てゐる。此等の結
 果を 表—16 に示す。試料
 1, 2 號の室乾の場合、測定
 時間中の變動少きを以て平
 均値のみを記入した。

同表中斜線ある部分は實
 測に不備な點ありしもので

ある。温度率 k^2 及び熱傳導度 λ を算定するに下記 表—17 の如し。

 表—17. O 温度傳導率 k^2 及び熱傳導度 λ 表

番 號	含水率 %	温度傳導率 k^2 (C.G.S.)	熱傳導度 λ (C.G.S.)
1	0	0.00203	0.00052
2	0	0.0022	0.00074
3	5	0.0053 ~ 0.0047	0.0023 ~ 0.0021
4	10	0.00475 ~ 0.00390	0.00226 ~ 0.0019
5	15	0.00475 ~ 0.00420	0.0023 ~ 0.0020

此等の値と間隙率 P 及び空閑率 $(P-P')$ の關
 係をみるに、稍々理解し得ざる點あり。見掛比重
 及び混水法の不備の點に就いては後に更めて實驗
 を繰返す。即ち含水率 5, 10, 15% の場合のみ二三
 反覆した填充荷重も、90.4 kg と増大せるも 1, 2, 3
 層位にて平均密度順次増大し、未だ平衡狀態に達
 せず。但試體内一様とは判定し得ざるも第 3 層位
 の場合の値より平均密度 (ρ_a) を算定した。資料

表—18. O 再 試 驗 表

含水率%	5	10	15
填 充 重 (土+水 gr.)	304.5	325.6	334.3
土 gr. 水 gr.	280 14.5	296 29.6	291 43.5
填 充 容 量 c.c.	211	203	204.2
P %	6.8	14.2	21.3
P	49.7	47.3	45.8
P-P'	42.9	33.1	24.5
ρ_a	1.43	1.53	1.64

種類 表—18 の如し。

熱容量 $[W]$ は通常の如く $\rho_t C (1-P) + P'$ 式に、 $\rho_t = 2.69$; $C =$
 0.274 を代入各含水率のものに應じ求め得(表—19)。

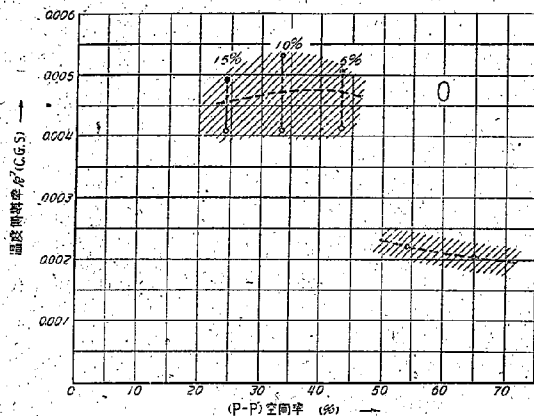
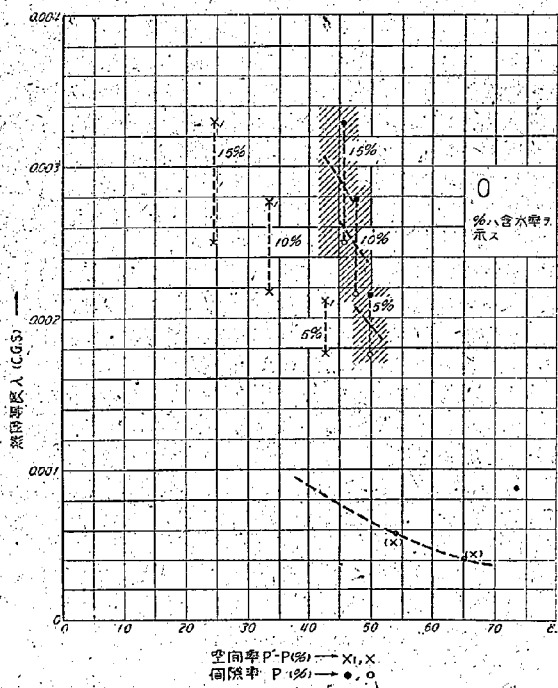
表—19 O 熱 容 量 表

含水率... (90.4 kg 壓縮)	5	10	15
$[W]$ g.cal/cm ³	0.421	0.529	0.612

實測されし温度傳導率 (k^2) は、低温より高温に移動せる場合大
 にて下表 (表—20) に兩者を示す。熱傳導度 $\lambda = k^2 [W]$ も容易に

 表—20 O 温度傳導率 k^2 及び熱傳導度 λ 表

含水率.....% 90.4 kg. 壓縮	5	10	15
温度傳導率 (k^2) C.G.S.	0.0051~0.0042	0.0053~0.0042	0.00493~0.0041
熱傳導度 (λ) C.G.S.	0.00215~0.00177	0.0023~0.00216	0.0033~0.00248

図-6 (a) 温度伝導率 k^2 と空隙率 $(P-P')$ との関係図-6 (b) 熱伝導率 k と空隙率 (P) との関係

求め得。表-20に此等の結果を取纏め記載す。

此等再試験のものと同乾資料によるものとの結果を取纏め、図-6 a, bの如き $k^2 \sim P$, $k \sim P$ 及び $k \sim (P-P')$ の関係を得。

(4) 赤土 試験結果

本実験に使用せしは關東ロームの一種にて赤土と通稱され、本章一節比重測定に用ひしものと類似せるも、同一地域のものでない二種を實驗に供した。即ちローム質と砂質ロームのもので真比重は夫々下記の如く異なるものである。

	真 比 重
ローム質	2.37
砂質ローム	2.61

供試體として室乾のもの、各種含有水量のものを作る。充分に一様に混和せる土塊を木片にて容器に詰込みしもので重量關係よりする土塊構成の土塊固體部、水、空間部の容積關係を求む。實驗方法は黄土の場合と全く同様である。

表-21, 22に此等の關係と實測されし平均温度伝導率 k^2 の値を記入す。温度伝導率は $\theta_c = 20^\circ\text{C} \sim \theta_h = 35^\circ\text{C}$ 程度の範圍のものであるが、實驗の誤差範圍内で前者は全く一定と見做し得るも後者に於ては黄土の場合の如き傾向をとる。

兩表を比較するに砂質ロームの方が温度伝導率の著しく大なる事分かる。此等の結果を圖示すれば一層其の傾向を明かに知り得。圖-7, 8中數字は含水量%を示し、數字無き

表-21 赤土(ローム質)温度傳導率 k^2 表(1)

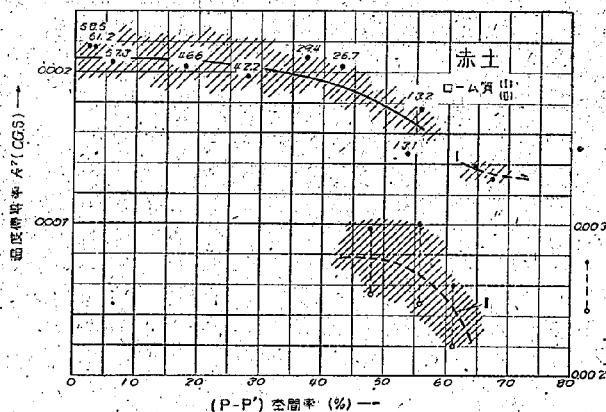
容 積 比%			温度傳導率 k^2 (C.G.S.)
土	水	空 隙	
35.4	46.6	18.0	0.00204
35.6	61.2	3.2	0.00217
38.8	29.4	38.8	0.00210
33.4	13.1	53.5	0.00147
30.0	42.2	27.8	0.00198
30.4	26.7	42.9	0.00203
31.6	13.2	55.2	0.00178
35.4	—	64.6	0.00189
34.8	—	65.2	0.00189
32.7	—	67.3	0.00180
39.0	58.5	2.5	0.00217
33.8	63.4	3.3	0.00205
36.2	57.3	6.5	0.00208

 表-22 赤土(砂質ローム)温度傳導率 k^2 表(2)

容 積 比%			温度傳導率 k^2 (C.G.S.)
土	水	空 隙	
64.4	19.0	16.7	0.00684
64.6	25.2	10.2	0.00673
64.6	26.8	9.6	0.00653
55.1	5.4	39.5	0.00410
61.9	25.5	12.6	0.00639
60.1	29.8	10.1	0.00596
57.0	18.1	24.9	0.00605
61.1	22.5	16.4	0.00617
55.5	10.2	34.3	0.00543
55.7	3.8	40.5	0.00274
53.8	—	46.2	0.00203
55.7	—	44.3	0.00210
59.8	—	40.2	0.00232
54.2	7.1	38.7	0.00482
54.1	15.5	30.4	0.00556

ものは風乾程度に乾燥せるものである。横軸に空間率をとる。

更に熱容量 $[W]$ 、並に熱傳導度 (λ) を算定せん。 $[W]$ は暫々述べし如く、 $\rho_s C(1-P) + P \dots$ 式にて算定する。も比熱 C には既に本章1節に於て得たる値 0.44 cal./gr. を代入す。砂質赤土の眞比重は比重測定に使用せしものの眞比重と可成り異なるを以てローム質赤土の場合のみの計算を行ふ。其の結果は表-23の如し。

 圖-7 赤土(ローム質)温度傳導率 k^2 ~空間率 關係


IV. 温度傳導率及び熱傳導度に及ぼす間隙率及び含水量の影響に就いて

上記の實驗結果を通覧するに、黄土等土壌の熱的特性特に熱傳導度、並に温度傳導率に關し組成母岩鑛物の差異によるも、土壌の機械的組成即ち粒度の分布状態によるものとして其の性状を考察するが利用上の立場より便宜多き様なれども、元來現今土木界で一般に使用されてゐる粘土（粒徑 0.005~0 mm）、沈泥（0.07~0.005mm）、砂粒（2.36~0.07 mm）の三分類に無批判による事は注意すべき事と考ふ。本報告には斯かる組織的考察は一切避け、單に結果を取纏める事とする。

一方水の熱傳導度 $\lambda = 0.001358 (1 + 0.0020 t)$ cal./cm. sec. °C、水の場合は測定値一定ならざるも水の場合の 4 倍前後の値を有す。空氣其のものゝ値小なれば土壌の熱傳度從つて熱的特性は含有せる水分並に其の含有狀況により著しく影響を蒙る。

一般に土壌の組織を最も簡單に考ふに固相液相氣相の組合せる分散系で其の詳細を知る事は頗る困難である。土壌の收縮、膨脹氷結特性等多くの問題も關聯してゐる。從つて熱傳導度、温度傳導率の上述の意味に於ける組織との關係を考察するも極めて皮相な考察に止まるものであるが、通常使用されてゐる間隙率（porosity）の定義による數値並に類似の考察により定義される氣相（空氣部）の總容積との比、即ち空間率（true porosity）の値と對比し種々論じ其の特性を考察し得。本報告に於て（水及び空隙の影響と云ふも）總て斯かる立場に立ち考察せるものである。其等の關係に就いての考察原理としては、總にコンクリートの熱的性質に關する研究に於てセメントペーストに關する研究の場合のものを援用する。セメントペーストの場合其の組織は本試驗のものに比し頗る單純なる如く推測さる。實驗結果も斯かる事實を裏書きしてゐる。先づ風乾土による實驗結果よりして温度傳導率 k ~ 空間率及び熱傳導度 λ ~ 空間率（ ϕ 、セメントペーストの試驗の場合には空隙率と稱した）の關係を求め、空隙零の状態に於ける値を推定しをく事により所謂固相の値を求め得る如きも資料數僅少にて斯くの如き値を求む事困難なるも、4-b, 5-l, 6-b, 及び 9-a 圖等に示す k - ϕ 傾向より空間率 60% 及び 70% に對照する λ -値を比較の爲め求め表-25 に掲ぐ。定量的に空間率（含有率零なる爲め空隙率と同じ）との關係を求め得ざるも、傾向はセメントペーストの場合に於けるものと類似の k^2 - ϕ , λ - ϕ 關係をとる様である。

表-25. 風乾土の温度傳導率 (k^2) 及び熱傳導度 (λ) の比較表

k^2 : (cm ² sec. ⁻¹)					
種 別	L_A	L_B	O	赤 土	砂混り赤土
間隙率%					
60	0.0020	0.00175	0.00215	0.00142	0.0012
70	0.00170	0.00160	0.00195	0.0013	(P: 60%)

λ : (cal. cm ⁻¹ sec. ⁻¹ °C ⁻¹)				
種 別	L_A	L_B	O	赤 土
間隙率%				
60	0.00050	0.00085	0.0008	0.00075
70	0.00035	0.0004	0.0004	0.00038

一般に天然に存在せる場合間隙率としては 50~60% 前後のもの多きものなれば、濕潤状態ならず乾燥せる場合に於ける土壌の温度傳導率 (k^2) 及び熱傳導度 (λ) のは略上記の値をとるものと了解し得、即ち乾燥せる状態

にて上記の程度の間隙に保ち得る時は一般材料に比較し保温度も大なる分類に属す様である。實際問題として壁體等の場合は大氣中の濕氣に對する吸濕性如何により其保溫能力が左右さる。

今溫度傳導率 k , 熱傳導度 λ , の大さの順位に列挙すれば

k^2 値;

O, I_A , I_B , 赤土

λ 値;

O, 赤土, I_B , I_A ,

熱容量値;

赤土, O, I_A , I_B .

の如くなるも特に著しき差異は無し。參考の爲め二三他の物質との値を比較す。(表-26)

表-26 風乾土壤の溫度傳導率及び熱傳導度

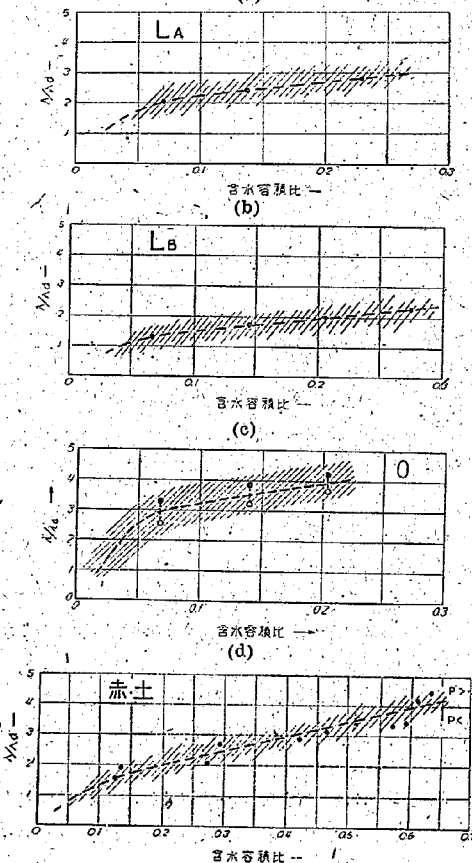
種 別	k^2 (C.G.S.)	λ (C.G.S.)
風 乾 土 間 隙 率 60% 黄 土 I_A	0.0020	0.00059
風 乾 土 間 隙 率 60% 黄 土 I_B	0.00175	0.00065
風 乾 土 間 隙 率 60% 黄 土 O	0.00215	0.0008
風 乾 土 間 隙 率 60% 赤 土	0.00142	0.00075
コンクリート, 乾燥 1:3:7, $w/c=0.8$	0.0098	0.00477
モルタル, 乾燥 1:3, $w/c=0.8$	0.0062	0.00269
	λ kcal/m.hr. $^{\circ}$ C	λ C.G.S.
玉 川 土	0.665	0.00185
埼 玉 土	東京工業大學學報所載 (本邦壘土)	0.522
海 土	0.288	0.00082
雪	田口澁雄著 "雪" 所載	積雪密度 0.18 0.24 積雪深さ 10-20cm. 20-30cm.
		0.00028 0.00045 0.00045 0.00075
		岡田氏 藤原, 宮澤氏
氷	理科年表	1.9-1.8
氷	披山氏公式	t ; 溫度 $^{\circ}$ C
		0.001358 (1+0.0020 t)
コルク板	若杉松三郎著 "保温材の理論及び	0.049-0.053
松	實際" 所載	0.121
アスベスト板		0.112-0.139

但し λ (kcal/m.hr. $^{\circ}$ C) = λ (C.G.S.) $\times 10^2 \times 3.6$

表-26 に示す如く風乾程度に乾燥せる場合は土壌の熱伝導率、及び温度伝導率は可成り少く、保温材としての性能をも有すと見做し得。例へば温氣の浸入を防止せる壁體等に有効に其の特性を發揮する。表-25 の數字並に 4-a, 5-b, 6-c, 及び 9-圖等に示せる曲線より與へられた熱的條件に應じた壁體の厚み等を推定し得。

含水の影響 其の傾向は各試料の實驗結果を記述せし箇々々圖示した。元來含水の影響は試料作成に際しても複雑にて上記温度伝導率、及び熱伝導率に及ぼす影響も總に筆者の試験せしセメントペーストの場合の如く數量的には簡單ならざる傾向を示してゐる。温度伝導率 (k^2) 關係に於ては、 k^2 ~空隙率 ($P-P'$) 關係を圖示し、熱伝導率關係に於ては、 k ~空隙率 (P) 關係を圖示した。其の理由は別に重要なものでもないが、試料の P 値及び k^2 値に含水の場合々々接近せる値をとり、 k^2 ~($P-P'$) 關係の方が傾向を考察するに便宜が多い。 k ~ P 關係は理論的考察上必要と考へた。O の場合には k ~($P-P'$) 關係をも圖示してをいた。 k ~ P 關係はセメントペーストの熱伝導率試験の場合の考察原理を満足せる如き傾向を示してゐる。特に L_A , L_B 試料の結果は可成り整

圖-10 土壌乾燥熱傳導比 (k/k_d) と含水容積比との關係を示す



然と配置されてゐる。O 試料の結果は前者に比較し稍々低調なるも類似の傾向をとる。

要するに含水による影響を數量的に可成りの精度まで明かにする事は試料數不足の爲め現在に於ては不可能である。此等實驗結果より含水状態及び風乾土の熱傳導率 k_d の比を算定し含水量の容積と、土の總熱との比即ち含水容積比との關係を求め、圖示するに圖-10 (a, b, c, d) の如き 4 者共に類似の傾向を有する曲線を得。

試料 L_A , L_B , O の場合は空隙率 (P) 各々類似の値をとり大差無きも赤土の場合に於ては空隙率 (P) は可成の範圍に變動してゐる。a~圖中にて $P > c$ と圖示せるは同一程度の含水にても詰め込み状況により空隙率の大小なりし範圍を示す。

圖-10によるに本試験に於ける如き方法にて作成せる資料に就ては、含水による熱傳導率の増加は約2~3倍程度で赤土の場合の如きは含水容積比0.6~0.7程度に至らしめた時約5倍に近き増加を示した。 k/k_d の増加傾向はセメントペーストの場合と異り、土壌を組織せる組成が最初熱傳導率値より見て急變するものと見做し、然る後單に空隙の含水影響による増加に起るものと解釋すれば一應 k/k_d ~含水容積比の傾向を理解し得。最初の急變部は土壌コロイド組成の膨潤による。其の關係は

重要なるものなれども茲には深く論究する資料無く別の機会にこれを譲るも上述の如く含水にする影響は之を窺ひ知り得。

要 約

壁體材料其の他保溫の利用價值を判別せん爲め、又は地盤永續深度等一般土壤の熱的特性を明かにせん爲め黄土3種關東赤土1種計4種の土壤に就き風乾並に含水狀態に於て溫度傳導度及び熱傳導度を實測し、此等の數値と他種類似の物質とを比較した。(土壤の組成等母岩の種別による考察は爲さず)。土性としては主として間隙率含水量の影響を明かにせるもので、斯かる見地より二三の重要なる結果を得。本報告結果を要約すれば下記の如し。

(1) 黄土3種、及び關東赤土の風乾狀態並に含水狀態に於ける熱性特性に關する實驗である。

(2) 資料土壤の土性、例へば眞比重、液性限界、可塑性限界、收縮限界、速力含水率等量、水素イオン濃度等を測定し表示し其の差異を考察す。例へば下記の如し。

	黄 土 系	赤 土
眞 比 重	2.6~2.7	2.4
P_H	7.6~8.5	5.5

其の他本文

(3) 比熱として $20^{\circ}\text{C} \sim 90^{\circ}\text{C}$ の平均値を求む。關東赤土(ローム質)最大にて大小順位に記載すれば下記の如し。

試 料 名	標 準 砂	O	I_A	I_B	赤土(ローム質)
比 熱 cal/gr:	0.202	0.274	0.281	0.289	0.44

(4) 溫度傳導率 (k^2) 測定には恒溫水槽による過渡法を使用し、試料は加壓填塞法により作成す。

(5) 乾燥狀態としては充分風乾せるものに就き二様の間隙率狀況に於て實驗す。尚含水狀態としては重量比 5, 10, 15% 含水せるものを標準とした。

(6) 各試料の熱容量は $\rho_s C(1-P) + P \dots$ 式により算定す。但し ρ_s = 眞比重, C = 比熱, P = 間隙率, P' = 含水容積。

(7) 各試料に就き間隙率 P , 含水容積 P' , 並に空閑率 $P - P'$ を算定す。

(8) 測定せる溫度傳導率 (k^2) に關して二三著しき特性がある。即ち、

風乾狀態のものにては實驗中(溫度範圍 $20 \sim 40^{\circ}\text{C}$) 略々一定である。然るに含水狀態に於ては含水量の大小試料の種別により溫度移動方向により異り、低温 (θ_0) より高温に移せる場合 k^2 は 20% 前後も大きく測定された。

本實驗は又常に溫度移動を低温 $\rightarrow$ 高温, 高温 $\rightarrow$ 低温の如く行へるを以て一應移動單位をも考察する必要があるも、含水せる土壤内の熱の移動が單に純粋な熱傳導のみに非らざる事を示す。又斯かる特性は資料 O, I_A , I_B と粘土質の増加せる程増々減少の度を示してゐる。

(9) 風乾試料の溫度傳導率 (k^2) 及び熱傳導度 (k) と間隙率 (P) の關係は、一般氣體氣相分散系の傾向をとり斯かる考察原理を適用し得る事を示す。 $P = 0.60$ に對する此等の値を他の類似物質の値と比較するも可成の程

度の保温乃至遮熱能力ある事を知る。本試料のもののみ記載す。

風乾土壤の温度傳導率 (k^2) 及熱傳導度 (λ)

種 別	k^2 (C.G.S.)	λ (C.G.S.)
L_A , $P = 0.6$	0.0020	0.00059
L_B , $P = 0.6$	0.00175	0.00065
O , $P = 0.6$	0.00215	0.0008
赤土, $P = 0.6$	0.00142	0.00075

(10) 含水の影響は熱傳導度 (λ)—間隙率 (P) の關係圖に示す如く、含水量 5%, 10%, 16%...と増大するに伴ひ増加するも容積比に直線的に増加せず土壤特有の傾向をとるも、其の量的關係は λ/λ_d —含水容積比の關係よりして其の増加の程度及び増加傾向を窺ひ知り得。即ち黄土系のは含水容積比 (P' と同値) は 0.3 以下にて λ/λ_d も 2—3 倍に達し、赤土 (ローム質) では含水容積比 0.6—0.7 にも達し、且つ λ/λ_d は 5 倍にも達した。且 λ/λ_d の傾向は O , L_A , L_B , 赤土 (ローム質) と移轉してゐる。

斯くの如く含水により熱傳導度 (λ) の増大する事を明にした。

(11) 温度傳導率 (k^2)—空隙率 ($P-P'$) 關係を見るに風乾状態の場合と全く異なる曲線で示し得るも、4 種の場合全く類似の傾向をとる。本實驗では温度傳導率 (k^2) より熱傳導度 (λ) を算定せるも逆算により温度傳導率 (k^2) を與へられた間隙率含水容積比 (含水量より算定し得) の土壤に對し求め得。

通常人工的に作成又は天然に存在せる狀況に於ける空隙率含水量に對する温度傳導率 (k^2) は下記の如きものである。

種 別	k^2 (C.G.S.)	
	含 水 状 態	風 乾 状 態
L_A	0.005—0.004	0.002—0.0013
L_B	0.004—0.0028	0.002—0.0017
O	0.0045—	0.0023—0.0021
赤 土 (ローム質)	0.0021—0.0017	0.0014—0.0013
赤 土 (砂 質)	0.0065—0.0046	0.0024—0.0018

以上の如く本報告は資料とし 4 種の土壤をとり材料學的の立場に立ち實驗を行ひ、此種土壤の熱的特性は如何なる要素により如何なる影響を蒙るやを實驗的に考察せるもので、豈に其の他遮熱的に利用する場合及び凍結深度推定等に於ける基本的數値を得たるものである。

資料數僅少にて綜合的諸種の視野より性状を論究し得ざりしも、土壤物質の熱的特性の傾向を明にしたものである。

本研究に當り日本學術振興會第 16 委員會 (現地材料利用に關する) 並に同委員藤井博士の御援助に俟つ所多し録して感謝の意を表す。