土木試驗所報告

第六十五號

勢力式に依る變斷面桁の固有振
動數を求むる計算法……內務技師 村上永一…(1)

天然凝結材に關する調査並びに試驗……內務技手 松本榮…(15)
（鹿兒島縣）

二層張り鋪板の載荷試驗並に之に
基く下層板の有效幅計算基準……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……內務技手 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……內務技師 島山八郎…(69)

昭和十七年三月

內務省土木試驗所

土木試驗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	敬 桁	鈑 桁

著者 村上永一

頁	行	誤	正
表 紙	上より 10	(51)	(61)
63	〃 12	……	……(1)
65	〃 23	$\varphi(u)\sqrt{\frac{1}{\pi}}\ he^{-h^2u^2}$	$\varphi(u)=\sqrt{\frac{1}{\pi}}\ he^{-h^2u^2}$

著者 八木龍助

頁	行	誤	正
1	下より 4	……する影響を明かにする	……よる……明かにする…
1	下より 14	…られた事…	…られる事…
5	上より 14	破 壊	破 壞
19	下より 2	16 委員會	33 委員會

著者 島田八郎

勢力式に依る變斷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斷面二次率が，桁端に向ふに從つて一次的或は二次的に減少する様な實際的な變斷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横振動の解法 …… (2)
Ⅲ．斷面二次率が變化する桁の固有横振動數の算定法 …… (4)
〔1〕 斷面二次率が一次的に變化する場合 …… (5)
〔2〕 斷面二次率が二次的に變化する場合 …… (8)
Ⅳ．斷面二次率が變化すの曲げモーメントのみに依る固有横振動數の計算 …… (10)
〔1〕 斷面二次率が一次的に變化する場合 …… (10)
〔2〕 斷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撃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．然るに之の衝撃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走行荷重に基く强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强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．即ち强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雜な構造物であるが，多くの大膽なる假定すれば斷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强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．即ち斷面二次率の一定なる桁としなければならぬ．玆に斷面二次率の變化する桁と振動學的に等値である一定斷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斷面二次率桁は固有振動數の等しい桁であらねばならぬ．依つて變斷面二次桁の固有

振動數を求めることがその第一歩として必要となつた.

玆に述べる變斷桁の固有振動數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撓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限なく近づきうるが，勢力式に依る解は飽く迄近似解たるの性質を失はない.

然し適當なる函數を選ぶことにより案外容易に嚴密解に近きうることは，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數の解法

振動する桁の撓は，桁が正規型振動を行ふときは時間的に正弦式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 のみの函數であり，振動中の各點の最大の撓を與へる. 但し ω は圓振動數であるから，1 秒間の振動數は $\frac{\omega}{2\pi}$ 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) 垂直撓振動に依る運動の勢力. (4) 回轉運動の勢力.

この內 (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. 然し構橋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來る.

桁の振動の撓の內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.

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

E: 材料の彈性係數.

$I_{(x)}$: 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.

$$A_2=\int_{-l}^{+l}\alpha\frac{S^2_{(x)}}{2GA_{(x)}}dx \quad\cdots\cdots(2)_1$$

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

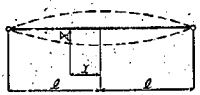
$S_{(x)}$: x 點の剪斷力.

τ: 剪斷應力.

$A_{(x)}$: x 點の斷面積.

G: 剪斷彈性係數.

圖-1



剪斷應力と剪斷歪との間には次の式が成立する.

$$\frac{d\xi}{dx}=\frac{1}{S_{(x)}G}\int_{(A)}\tau^2dA \quad\cdots\cdots(2)_2$$

剪斷力と剪斷歪との間には次の式が成立す.

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

この兩式を $(2)_1$ に使用すれば

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

桁の微小部分の縱方向の直線運動に對する微分方程式は

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

$(2)_2$, $(2)_5$ より

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

$y=X\cos\omega t$ なるにより,

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

m: 桁の單位當りの荷重, この場合常數とす.

g: 重力加速度.

$\dfrac{1}{k_{(x)}A_{(x)}G}=\beta_{(x)}$ とすれば

$(2)_4$ は

$$A_2=\int_{-l}^{+l}\frac{1}{2\beta_{(x)}}\left(\frac{d\zeta}{dx}\right)^2dx \quad \cdots\cdots(2)$$

$(2)_7$ は

$$\frac{d\zeta}{dx}=-\frac{m}{g}\beta_{(x)}\omega^2\int_0^x Xdx \quad \cdots\cdots(3)$$

3. 垂直振振動に依る運動の勢力.

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

4. 振動に依る回轉運動の勢力.

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

$i_{(x)}$: 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 $\dfrac{d\zeta}{dx}$ は $\dfrac{dx}{dx}$ に對して無視し得る.

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

振動する桁の總勢力は

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

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

振動する系はその總勢力が極小なる様に振動する．今振動撓型に $X=a_1f_1(x)$ なる函數を與ふれば，(3) の關係式より $\frac{d\zeta}{dx}$ も決まり總勢力を求められる．總勢力極小なる條件より

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

未知數として 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數を與ふ．

而して $f_1(x)$ が實際の振動撓型と一致したものであるならば，斯くして求め得た ω は眞の振動數を與へる．$f_1(x)$ が實際の振動撓型と一致しない場合には振動の總勢力は常に實際の總勢力より大きくなり，振動數は實際のものより大きく出る．即ち振動撓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．然るに彈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撓型に與へねばならぬ．然し適當なる函數（眞の振動撓型に早く收斂するもの）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．

$$x=a_1f_1(x)+a_2f_2(x)+a_3f_3(x)+\cdots\cdots$$

と假定し，總勢力 A を計算し

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

より n 個の聯立方程式を得る．これより $a_1a_2a_3\cdots\cdots$ 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撓型は，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

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

とおきうる．この振動撓型は單桁としての境界條件を滿足する．

兩支點で撓は零　　$(X)_{x=\pm l}=0$

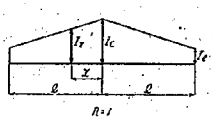
兩支點で曲げモーメントが零　　$\left(\frac{d^2x}{dx^2}\right)_{x=\pm l}=0$

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，剪斷剛性及斷面の回轉半徑の影響は全體として小さく，而も鈑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



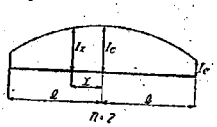


圖-2 の如く坐標を取れば

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

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: 桁端の斷面二次率

n: 1 又は 2

$1-\frac{I_l}{I_e}=\alpha$ とおけば

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

依つて振動の總勢力は次の如くなる.

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

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

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

[1] 斷面二次率が一次的に變化する場合

(8)……より

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

(7)……より

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

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

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

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

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

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

$$=EI_e\int_0^{+l}\left(1-\alpha\frac{x}{l}\right)\left[\left\{\left(\frac{\pi^2}{4l^2}-\frac{m}{g}\beta\omega^2\right)\right\}a_1\cos\frac{\pi x}{2l}\right.$$

$$\left.\left.+\left(3^2\frac{\pi^2}{4l^2}-\frac{m}{g}\beta\omega^2\right)a_3\cos\frac{3\pi x}{2l}+\left(5^2\frac{\pi^2}{4l^2}-\frac{m}{g}\beta\omega^2\right)a_5\cos\frac{5\pi x}{2l}\right\}+\cdots\cdots\right]^2dx$$

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

$$A_1=EI_b\int_0^{+l}\left(1-\alpha\frac{x}{l}\right)\left(B_1a_1\cos\frac{\pi x}{2l}+B_3a_3\cos\frac{3\pi x}{2l}+B_5a_5\cos\frac{5\pi}{2l}+\cdots\cdots\right)^2dx$$

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

$$=\frac{m^2}{g^2}\beta\omega^4\int_0^l\left(\frac{2l}{\pi}a_1\sin\frac{\pi x}{2l}+\frac{2l}{3\pi}a_3\sin\frac{3\pi x}{2l}+\frac{2l}{5\pi}a_5\sin\frac{5\pi x}{2l}+\cdots\cdots\right)^2dx$$

$$A_3=-\frac{m}{2g}\omega^2\int_{-l}^{+l}X^2dx$$

$$=-\frac{m}{g}\omega^2\int_0^{+l}\left(a_1\cos\frac{\pi x}{2l}+a_3\cos\frac{3\pi x}{2l}+a_5\cos\frac{5\pi x}{2l}+\cdots\cdots\right)^2dx$$

$$A_4=-\frac{\omega^2m}{2g}\int_{-l}^{+l}i^2\left(\frac{dX}{dx}\right)^2dx$$

$$=-\omega^2\frac{m}{g}i^2\int_0^{+l}\left(\frac{\pi}{2l}a_1\sin\frac{\pi x}{2l}+\frac{3\pi}{2l}a_2\sin\frac{3\pi}{2l}+\cdots\cdots\right)^2dx$$

$$\frac{\partial A}{\partial a_n}=2EI_c\int_0^l\left\{B_nB_1a_1\left(\cos\frac{n\pi x}{2l}\cos\frac{\pi x}{2l}-\frac{\alpha}{l}x\cos\frac{n\pi x}{2l}\cos\frac{\pi x}{2l}\right)+B_nB_3a_3\left(\cos\frac{n\pi x}{2l}\cos\frac{3\pi x}{2l}\right.\right.$$

$$\left.-\frac{\alpha}{l}x\cos\frac{n\pi x}{2l}\cos\frac{3nx}{2l}\right)+B_nB_5a_5\left(\cos\frac{n\pi x}{2l}\cos\frac{5nx}{2l}-\frac{\alpha}{l}x\cos\frac{n\pi x}{2l}\cos\frac{3\pi x}{2l}\right)+\cdots\cdots\left.\right\}dx$$

$$+2\frac{m^2}{g^2}\omega^4\beta\int_0^l\left(\frac{2l}{n\pi}\cdot\frac{2l}{\pi}a_1\sin\frac{n\pi x}{2l}\sin\frac{\pi x}{2l}+\frac{2l}{n\pi}\cdot\frac{2l}{3\pi}a_5\sin\frac{n\pi x}{2l}\sin\frac{3\pi x}{2l}\right.$$

$$\left.+\frac{2l}{n\pi}\cdot\frac{2l}{5\pi}a_5\sin\frac{n\pi x}{2l}\sin\frac{5\pi x}{2l}+\cdots\cdots\right)dx-2\frac{m}{g}\omega^2\int_0^l\left(a_1\cos\frac{n\pi x}{2l}\cdot\cos\frac{\pi x}{2l}+a_3\cos\frac{n\pi x}{2l}\cos\frac{3\pi n}{2l}\right.$$

$$\left.+a_5\cos\frac{n\pi x}{2l}\cos\frac{5\pi x}{2l}+\cdots\cdots\right)dx-2\frac{m}{g}i^2\omega^2\int_0^l\left(\frac{n\pi}{2l}\cdot\frac{\pi}{2l}a_1\sin\frac{n\pi x}{2l}\sin\frac{\pi x}{2l}\right.$$

$$\left.+\frac{n\pi}{2l}\cdot\frac{3\pi}{2l}a_3\sin\frac{n\pi x}{2l}\sin\frac{3\pi x}{2l}+\cdots\cdots\right)dx\quad\cdots\cdots(9)$$

玆に於て

$$\int_0^l\cos\frac{n\pi x}{2l}\cos\frac{n\pi x}{2l}dx=\int_0^l\sin\frac{n\pi x}{2l}\cos\frac{n\pi x}{2l}dx=\frac{1}{2}\left[x+\frac{l}{2n\pi}\sin\frac{n\pi x}{l}\right]_0^l=\frac{l}{2}$$

$$\int_0^l\cos\frac{m\pi x}{2l}\cos\frac{n\pi x}{2l}dx=\int_0^l\sin\frac{m\pi x}{2l}\cos\frac{n\pi x}{2l}dx=0\qquad\text{但し}\quad m\neq n$$

$$\int_0^l x\cos\frac{n\pi x}{2l}\cos\frac{n\pi x}{2l}dx=\left[\frac{x^2}{4}+\frac{1}{2}x\frac{l}{n\pi}\sin\frac{n\pi x}{l}+\frac{1}{2}\frac{l^2}{n^2\pi^2}\cos\frac{n\pi x}{l}\right]_0^l=\frac{l^2}{4}-\frac{l^2}{(n\pi)^2}$$

$$\int_0^l x\cos\frac{m\pi x}{2l}\cos\frac{n\pi x}{2l}dx=\left[\frac{x}{2}\cdot\frac{2l}{(m-n)\pi}\sin\frac{(m-n)\pi x}{2l}+\frac{xl}{(m+n)\pi}\sin\frac{(m+n)nx}{2l}\right.$$

$$\left.+\frac{1}{2}\left\{\frac{2l}{(m-n)\pi}\right\}^2\cos\frac{(m-n)\pi x}{2l}+\frac{1}{2}\left\{\frac{2l}{(m-n)\pi}\right\}^2\cos\frac{(m+n)\pi x}{2l}\right]_0^l$$

$\frac{m-n}{2}$ が奇數なれば，$\frac{m+n}{2}$ は偶數となり，

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

$\frac{m-n}{2}$ が偶數なれば，$\frac{m+n}{2}$ は奇數となり，

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

を利用すれば

$$\frac{\partial A}{\partial a_1}=2EI_c\left[B_1^2a_1\left\{\frac{l}{2}-\frac{\alpha}{l}\left(\frac{l^2}{4}-\frac{l^2}{\pi^2}\right)\right\}+B_1B_3a_3\frac{\alpha}{l}\frac{l^2}{\pi^2}+B_1B_5a_5\frac{\alpha}{l}\frac{l^2}{3^2\pi^2}+\cdots\cdots\right]$$

$$+\frac{2}{g}\frac{m^2}{g^2}\beta\omega^4\frac{4l^2}{\pi^2}\cdot\frac{l}{2}a_1-2\frac{m}{g}\omega^2\frac{l}{2}a_1-2\omega^2\frac{m}{g}i^2\left(\frac{\pi}{2l}\right)^2\frac{l}{2}a_1=0$$

$$\left\{EI_cB_1^2\left(1-\frac{\alpha}{2}+\frac{2\alpha}{\pi^2}\right)+\frac{m^2}{g^2}\beta\frac{4l^2}{\pi^2}\omega^4-\frac{m}{g}i^2\frac{\pi^2}{4l^2}\omega^2-\frac{m}{g}\omega^2\right\}a_1+B_1B_3\frac{2\alpha}{\pi^2}a_3$$

$$+B_1B_5\frac{2\alpha}{3^2\pi^2}a_5+B_1B_7\frac{2\alpha}{3^2\pi^2}a_7+\cdots\cdots=0 \quad\cdots\cdots(10)$$

同樣に

$$\frac{\partial A}{\partial a_3}=0 \quad \text{より}$$

$$B_3B_1\frac{2\alpha}{\pi^2}a_1+\left\{EI_cB_3^2\left(1-\frac{\alpha}{2}+\frac{2\alpha}{3^2\pi^2}\right)+\frac{w^2}{g^2}\beta\frac{4l}{3^2\pi^2}\omega^4-\frac{m}{g}i^2\frac{3^2\pi^2}{4l^2}\omega^2-\frac{m}{g}\omega^2\right\}a_3$$

$$+B_3B_5\frac{2\alpha}{\pi^2}a_5+B_3B_7\frac{2\alpha}{5^2\pi^2}a_7+\cdots\cdots=0 \quad\cdots\cdots(11)$$

$$\frac{\partial A}{2a_5}=0 \quad \text{より},$$

$$B_5B_1\frac{2\alpha}{3^2\pi^2}a_1+B_5B_3\frac{2\alpha}{\pi^2}a_3+\left\{EI_cB_5^2\left(1-\frac{\alpha}{2}+\frac{2\alpha}{5^2\pi^2}\right)+\frac{m^2}{g^2}\beta\frac{4l^2}{5^2\pi^2}\omega^4-\frac{m}{g}i^2\frac{5^2\pi^2}{4l^2}\omega^2\right.$$

$$\left.-\frac{m}{g}\omega^2\right\}a_5+B_5B_7\frac{2\alpha}{a}+\cdots\cdots=0 \quad\cdots\cdots(12)$$

$$\frac{2\partial}{2a_7}=0 \quad \text{より}$$

$$B_7B_1\frac{2\alpha}{3^2\pi^2}a_1+B_7B_3\frac{2\alpha}{3^2\pi^2}a_3+B_7B_5\frac{2\alpha}{\pi^2}a_5+\left\{EI_cB_7^2\left(1-\frac{\alpha}{2}+\frac{2\alpha}{7^2\pi^2}\right)+\frac{m^2}{g^2}\beta\frac{4l^2}{7^2\pi^2}\omega^4\right.$$

$$\left.-\frac{m}{g}i^2\frac{7^2\pi^2}{4l^2}\omega^2-\frac{m}{g}\omega^2\right\}a_7+\cdots\cdots=0 \quad\cdots\cdots(13)$$

上式より a_1 a_3 a_5 a_7…… を消去すれば

$$\begin{vmatrix} \Delta_{11} & B_1B_3\frac{2\alpha}{\pi^2} & B_1B_5\frac{2\alpha}{3^2\pi^2} & B_1B_7\frac{2n}{3^2\pi^2} & \cdots\cdots \\ B_3B_1\frac{2\alpha}{\pi^2} & \Delta_{33} & B^3B_5\frac{2\alpha}{\pi^2} & B_3B_7\frac{2\pi}{5^2\pi^2} & \cdots\cdots \\ B_5B_1\frac{2\alpha}{3^2\pi^2} & B_5B_3\frac{2\alpha}{\pi^2} & \Delta_{55} & B_5B_7\frac{2\alpha}{\pi^2} & \cdots\cdots \\ B_7B_1\frac{2\alpha}{3^2\pi^2} & B_7B_3\frac{2\alpha}{5^2\pi^2} & B_7B_5\frac{2\alpha}{\pi^2} & \Delta_{77} & \cdots\cdots \\ \cdots\cdots & \cdots\cdots & \cdots\cdots & \cdots\cdots & \cdots\cdots \end{vmatrix}=0 \quad\cdots\cdots(14)$$

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

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

(14) 式は未知數として 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．この内小なる ω が第一次基本振動數を與へるものである．

斷面二次率が一定である桁の剪斷力，及回轉運動の影響を無視した場合の振動數は，(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，第一次基本圓振動數は $k=1$ 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圓振動數を與へる

[2] 斷面二次率が二次的に變化する場合

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

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

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

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

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

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

$$=EI_c\int_0^l\left\{1-\alpha\left(\frac{x}{l}\right)^2\right\}\left\{\left(\frac{\pi^2}{4l^2}-\frac{m}{g}\beta\omega^2\right)a_1\cos\frac{\pi x}{2l}+\left(3^2\frac{\pi^2}{4l^2}-\frac{m}{g}\beta\omega^2\right)a_3\cos\frac{3\pi x}{2l}\right.$$

$$\left.+\left(5^2\frac{\pi^2}{4l^2}-\frac{m}{g}\beta\omega^2\right)a_5\cos\frac{5\pi n}{2l}+\cdots\cdots\right\}^2dx$$

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

$$A_1=EI_c\int_{-0}^{+l}\left\{1-\alpha\left(\frac{x}{l}\right)^2\right\}\left(B_1a_1\cos\frac{\pi x}{2l}+B_3a_3\cos\frac{3\pi x}{2l}+B_5a_5\cos\frac{5\pi}{2l}+\cdots\cdots\right)^2dx$$

$$A_2=\frac{1}{2\beta}\int_{-l}^{+l}\left(\frac{-d\zeta}{dx}\right)^2dx=\frac{m^2}{g^2}\beta\omega^4\int_0^l\left(\frac{2l}{\pi}a_1\sin\frac{\pi x}{2l}+\frac{2l}{3\pi}a_3\sin\frac{3\pi x}{2l}+\cdots\cdots\right)^2dx$$

$$A_3=-\frac{m}{g}\omega^2\int_0^{+l}\left(a_1\cos\frac{\pi x}{2l}+a_3\cos\frac{3\pi n}{2l}+a_5\cos\frac{5nx}{2l}+\cdots\cdots\right)^2dx$$

$$A_4=-\frac{\omega^2mi^2}{g}\int_0^l\left(\frac{\pi}{2l}a_1\sin\frac{\pi n}{2l}+\frac{3\pi}{2l}a_3\sin\frac{3\pi}{2l}+\cdots\cdots\right)^2dx$$

$$\frac{\partial A}{\partial a_n}=2EI_c\int_0^l\left\{B_nB_1a_1\left(\cos\frac{n\pi x}{2l}\cos\frac{\pi x}{2l}-\alpha\left(\frac{x}{l}\right)^2\cos\frac{n\pi x}{2l}\cos\frac{\pi x}{2l}\right)\right.$$

$$+B_nB_3a_3\left(\cos\frac{n\pi x}{2l}\cos\frac{3\pi x}{2l}-\alpha\left(\frac{x}{l}\right)^2\cos\frac{n\pi x}{2l}\cos\frac{\pi x}{2l}\right)$$

$$+B_nB_5a_5\left(\cos\frac{n\pi x}{2l}\cos\frac{3\pi x}{2l}-\alpha\left(\frac{x}{l}\right)^2\cos\frac{n\pi x}{2l}\cos\frac{\pi x}{2l}\right)$$

$$+\cdots\cdots\Big\}dx+2\frac{m^2}{g^2}\omega^4\beta\int_0^l\Big(\frac{2l}{n\pi}\frac{2l}{\pi}a_1\sin\frac{n\pi x}{2l}\sin\frac{n\pi}{2l}+\frac{2l}{n\pi}\frac{2l}{3\pi}a_3\sin\frac{n\pi x}{2l}\sin\frac{3\pi x}{2l}$$

$$+\cdots\cdots\Big)dx-2\frac{m}{g}\omega^2\int_0^l\Big(a_1\cos\frac{n\pi x}{2l}\cos\frac{\pi x}{2l}+a_3\cos\frac{n\pi x}{2l}\cos\frac{3\pi x}{2l}$$

$$+a_5\cos\frac{n\pi x}{2l}\cos\frac{5\pi x}{2l}+\cdots\cdots\Big)dx-2\frac{m}{g}i^2\omega^2\int_0^l\Big(\frac{n\pi}{2l}\frac{\pi}{2l}\sin\frac{n\pi x}{2l}\sin\frac{\pi x}{2l}$$

$$+\frac{n\pi}{2l}\frac{3\pi}{2l}\sin\frac{n\pi x}{2l}\sin\frac{3\pi x}{2l}+\cdots\cdots\Big)dx\cdots\cdots(15)$$

玆に

$$\int_0^l\cos\frac{n\pi x}{2l}\cos\frac{n\pi x}{2l}=\int_0^l\sin\frac{n\pi n}{2l}\sin\frac{n\pi x}{2l}=\frac{l}{2}$$

$$\int_0^l\cos\frac{n\pi x}{2l}\cos\frac{m\pi x}{2l}=\int_0^l\sin\frac{n\pi x}{2l}\sin\frac{m\pi x}{2l}=0\quad\text{但し}\quad m\neq n$$

$$\int_0^l x^2\cos\frac{n\pi x}{2l}\cos\frac{n\pi x}{2l}=\frac{l^3}{6}+(-1)^n\frac{l^3}{(n\pi)^2}$$

$$\int_0^l x^2\cos\frac{m\pi x}{2l}\cos\frac{n\pi x}{2l}=(-1)^{\frac{m-n}{2}}\frac{l^3}{\left(\frac{m-n}{2}\pi\right)^2}+(-1)^{\frac{m+n}{2}}\frac{l^3}{\left(\frac{m+n}{2}\pi\right)^2}$$

を用ふれば

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

$$\left\{EI_cB_1^2\left(1-\frac{\alpha}{3}+\frac{2\alpha}{\pi^2}\right)+\frac{m^2}{g^2}\beta\frac{4l^2}{\pi^2}\omega^4-\frac{m}{g}i^2\frac{\pi^2}{4l^2}\omega^2-\frac{m}{g}\omega^2\right\}a_1+2B_1B_3\left(\frac{1}{\pi^2}-\frac{1}{2^2\pi^2}\right)\alpha a_3$$

$$+2B_1B_5\left(-\frac{1}{2^2\pi^2}+\frac{1}{3^2\pi}\right)\alpha a_5+2B_1B_7\left(\frac{1}{3^2\pi^2}-\frac{1}{4^2\pi^2}\right)\alpha a_7+\cdots\cdots=0\cdots\cdots(16)$$

$\frac{\partial A}{\partial a_3}=0$ より

$$2B_3B_1\left(\frac{1}{\pi^2}-\frac{1}{2^2\pi^2}\right)\alpha a_1+\left\{EI_cB_3^2\left(1-\frac{\alpha}{3}+\frac{2\alpha}{3^2\pi^2}\right)+\frac{m^2}{g^2}\beta\frac{4l^2}{3^2\pi^2}\omega^4-\frac{m}{g}i^2\frac{3^2\pi^2}{4l^2}-\frac{m}{g}\omega^2\right\}a_3$$

$$+2B_3B_5\left(\frac{1}{\pi^2}-\frac{1}{4^2\pi^2}\right)\alpha a_5+2B_3B_7\left(-\frac{1}{2^2\pi^2}+\frac{1}{5^2\pi^2}\right)\alpha a_7+\cdots\cdots=0\cdots\cdots(17)$$

$\frac{\partial A}{\partial a_5}=0$ より

$$2B_5B_1\left(-\frac{1}{2^2\pi^2}+\frac{1}{3^2\pi^2}\right)\alpha a_1+2B_5B_3\left(\frac{1}{\pi^2}-\frac{1}{4^2\pi^2}\right)\alpha a_3+\left\{EI_cB_5^2\left(1-\frac{\alpha}{3}+\frac{2\alpha}{5^2\pi^2}\right)\right.$$

$$\left.+\frac{m^3}{g^2}\beta\frac{4l^2}{5^2\pi^2}\omega^4-\frac{m}{g}i^2\frac{5^2\pi^2}{4l^2}\omega^2-\frac{m}{g}\omega^2\right\}a_5+2B_5B_7\left(\frac{1}{\pi^2}-\frac{1}{6^2\pi^2}\right)\alpha a_7+\cdots\cdots=0\cdots\cdots(18)$$

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

$$2B_7B_1\left(\frac{1}{3^2\pi^2}-\frac{1}{4^2\pi^2}\right)\alpha a_1+2B_7B_3\left(-\frac{1}{2^2\pi^2}+\frac{1}{5^2\pi^2}\right)\alpha a_3+2B_7B_5\left(\frac{1}{\pi^2}-\frac{1}{6^2\pi^2}\right)\alpha a_5+\left\{EI_cB_7^2\left(1-\frac{\alpha}{3}+\frac{2\alpha}{7^2\pi^2}\right)+\frac{m^2}{g^2}\beta\frac{4l^2}{7^2\pi^2}\omega^4-\frac{m}{g}i^2\frac{7^2\pi^2}{4l^2}\omega^2-\frac{m}{g}\omega^2\right\}a_7+\cdots\cdots=0 \quad \cdots\cdots(19)$$

上式より a_1 a_3 a_5 a_7…… を消去すれば

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

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

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

(20)式は未知數として 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數を與へる．

Ⅳ. 斷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數の計算

[1] 斷面二次率が一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．

$$\begin{vmatrix} 1-\frac{\alpha}{2}+\frac{2\alpha}{\pi^2}-k^2 & 2\cdot\frac{3^2}{\pi^2}\alpha & 2\cdot\frac{5^2}{3^2\pi^2}\alpha & 2\cdot\frac{7^2}{3^2\pi^2}\alpha\cdots\cdots \\ 2\cdot\frac{3^2}{\pi^2}\alpha & 3^4-\frac{3^4}{2}\alpha-\frac{2\cdot3^2}{\pi^2}\alpha-k^2 & 2\cdot\frac{5^2\cdot3^2}{\pi^2}\alpha & 2\cdot\frac{7^2\cdot3^2}{5^2\pi^2}\alpha\cdots\cdots \\ 2\cdot\frac{5^2}{3^2\pi^2}\alpha & 2\cdot\frac{5^2\cdot3^2}{\pi^2}\alpha & 5^4-\frac{5^4}{2}\alpha+\frac{2\cdot5^2}{\pi^2}-k^2 & 2\cdot\frac{7^2\cdot5^2}{\pi^2}\alpha\cdots\cdots \\ 2\cdot\frac{7^2}{3^2\pi^2}\alpha & 2\cdot\frac{7^2\cdot3^2}{5^2\pi}\alpha & 2\cdot\frac{7^2\cdot5^2}{\pi^2}\alpha & 7^4-\frac{7^4}{2}\alpha+\frac{2\cdot7^2}{\pi^2}-k^2\cdots \\ \cdots\cdots & \cdots\cdots & \cdots\cdots & \cdots\cdots \end{vmatrix}=0 \quad \cdots\cdots(21)$$

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

(21)式より k の値を求むれば，變斷面桁の固有振動數は

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

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斷面桁の振動の型に非常に近く，從つて (7) 式に依つて示される振動模型は項數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 に近づくに從つて (7) 式の收斂は遲くなり，嚴密解を得るには多くの項を取る必要がある.

玆に求めた近似解は，(7) の展開式の第 3 項迄を取つて計算した.

(21) 式の 3 項迄を取れば次の如く書き改められる.

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

從つて

$$k^6-c_1k^4+c_2k^2+c_3=0$$

の最小根を求むれば，右左對稱なる振動模型をなす第一次基振動數は (22) 式に依つて與へられる．$\alpha=0.1\sim1.0$ に就いて計算すれば表-1 の如し.

表—1

$\alpha=\frac{I_c-I_s}{I_c}$	A	B	C	D^2	E^2
0.1	0.970264	77.132278	594.256606	0.03322	0.003168
0.2	0.940528	73.264556	563.513212	0.132901	0.012674
0.3	0.910793	69.396834	532.769818	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	440.539636	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
83.154523	637.718297	41801.152922	38676.946611	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	28993.048180	23912.262676	0.9153
748.390105	499.155490	25120.388348	19789.055759	0.8947
1018.642087	464.514738	21445.708776	16049.259269	0.8722
1330.471298	430.404986	17969.246159	12678.016615	0.8473
1683.877736	395.233234	14690.997663	9667.891425	0.8182
2078.861403	360.592484	11610.966537	7007.180120	0.7849

[2] 斷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.

$$\begin{vmatrix} 1-\frac{\alpha}{3}+\frac{2\alpha}{\pi^2}-k^2 & 2\cdot3^2\left(\frac{1}{\pi^2}+\frac{1}{2^2\pi^2}\right)\alpha & 2\cdot5^2\left(-\frac{1}{2^2\pi^2}+\frac{1}{3^2\pi^2}\right)\alpha & 2\cdot7^2\left(\frac{1}{3^2\pi^2}-\frac{1}{4^2\pi^2}\right)\alpha \cdots\cdots \\ 2\cdot3^2\left(\frac{1}{\pi^2}-\frac{1}{2^2\pi^2}\right)\alpha & 3^4-\frac{3^4\alpha}{3^2}+\frac{2\cdot3^2\alpha}{\pi^2}-k^2 & 2\cdot3^2\cdot5^2\left(\frac{1}{\pi^2}+\frac{1}{4^2\pi^2}\right)\alpha & 2\cdot3^2\cdot7^2\left(-\frac{1}{2\pi^2}+\frac{1}{5^2\pi^2}\right)\alpha \cdots \\ 2\cdot5^2\left(\frac{1}{2^2\pi^2}+\frac{1}{3^2\pi^2}\right)\alpha & 2\cdot3^2\cdot5^2\left(\frac{1}{\pi^2}-\frac{1}{4^2\pi^2}\right)\alpha & 5^4-\frac{5^4\alpha}{\pi^2}+\frac{2\cdot5^2\alpha}{\pi^2}-k^2 & 2\cdot5^2\cdot7^2\left(\frac{1}{\pi^2}-\frac{1}{6^2\pi^2}\right)\alpha \cdots\cdots \\ 2\cdot7^2\left(\frac{1}{3^2\pi^2}-\frac{1}{4^2\pi^2}\right)\alpha & 2\cdot3^2\cdot7^2\left(-\frac{1}{2^2\pi^2}+\frac{1}{5^2\pi^2}\right)\alpha & 2\cdot5^2\cdot7^2\left(\frac{1}{\pi^2}-\frac{1}{6^2\pi^2}\right)\alpha & 7^4-\frac{7^4\alpha}{3}+\frac{2\cdot7^2\alpha}{\pi^2}-k^2 \cdots\cdots \\ \cdots\cdots & \cdots\cdots & \cdots\cdots & \cdots\cdots \end{vmatrix} = 0 \quad \cdots(24)$$

茲に

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

(24)式より k の最小値を求むれば，二次的に變化する變斷面桁の第一次基本振動數は

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

に依り與へられる．

この場合は斷面二次率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

$\alpha=\frac{I_c-I_e}{I_c}$	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	543.693090	0.299028	0.079213
0.5	0.934654	68.411891	523.366363	0.467231	0.123770
0.6	0.921585	65.894269	503.039636	0.672813	0.178229
0.7	0.908516	63.376647	482.712908	0.915773	0.242589
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)

F_2	C_1	C_2	C_3	(23)式の最小根 k
18.271243	672.359148	46466.975369	46806.182622	0.9933
73.084971	637.718297	41801.152922	43112.454075	0.9863
164.441185	603.087445	37333.562595	39402.295908	0.9790
292.339885	568.436593	33064.194337	36097.384238	0.9713
456.781070	533.795741	28993.048180	32774.603677	0.9629
657.764741	499.155490	25120.388348	29573.403144	0.9539
895.290898	464.514738	21445.708776	26494.952936	0.9444
1169.359540	430.404986	17969.245159	23536.643040	0.9340
1479.970667	395.233234	14690.997663	20698.384893	0.9225
1827.124281	360.592485	11610.966537	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 $Z_{(x)}$ を振動慣型を與へるのみの函数とすれば

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

である．この $I_{(x)}$ が一次的又は二次的に變化する場合に就いて，内務省土木試驗所横田技師が報告第 61 號に於て基礎微分方程式を冪級數に展開して嚴密解を歩かに求められたが，玆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．

表—3

$\frac{I_0-I_e}{I_0}$	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	
	k（横田）	k（村上）	k（横田）	k（村上）
0.1	0.9848	0.9848	0.9933	0.9933
0.2	0.9688	0.9689	0.9865	0.9863
0.3	0.9520	0.9521	0.9789	0.9790
0.4	0.9342	0.9343	0.9711	0.9713
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

これにより兩者の計算値を比較すれば，$\alpha=\frac{I_0-I_e}{I_0}$ 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 $\frac{I_0-I_e}{I_0}$ が 1 に近づくと本例の如く 3 項のみを計算したのでは相當の誤差はまぬかれぬ．$\frac{Ie-Ie}{I_0}=0.8$ 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 $\frac{I_0-I_e}{I_0}=1.0$ の場合には更に誤差は增大すると思はれるが嚴密解の數字が分らないから具體的に示すことが出來ない．

要するに横田技師の嚴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. 緒　　言

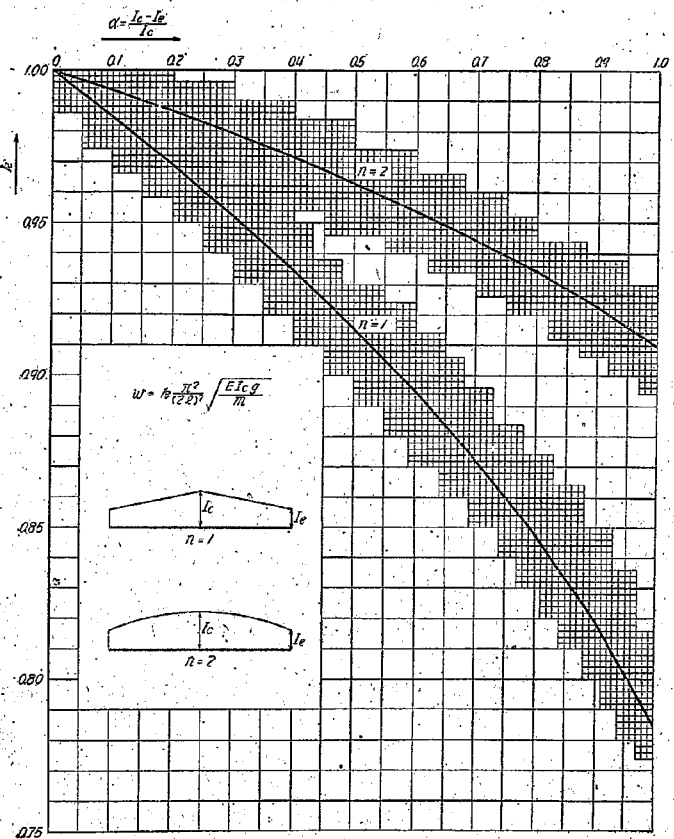
此の計算結果を要約すれば次の通りである．

1. 鉸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．然し橋脚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，横田技師の嚴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むることは容易である．

圖—3


α=(Ic-Ie)/Ic
0
0.1
0.2
0.3
0.4
0.5
0.6
0.7
0.8
0.9
1.0
1.00
0.95
0.90
0.85
0.80
0.75
n=2
n=1
w = fe π²/(2l)² √(EIcg/m)
Ic
Ie
n=1
Ic
Ie
n=2

天然凝結材に關する調査並びに試驗

(鹿兒島縣產火山灰砂及び各種凝結材の利用に就いて)

內務技手　松　本　榮

目　次

[I] 緒　言……(1)
[II] 火山灰砂の調査並びに成分，性質に關する試驗……(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驗……(10)
(1) 天然凝結材としての試驗……(10)
(2) セメント混和材としての試驗……(11)
(3) コンクリート用細骨材としての試驗……(14)
[IV] 天然凝結材の調査並びに成分，性質に關する試驗……(17)
(1) 利用狀況並びに利用工法……(17)
(2) 產地及び賦存狀態……(20)
(3) 成分及び性質……(23)
(4) 石灰混合物の强度……(25)
[V] 要　約……(27)

[I] 緒　言

翁島火山脈の走る南九州地方の一部の地域，卽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丶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，本土部內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ゝゐるが，シラスはその文字の示す如く白色乃至は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堆積物であつて，時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原野に分布してゐるが，代表的なものにあつては主として高距 100～200 m にして上部の稍ゝ平坦なる臺地を構成するものゝ如くである．

シラスは，縣內に斯く廣大にして豐富なる賦存を示すに拘らず，これが利用の途は殆んど拓かれず，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，全く價値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，土木工事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，透水性大にして凝集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，隧道，堰堤等の施工に於ても取扱ひの困難なる土質とせられ，寧ろ厄介視され来つたものゝ如くも見られるのである．

鹿兒島縣土木課に於ては，これが土木工事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檢討せんがため，縣内各地に産するシラスの代表試料3種を採取してこれを本試驗所に送付し，上記目的の試驗研究を依頼し来つた．偶々本試驗所に於ては岩石又は火山抛出物等を主とする天然膠結材の調査並びに試驗を進めてをり，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驗を實施することとした．

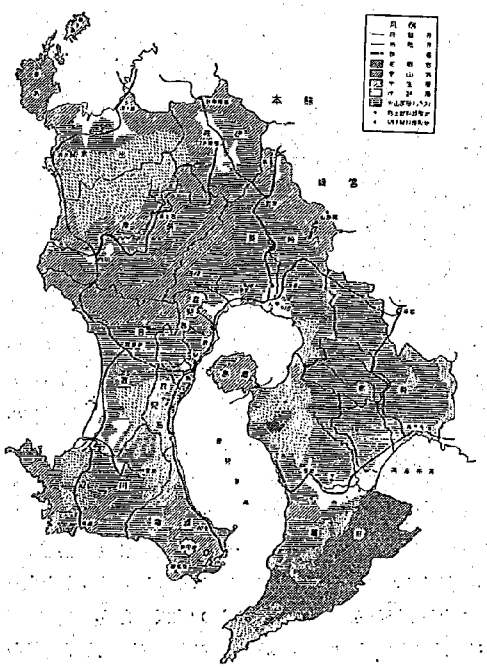
なほシラスとは別箇の立場から，縣内に産する粘土その他の天然膠結材に關する調査を行ひ且つその成分，性質等を明かならしむることゝした．

［II］　火山灰砂の調査並びに成分，性質に關する試驗

（1）分　布

圖—1 に示した地質概要圖から鹿兒島縣本土部の地質別分布面積を概測すると表—1 の如くなる．表—1 によると，シラスの分布面積は 3427 km² となり，本土部總面積 6964 km² の凡そ 49% に相當する廣域を領することが分る．なほ圖—1 及び表—1 は鹿兒島縣土木課の好意になる 20 萬分の 1 地質概要圖をもとゝし，地質調査所作製の 20

圖—1　鹿兒島縣本土部地質概要圖



表—1 鹿兒島縣本土部の地質別面積

地　質	面積	百分率	備　考
	km²	%	
中生層(砂岩,頁岩)	1195	17.1	
シラス層(火山灰砂)	3427	49.2	シラスに類する他層をも含む
冲積層	435	6.3	
花崗岩	486	7.0	
安山岩	1421	20.4	湖沼面を含む
合　計	6964	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．從つて地質別分布狀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．例へば鹿兒島縣本土部の實際面積は 7192 km² であるにも拘らず，圖—1 による測定面積は 6964 km² であつて，實際の面積に比し約 3% の不足を示してゐる．又圖—1 に於てはシラス層及びシラスに類する他の地層例へば冲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あるものなので，こゝ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あるが，特に薩摩半島の基部即ち鹿兒島市の西方より南方に亘る一帶の地域，大隅半島の中央部，霧島火山の西麓より南麓に及ぶ一帶の山地，川内市の東方一帶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懷かしむるものがある．

（2） 賦存狀態

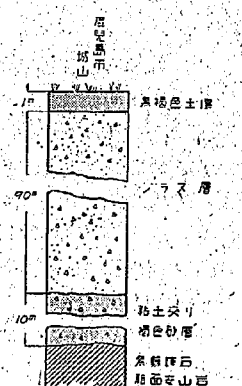
シラス層は多くの場合，高距 250 m 以下の高陵ならざる臺地を形成して賦存する．層の基盤は灰石と稱せられる脆弱な紫蘇輝石粗面安山岩よりなる場合が比較的多いが，時には中生層又は第三紀層の砂岩，頁岩等を不整合的に被覆し，これを基盤となすものも見られる．

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，褐鐵鑛の薄層等があり，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ある．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 1m 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．

實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狀態を說明すれば以下の如くである．

（i） 鹿兒島市城山　城山は圖—1 に於て・點 1 を以て示した地點にあり，東に鹿兒島灣を距てゝ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ある．

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 の部分は黑褐色の火山灰質土壤よりなり，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黃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．



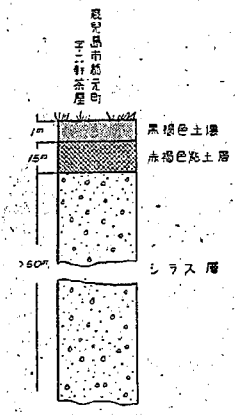
圖—2　シラス層見取圖—(1)

紫蘇輝石粗面安山岩は俗に灰石と稱せられ，暗灰色乃至は黝灰色を帶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拋出物で，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，後者は一旦空中に拋出された後，水中に落下し急冷して火山灰砂となつたと見られてある．

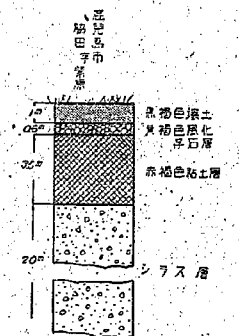
城山をはじめ鹿兒島市附近に見られるシラス層には，他種岩石の互層するもの比較的少く，代表的なシラス層として取扱はれる．

（ii） 鹿兒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)



圖—4　シラス層見取圖—(3)



本地域のシラスは灰白色を帯びた細粒に屬する火山灰砂で，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，前者は極めて少いが後者の混入量は可成り多い．

本地點で採取した試料には那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驗の代表試料となした．

(iii)　鹿兒島市脇田字茶原　この附近一帶は海拔 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，周圍の傾斜面は松林その他の樹林をなしてゐる．

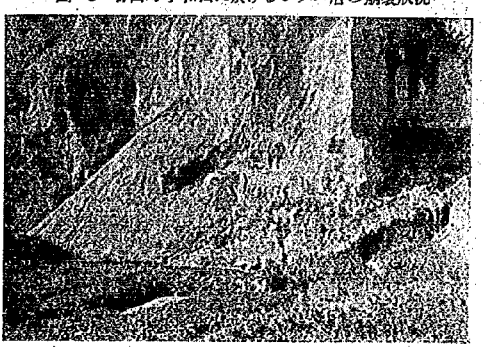
臺地の東端に露れた地層の見取圖を示すと圖—4 の如くである．地表に近き部分は厚さ約 1m の黒褐色土壌によつて覆はれ，その下位には充分風化霧爛し殆んど原形態を失ふまで粘土化せる黄褐色の浮石が厚さ約 0.5 m の層をなして横たはり，更にその下位には赤褐色を呈し著しく粘稠なる粘土質土壌が厚さ約 3.5 m の層をなして存在する．シラス層はこれら各層の下部に厚層をなして横たはる．地上に露れたシラス層の厚さは約 20 m に及んでゐるが，その下部に於ける厚さ及びシラス層の基盤をなす岩石等は全く不明である．

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．

(iv)　鹿兒島郡谷山町字和田　谷山町字和田地内の丁拓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現はれる．地上に露れた部分の層厚は約 40m 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狀況を示す寫眞を掲げたが，この種の崩壊現象は本例のみならず，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　谷山町字和田に於けるシラス層の崩壊狀況



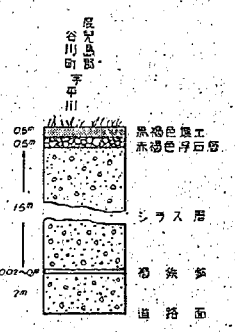
シラス層は一般に粗鬆，脆弱であつて鶴嘴等の器具で容易に切崩すことが可能であり，而も含水量が一定限度に達するまでは，これを垂直近くにまで切取つても比較的安定である．然るにシラス層は稜角に富んだ粒子の弛やかな堆積に過ぎず，固結性極めて低く粒子相互の摩擦力によつて安定性を保持するのみで，その安定性が粘着性又は凝集力に依存することが比較的少いため，一度降雨によつて含水量が增加し粒子相互の間に滑性が加はると，安定性が著しく減じて寫眞に示すやうな崩壊が惹起するのである．

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驗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鑛の薄層の挾存するのが屢々見受けられる．褐鐵鑛の層は 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，褐鐵鑛層の直上部附近には常に多量の水が湛えられてゐる．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鑛の薄層で，層の直上部のシラスは湛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．

圖—6　シラス層見取圖—(4)

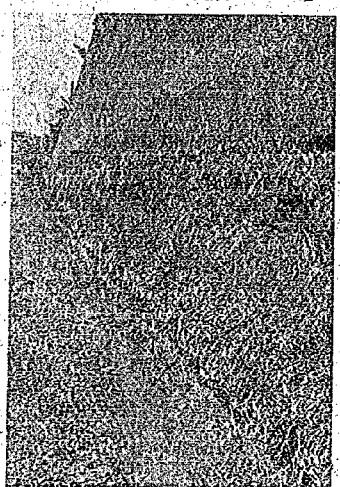


この附近のシラスは一般に稍赤味を帶びた褐色を呈し，灰及び砂分に富み礫分に乏しき組成を有する如くである．

（vi）姶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，四圍の情況より判斷すると，紫蘇輝石組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ゝ如く認められる．

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，又礫の混入量比較的少く特に火山岩質片塊の混在は著しく少いやうである．

圖—7　谷山町字平川地内のシラス層



（vii）姶良郡霧島村重久　霧島村重久地内の縣道切取箇所に點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ゝ如くである，層の基盤は主として安山岩質岩石よりなるものゝ如くであるが，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頁岩は，灰白色乃至灰綠色を呈する粗鬆，脆弱な岩石であつて，鑛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緩崩潰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き時代の生成層に屬することが分る．

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，全般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

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．又シラス層中には屢々 Bulla sp., Tapes sp., Fusus sp., Cardium muticum Rve, C. retusum L., Dosinia troscheli lischke その他各種の海棲貝化石の埋藏することが明かになつてゐる點から見ても，シラス層が水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輝石紐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來る．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，これを鹿兒島縣產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驗を行つた．

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	鹿兒島市郡元町字二軒茶屋
脇田シラス	3	鹿兒島市脇田字紫原
和田シラス	5	鹿兒島郡谷山町字和田
平川シラス	6	鹿兒島郡谷山町字平川
加治木シラス	7	姶良郡加治木町小山田字堀切
霧島シラス	8	姶良郡霧島村重久
姶良シラス	9	姶良郡國鐵古江線姶良驛附近

（i） 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，時に淡黃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，角閃石等の有色鑛物の分解程度により異る如くであつて，風化分解が進み微細分を多量に含むシラスは一般に黃色乃至褐色を帶びてゐる．

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粗鬆にして水中に投ずるときは浮游する部分が多い．

表—3 シラス試料の一般的性質

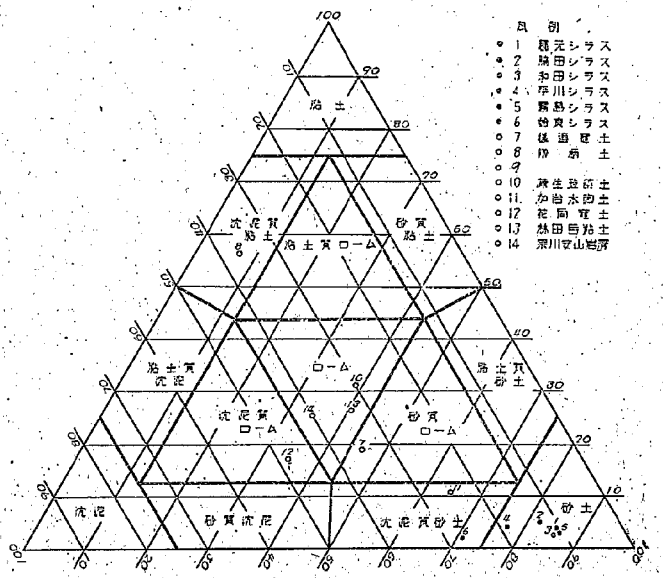
項目	郡元シラス	脇田シラス	和田シラス	平川シラス	加治木シラス	霧島シラス	姶良シラス
外觀	灰白色	淡褐色	灰白色	赤褐色	灰白色	暗灰色	灰白色
比重	2.42	2.40	2.37	2.36	2.39	2.47	2.33
含水量 %	1.17	17.51	0.84	29.58	9.00	12.62	0.61
粒度 %							
30mm～25mm	0	0	2.1	0	0	0	1.1
25″～20″	2.0	5.2	3.4	0	0	0	0.7
20″～15″	4.0	4.8	4.9	0	1.1	0	1.3
15″～10″	3.8	10.1	2.6	0	2.5	1.6	0.8
10″～5″	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	26.8	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	85.0	81.9	85.9	76.9	—	86.2	70.3
沈泥	11.1	13.1	11.7	19.0	—	11.0	27.8
粘土	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，2.0～0.075 mm の範圍を火山砂，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 15.4～32.4 %，平均 20.90 %，火山砂の量は 43.6～76.5%，平均 62.6%，浮石礫及び火山岩塊の量は3.0～37.4 %，平均 16.6%となり，シラスの主體は火山砂であることが分る．

淘汰分析と篩分析とを併用して機械的分析を行ひ，各シラス試料の機械的成分即ち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 を砂と礫との限界と見做し，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 11.0～27.8 %の沈泥と 1.4～5.0 %の粘土を含むもので，三角圖上に於ける位置は砂土（Sand）又は沈泥質砂土（Silty Sand）の範圍に入る．

圖—8　シラスの機械的成分



（ii）　比重　比重は 2.33～2.47，平均 2.39 を示し，最大最小の間に於て約 0.14 の僅少なる差違が見出される．これはシラスの鑛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，粘土及び沈泥分の含有量等によつても差違を來す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粗鬆なる粒子に原因するところが多いやうに思はれる．

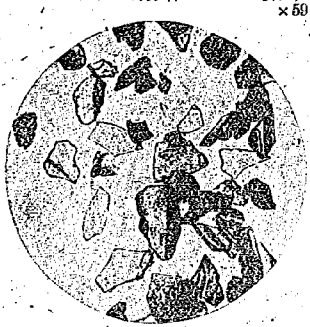
（iii）　含水量　含水量は試料採取時の氣象狀態，採取後の保存方法等によつて異る．從つて 表—3 に見られるやうな廣範圍の差違が現れるため，含水量の大小から，シラスの多孔質粗鬆の程度を推定することは困難である．

（iv）　鑛物的成分　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．

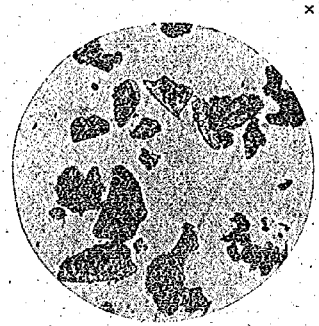
玻璃質は火山灰の部分にも火山砂の部分にも存在するが火山砂の部分に特に多い．一般に偏平且つ細長で稜角の鋭きもの多く，玻璃質粒子の外觀は殆ど白雲母の薄片を破碎せるものゝ如くである．シラスの鑛物的成分は賦存箇所により著しく異る場合もあり一定せざるものゝ如くであるが，その主要成分は常に玻璃質で 70～90% の含有量を示す如く推定される．

図—9 火山灰砂の顕微鏡写真

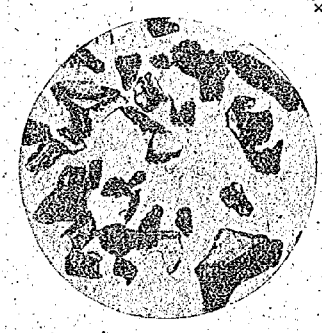
i 和田シラスの火山砂部分(径0.075mm以上) ×59



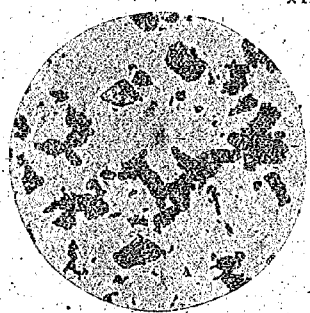
iv和田シラスの火山灰部分(径0.075mm以下) ×111



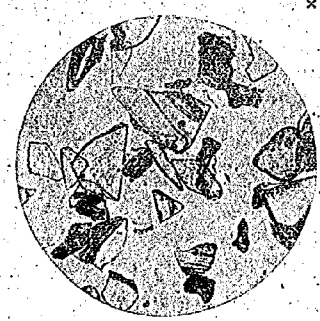
ii 郡元シラスの火山砂部分(径0.075mm以上) ×59



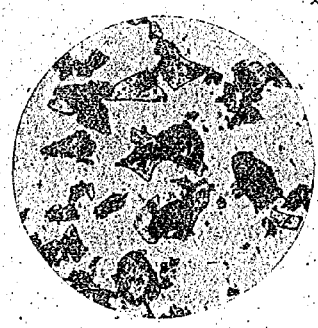
v 郡元シラスの火山灰部分(径0.075mm以下) ×111



iii 姶良シラスの火山砂部分(径0.075mm以上) ×59



vi 姶良シラスの火山灰部分(径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狀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驗（全分析及び可溶分析）の結果を示すと表—4の如くである．

全分析試驗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	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	姶良シラス
(全分析)%							
灼熱減	2.48	6.41	1.96	5.18	2.32	2.62	1.91
珪　酸	68.56	60.11	69.44	68.11	68.41	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	22.98	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	0.86	1.46	0.91		1.13	—	0.57
石　灰	0.69	0.50	2.08	0.74	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，姶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 900°～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．勿論炭酸塩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やうな推測を下し得ないが，シラスには炭酸塩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，姶良シラス等は特に珪酸含有量が大で 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 2.00～3.59%，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，姶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 5% 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次章 [III] の (1) に於て考察する．

[Ⅲ]　火山灰砂の利用方法に關する試験

(1) 天然凝結材としての試験

シラスは表—3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，いはゆる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驗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珪酸，礬土，酸化鐵等の含有量も概して少く，從來天然凝結材の價値判定の基準となした可溶性珪酸 25% 以上，同礬土及び鐵の合量 30 % 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，その强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．

(i) 配合，水量を異にするシラス・石灰混合物の强度

2.0 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驗用型に2層に分けて詰め，各層を 25 回宛鐵棒にて突き固め，4×4×16 cm の羊羹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，曲げ强及び壓縮强を測定する．なほ本試驗では試料として和田シラスを用ひた．

試驗結果は表—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驗，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驗結果である．表—5 より，配合割合，水量，施工軟度等とは無關係に曲げ强の最大値及び最小値をとつて見ると，材齡 7 日に於て 0.8～1.8 kg/cm², 材齡 28 日に於ては 3.5～7.0 kg/cm² となり，又壓縮强は材齡 7 日に於て 3.7～6.6 kg/cm², 28 日に於

表—5　シラス混合物の曲げ强及び壓縮强（20°C 恒温，空氣中養生）

No	配合 石灰：シラス	水量 %	フロー	曲げ强 kg/cm²		壓縮强 kg/cm²	
				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
新川礬土	1 : 5	20	102	23.8	33.8	91.9	127.6
新川礬土	1 : 12	17.5	101	18.7	15.9	82.4	87.6
大塚礬土	1 : 5	21	101	10.2	15.5	29.0	41.2

ては 12.8～25.0 kg/cm² となり，これは從來天然凝結材として使用された礬土（花崗岩の風化物）の石灰混合物の同一條件に於ける强さ（表—5 下欄）に比し著しく劣ることが分る．少くとも礬土と同一程度の强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

都元シラス, 和田シラス, 姶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, 壓縮强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 2.5 cm, 直徑 2.5 cm の

表—6　シラス・石灰混合物の壓縮强 (20°C 恒溫, 空氣中養生)

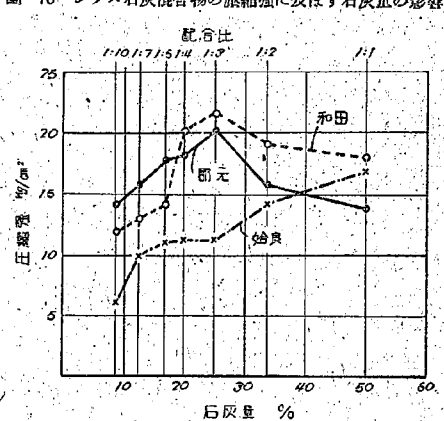
配合	都元シラス		和田シラス		姶良シラス	
石灰：シラス	水量 %	壓縮强 kg/cm²	水量 %	壓縮强 kg/cm²	水量 %	壓縮强 kg/cm²
1 : 1	45.0	13.9	46.2	18.0	55.7	17.0
1 : 2	38.0	15.8	39.5	19.1	45.4	14.4
1 : 3	35.3	20.3	37.3	21.6	44.0	11.4
1 : 4	31.4	18.2	32.3	20.2	42.1	11.4
1 : 5	32.0	17.9	31.3	14.1	40.5	11.2
1 : 7	28.8	15.9	31.3	13.0	40.5	9.9
1 : 10	27.8	14.4	26.3	12.0	41.0	6.1

圓柱形供試體を用ひ, 混合物の混捏に要する水量は混合物を 15 kg/cm² の成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, 微細なる部分を多量に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.

壓縮强も亦, 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强に比較的大なる影響を與ふることが分る. 圖—10 によると都元シラス. 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强が最大となり, 姶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强が最大を示す傾向を見ることが出來る.

圖—10　シラス石灰混合物の壓縮强に及ぼす石灰量の影響



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强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强度の增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値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, 珪藻白土, 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從來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

所謂凝灰質砂に屬する軟岩である.

シラスも亦その成因から見れば凝灰質砂の一種に屬するものであるが, その生成は凝灰質砂に比して幾分新しき時代に屬する如くで, 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は了解出來るのであるが, 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ゝした.

(i) シラスの粉碎　都元シラス, 和田シラスを及び姶良シラスの3種を代表試料としてとり, 更に比較試驗の試料としては三重縣安濃郡神戸村半田産の凝灰質砂 (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) 及び長野縣上水內郡産の凝灰質砂製品 (長野珪藻白土) 等を選び, 長野珪藻白土以外はいづれもこれを一旦 110°~120°C の乾燥盧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・ミルの回轉數は 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ゝした.

粉碎試料の粉末度を 4900 孔篩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るに從つて粉碎に難易ある如くで, 例へば姶良シラスは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, 都元シラスと和田シラスは比較的多量の粗粒分を殘し粉碎稍困難なる如く認められた.

本試驗では, これ等の粉碎試料をそのまゝで用ひることゝし, 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價値は, 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驗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ることゝした.

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から, 後者よりも混合材としての價値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驗方法に準據した. 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分間激しく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驗の結果を示すと表—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顯著である. 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

粉砕試料		施工軟度（フロー）		
種類	粉末度（4900孔残法）	10%	20%	30%
郡元シラス	10.82%	156	144	142
和田シラス	8.02	149	127	124
姶良シラス	3.77	143	128	124
三重凝灰質砂	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

粉砕試料の混合量によるフローの變化は，粉砕試料を10～20% 程度混合せるとき最も著しく，混合量を增加して 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）曲げ强及び壓縮强　粉砕試料を混合してつくつたセメント・モルタルの曲げ强及び壓縮强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，粉砕試料を混用せるモルタルの强度を，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　シラス及び凝灰質砂の粉砕試料を混用せるセメント・モルタルの强度（配合 1:2, 水量 65%）

粉砕試料の混合量(%)	材齢（日）	郡元シラス kg/cm²		和田シラス kg/cm²		姶良シラス kg/cm²		三重凝灰質砂 kg/cm²		山形火山灰 kg/cm²		長野珪酸白土 kg/cm²	
		曲げ强	壓縮强	曲げ强	壓縮强	曲げ强	壓縮强	曲げ强	壓縮强	曲げ强	壓縮强	曲げ强	壓縮强
10	3	13.9	48.7	13.7	49.8	10.7	51.6	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	22.9	82.5	23.6	93.5	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	58.8	12.9	58.5	9.4	26.5
	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　粉砕試料を混用せるセメント・モルタルの純セメント・モルタルに對する强度比率

粉砕試料の混合量(%)	材齢（日）	壓縮强の强度比率(%) シラス粉砕試料			凝灰質砂試料			曲げ强の强度比率(%) シラス粉砕試料			凝灰質砂試料		
		最大	最小	平均	最大	最小	平均	最大	最小	平均	最大	最小	平均
10	3	75.7	71.4	73.4	101.5	78.0	92.9	69.7	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	83.3	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	78.8	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	58.9	70.8	45.9	60.0
	28	74.1	51.6	63.6	79.3	69.1	67.8	69.8	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顯著である．少くとも本試驗の範圍では，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圖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鹸性の増大を圖るとゝもに，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或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，曲げ強は材齡によつて著しく異るが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滿足されるならば，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．

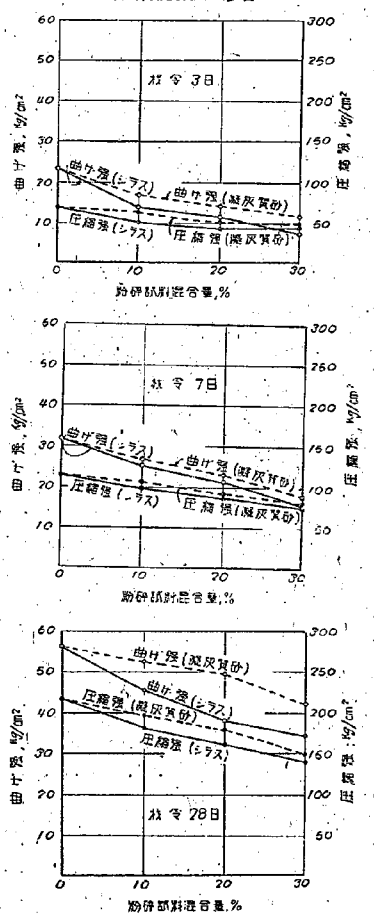
粉砕試料の混合による強度の低下は圖—11に見られる如く，材齡によつても異り更に粉砕試料の種類によつても異るが，混合量の増加は常に強度の低下を招致する如くであつて，要するところ粉砕試料の混用によつて得られる強度の上の利益は殆んど認められず，混合量の増加はこれを混用せるセメント・コンクリート構造物に時として重大なる危險を發生せしむる原因をなす如く考へられる．

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，特に推奬せられるべきでないことが明かになつた．

表—10　純セメント・モルタルの強度 (1:2)

材齡 (日)	曲げ強 kg/cm²	壓縮強 kg/cm²
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



(3)　コンクリート用細骨材としての試驗

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，而も砂粒子の形狀は圖—9の顯微鏡寫眞に見るやうに偏平且つ細長で

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當な材料ではないやうに思はれる．從來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，その經濟的價値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・モルタルの强度を測定し，コンクリート用細骨材としての適否を判斷することゝした．

（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樣の試驗を行ひ表—11の如き結果を得た．シラス試料には都元シラス，和田シラス，姶良シラスの3種を選び，2.0 mm 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，又强度試驗の基準を得るため九味浦砂を使用した．

比重　ルシャテリー比重瓶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驗

項　目	都元シラス	和田シラス	姶良シラス	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″　〃	100	100	100	100	100	100	85～100
1.2″　〃	93.8	95.9	97.2	84.2	94.0	100	45～80
0.3″　〃	40.0	47.8	72.4	50.2	27.9	98.4	10～30
0.15″　〃	32.1	34.9	51.5	7.2	16.0	32.5	0～5
洗試驗損失	19.2	17.5	33.0	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，この種輕量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驗方法に準據し，2.0 mm 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．特に洗試驗による損失即ち 0.075 mm 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ゝなるため，このまゝ通常の川砂と同じ取扱によつた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 1 m 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來る機會が極めて少い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.

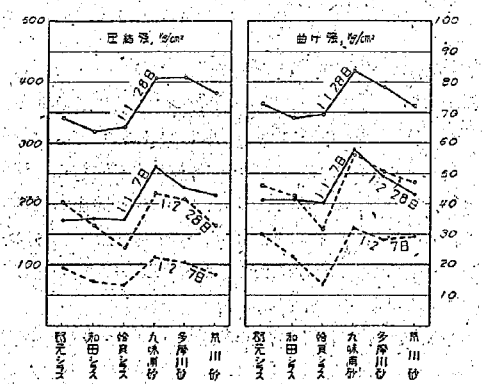
(ii) セメント・モルタルの試驗

セメント・モルタル供試體の作製方法, 養生方法並びに强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驗方法に準據した. 秩父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 日に於ける强度を測定した. 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. 即ち本試驗では配合 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.

表—12 シラスを細骨材に用ひたセメント・モルタルの强度

細骨材	試驗條件 配合	水量	フロー	曲げ强 kg/cm² 7日	28日	壓縮强 kg/cm² 7日	28日
郡元シラス	1:1	68	165	41.2	72.8	173	342
和田シラス	〃	59	171	41.8	68.1	175	318
姶良シラス	〃	72	162	40.2	69.1	174	326
九味浦砂	〃	45	172	57.3	83.3	262	407
多摩川砂	〃	46	156	48.8	78.0	226	408
荒川砂	〃	56	152	43.0	71.9	215	332
郡元シラス	1:2	88	158	29.9	45.9	95.0	202
和田シラス	〃	92	167	22.6	42.5	70.2	165
姶良シラス	〃	115	153	13.5	31.8	67.7	128
九味浦砂	〃	65	160	31.8	56.2	113	217
多摩川砂	〃	66	153	28.0	50.4	104	206
荒川砂	〃	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・モルタルの强度



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强度の相違が極めて明瞭に現れてくる. 例へば曲げ强7日の强度比率は郡元シラス 94.0%, 和田シラス 71.1%, 姶良シラス 42.5% と互に顯著な强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强さを示す例が見られるとゝもに, 姶良シラスの如く九味浦標準砂による强度の 50% にも達し得ぬものもある. このやうな傾向は, 材齡が變つても同樣であり又壓縮强に於ても同樣である.

以上の試驗結果を綜合判斷すると, シラスを

コンクリート用細骨材として用ひる場合には，材齡，配合，水量等の如何に關らず，常に混合物の强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强度の低下率が極端に異るから，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，性質に關する試驗

シラスの調査及び試驗と併行し，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，分布及び賦存狀態，既往及び現在に於ける利用狀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驗を行ひ成分並びに性質を明かならしめた．

（ⅰ）　利用狀況並びに利用工法

鹿兒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，その使用は著しく減退したが，今尙縣內各地の民家では古來の習慣に從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，信玄壘と稱する練積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ゝめ，その遺趾を探ることは出來ない．たゞその面影を殘すのは，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，鹿兒島港の波止場（三五郎波止として現存）工事，鹿兒島市附近に於ける石拱橋の架設，川內川下流高江村の干拓工事等に盡瘁し偉大なる功績を遺してゐる．

太鼓橋も岩永三五郎の手になる石拱橋の一で，鹿兒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ゝもに甲突川の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，有效幅員約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とよりなる灰色の混合物が塡充されてゐる．

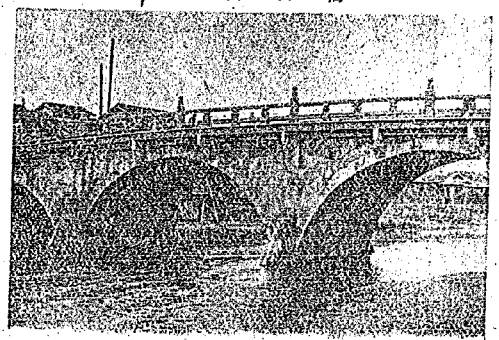
この石灰・粘土混合物の中，常に水と接觸してゐる橋基部分に施したものは水に侵蝕されて脆弱化し一部缺落せる箇所も見られたが，大部分は極めて堅牢で今猶目地としての機能を充分果してゐる．

太鼓橋より採取せる粘土・石灰混合物の化學

分析試驗結果を示せば 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 4 m，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皷橋と同様岩永三五郎が架設せるものといはれる．

圖—14　西　田　橋



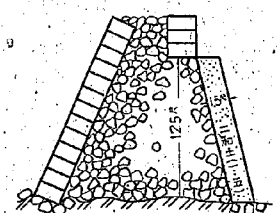
使用した石材の孔隙，缺落箇所等には他物を塡充した形跡が明かに遺つてゐるが，これは珪藻土と松脂との混合物であるといはれ，些細な部分にまで遺憾なき注意の拂はれたことが想像せられる．

(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と相前後して姶良郡新川尻の海面を埋立てゝ，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，干拓地護岸の石積工事には，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．附近一帶は明治中葉に至り全面的に改修工事が行はれたよしで，現在その跡を遺すものは無い．

次に明治以降に施工された天然凝結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 年に竣功を見たのであるが，俗に洲崎海堡と稱せられる海岸の護岸工事及び附近の埋築工事には粘土・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 尺の裏築には配合 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，內務省直轄の改修工事に際し取除かれたゝめ，本工事の詳細を知ることは出來なかつた．

(vi) 新川尻の干拓工事　島津藩の干拓工事に次ぎ明治以後，鹿兒島灣に面した姶良郡下の各地では砂洲，海面等を埋てゝ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ゝめ明治 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 の間知石練積の防潮堤には代表的な天然凝結材利用の跡が見出される．この防潮堤は櫻島大爆發（大正 3 年）の直後に完成したとのことであるから，既に約 30 年の星霜を經た譯であるが，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．

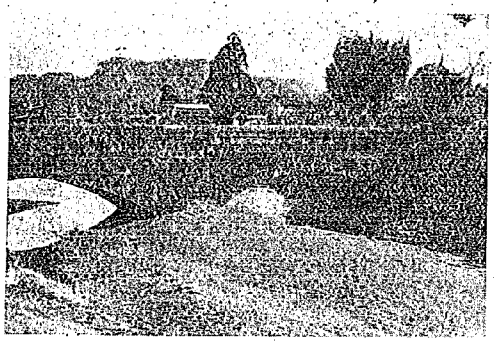
本工事の粘土・石灰混合物に使用した粘土は國分町大字野口，同大字松木等に於ける沖積層の畑地の下部に成層せる赤褐色重粘な粘土であるといひ，又一部には姶良郡溝邊村重久附近に產する第三紀層の粘土を採取使用せ

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漆喰及び天川混凝土工法とよく似た混捏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, 臼に入れて足にて踏み練りを行ひ充分粘稠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　國分町字花向には, 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—16　國分町の水路橋[1]



圖—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. 橋臺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, 閘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社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, 灰色を帶びた粘土・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竈の築造に供する等, 極めて廣汎なる用途を有するもので, 雁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—13　天然凝結材・石灰混合物の化學的成分

成分	湯口温泉石橋橋臺の目地	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 %	21.90	24.75	25.02	29.51	25.63
珪酸 %	29.72	28.57	35.16	22.25	30.12
礬土 % / 酸化鐵 %	23.33	23.14	9.16	9.94	12.86
石灰 %	19.12	19.36	26.65	28.42	25.90
苦土 %	0.66	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學的成分を定量した結果である．石灰含有量は 19.12～28.42%，平均 23.89% 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 {Ca (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來る譯である．

（2）　産地及び賦存狀態

上に述べたやうに鹿兒島縣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，その賦存も山川町その他縣内數箇所に知られてゐる等，土木材料として利用の可能な岩石風化物の豐富なる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

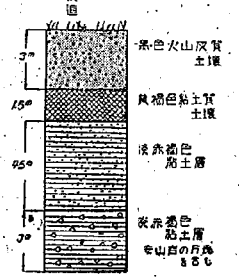
略名	圖-1に於ける位置	採取地名	備考
後迫層土	○ 9	鹿兒島郡谷山町後迫(上場の茶屋)	
薩摩土	○ 10	指宿郡指宿町湊字南(上溜)	
珪藻土(i)	○ 11	指宿郡山川町成川字山神西ノ	珪酸質植物遺骸
火山灰(ii)	○ 12	指宿郡山川町成川，火山灰會社跡	同　上
珪藻土(iii)	○ 13	姶良郡浦生村大字重富字火字都	同　上
陶土	○ 14	姶良郡國分町字野口	沖積層粘土
野口粘土	○ 15	姶良郡國分町字野口	沖積層粘土
花向層土	○ 16	姶良郡國分町字花向	沖積層粘土
林田白粘土	○ 17	姶良郡牧園村林田温泉	
栗川安山岩層	○ 18	姶良郡牧園村栗川	安山岩質拋出物
横岳火山灰	○ 19	姶良郡霧島村横岳	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，賦存狀態を明かならしめ，又各種試料の大體の性質，成分等を明かになし得たものと思ふ．

各産地に於ける天然凝結材の賦存狀態，現在に於ける利用狀況等を概説すれば以下の如くである．

（i）　鹿兒島郡谷山町字後迫（上場の茶屋）　圖—17 に示した見取圖に於て，地表下 3 m の下部に成層する黄褐色の粘土質土壌並びに更にその下層の淡赤褐色土壌は，著しく粘調性に富み乾燥するも龜裂を生ぜざるため，附近では古くから簡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．

圖—17　後迫地内の地層見取圖



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樣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薩摩土と稱する赤褐色の粘土は，同町の西方 2～4 km に位する高距 50～150 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帶に薩摩土の豐富なる賦

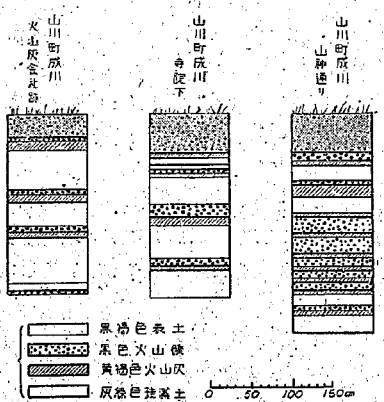
存が見られ，上部に厚さ 1～5 m のシラス層又は風化褐變せる浮石の層を頂き厚さ 2～10m を以て成層する如く推測される．

指宿町附近では粉炳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繼目，樋門開門の類の漏水止め，温泉導水管及び排水管の繼目等，多種多様の目的に利用してゐる．

粉炳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．混合作業は叺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　山川町成川地内一帶に亘る臺地には珪藻土の極めて豐富なる埋藏が知られてゐる．珪藻土は含水狀態に於て灰綠色を呈し，圖—18 に見るやうに黑色多孔質の火山礫層，黃褐色又は赤褐色の火山灰

圖—18　山川町地内に於ける地層見取圖



圖—19　山川町の珪藻土火山灰層

層と互層し，圖—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—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會社が起りローラー・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碎して製品となし，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，先づ灰綠色の珪藻土と黃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碎する．粉碎後，火山灰 30：珪藻土 70 の割合に混合し，100 斤俵叺に詰めて製品となす．1 叺の價格約 1 圓，1 日の生産高は 100 斤叺入凡そ 300 叺，即ち 30,000 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¼程度を限度とし，一般には場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餘儀なきに至り，現在ではこゝに埋存する豐富な珪藻土に一顧を與ふるものもない．

(iv)　姶良郡溝生村西浦字火字都　本地域にも亦珪藻土の豐富なる埋藏が見られ，現在探掘中である．

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

存する．採掘せる原土は姶良郡重富村字脇下の粉碎工場に送り粉碎加工して製品となす．製品の主なる販途は熊本縣八代，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） 姶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燒と稱する陶器の窯元が數戸あり，家內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內の丘陵の麓部に成層する黃褐色の粘土を充てゝゐるが，產量十分でなきため熊本縣天草方面より供給を仰ぐ狀態にあるといふ．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，產量より見て土木材料としての利用價値は極めて乏しきものである．

（vi） 姶良郡國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，古くから國分町附近で各種工作物の凝結材に利用されつゝあることを既に述べた．その代表的產地として國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竈築造用土として隨時使用する程度で，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 の黑色表土の下位に成層する．粘土層の上部凡そ 0.4 m は粘稠な赤褐色粘土よりなり，下部は幾分黃味を帶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ゝ如く觀察された．

（vii） 姶良郡牧園村林田溫泉附近　林田溫泉は霧島國立公園內の所謂霧島溫泉地帶に在る一溫泉である．林田溫泉附近の山地一帶では，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稠な粘土と化した地層が隨處に見られる．部分的には幾分黃色を帶び或は赤味を帶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溫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，その何れに屬するかに就ては地質學的研究に俟つところが多いのであるが，林田溫泉の溫泉湧出量の豐富なる事實，粘土の性質乃至成分の酷似せる點等よりして別府溫泉に於ける別府白土の成因と同樣，溫泉又は溫泉水の影響に起因するところも亦極めて大なるものゝ如く推測せられる．

（viii） 姶良郡牧園村栗川　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層の賦存が見られるが，牧園村栗川地內には代表的な露出箇所が多數存在する．

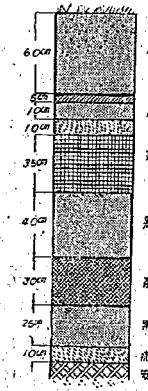
この附近に於ける安山岩層は濃赤褐色重粘な粘土質土壤と化してをり，硬軟の程度は天然凝結材として利用するに十分なるを思はしむるものがある．粘土中には稀に大きさ 50 cm 以上に達する新鮮堅硬な安山岩質岩塊を含み且つ少量の浮石礫を雜へてゐる．

（ix） 姶良郡霧島村横岳　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帶の傾斜面には 圖—20 に例示したやうな，多樣の色彩を帶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畫いてゐて，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從つて漸次薄くなり，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，山麓近くの日豐本線霧島神宮驛附近まで下ると，僅か 0.5 m 內外の薄層となる．

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

圖—20　横岳附近の地層見取圖



的新しき時代に於ける拋出物であつて，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驗及び化學的試驗を行つて，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，使用の適否等を判斷することゝした．

物理的試驗の結果を總括すれば 表—15 の如くなり，化學的試驗の結果を示せば 表—16 の如くである．

（i）　外觀　野外に存在する狀態では，表—15 に示す如く 著量の水分を吸收してゐて，一般に重粘で可塑性の大なる粘土質土壤の狀態を保つてゐるものが多い．後迫峠土，辨柄土，林田白粘土，栗川安山岩層等は特に粘稠性が大である．

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，赤味を帶びたものと白色系統のものとに分けることが出來るが，一般に鐵分含有量の多きものは赤色を帶び，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くものが多い．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　乾燥破碎した試料の比重は 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，珪酸質で植物性遺體を含む試料は一般に比重が小であり，後迫峠土，栗川安山岩層の如

表—15　天然凝結材試料の物理的性質

試驗項目	後迫峠土	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	花尚峠土	林田白粘土	栗川安山岩層	横岳火山灰
外觀	赤褐色粘稠	赤褐色粘稠	灰綠色粗鬆	黄褐色	灰白色	黄褐色	灰白色粗鬆	黄白色	白色粘稠	赤褐色粘稠	黒褐色粗鬆
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	—	34.9	40.3	34.2	—
沈泥	35.0	36.8	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	—	58.2	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拋出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狀態，採取箇所，試料保存方法等によつて異るから，表—15 に示した含水量を以て各試料の常に吸藏する水分と見ることは出來ないが，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　機械的分析試驗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 の所要欄の如くであり，これを土質分類三角圖に挿入して示せば 圖—8 (7 頁參照) の如くである. 圖—8 により，各試料の所屬を見ると，

沈泥質粘土に屬するもの	辨柄土
ロームに屬するもの	蒲生珪藻土
	林田白粘土
	栗川安山岩層
沈泥質ロームに屬するもの	花向凝土
砂質ロームに屬するもの	後迫凝土

となる.

(v) 土としての性質　參考として收縮限界，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. 試驗結果は 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驗の結果を示せば 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，野口及び花向凝土，林

表—16　天然凝結材試料の化學的成分(%)

成分	後迫凝土	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	花向凝土	林田白粘土	栗川安山岩層	桜島火山灰
% 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	28.09	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	38.40	21.02	26.74	—	30.13	—	—	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	痕跡		
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	0.68	—

田白粘土等は比較的多量の珪酸を含み，後迫凝土，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帶び，鐵含有量の多きものは赤味を帶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.

全分析試驗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，可溶分析試驗を併せ行ふのを普通とする. 可溶分析試驗によれば，石灰と化學的結合の比較的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値判定は，可溶性珪酸 25 % 以上，同礬土及び鉄の合量 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値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

等の各條件を概ね滿足する試料として後迫礬土，辨柄土，花向礬土，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ゝし，なほ參考試料として從來天然凝結材としてひろく利用されつゝある敲土及び天川粘土の代表的試料各 1 種及び關東ローム 1 種を選び同樣の試験を行ひ，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敲土，長崎市産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るとゝもに，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 6:4 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 の圓壔とし，供試體は既に述べたシラス・石灰混合物の場合と同樣にして作製した．先づ所要量の天然凝結材試料と消石灰とを秤取し，磁製乳鉢にて擂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 の割合に九州浦邊標準砂を秤取し，混合物と標準砂とを蒸發皿に入れ金屬製匙を以て 5 分間空煉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．混捏に要する水量は，試料全量に對して 88% と定めたが，この程度の水量を以てすれば，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函中に保存して，所定期間後に壓縮強を測定した．

（iii） 試驗結果

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．

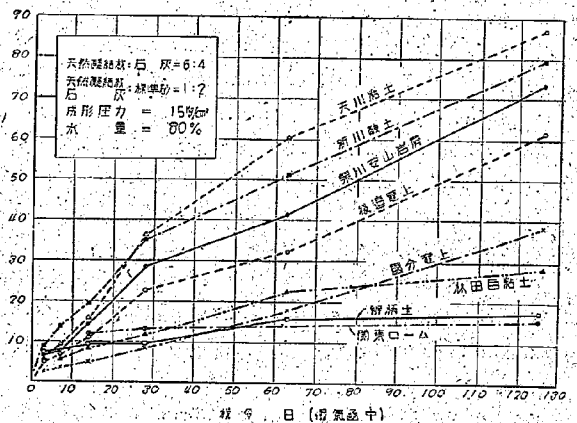
表—17 によつて明かなやうに，この種天然凝結材は早期強度が著しく小であつて，各混合物とも同一配合割合のセメント・モルタルの有する強度の場内外を示すに過ぎない．材齡の增加による強度の增大傾向は圖—21 によつて明かなやうに，栗川安山岩屑，後迫礬土の如く材齡 126 日（約 4 箇月）以内に於ては未だ急激なる上昇曲線を示して強度の增大するものと，辨柄土，林田白粘土の如く材齡 63 日（約 2 箇月）以内に於て既に強度の增大傾向の停止せるものとがある．

表—17　天然凝結材石灰混合物の壓縮強

	後迫畚土	辨柄土	野口粘土	林田白粘土	菜川安山岩屑	天鳥粘土	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	108	146	—
壓縮強kg/cm²									
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來ない．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價値の乏しきものと見られるのであるが，天然凝結材：石灰の混合比を6:4より4:6の比較的石灰量の豐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價値を有するものとなる．

圖—21　各種天然凝結材石灰混合物の壓縮強



表—18　天然凝結材・石灰混合物の壓縮強（kg/cm²）

材齡	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

表—19　配合1:1の混合物の壓縮強

試料	壓縮強 kg/cm² 7 日	28 日
後迫畚土	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)
菜川安山岩屑	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：括弧内の數字は，同一材齡の1:2混合物の强度に對する比率である

從つて，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，混合及び成形條件等を種々に變へて試驗を行ひ，更に比較的長期に亘る試驗を行つた上でなければ適正なる判斷を下すことは出來ないと思はれる．

配合割合1:1，材齡7及び28日に於ける混合物の壓縮強を示せば表—19

の如くである．骨材使用量を減じ天然凝結材・石灰混合物を增すことにより即ち富配合混合物となすことにより，混合物の强度の增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柄土，林田白粘土の2試料にあつては强度增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倍の强度增大を示してゐる．

以上を要するに，本試驗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，特に後迫礦土，栗川安山岩層等は天川粘土と略同等の品質を有し，天川粘土と同樣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

鹿兒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驗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充分で，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るため，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碎し，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）これを粉碎して微粉となし，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ゝある凝灰質砂に比し，粉碎稍々困難にして且つ混合物の强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，その强度を檢せるに，九州浦標準砂に比し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 % 內外の强度減を示し，1:2配合に於ては10～45% の强度減を示し貧配合に於ては火山灰砂の種類乃至性質がモルタルの强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

縣內各地に產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る各種天然凝結材に就き調査並びに試驗を行ひ次の如き結果を得た．

（i）後迫礦土，辨柄土，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强度を有する混合物が得られ，土木材料特に道路材料，擁壁材料として利用し得ることが明かとなつた．

縣內各地には，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豐富なる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驗研究は，地方的材料の適切なる利用，埋藏資源の新なる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，新生珪藻土，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驗並に之に基く下層板の有効幅の計算基準

福岡正巳

要旨

木橋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驗し，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．又破壞荷重を求めて實際の安全度を明かにした．

本實驗は吉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 試驗の目的……（1）
Ⅱ 試驗に用ひたる床部の構造……（2）
Ⅲ 試驗方法……（3）
〔1〕使用木材……（3）
〔2〕載荷方法……（3）
〔3〕撓み測定方法……（3）
〔4〕破壞試驗……（4）
Ⅳ 鋪板の撓みに關する試驗結果……（4）
〔1〕床版試驗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〕破壞試驗……（9）
Ⅴ 試驗結果に對する考察……（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〕破壞試驗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. 試驗の目的

從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樣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，支間をその純經間に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

以て試驗を行つた．又破壞荷重を實驗的に求め實際の安全度を明にした．

II　試驗に用ひたる床部の構造

床部構造の設計は國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，各材の材種形狀寸法配置は表-1 に示す．

圖-1　二重張鋪板設計圖

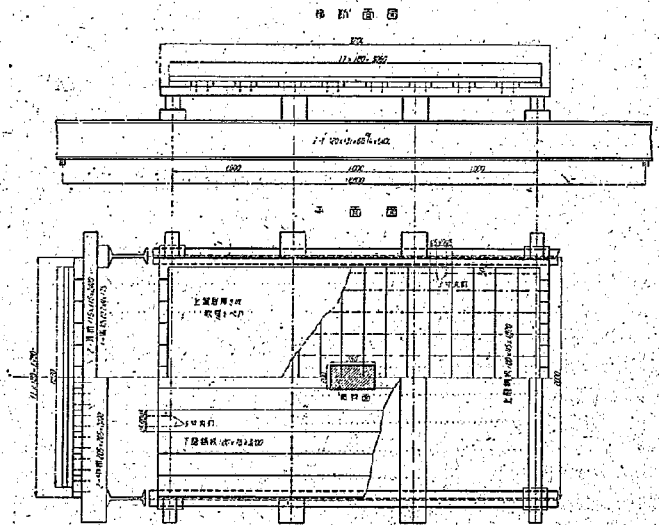


表-1

名稱	材種	寸法（糎）	數量	摘要
横桁	I 型鋼		2	中心間隔 2 米
中桁	米松	20.5×20.5×240	2	各桁の中心間隔 1 米
耳桁	杉	11.5×11.5×240	2	
縁材	杉	9×20.2×17.5	4	耳桁と I 型鋼との間
下層鋪板	杉	7.5×18×320	11	中桁に釘付けする
上層鋪板	杉	4.5×18×182	17	下層鋪板に釘付けする
上敷層	軟質トペカ	厚さ 4 cm	1 枚	註 1 參照
下層鋪板に使用せる釘	丸釘	6 寸	88	註 2 參照
上層鋪板に使用せる釘	丸釘	3 寸	188	

註 1. 軟質トペカの配合，

註 2. 試驗は三段にわけ，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裝を施したものに就いて各々載荷試驗を行つたのであるが，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）宛打つた．又上層板は下層板の中心線上に下層板と同樣の間隔を以て打つた．（圖-1 參照）尙桁と I 型鋼との間には石脊を用ひた．

碎石徑 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

施工方法は鐵製手動ローラー（ローラーの直徑 30 cm，ローラーの幅 30.5 cm，重量 73 kg）を用ひ十分輾壓した．

Ⅲ 試 驗 方 法

〔1〕使 用 木 材

鋪板に使用せる杉材の曲げ試驗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.

曲げ破壞强度最大 595 kg/cm²，最小 406 kg/cm²，平均 510 kg/cm².

〔2〕載 荷 方 法

試驗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ペカの上置層をおいた場合に就いて，各荷重と撓みの關係を測定する．

寫眞-1　鋪板試驗裝置

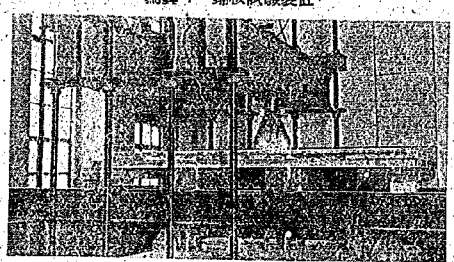
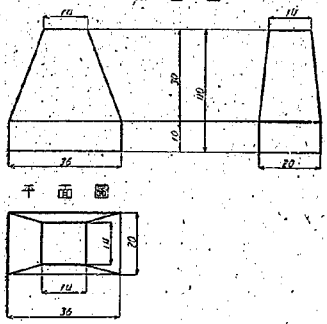


圖-2　加壓用コンクリート塊
（配合 1:2:4 重量 49.5 kg）



試驗機は 75 ton 床版試驗機を使用した．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ひた．（寫眞-1）

〔3〕撓み測定方法

鋪版の下に圖-3 に示す如く測點を設け，ダイアルゲージ（$\frac{1}{100}$ mm 讀み）及びデフレクトメーター（$\frac{1}{10}$ mm 讀み）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）．

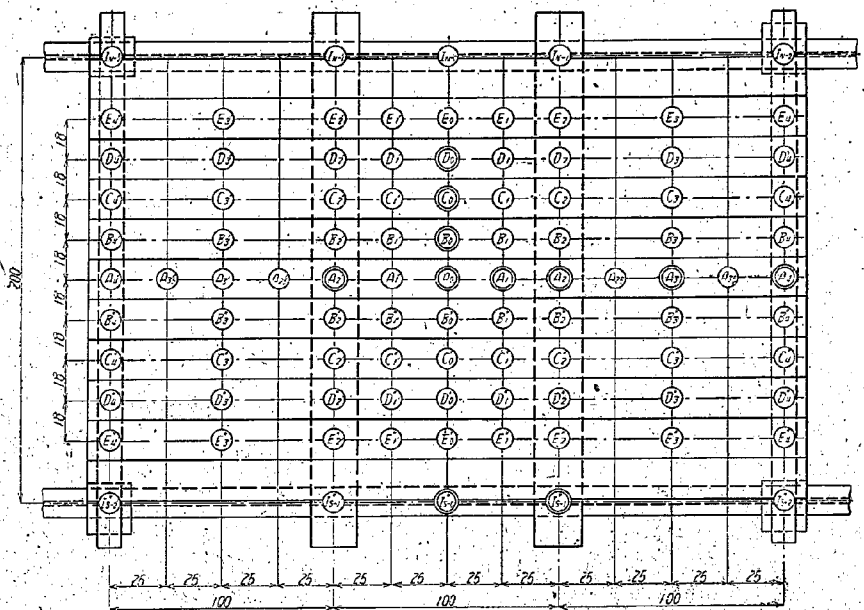
〔4〕破 壞 試 驗

荷重を漸次增加して，龜裂が生じ破壞狀態に達して荷重の上昇がやむ迄載荷を續け，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驗結果

縱桁上中央に唯一枚の鋪板を張り，豫備試驗を行つた結果，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（この範圍では荷重取除後に各部分がもとの狀態にかへる）ので，以下の實驗に於ては載荷試驗の荷重限度は之を標準とした．

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日檢定の結果壓力計 (50 kg/cm$_2$ 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.

$$P = 174.0\,G\ (kg)$$

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

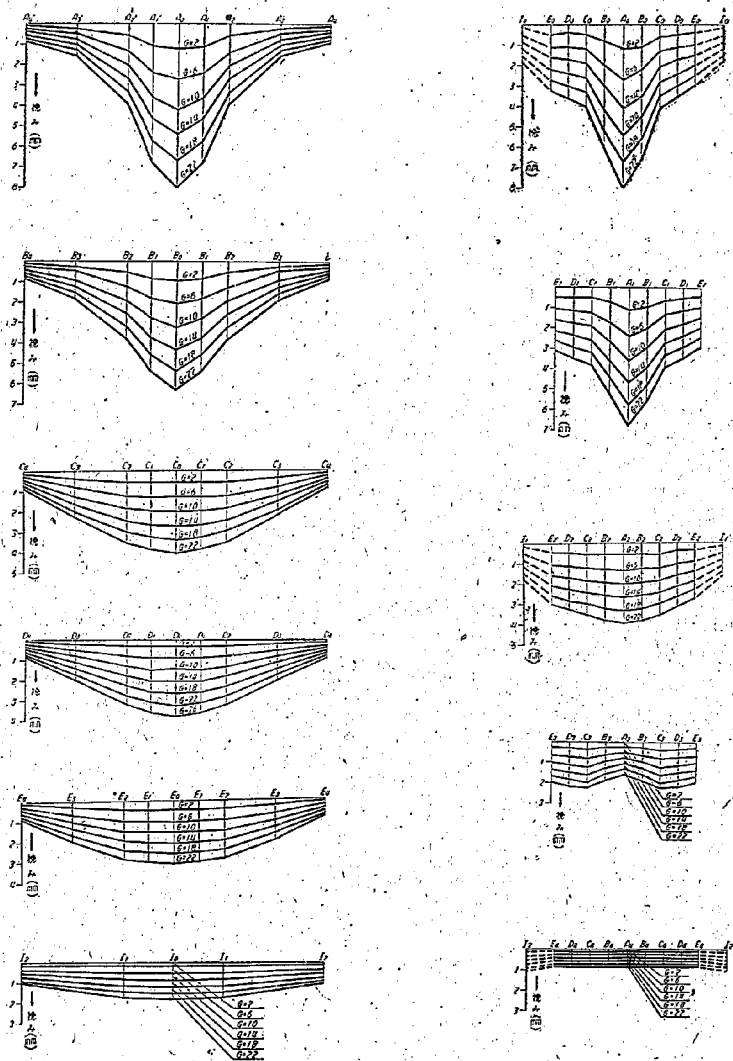
表—2

G(kg/cm$_2$)	P(kg)	G(kgcm^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

各斷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との關係



〔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との關係は圖-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との關係は圖-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

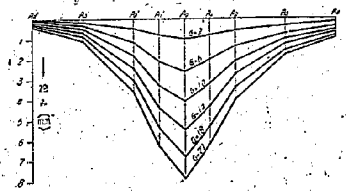
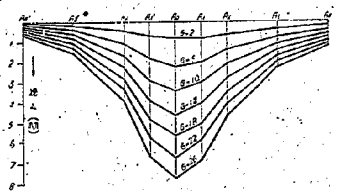
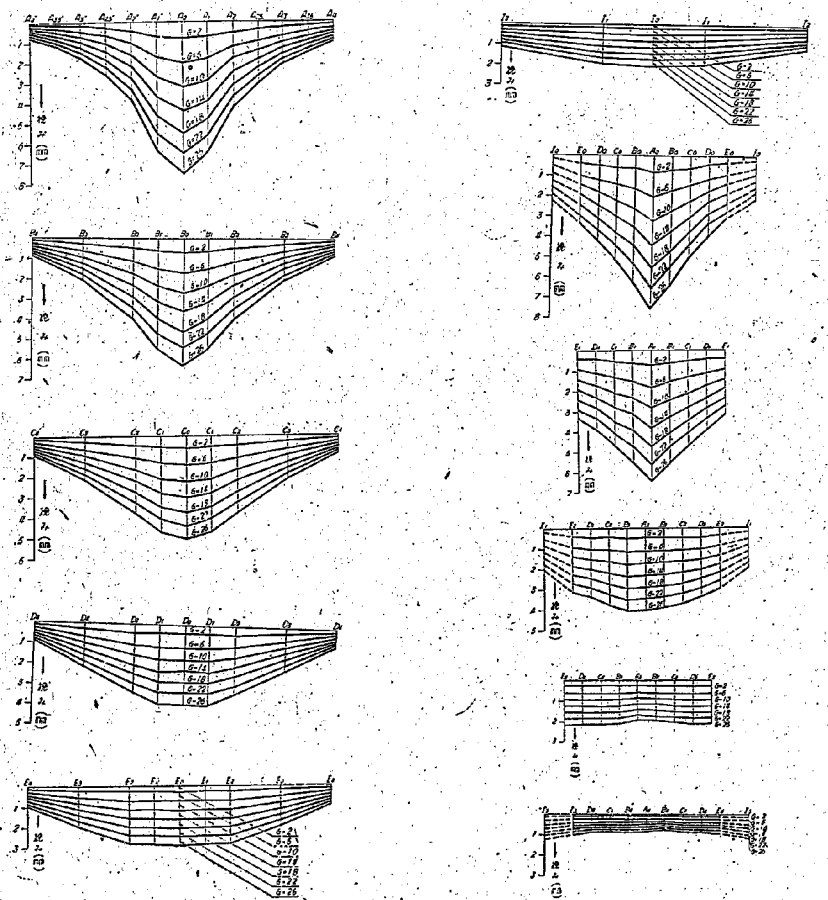


圖-6　上層鋪板の中で中央の3枚を張つた場合の荷重と撓みとの關係



（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 の軟質トペカを施工せる場合の荷重と撓みとの關係の試驗結果は圖-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)の再試驗

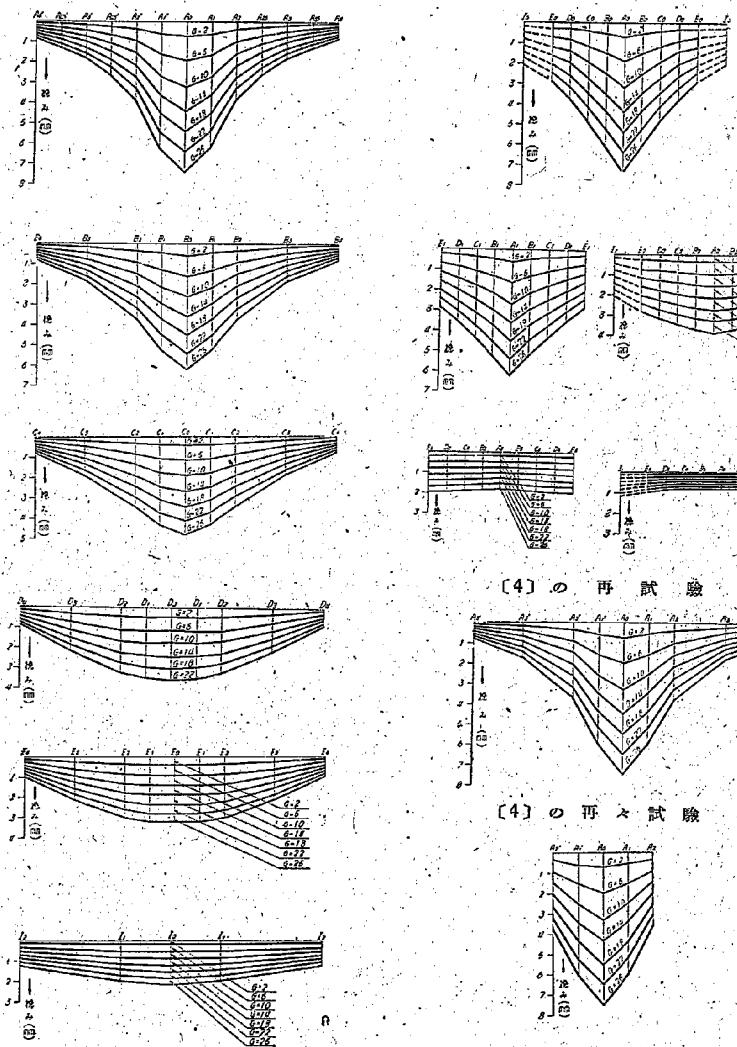
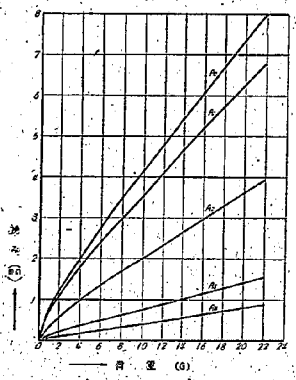


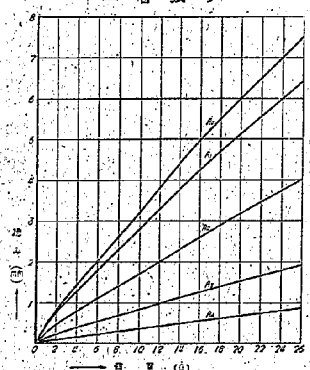
圖-9 は中央鋪板の荷重と撓みとの關係を示すものである.

図-9 中央鋪板の荷重と撓みとの關係

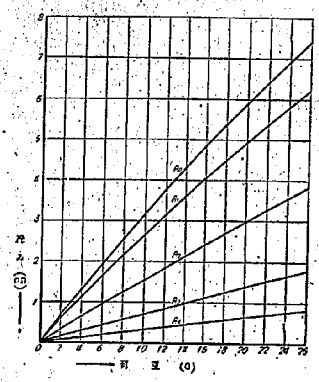
a. 一層張り



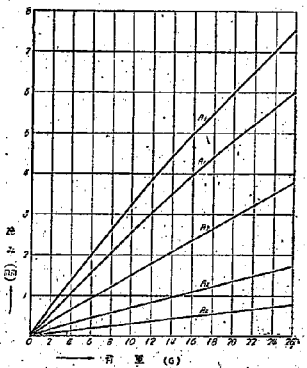
b. 二層張り



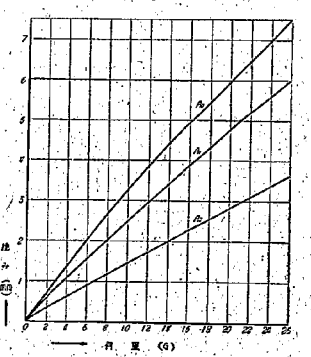
c. (1) 上置層施工



c. (2) 上置層施工再試験

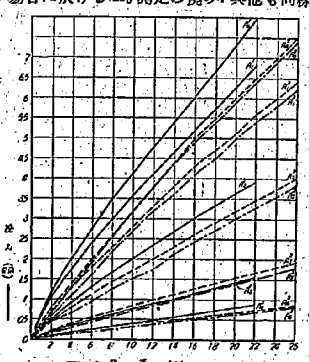


c. (3) 上置層施工再々試験



中央鋪板の撓み比較図 (A_0' は一層張りの場合に於ける A_0 測定の撓み. 其他も同様)

(實線は a. 點線は b. 鎖線は c(1) を示す)



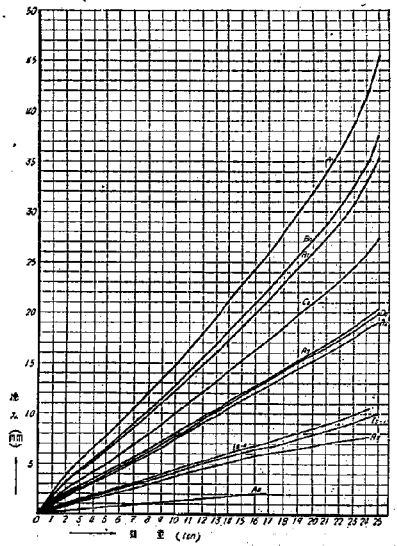
〔5〕 破 壞 試 驗

昭和16年8月28日破壞試驗を行つた.

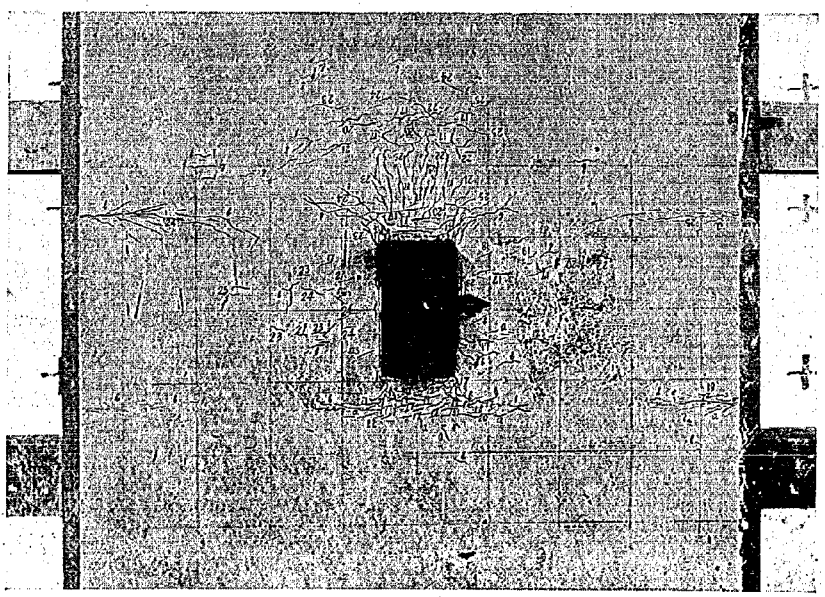
載荷前の上置層の凹みは2mmであつた. 荷重を增すにつれて撓みは增加し, その狀態は圖-10に示す. 實驗に要された時間は55分間である.

荷重7tより荷重增加に伴ひ小音響を發する樣になり, 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擴がり初めた. 16.7tに達したとき その巾が約2mmとなり, 上置層にはA2側に中心線から30cm附近に寫眞-2に見る如く多數の毛髮狀龜裂が發生し初め續いてA'2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兩共に盛んに龜裂の發生を見る樣になつた. B板に於ても23.4tで破壞を初めた. 尙引續き25t迄載荷を續行した. この時上層鋪板中中央の三枚は特に彎曲甚しく, 兩端に於て下層板との間に1~9mmの間隙を生じた. 又耳

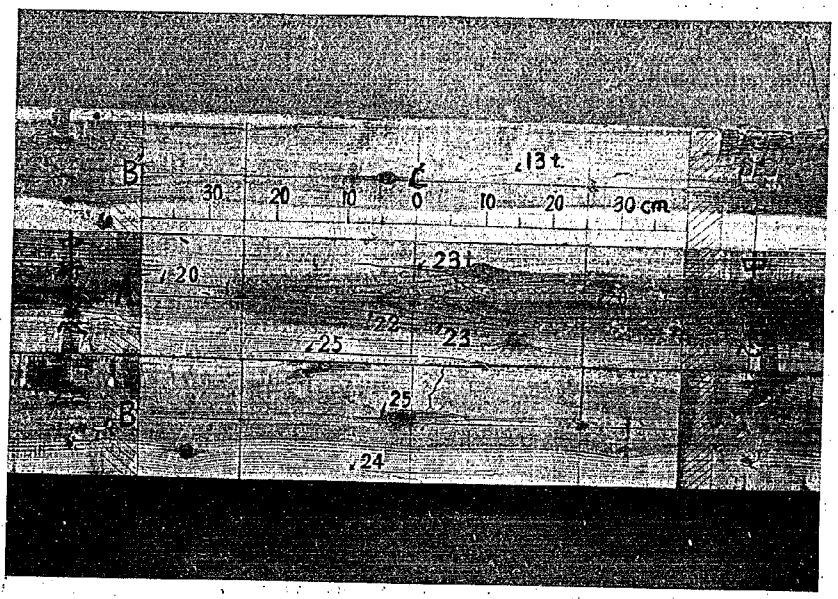
圖—10 破壞試驗に於ける荷重と撓みとの關係



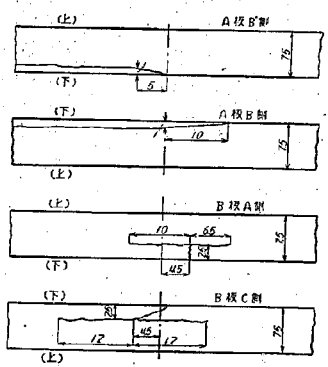
寫眞-2 上 面 の 龜 裂



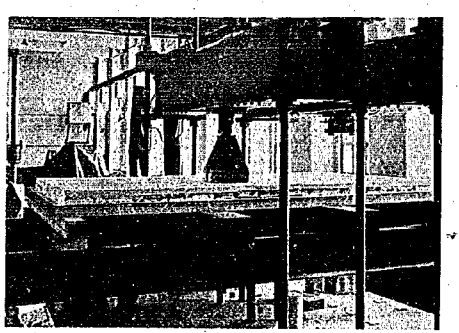
寫眞-3 a. 下層鋪板の破壊狀況（下面）最中央の三枚を示す



b. 下層鋪板の破壊狀況（側面）



寫眞-4 破 壞 狀 況



桁の支點はI桁と 3~6 mm の間隙を生じた. 寫眞に於てa示すのは 25 t 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. 試驗終了後の上壓層の凹み, 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. 試驗結果に對する考察

〔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 として働く．Rost の格點の構造は完全なる鉸でもなく，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．荷重の大さ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……ヤシグ彈性率

I……斷面慣性モーメント

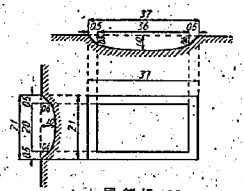
x ……(x_0, x_1, x_2, x_3……) A_0 を原點とせる場合測點の位置

y ……(y_0, y_1, y_2, y_3……) 各 x に應ずる撓み

λ ……$x_1-x_0=x_2-x_1=x_3-x_2=x_0-x_{-1}=x_{-1}-x_{-2}=x_{-2}-x_{-3}=\lambda$ 測點の間隔とすれば(圖-12)

圖-11

a 上置層の凹み



b 上層鋪板の凹み

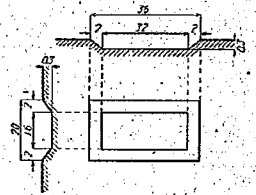


圖-12

$$M=-EI\left(\frac{d^2y}{dx^2}\right)_{A0}$$

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

之より　$$\sigma=-\frac{Eh}{2}\left(\frac{d^2y}{dx^2}\right)_{A0} \quad\cdots\cdots(1)$$

又數値微分法により

$$\left(\frac{d^2y}{dx^2}\right)_{A0}=\frac{1}{\lambda^2}\left\{\Delta^2y_{-1}-\frac{1}{12}\Delta^4y_{-2}+\frac{1}{90}\Delta^6y_{-3}-\cdots\cdots\right\} \quad\cdots\cdots(2)$$

(1), (2) より

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

(3)に於て

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

$$\sigma=44\left\{\Delta^2y_{-1}-\frac{1}{12}\Delta^4y_{-2}+\frac{1}{90}\Delta^6y_{-3}-\cdots\cdots\right\} \quad\cdots\cdots(4)$$

但し，σ は最大曲げ應力度 $\mathrm{kg/cm^2}$

y は各測點の撓み mm

スパン $l=90\ \mathrm{cm}$ 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(kg) を荷重の大さとして，

一層張鋪板に就いては　$\sigma_0=0.0662\,W$($\mathrm{kg/cm^2}$)

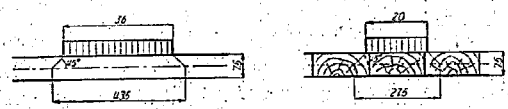
二層張鋪板に就いては　$\sigma_0=0.0466\,W$(〃)

上置層施工後のものに就いては　$\sigma_0=0.0358\,W$(〃) $\quad\cdots\cdots(5)$

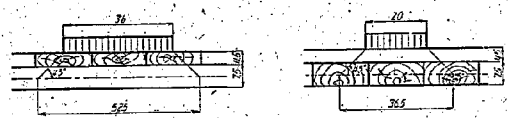
但し荷重の分布は本道路橋設計示方書に示されたる如くであると假定した(圖-13)

圖-13 荷重の分布

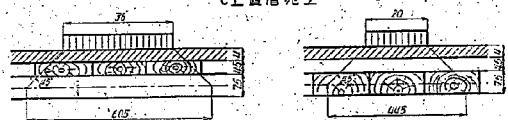
a 一層張



b 二層張



c 上置層施工



(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. 一層張り鋪板曲げ應力度(kg/cm²) 比較表

G(壓力計)	W(荷重kg)	スパン 90cm の埋込梁	スパン100cm の三スパン連續梁	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. 二層張り鋪板の下層板の最大曲げ應力度 (kg/cm²) 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	194	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. 二層張り鋪板に上置層を施せる場合下層中央鋪板の最大曲げ應力度(kg/cm²)比較表

G(壓力計)	W(荷重 kg)	スパン90cmの單純梁 σ_0(kg/cm²)	(1) 實測値 σ(kg/cm²)	$\sigma_0:\sigma$	(2) 實測値 σ(kg/cm²)	$\sigma_0:\sigma$	(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	28	1.3	43	.86	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	88	.85	90	.83
14	2,436	87	72	1.2	198	.89	100	.87
16	2,784	100	82	1.2	108	.93	106	.94
18	3,132	112	86	1.3	115	.97	112	1.00
20	3,480	125	92	1.4	121	1.03	119	1.05
22	3,828	137	98	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.

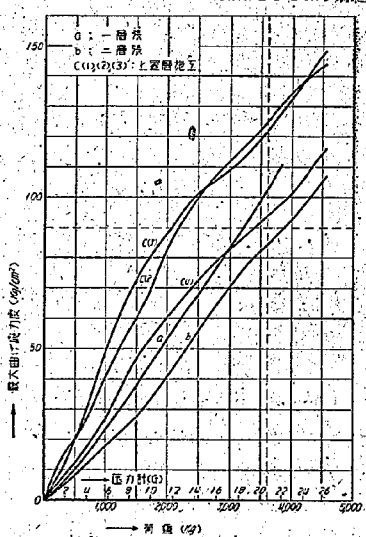
上の結果より次の事が言へる.

(i) 荷重の分布を木道路橋示方書案に示された如くであると假定し, 鋪板のスパンを縱桁間の純距間に 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さ (σ_0 kg/cm²) と實測せる最大曲げ應力度 (σ kg/cm²) との此の値は一層張, 二層張, 上置層施工によつて順次小となつてゐる.

(ii) 荷重の大さと曲げ應力度との關係をあらはす圖-14 をみると, 同一の大さをもつた荷重に對して, 一層張の場合は二層張の場合よりも曲げ應力度は大である. 之は上層板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. 尙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, 載荷面が軟質トペカの場合にはむしろ中心部に應力が集中する結果, 中央下層鋪板には軟質トペカ施工によつてかへつて大きな荷重がかゝるためである. 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

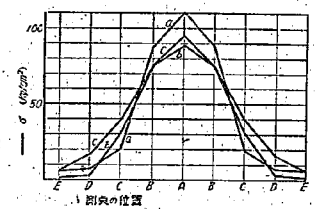


下層鋪板の最大曲げ應力度が一層張，二層張上置層施工に依つて如何樣に變化してゆくかを調べる．$G=22$ ($W=3{,}823$ kg) の場合をえらぶときは次表の如くなる．

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(單位は kg/cm²)

測點	A_0	B_0	C_0	D_0	E_0
一層 a	111	88	20	7	6
二層 b	89	75	31	3	1
上置層 c	95	75	40	16	6

圖-15　下層鋪板最大曲げ應力度比較圖



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縱桁方向の荷重の分布狀態がよくなつて居る．しかしながら前述の如く，こゝに於ても載荷面の狀態，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

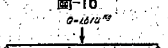
簡單なる假定を設けて撓みの比較を行ふ．荷重 $W=3{,}823$ kg($G=22$)，一層張りの場合計算値に依る撓みの量は，單純梁として 0.72 cm，埋込梁としては 0.17 cm である．之に對して實測値では 0.41 cm となつて居る．

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

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．

圖-16



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，即ち縱桁上の荷重はだんだん廣く分布される事を知る．

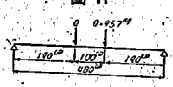
I形鋼に於ては中桁ののる點を荷重點とした單純梁として中央の撓みを出せば 0.183 cm となり，實測の結果は表-6 の如くなる。

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

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)中桁にかゝる荷重は耳桁の荷重に比して比較にならぬ程大きく，鋪板の數を增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．

圖-17



之によつても中桁にかゝる荷重は耳桁にかゝ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ゝる荷重の幾分增大する事が推知される．上述の事は前に示した撓みの實驗結果，及び破壞試驗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數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．

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-18參照)

$$p_x=-ky \qquad (k\text{は比例常數})$$

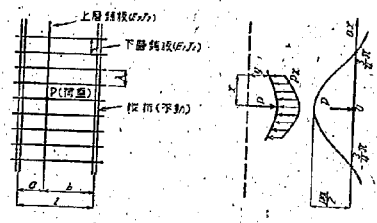
であらはせば，彈性床上の梁の理論により

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

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

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

圖-18

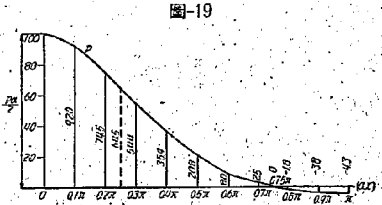


k, α は次の如き常數である.

$$k=\frac{3E_1J_1l}{\lambda a^2b^2}, \qquad \alpha=\sqrt[4]{\frac{k}{4E_2J_2}} \quad \cdots\cdots(9)$$

反力と距離との關係を圖示すれば次の如し.(圖-19)

圖-19



上層鋪板中最中央にのるもの (之をZの板とする) に就いては $k=169$ (kg/cm²), $\alpha=0.045$(cm⁻¹) 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 $k=238$(kg/cm²), $\alpha=0.049$(cm⁻¹) となる.Zの板及Sの板に就いて $\alpha\lambda$ の値は夫々 0.257π 及び 0.282π となる. $\alpha\lambda$ に從つて圖-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 の半分卽ち $\frac{W}{2}$ がかゝり (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ゞ圖-20 及び表-7 の如くなる.

圖-20　反力の分布圖

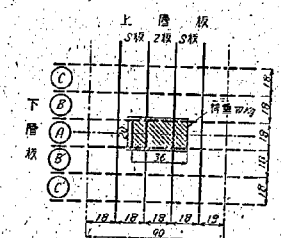


表-7 反力の分布

	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 は上層層施工後の鋪板の載荷試驗結果により，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

$$M_2=\frac{P}{4\alpha}=\frac{0.5W}{4\times0.045}=2.8\,W$$

下層板の最大曲げモーメントは

$$M_1=\frac{90\times0.2\,W}{4}+27\times0.11\,W=7.5\,W$$

最大曲げモーメントの比は

$$\frac{M_1}{M_2}=\frac{7.5W}{2.8W}=2.7$$

兩方の板の最大繊維應力度を相等しくするためには，厚さ（h_1を下層板の厚さ，h_2を上層板の厚さとする）の比は

$$\frac{h_1}{h_2}=\sqrt{\frac{M_1}{M_2}}=\sqrt{2.7}=1.65$$

これより上層板の厚さを4.5 cm とすれば下層板の厚さは7.5 cm にするのが適當であると云ふことができる．實驗結果による最大曲げ應力度の比較は圖-22 によつて示され，本計算のほゞ正しい事が立證される．

圖-21

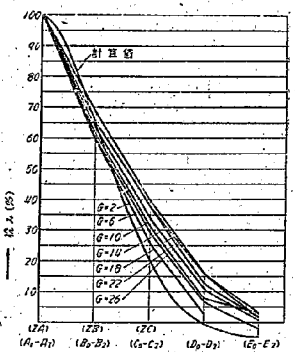
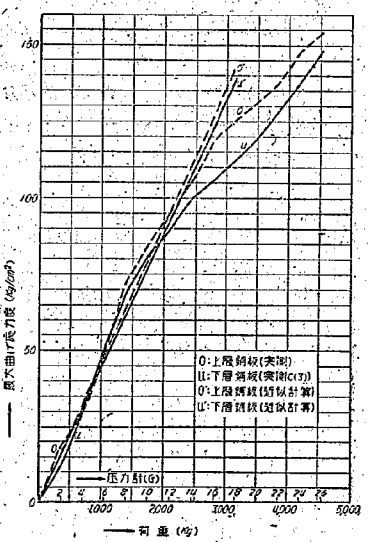


圖-22

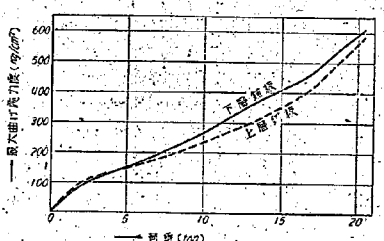
上層層施工後の上下層鋪板の最大曲げ應力度比較



〔4〕 破壞試驗の結果に對する考察

（i） 龜裂の發生し初めたのは16.7 t の時であり，益々龜裂が擴大して最大荷重に達したのは25 t である．此の間に於ては破壞にまつて應力の分布が變化し最大荷重25 t 迄荷重を增加する事ができたのであらう．靜荷重を鋼道路橋第二種自動車荷重(9 t)の後輪の重量 3,600 kg とすれば，破壞に對する安全率は龜裂發生に對して 4.6 最大荷重に對しては7.0となる．荷重に應ずる各點の撓みにより數値微分法を以て荷重を最大曲げ應力度との關係を求めると 圖-23 の如くなる．(圖-23)

圖-23　荷重と最大曲げ應力度との關係



木材の曲げ試驗の結果によれば，破壞曲げ應力度は 510 kg/cm² である本實驗に於て下戸鋪板が曲げ破壞をおこしたと考へてよい事がわかる．

（ii） 龜裂發生の狀態をみると，先づ下戸鋪板の弱點であるかすかな乾割が發達し破壞の口火を切つたものと考へられる．第22圖に見る如く，下層板に働く應力は上層板に働く應力よりもわづかばかり大きいが，兩者は

殆んど同時に破壞狀態に陷る．今の場合は下層板が腹鉛を有して居たがために下層板が破壞し，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．下層板の龜裂の狀態より明かに曲げ破壞であり最大纖維應力による單純引張破壞である事がわかる．

（iii） 桁は中央二本のみが働き，耳桁は荷重を橫桁に殆んど傳へない．

（iv） 上面の龜裂は床部構造全體としての撓み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. 下層鋪板の有效幅に就いて

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效幅を B とする．然るときは次の關係式が成立する．（圖-24 參照）

$$MB=M_0b$$

よつて

$$\frac{B}{b}=\frac{M_0}{M}=\frac{\sigma_0}{\sigma}=n$$

圖-24

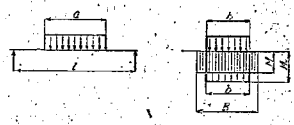


表-8 は實測の結果より板の有效幅 B を求めたものである．

上置層を置いた爲に有效幅が減じたのは一見奇妙であるが，之は

表-8 有 效 幅

	$n=\sigma_0:\sigma$	b(cm)	B(cm)
一層張	2.6	27.5	71
二層張	2.3	36.5	84
上置層施工(1)	1.3	44.5	58
〃 (2)	0.95	44.5	42
〃 (3)	0.93	44.5	41.5

壓々述べた樣に加壓に用ひ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狀態を異にする事，實驗中釘に緩みを生じた事等に依ると思はれる．

Ⅶ. 結　　語

以上の實驗によつて得られた結果を總括すると次の如くなる．

（i） 本試驗に用ひたる如き構造の床部を有する鋪板に於ては內務省土木局昭和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，上置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．

有效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） 破壞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（道路橋標準法荷重，自動車，第二種（9t）荷重の後輪の重量）に達し，計算及び實驗に依る木材の應力度が許容應力度を超過した場合でも尙ほ破壞に對して 4.6 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

內務技手　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場に生ずる誤差……（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$l_1, l_2, \cdots\cdots l_n$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

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

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

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

等種々考へられるが，最小自乘法の原理を適用すれば

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

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

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

間接觀測のもの

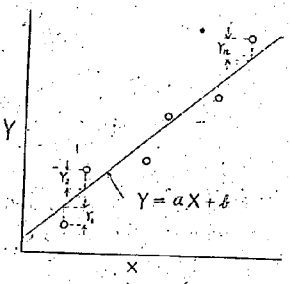
$$Y=aX+b$$

なる直線式で表はせる樣な一系列の觀測値$(x_1, y_1), (x_2, y_2), \cdots\cdots (x_n, y_n)$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

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

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 $r_i=ax_i+b-y_i$ とすれば圖-1 に於て $r_1^2+r_2^2+\cdots\cdots+r_n^2$ が最小であり，$r_1+r_2+\cdots\cdots+r_n=0$ （但し $r_1+r_2\cdots\cdots+r_n=0$ を満足するだけの直線は他に無數に存在し得る）となる．即ち多數の觀測値 (x_1, y_1) (x_2, y_2) 等の y の値を

圖-1



$$Y=aX+b$$

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觀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，換言すれば最小自乘法で $Y=aX+b$ なる直線を算出したとき，此線の附近に散つてゐる觀測値を直線の方向に並行に移動して X の或る任意の値の一線上に集めれば，それ等の觀測値とそこでの直線の位置との關係は一つの量の直接觀測値に對する算術平均値と同樣に考へられ，間接觀測のときでもその殘差だけに着目すれば直接觀測と同じ理論で扱へることを示す．

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

〔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

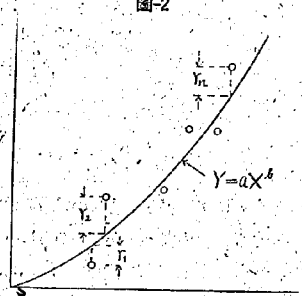
$$Y=aX^b$$

なる曲線で表はし得る樣な多數の觀測値から最小自乘法に依り a 及び b を決める場合は

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

を最小にする a と b とを求めればよいので，若しこの條件を滿足する a 及び b が何等かの方法で得られたならば，圖-2 に就いて見ればその曲線 $Y=aX^b$ の上下に散在する多數の觀測値の殘差即ちその曲線からの距たり，r_1, $r_2\cdots\cdots r_n$ の自乘の和が最小となり，$r_1+r_2+\cdots\cdots+r_n=0$ となる筈である．然るに此樣な指數型の實驗式の場合は常數 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

圖-2



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

と置き換え，$x_1, x_2, \cdots\cdots x_n$ 及び $y_1, y_2, \cdots\cdots y_n$ 等の對數を先づ求め，此對數を觀測値の如く扱ひ直線式として b 及び $\log a$ を求め

$$Y=aX^b$$

を決める方法が行はれるが，此如く觀測値の對數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，その直線と各觀測値（の對數）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，最小自乘法で直線を決定した場合この自乘の和が最小にはなつてはゐてもこれは後に說明する如く眞數に引戻し曲線としたとき最小自乘法の原理である所の「殘差の自乘の和が最小」といふ條件には適合しなくなる．

此關係を簡單な例で示せば，$\log y_1$ 及び $\log y_3$ 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 $y_1, y_2 \cdots\cdots y_n$ に對し夫々 $x_1, x_2 \cdots\cdots x_n$ を得たとき最小自乘法で a を求むれば

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

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乘法により a を求むれば

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

故に

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

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と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，最小自乘法の原理に適合する最確値は前述の如くその算術平均

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

となるが，觀測値の對數をとり最小自乘法の條件を滿足する最確値を求むれば

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

$$= \sqrt{(y+py)(y-py)} \quad = y\sqrt{1-p^2}$$

$$\cdots\cdots (4)$$

即ち二つの觀測値の幾何平均となり，(3)の場合に比し $\sqrt{1-p^2}$ を乘じただけ異つて來る．玆に 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

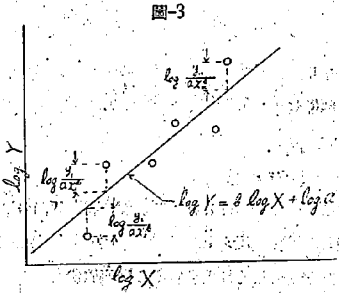
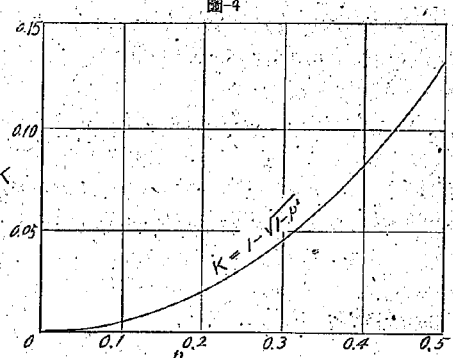


圖-4



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

となり，之を圖示すれば圖-4の如く p の增加に從ひ K は急速に增大する．

間接觀測のもの，間接觀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觀測値を得たとき，眞數のまゝ圖示すれば圖-5 の如くなり $+py$ なる誤差を有する觀測値群は

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

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．然るに各觀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，$+py$ なる誤差を含む觀測値の對數は

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

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，$-py$ なる誤差を含む觀測値の對數は

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

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．

圖-5

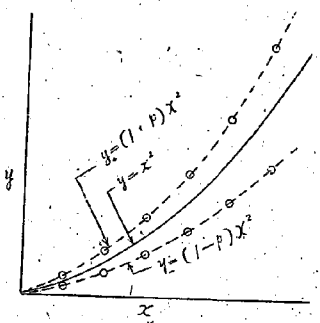
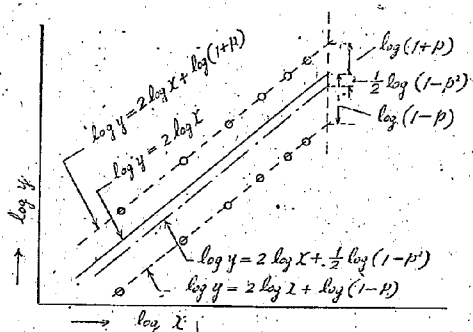


圖-3



そこで觀測値の對數から最小自乘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．即ち斯の如き場合觀測値の對數を採つて最小自乘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乘法の原理である「殘差の自乘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．

間接觀測の一例，今こゝに

$$y=x^2 \quad \cdots\cdots(5)$$

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，

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數をとつて最小自乘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んでゐないから

$$y=ax^b$$

と假定して計算すれば

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

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

$$y+0.1\,y, \qquad y-0.1\,y$$

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數をとつて前同樣最小自乘法計算を行へば

$$a=0.995, \qquad b=2.$$

となり，此結果觀測値そのまゝの殘差の自乘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

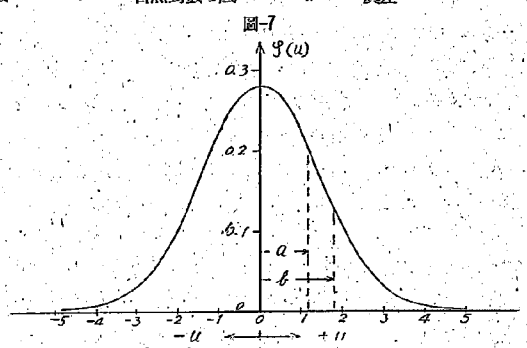
$$\varphi(u)\sqrt{\frac{1}{\pi}}he^{-h^2u^2}$$

但　π……圓周率　　h……常數　　e……自然對數の底　　u……眞差

$\varphi(u)$……uの函數で　$h=\frac{1}{2}$

とすれば圖-7の如し

圖-7



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說明は略すがこれは$u=0$を中心に左右對稱で，此曲線內の面積は$u=+\infty$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$+b$との間に存在す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數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．從つて正常分布のものでも觀測値の對數をとつて最小自乘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

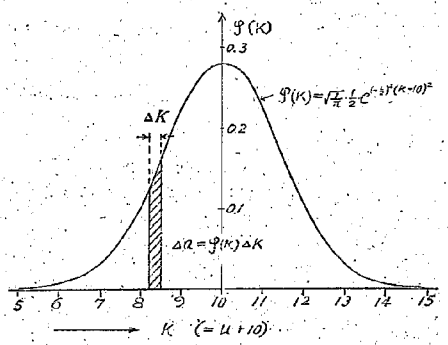
測値を算術平均したもの（之は對稱形なる故に $u=0$ と一致する）と幾何平均したものとの差だけの誤差を生ずる．而して算術平均と幾何平均との差は，正負同量誤差の場合圖-4の如く算術平均値（最確値）と觀測値との差（殘差）の算術平均値に對する比（p）の函數で表はされる故に，圖-7の如く觀測誤差 u の分布狀態が定つてゐても $u=0$ なる點の位置に依り，即ち測定されるものゝ眞値の大小に依り，誤差の大きさの眞値に對する割合（p）が異り從つて算術平均と幾何平均との差も異ることになる

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

$$\varphi(K)=\sqrt{\frac{1}{\pi}}\cdot\frac{1}{2}\cdot e^{(-\frac{1}{8})^2(K-10)^2}$$

なる曲線は圖-8 の如くなり，これは圖-7 の誤差曲線と同樣な誤差の正常分布曲線である．

圖-8



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 の對數の算術平均を求めたものゝ眞數とを比較するに，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內全域に亙り集め之を曲線內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．

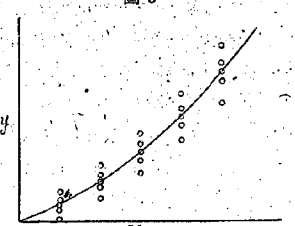
之に對し觀測値の對數の算術平均は

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

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）觀測値の對數の平均値 0.9944 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．

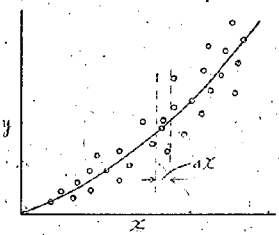
間接觀測のもの，間接觀測のものでもその殘差だけに着目すれば直接觀測のものと同樣に考へられることは前に述べた通りであるが實際問題として圖-9 の如く x の方を或る間隔に區分して各 x に對し y を多數觀測する場合もあり，此場合各 x に對する多數の y の觀測値は一つの量の直接觀測の如く誤差の分布もガウスの誤差法則に從ふものと考へられる．若し又一般の場合の如く x の任意の値に對し各々 y を觀測する場合でも圖-10 の如く Δx の間にある y の値を考へるとき觀測數を非常に多くし，Δx を小さくとつて行けば結局前同樣に考へられ，間接觀測のときでも對數をとつて最小自乘法計算を行つた爲めの誤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從つて增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乘法で指數實驗

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單な關係でなくなるが，その樣な場合の檢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乘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，計算定曲線に對して最小自乘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．

土壌特に黄土の熱的特性に關する實驗的研究

內務技師　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隙率及び含水量の影響に就いて……（15）
Ⅴ　要　　約……（18）

緒　　言

土壌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．蓋し力學的特質の如く直接な影響を建設物に及ぼす事少く，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壌判別の資料に常に供せられてゐる．然るに最近土壌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壌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溫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なるを必要とする等土壌の熱的特性が重視考慮さるゝに至つた．斯かる現狀なれば單に漫然と數表の數値を使用する事なく，一應地方により土壌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殊固め壁抑條壁土造等土壌を直接利用せるもの多く，其の熱的特性に應じ其の構造が考察され定められるべきである．元來土壌の熱的特性は熱容量熱傳導度溫度擴散率により判別されるが，此等は土壌の構成要素なる例へば鑛物的要素によるも土壌の如き生熟過程を有する物質に就ては頗る複雜緩昧の點多く，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．

建設材料としての熱的特性の熱容量熱傳導度溫度傳導度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暖の差異に關する感應度，保溫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．本報告は二三の土壌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種は所謂黃土（壜斯）と稱せられてゐるもので，1種は關東ローム（壜塀）である．4種共濃淡異るも共に黃褐色の土壌にて，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．黃土資料は（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參照されたし．

資料名	記號
1) 山西省芹縣黃土	L_A
2) 北京郊外黃土(主として煉瓦製造用)	L_B
3) 北京郊外黃土	O
4) 東京關東ローム	赤土

各資料に就きて本實驗に必要なる特性並に土壌(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．

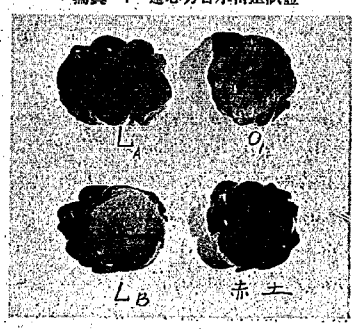
眞比重，液性限界，可塑性限界，收縮限界，遠心力含水等量，水素イオン濃度（P_H 値）等**

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，P_H 値は指示藥法(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壌學會法式に據る．赤土の場合キンヒドロン電極，水素電極法にて測定せしも略 P_H 5.5 の近くの値を示せり．實測値は取纏め表—1に示す．

表—1

	L_A	L_B	O	赤土(ローム質)
眞比重 ρ_t	2.62	2.64	2.69	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	13.9	26.4	63.0
遠心力含水當量(%)	8.98	21.6	6.27	56.2
P_H 値	7.6～8.0	7.7～7.6	8～8.5	5.5

寫眞—1 遠心力含水當量試驗



寫眞—1 は遠心力含水當量試驗直後の試料狀況を示すもので表—1 に於ける同當量%値と比較する事により黃土系のものと關東ロームとは可成り異る成熟過程にある土壌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]=[ρc]，熱貫流抵抗としては直接 $1/\lambda$，地下氷結には温度波長 $\lambda=k\sqrt{2\pi\tau}$ が利いて來る．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．

** 機械分析精果は一應福島技師報告（土木試驗所報告第61號）を參照され度し（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單に記述す．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．資料は常に篩 30 番以下の風乾狀態より絕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槽に移し同樣の測定を爲す．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 の眞鍮中空圓筒に適當に含水せる試料を三層に分ち，一定の壓力にて塡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

$$\Sigma I\,(r)=\sum_{s=1,2,3,\cdots}^{\infty}\frac{2}{\lambda_s J_1(\lambda_s)}J_o\left(\frac{\lambda_s}{a}r\right)e_2^{-k^2\left(\frac{\lambda^2 s}{a^2}\right)t}$$

J_0, J_1,…; 0, 1,…次ベッセル函數，λ_s; $J_0(\lambda_s)=0$…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^2t 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

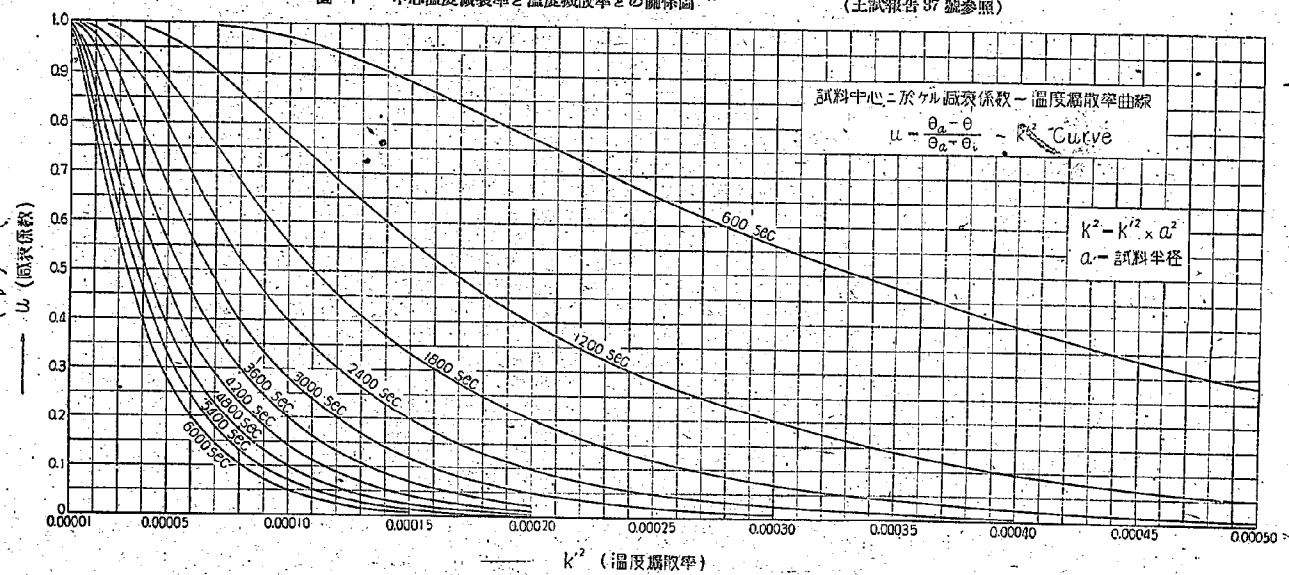
土壌の比熱は其の含水量の影響は勿論大なるも組成により著しく異るものである．例へば砂土質，粘土質にては重量當り後者が 40% も大なる値をとる事は一般に認められてゐる．更に腐植土等の混入する事により値の增大するものである．即ち該土壌の成因並に地方により異るも，其の範圍は約 0.19～0.4 cal/gr. のものゝ樣である．

本實驗は風乾乃至絕對乾燥に近き 0.5% 以下の含水せる資料の粉末を同心圓筒を有する直徑 30 mm，高さ 72 mm，厚さ約 0.38 mm のアルミニウー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 $\Delta t=1$～2°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．攪拌關回轉速度其の他測定操作は從來通りとす．

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關する研究，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　中心溫度減率と溫度擴散率との關係圖　（土試報告37號參照）



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

從つて一般に含水量及び見掛比重の與へられた土壌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．

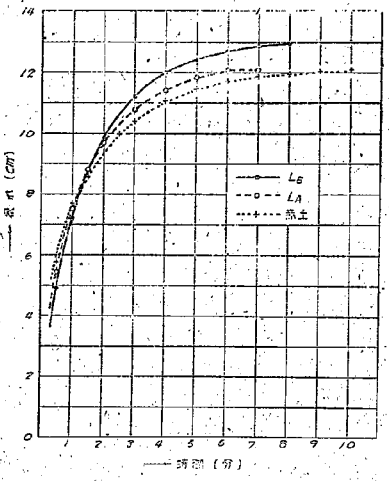
〔2〕 温度傳導率並に熱傳導度

實驗方法は簡單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%以下の風乾土壌の所謂團粒組織の充分破壞せるものを，眞鍮製內徑 5 cm，內高 12.1 cm の容器に可及的一樣に填充せんと試みしも種々異なる空隙狀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裝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．重量及び嵩容積より見掛け比重 (ρ_a) を求め，間隙率（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 は可成り異る事あるも其の一例として，L_A 及び L_B の含水狀態に於ける結果を示すに表—3 の如し．斯る程度の一樣性である水の混和には特に細心の注意を拂ふ．後單に平均値を以て示す．L_A, L_B の常所到着當時の間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，且つ本試驗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說明せるを以て省略するも，含水狀態の間隙率の計算は便宜上，下式

$$P=\left[1-\frac{\rho_a}{\rho_t}\left(1-\frac{W_w}{W_s+W_w}\right)\right]$$，(但し，ρ_a; 見掛比重，ρ_t; 眞比重，W_s; 土の固形重量，W_w; 含水重量等を示す)…により計算せるもので，上式誘導方式より明かなる如く水が單に容積的に加算され場合には斯かる狀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

$P'=\rho_a\frac{W_w}{W_s+W_w}$ で與へられる含水容積に相當する P' を減ずる必要がある．兩者共に便宜上の式なる事を常に顧慮しつゝ試驗結果を批判する事とする．後節 $P-P'$ を特に空間率と稱へた．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
	15	1	1.86
		1—2	1.80
		1—2—3	1.88
L_B	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	1.59
		1—2	1.61
		1—2—3	1.61

備考 O」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（後節參照）

* 福島技師：黄土路床土の固結安定に關する基礎試驗及び調査，土木試驗所報告第 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続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

資料とし風乾狀態のもの並に含水量重量比にて 5, 10, 15% のものを夫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…$\rho_t C(1-P)+P'$…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 %	見掛比重 ρ_a	間隙率 P	含水容積 P'	空間率 P—P'
1	0	0.93	0.65		0.65
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

備考　眞比重 (ρ_t); 2.6

表—5 L_A 熱容積 [W] g. cal./cm³

番 號	含水量 %	見掛比重 ρ_t	[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

以下試驗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, 中心温度の變化を觀測し後更に高温槽より低温槽 (θ_c) に移し同樣の事を繰返す. 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.

圖面の橫軸には時間をとり, 縱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るも, 温度差 $\theta_h-\theta_c$ との比をとれば縱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温度傳導率 k'^2 の値をも記入す. 但し單位温度傳導率 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き場合は低温度~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 $k'^2\times10^{-4}$

時間 min. / 試驗名	2	4	6	8	10
1 號　$\theta_c\to\theta_h$	2.9	2.8	2.8	2.7	2.8
$\theta_h\to\theta_c$	2.9	2.9	2.8	2.7	2.7
2 號　$\theta_c\to\theta_h$	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温度に達するまでも温度傳導率が不變の樣である. 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.

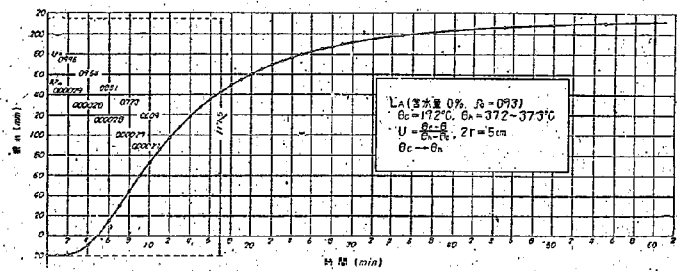
更に同樣の試驗を 5, 10, 15% 含水せるものに就き行ふ. 略同樣の傾向を示すも算定される温度傳導率 k'^2 は温度變化の順位により著しく異るもので, 低温より高温に移せし場合が一般に大きく測定されてゐる. 圖—3 c, d は此等の温度傳導の一例を示すもので, 表—7 に其の傾向を示す. 約 20 分程度で供試體全體の温度が同樣となる.

* C. G. S 單位とメートル實用單位との關係式を示し置く.

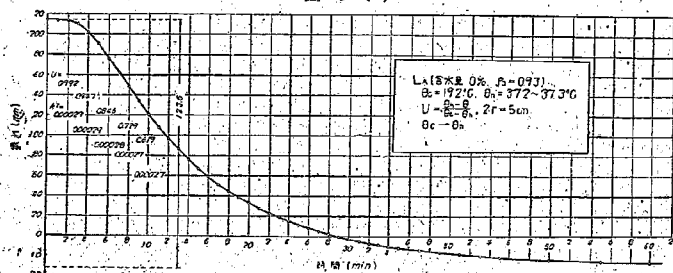
熱傳導度率 ; $\lambda\left(\frac{K.\ cal.}{m.\ hr.\ °C}\right)=\lambda(\text{C.G.S.})\times10^2\times3.6$

温度傳導率 ; $k^2\left(\frac{m^2}{hr.}\right)=k^2(\text{C.G.S.})\times3.6\times10^{-4}$

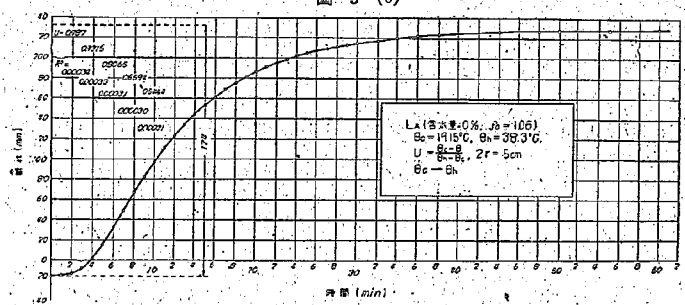
圖—3 (a)



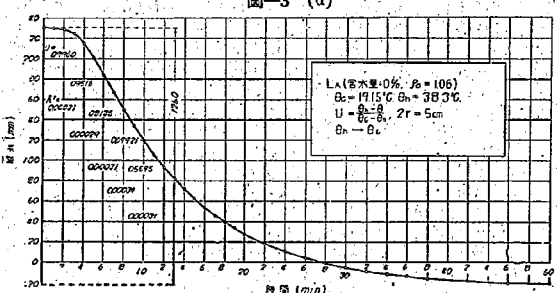
圖—3 (b)



圖—3 (c)



圖—3 (d)



表—7　$k'^2\times10^{-4}$

試驗名 ＼ 時間 min.		2	4	6	8	10
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.)

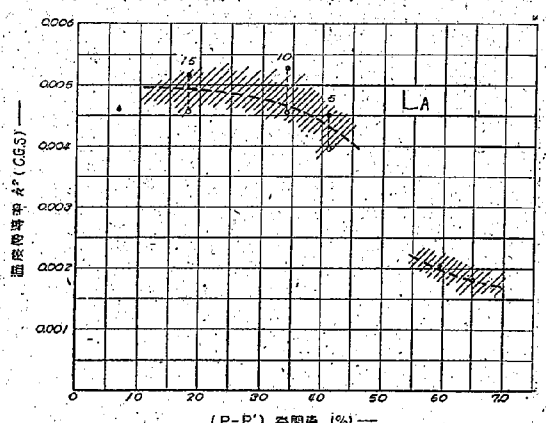
番號	λ (C.G.S.)
1	0.00045
2	0.00061
3	0.00199～0.00175
4	0.00274～0.00235
5	0.00334～0.00295

各實驗値の平均値より温度傳導率 (k^2) を算定す ($k^2=k'^2\times$ 牛徑^2). 表—8 に此等の結果を示す. 含水狀態に於ける二樣の値は其の儘一應記載す.

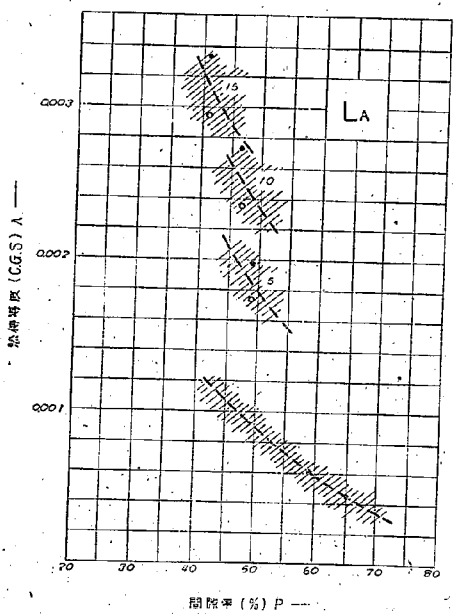
同表値の二樣記載せるは温度變化方向の異るに從つて異る温度傳導率を示す場合にて, 前者は低温より高温に移す ($\theta_c\rightarrow\theta_h$) 場合で, 後者は其の逆の場合である. 表—8 の値と表—5 に示す熱容量 [W] より k^2 [W] 即ち熱傳導度 (λ) を容易に算定し得. 表—9 に此等を示す. 同表中二樣の値あるものは總に述べしものと同じ意味である. 表—8, 表—9 の結果と空間隙率 $P-P'$, 及び間隙率 P との關係を圖—4 (a), (b) に示す. 此等 $k^2\sim P$, $\lambda\sim P$ の關係はセメントペースト等の如き場合に比較するに可成り複雜せるものである. 勿論既に曩々述べし如く, 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釋は之を爲し得. 元來土壤含水狀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.

全く同樣の實驗を他の資料 L_B, O, 赤土に就いても行ふ. 温度傳導率, 熱傳導度の實驗操作, 温度其の他間隙

圖—4　(a)　温度傳導率 k^2 と空間率 $(P-P')$ との關係



圖—4 (b) 熱傳導度 λ と間隙率 P との關係



率に對する影響も類似せるもの多し. 簡單に結果のみ記述す.

2) L_B 試驗結果

供試體の見掛比重 ρ_a, 間隙率 P, 空間率 $P-P'$, 含水量は表—10 に示す.

更に熱容量 [W] は土壌固體部比熱 $C=0.29$cal/gr. を下式 $\rho_t C(1-P)+P\cdots$ に代入し容易に計算し得. (表—11) 各記號に就ては上述參照.

表—11 熱 容 量 表

番 號	含水量 %	熱 容 量 [cal./cm³]
1	0	0.237
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 h'^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_t	間隙率 P	含水容積率 P'	空間率 $P-P'$
1	0	0.84	0.311	0.68	—	0.68
2	0	1.35	0.517	0.483	—	0.517
3	5	1.38	0.521	0.50	0.066	0.434
4	10	1.55	0.595	0.46	0.142	0.358
5	15	1.60	0.62	0.47	0.206	0.264
6	18	1.81	0.685	0.42	0.274	0.146

備考　但し眞比重 $\rho_t=2.64$ 全加壓力 64 kg.

表—12 h'^2 溫度傳導率表 ($h'^2\times10^{-4}$. 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→35.4°C)	—	—	—	—	2.75
	$\theta_h\rightarrow\theta_c$(35.4→21.7°C)	—	2.9	2.8	2.8	2.7
2	$\theta_c\rightarrow\theta_h$(22.0→35.2°C)	—	3.8	3.2	3.0	3.0
	$\theta_h\rightarrow\theta_c$(35.2→22.0°C)	—	3.8	3.2	3.0	3.1
3	$\theta_c\rightarrow\theta_h$(21.3→38.8°C)	4.6	4.0	4.8	4.8	4.9
	$\theta_h\rightarrow\theta_c$(38.8→21.3°C)	4.7	4.3	4.3	4.3	4.3
4	$\theta_c\rightarrow\theta_h$(26.5→41.3°C)	6.1	5.8	5.6	5.5	5.5
	$\theta_h\rightarrow\theta_c$(41.3→26.5°C)	—	5.8	5.6	5.2	5.2
5	$\theta_c\rightarrow\theta_h$(21.1→39.7°C)	5.8	6.2	6.2	6.2	6.2
	$\theta_h\rightarrow\theta_c$(39.7→21.1°C)	5.8	5.7	5.5	5.3	5.4
6	$\theta_c\rightarrow\theta_h$(27.0→40.4°C)	6.8	6.7	6.7	6.7	7.0
	$\theta_h\rightarrow\theta_c$(40.4→27.0°C)	6.5	6.2	6.0	6.1	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 %	温度傳導率 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	0.00386~0.00336	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樣と見做して取扱ふ．平均値をとり温度傳導率 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．

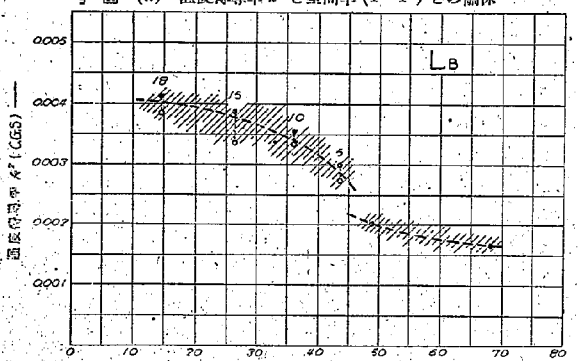
此等の値と間隙率 P の關係を圖示するに圖—4 (a)，(b) の如く，其の傾向は L_A の場合と類似してゐる．

(3) O 試驗結果

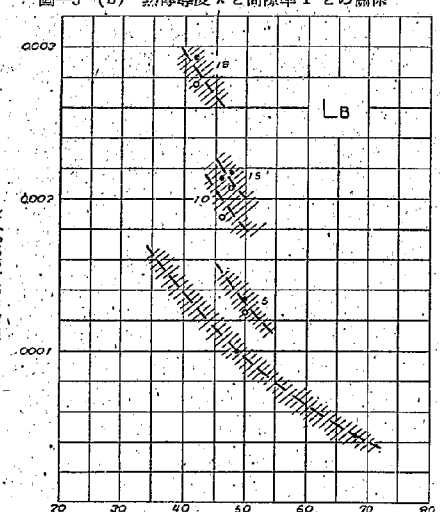
供試體製作其の他取扱ひ等は總て前回と同じ．先づ見掛比重 ρ_a，間隙率 P，空間率 P−P'，含水量等を一纏めとし表—14 に示す．

更に熱容量 [V] は，土壤固體部比熱 c=0.274 cal./gr. を下式 $\rho_t C(1-P)+P\cdots$ 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．

5—圖 (a) 温度傳導率 k^2 と空間率 (P−P') との關係



圖—5 (b) 熱傳導度 λ と間隙率 P との關係



表—14 O 供試體表

番號	含水量 %	見掛比重 ρ_a	ρ_a/ρ_t	間隙率 P	含水容積率 P'	空間率 P−P'
1	0	0.955	0.356	0.65	—	0.65
2	0	1.20	0.446	0.54	—	0.54
3	5	1.46	0.545	0.482	0.069	0.413
4	10	1.57	0.585	0.47	0.144	0.33
5	15	1.46	0.545	0.525	0.19	0.335

但し眞比重 ρ_t=2.69、
金加壓力 64 kg

表—15 熱容量表

番號	含水量 %	熱容量[cal/cm³]
1	0	0.256
2	0	0.337
3	5	0.449
4	10	0.478
5	15	0.48

温度傳導率 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 I_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, 及び熱導傳度 λ を算定するに下記表—17 の如し．

表—16　k^2 温度傳導率表 ($k^2 \times 10^{-4}$ C.G.S.)

番號	實驗條件	時間 (min.) 2	4	6	8	10
1	20～39.3°C			3.3		
2				3.56		
3	$\theta_c \rightarrow \theta_h$ (24.9→38°C)	8.4	8.2	8.7	9.0	9.0
	$\theta_h \rightarrow \theta_c$ (38→24.9°C)	8.	7.5	7.7	7.8	7.5
4	$\theta_c \rightarrow \theta_h$ (21→37.8°C)	7.7	7.5	7.4	7.4	7.5
	$\theta_h \rightarrow \theta_c$ (37.8→21°C)	7.	6.3	6.0	5.7	6.2
5	$\theta_c \rightarrow \theta_h$ (20.8→38°C)	7.7	7.7	7.5	7.5	7.6
	$\theta_h \rightarrow \theta_c$ (38→20.8°C)	—	6.9	6.5	6.3	6.7

表—17　O 温度傳導率 k^2 及び熱傳導度 λ 表

番號	含水量 %	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 及び空間率 (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 と增大せるも 1, 2, 3 層位にて平均密度順次增大し，未だ平衡狀態に達せず．供試體内一樣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．資料種類 表—18 の如し．

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.	290	296	291
水 gr.	14.5	29.6	43.5
填充容量 c.c.	211	208	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	1.56	1.64

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

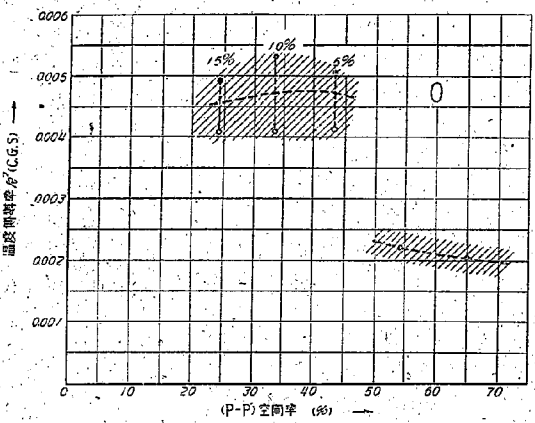
含水率…(90.4kg壓縮)	5	10	15
[W] g.cal/cm³	0.421	0.529	0.612

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

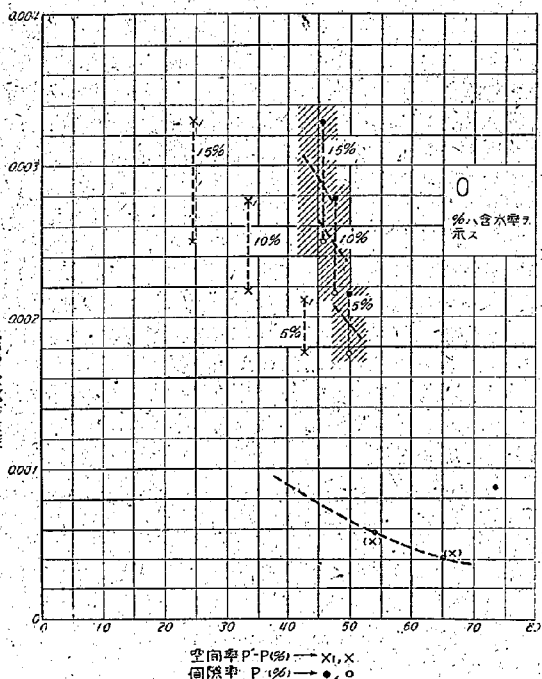
表—20　O 温度傳導率 k^2 及び熱傳導度 λ 表

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	0.0028～0.00216	0.0033～0.00248

圖—6 (a) 温度傳導率 k^2 と空間率 (P—P') との關係



圖—6 (b) 熱傳導度 λ と間隙率 (P) との關係



求め得. 表—20に此等の結果を取纏め記載す.

此等再試驗のものと風乾資料によるものとの結果を取纏め, 圖—6 *a*, *b* の如き k^2~P, λ~P 及び λ~(P—P') の關係を得.

(4) 赤土 試驗結果

本實驗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眞比重は夫々下記の如く異るものである.

	眞 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と, 各種含有水量のものとを作る. 充分に一樣に混和せる土壤を木片にて容器に詰込みしもので重量關係よりする土壤構成の土壤固體部, 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樣である.

表—21, 22 に此等の關係と實測されし平均温度傳導率 k^2 の値を記入す. 温度傳導率は θ_c=20°C~θ_h=35°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O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傳導率の著しく大なる事が分る. 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
33.8	29.4	36.8	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	0.00139
34.8	—	65.2	0.00139
32.7	—	67.3	0.00130
39.0	58.5	2.5	0.00217
33.3	63.4	3.3	0.00205
36.2	57.3	6.5	0.00208

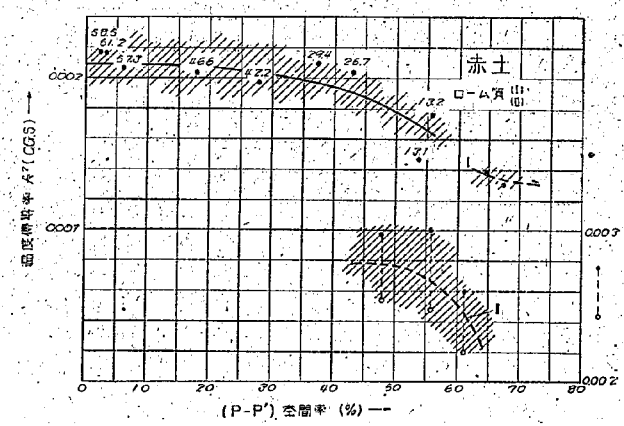
表—22　赤土(砂質ローム)温度傳導率 k^2 表 (2)

容積比%			温度傳導率 k^2 (C.G.S.)
土	水	空隙	
64.4	19.9	16.7	0.00664
64.6	25.2	10.2	0.00673
64.6	26.8	8.6	0.00656
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

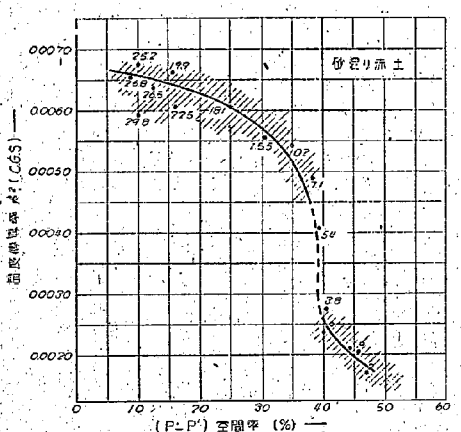
ものは風乾程度に乾燥せるものである．横軸に空間率をとる．

更に熱容量 [W]，並に熱傳導度 (λ) を算定せん．[W] は曾々述べし如く，$\rho_s C(1-P)+P\cdots$ 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



圖—8 赤土(砂質赤土)溫度傳導率 k^2～空間率 關係



表—23 ローム質赤土熱容量

[W] g.cal./gr. $\rho_t=2.37$; $C=0.44$

容積比 土	容積比 水	[W] g.cal./cm	容積比 土	容積比 水	[W] g.cal./cm
0.354	0.466	0.834	0.354	—	0.368
0.356	0.612	0.983	0.348	—	0.363
0.338	0.294	0.647	0.327	—	0.340
0.334	0.131	0.478			
0.300	0.422	0.734	0.390	0.585	0.991
0.304	0.267	0.583	0.333	0.634	0.980
0.316	0.132	0.460	0.362	0.573	0.950

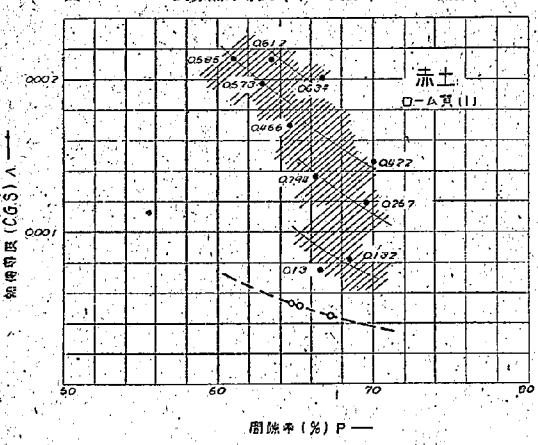
熱傳導度 (λ) は [W] k^2 より容易に求め得. 表—21 に此等の結果を示す.

稿に述べし如く熱傳導度 (λ) と間隙率 P の關係を圖示するに圖—9 に示す如く兩者の間に密接なる關係の存在せる如く, 同圖中測點に記入せる數字は含水量を容積比にて示すものである.

同圖中點線は室乾資料に就ての λ—P を結べる曲線で, 理論的意義を有するものと考へ含水狀態に於ける熱傳導度の增加を批判する基準に使用す.

上述せる如く 4 種土壤に就き其熱的特性を決定する要素たる溫度傳導率, 及び熱傳導度に及ぼす間隙率, 及び含水の影響の一端を明かにする事を得.

圖—9 ローム質赤熱傳導度 (λ) と間隙率 P との關係



表—24 ローム質赤土熱傳導度 λ (C.G.S.) 表

間隙率 P	λ (C.G.S.)
0.646	0.00170
0.634	0.00213
0.662	0.00136
0.666	0.000704
0.700	0.00145
0.696	0.00119
0.684	0.00082
0.646	0.00051
0.652	0.000505
0.673	0.000445
0.610	0.00214
0.667	0.00201
0.638	0.00197

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覽するに，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粒度の分布狀態によるものとして其の性狀を考察するが利用上の立場より便宜多き樣なれども，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, 氷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，温度傳導率の上記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，國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してゐる．先づ風乾土による實驗結果よりして温度傳度率 h^2～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，空隙零の狀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値少にて斯くの如き値を求む事困難なるも，4—b，5—b，6—b，及び 9—圖等に示す λ—P 圖向より空間率 60%及び 70%に對應する λ～値を比較の爲め求め 表—25 に掲ぐ．定量的に空間率（含有率零なる爲め間隙率と同じ）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 h^2～φ，λ～φ 關係をとる樣である．

表—25　風乾土の温度傳導率（h^2）及び熱傳導度（λ）の比較表

h^2:　($cm^2.sec.^{-1}$)

種別 / 間隙率%	L_A	L_B	O	赤土	砂混り赤土
60	0.0020	0.00175	0.00215	0.00142	0.0012
70	0.00170	0.00160	0.00195	0.0013	(P: 50%)

λ;　($cal.\,cm^{-1}.sec^{-1}.°C^{-1}$)

種別 / 間隙率%	L_A	L_B	O	赤土
60	0.00059	0.00065	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，濕潤狀態ならず乾燥せる場合に於ける土壌の温度傳導率（h^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．即ち乾燥せる狀態

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屬す様である．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温能力が左右さる．

今温度傳導率 k^2, 熱傳導度 λ, の大さの順位に列擧すれば

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 風乾土撲の温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	0.00260

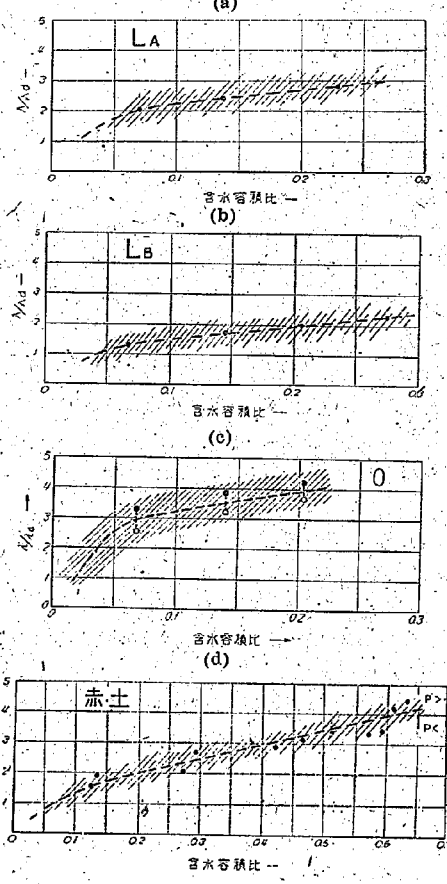
		λ kcal/m.hr°.C	λ C.G.S.
玉川土	東京工業大學學報所載 (本邦壁土)	0.665	0.00185
埼玉土		0.522	0.00145
海土		0.288	0.00082
雪	田口瀧雄著 "雪" 所載	積雪密度 0.18	0.00028 } 岡田氏
		積雪密度 0.24	0.00045 } 岡田氏
		積雪深さ 10—20cm.	0.00045 } 藤原, 宮澤氏
		積雪深さ 20—30cm.	0.00075 } 藤原, 宮澤氏
氷	理科年表	1.9~1.8	
水	抜山氏公式	t; 温度 °C	0.001358 (1+0.0020 t)
コルク板	若杉松三郎著 "保温材の理論及び實際" 所載	0.049~0.053	
松		0.121	
アスベスト板		0.112~0.139	

但し λ (kcal/.m.hr.°C) = λ (C.G.S.) × 10^2 × 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傳導度，及び温度傳導率は可成り少く，保温材としての性能をも有すと見做し得．例へば濕氣の浸入を防止せる壁體等は有効に其の特性を發揮する．表—25 の數字並に 4—b, 5—b, 6—b, 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節夫々圖示した．元來含水の影響は試料作成に際しても複雜にて上記温度傳導率，及び熱傳導度に及ぼす影響も亦に筆者の試驗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．温度傳導率 (k^2) 關係に於ては，k^2～空間率 (P—P') 關係を圖示し，熱傳導度關係に於ては，λ～間隙率 (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 値に含水の場合夫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．λ—P 關係は理論的考察上必要と考へた．O の場合には λ—(P—P') 關係をも圖示してをいた．λ—P 關係はセメントペーストの熱傳導試驗の場合の考察原理を滿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．

圖—10　土壌乾濕熱傳導比 ($\lambda/\lambda d$) と含水容積比との關係を示す



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狀態及び風乾土の熱傳導度 λ, λ_d の比を算定し含水量の容積と，土の總嵩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 の場合は間隙率 (P) 各々類似の値をとり大差無きも赤土の場合に於ては間隙率 (P) は可成の範圍に變動してゐる．a～圖中にて P>< と圖示せるは同一程度の含水にても詰め込み狀況により間隙率の大小なりし範圍を示す．

圖—10によるに本試驗に於ける如き方法にて作成せる資料に就ては，含水による熱傳導度の增加は約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倍に近き增加を示した．λ/λ_d の增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性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增加が起るものと解釋すれば一應 λ/λ_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玆には深く論究する資料無く別の機會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

壁體材料其の他保温的利用價値を判別せん爲め，又は地經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温度傳導率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，遠心力含水等量，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°C～90°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	L_A	L_B	赤土(ローム質)
比　熱 cal./gr.	0.202	0.274	0.281	0.289	0.44

(4) 温度傳導率 (k^2) 測定には恒温水槽による過渡法を使用し，試料は加壓填充法により作成す.

(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. 尙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 $\rho_t C(1-P)+P'$…式により算定す. 但し ρ_t=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'，並に空間率 P−P' を算定す.

(8) 測定せる温度傳導率 (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 (温度範圍20～40°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温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.

本實驗は又常に温度移動を低温→高温，高温→低温の如く行へるを以て一應移動順位をも考察する必要あるも，含水せる土壤内の熱の移動が單に純粹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, L_A, L_B と粘土質の增加せる程稍々減少の度を示してゐる.

(9) 風乾試料の温度傳導率 (k^2) 及び熱傳導度 (λ) と間隙率 (P) の關係は，一般固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

度の保溫乃至遮熱能力ある事を知る．本試料のものゝみ記載す．

風乾土壌の温度傳導率 (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%, 15%…と增大するに伴ひ增加するも容積比に直線的に增加せず土壌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增加の程度及び增加傾向を窺ひ知り得．即ち黄土系のものは含水容積比 (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) の增大する事を明にした．

(11) 温度傳導率 (k^2)～空間率(P－P') 關係を見るに風乾狀態の場合と全く異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）の土壌に對し求め得．

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　狀　態	風　乾　狀　態
L_A	0.005～0.004	0.002～0.0018
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）	0.0065～0.0045	0.0024～0.0018

以上の如く本報告は資料として4種の土壌をとり材料學的の立場に立ち實驗を行ひ，此種土壌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，壁體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．

資料數値少にて綜合的諸種の視野より性狀を論究し得ざりしも，土壌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錄して感謝の意を表す．