土木研究所報告

第八十二號

鈑桁に於ける集中荷重の拡散について (1)……高田孝信

比較的浅い円弧拱の挫屈について……猪瀬寧雄・高田孝信

電気発生コンクリートの設計施工上考慮すべき事項に関する実験的研究 (2)……山田順治・伊藤茂富・清水道貞

昭和年 24 度機械化現場実態調査……西村義一・長江典彦

漂沙に関する研究 (4)……佐藤清一
浅水表面波について

瀝青混合物の安定度判定に関する簡易試験法……谷藤正三・神吉満志

昭和十九年三月

建設省土木研究所

鈑梁に於ける集中荷重の拡対について（1）　正誤表

頁	行	誤	正
11	下より 9	$\mathfrak{B}(\lambda')$	$\mathfrak{B}_2(\lambda')$

比較的浅い円弧拱の挫屈について　正誤表

頁	行	誤	正
7	上より 15	k_4	k_4/β^2
〃	〃 〃	$\ll 10$	$\ll 1$

漂砂に関する研究（浅水表面波について）　正誤表

頁	行	誤	正
表紙	題名	漂沙	漂砂
2	上より 15	5.21	5·21
2	下より 6	5.21	5·21
3	下より 6	$\left(2k\cdot\frac{x}{\lambda}\right)$	$\left(2K\cdot\frac{x}{\lambda}\right)$
8	下より 11	$\left\{\left(\frac{\partial\varphi}{\partial y}\right)^2+\left(\frac{\partial\varphi}{\partial y}\right)^2\right\}$	$\left\{\left(\frac{\partial\varphi}{\partial x}\right)+\left(\frac{\partial\varphi}{\partial y}\right)^2\right\}$
9	上より 6	無視すれば	無視すれば
16	下より 1	134 頁	141 頁
22	下より 6	$\frac{\pi^2}{\sqrt{8\pi g}}$	$\frac{\pi^2}{\sqrt{8\pi g}}$
24	上より 2	定常流の上と同一	定常流の，上と同一
26	上より 6	$u_s=$	v_s
26	上より 14	$u_s=$	v_s
26	上より 15	出来ない	出来ない
27	上より 5	0.77～0.70	0.77～1.70
28	最後の行の後に		(Sept. 29, 1951) を付け足す
9	上より 11	$k(h+\eta)$	$k(h+y)$
9	上より 12	$k(h+\eta)$	$k(h+y)$

鈑桁に於ける集中荷重の拡散について (1)

建設技官　高　田　孝　信

目　　次

まえがき……(1)
I. 緒　　論……(1)
II. 腹板，垂直材および縁材に生ずる力および変位に対する基礎式……(2)
III. 中央集中荷重の拡散について
　其の一　負荷点に垂直材がない場合……(5)

まえがき

本文は鈑桁に集中荷重が作用する時に，荷重が如何に拡散するかを検討したもので，本報告にて数値計算を行つたような中央集中荷重の場合には縁材の剪力は腹板と縁材との間のずれにより従来の初等桁理論によつて求めたものに比べて非常に小さく，負荷点附近の各部材に生ずる応力の集中度は相等大きい事が明らかになつた．

I. 緒　　論

鈑桁は材料節約或は剛性を大ならしむる点等幾多の利点を有しているので，橋桁其の他の桁材としてしばしば用いられるが，鈑桁も他の構造物同様殆ど総て鋲，ボルト或は熔接等にて鈑と型材とを結合して出来ている．しかも橋桁として用いられる場合には端末その他の点で大きい集中荷重を受ける事が多い．一般にこの集中荷重は一旦垂直材のような強大な補強材で受け，この補強材より鈑又はボルトの如き接合材を通して腹板に伝つて行くものであるが，この拡散状況に就ては現在尚明らかにされていない．然るに橋桁の如き常に繰返し荷重を受けるものでは，最大応力は疲労限界以下に押えておかねばならぬので，この最大応力不明のため実際の設計では安全率を大きく取つてこの荷重点附近の応力集中に耐えるようにせねばならない．故に構造的に優秀なる構造法もこのため大いに減殺されるわけである．本論文はこの荷重点附近に於て集中荷重が如何に拡散してゆくかを簡単な 2，3 の例に就いて解き，その拡散状況を明らかにした．取扱い方としては理論的解析に便なるため，鈑又はボルトの結合は連続的であるとし，境界条件を完全に満足してない解（端末集中荷重の場合）に対しては実験により現象を確認する事にした．

鈑桁梁は一般に径間の長さに比し高さは比較的に大きく且つ大きな縁材をつけるので剪断梁と見做す事が出来，従つて腹板は概括的に云えば剪断場をなし荷重の傳達も剪断力によるものが多く此の現象に就ては「剪断遅れ」の現象として多くの人々[1]により理想化された場合に就ては取扱われているが，「剪断遅れ」の現象そのものに於ても厳密に云えば常に 3 応力を考える必要があるわけである．殊に集中荷重を受ける場合にはこの傾向が大である．依つて本文は一部「剪断遅れ」に対する厳密解をも示している事になる．

鈑桁梁の如き結構物では特に荷重点附近にては接合部材の種類，形状により縁材，垂直材，腹板間の力の傳達および各部材の力の分布は千差万別である．例えば接合部材が鋲の如き場合には鋲材および鋲孔の変歪により接合部材に相対的変位を生じ両部材の力の分布を極めて複雑にするものである．鋲やボルト接合の場合は微視的に見れば接合状態は当然不連続であるが巨視的に見れば連続的と見做し得る場合が多いので，これ等の簡単な場合に就てはすでに 2, 3 の解[2]が与えられているが，実際問題に対しては尚不充分な感がある．本文ではこれ等の現象の説明に最も重点をおく事にした．但し挫屈現象は起らないものとす．然る時は腹板の応力状態は 2 次元的となる故，この腹板の応力は $\Delta\Delta F=0$ を満足すべきいわゆる *Airy* の応力函数 $F(x,y)$ より形式的には直ちに求む事が出来るが，この場合積分常数を如何に決すべきか，換言すれば境界条件を如何にとるべきかという事が問題となる．然してこの境界条件は一つのパネルに就てその周辺の補強材の腹板に対する作用を明らかにすれば必然的に定まるものである．依つて先づこの補強材（垂直材および縁材）の作用を考察しこれ等を基礎として代表的な 2, 3 の例題につき解答を与えた．

II. 腹板，垂直材および縁材に生ずる力および変位に対する基礎式

[1] 腹板に生ずる力および変位に対する式

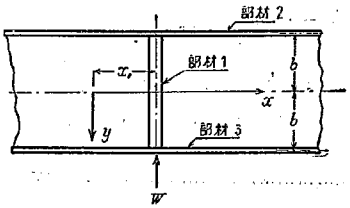
今図−1 の如き集中荷重 W を受ける鈑桁の一部分を取出して考える．腹板の中央に x 軸をとりそれに垂直に下向きに y 軸をとる．垂直材を部材 1，上下縁材をそれぞれ部材 2，部材 3 とす．

腹板の要素 $dxdy$ に作用する力は図−2 の如くなり，x,y 方向の変位を u, v にて表わし，部材 1 の x 方向の変位を U_1，部材 2, 3 の y 方向の変位をそれぞれ V_2, V_3 にて表わすものとす．腹板に生ずる力を決定する式は *Airy* の応力函数を $F(x,y)$ とすれば

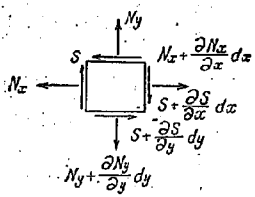
$$Nx=t\frac{\partial^2 F}{\partial y^2},\quad Ny=t\frac{\partial^2 F}{\partial x^2},\quad S=-t\frac{\partial^2 F}{\partial x\partial y} \qquad \cdots\cdots(2\text{–}1)$$

1) P. Kuhn: Some notes on the numerical solution of Shear lag and mathematically related Problem. N.A.C.A. T.N. No. 704.
W.J. Duncan: Diffusion of load in Certain sheet stringer combination. RdM. No. 1825.

2) A.Hertwig u. H.Petermann: Über die verteilung einer Kraft auf die einzelnen Niete einer Nietreihe. Stahlbau 1929 Heft 25.
H.Petermann: Spannungsverteilung in einer Flankenschweißnaht. Stahlban 1932 Heft 12.
井町勇，庄田文雄：薄板に於ける鋲の曳りに関する実験．第1報．日本航空学会誌，昭14年8月．
井町勇：薄板接合の力学．日本航空学会誌，昭15年12月．



図—1



図—2

但し t は腹板の厚さにして，$F(x,y)$ は

$$\Delta\Delta F=0 \quad \cdots\cdots(2\text{-}2)$$

$$\Delta=\frac{\partial^2}{\partial x^2}+\frac{\partial^2}{\partial y^2}$$

を満足するものである．又変位 u，v と F との間にはフックの法則により

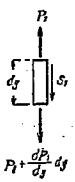
$$\left.\begin{aligned} 2G\frac{\partial u}{\partial x}&=-\frac{1}{m+1}\frac{\partial^2 F}{\partial x^2}+\frac{m}{m+1}\frac{\partial^2 F}{\partial y^2}\\ 2G\frac{\partial v}{\partial y}&=\frac{m}{m+1}\frac{\partial^2 F}{\partial x^2}-\frac{1}{m+1}\frac{\partial^2 F}{\partial y^2}\end{aligned}\right\} \quad \cdots\cdots(2\text{-}3)$$

なる関係あり．但し G は腹板の剪断剛性率，m は *Poisson's Number* である．

〔2〕 垂直材に生ずる力および変位に対する式

一般には部材 1 は軸力および曲げモーメントを受け，伸び（又は縮み）および曲りを生ずる．先づ軸方向の要素の釣合を考えるに 図—3 の如くなる．この場合 S_1 は腹板より接合材を通して垂直材に負荷される分布力である．要素の釣合より

$$\frac{dP_1}{dy}+S_1=0 \quad \cdots\cdots(a)$$



図—3

然して S_1 は垂直材と腹板とを結合する接合材により傳達される力であるが，今両部材の相対的ずれの量を γ_1 とすれば S_1 と γ_1 との間には相対的ずれが余り大でない範囲にてはほゞ直線的関係があると見做し得るので

$$S_1=K_1\,\gamma_1 \quad \cdots\cdots(b)$$

と表わし得．此処に K_1 はこの場合の比例常数にして滑り係数[3] と云われるものである．K_1 は結合部材の形状，材質，寸法，接合鋲（又はボルト）の材質，寸法等により変化するものである．尚両部材の相対的ずれの変化は両部材の変歪量の差に等しき故

$$\frac{d\gamma_1}{dy}=-\frac{P_1}{EF_1}+\frac{1}{Et}\left(N_v(x_0,y)-\frac{1}{m}N_x(x_0,y)\right) \quad \cdots\cdots(c)$$

依つて (a)，(b)，(c) の 3 式より

---

[3] 井町，床田，前掲 [2]
Bleich: Theorie u. Berechnungen der eisernenbrücken Seite 312

$$\frac{d^2P_1}{dy^2}-\frac{K_1}{EF_1}P_1=-\frac{K_1}{Et}\left\{N_y(x_0,y)-\frac{1}{m}N_x(x_0,y)\right\} \quad \cdots\cdots(2\text{-}4)$$

但し F_1 は垂直材の断面積，E は腹板および垂直材の弾性率なり．(材料は総て同一とす)．(2-4) 式が垂直材の軸力 $P_1(y)$ を決定する式である．尚 (a) にて S_1 が腹板の剪断力として決定されていれば，$P_1(y)$ は，

$$\frac{dP_1}{dy}+S(x_0+0,y)-S(x_0-0,y)=0 \quad \cdots\cdots(2\text{-}4)'$$

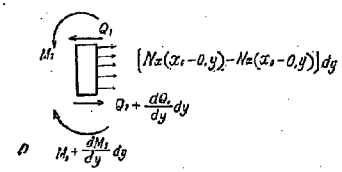
から決定される．

次に垂直材の x 方向の変位を考えるに垂直材は腹板の変位の外に接合材の変歪および腹板に於ける接合部の変歪によるずれの最大小さくなるので，垂直材の x 方向の変位 $U_1(y)$ は

$$U_1(y)=u(x_0,y)-\frac{N_x(x_0+0,y)-N_x(x_0-0,y)}{K_1'} \quad \cdots\cdots(2\text{-}5)$$

(2-5) 式の関係を図示すれば図−4 の如し．

図−4



図−5

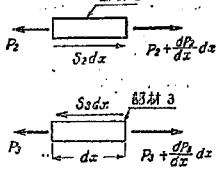
K_1' は部材 1 の x 方向えの移動に対する滑り係数とす．次に垂直材の x 方向の要素の釣合を考えるに

$$EI_1\frac{d^4U_1}{dy^4}=N_x(x_0+0,y)-N_x(x_0-0,y) \quad \cdots\cdots(2\text{-}6)$$

但し EI_1 は x,y 面内に於ける部材 1 の曲げ剛性なり．(2-5)，(2-6) 両式が垂直材 (部材 1) の変位および曲げを表わす式である．

〔3〕 縁材に生ずる力および変位

導き方は〔2〕の場合と同様なり．部材 2 および 3 の軸方向の釣合の関係は 図−6 により



図−6

$$\left.\begin{aligned}\frac{dP_2}{dx}+S_2&=0\\ \frac{dP_3}{dx}-S_3&=0\end{aligned}\right\} \quad \cdots\cdots(d)$$

$$\left.\begin{aligned}S_2&=K_2\gamma_2\\ S_3&=K_3\gamma_3\end{aligned}\right\} \quad \cdots\cdots(e)$$

又

$$\left.\begin{aligned}\frac{d\gamma_2}{dx}&=-\frac{P_2}{EF_2}+\frac{1}{Et}\left[N_x(x,-b)-\frac{1}{m}N_y(x,-b)\right]\\ \frac{d\gamma_3}{dx}&=\frac{P_3}{EF_3}-\frac{1}{Et}\left[N_x(x,b)-\frac{1}{m}N_y(x,b)\right]\end{aligned}\right\}\quad\cdots\cdots(f)$$

但し F_2, F_3 は 部材 2 および 3 の断面積なり．依つて (d), (e), (f) の 3 式より

$$\left\{\begin{aligned}&\frac{d^2P_2}{dx^2}-\frac{K_2}{EF_2}P_2=-\frac{K_2}{Et}\left[N_x(x,-b)-\frac{1}{m}N_y(x,-b)\right]\quad\cdots\cdots(2\text{-}7)\\ &\frac{d^2P_3}{dx^2}-\frac{K_3}{EF_3}P_3-\frac{K_3}{Et}\left[N_x(x,b)-\frac{1}{m}N_y(x,b)\right]\quad\cdots\cdots(2\text{-}8)\end{aligned}\right.$$

或は又 S_2, S_3 が腹板の剪断力として判つている場合には

$$\left\{\begin{aligned}&\frac{dP_2}{dx}+S(x,-b)=0\quad\cdots\cdots(2\text{-}7)'\\ &\frac{dP_3}{dx}-S(x,b)=0\quad\cdots\cdots(2\text{-}8)'\end{aligned}\right.$$

次に部材 2 および 3 の y 方向の変位は部材 1 の場合と同様にして

$$\left\{\begin{aligned}&V_2(x)=v(x,-b)-\frac{1}{K_2'}N_y(x,-b)\quad\cdots\cdots(2\text{-}9)\\ &V_3(x)=v(x,b)+\frac{1}{K_3'}N_y(x,b)\quad\cdots\cdots(2\text{-}10)\end{aligned}\right.$$

曲げの式は

$$\left\{\begin{aligned}&EI_2\frac{d^4V_2}{dx^4}=N_y(x,-b)\quad\cdots\cdots(2\text{-}11)\\ &EI_3\frac{d^4V_3}{dx^4}=-N_y(x,b)\quad\cdots\cdots(2\text{-}12)\end{aligned}\right.$$

但し EI_2, EI_3 は x,y 平面内に於ける部材 2 および 3 の曲げ剛性なり．かくて部材 2 および 3 に対する軸力は (2-7), (2-8) 或は 又 (2-7)', (2-8)' の如く，変位は (2-9), (2-10) の如く，曲げに対しては (2-11), (2-12) の如く表わし得．

III. 中央集中荷重の拡散について
其の一，負荷点に垂直材なき場合

〔1〕 問題の取扱い方

補強材なき無限長の桁に対する集中荷重の問題は二次元応力問題として極めて興味ある問題故，現在まで多くの人々により取扱われているが[4]，一般に鈑桁には縁材および垂直材の如き補強材を数多く配するものであり，これ等の作用により鈑桁の応力状態は重大なる影響を受けるものである．然して集中荷重を受けるような場合には，その大なる荷重を受け取るためにその部分に強大なる垂直材の如き補強材を配す．然し本章では先づ桁の任意の箇所に集中荷重が作用した場合，縁材が腹板に対し力の拡散上如何なる作用をなすかを吟味する事を

[4] 小野鑑正：材料力学 486頁

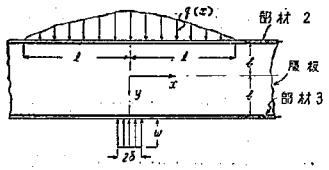
を主目的とするので垂直材の存在は全域に亘り考慮しないものとす．尚集中荷重は *St*, *Venant* の原理により急速に拡散すべき性質のものであるから，有限長の梁に対しても径間が梁の高さに比し可成り大なる場合には集中荷重に対しては無限長の梁として考えても差支えないので，この場合問題を簡単化するため，無限長の梁に集中荷重の負荷された場合を取扱うものとする．又荷重状況は図－7 の如きものとす．

なお荷重分布 $q(x)$ は x の偶函数とし

$$2w\delta=\int_{-l}^{l}q(x)dx$$

とす．集中点荷重の場合には

$$\lim_{\delta\to 0} w\delta=W$$



図－7

〔2〕 腹板，縁材に生ずる力および変位

今座標を図－7 の如くにとれば，桁梁の形状および荷重状況は y 軸に対して対称であるから腹板の *Airy* の応力函数 $F(x,y)$ は

$$F_1(x,y)=\int_0^{\infty}\left[A(\lambda)\operatorname{ch}\lambda y+B(\lambda)\operatorname{sh}\lambda y+C(\lambda)\frac{y}{b}\operatorname{ch}\lambda y+D(\lambda)\frac{y}{b}\operatorname{sh}\lambda y\right]\frac{\cos\lambda x}{\lambda^3\operatorname{ch}\lambda b}d\lambda$$

但し $A(\lambda)$, $B(\lambda)$, $C(\lambda)$, $D(\lambda)$ は積分常数にしてそれぞれ λ に就ての未知の函数である．然る時は腹板に生ずる各力は (2-1) より

$$\begin{cases} N_x(x,y)=t\displaystyle\int_0^{\infty}\left[\begin{array}{l}A(\lambda)\operatorname{ch}\lambda y+B(\lambda)\operatorname{sh}\lambda y+C(\lambda)\frac{y}{b}\operatorname{ch}\lambda y+D(\lambda)\frac{y}{b}\operatorname{sh}\lambda y\\ \quad+\frac{2}{\lambda b}\left(C(\lambda)\operatorname{sh}\lambda y+D(\lambda)\operatorname{ch}\lambda y\right)\end{array}\right]\frac{\cos\lambda x}{\operatorname{ch}\lambda b}d\lambda \quad\cdots\cdots(3\text{-}1\text{-}1)\\ N_y(x,y)=-t\displaystyle\int_0^{\infty}\left[A(\lambda)\operatorname{ch}\lambda y+B(\lambda)\operatorname{sh}\lambda y+C(\lambda)\frac{y}{b}\operatorname{ch}\lambda y+D(\lambda)\frac{y}{b}\operatorname{sh}\lambda y\right]\frac{\cos\lambda x}{\operatorname{ch}\lambda b}d\lambda \quad\cdots\cdots(3\text{-}1\text{-}2)\\ S(x,y)=t\displaystyle\int_0^{\infty}\left[\begin{array}{l}A(\lambda)\operatorname{sh}\lambda y+B(\lambda)\operatorname{ch}\lambda y+C(\lambda)\frac{y}{b}\operatorname{sh}\lambda y+D(\lambda)\frac{y}{b}\operatorname{ch}\lambda y\\ \quad+\frac{1}{\lambda b}\left(C(\lambda)\operatorname{ch}\lambda y+D(\lambda)\operatorname{sh}\lambda y\right)\end{array}\right]\frac{\sin\lambda x}{\operatorname{ch}\lambda b}d\lambda \quad\cdots\cdots(3\text{-}1\text{-}3)\end{cases}$$

腹板に生ずる各点の変位 $u(x,y)$, $v(x,y)$ は (2-3) より

$$\begin{cases} u(x,y)=\dfrac{1}{2G}\displaystyle\int_0^\infty \Big\{ A(\lambda)\operatorname{ch}\lambda y+B(\lambda)\operatorname{sh}\lambda y+C(\lambda)\frac{y}{b}\operatorname{ch}\lambda y+D(\lambda)\frac{y}{b}\operatorname{sh}\lambda y \\ \qquad +\dfrac{m}{m+1}\dfrac{2}{\lambda b}\Big(C(\lambda)\operatorname{sh}\lambda y+D(\lambda)\operatorname{ch}\lambda y\Big)\Big\}\dfrac{\sin\lambda y}{\lambda\operatorname{ch}\lambda b} \\ \qquad \times d\lambda+g(y) \cdots\cdots (3\text{-}2\text{-}1) \\ v(x,y)=-\dfrac{1}{2G}\displaystyle\int_0^\infty \Big\{ A(\lambda)\operatorname{sh}\lambda y+B(\lambda)\operatorname{ch}\lambda y+C(\lambda)\frac{y}{b}\operatorname{sh}\lambda y+D(\lambda)\operatorname{ch}\lambda y \\ \qquad -\dfrac{m-1}{m+1}\dfrac{1}{\lambda b}\Big(C(\lambda)\operatorname{ch}\lambda y+D(\lambda)\operatorname{sh}\lambda y\Big)\Big\}\dfrac{\cos\lambda x}{\lambda\operatorname{ch}\lambda b}d\lambda+h(x) \\ \qquad \cdots\cdots (3\text{-}2\text{-}2) \end{cases}$$

但し $g(y)$, $h(x)$ は積分函数にしてそれぞれ y および x のみの函数である. 而して u, v は次の条件を満足せねばならぬ. 即ち

$$S(x,y)=-t\frac{\partial^2 F_1}{\partial x\partial y}=Gt\Big(\frac{\partial u}{\partial y}+\frac{\partial v}{\partial x}\Big)$$

依つて $$\frac{m}{m+1}\Big[2\frac{\partial^2 F_1}{\partial x\partial y}+\int\Big(\frac{\partial^3 F_1}{\partial x^3}dy+\frac{\partial^3 F_1}{\partial y^3}dx\Big)\Big]+2G\Big(\frac{dg}{dy}+\frac{dh}{dx}\Big)=0 \quad \cdots\cdots (3\text{-}3)$$

依つて (3-3) 式に $F_1(x,y)$ の解を代入すれば

$$\frac{dh}{dx}+\frac{dg}{dy}=0$$

而して梁の形状および荷重状況は y 軸に対して対照なる故

$$u(0,y)=0$$

故に (3-2-1) より

$$g(y)=0$$

依つて $$h(x)=\text{cons}\,t=c_0$$

次に縦材に生ずる変位および軸力は II により

$$\begin{cases} \text{部材 2 の } y \text{ 方向の変位：} V_2(x)=v(x,-b)-\dfrac{1}{K_2'}N_y(x,b) \cdots\cdots (2\text{-}11) \\ \text{部材 3 の } y \text{ 方向の変位：} V_3(x)=v(x,b)+\dfrac{1}{K_3'}Ny(x,b) \cdots\cdots (2\text{-}12) \end{cases}$$

$$\begin{cases} \text{部材 2 の軸力を決定する式：} \\ \qquad \dfrac{d^2P_2}{dx^2}-\mu_2{}^2P_2=-\dfrac{K_2}{Et}\Big[N_x(x,-b)-\dfrac{1}{m}N_y(x,-b)\Big] \cdots\cdots (2\text{-}7) \\ \text{部材 3 の軸力を決定する式：} \\ \qquad \dfrac{d^2P_3}{dx^2}-\mu_3{}^2P_3=-\dfrac{K_3}{Et}\Big[N_x(x,b)\dfrac{1}{m}-N_y(x,b)\Big] \cdots\cdots (2\text{-}8) \end{cases}$$

但し $$\mu_i{}^2=\frac{K_i}{EF_i}\ ,\quad i=2,3$$

かくて縦材の変位を求むるには (2-11) および (2-12) に (3-1-2) および (3-2-2) を代入すれば

$$\left\{\begin{aligned} V_2(x)=&\frac{1}{2G}\int_0^\infty\Big[A(\lambda)\Big(\mathrm{th}\lambda b+2\frac{Gt}{K_2'}\lambda\Big)-B(\lambda)\Big(1+2\frac{Gt}{K_2'}\lambda\,\mathrm{th}\lambda b\Big)\\ &-C(\lambda)\Big(\mathrm{th}\lambda b+2\frac{Gt}{K_2'}\lambda-\frac{m-1}{m+1}\frac{1}{\lambda b}\Big)\\ &+D(\lambda)\Big(1+2\frac{Gt}{K_2'}\lambda\,\mathrm{th}\lambda b-\frac{m-1}{m+1}\frac{\mathrm{th}\lambda b}{\lambda b}\Big)\Big]\frac{\cos\lambda x}{\lambda}d\lambda+C_0 \qquad\cdots\cdots(3\text{-}4\text{-}1)\\ V_3(x)=&-\frac{1}{2G}\int_0^\infty\Big[A(\lambda)\Big(\mathrm{th}\lambda b+2\frac{Gt}{K_3'}\lambda\Big)+B(\lambda)\Big(1+2\frac{Gt}{K_3'}\lambda\,\mathrm{th}\lambda b\Big)\\ &+C(\lambda)\Big(\mathrm{th}\lambda b+2\frac{Gt}{K_3'}\lambda-\frac{m-1}{m+1}\frac{1}{\lambda b}\Big)\\ &+D(\lambda)\Big(1+2\frac{Gt}{K_3'}\lambda\,\mathrm{th}\lambda b-\frac{m-1}{m+1}\frac{\mathrm{th}\lambda b}{\lambda b}\Big)\Big]\frac{\cos\lambda x}{\lambda}d\lambda+C_0 \qquad\cdots\cdots(3\text{-}4\text{-}2)\end{aligned}\right.$$

次に縁材の軸力を求むるには (2-7) および (2-8) より

$$\left\{\begin{aligned} \frac{d^2P_2}{dx^2}-\mu_2{}^2P_2=&-\frac{m+1}{m}\frac{K_2}{E}\int_0^\infty\Big[A(\lambda)-B(\lambda)\,\mathrm{th}\lambda b-C(\lambda)\Big(1+\frac{2m}{m+1}\frac{\mathrm{th}\lambda b}{\lambda b}\Big)\\ &+D(\lambda)\Big(\mathrm{th}\lambda b+\frac{2m}{m+1}\frac{1}{\lambda b}\Big)\Big]\cos\lambda x d\lambda\\ \frac{d^2P_3}{dx^2}-\mu_3{}^2P_3=&-\frac{m+1}{m}\frac{K_3}{E}\int_0^\infty\Big[A(\lambda)+B(\lambda)\mathrm{th}\lambda b+C(\lambda)\Big(1+\frac{2m}{m+1}\frac{\mathrm{th}\lambda b}{\lambda b}\Big)+D(\lambda)\Big(\mathrm{th}\lambda b\\ &+\frac{2m}{m+1}\frac{1}{\lambda b}\Big)\Big]\cos\lambda x d\lambda\end{aligned}\right.$$

依つて上 2 方程式の解は

$$\left\{\begin{aligned} P_2(x)=&a_2\,\mathrm{ch}\,\mu_2x+b_2\,\mathrm{sh}\,\mu_2x\\ &+\frac{m+1}{m}\frac{K_2}{E}\int_0^\infty\Big[A(\lambda)-B(\lambda)\,\mathrm{th}\lambda b-C(\lambda)\Big(1+\frac{2m}{m+1}\frac{\mathrm{th}\lambda b}{\lambda b}\Big)\\ &+D(\lambda)\Big(\mathrm{th}\lambda b+\frac{2m}{m+1}\frac{1}{\lambda b}\Big)\Big]\frac{\cos\lambda x}{\lambda^2+\mu_2{}^2}d\lambda \qquad\cdots\cdots(3\text{-}5\text{-}1)\\ P_3(x)=&a_3\,\mathrm{ch}\,\mu_3x+b_3\,\mathrm{sh}\,\mu_3x\\ &+\frac{m+1}{m}\frac{K_3}{E}\int_0^\infty\Big[A(\lambda)+B(\lambda)\,\mathrm{th}\lambda b+C(\lambda)\Big(1+\frac{2m}{m+1}\frac{\mathrm{th}\lambda b}{\lambda b}\Big)\\ &+D(\lambda)\Big(\mathrm{th}\lambda b+\frac{2m}{m+1}\frac{1}{\lambda b}\Big)\Big]\frac{\cos\lambda x d\lambda}{\lambda^2+\mu_3{}^2} \qquad\cdots\cdots(3\text{-}5\text{-}2)\end{aligned}\right.$$

但し a_i, b_i $(i=2,3)$ は積分常数である.

以上により腹板の踏力および縁材の軸力に対する一つの解を求むる事が出来たわけである.

〔3〕 境 界 条 件

以上の計算により腹板の踏力および縁材の軸力を求むる事が出来たがこれ等の中には $A(\lambda)$, $B(\lambda)$, $C(\lambda)$, $D(\lambda)$, a_i, b_i $(i=2,3)$ なる 8 個の積分常数を含む. これ等を決定するには次の如き 8 個の境界条件を考える.

(i) 部材 2 の軸力に対する条件:

$$x=0 \text{ にて } \left(\frac{dP_2}{dx}\right)_{x=0}=0 \quad \cdots\cdots(3\text{-}6\text{-}1)$$

$$\therefore \quad \left(\frac{dP_2}{dx}\right)x=0=-S(x,-b)_{x=0}=-K_2\gamma_{2x=0}=0$$

$$x=\infty \text{ にて } P_2=0 \quad \cdots\cdots(3\text{-}7\text{-}1)$$

(ii) 部材 3 の軸力に対する条件：

$$\begin{cases} \left(\dfrac{dP_3}{dx}\right)_{x=0}=0 \cdots\cdots(3\text{-}6\text{-}2) \\ (P_3)_{x=\infty}=0 \cdots\cdots(3\text{-}7\text{-}2) \end{cases}$$

(iii) 部材 2 と腹板との接合部の条件：

$$\begin{cases} \dfrac{dP_2}{dx}+S(x,-b)=0 \cdots\cdots(3\text{-}8\text{-}1) \\ \dfrac{d^4V_2}{dx^4}-\dfrac{1}{EI_2}\left\{N_y(x,-b)+\dfrac{2}{\pi}\displaystyle\int_0^\infty \cos\lambda x d\lambda \int_0^l q(\xi)\cos\lambda\xi\, d\xi\right\}=0 \cdots\cdots(3\text{-}9\text{-}1) \end{cases}$$

但し (3-9-1) にて

$$\frac{2}{\pi}\int_0^\infty \cos\lambda x d\lambda \int_0^l q(\xi)\cos\lambda\xi d\xi$$

は分布荷重 $q(x)$ を cosine の *Fourier integral* にて表わしたるものにして分布荷重 $q(x)$ が $-l\leqq x\leqq l$ の領域にて等分布 q_0 にて負荷されたる場合には，

$$q_0=\frac{2q_0l}{\pi}\int_0^l \frac{\sin\lambda l}{\lambda l}\cos\lambda x d\lambda$$

(iV) 部材 3 と腹板との接合部の条件：

$$\begin{cases} \dfrac{dP_3}{dx}-S(x,b)=0 \cdots\cdots(3\text{-}8\text{-}2) \\ \dfrac{d^4V_3}{dx^4}+\dfrac{1}{EI_3}\left\{N_y(x,b)+\dfrac{2w\delta}{\pi}\displaystyle\int_0^\infty \frac{\sin\lambda\delta}{\lambda\delta}\cos\lambda x d\lambda\right\}=0 \cdots\cdots(3\text{-}9\text{-}2) \end{cases}$$

但し上式にて

$$\frac{2w\delta}{\pi}\int_0^\infty \frac{\sin\lambda\delta}{\lambda\delta}\cos\lambda x d\lambda$$

は均一分布荷重 $2w\delta$ を cosine の *Fourier integral* にて表わしたるものにして集中点荷重の場合には，

$$\lim_{\delta\to 0}\ \frac{2w\delta}{\pi}\int_0^\infty \frac{\sin\lambda\delta}{\lambda\delta}\cos\lambda x d\lambda=\frac{2W}{\pi}\int_0^\infty \cos\lambda x d\lambda$$

〔4〕 積分常数の決定

先づ条件 (3-9-1)，(3-9-2) に (3-1-2) を代入すれば，

$$\begin{cases} A(\lambda')\left[\operatorname{th}\lambda'+2\frac{Gt}{K_2'b}\lambda'+2\frac{Gtb^3}{EI_2}\frac{1}{\lambda'^3}\right]-B(\lambda')\left[1+2\frac{Gt}{K_2'b}\lambda'\operatorname{th}\lambda'+2\frac{Gtb^3}{EI_2}\frac{\operatorname{th}\lambda'}{\lambda'^3}\right] \\ -C(\lambda')\left[\operatorname{th}\lambda'-\frac{m-1}{m+1}\frac{1}{\lambda'}+2\frac{Gt}{K_2'b}\lambda'+2\frac{Gtb^3}{EI_2}\frac{1}{\lambda'^3}\right]+D(\lambda')\left[1-\frac{m-1}{m+1}\frac{\operatorname{th}\lambda'}{\lambda'}+2\frac{Gt}{K_2'b}\lambda'\operatorname{th}\lambda'\right. \\ \left.+2\frac{Gtb^3}{EI_2}\frac{\operatorname{th}\lambda'}{\lambda'^3}\right]=\frac{4Gb^3}{\pi EI_2\lambda'^3}\int_0^\infty q(\xi)\cos\lambda\xi d\xi \quad\cdots\cdots(3\text{-}10\text{-}1) \\ A(\lambda')\left[\operatorname{th}\lambda'+2\frac{Gt}{K_3'b}\lambda'+2\frac{Gtb^3}{EI_3}\frac{1}{\lambda'^3}\right]+B(\lambda')\left[1+2\frac{Gt}{K_3'b}\lambda'\operatorname{th}\lambda'+2\frac{Gtb^3}{EI_3}\frac{\operatorname{th}\lambda'}{\lambda'^3}\right] \\ +C(\lambda')\left[\operatorname{th}\lambda'-\frac{m-1}{m+1}\frac{1}{\lambda'}+2\frac{Gt}{K_3'b}\lambda'+2\frac{Gtb^3}{EI_3}\frac{1}{\lambda'^3}\right]+D(\lambda')\left[1-\frac{m-1}{m+1}\frac{\operatorname{th}\lambda'}{\lambda'}+2\frac{Gt}{K_3'b}\lambda'\operatorname{th}\lambda'\right. \\ \left.+2\frac{Gtb^3}{EI_3}\frac{\operatorname{th}\lambda'}{\lambda'^3}\right]=\frac{4Gb^3}{\pi EI_3\lambda'^3}\frac{w\delta}{\sin\lambda\delta}\frac{\sin\lambda\delta}{\lambda\delta} \quad\cdots\cdots(3\text{-}10\text{-}2) \end{cases}$$

但し $\lambda'=\lambda b$

次に軸力 P_2, P_3 に対して条件 (3-6-1), (3-6-2) より

$$b_2=b_3=0$$

又 (3-7-1), (3-7-2) より

$$a_2=a_3=0$$

依つて

$$\begin{cases} P_2(x)=\frac{m+1}{m}\frac{K_2}{E}\int_0^\infty\left[A(\lambda')-B(\lambda')\operatorname{th}\lambda'-C(\lambda')\left(1+\frac{2m}{m+1}\frac{\operatorname{th}\lambda'}{\lambda'}\right)\right. \\ \left.+D(\lambda')\left(\operatorname{th}\lambda'+\frac{2m}{m+1}\frac{1}{\lambda'}\right)\right]\frac{\cos\lambda x d\lambda}{\lambda^2+\mu_2^2} \quad\cdots\cdots(3\text{-}11\text{-}1) \\ P_3(x)=\frac{m+1}{m}\frac{K_3}{E}\int_0^\infty\left[A(\lambda')+B(\lambda')\operatorname{th}\lambda'+C(\lambda')\left(1+\frac{2m}{m+1}\frac{\operatorname{th}\lambda'}{\lambda'}\right)\right. \\ \left.+D(\lambda')\left(\operatorname{th}\lambda'+\frac{2m}{m+1}\frac{1}{\lambda'}\right)\right]\frac{\cos\lambda x d\lambda}{\lambda^2+\mu_3^2} \quad\cdots\cdots(3\text{-}11\text{-}2) \end{cases}$$

依つて (3-8-1), (3-8-2) の条件に上の 2 式および (3-1-3) を代入すれば,

$$\begin{cases} A(\lambda')\left[\operatorname{th}\lambda'+\frac{m+1}{m}\frac{K_2b}{Et}\frac{\lambda'}{\lambda'^2+\mu_2'^2}\right]-B(\lambda')\left[1+\frac{m+1}{m}\frac{K_2b}{Et}\frac{\lambda'}{\lambda'^2+\mu_2'^2}\operatorname{th}\lambda'\right] \\ -C(\lambda')\left[\operatorname{th}\lambda'+\frac{1}{\lambda'}+\frac{m+1}{m}\frac{K_2b}{Et}\frac{\lambda'}{\lambda'^2+\mu_2'^2}\left(1+\frac{2m}{m+1}\frac{\operatorname{th}\lambda'}{\lambda'}\right)\right]+D(\lambda')\left[1+\frac{\operatorname{th}\lambda'}{\lambda'}\right. \\ \left.+\frac{m+1}{m}\frac{K_2b}{Et}\frac{\lambda'}{\lambda'^2+\mu_2'^2}\left(\operatorname{th}\lambda'+\frac{2m}{m+1}\frac{1}{\lambda'}\right)\right]=0 \quad\cdots\cdots(3\text{-}12\text{-}1) \\ A(\lambda')\left[\operatorname{th}\lambda'+\frac{m+1}{m}\frac{K_3b}{Et}\frac{\lambda'}{\lambda'^2+\mu_3'^2}\right]+B(\lambda')\left[1+\frac{m+1}{m}\frac{K_3b}{Et}\frac{\lambda'}{\lambda'^2+\mu_3'^2}\operatorname{th}\lambda'\right] \\ +C(\lambda')\left[\operatorname{th}\lambda'+\frac{1}{\lambda'}+\frac{m+1}{m}\frac{K_3b}{Et}\frac{\lambda'}{\lambda'^2+\mu_3'^2}\left(1+\frac{2m}{m+1}\frac{\operatorname{th}\lambda'}{\lambda'}\right)\right]+D(\lambda')\left[1+\frac{\operatorname{th}\lambda'}{\lambda'}\right. \\ \left.+\frac{m+1}{m}\frac{K_3b}{Et}\frac{\lambda'}{\lambda'^2+\mu_3'^2}\left(\operatorname{th}\lambda'+\frac{2m}{m+1}\frac{1}{\lambda'}\right)\right]=0 \quad\cdots\cdots(3\text{-}12\text{-}2) \end{cases}$$

(3-10-1), (3-10-2), (3-12-1), (3-12-2) の 4 式より $A(\lambda')$, $B(\lambda')$, $C(\lambda')$, $D(\lambda')$ を決定し得. かくすれば積分常数は全部求まる事になる. 今簡単な場合として部材 2 と部材 3 の断面相等しく且つ腹板との取付状況も相等しとすれば,

$$I_2=I_3,\ \mu_2=\mu_3,\ K_2=K_3,\ K_2'=K_3'$$

然る時は上の 4 式より

$$\begin{cases}\mathfrak{A}_1(\lambda')\ A(\lambda')+\mathfrak{D}_1(\lambda')\ D(\lambda')=R_1(\lambda') & \cdots\cdots(3\text{-}10\text{-}1)'\\ \mathfrak{B}_3(\lambda')\ B(\lambda')+\mathfrak{C}_3(\lambda')\ C(\lambda')=R_3(\lambda') & \cdots\cdots(3\text{-}10\text{-}1)'\\ \mathfrak{A}_3(\lambda')\ A(\lambda')+\mathfrak{D}_3(\lambda')\ D(\lambda')=0 & \cdots\cdots(3\text{-}12\text{-}1)'\\ \mathfrak{B}_4(\lambda')\ B(\lambda')+\mathfrak{C}_4(\lambda')\ C(\lambda')=0 & \cdots\cdots(3\text{-}12\text{-}2)'\end{cases}$$

但し

$$\mathfrak{A}_1(\lambda')=\operatorname{th}\lambda'+2\frac{Gt}{K_2'b}\lambda'+2\frac{Gtb^3}{EI_2}\frac{1}{\lambda'^3}$$

$$\mathfrak{D}_1(\lambda')=1-\frac{m-1}{m+1}\frac{\operatorname{th}\lambda'}{\lambda'}+2\frac{Gt}{K_2'b}\lambda'\operatorname{th}\lambda'+2\frac{Gtb^3}{EI_2}\frac{\operatorname{th}\lambda'}{\lambda'^3}$$

$$R_1(\lambda')=2\frac{Gtb^3}{EI_1}\frac{1}{\lambda'^3}\frac{1}{\pi t}\left\{\int_0^l q(\xi)\cos\lambda\xi d\xi+w\delta\times\frac{\sin\lambda\delta}{\lambda\delta}\right\}$$

特に $q(\xi)=\text{cons}\,t=q_0$, $w\delta=W$ (点荷重) の場合には

$$=\frac{Gtb^3}{EI_2}\frac{2W}{\pi t}\left(1+\frac{\text{sni}\,\lambda l}{\lambda l}\right)\frac{1}{\lambda'^3}$$

$$\mathfrak{B}(\lambda')=1+2\frac{Gt}{K_2'b}\lambda'\operatorname{th}\lambda'+2\frac{Gtb^3}{EI_2}\frac{\operatorname{th}\lambda'}{\lambda'^3}$$

$$\mathfrak{C}_2(\lambda')=\operatorname{th}\lambda'-\frac{m-1}{m+1}\frac{1}{\lambda'}+2\frac{Gt}{K_2'b}\lambda'+2\frac{Gtb^3}{EI_2}\frac{1}{\lambda'^3}$$

$$R_2(\lambda')=2\frac{Gtb^3}{EI_2}\frac{1}{\pi t}\cdot\frac{1}{\lambda'^3}\left\{w\delta\frac{\sin\lambda\delta}{\lambda\delta}-\int_0^l q(\xi)\cos\lambda\xi d\xi\right\}$$

$$=\frac{Gtb^3}{EI_2}\frac{2W}{\pi t}\left(1-\frac{\sin\lambda l}{\lambda l}\right)\frac{1}{\lambda'^3}\qquad\text{(但し } q(\xi)=q_0 \text{ の場合)}$$

$$\mathfrak{A}_3(\lambda')=\operatorname{th}\lambda'+\frac{m+1}{m}\frac{K_2b}{Et}\frac{\lambda'}{\lambda'^2+\mu_2'^2}$$

$$\mathfrak{D}_3(\lambda')=1+\frac{\operatorname{th}\lambda'}{\lambda'}+\frac{m+1}{m}\frac{K_2b}{Et}\frac{\lambda'}{\lambda'^2+\mu_2'^2}\left(\operatorname{th}\lambda'+\frac{2m}{m+1}\frac{1}{\lambda'}\right)$$

$$\mathfrak{B}_4(\lambda')=1+\frac{m+1}{m}\frac{K_2b}{Et}\frac{\lambda'}{\lambda'^2+\mu_2'^2}\operatorname{th}\lambda'$$

$$\mathfrak{C}_4(\lambda')=\operatorname{th}\lambda'+\frac{1}{\lambda'}+\frac{m+1}{m}\frac{K_2b}{Et}\frac{\lambda'}{\lambda'^2+\mu_2'^2}\left(1+\frac{2m}{m+1}\frac{\operatorname{th}\lambda'}{\lambda'}\right)$$

とす. 然る時は前記 4 個の方程式より

$$\left.\begin{aligned} A(\lambda')&=\frac{\mathfrak{D}_3(\lambda')\ R_1(\lambda')}{\mathfrak{A}_1(\lambda')\mathfrak{D}_3(\lambda')-\mathfrak{A}_3(\lambda')\mathfrak{D}_1(\lambda')}\\ B(\lambda')&=\frac{\mathfrak{C}_4(\lambda')\ R_2(\lambda')}{\mathfrak{B}_2(\lambda')\mathfrak{C}_4(\lambda')-\mathfrak{B}_4(\lambda')\mathfrak{C}_2(\lambda')}\\ C(\lambda')&=\frac{-\mathfrak{B}_4(\lambda')\ R_2(\lambda')}{\mathfrak{B}_2(\lambda')\mathfrak{C}_4(\lambda')-\mathfrak{B}_4(\lambda')\mathfrak{C}_2(\lambda')}\\ D(\lambda')&=\frac{-\mathfrak{A}_3(\lambda')\ R_1(\lambda')}{\mathfrak{A}_1(\lambda')\mathfrak{D}_3(\lambda')-\mathfrak{A}_3(\lambda')\mathfrak{D}_1(\lambda')} \end{aligned}\right\}$$

かくて積分常数 $A(\lambda')$, $B(\lambda')$, $C(\lambda')$, $D(\lambda')$ を上述の如くに求むる事が出来たので，腹板および縁材に作用する力は (3-1-1), (3-1-2), (3-1-3) および (3-11-1), (3-11-2) より決定し得．但しこの場合被積分函数は $0\leqq\lambda'$ の領域にて有限でなければならぬ．然るに

$$\begin{aligned}&\mathfrak{A}_1(\lambda')\ \mathfrak{D}_3(\lambda')-\mathfrak{A}_3(\lambda')\ \mathfrak{D}_1(\lambda')\\ &=2\frac{Gt}{K_2'b}\left(\lambda'-\lambda'\operatorname{th}\lambda'+\operatorname{th}\lambda'+2\frac{K_2b}{Et}\frac{\lambda'}{\lambda'^2+\mu_2'^2}\right)+\frac{m+1}{m}\frac{K_2b}{Et}\frac{\lambda'}{\lambda'^2+\mu_2'^2}\left(\operatorname{th}^2\lambda'-1\right.\\ &\left.+\frac{3m-1}{m+1}\frac{\operatorname{th}\lambda'}{\lambda'}+\frac{2m}{m+1}\frac{\operatorname{th}^2\lambda'}{\lambda'}\right)+2\frac{Gtb^3}{EI_2}\frac{1}{\lambda'^3}\left(1-\operatorname{th}^2\lambda'+\frac{3m-1}{m+1}\frac{\operatorname{th}\lambda'}{\lambda'}\right)\quad\cdots\cdots\cdots(3\text{-}13)\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}&\mathfrak{B}_2(\lambda')\ \mathfrak{C}_4(\lambda')-\mathfrak{B}_4(\lambda')\mathfrak{C}_2(\lambda')\\ &=2\frac{Gt}{K_2'b}\left(\lambda'\operatorname{th}^2\lambda'-\lambda'+\operatorname{th}\lambda'+2\frac{K_2b}{Et}\frac{\lambda'\operatorname{th}^2\lambda'}{\lambda'^2+\mu_2'^2}\right)+\frac{m+1}{m}\frac{K_2b}{Et}\frac{\lambda'}{\lambda'^2+\mu_2'^2}\left(1-\operatorname{th}^2\lambda'\right.\\ &\left.+\frac{3m-1}{m+1}\frac{\operatorname{th}\lambda'}{\lambda'}\right)+2\frac{Gtb^3}{EI_2}\frac{1}{\lambda'^3}\left(\operatorname{th}^2\lambda'-1+\frac{\operatorname{th}\lambda'}{\lambda'}+2\frac{K_2b}{Et}\frac{\operatorname{th}^2\lambda'}{\lambda'^2+\mu_2'^2}\right)\quad\cdots\cdots\cdots\cdots(3\text{-}14)\end{aligned}$$

然るに上の 2 式にて

$$\lambda'-\lambda'\operatorname{th}\lambda'+\operatorname{th}\lambda'\geqq0$$

$$1-\operatorname{th}^2\lambda'+\frac{3m-1}{m+1}\frac{\operatorname{th}\lambda'}{\lambda'}>0$$

$$\operatorname{th}^2\lambda'-1+\frac{\operatorname{th}\lambda'}{\lambda'}\geqq0$$

$$\operatorname{th}^2\lambda'-1+\frac{3m-1}{m+1}\frac{\operatorname{th}\lambda'}{\lambda'}>0$$

依つて (3-13), (3-14) 両式は $\lambda'>0$ の領域にて零より大なり．

故に被積分函数は $\lambda'=0$ および $\lambda'=\infty$ にて有限確定値を有すれば，各部材に生ずる各力を決定する事が出来る．

(i) $\lambda'=0$ に対する $A(\lambda')$, $B(\lambda')$, $C(\lambda')$, $D(\lambda')$ の値：

$\lambda'=0$ に於ける被積分函数の値として $\lim_{\lambda'\to0}$ をとれば，

$$\begin{cases} \lim\limits_{\lambda'\to 0} A(\lambda') = \dfrac{1}{1+\dfrac{1}{\mu_2'^2}\dfrac{K_2 b}{Et}}\dfrac{2w}{\pi t} \\ \lim\limits_{\lambda'\to 0} B(\lambda') = \infty \\ \lim\limits_{\lambda'\to 0} C(\lambda') = -\dfrac{\left(\dfrac{l}{b}\right)^2}{4+\dfrac{12}{\mu_2'^2}\dfrac{K_2 b}{Et}+\dfrac{6m}{m+1}\dfrac{EI_2}{Gtb^2}}\dfrac{W}{\pi t} \\ \lim\limits_{\lambda'\to 0} D(\lambda') = 0 \end{cases}$$

依つて $\lim\limits_{\lambda'\to 0} B(\lambda')=\infty$ であるが N_x, N_y を計算する場合には $B(\lambda')\operatorname{sh}\lambda y$

なる形にて存在し，$S(x,y)$ を計算する場合には $B(\lambda')\sin\lambda x$

軸力 $P_2(x)$，$P_3(x)$ を計算する場合には $B(\lambda')\operatorname{th}\lambda'$

なる形にて存在する故これ等が $\lambda'\to 0$ にて有限確定値を有すればよい．今これ等を求めてみるに，

$$\begin{cases} \lim\limits_{\lambda'\to 0} B(\lambda')\operatorname{sh}\lambda y = \dfrac{\left(\dfrac{l}{b}\right)^2\dfrac{y}{b}}{4+\dfrac{12}{\mu_2'^2}\dfrac{K_2 b}{Et}+\dfrac{6m}{m+1}\dfrac{EI_2}{Gtb^3}}\dfrac{W}{\pi t} \\ \lim\limits_{\lambda'\to 0} B(\lambda')\sin\lambda x = \dfrac{\left(\dfrac{l}{b}\right)^2\dfrac{x}{b}}{4+\dfrac{12}{\mu_2'^2}\dfrac{K_2 b}{Et}+\dfrac{6m}{m+1}\dfrac{EI_2}{Gtb^3}}\dfrac{W}{\pi t} \end{cases}$$

(ii) $\lambda'=\infty$ に於ける $A(\lambda')$，$B(\lambda')$，$C(\lambda')$，$D(\lambda')$ の値：

(3-13)，(3-14) 両式より A，B，C，D の各分母は，

$$\lim_{\lambda'\to\infty}\left[\mathfrak{N}_1(\lambda')\,\mathfrak{D}_3(\lambda')-\mathfrak{N}_3(\lambda')\,\mathfrak{D}_1(\lambda')\right]=\lim_{\lambda'\to\infty}\left[\mathfrak{B}_2(\lambda')\mathfrak{C}_4(\lambda')-\mathfrak{B}_4(\lambda')\mathfrak{C}_2(\lambda')\right]=2\frac{Gt}{K_2 b}$$

又 $\lim\limits_{\lambda'\to\infty}\mathfrak{D}_3(\lambda')R_1(\lambda')=\lim\limits_{\lambda'\to\infty}\mathfrak{N}_3(\lambda')R_1(\lambda')=0$

故に $\lim\limits_{\lambda'\to\infty}A(\lambda')=\lim\limits_{\lambda'\to\infty}D(\lambda')=0$

又 $\lim\limits_{\lambda'\to\infty}\mathfrak{C}_4(\lambda')R_2(\lambda')=\lim\limits_{\lambda'\to\infty}\mathfrak{B}_4(\lambda')R_2(\lambda')=0$

依つて $\lim\limits_{\lambda'\to\infty}B(\lambda')=\lim\limits_{\lambda'\to\infty}C(\lambda')=0$

以上 (i)，(ii) に依り λ' についての被積分函数は $\lambda'\geqq 0$ の領域にて有限確定値を有する故，各部材に生ずる各力を決定する事が出来る．

[5] 数 値 計 算

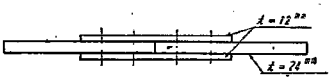
腹板と縦材との結合材が鋲の場合を取扱えば，この場合問題となるのは鋲の滑り係数 K の値を如何にとるべ

きかである．これ等を実験的に求めたのに井町氏[5]および Rudeloff[6] の実験がある．前者は単剪断にして板厚 0.8 m/m 鋼板に対して　鋲径　3·0 mm にて　K_0= 7·84 T/mm

〃　3·5 mm にて　K_0= 8·725 T/mm

〃　4·0 mm にて　K_0=10·39 T/mm

かくの如く一本の鋲の滑り係数 K_0 は鋲径の大小により相当の差異がある．この事は鈑厚によつても差異を生ずると思われる．依つてこの実験結果は板厚，鋲径等の関係より橋梁の鈑桁の計算に用うるには不適当である．



図—8

Rudeloff は図—8 の如き鋼板にて実験を行つている．但し結合は鋲の代りにボルトを用いているので，鋲の滑り係数とは些か異るものがあると思われるが，その結果は

鋲　径　25 mm にて　K_0=45·5 T/mm

〃　27 mm にて　K_0=44·3 T/mm

依つて今この結果を用うるとすれば，板厚 t=24 mm の板に鋲径 25 mm のものをピツチ 100 mm にて打ちこの場合鋲を連続的に結合してあるとみて単位長当りの滑り係数に換算すれば大略

$$K=\frac{45{,}000}{100}=450\ \mathrm{kg/mm^2}$$

板厚 t=12 m/m のものに対してその半分

$$K=225\ \mathrm{kg/mm^2}$$

をとる事にする．次に縁材には 130 mm×130 mm×12 mm の山型材 2 個を用うるものとすれば，

断面積　F=2976×2=5952 mm²

断面 2 次率　I=4670,000×2=9,340,000 mm⁴

$$E=21{,}000\ \mathrm{kg/mm^2}$$

$$m=\frac{10}{3}$$

とすれば

$$G/E=\frac{1}{2\left(1+\frac{1}{m}\right)}=\frac{1}{2.6}$$

又　b=500 mm，t=12 mm

なお　$K_2=K_2'$ とすれば

$$\frac{Gt}{K_2'b}=0.864,\quad \frac{Gtb^3}{EI_2}=62.1,\quad \mu_2''=0.446$$

---

5) 前掲 2) および第2報，日本航空学会誌．昭 15 年 6 月

6) Bleick：前掲 3)

$$\frac{Et}{K_2b}=2.6\frac{Gt}{K_2'b}$$

なる数値を得る．依つて数値計算例としては

$q(x)=q_0=\text{const}$ とし，

$$\frac{Gt}{K_2'b}=0.8,\quad \frac{Gtb^3}{EI_2}=60,\quad \frac{K_2b}{Et}=\frac{0.8}{2.6},\quad \mu_2'^2=0.4$$

とし，　$l=b,\ 2b,\ 4b,\cdots\cdots$

の場合につき計算するものとす．

上の数値に対する計算結果を示せば表−1，2，3，4 および図−9，10，11 の如くになる．これ等より観察す

表−1　$n=\frac{\pi b}{2W}N_z(x,y)$ の分布

$l/b=1$ の場合

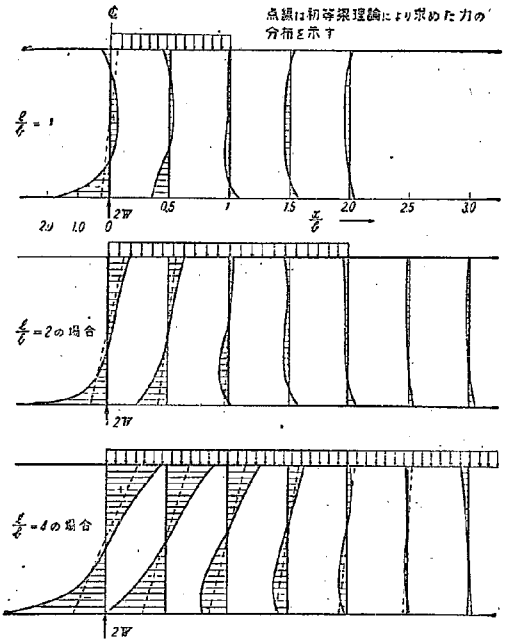
y/b \ x/b	0	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0
−1.0	−0.2659	−0.2084	−0.0364	0.1503	0.0895	0.0113	−0.0217
−0.5	0.1461	0.0930	−0.0190	−0.1193	−0.1226		
−0.25	0.2431	0.1264	−0.0612	−0.1661	−0.1490		
0	0.2400	0.1242	−0.0930	−0·1834	−0.1556		
0.25	0.2027	0.0463	−0.1462	−0.1798	−0.1151		
0.5	0.0400	−0.1727	−0.1425	−0.1115	−0.0565		
1.0	−1.8025	−0.6031	0.3671	0.3654	0.1553	0.0336	−0.0772

$l/b=2$ の場合

y/b \ x/b	0	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0
−1.0	0.7016	0.5561	0.1406	−0.1767	−0.2026	−0.0447	−0.0208
−0.5	0.3713	0.2744	0.1002	−0.0429	−0.0998	−0.1050	−0.0810
−0.25	0.2630	0.1657	0.0255	−0.0824	−0.0996	−0.0967	−0.0718
0	0.1590	0.0577	−0.0784	−0.1214	−0.0988	−0.0829	−0.0596
0.25	−0.0270	−0.0950	−0.2011	−0.1616	−0.0906	−0.0524	−0.0138
0.5	−0.2288	−0.3221	−0.2929	−0.1527	−0.0261	0.0036	0.0039
1.0	−2.4133	−1.0746	0.0633	0.3307	0.3075	0.1413	−0.2107

$x/b=4$ の場合

y/b \ x/b	0	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0
−1.0	1.8001	1.5596	1.0577	0.5512	0.1222	−0.0893	−0.2355
−0.5	0.8835	0.7200	0.4491	0.2716	0.1335	−0.0040	−0.1109
0	0.1632	0.0482	−0.1015	−0.1356	−0.0911	−0.0411	−0.0233
0.5	−0.6935	−0.7683	−0.6834	−0.4361	−0.2127	−0.0752	0.0198
1.0	−3.8665	−2.0041	−0.7261	−0.2630	−0.0699	+0.0434	0.1169



図−9　$\frac{\pi b}{2W}N_x(x,y)$ の分布

表−2−a　$-\frac{\pi b}{2W}N_y(0,y)$

y/b	−1	−0.75	−0.5	−0.25	0	0.25	0.5	0.75
$l/b=1$の場合	1.8580	1.6566	1.6878	1.7452	1.8593	2.0495	2.3425	2.7325
$l/b=4$の場合	0.4091	0.5232	0.7177	0.9700	1.2813	1.6622	2.1128	2.6313

y/b	1
$l/b=1$ の場合	3.0654
$l/b=4$ の場合	3.1068

表−2−b　$-\frac{\pi b}{2W}N_y(x,b)$の分布

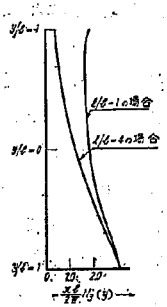
x/b	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4
$l/b=1$ の場合	3.0654	2.7008	1.9858	1.3633	0.7493	0.2794	−0.0145	−0.1327
$l/b=4$ の場合	3.1068	2.6893	1.9559	1.2149	0.6169	0.2315	0.0420	−0.0790

y/b	1.6	1.8
$l/b=1$ の場合	−0.1020	0.0015
$l/b=4$ の場合	−0.0838	0.0110

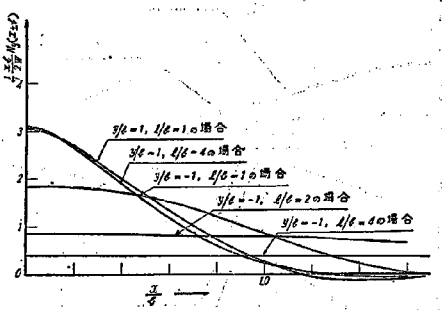
表−2−c $-\frac{\pi b}{2W}N_y(x,-b)$ の分布

x/b	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4
$l/b=1$ の場合	1.8580	1.8232	1.7173	1.5328	1.2108	0.8620	0.5032	0.2245
$l/b=2$ の場合	0.8745	0.8708	0.8620	0·8128	0.8069	0.8041	0.7848	0.7261
$l/b=4$ の場合	0.4091	0.4086	0.4030	0.3963	0.3966	0.3919	0.3920	0.3922

x/b	1.6	1.8
$l/b=1$ の場合	0.0393	0.0205
$l/b=2$ の場合	0.6511	0.5257
$l/b=4$ の場合	0.3924	0.3925



図−10−a



図−10−b

表−3 $n_2=\frac{m}{m+1}\cdot\frac{Et}{K_2b}\cdot\frac{\pi}{2W}P_2(x)$ の分布

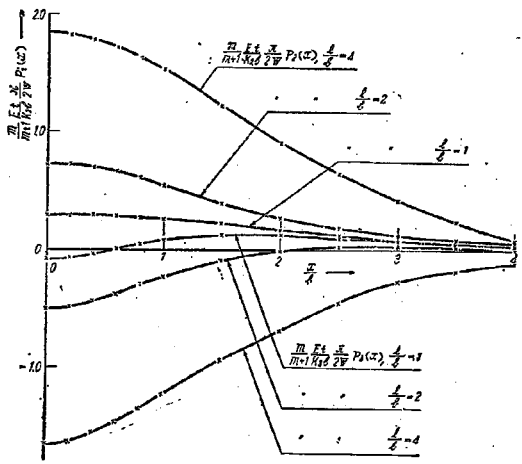
x/b	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0
$l/b=1$ の場合	0.2981	0.2963	0.2911	0.2834	0.2744	0.2635
$l/b=2$ の場合	0.7365	0.7349	0.7085	0.6729	0.6140	0.5533
$l/b=4$ の場合	1.8497	1.8354	1.7934	1.7261	1.6372	1.5341

x/b	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0
$l/b=1$ の場合	0.2265	0.1757	0.1246	0.0693	0.0506	0.0347
$l/b=2$ の場合	0.3974	0.2723	0.1861	0.1260	0.0835	0.0615
$l/b=4$ の場合	1.2257	0.9144	0.6550	0.4212	0.2315	0.0320

表—4　$n_3=\frac{m}{m+1}\frac{Et}{K_3b}\frac{\pi}{2W}P_3(x)$ の分布

x/b	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0
$l/b=1$ の場合	−0.0733	−0.0661	−0.0296	0.0103	0.0538	0.0893
$l/b=2$ の場合	−0.5028	−0.4844	−0.4353	−0.3737	−0.2935	−0.2216
$l/b=4$ の場合	−1.6512	−1.6228	−1.5563	−1.4603	−1.3470	−1.2333

x/b	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0
$l/b=1$ の場合	0.1307	0.1224	0.0935	0.0658	0.0487	0.0347
$l/b=2$ の場合	−0.0807	−0.0037	0.0275	0.0338	0.0303	0.0054
$l/b=4$ の場合	−0.9283	−0.6311	−0.4415	−0.2681	−0.1783	−0.1085



図—11　縁材の軸力 $P_2(x)$, $P_3(x)$ の分布

るに腹板の垂直力 N_x, N_y は極めて複雑な分布をなし，殊に N_x に於ては図—9 にて分るように，通常の梁理論により求めた応力分布とは大いに異り分布は極めて不規則である．然も一般に外荷重の分布領域外にてはこの場合力は存在しないように思われるが，計算の結果は僅かながら外荷重分布領域外にも力の存在する事を示している．これはいわゆる剪断遅の影響と思われる．なお本問題の取扱いに於ては垂直材の存在を考慮しなかつたが，以上の計算により集中荷重の影響は極めて局部的である故この垂直補強材の主なる効力は腹板の挫屈に対する防護材であり，挫屈荷重以下では腹板の力 N_x, N_y, S に対する影響は 2 次的な意味を有するだけであると云える．従つて集中荷重が垂直補強材に直接作用しなければ，垂直補強材を考慮しなくとも腹板の力の分布には大して影響はないように思われる．

次に縁材と腹板との接合部に於ける応力の状態を調べてみるに，今縁材の軸力 P_2, P_3 を

$$\begin{cases} P_2=n_2\dfrac{m+1}{m}\dfrac{K_2b}{Et}\dfrac{2W}{\pi} \\ P_3=n_3\dfrac{m+1}{m}\dfrac{K_3b}{Et}\dfrac{2W}{\pi} \end{cases}$$

にて表わせば縁材の軸応力 σ_2, σ_3 は

$$\begin{cases}\sigma_2(x)=n_2\dfrac{m+1}{m}\dfrac{K_2b}{Et}\dfrac{2W}{\pi F_2},\\ \sigma_3(x)=n_3\dfrac{m+1}{m}\dfrac{K_3b}{Et}\dfrac{2W}{\pi F_3}\end{cases}$$

但し n_2, n_3 は表−3 および表−4 に示すような値である．次に腹板の $y=\pm b$ に於ける x 方向の垂直力を

$$N_x(x,\pm b)=n\ \frac{2W}{\pi b}$$

にて表わせば，縁材と接合せる部分の腹板の応力 $\sigma_x(x,\ \pm b)$ は

$$\sigma_x(x,\ \pm b)=n\frac{2W}{\pi bt}$$

n は表−1 に示すようなものである．

従つて縁材と腹板との接合部に於ける両者の応力の比は

$$\frac{\sigma_x(x,\pm b)}{\sigma_i(x)}=\frac{n}{n_i}\ \frac{m}{m+1}\ \frac{F_i}{bt}\ \frac{Et}{K_ib}\qquad \text{但し } i=2,\ 3$$

となる．然して

$$\mu_i'^2=\frac{K_ib^3}{EF_i}=0.4$$

$$\frac{Gt}{K_ib}=0.8$$

$$\therefore\ \frac{G}{E}\ \frac{tb}{F_i}=0.32$$

$$\therefore\ F_i/bt=\frac{1}{0.832}$$

又

$$\frac{Et}{K_ib}=\frac{2.6}{0.8}$$

故に

$$\frac{\sigma_x(x,\pm b)}{\sigma_i(x)}=3.004,8\times\frac{n}{n_i}$$

よつて上の数値を $l/b=2$, $l/b=4$ の場合に就て求めれば表−5 および表−6 の如くになる．

表−5　$\sigma_x(x,-b)/\sigma_2(x)$ の値

x/b	0	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0
$l/b=2$ の場合	2.8321	2.4217	0.7638	−1.3359	−2.2360	−0.7214	−0.4960
$l/b=4$ の場合	2.9242	2.6327	2.0717	1.3511	0.4015	−0.4097	−1.6799

表−6　$\sigma_x(x,b)/\sigma_3(x)$ の値

x/b	0	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0
$l/b=2$ の場合	14.4220	7.9529	−0.8581	−12.3084	−247.0964	15.4392	2.1701
$l/b=4$ の場合	6.1264	3.9880	1.7691	0.8512	0.3082	−0.2954	−1.3099

上表より分るように接合部に於ける両者の応力の大きさには大なる差がある．これは鋲のすべりにより生ずるものにして，鋲の変歪の影響が如何に大であるかが分る．

以上の計算により鈑桁における集中荷重に対し縁材腹板の応力分布が如何になるかがほゞ判明したが，実際の場合には既述のように大なる集中荷重点には強大なる垂直補強材を有する故この部材の作用は鈑桁に於て充分なる検討を要する．この問題に就ては次報に於て論じたいと思う．

比較的淺い円弧拱の挫屈について

建設技官　猪瀬寧雄
建設技官　高田孝信

目　次

I. 緒　言……(1)
II. 挫屈荷重算出の基礎式……(1)
〔1〕 両端固定の場合……(5)
〔2〕 両端 Pin の場合……(6)
III. 両端 Pin の円弧拱の挫屈荷重……(8)
IV. 数値計算……(14)
V. 結　語……(15)

I. 緒　言

均一分布荷重を受ける円弧拱の挫屈荷重を求むるのに，従来[1]は挫屈するまでは拱には軸力のみ生じて曲げは生じないものとして計算している．この事は拱が深く挟角が可成り大きい場合にはほゞ正しいとみて差し支えないが，拱が比較的に浅く挟角が小となるにつれ端末の影響が漸次現われ，拱は挫屈前にすでに曲げを受けているので挫屈荷重は従来の方法で求めたものよりも実際は大となる筈である．本文はその誤差の程度を比較的浅い場合につき吟味したものである．拱が極めて浅い場合[2]に就ては此処では触れない事にする．

II. 挫屈荷重算出の基礎式

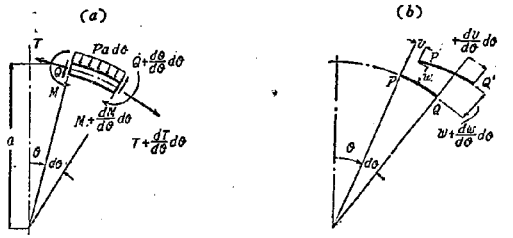
今挫屈時の変形状況を考えるに，無負荷時に P, Q にあつた点は挫屈すれば P', Q' に移動する．従つて

$$\widehat{PQ}=ad\theta\rightarrow ad\theta\left(1+\frac{dv}{ad\theta}+\frac{w}{a}\right)$$

又 Q に於ける断面は P に於ける断面に対して $d\theta$ の傾きをなすが，Q' に於ける断面は P' に於ける断面に対して

$$d\theta\left(1+\frac{dv}{ad\theta}-\frac{1}{a}\frac{d^2w}{d\theta^2}\right)$$

1) Timoshenko: Theory of elastic stability
2) 同上，および谷西：弾性学



図−1

の傾きをなす．従つて微小要素 $ad\theta$ の釣合の方程式は次の如くなる．

法線方向の力の釣合：

$$Q+\frac{dQ}{d\theta}d\theta=Q+\left(T+\frac{dT}{d\theta}d\theta\right)d\theta\left(1+\frac{dv}{ad\theta}-\frac{1}{a}\frac{d^2w}{d\theta^2}\right)+pad\theta\left(1+\frac{dv}{ad\theta}+\frac{w}{a}\right)$$

$$\therefore\quad \frac{dQ}{d\theta}=T\left(1+\frac{dv}{ad\theta}-\frac{1}{a}\frac{d^2w}{d\theta^2}\right)+pa\left(1+\frac{dv}{ad\theta}+\frac{w}{a}\right)\quad\cdots\cdots(1)$$

切線方向の力の釣合：

$$T=T+\frac{dT}{d\theta}d\theta+\left(Q+\frac{dQ}{d\theta}d\theta\right)d\theta\left(1+\frac{dv}{ad\theta}-\frac{1}{a}\frac{d^2w}{d\theta^2}\right)$$

$$\therefore\quad \frac{dT}{d\theta}+Q\left(1+\frac{dv}{ad\theta}-\frac{1}{a}\frac{d^2w}{d\theta^2}\right)=0\quad\cdots\cdots(2)$$

モーメントの釣合：

$$M+\left(Q+\frac{dQ}{d\theta}d\theta\right)ad\theta=M+\frac{dM}{d\theta}d\theta$$

$$\therefore\quad Q=\frac{dM}{ad\theta}\quad\cdots\cdots(3)$$

(1)，(2)，(3) より Q を消去すれば

(1)より

$$\frac{1}{a}\frac{d^2M}{d\theta^2}=T\left(1+\frac{dv}{ad\theta}-\frac{1}{a}\frac{d^2w}{d\theta^2}\right)+pa\left(1+\frac{dv}{ad\theta}+\frac{w}{a}\right)\quad\cdots\cdots(1)'$$

(2) より

$$\frac{dT}{d\theta}+\frac{dM}{ad\theta}\left(1+\frac{dv}{ad\theta}-\frac{1}{a}\frac{d^2w}{d\theta^2}\right)=0\quad\cdots\cdots(2)'$$

然るに軸力 T および曲げモーメント M と変位 v，w との間には

$$\left.\begin{aligned}T&=\frac{EA}{a}\left(\frac{dv}{d\theta}+w\right)+\frac{EI}{a^3}\left(\frac{d^2w}{d\theta^2}+w\right)-pa\\ M&=-\frac{EI}{a^2}\left(\frac{d^2w}{d\theta^2}+w\right)\end{aligned}\right\}\quad\cdots\cdots(4)$$

なる関係ある故に，(1)′，(2)′ に (4) の関係式を代入し，高次の微小項を無視すれば

$$\begin{cases}\dfrac{1}{a^2}\dfrac{d^2}{d\theta^2}\left\{EI\left(\dfrac{d^2w}{d\theta^2}+w\right)\right\}+\left(\dfrac{EI}{a^3}+p\right)\left(\dfrac{d^2w}{d\theta^2}+w\right)+\dfrac{EA}{a}\left(\dfrac{dv}{d\theta}+w\right)=0 \cdots(5)\\ \dfrac{d}{d\theta}\left\{EA\left(\dfrac{dv}{d\theta}+w\right)\right\}=0 \cdots\cdots(6)\end{cases}$$

上式にて

$$I=I_0\,i(\theta),\quad \frac{pa^3}{EI_0}=\alpha^2$$

と置けば (6) より

$$EA\left(\frac{dv}{d\theta}+w\right)=\frac{EI_0}{a^2}C=(\text{積分常数})$$

なる故 (5) より

$$\frac{d^2}{d\theta^2}\left\{i(\theta)\left(\frac{d^2w}{d\theta^2}+w\right)\right\}+\left(i(\theta)+\alpha^2\right)\left(\frac{d^2w}{d\theta^2}+w\right)+C=0 \cdots\cdots(7)$$

(7) 式が従来の考え方に依る円弧拱の挫屈後の変形の微分方程式で，之より固有値 α を求むれば挫屈荷重が定まる．

然るに実際には拱の両端の移動は制限を受けているので，拱が挫屈しなくとも p が作用すれば p の大小に関せず拱は軸圧縮力と同時に曲げモーメントを受ける事になる．然る時は挫屈後の軸圧縮力は変位 v，w にて表わす場合 (4) の如くすれば相当の誤差を生ずるおそれがあるので，次の如くせねばならぬ．今挫屈直前の力，曲げモーメントおよび変位に対し Suffix 0 を附し挫屈後の変位の増加を v'，w' にて表わせば，挫屈後の力，モーメントおよび変位 T，M，v，w は次の如くなる．

$$\left.\begin{aligned}v&=v_0+v'\\ w&=w_0+w'\end{aligned}\right\}$$

$$\left.\begin{aligned}T_0&=\frac{EA}{a}\left(\frac{dv_0}{d\theta}+w_0\right)+\frac{EI}{a^3}\left(\frac{d^2w_0}{d\theta^2}+w_0\right)\\ M_0&=-\frac{EI}{a^2}\left(\frac{d^2w_0}{d\theta^2}+w_0\right)\end{aligned}\right\} \cdots\cdots(4)'$$

$$\left.\begin{aligned}T&=T_0(v_0,w_0)+\frac{EA}{a}\left(\frac{dv'}{d\theta}+w'\right)+\frac{EI}{a^3}\left(\frac{d^2w'}{d\theta^2}+w'\right)\\ M&=M_0(w_0)-\frac{EI}{a^2}\left(\frac{d^2w'}{d\theta^2}+w'\right)\end{aligned}\right\} \cdots\cdots(4)''$$

然して挫屈直前の釣合の式は (1)′，(2)′ より

$$\begin{cases}\dfrac{1}{a}\dfrac{d^2M_0}{d\theta^2}=T_0\left(1+\dfrac{dv_0}{d\theta}-\dfrac{1}{a}\dfrac{d^2w_0}{d\theta^2}\right)+pa\left(1+\dfrac{dv_0}{ad\theta}+\dfrac{w_0}{a}\right) \cdots\cdots(1)''\\ \dfrac{dT_0}{d\theta}+\dfrac{1}{a}\dfrac{dM_0}{d\theta}\left(1+\dfrac{dv_0}{ad\theta}-\dfrac{1}{a}\dfrac{d^2w_0}{d\theta^2}\right)=0 \cdots\cdots(2)''\end{cases}$$

上の 2 式に (4)′ を代入して 2 次以上の高次の微小項を無視し且つ断面一定とすれば

$$\begin{cases} \dfrac{d^4w_0}{d\theta^4}+2\dfrac{d^2w_0}{d\theta^2}+w_0+(\alpha^2+\beta^2)\left(\dfrac{dv_0}{d\theta}+w_0\right)=-\alpha^2a \cdots\cdots(8) \\ \dfrac{d^2v_0}{d\theta^2}+\dfrac{dw_0}{d\theta}=0 \cdots\cdots(9) \end{cases}$$

但し

$$\alpha^2=\frac{pa^3}{EI},\quad \beta^2=\frac{a^2A}{I}$$

次に (4)″ を (1)′, (2)′ に代入すれば

$$\begin{cases} \dfrac{1}{a}\dfrac{d^2M_0}{d\theta^2}-\dfrac{EI}{a^3}\dfrac{d^2}{d\theta^2}\left(\dfrac{d^2w'}{d\theta^2}+w'\right)=\left\{T_0(v_0,\ w_0)+\dfrac{EA}{a}\left(\dfrac{dv'}{d\theta}+w'\right)\right. \\ \qquad \left.+\dfrac{EI}{a^3}\left(\dfrac{d^2w'}{d\theta^2}+w'\right)\right\}\left(1+\dfrac{dv_0}{d\theta}-\dfrac{1}{a}\dfrac{d^2w_0}{d\theta^2}+\dfrac{dv'}{ad\theta}-\dfrac{1}{a}\dfrac{d^2w'}{d\theta^2}\right) \\ \qquad +pa\left(1+\dfrac{dv_0}{ad\theta}+\dfrac{w_0}{a}+\dfrac{dv'}{ad\theta}+\dfrac{w'}{a}\right) \\ \dfrac{dT_0}{d\theta}+\dfrac{EA}{a}\dfrac{d}{d\theta}\left(\dfrac{dv'}{d\theta}+w'\right)+\dfrac{EI}{a^3}\dfrac{d}{d\theta}\left(\dfrac{d^2w'}{d\theta^2}+w'\right)+\left(\dfrac{1}{a}\dfrac{dM_0}{d\theta}\right. \\ \qquad \left.-\dfrac{EI}{a^3}\dfrac{d}{d\theta}\left(\dfrac{d^2w'}{d\theta^2}+w'\right)\right)\left(1+\dfrac{dv_0}{ad\theta}-\dfrac{1}{a}\dfrac{d^2w_0}{d\theta^2}+\dfrac{dv'}{ad\theta}-\dfrac{1}{a}\dfrac{d^2w'}{d\theta^2}\right)=0 \end{cases}$$

上の 2 式に (1)″, (2)″ を代入し微小項を無視すれば,

$$\begin{cases} \dfrac{EI}{a^3}\left(\dfrac{d^4w'}{d\theta^4}+\dfrac{d^2w'}{d\theta^2}\right)+\dfrac{T_0}{a}\left(\dfrac{dv'}{d\theta}-\dfrac{d^2w'}{d\theta^2}\right)+\dfrac{EA}{a}\left(\dfrac{dv'}{d\theta}+w'\right) \\ \qquad +\dfrac{EI}{a^3}\left(\dfrac{d^2w'}{d\theta^2}+w'\right)+p\left(\dfrac{dv'}{d\theta}+w'\right)=0 \cdots\cdots(10) \\ \dfrac{EA}{a}\left(\dfrac{d^2v'}{d\theta^2}+\dfrac{dw'}{d\theta}\right)+\dfrac{1}{a^2}\dfrac{dM_0}{d\theta}\left(\dfrac{dv'}{d\theta}-\dfrac{d^2w'}{d\theta^2}\right)=0 \cdots\cdots(11) \end{cases}$$

(10), (11) 両式に含まれる T_0, M_0 は (8), (9) 両式より v_0, w_0 を求むれば (4)′ より決定される. 即ち (9) より

$$\frac{dv_0}{d\theta}+w_0=C_0 \cdots\cdots(12)$$

依つて (8) より

$$\frac{d^4w_0}{d\theta^4}+2\frac{d^2w_0}{d\theta^2}+w_0=-(\alpha^2+\beta^2)C_0-\alpha^2a$$

上式の一般解は

$$w_0=-(\alpha^2+\beta^2)C_0-\alpha^2a+C_1\cos\theta+C_2\sin\theta+C_3\theta\cos\theta+C_4\theta\sin\theta$$

両端の条件を相等しいとすれば w は θ の偶函数でなければならぬ故

$$C_2=C_3=0$$

$$\therefore\quad w_0=-(\alpha^2+\beta^2)C_0-\alpha^2a+C_1\cos\theta+C_4\theta\sin\theta \cdots\cdots(13)$$

依つて (12) より

$$v_0=C_3+(1+\alpha^2+\beta^2)C_0\theta+\alpha^2a\theta-C_1\sin\theta+C_4(\theta\cos\theta-\sin\theta)$$

然るに v_0 は θ の奇函数である故

$$C_3=0$$

$$\therefore\quad v_0=(1+\alpha^2+\beta^2)C_0\theta+\alpha^2a\theta-C_1\sin\theta+C_4(\theta\cos\theta-\sin\theta)\cdots\cdots\cdots\cdots(14)$$

(13), (14) にて尚未知の積分常数 C_0, C_1, C_4 を含むが, 之等を求むるには次のような境界条件による.

$\theta=\theta_0$ にて

$$v_0=0\cdots\cdots(i)$$

$$w_0=0\cdots\cdots(ii)$$

$$\frac{dw_0}{d\theta}=0\cdots\cdots\text{(両端固定の場合)}\cdots\cdots(iii)$$

或は又

$$\frac{d^2w_0}{d\theta^2}+w_0=0\cdots\cdots\text{(両端 Pin の場合)}\cdots\cdots(iii)'$$

依つて

$$\left.\begin{aligned}
&\text{(i)}\rightarrow\ (1+\alpha^2+\beta^2)C_0\theta_0-C_1\sin\theta_0+C_4(\theta_0\cos\theta_0-\sin\theta_0)=-\alpha^2a\theta_0\\
&\text{(ii)}\rightarrow\ -(\alpha^2+\beta^2)C_0+C_1\cos\theta_0+C_4\theta_0\sin\theta_0=\alpha^2a\\
&\text{(iii)}\rightarrow\ -C_1\sin\theta_0+C_4(\sin\theta_0+\theta_0\cos\theta_0)=0\\
&\text{(iii)}'\rightarrow\ -(\alpha^2+\beta^2)C_0+2C_4\cos\theta_0=\alpha^2a
\end{aligned}\right\}$$

かくて積分常数は次の如くなる.

$$\left.\begin{aligned}
C_0&=\frac{D_0}{D}a=k_0a\\
C_1&=\frac{D_1}{D}a=k_1a\\
C_4&=\frac{D_4}{D}a=k_4a
\end{aligned}\right\}$$

但し D, D_1, D_4 は次の如きものである.

〔1〕 両端固定の場合

$$D=\begin{vmatrix}(1+\alpha^2+\beta^2)\theta_0-\sin\theta_0 & \theta_0\cos\theta_0-\sin\theta_0\\ -(\alpha^2+\beta^2) & \cos\theta_0\ \ \theta_0\sin\theta_0\\ 0 & -\sin\theta_0\ \ \sin\theta_0+\theta_0\cos\theta_0\end{vmatrix}$$

$$D_0=\alpha^2\begin{vmatrix}-\theta_0 & -\sin\theta_0\ \ \theta_0\cos\theta_0-\sin\theta_0\\ 1 & \cos\theta_0\ \ \theta_0\sin\theta_0\\ 0 & -\sin\theta_0\ \ \sin\theta_0+\theta_0\cos\theta_0\end{vmatrix}$$

$$D_1=\alpha^2\begin{vmatrix}(1+\alpha^2+\beta^2)\theta_0-\theta_0 & \theta_0\cos\theta_0-\sin\theta_0\\ -(\alpha^2+\beta^2) & 1 \quad \theta_0\sin\theta_0\\ 0 & 0 \quad \sin\theta_0+\theta_0\cos\theta_0\end{vmatrix}$$

$$D_4=\alpha^2\begin{vmatrix}(1+\alpha^2+\beta^2)\theta_0 & -\sin\theta_0 & -\theta_0\\ -(\alpha^2+\beta^2) & \cos\theta_0 & 1\\ 0 & -\sin\theta_0 & 0\end{vmatrix}$$

〔2〕 両端 pin の場合：

$$D=\begin{vmatrix}(1+\alpha^2+\beta^2)\theta_0 & -\sin\theta_0 & \theta_0\cos\theta_0-\sin\theta_0\\ -(\alpha^2+\beta^2) & \cos\theta_0 & \theta_0\sin\theta_0\\ -(\alpha^2+\beta^2) & 0 & 2\cos\theta_0\end{vmatrix}$$

$$D_0=\alpha^2\begin{vmatrix}-\theta_0 & -\sin\theta_0 & \theta_0\cos\theta_0-\sin\theta_0\\ 1 & \cos\theta_0 & \theta_0\sin\theta_0\\ 1 & 0 & 2\cos\theta_0\end{vmatrix}$$

$$D_1=\alpha^2\begin{vmatrix}(1+\alpha^2+\beta^2)\theta_0 & -\theta_0 & \theta_0\cos\theta_0-\sin\theta_0\\ -(\alpha^2+\beta^2) & 1 & \theta_0\sin\theta_0\\ -(\alpha^2+\beta^2) & 1 & 2\cos\theta_0\end{vmatrix}$$

$$D_4=\alpha^2\begin{vmatrix}(1+\alpha^2+\beta^2)\theta_0 & -\sin\theta_0 & -\theta_0\\ -(\alpha^2+\beta^2) & \cos\theta_0 & 1\\ -(\alpha^2+\beta^2) & 0 & 1\end{vmatrix}$$

依つて (4)′ より

$$\left.\begin{aligned}T_0&=\frac{EA}{a}\left\{C_0-\frac{EI}{a^3}\left\{(\alpha^2+\beta^2)C_0+\alpha^2 a-2C_4\cos\theta\right\}\right\}\\&=-\frac{EI}{a^3}\left\{\alpha^2(C_0+a)-2C_4\cos\theta\right\}\\M_0&=\frac{EI}{a^3}\left\{(\alpha^2+\beta^2)C_0+\alpha^2 a-2C_4\cos\theta\right\}\end{aligned}\right\}$$

依つて (10), (11) の両式より

$$\left\{\begin{aligned}&\frac{d^4w'}{d\theta^4}+\left\{2+\alpha^2(1+k_0)-2k_4\cos\theta\right\}\frac{d^2w'}{d\theta^2}+w'-\left\{\alpha^2(1+k_0)\right.\\&\left.-2k_4\cos\theta\right\}\frac{dv'}{d\theta}+(\alpha^2+\beta^2)\left(\frac{dv'}{d\theta}+w'\right)=0 \quad \cdots\cdots(10)'\\&\frac{d^3v'}{d\theta^3}+\frac{dw'}{d\theta}+\left\{\left(1+\frac{\alpha^2}{\beta^2}\right)k_0+\frac{\alpha^2}{\beta^2}-\frac{2k_4}{\beta^2}\cos\theta\right\}\left(\frac{dv'}{d\theta}-\frac{d^2w'}{d\theta^2}\right)\\&\quad=0 \quad \cdots\cdots(11)'\end{aligned}\right.$$

或は又上の 2 式より

$$\begin{cases} L_1=\dfrac{d^4w'}{d\theta^4}+(2-\beta^2k_0)\dfrac{d^2w'}{d\theta^2}+\beta^2\dfrac{dw'}{d\theta}+(1+\alpha^2+\beta^2)w' \\ \qquad +\beta^2\dfrac{d^2v'}{d\theta^2}+\left(\alpha^2+(1+k_0)\beta^2\right)\dfrac{dv'}{d\theta}=0 \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(10)'' \\ L_2=\dfrac{d^2v'}{d\theta^2}+\left\{k_0+(1+k_0)\dfrac{\alpha^2}{\beta^2}-\dfrac{2k_4}{\beta^2}\cos\theta\right\}\dfrac{dv'}{d\theta}-\left\{k_0+(1+k_0)\dfrac{\alpha^2}{\beta^2} \\ \qquad -\dfrac{2k_4}{\beta^2}\cos\theta\right\}\dfrac{d^2w'}{d\theta^2}+\dfrac{dw'}{d\theta}=0 \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(11)'' \end{cases}$$

(10)′, (11)′ 又は (10)″, (11)″ 両式が両端拘束の影響をも考慮せる場合の円弧拱の挫屈後の変形の微分方程式にして，これ等より固有値 α を求むれば挫屈荷重が決定される．尚 (11)′ にて一般に実際の橋梁等では

$$\beta^2>1000$$

例. 東京都万年橋 $\beta^2\fallingdotseq 6000$

愛知県鹿乗橋 $\beta^2\fallingdotseq 3780$

限界挫屈荷重 α_c^2 は (7) 式より求めると両端 Pin の場合には

$\theta_0=30°$ の場合： $\alpha_c^2=35$

$\theta_0=20°$ の場合： $\alpha_c^2=80$

$$\begin{cases} k_0=\dfrac{\alpha^2(3\sin\theta_0\cos\theta_0-2\theta_0\cos^2\theta_0-\theta_0)}{2\theta_0\cos^2\theta_0+(\alpha^2+\beta^2)(\theta_0+2\theta_0\cos^2\theta_0-3\sin\theta_0\cos\theta_0)}\ll 1 \\ k_4=\dfrac{\alpha^2\theta_0\cos\theta_0}{2\theta_0\cos^2\theta_0+(\alpha^2+\beta^2)(\theta_0+2\theta_0\cos^2\theta_0-3\sin\theta_0\cos\theta_0)}\ll 10 \end{cases}$$

又

$$\frac{dw'}{d\theta}>\frac{dv'}{d\theta},\quad \frac{dw'}{d\theta}>\frac{d^2w'}{d\theta^2}$$

依つて (11)′ の第 2 項を第 1 項に比し無視し得ると見做せば

$$\frac{dv'}{d\theta}+w'=C_0'$$

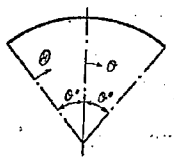
依つて (10)′ 式は

$$\frac{d^4w'}{d\theta^4}+\left(2+\alpha^2(1+k_0)-2k_4\cos\theta\right)\frac{d^2w'}{d\theta^2}+\left(1+\alpha^2(1+k_0)\right.$$
$$\left.-2k_4\cos\theta\right)w'=(k_0\alpha^2-\beta^2-2k_4\cos\theta)C_0' \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(15)$$

(15) も亦両端拘束の影響を考慮せる場合の挫屈後の変形の式である．結局挫屈荷重を求むるには連立方程式 (10)″, (11)″ 或は (15) の固有値 α^2 を求むればよい訳になる．

III. 両端 pin の円弧拱の挫屈荷重

挫屈荷重を求むるには連立方程式 (10)″, (11)″ を用うる．然しこの方程式をそのまゝ解く事は困難故，Galerkin method の近似的解法を用うる事にする．この方法を用うる際には想定せる変位 v', w' は何れも境界条件を満足せねばならぬ．然るに両端 Pin の場合の境界条件は



図−2

$$\theta=\pm\theta_0 \text{ にて}, \quad v=0, \quad w=0, \quad \frac{d^2w}{d\theta^2}+w=0$$

今拱の中央にあつた θ の原点を θ_0 だけずらし，

$$\Theta=\theta+\theta_0$$

とす．然る時は変位 v', w' を次の如く表わせば上の境界条件を満足す．

$$\begin{cases} v'=\sum_{m=1}^{\infty} a_m v_m=\sum_{m=1}^{\infty} a_m \sin\dfrac{m\pi\Theta}{2\theta_0} & \cdots\cdots(16\text{-}1) \\ w'=\sum_{m=1}^{\infty} b_m w_m=\sum_{m=1}^{\infty} b_m \sin\dfrac{m\pi\Theta}{\theta_0} & \cdots\cdots(16\text{-}2) \end{cases}$$

尚 θ の原点をずらした場合は (10)″, (11)″ 両式は次の如くになる．

$$\begin{cases} L_1=\dfrac{d^4w'}{d\Theta^4}+(2-k_0\beta^2)\dfrac{d^2w'}{d\Theta^2}+\beta^2\dfrac{dw'}{d\Theta}+(1+\alpha^2+\beta^2)w' \\ \quad +\beta^2\dfrac{d^2v'}{d\Theta^2}+\left\{\alpha^2+(1+k_0)\beta^2\right\}\dfrac{dv'}{d\Theta}=0 \quad \cdots\cdots(10)''' \\ L_2=\dfrac{d^2v'}{d\Theta^2}+\left\{k_0+(1+k_0)\dfrac{\alpha^2}{\beta^2}-2\dfrac{k_4}{\beta^2}\cos(\Theta-\theta_0)\right\}\dfrac{dv'}{d\Theta} \\ \quad -\left\{k_0+(1+k_0)\dfrac{\alpha^2}{\beta^2}-2\dfrac{k_4}{\beta^2}\cos(\Theta-\theta_0)\right\}\dfrac{d^2w'}{d\Theta^2}+\dfrac{dw'}{d\Theta}=0' \cdots\cdots(11)''' \end{cases}$$

依つて v', w' を (16-1), (16-2) 式にて表わしこれ等を (10)‴, (11)‴ 両式に代入した場合に生ずる誤差 ε_1, ε_2 は次の如くなる．

$$\begin{cases} \varepsilon_1=\sum_{m=1}^{\infty} a_m\left[-\beta^2\left(\dfrac{m\pi}{2\theta_0}\right)^3\sin\dfrac{m\pi\Theta}{2\theta_0}+\left\{\alpha^2+(1+k_0)\beta^2\right\}\left(\dfrac{m\pi}{2\theta_0}\right)\cos\dfrac{m\pi\Theta}{2\theta_0}\right] \\ \quad +\sum_{m=1}^{\infty} b_m\left[\left\{\left(\dfrac{m\pi}{\theta_0}\right)^4-(2-k_0\beta^2)\left(\dfrac{m\pi}{\theta_0}\right)^2+(1+\alpha^2+\beta^2)\right\}\sin\dfrac{m\pi\Theta}{\theta_0}\right. \\ \quad \left.+\beta^2\left(\dfrac{m\pi}{\theta_0}\right)\cos\dfrac{m\pi\Theta}{\theta_0}\right] \\ \varepsilon_2=\sum_{m=1}^{\infty} a_m\left[-\left(\dfrac{m\pi}{2\theta_0}\right)^2\sin\dfrac{m\pi\Theta}{2\theta_0}+\left\{k_0+(1+k_0)\dfrac{\alpha^2}{\beta^2}-2\dfrac{k_4}{\beta^2}\cos(\Theta-\theta_0)\right\}\right. \\ \quad \left.\times\left(\dfrac{m\pi}{2\theta_0}\right)\cos\dfrac{m\pi\Theta}{2\theta_0}\right] \\ \quad +\sum_{m=1}^{\infty} b_m\left[\left\{k_0+(1+k_0)\dfrac{\alpha^2}{\beta^2}-2\dfrac{k_4}{\beta^2}\cos(\Theta-\theta_0)\right\}\left(\dfrac{m\pi}{\theta_0}\right)^2\sin\dfrac{m\pi\Theta}{\theta_0}\right. \\ \quad \left.+\left(\dfrac{m\pi}{\theta_0}\right)\cos\dfrac{m\pi\Theta}{\theta_0}\right] \end{cases}$$

然して Galerkin method により

$$\begin{cases}\int_0^{2\theta_0} \varepsilon_1 w_n \, d\Theta = \int_0^{2\theta_0} \varepsilon_1 \sin\dfrac{n\pi\Theta}{\theta_0} \, d\Theta = 0 \cdots\cdots(17\text{-}1)\\ \int_0^{2\theta_0} \varepsilon_2 v_n \, d\Theta = \int_0^{2\theta_0} \varepsilon_2 \sin\dfrac{n\pi\Theta}{2\theta_0} \, d\Theta = 0 \cdots\cdots(17\text{-}2)\end{cases}$$

ならしむ．然る時は (17-1) にて

$$\int_0^{2\theta_0} \sin\frac{m\pi\Theta}{2\theta_0} \sin\frac{n\pi\Theta}{\theta_0} \, d\Theta = 0 \cdots\cdots m \neq 2n$$

$$= \theta_0 \cdots\cdots m = 2n$$

$$\int_0^{2\theta_0} \cos\frac{m\pi\Theta}{2\theta_0} \sin\frac{n\pi\Theta}{\theta_0} \, d\Theta = 0 \cdots\cdots n = \text{偶数}$$

$$= \frac{8\theta_0}{\pi} \frac{n}{2n^2 - m^2} = \frac{8\theta_0}{\pi} J_{m\cdot n} \cdots\cdots m = \text{奇数}$$

$$\int_0^{2\theta_0} \sin\frac{m\pi\Theta}{\theta_0} \sin\frac{n\pi\Theta}{\theta_0} \, d\Theta = \theta_0 \cdots\cdots m = n$$

$$= 0 \cdots\cdots m \neq n$$

$$\int_0^{2\theta_0} \cos\frac{m\pi\Theta}{\theta_0} \sin\frac{n\pi\Theta}{\theta_0} d\Theta = 0$$

依つて (17-1) 式は

$$b_n = A_n \cdot a_{2n} - \sum_{m=1}^{\infty} B_{m\cdot n} a_m \cdots\cdots(18\text{-}1)$$

但し

$$A_n = \frac{\beta^2 \left(\frac{n\pi}{\theta_0}\right)^2}{\left(\frac{n\pi}{\theta_0}\right)^4 - (2 - k_0\beta^2)\left(\frac{n\pi}{\theta_0}\right)^2 + 1 + \alpha^2 + \beta^2}$$

$$B_{m\cdot n} = \frac{\frac{8}{\pi}\left(\alpha^2 + (1+k_0)\beta^2\right)\left(\frac{m\pi}{2\theta_0}\right) J_{m\cdot n}}{\left(\frac{n\pi}{\theta_0}\right)^4 - (2 - k_0\beta^2)\left(\frac{n\pi}{\theta_0}\right)^2 + (1 + \alpha^2 + \beta^2)} = K_{n\cdot m} J_{m\cdot n}$$

次に (17-2) にて

$$\int_0^{2\theta_0} \sin\frac{m\pi\Theta}{2\theta_0} \sin\frac{n\pi\Theta}{2\theta_0} d\Theta = \theta_0 \cdots\cdots m = n$$

$$= 0 \cdots\cdots m \neq n$$

$$\int_0^{2\theta_0} \cos\frac{n\pi\Theta}{2\theta_0} \sin\frac{n\pi\Theta}{2\theta_0} d\Theta = 0 \cdots\cdots m \pm n = 0 \text{および偶数}$$

$$= \frac{4\theta_0}{\pi} \frac{n}{n^2 - m^2} = \frac{4\theta_0}{\pi} D_{m\cdot n} \cdots m \pm n = \text{奇数}$$

$$\int_0^{2\theta_0} \cos(\Theta-\theta_0)\cos\frac{m\pi\Theta}{2\theta_0}\sin\frac{n\pi\Theta}{2\theta_0}\,d\Theta=0\cdots\cdots m\pm n=0\text{および偶数}$$

$$=-2\theta_0\cos\left(\frac{\overline{m-n}\,\pi}{\overline{m-n}^2\pi^2-4\theta_0^2}-\frac{\overline{m+n}\,\pi}{\overline{m+n}^2\pi^2-4\theta_0^2}\right)$$

$$=-2\theta_0\cos\theta_0\,E_{m\cdot n}\cdots\cdots m\pm n=\text{奇数}$$

$$\int_0^{2\theta_0}\sin\frac{m\pi\Theta}{\theta_0}\sin\frac{n\pi\Theta}{2\theta_0}\,d\Theta=\theta_0\cdots\cdots 2m=n$$

$$=0\cdots\cdots 2m\neq n$$

$$\int_0^{2\theta_0}\cos\frac{m\pi\Theta}{\theta_0}\sin\frac{n\pi\Theta}{2\theta_0}\,d\Theta=0\cdots\cdots 2m\pm n=0\text{ および偶数}$$

$$=\frac{4\theta_0}{\pi}\frac{n}{n^2-4m^2}=\frac{4\theta_0}{\pi}F_{m\cdot n}\cdots\cdots n=\text{奇数}$$

$$\int_0^{2\theta_0}\cos(\Theta-\theta_0)\sin\frac{m\pi\Theta}{\theta_0}\sin\frac{n\pi\Theta}{2\theta_0}\,d\Theta=0\cdots\cdots n=\text{奇数}$$

$$=-4\theta_0^2\sin\theta_0\left(\frac{1}{\overline{2m-n}^2\pi^2-4\theta_0^2}-\frac{1}{\overline{2m-n}^2\pi^2-4\theta_0^2}\right)$$

$$=-4\theta_0^2\sin\theta_0\,H_{m\cdot n}\cdots\cdots 2m\pm n=0\text{および偶数}$$

依つて (17-2) 式は

$$a_n-\sum_{m=1}^{\infty}\frac{8\theta_0}{\pi}\left(\frac{m}{n^2}\right)\left[\left(k_0+(1+k_0)\left(\frac{\alpha}{\beta}\right)^2\right)\frac{D_{m\cdot n}}{\pi}+\frac{k_4}{\beta^2}\cos\theta_0\,E_{m\cdot n}\right]a_m$$

$$-\left(k_0+(1+k_0)\left(\frac{\alpha}{\beta}\right)^2\right)b_{\frac{n}{2}}$$

$$-\frac{16\theta_0}{\pi^2}\sum_{m=1}^{\infty}\frac{m}{n^2}\left[\frac{2\pi^2k_4}{\beta^2}\sin\theta_0\,m\cdot H_{m\cdot n}+F_{m\cdot n}\right]b_m=0\cdots\cdots(18\text{-}2)$$

(18-1), (18-2) 両式より b_m を消去すれば

$$a_n-\frac{8\theta_0}{n\pi^2}\sum_{m=1}^{\infty}m\left[K_0\cdot D_{m\cdot n}+\frac{\pi k_4}{\beta^2}\cos\theta_0\cdot E_{m\cdot n}\right]a_m-K_0\cdot A_{\frac{n}{2}}\cdot a_n$$

$$+K_0\sum_{m=1}^{\infty}B_{m\cdot\frac{n}{2}}\cdot a_m-\frac{16\theta_0}{n\pi^2}\sum_{m=1}^{\infty}m\cdot G_{m\cdot n}\left[A_m\cdot a_{2m}-\sum_{t=1}^{\infty}B_{t\cdot m}\cdot a_t\right]=0$$

但し

$$\begin{cases}K_0=k_0+(1+k_0)\left(\dfrac{\alpha}{\beta}\right)^2\\[2ex] G_{m\cdot n}=\dfrac{2\pi^2k_4}{\beta^2}\sin\theta_0\cdot m\cdot H_{m\cdot n}+F_{m\cdot n}\end{cases}$$

然して

$$\sum_{m=1}^{\infty}m\cdot G_{m\cdot n}\sum_{t=1}^{\infty}B_{t\cdot m}\cdot a_t=\sum_{m=1}^{\infty}a_m\left[\sum_{t=1}^{\infty}i\,G_{t\cdot n}B_{m\cdot t}\right]$$

依つて

$$\left(1-K_0\cdot A_{\frac{n}{2}}\right)a_n+\sum_{m=1}^{\infty}\left[\frac{16\theta_0}{n\pi^2}\sum_{i=1}^{\infty}iG_{i\cdot n}B_{m\cdot i}-\frac{8\theta_0}{n\pi^2}m\left(K_0\cdot D_{m\cdot n}+\frac{\pi k_4}{\beta^2}\cos\theta_0 E_{m\cdot n}\right)+K_0\cdot B_{m\cdot\frac{n}{2}}\right]a_m$$

$$-\frac{16\theta_0}{n\pi^2}\sum_{m=1}^{\infty}mG_{m\cdot n}A_m a_{2m}=0 \quad\cdots\cdots(19)$$

(19) 式に $n=1, 2, 3, \cdots\cdots$を入れると,

$$\left.\begin{aligned}
&n=1:\ (1+L_{1\cdot1})a_1-L_{2\cdot1}a_2+L_{3\cdot1}a_3-L_{4\cdot1}a_4+\cdots\cdots=0\\
&n=2:\quad L_{1\cdot2}a_1+(1-K_0A_1)a_2+L_{3\cdot2}a_3+L_{5\cdot2}a_5+\cdots\cdots=0\\
&n=3:\quad L_{1\cdot3}a_1-L_{2\cdot3}a_2+(1+L_{3\cdot3})a_3-L_{4\cdot3}a_4+\cdots\cdots=0\\
&n=4:\quad L_{1\cdot4}a_1+L_{2\cdot4}a_3+(1-K_0\cdot A_1)a_4+\cdots\cdots=0\\
&\qquad\vdots
\end{aligned}\right\}\cdots\cdots(19)'$$

但し

$$\left.\begin{aligned}
L_{1\cdot1}&=\frac{16\theta_0}{\pi^2}\sum_{i=1}^{\infty}i\cdot G_{i\cdot1}B_{1\cdot i}\\
L_{2\cdot1}&=\frac{16\theta_0}{\pi^2}\left[1\cdot G_{1\cdot1}A_1+\frac{2}{2}\left(K_0\cdot D_{2\cdot1}+\frac{\pi k_4}{\beta^2}\cos\theta_0\cdot E_{2\cdot1}\right)\right]\\
L_{3\cdot1}&=\frac{16\theta_0}{\pi^2}\sum_{i=1}^{\infty}iG_{i\cdot1}\ B_{3\cdot i}\\
L_{4\cdot1}&=\frac{16\theta_0}{\pi^2}\left[2G_{2\cdot1}\cdot A_2+\frac{4}{2}\left(K_0\cdot D_{4\cdot1}+\frac{\pi k_4}{\beta^2}\cos\theta_0\cdot E_{4\cdot1}\right)\right.\\
&\vdots
\end{aligned}\right\}$$

$$\left.\begin{aligned}
L_{1\cdot2}&=K_0\cdot B_{1\cdot1}-\frac{1\times8\theta_0}{2\pi^2}\left(K_0\cdot D_{1\cdot2}+\frac{\pi k_4}{\beta^2}\cos\theta_0\cdot E_{1\cdot2}\right)\\
L_{3\cdot2}&=K_0\cdot B_{3\cdot1}-\frac{3\times8\theta_0}{2\pi^2}\left(K_0\cdot D_{3\cdot2}+\frac{\pi k_4}{\beta^2}\cos\theta_0\cdot E_{3\cdot2}\right)
\end{aligned}\right\}$$

$$\left.\begin{aligned}
&\vdots\\
L_{1\cdot3}&=\frac{16\theta_0}{3\pi^2}\sum_{i=1}^{\infty}iG_{i\cdot3}\ B_{1\cdot i}\\
L_{2\cdot3}&=\frac{16\theta_0}{3\pi^2}\left[1\cdot G_{1\cdot3}\ A_1+\frac{2}{2}\left(K_0\cdot D_{2\cdot3}+\frac{\pi k_4}{\beta^2}\cos\theta_0\cdot E_{2\cdot3}\right)\right]\\
L_{3\cdot3}&=\frac{16\theta_0}{3\pi^2}\sum_{i=1}^{\infty}iG_{i\cdot3}\ B_{3\cdot i}\\
L_{4\cdot3}&=\frac{16\theta_0}{3\pi^2}\left[2\cdot G_{2\cdot3}\ A_2+\frac{4}{2}\left(K_0\cdot D_{4\cdot3}+\frac{\pi k_4}{\beta^2}\cos\theta_0\cdot E_{4\cdot3}\right)\right]\\
&\vdots
\end{aligned}\right\}$$

然して

$$\sum_{i=1}^{\infty} iG_{i\cdot1}\,B_{1\cdot i}=\left[\frac{2\pi^2k_4}{\beta^3}\sin\theta_0\sum_{i=1}^{\infty}i^2H_{i\cdot1}J_{1\cdot i}+\sum_{i=1}^{\infty}iF_{i\cdot1}J_{1\cdot i}\right]K_1$$

$$\sum_{i=1}^{\infty}i^2H_{i\cdot1}J_{1\cdot i}=\frac{1}{4}\left[\frac{1}{8}\frac{\tan\theta_0}{\theta_0}+\sum_{i=1}^{\infty}\frac{i}{2i^2-1}\left(\frac{1}{2i-1^2\,\pi^2-4\theta_0^2}-\frac{1}{2i+1^2\pi^2-4\theta_0^2}\right)\right]$$ [3]

$$\sum_{i=1}^{\infty}iF_{i\cdot1}J_{1\cdot i}=-\frac{1}{4}\left(\frac{1}{2}+\sum_{i=1}^{\infty}\frac{1}{(2i^2-1)^2}\right)=-0.15421$$

$$\sum_{i=1}^{\infty}iG_{i\cdot1}\;B_{3\cdot i}=3\left[\frac{2\pi^2k_4}{\beta^3}\sin\theta_0\sum_{i=1}^{\infty}i^2H_{i\cdot1}J_{3\cdot i}+\sum_{i=1}^{\infty}iF_{i\cdot1}J_{3\cdot i}\right]K_3$$

$$\sum_{i=1}^{\infty}i^2H_{i\cdot1}J_{3\cdot i}=\frac{1}{4}\left[-\frac{1}{8}\frac{\tan\theta_0}{\theta_0}+9\sum_{i=1}^{\infty}\frac{i}{2i^2-3^2}\left(\frac{1}{2i-1^2\,\pi^2-4\theta_0^2}-\frac{1}{2i+1^2\,\pi^2-4\theta_0^2}\right)\right]$$

$$\sum_{i=1}^{\infty}iF_{i\cdot1}J_{3\cdot i}=0$$

$$\sum_{i=1}^{\infty}iG_{i\cdot3}B_{1\cdot i}=\left[\frac{2\pi^2k_4}{\beta^3}\sin\theta_0\sum_{i=1}^{\infty}i^2H_{i\cdot3}J_{1\cdot i}+\sum_{i=1}^{\infty}iF_{i\cdot3}J_{1\cdot i}\right]K_1$$

$$\sum_{i=1}^{\infty}i^2H_{i\cdot3}J_{1\cdot i}=\frac{1}{4}\left[\frac{3}{8}\frac{\tan\theta_0}{\theta_0}+\sum_{i=1}^{\infty}\frac{i}{(2i^2-1)}\left(\frac{1}{2i-3^2\,\pi^2-4\theta_0^2}-\frac{1}{2i+3^2\,\pi^2-4\theta_0^2}\right)\right]$$

$$\sum_{i=1}^{\infty}iF_{i\cdot3}J_{1\cdot i}=0$$

$$\sum_{i=1}^{\infty}iG_{i\cdot3}B_{3\cdot i}=3\left[\frac{2\pi^2k_4}{\beta^3}\sin\theta_0\sum_{i=1}^{\infty}i^2H_{i\cdot3}J_{3\cdot i}+\sum_{i=1}^{\infty}iF_{i\cdot3}J_{3\cdot i}\right]$$

$$\sum_{i=1}^{\infty}i^2H_{i\cdot3}J_{3\cdot i}=\frac{1}{4}\left[\frac{3}{8}\frac{\tan\theta_0}{\theta_0}+9\sum_{i=1}^{\infty}\frac{i}{2i^2-3^2}\left(\frac{1}{2i-3^2\pi^2-4\theta_0^2}-\frac{1}{2i+3^2\pi^2-4\theta_0^2}\right)\right]$$

$$\sum_{i=1}^{\infty}iF_{i\cdot3}J_{3\cdot i}=-0.46259$$

$$\vdots$$

然して $J_{m\cdot n}$, $D_{m\cdot n}$, $F_{m\cdot n}$, $E_{m\cdot n}$, $H_{m\cdot n}$ は表 1, 2, 3, 4, 5 に示すようなものである．依つて (19) 式より固有値 α^2 を求むるには (19)′ にて a_1, a_2, a_3,… 等は同時に総べてが零となつてはならぬ故，次の条件を満足せねばならぬという条件を用う．即ち

3) 竹内端三：函数論 上巻， p.355

表−1　$J_{m\cdot n}=\dfrac{n}{2n^2-m^2}$

n \ m	1	2	3	4	5
1	0.33333	0	−0.20000	0	−0.04762
2	0.13333	0	0.28572	0	−0.22222
3	0.08571	0	0.11111	0	0.27272$_7$
4	0.06349	0	0.07273	0	0.10256
5	0.05050	0	0.05494	0	0.06666

表−2　$D_{m\cdot n}=\dfrac{n}{n^2-m^2}$

n \ m	1	2	3	4	5
1	0	−0.33333	0	−0.06666	0
2	0.66666	0	−0.40000	0	−0.09524
3	0	0.60000	0	−0.42857	0
4	0.26666	0	0.57143	0	−0.44444
5	0	0.23809	0	0.55555	0

表−3　$F_{m\cdot n}=0$ ……n＝偶数

$=\dfrac{n}{n^2-2m^2}$ ……n＝奇数

n \ m	1	2	3	4	5
1	−0.33333	−0.06666	−0.02857	−0.01587	−0.01010
2	0	0	0	0	0
3	0.60000	−0.42857	−0.11111	−0.05455	−0.03297
4	0	0	0	0	0
5	0.23809	0.55555	−0.45454	−0.12821	−0.06666

表−4　$E_{m\cdot n}=\dfrac{\overline{m-n}\,\pi}{m-n^2\pi^2-4\theta_0^2}-\dfrac{\overline{m+n}\,\pi}{m+n^2\pi^2-4\theta_0^2}$ ……$m\pm n$＝奇数

$=0$ ……$m\pm n$＝偶数

$\theta_0=30°$ の場合

n \ m	1	2	3	4	5
1	0	0.25067	0	0.04348	0
2	−0.46553	0	0.29415	0	0.06185
3	0	−0.42204$_5$	0	0.31252	0
4	−0.17137$_5$	0	−0.40367$_5$	0	0.32268
5	0	−0.15300$_5$	0	−0.39351$_5$	0

$\theta_0=20°$ の場合

n \ m	1	2	3	4	5
1	0	0.22816	0	0.04290	0
2	−0.44154	0	0.27106	0	0.06117
3	0	−0.39864	0	0.28933	0
4	-0.17047_6	0	−0.38037	0	0.29895_5
5	0	-0.15220_6	0	-0.3707_4	0

表−5 $H_{m\cdot n}=\dfrac{1}{2m-n^2\pi^2-4\theta_0^2}-\dfrac{1}{2m+n^2\pi^2-4\theta_0^2}$ ……n=偶数

$=0$ ……n=奇数

$\theta_0=30°$ の場合

n \ m	1	2	3	4	5
1	0.10259	0.00733	0.00200	0.00082	0.00041_5
2	0	0	0	0	0
3	0.10991_5	0.11191	0.01014_5	0.00323	0.00147
4	0	0	0	0	0
5	0.00932_8	0.11273	0.11315	0.01080	0.00362

$\theta_0=20°$ の場合

n \ m	1	2	3	4	5
1	0.09526_5	0.00726	0.00199	0.00082	0.00041_5
2	0	0	0	0	0
3	0.10252_5	0.10451_8	0.01007	0.00322_8	0.00147
4	0	0	0	0	0
5	0.00919	0.10533_4	0.10575	0.01066	0.00361_1

$$D=\begin{vmatrix} 1+L_{1\cdot1} & -L_{2\cdot1} & L_{3\cdot1} & \cdots \\ L_{1\cdot2} & 1-K_0\cdot A_1 & L_{3\cdot2} & \cdots \\ L_{1\cdot3} & -L_{2\cdot3} & 1+L_{3\cdot3} & \cdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \end{vmatrix}=0 \quad \cdots\cdots(20)$$

(20) の α^2 の根が座屈荷重となる.

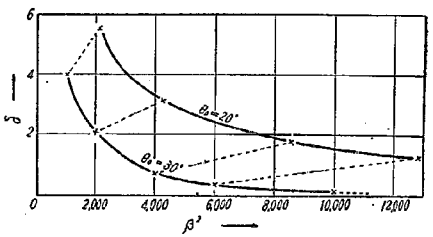
IV. 数 値 計 算

数値計算は挟角 $\theta_0=20°$, $30°$ の場合, β^2 の変化により限界座屈荷重が如何に変化するかを調べてみた. 其

の結果は 表−6 および図−3 の如くなる．その場合拱の浅くなつたゝめの影響を調べるために挟角 θ_0 を 30° より 20° に変化せしむる場合には拱の径間 l および断面は変化しないものとして

表−6

$\theta_0=30°$					$\theta_0=20°$				
β^2	第1近似値	第2近似値	第3近似値	δ	β^2	第1近似値	第2近似値	第3近似値	δ
1,000	39.258	39.000		4.000	2,137·4		85.520		5.520
2,000	38.036	37.058	37.058	2.058	4,274·8	89.945	83.152		3.152
4,000	36.333	35.710		0.710	8,549·6		81.770		1.770
6,000	35.694	35.350		0.350	12,824	83.000	81.260	81.255	1.255
10,000	35.232	35.145		0.145					



図−3　β^2 による限界座屈荷重の変化

$$\beta^2=\frac{\alpha^2 A}{I}=\frac{l^2 A}{4I\sin^2\theta_0}$$

依つて $(\beta^2)_{\theta_0=30°}=1,000$ に対して，$\theta_0=20°$ になつた場合の $(\beta^2)_{\theta_0=20°}$ は

$$\frac{l^2A}{4I}=\beta^2\sin^2 20°=1,000\times\sin^2 30°$$

$$\therefore\quad (\beta^2)_{\theta_0=20°}=1,000\times\left(\frac{\sin 30°}{\sin 20°}\right)^2=2,137\cdot4$$

とすれば浅くなつたゝめの影響を知る事が出来る．尚図−3 にて縦軸 δ は本法により求めた限界座屈荷重と従来の考え方により求めた (7) 式の解との差である．

V. 結　　語

以上は両端 pin の場合につき従来の方法にて計算した限界座屈荷重が更に精密に求めた場合に比し如何程の誤差を生ずるかを吟味せるものにして，その結果は実際に使用せられる如き β^2 および挟角 $2\theta_0$ が 60° 以上では従来の方法の解が実用上充分使用し得る程度の正解に近い事も判明した．然し拱が浅くなり β^2 が小さくなるにつれその誤差は漸次顕著となる事も明らかである．尚 θ_0 が 20° 以下の浅い拱になれば 2 次以上の微小項

を無視している本法でも尚不充分であると思われる．この問題についてはふれない事にする．此処では両端固定の場合に就ては解を示さなかつたが，同様の結論が得られると思う．

電気養生コンクリートの設計施工上考慮すべき事項に関する実験的研究 (2)

建設技官　山田順治
建設技官　伊東茂富
建設技官　清水道貞

目　次

I. 前がき……(2)
II. 見掛けの比抗抵に関する試験……(2)
〔1〕目的……(2)
〔2〕電極板の大きさと見掛けの比抵抗との関係に関する試験……(2)
〔3〕挿入鉄筋の位置と見掛けの比抵抗との関係に関する試験……(3)
〔4〕鉄筋量と見掛けの比抵抗との関係に関する試験……(4)
〔5〕電極板が片側のみにある場合の見掛けの比抵抗に関する試験……(4)
(1) 電極板の間隔が同じで供試体の厚みが変る場合の見掛けの比抵抗に関する試験……(4)
(2) 電極板の間隔と見掛けの比抵抗との関係に関する試験……(5)
III. 電気養生が附着強度に及ぼす影響に関する試験……(5)
〔1〕目的……(5)
〔2〕材料……(5)
(1) セメント……(5)
(2) 砂……(6)
(3) 砂利……(6)
〔3〕コンクリート……(6)
(1) 配合……(6)
(2) 練り混ぜ……(7)
(3) 供試体……(7)

〔4〕 通　　電……(7)
〔5〕 試 験 方 法……(9)
〔6〕 試験結果およびその考察……(9)
(1) 電 気 抵 抗……(9)
(2) 附 着 強 度……(10)
(3) 電力消費量……(10)
IV. 結　　び……(12)

I. 前　が　き

無筋コンクリートを電気養生する場合，考慮すべき問題の一部として，コンクリートの組成と比抵抗との関係，並びに温度上昇速度と圧縮強度および弾性係数との関係等につき，「電気養生コンクリートの設計施工上考慮すべき事項に関する実験的研究（第1報）」として既に報告した．

我が国およびソ聯邦の二，三の現場では，鉄筋コンクリートにも電気養生方法を採用し，成功を収めその工事記録が報告されている．然し鉄筋挿入による電導度の変化，鉄筋の附着強度に及ぼす影響，等の基礎的問題については余り明白ではない．本報告は鉄筋挿入による見掛けの比抵抗の変化並びに鉄筋との附着強度におよぼす影響について実験した結果につき記述したものであつて，今後更に電気養生したコンクリートの曲げ強さ，耐久性等につき実験を行う予定である．

なお本実験は，文部省科学試験研究費より補助を得た．こゝに記して謝意を表する．

II. 見掛けの比抵抗に関する試験

〔1〕 目　　的

電極配置，消費電力量，最大電力等の見積りには，コンクリートの発熱および冷却に就て考慮しなければならないのであつて，それらの問題はコンクリートの最高温度，温度上昇速度，外気温，風速，放熱面積等多数の要素がある．これ等のうち，発熱に最も関係のあるコンクリートの比抵抗につき実験し，電極配置，消費電力量等の資料をえんとする目的で行つたものである．

〔2〕 電極板の大きさと見掛けの比抵抗との関係に関する試験

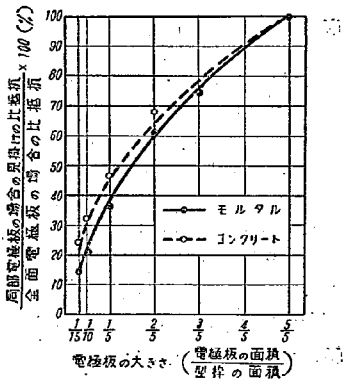
使用したセメント，砂，砂利の品質は III に記してある如きものである．セメント砂重量比 1：2，水セメント重量比 65％ のモルタルおよび粗骨材の最大寸法 30 mm，コンクリート 1 m³ につきセメント量 320 kg，水セメント比 55％ のコンクリートを用いて，電極板を型わくの相対する面の全面に取付けた場合および局部的に取付けた場合の数種につき，瞬間的に電流を通じ電流および電圧を測定し，これより見掛けの比抵抗を求めた．供試体の大きさはモルタルの場合は 5×5×5 cm，コンクリートの場合は 15×15×30 cm である．（電極板を取付ける面は 15×30 cm の面）．

$\frac{\text{電極板の面積}}{\text{型わくの面積}}$ と $\frac{\text{局部電極板の場合の見掛けの比抵抗}}{\text{全面電極板の場合の比抵抗}}$ との関係を図示すると図−1 の如くである.

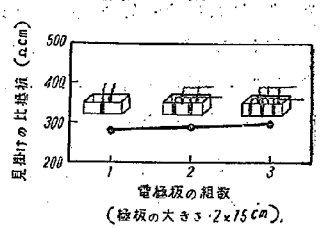
図−1 より, 見掛けの比抵抗は $\frac{\text{電極板の面積}}{\text{型わくの面積}}$ に関係し, その値が小さい程見掛けの比抵抗値は小さい. 更にこの見掛けの比抵抗値と $\frac{\text{電極板の面積}}{\text{型わくの面積}}$ との関係はモルタルとコンクリートとで殆ど同傾向にあるから, 配合の如何に余り関係がないものと思われる.

次に細い電極板を多数使用した場合; コンクリートの見掛けの比抵抗はどう変化するかにつき検討するため, 上記型わくおよびコンクリートを用い, 2 cm 巾の電極板を向い合せに 1 組, 2 組, および 3 組の 3 種につき測定した結果を図示すると図−2 の如くである.

図−2 より細い電極板を多数用いた場合の見掛けの比抵抗は, 電極板の各細片の面積が一定なら, その組数には殆ど影響を受けないことが分る.



図−1 電極板の大きさと見掛けの比抵抗との関係



図−2 電極板の組数と見掛けの比抵抗との関係

〔3〕 挿入鉄筋の位置と見掛けの比抵抗との関係に関する試験

挿入鉄筋に電力の集中するのを防ぐための一つの問題として, 電極板と挿入鉄筋との距離をどの位, 離したらよいかと云う問題を検討するために, 電極板とスターラップとの距離を種々に変え, 〔2〕の実験に使用したコンクリートおよび型わく (但し電極板は全面とする) を用いて見掛けの比抵抗を求めた結果を表示すると表−1 の通りである.

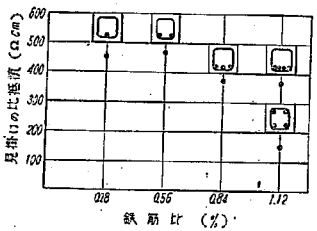
表−1 電極板とスターラップとの距離と見掛けの比抵抗との関係

電極板とスターラップとの距離 (cm)	見掛けの比抵抗 (Ωcm)		
	I	II *	III *
鉄筋挿入せず	1150		
スターラップなし	1200	1440	1710
5.5	1260		
4.5	1140		
3.5	1035		
2.0		960	1200
1.5	675		
1		800	960
0.5		375	690

II *, III * は附着強度試験供試体製作の際求めたもの

表−1 より挿入鉄筋と電極板との距離を 5 cm 以上にすれば，挿入鉄筋に電力の集中するのを防ぎうることが分る．

〔4〕 鉄筋量と見掛けの比抵抗との関係に関する試験



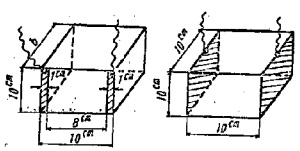
図−3 鉄筋量と見掛けの比抵抗との関係

鉄筋量が見掛けの比抵抗に及ぼす影響につき検討するために，スターラップと電極板との距離を同じくし，鉄筋比 0.28 %，0.56 %，0.48 %，1.12 % のものにつき〔1〕～〔3〕の方法と全く同様の方法で見掛けの比抵抗を求めた結果を図示すると図−3 の通りである．図−3 より，見掛けの比抵抗は鉄筋量により甚だしい影響を受けないが，その位置により受ける影響は甚だ大きいことが分る．

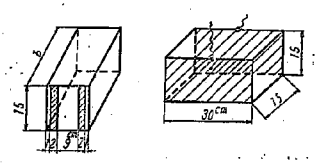
〔5〕 電極板が片側のみにある場合の見掛けの比抵抗に関する試験

(1) 電極板の間隔が同じで供試体の厚みが変る場合の見掛けの比抵抗に関する試験．

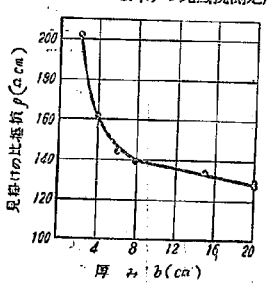
セメント，砂，砂利の品質は〔2〕～〔4〕と同様のものを用い，セメント砂重量比 1：2，水セメント比 60 % のモルタルおよび〔2〕～〔4〕と同配合のコンクリートにつき見掛けの比抵抗を求めた．モルタルの場合図− 4 (b) の如くにして求めた比抵抗は 360 Ω cm である．(a) 図に示す如く，表面に巾 1 cm の電極板をあて，厚み b が 2 cm，4 cm，6 cm，8 cm，10 cm，15 cm，20 cm，の場合の見掛けの比抵抗を求めた結果は図−6 の如くである．(但し便宜上 $\rho = R\frac{A}{l}$ 中，l は電極板の純間隔とした．)



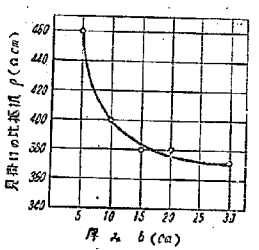
図−4 モルタルの見掛けの比抵抗測定用供試体



図−5 コンクリートの見掛けの比抵抗測定用供試体



図−6 厚みの変化によるモルタルの見掛けの比抵抗



図−7 厚みの変化によるコンクリート見掛けの比抵抗

図−6 より，b が小さい時は見掛けの比抵抗は大きく，b が大きくなるにつれ徐々に減少して，電極板の純間隔に達すると殆ど一定の値に達する．

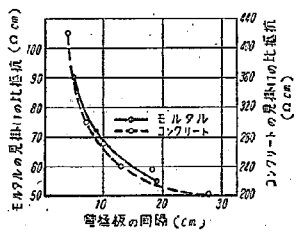
コンクリートの場合は図−5 (b) の如くにして求め比抵抗は 960 Ωcm である．〔3〕の比抵抗と異つた値を示しているのは，コンクリートの温度が高いためである．(a) 図に示す如く表面に 2 cm の電極板をおき，b を 5cm，10 cm，15 cm．20 cm および 30 cm につき，見掛けの比抵抗を求めた結果を図示すると図−7 の通りである．

コンクリートの場合は，厚み b が電極板の純間隔の約 2 倍に達すると殆ど一定の値に達する．

(2) 電極板の間隔と見掛けの比抵抗との関係に関する試験．

モルタルの場合は型わくの大きさ 6×10×30 cm のはり形で，6×30 cm の面に，巾 1 cm の 1 組の電極板を純間隔 5 cm，9 cm，19 cm に置いて，見掛けの比抵抗を求め，コンクリートの場合は 15×15×40 cm のはり形型わくの 15×40 cm の面に巾 2 cm の 1 組の電極板を純間隔 4 cm，7 cm，10 cm，13 cm，18 cm，28 cm，に置いて比抵抗を求めた．この結果を図示すると図−8 の通りである．(1) の場合より比抵抗値の幾分低いのは温度の影響と思われる．

図−8 より電極板の間隔が狭いときは見掛けの比抵抗は甚だ大きいが，間隔が大きくなると徐々に小さくなり，ある間隔以上になると殆ど一定の値をとる事が分る．



図−8 電極板の間隔を変えた場合のモルタルおよびコンクリートの見掛けの比抵抗

III. 電気養生が附着強度におよぼす影響に関する試験

〔1〕 目 的

鉄筋コンクリートを電気養生により施工した場合，挿入鉄筋に電流が集中し，これに接するコンクリートが過熱され，鉄筋とコンクリートとの附着力が減少しないかと云う問題は最も重要なものと思われる．

この問題につき検討し，鉄筋コンクリートを電気養生により施工することの適否および施工方法に対する資料をうる目的で行つたものである．

〔2〕 材 料

(1) セメント

普通ポルトランドセメントで，試験結果は表−2 の通である．

表−2 セメント試験結果

試験項目	比重	粉末度 (%)	膨張 ヒビワレ	凝結時間 始発 (時〜分)	凝結時間 終結 (時〜分)	曲げ強度 (kg/cm²) 成形後の日数 3日	7日	28日	圧縮試験 成形後の日数 3日	7日	28日
試験成績	3.13	1.35	完全	2〜25	3〜52	19	32	53	65	107	198

以上の如くセメントは規格に適合したものである.

表-3 砂の性質

試験項目	試験成績
比重	2.63
吸水率 (%)	1.80
単位容積重量(kg/m³)	1555.00
空隙率 (%)	40.90
洗い試験 (%)	0.515
有機不純物	標準色より うすい
粗粒率	2.07

(2) 砂

砂は荒川産で,板フルイ 5 を全部通過したもので,その主な性質は表-3 の通りである.

(3) 砂利

砂利は相模川産で,比重 2.67,吸水率 1.4% で,各粒径別に貯蔵してあるものを再び混合して用い,その単位容積重量は 1750 kg/m³, 空隙率は 34.5%, 粗粒率は 7.05 である.

[3] コンクリート

(1) 配合

コンクリートの配合は表-4 の通りである.

表-4 コンクリートの配合

粗骨材の最大寸法 cm	スランプ cm	水セメント重量比 (w/c) %	コンクリート 1m³ に用いるセメント量 kg	コンクリート 1m³ に用いる水量 kg	粗細骨材比 (G/S)	コンクリート 1m³ に用いる表面乾燥飽和状態の骨材重量 kg		
						全量	細骨材	粗骨材
30	7	55	322	177	2.2	1911	598	1313

材令 28 日の標準試験方法による圧縮強度は 282 kg/cm² である.

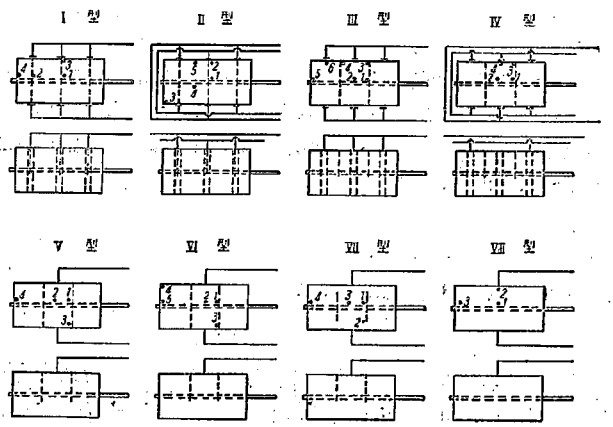


図-9 供試体

(2) 練り混ぜ

練り混ぜには 8 切練りランサム型ミキサを用い，空練り 2 分間，水を加えて 1 分間，砂利を加えて 3 分間練り混ぜた後，練り台に受取つた後数回切返して用いた．

(3) 供 試 体

供試体は図−9 に示す如く 15×15×30 cm のはり形供試体の中心に直径 16 mm，長さ 70 cm の丸鋼とこれに 2 個或は 3 個のスターラップを挿入したものである．丸鋼の一端はコンクリート面から約 1 cm だけ突き出させて置いて，棒鋼端の滑動するのを測定するに便にした．コンクリートは 2 層に分けて型わくにつめ，各層を標準突き棒で 27 回ずつ突き固め，なお木槌で型を叩いてコンクリートの落着きをよくした．供試体は表面からの水分の蒸発を防ぐため，セメント袋 3 枚をぬらしたもので覆をした．

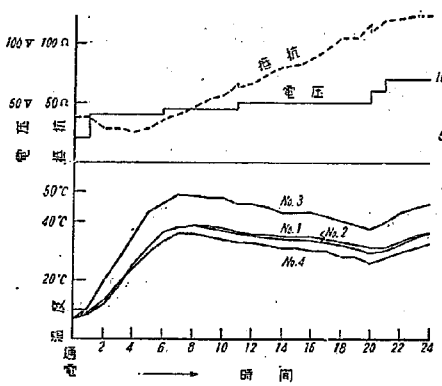
〔4〕 通　　電

電源としては 100 ボルトの交流を使用し，変圧器を用いて連続通電し，且つコンクリートの温度上昇速度および最高温度を調節した．電極が局部的なもの即ち I 型〜IV 型と全面のもの即ち V 型〜VIII 型の 2 組に分け，各組を 1 つの変圧器に連結したので，スターラップの相違により温度上昇速度および最高温度を同様の条件に置くことができなかつた．通電中の供試体の温度，気温および電気的経過を示すと図−10〜図−17 の通りである．

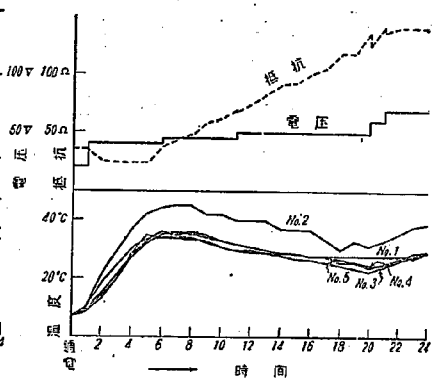
図−10〜図−17 より温度上昇速度および最高温度を表示すると表−5 の通りである．

供試体の温度は 図−10〜図−17 に示してある位置でアルコール寒暖計により測定した．

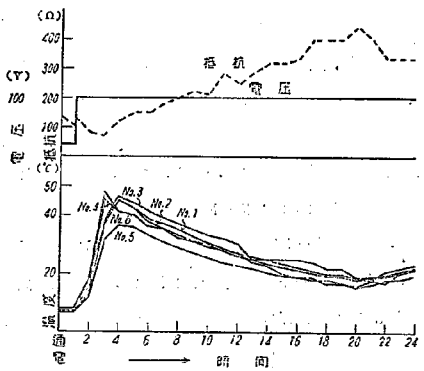
供試体は 24 時間通電の後，室温まで冷却するのをまつて，養生水槽にいれ材令 28 日まで養生した．



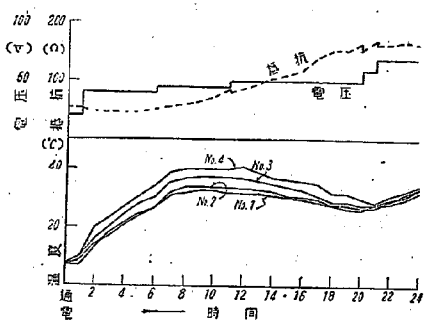
図−10 I 型の温度および電気的経過



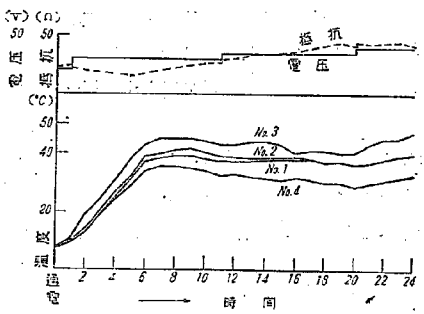
図−11 II 型の温度および電気的経過



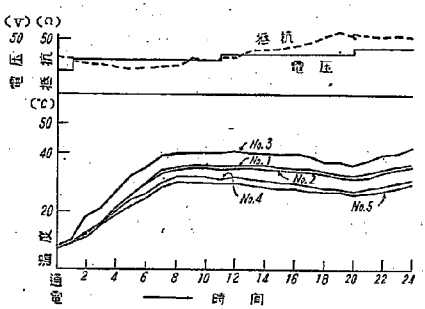
図—12 III 型の温度および電気的経過



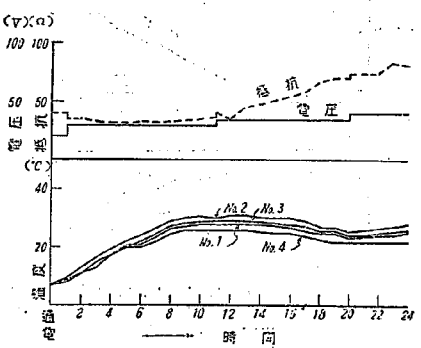
図—13 IV 型の温度および電気的経過



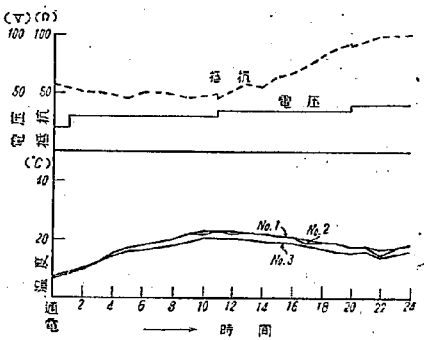
図—14 V 型の温度および電気的経過



図—15 VI 型の温度および電気的経過



図—16 VII 型の温度および電気的経過



図—17 VIII 型の温度および電気的経過

表−5 各供試体の温度上昇速度および最高温度

供試体の種類	温度上昇速度 (oc/hr)	最高温度 (°C)
I	6	49
II	6	45
III	14*	48
IV	4	40
V	5	45
VI	4	40
VII	2.5	30
VIII	2	22

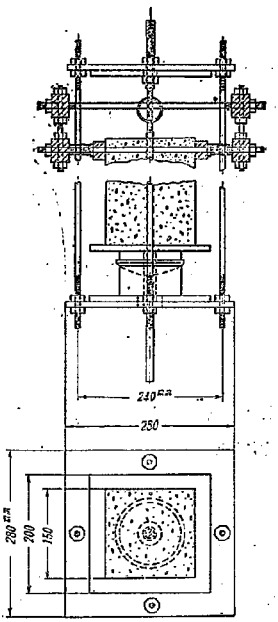
(* この値の大きいのは，結線の不注意による)

〔5〕 試 験 方 法

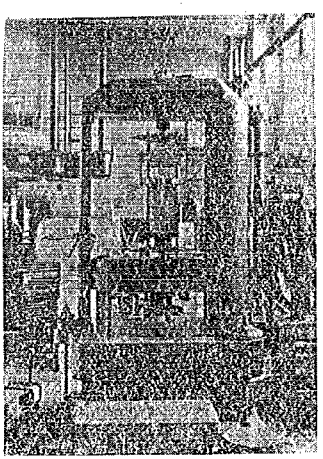
附着強度試験は引き抜き試験方法により試験し，試験の材令は 28 日である．

引き抜き試験は図−18 に示す如き方法で行い，荷重を加えるにはオルゼン会社製 100 屯多能試験機を用いた．

又丸鋼の上端にダイアルゲージを取付け，丸鋼の滑動を測定した．供試体引き抜き試験中の状況は写真−1 の通りである．



図−18 引抜試験装置



写真−1

〔6〕 試験結果およびその考察

(1) 電 気 抵 抗

各供試体の電気抵抗は 図−10～図−17 に示す通りで，通電後 3～5 時間で最も減少し，その後徐々に増加する．通電開始の際および最も減少した際の電気抵抗を表示すると表−6 の通りである．

I 型および VI 型の見掛けの比抵抗を求めてみると 216 Ω cm および 960 Ω cm となり，その比は 1：4.4 となる．一方 II 〔2〕 から鉄筋が全く挿入されていない場合の関係を求めてみると 1：3.9 となり，比較的よく合っている．又第 1 報で報告した温度と比抵抗との関係を示す実験式 $\frac{\rho_n+t}{\rho_n}=1-0.0151\,t$ より，最小抵抗と通電の際の抵抗の比 0.64，0.72, 0.83, 0.63，0.69，

表−6　電　気　抵　抗

供試体の種類	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
最小抵抗に到る時間	3	4	1	3	5	5	4	4
通電の際の抵抗 (λ)	36	35	1	52	23	32	40	57
最小抵抗 (Ω)	23	25	1	44	15	22	31	46
最小抵抗 / 通電の際の抵抗	0.64	0.72		0.84	0.63	0.69	0.75	0.87

0.75, 0.87 につき求めてみると t はそれぞれ 23.8°C, 18.5°C, 10.6°C, 24.5°C, 20.5°C, 16.5°C, 8.6°C となる．測定結果は大体 18°C, 24°C, 12°C, 25°C, 20°C, 10°C, 8°C となる．最大電力量，電線の太さ，等をきめる際の目安に使用する場合，この程度の精度で差支えないと思われる．

(2) 附着強度

標準養生をした供試体および電気養生をした供試体各種類 4 個ずつにつき材令 28 日で引き抜き試験をした結果を表示すると表−7 の通りである．

表−7．　附着強度および標準養生をした供試体の附着強度との百分率

供試体の種類 / 試験項目	標準養生をした供試体 (N)	電気養生をした供試体 (E) I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
附着強度 (kg/cm²)	36.9	31.3	21.2	31.7	29.3	26.2	35.0	33.5	33.0
$\frac{E}{N}\times 100$ (%)		84.8	57.5	86.4	79.5	71.0	94.8	90.8	89.4

供試体内部の測温結果によると，その温度差は大体 10°C 程度で，最高温部は極板の位置であり，鉄筋挿入による影響は余り大きくなかつた．

附着応力度と丸鋼端の滑動との関係については明白な結果がえられなかつた．最も附着強度の減少した II 型は小さな応力に於ても滑動を開始していた．

表−7 によると，電気養生をした供試体の附着強度は標準養生をした供試体に比し，大体 5%〜20% の強度減少で，II 型の如く 40% 以上強度の減少しているものは，滑動応力が殆ど零であつた事実から考えても，丸鋼の周囲極く小部分が過熱されたためと思われる．更に電極の位置即ち丸鋼の方向と電流の方向とに関しては，決定的なことは言えないが，棒鋼の方向と電流の方向が直角になる様に電極板を配置することが望ましいと思われる．挿入鉄筋と極板の距離は 1 cm 以上に保てばその附着強度は 10% 程度の減少ですむことが分るが，短絡を防止し，安全な工事をするために，5 cm 程度離すことが望ましい．

(3) 電力消費量

本実験において，コンクリート供試体の熱に要した所要電力量は表−8 の通りで，1 m³ につき 63 KWH〜

表−8 電 力 消 費 量 消費電力 W (KW)

Time	h分	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
12.00	0	0.05	0.04	0.03	0.01	0.07	0.05	0.04	0.03
30		0.05	0.04	0.03	0.01	0.07	0.05	0.04	0.03
13.00	1	0.05	0.04	0.03	0.01	0.07	0.05	0.04	0.03
		0.19	0.18	0.80	0.05	0.17	0.13	0.10	0.07
30		0.22	0.19	0.13	0.37	0.17	0.13	0.10	0.07
14.00	2	0.26	0.22	0.14	0.51	0.19	0.14	0.11	0.07
					0.43				
30		0.26	0.23	0.14	0.49	0.19	0.14	0.11	0.07
15.00	3	0.27	0.24	0.14	0.57	0.19	0.14	0.11	0.07
		0.28	0.25	0.14	0.38				
30		0.27	0.26	0.14	0.35	0.20	0.15	0.11	0.08
16.00	4	0.27	0.26	0.14	0.33	0.22	0.16	0.11	0.08
30		0.26	0.25	0.14	0.30	0.22	0.16	0.12	0.08
17.00	5	0.22	0.23	0.14	0.27	0.23	0.16	0.12	0.08
18.00	6	0.17	0.18	0.12	0.21	0.21	0.16	0.11	0.07
		0.22	0.23	0.16	0.24				
19.00	7	0.19	0.20	0.15	0.22	0.18	0.15	0.11	0.07
20.00	8	0.17	0.18	0.13	0.20	0.17	0.15	0.11	0.08
21.00	9	0.14	0.15	0.12	0.18	0.15	0.14	0.11	0.08
22.00	10	0.13	0.14	0.11	0.19	0.14	0.12	0.10	0.08
23.00	11	0.11	0.12	0.09	0.14	0.13	0.12	0.10	0.07
		0.15	0.16	0.13	0.17	0.16	0.15	0.12	0.09
24.00	12	0.14	0.15	0.12	0.16	0.16	0.14	0.12	0.09
1.00	13	0.12	0.14	0.11	0.14	0.14	0.13	0.11	0.08
2.00	14	0.11	0.13	0.10	0.13	0.14	0.13	0.10	0.09
3.00	15	0.11	0.12	0.09	0.13	0.14	0.12	0.10	0.08
4.00	16	0.10	0.12	0.08	0.12	0.13	0.12	0.09	0.07
5.00	17	0.10	0.11	0.07	0.10	0.13	0.11	0.08	0.07
6.00	18	0.09	0.10	0.07	0.10	0.12	0.10	0.07	0.06
7.00	19	0.09	0.10	0.07	0.10	0.11	0.09	0.07	0.06
8.00	20	0.08	0.09	0.06	0.09	0.12	0.10	0.07	0.05
		0.10	0.11	0.09	0.12	0.14	0.12	0.09	0.07
9.00	21	0.09	0.10	0.08	0.10	0.13	0.11	0.08	0.06
		0.11	0.13	0.12	0.12				
10.00	22	0.10	0.12	0.12	0.12	0.11	0.13	0.09	0.06
11.00	23	0.14	0.16	0.12	0.12	0.14	0.12	0.08	0.06
12.00	24	0.14	0.16	0.12	0.12	0.15	0.13	0.08	0.06
KWH/0.00675m³		3.44	3.60	2.55	4.37	3.67	3.07	2.31	1.70
KWH/m³		127	133	95	162	136	114	86	62

136 KWH で，電力費は甚だ僅小で非常に経済的に施工することができる．

IV. 結　　び

本試験の結果を要約すると次の如くなる．

(1) 電極板の大きさと見掛けの比抵抗との関係は，配合には余り関係せず，$\frac{\text{極板の面積}}{\text{型わくの面積}}$ に関係する．又見掛けの比抵抗は細い電極板を多数用いるときは，各細片の面積により決まる．

(2) 挿入鉄筋に電力の集中するのを防ぐために，電極板と挿入鉄筋との距離は 5 cm 以上離すことが望ましい．

(3) 鉄筋コンクリートの見掛けの比抵抗は鉄筋量により甚だしい影響を受けないが，その位置により甚だしく影響を受ける．

(4) 電極板が片側のみにある場合，部材の厚みによる見掛けの比抵抗の変化は，モルタルの場合に於ては厚みと電極板の純間隔が同じになると殆ど一定となり，コンクリートの場合は 2 倍になると殆ど一定となる．

(5) 電気養生をすると附着強度は，標準養生のものに比し，5～20 % の附着強度が減少する．比抵抗の測定を考慮にいれて，鉄筋コンクリートを電気養生する場合は，電極板と挿入鉄筋との距離を 5 cm 以上に保つことが望ましい．

(6) 電力消費量はコンクリート 1 m³ につき 60 KWH～140 KWH で，非常に経済的である．

機械化現場実態調査報告

建設技官　西　村　義　一

建設技官　長　江　典　彦

目　次

I. まえがき ……(2)
II. 24年度直轄機械使用現場概要 ……(3)
III. 運営について ……(3)
〔1〕 機械の購入 ……(3)
〔2〕 運　用 ……(5)
〔3〕 管　理 ……(17)
〔4〕 維持修理 ……(18)
〔5〕 運営に対する意見 ……(19)
IV. 作業員について ……(22)
〔1〕 運転員 ……(22)
〔2〕 機械整備員 ……(27)
V. 施工能率 ……(28)
〔1〕 資料整理要領 ……(28)
〔2〕 稼働率と機能率 ……(30)
〔3〕 各種機械能率 ……(32)
〔4〕 能率向上 ……(39)
VI. 経済性について ……(39)
〔1〕 経費算出要領 ……(40)
〔2〕 ブルドーザー作業経費 ……(42)
〔3〕 モーター・グレーダー作業経費 ……(43)
〔4〕 掘さく機械作業経費 ……(43)

〔5〕 機関車による運搬作業経費 ……(47)
〔6〕 機械掘さく，機関車運搬の場合の経費 ……(49)
VII. あ と が き……(50)

I. ま え が き

本調査は昭和 24 年度直轄工事現場における建設機械使用状況を運営，施工要領，能率，工程，経済性，要望等の面よりその実態について広範囲に知り，今後の機械化施工向上の資料とする事を目的として行つた．調査方法としては主要現場に特に調査担当者を採用し，調査係員の指導の下に日夜現場作業員と行動を共にして長期記録を得たいと思つたが，実情実行困難であつたので所定様式に従つた細部の調査を現場に依頼し最終的に本所係員が取纏め整理したものである．

本年度においては先づ国内直轄工事の状況を出来るだけ細部に亘つて知らんとしたが調査期間が短く，各現場における細部調査方法の不徹底の為に全資料の統一が取れず，決定的なものは掴み得なかつた．然し乍ら今後調査要領を改善しつゝ継続する事に依つて機械化施工の実態およびその発展の方向を掴み得ることは確実であり，向上の資料として多少なりとも貢献し得るものと信ずる．

調査の対象として選んだ工事々務所および現地における本所係員の資料取纏め期間は次の通りである．(表—1)

表—1

期間	地方別	工事々務所
1月17日，18日	北海道庁	土木試験所
1月19日	〃	真駒内米軍部隊，石狩川治水事務所
1月20日	〃	釧路港
1月21日，22日	〃	札幌土木現業所および同派出所
3月14日	東北地建	多賀城工作出張所，塩釜出張所
3月15日，16日	〃	江合鳴瀬川工事々務所山崎出張所味明見張所
3月17日	〃	江合鳴瀬川工事々務所山崎出張所柏川見張所
3月18日	〃	宮城国道工事々務所
3月19日，20日	〃	北上川工事々務所一の関出張所
3月21日，22日，23日	〃	最上川下流工事々務所および酒田工場
3月24日，25日	〃	阿賀川工事々務所
2月24日	関東地建	江戸川工事々務所および運河出張所
2月26日	〃	熊谷国道工事々務所，荒川上流出張所
2月27日，28日	〃	荒川上流工事々務所および古谷工作出張所
		入間川山田出張所
3月11日	中部地建	富山工事々務所常願寺川出張所
3月12日	〃	富山工事々務所黒部川出張所
4月11日	〃	静岡工事々務所由比国道出張所

2月30日	近畿地建	大阪工作事務所
2月1日，2日	〃	淀川工事々務所管内高見伝法築堤
2月3日	〃	福井工事々務所管内全般
2月6日，7日	〃	滋賀第一工事々務所逢坂山出張所
2月3日	中国四国地建	太田川工事々務所，広島工作事務所
2月5日	〃	岡山第二工事々務所管内全般
2月7日	〃	吉野川工事々務所管内全般
2月9日	〃	高知工事々務所および高岡出張所
2月11日	〃	渡川工事々務所管内全般
2月13日	〃	重信川工事々務所，松山工作事務所
2月10日，11日	九州地建	築後川工事々務所管内全般
2月12日，13日	〃	川内川工事々務所京町，宮内，五井出張所
2月15日	〃	佐賀国道工事々務所
2月17日，18日	〃	鳥栖材料試験所

II. 24年度直轄機械使用現場概要

吾国の河川工事は他の工事に比し土工量が多く，運搬距離の長いのに加え災害復旧の為急速な施工を要する場所が多い．従つて機械化施工現場としてはやはり河川工事が主力で，機械化土工とは云えないまでも大なり小なり機械力を使用している．特に機械化土工と称するものは河川工事 307 ケ所の内 43 ケ所であつて約 14% を示し，土工量としては 2～8 万立米の所である．

道路工事は昭和 23 年 11 月の道路補修 5 ケ年覚書によりグレーダーが内国幹線，地方主要道路延長約 8 万粁に亘り砂利道補修に使用されており，他方各種建設機械が国道の建設改良に特に配置されている．

現在建設省に於て保有して居る建設機械の内主要なものは約 500 台で，これらが河川および道路工事に主として使用されているが全工事を機械化してその能力を発揮する迄にはなお相当の期間を要すると思われる．

III. 運 営 に つ い て

建設機械運営の現況を機械購入，運用，管理および維持修理に分けて検討する．

(1) 機 械 購 入

購入様式は次の 2 種類に分けられる．

(1) 本省に於て機械整備費中の購入費によつて購入し各地方建設局に分配する．

(2) 施工現場において工事費予算に依り購入する．

以上の内 (1) の場合が多く，現場の要求に基き調査配分せられているので大局的に機械化促進に相当な効果を上げていると思われる．之に対する各地の意見をまとめてみると以下の通りである．

1) 連絡が取れない．

工事現場と本省又は製作会社とが遠隔の為連絡が充分に取れないので工事内容に即応せず，又機械特性もは

つきりわからない．特に払下機械は構造および取扱について現場では何も解らずにいる例がある．

2) 時期に遅れる．

機械を最も必要とする時期に納入されず年度末に近くなつて機械が到着する．

表−2 F地建機械入手情況

	昭和23年																		計
	7月以前	8,	9,	10,	11,	12	1,	2,	3,	4,	5,	6,	7,	8,	9,	10,	11,	12	
ブルドーザー	1	3	—	—	3	—	1	—	—	—	—	1	—	4	2	1	3	—	19
グレーダー	—	—	—	—	—	—	1	—	—	—	—	1	—	2	—	1	2	—	7
ショベル	—	—	—	—	—	—	—	—	1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1
ドラグライン	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1	—	1	2
計	1	3	—	—	3	—	2	—	1	—	—	2	—	6	2	3	5	1	29

3) 故障が多い．

現場に着いてすぐに故障を起すものが多い．之に関連して検収，試運転規定の設定が要望せられている．

4) 地方別機種の統一．

現場に各種の機械が入るので故障修理に困る事が多い．使い馴れた構造の余り複雑で無く確実なものが望まれている．現場に於て機械の配分を要求してどの程度入手出来たか，又どんな機械を特に望むかを調べた結果は次の通りである．

表−3 要求機械および充足状況

地方名	入手(%)	特に望む機械
A	30〜70	ラダー・エキスカベーター，機関車
B	50	ラダー・エキスカベーター，ショベル；機関車
C	50	コンベアー，タワー・エキスカベーター
D	70	運搬用機械
E	50	タワー・エキスカベーター，ラダー・エキスカベーター，ブルドーザー
F	30〜50	ブルドーザー，機関車

以上の如く大体積込機械と機関車が望まれているようであるが，その内現在の所有機械で兎に角間に合つていると云う所は3ヶ所しか無かつた．此の3ヶ所は大体において満足な機械化施工が実施されており修理施設が充分に駆使されている．

(2) は特に必要と考えられる機械を工事費予算の枠内で地方建設局直接購入されるもので機械購入費として配布を受ける他は之に依らねばならない．主として機関車が多いが，大体局の機械課に配布されるものは少額で特に限定されたものであるし，修理面に多額の経費を要し，現場に於ても殆んど総ての工事が諸船機械費として工事費の20%と見込まれている為に修理だけでも困難であるのに購入まではなかなか余裕が無い．以上のような状況であるから購入台数は極めて少数であるが 1) に於ける欠陥は或る程度補われる．

〔2〕運　用

運用は機械の管理と深い関連が有り各局共機械を重点的に配分して合理的運用を行わんとしているが，絶対数の不足している現況では工種，工期，土量，状況等に応じて最も経済的な工事を施工出来るように機種の選択，組合せを行う迄には至らない．工事計画全体に対する機械の使用計画に就ては，計画は樹てたが機械の到着が予定より遅れたり，予定機械が現場に入つたが実際に使用してみると適応しないとか，燃料が割当の為に順調に入らなかつたり，故障したりして計画の実行が出来ないと云う処もあつた．多くの現場に於て発見せられたのは単機作業で，これは一部に於て機械は信頼性の無いと云う先入感や，機械化施工に対する認識度の不足に加えて現場間或は組織間のセクショナリズムによる機械の取り合いが未だ有るのでは無いかと思う．しばしば論ぜられる如く機械化現場は各種機械が一連となつてその全能力を発揮出来るような態勢に置かれて初めて其の真価を発揮出来るのであるが，此のような処は非常に少い．建設機械は同一機種を少くとも 2 台又はそれ以上揃え故障や突発事故の有つた場合作業に影響を及ぼさないようにしなくてはならない．現状の如く機械台数の不足している時期に予備車輛を置く事は勿論出来ないが，故障した際の影響を考慮し機械配分を行い影響大なる現場と比較的小なる現場との連繋を保つて準予備的な車輛を配置すべきである．又現状では短期間作業を行つて直ぐ次の現場え移動する場合が多く段取替による時間が多くて実働時間が短い．

今回の調査の対象となつた現場において行われていた各種施工方式を次に挙げるが，総体的に見て施工方式中のブルドーザーは主として堤防の嵩上，腹付，他の積込機械を援助して小運搬，材料掻集，ホツパーによる積込作業に用いられ押上運搬距離が 30 米以下の場合が多い．70～150 米の距離でも 30 米以下に数回押している処があり，他方 1 回に押してしまつている場処もあるがこれらは地質によつてどちらを長とするかは云えないが，長距離運搬を行う事は余り経済的な使用法とは云えない．

ドラグラインは水路根掘掘さくに或は機関車，ブルドーザーとの組合せによつて堤外地掘さく，トロ積込，およびブルドーザーにより堤防法尻に集められた土砂の嵩上に用いられているが，元来積込には余程の熟練を要する事でもあり鎖条が土砂に埋まりやすい．

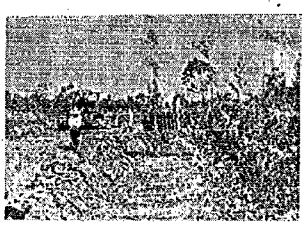
ショベルは主として機械車積込に用いられている．

ラダー・エキスカベーターは台数が割合多く主として堤外地掘さくに使用され技術員も熟練した者が多い．これに比してショベル，ドラグラインは熟練した技術員が少く総じて積込機械は純積込作業時間に比較して待合時間が長くその割合は半々程度のものが多い．本所において調査した現場の施工型式は次のようなものである．

(1) ブルドーザー単独組合せ作業

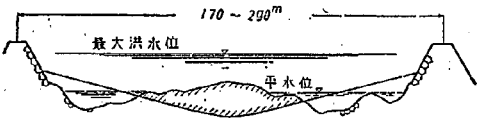
1) A 道路工事　キヤタピラー D-8，小松 D-50 2 台，民生 B-8 合計 4 台で各車毎に 100～300 米の区間を順次替えて切取，盛上を行う．

2) B 道路工事　キヤタピラー D-7 2 台，小松 D-50 2 台，東日本重工 T.C.型 1 台，民生 B-8 1 台合計 6 台

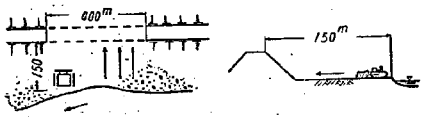


写真－1

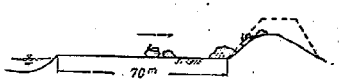
を使用して延長 9 粁の森林地帯に有効幅員 3.6 米，最小勾配 10%，最小半径 13 米のいわゆる山岳道路を築造している．



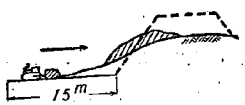
図—1 A 河川断面図



図—2



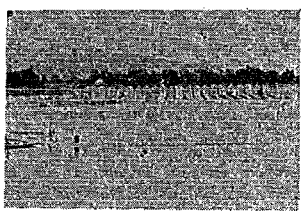
図—3



図—4

3) A 河川工事 ブルドーザー民生 B-8 8 台，羽田 AT-50 1 台，小松 D-50 2 台，インターナショナル TD-9 型 1 台，起重機車，ロケを使用して敷幅 18 米，延長 1381米 の河道整理を行つている．

4) B 河川工事 キヤタピラーD-7 1台によつて堤外地の砂利を波堤部約 400 米に対し直角に約 150 米土寄を行う．



写真—2

5) C 河川工事 キヤタピラー D-7 で平均 70 米の洪水敷を切削り築堤法尻迄運搬の上更にこれを旧堤上に盛上げる．

6) D 河川工事 小松 D-50 1 台で堤外地土砂を平均 15 米の距離にて切削り堤防腹付を行う．

7) E 河川工事 キヤタピラー D-7 2 台，東日本重工 BB II 型 1 台合計 3 台で水中掻さく，土取場に於ける砂利の集積，堰堤の成形を行う．

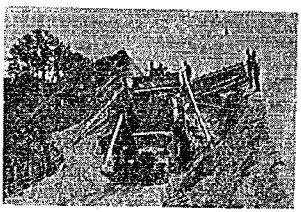
写真—3

8) F 河川工事 小松 D-50 2 台で距離 20~30 米の切削りを行う．状況は大体 D 河川と同じ．

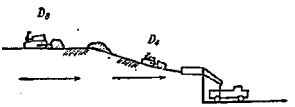
(2) ブルドーザー，トラツク組合せ作業

1) C 道路工事 キヤタピラー D-8 で礫岩の切通しの掻さくを行い，キヤタピラー D-4 でホツパーに依

りトラックに積込み，400 米運搬して人力捨土をする．

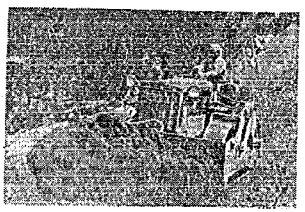


写真－4

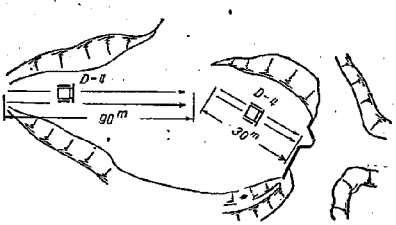


図－5　C 道路工事土取場

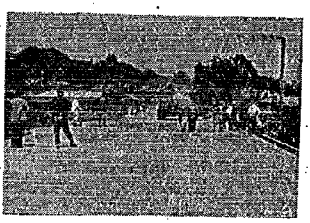
2)　D 道路工事　河川堆積土砂をキヤタピラー D-4 2 台で約 90 米と 30 米の 2 回押しをなし，ホツパーによりダンプカーに積込み約 3 粁運搬して捨土を行う．



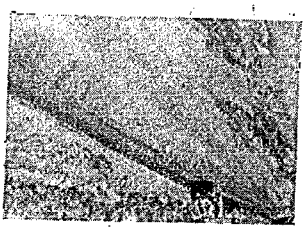
写真－5



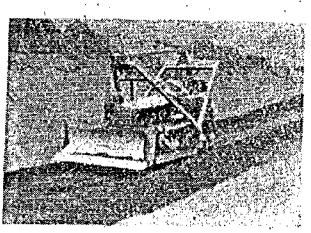
図－6



写真－6



写真－7

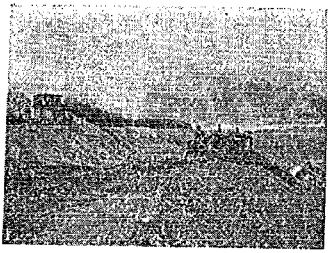


写真－8

(3) ブルドーザー，機関車の組合せ作業

1) G 河川工事　機関車にて運搬した土砂を小松 D-50 型 1 台で小運搬し堤防腹付を行う．

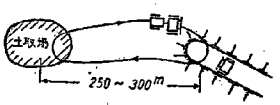
図−7



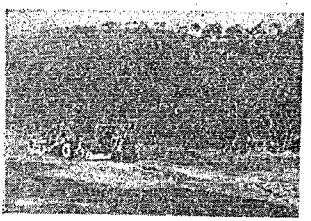
写真−9

(4) キヤリオール，ブルドーザー組合せ作業

1) E 道路工事　6 立米積キヤリオールをキヤタピラー D-7 で引き片道 250~300 米の距離で土運搬しキヤタピラー D-4 で敷均し盛土を行う．運搬回数平均 30 回/日 位である．



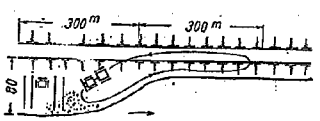
図−8



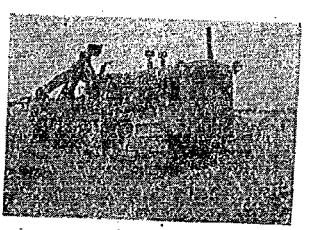
写真−10

2) H 河川工事　不規則に洗掘された洪水敷を小松 D-50 1 台，キヤタピラー D-7 1 台合計 2 台により約 30 米削土運搬し，一方ターンナツプル・スクレパーで約 500 米凸地を掘さく，運搬，埋立を行う．

3) I 河川工事　キヤタピラー D-7 1 台，アリスチヤルマー HD-14 1 台合計 2 台を使用しポンプ船により吹き上げられた砂丘を押土築堤する．運搬距離約 80 米，尚隣接して約 300 米の区間をキヤリオールにより運搬築堤する．キヤリオールは容量 6 立米積でアリスチヤルマー HD-14 で引く．

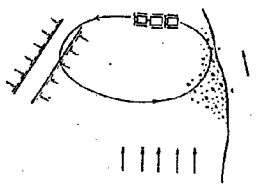


図−9



写真−11

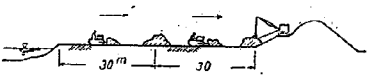
4) J 河川工事　インターナショナル TD-18 でキャリオールを引き背部堤築堤個処に堆積土砂を運搬する．アリスチャルマー HD-14 1 台で同キャリオールのプッシュおよび敷均しを行う．1 循環距離約 500 米：土質は玉石混り砂．



図−10

(5) **ブルドーザー，ドラグライン組合せ作業**

1) K 河川工事　小松 D-50 で約 60 米を 2 回に削土運搬し堤防法尻に土砂を寄せドラグラインで掬い上げ腹付する．



図−11

2) L 河川工事　アリスチャルマー HD-14 1 台で堤外地土砂を集積し，四国機械ドラグライン 1 台で 3 段に掬い上げ築堤する．土質は玉石混り砂．

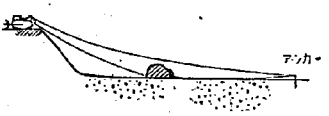
(6) **石掴機単独作業**

1) M 河川工事　小松 D-50 型ブルドーザーの背后に双胴ウインチを取付け約 150 米離れた移動式アンカーとの間に鋼索を張りその途中に爪形および袋形の石掴み装置を取付けたもので，河床に半ば埋没している 200～500 粍の石を堤防法先に引き寄せる．此の石は法面保護の為二重張石として使用される．1 循環行程約 3 分である．

図−12

(7) **ショベル機関車の組合せ作業**

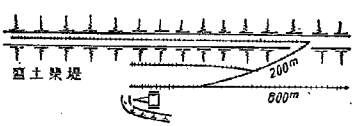
1) N 河川工事　油谷 0.5 立米ディーゼル・ショベルで 1 立米トロ 12 台 に積込み 7 噸蒸気機関車で 1,500 米運搬する．



図−13

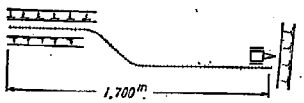
2) F 鉄路工事　高い場処は土採人夫を補助とし，軟岩を第一機械 0.7 立米スチーム・ショベルにて切崩し鋼トロに積込み約 1 粁をディーゼル 4 噸機関車および同 7 噸機関車で運搬する．

3) O 河川工事　マリオン 0.5 立米スチーム・ショベルで掘さく，1 立米鋼トロ 11～12 台に積込み加藤 7 粍機関車で約 2.5 粁運搬築堤する．土質は粘土質．

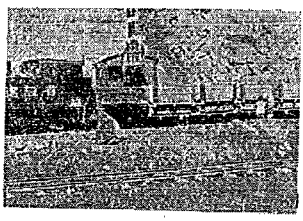


図−14

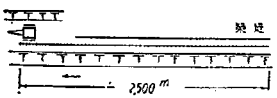
4) P 河川工事　発破作業で崩した砂岩を人力掻落を行いビサイラス 0.5 立米ステイーム・ショベルに依りダンプ・トロ 20 台に積込み 20 噸ステイーム機関車にて約 1.7 粁運搬する．入替には 5 噸ステイーム機関車を使用する．



図−15



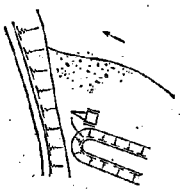
写真−12



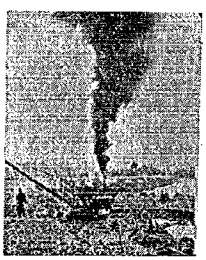
図−16

(8) **ドラグラインと機関車組合せ作業**

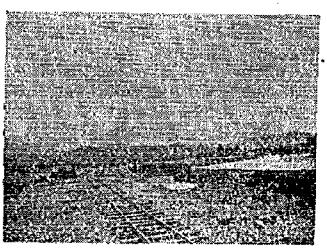
1) Q 河川工事　ドラグラインで掘さくした堤外地土砂を機関車で運搬したが調査の際は最終段階にてドラグラインの単独作業を行つていた．



図−17



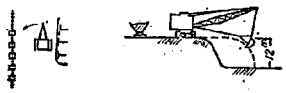
写真−13



写真−14

2) R 河川工事　15k ドラグラインで掘さく，トロに積み込み約 1.6 粁を 7 噸デイーゼル機関車で運搬する．入替には 7 噸ガソリン機関車を使用．

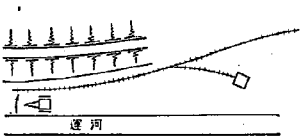
3) S 河川工事　運河新設堤防嵩上げ工事に於て日燃デイーゼル・ドラグライン（0.5 立米）で掘さくし，1立米トロ 10 台に積込み，7 噸デイーゼル機関車（補助 6 噸ステイーム機関車）により 500 米運搬する．ドラグライン作業土量 200 立米/日．



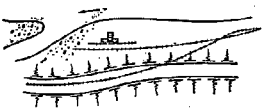
図—18

(9) **ラダー・エキスカベーター，機関車組合せ作業**

1) T 河川工事　新潟鉄工 120 立米掴ステイーム・ラダーエキスカベーターにて掘さく 3 立米トロ 21 台に積込み，独乙製 20 噸ステーム機関車 2 台にて 2,200 米運搬し築堤嵩上げをする．土質は砂質土．エキスカベーター作業土量 840 立米/日．

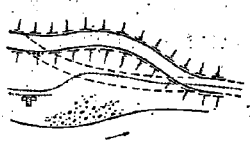


図—19



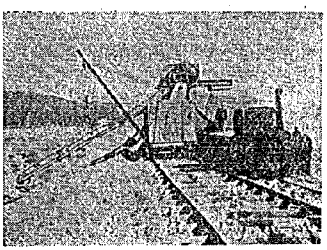
図—20

2) U 河川工事　佛国製 120 立米ステイーム・ラダーエキスカベーターにて掘さく 1 立米積ダンプ・トロ 15 台に積込み機関車 4 台（5 噸デイーゼル 2 台，6 噸ステイーム 2 台）で運搬新堤の築造を行う．運搬距離は 1,800 米，作業土量 154.2 立米/日．



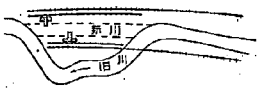
図—21

写真—15．

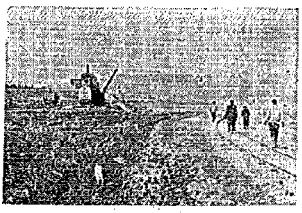


写真—16

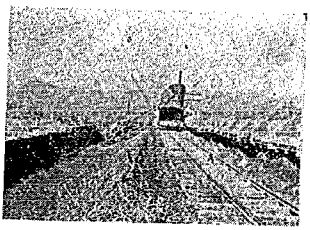
3) P 河川工事　120 立米掴ステイーム・ラダーエキスカベーター 2 台にて掴さく，3 立米ダンプトロ 25 台に積込み 20 廵，15 廵ステイーム機関車にて約 3 粁運搬する．土質は粘土質ローム．



図—22

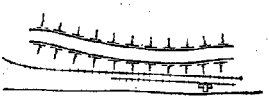


写真—17



写真—18

4) V 河川工事　新潟鉄工 120 立米掴ステイーム・ラダーエキスカベーターにて掴さく 3 立米積ダンプ・トロ 25 台宛に積込み 20 廵ステイーム機関車 2 台で約 4 粁運搬する．

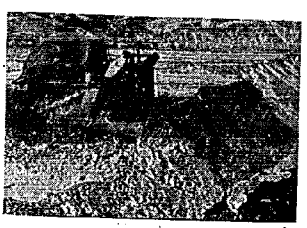


図—23

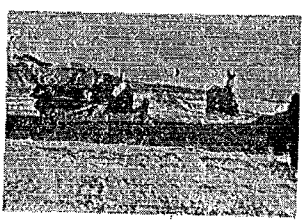
(10) ブルドーザー，ショベル，機関車の組合せ

1) W 河川工事　アリスチャルマー HD-7 1 台にて土砂を寄せ日立ステイーム・ショベルにより 1 立米ダンプ・トロ 10 台に積込み 約 1.5 粁運搬して破堤部分の修築を行う．トロは 8 廵ステイーム機関車で牽引する．土質は砂利混り砂質ローム．

図—24



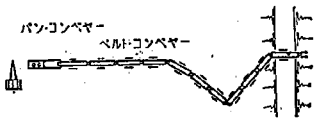
写真—19



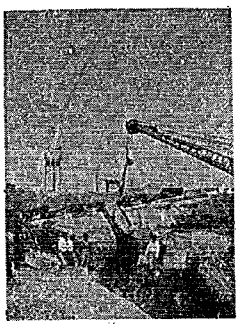
写真—20

(11) ドラグライン，ベルト・コンベヤーの組合せ作業

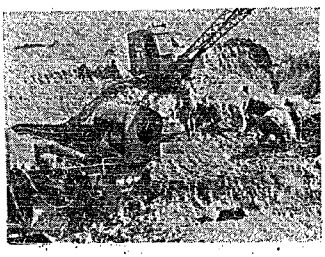
1) X河川工事　神戸製鋼　15k デイーゼル・ドラグラインにてパン・コンベヤーに積込み，四国機械製 20 台 1 組のベルト・コンベヤーに依り約 200 米蛇行運搬して堤防腹付をする．



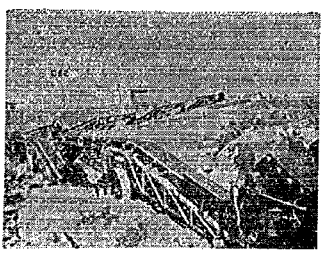
図—25



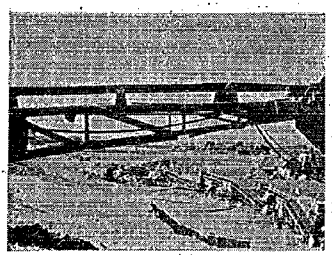
写真－21



写真—22



写真—23

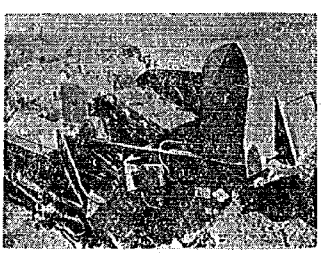


写真—24

(12) ブルドーザー，ベルト・コンベヤー組合せ作業

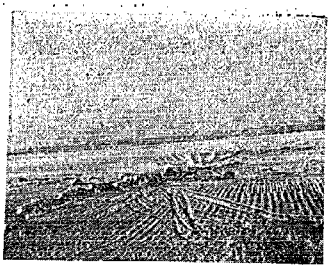
1) X河川工事　小松 D-50 ブルドーザー 1 台にてパン・コンベヤーに土寄せ積込みを行い，20 台 1 組のベルト・コンベヤーに依り約 200 米運搬し，更に小松 D-50 1 台でその土砂を小運搬し堤防腹付を行う．土質は玉石混り砂．

(13) ブルドーザー，シヨベル，ラダーエキスカベーター，機関車の組合せ作業



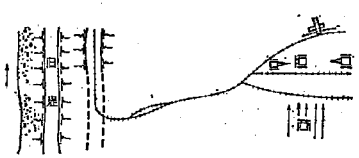
写真—25

写真—26

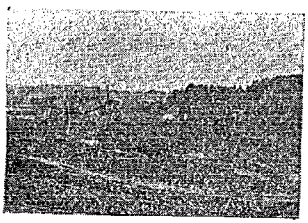


写真—27

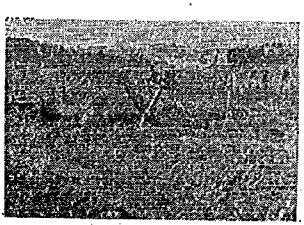
1) Y 河川工事　土取場に於て線路を 3 線に分岐させ，1 線にはキヤタピラー D8 で土寄せをなし手積でトロに積込み，1 線はキヤタピラー D7 で土寄せをして日立 0.5 立米ディーゼル・ショベルでトロに積込むと同時にその他端で日燃 0.7 立米ディーゼル・ショベルにて地山を切りトロに積む．残つた 1 線では浦賀 60 立米掴ステイーム・ラダーエキスカベーターにて積込む．これ等のトロはいづれも 3 立米ダンプ・トロで 30 台編成で 20 瓲ステイーム機関車で約 4,000 米運搬し新堤の築造をする．土質は砂質ローム．



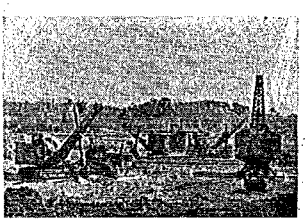
図—26



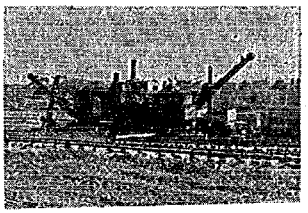
写真—28



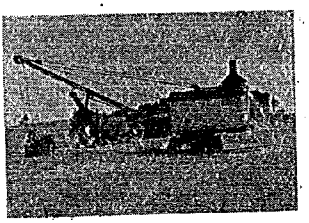
写真—29



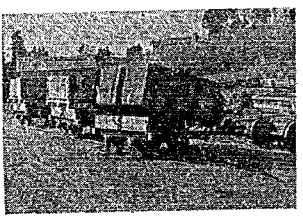
写真—30



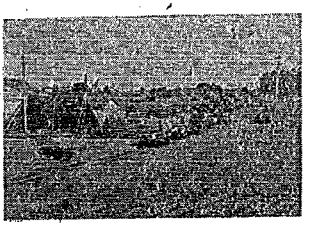
写真－31



写真－32



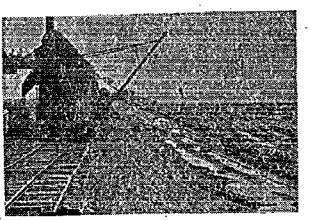
写真－33



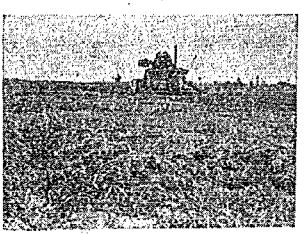
写真－34

2) Y 河川工事　キヤタピラー D-7 にて土を寄せ日鉱ショベルにてダンプ・トロ 3 立米積に積込む．その先ではラダー・エキスカベーターにて同様 3 立米ダンプ・トロに積込み，これらを 15 噸スティーム機関車にて約 2 粁運搬する．土質は砂．

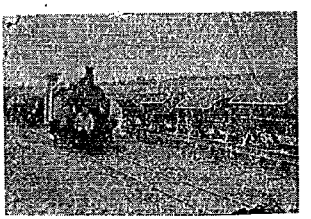
図－27



写真－35



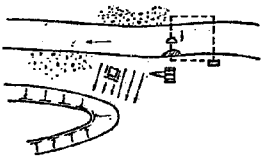
写真－36



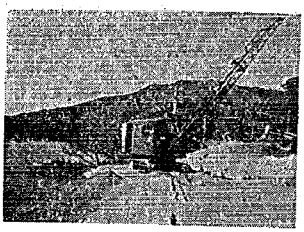
写真－37

(14) **ブルドーザー，ドラグライン，ドラグ・スクレーパーの組合せ作業**

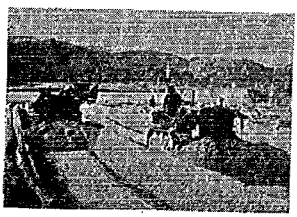
1) Z 河川工事 0.3 立米ドラグ・スクレパーで河心を掘さくして河側に土砂を寄せ，ビサイラス 0.5 立米デイーゼル・ドラグラインにて河岸に上げこれをブルドーザーで押して築堤をする．



図−28



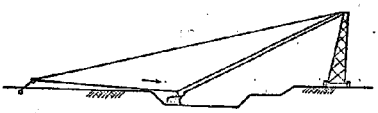
写真−38



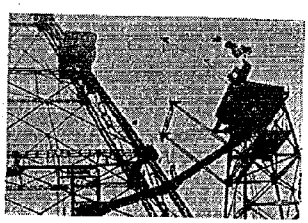
写真−39

(15) **タワー・エキスカベーターによる作業**

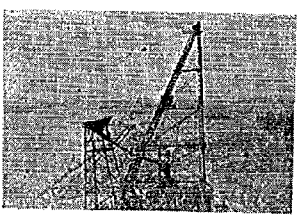
1) α 河川工事 河床に堆積した土砂をバケット容量 2立米のタワー・エキスカベーターを用いて掘さくし新堤を築く．タワーとアンカーの距離は 350 米である．



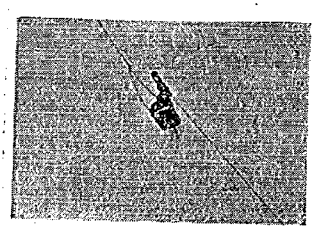
図−29



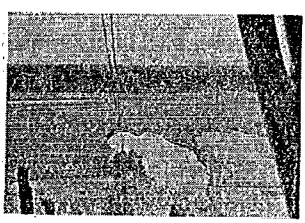
写真−40



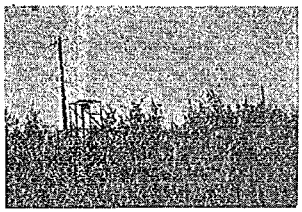
写真−41



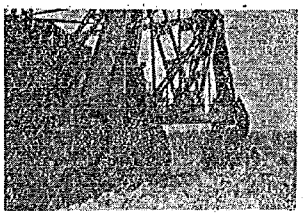
写真−42



写真−43



写真—44



写真—45

〔3〕 管　理

各地建に於ける建設機械の管理は特殊なものを除いては工事々務所において行つている．勿論本局機械課において一応は管理を行う型式になつているが，先述の二購入方法の内いづれを経て入手した機械にせよ実質的には工事々務所で機械を握つている．地建の傾向としては機械整備事務所において一貫的使用，修理を行う為に或る程度の機械を集積しつゝあるが，未だ態勢がとゝのはず一小部分で実施されているに過ぎない．運用はあくまで工事々務所において計画のもとに実施すべきではあるが，管理迄工事々務所で行う事については色々と不都合が生ずる．即ち合理的に集中して使用出来ないし，現場相互の建設機械の融通が無いのでその機動性を阻碍し，修理整備不充分の原因となつている．之等の欠陥を補う為機械の重点的配分を行つているが完全に欠陥が除去されてはいない．

(1) 合理的集中化に就て

現場を見て先づ感ずる事は老旧の機械が多く新しい機械の台数が実に少いところである．つまり消却期限をはるかに越えたものが多く機械として工事計画に入れ得るものが少いので，実際には保有台数がいくらも無い事になる．結局建設機械の絶対数が不足しているから各現場において工事に際し機種の選択，組合せ等は思いもよらない事である．にも不拘現在の配分を行い，現行の管理方法を行つていたなれば，何時になつたら充足可能か見当がつかず，其の間は不経済な工事を行わねばならない．

(2) 現場相互の建設機械融通および機動性について

各工事々務所間の建設機械の融通は実質的に余り行われていない．同一工事々務所管内では割合に融通されている処もあるが，高価でなかなか購入出来ない機械を大局的見地から他の現場に貸与すれば早速自分の現場が困るから，仮に本局において機械を融通させ度いと考えても何等かの裏付けが無くては応じられない．単にセクショナリズムとして片付けられぬ事情ではあるが，兎に角機械の機動性は無くなつてしまう．

(3) 整備について

各工事々務所保有の機械は余裕の無い予算内で整備を行う為，どうしても整備不充分となる．一時的に使用を中止している際もなかなか整備して置く事はせずに次に必要となつた時に本格的に修理，整備を行うのが多い．予算に余裕を生ずれば多少でも余分に工事を行い，それを機械の修理，整備に当てないし，部品の購入も行わない処がある．現状においては止むを得ないとは思うが機械を主としてみると誠に不満足な事ではあるし，

工事を主体として考えても故障による働率の低下は大きな損害である．

以上の如き状況から各地建共機械整備事務所（モーター・プール）の設置が急がれ建設機械の計画的購入，管理，整備，集積，直轄機械施工，廃棄或は技術員の養成等を行わんとし，既にB工作事務所はその機能を発揮している．

〔4〕維持修理

各現場の建設機械維持修理方式としては次の通りである．

(1) 作業現場（出張所）に小修理工場を有するもの

実際に余り無くU河川N工場，B道路工事O工場等である．

(2) 事務所管内に工作出張所として修理工場を有するもの

V河川A機械工作出張所，J河川C工作出張所，N河川D工作出張所，T河川G工作出張所，W河川I機械出張所等がこれに属し原則として工事々務所管内の修理を行つている．S河川N機械工場は出張所では無いがその内容からみて出張所と同じである．

(3) 数事務所管内に一カ所修理工場を有するもの

T河川G工作出張所がこれに相当し管内3出張所の他に1國道事務所の修理も行つている．

(4) 機械課において特に指定修理工場を持ちこれに行わしむるもの

F地建運営会がこれに概当する．

(5) 局に機械工作事務所を置くもの．

B工作事務所，I機械整備事務所，C工作事務所である．

大体分類すると以上のようなもので今回の調査の対象とした主な12工場の機械，建物等の施設の内容は（表

表−4　修理工場機械建物

	機械台数						敷地(坪)	建物(坪)				
	工作機械	鍛冶製缶	鋳造	木工	其他	計		工場	事務所	倉庫	其他	計
A	5	1	1		3	10	450	120.50	1.25	15		136.75
B	8	4			14	26	10,500	200.00	40.00	60		300.00
C	11					11	1,386.16	50.00	40.00	40	152	282.00
D	12	2	1		2	17	100	222.00		40	23	285.00
E	10	2			3	15	100	74.00	7.80	36	49	166.80
F	11	1			4	16	2,100					479.00
G	9	3	4	3	6	25	1,583	242.00	31.75	121	269	663.75
H	17	4	4	1		26	3,600	482.60	27.00	200	9	718.60
I												
J	16	4	4	2	2	28	6,427	570.00	51.00	161	102	884.00
K	15	5	4	5	16	45	1,900	136.00	30.00	107	41	314.00
L	17	4	3	2	11	37	594	129.25	44.00	10.5	10	193.75
M	7				1	8	900	72.75	5.00	25.5	4	107.25

—4）の通りである．その修理実績が不明であるから何とも云う事は出来ないが，どの程度に直轄機械工場を利用するかに依つても異り，又民間修理工場では工作機械は 5 台位でその他の工作は外注し乍らも月にブルドーザーの完全分解 2 台程度の実績を挙げている処もあるが色々条件が異るので現段階の調査では比較出来ない．現場と密接な連絡の下に一貫した整備計画を樹立して行かないと工場作業にもむらが生ずるし，建設機械の整備維持は出来ない．先に地方別機種統一の項において述べた 3 現場においては機械が比較的集中している事も事実であるが同時に修理施設が計画的に有効に駆使されている事を忘れてはならない．機械が集中されいば尚組織立つた整備計画が樹立され実行されなければ事故事が続出して工事は停頓してしまう．又修理費も工事費中の機械修理費を必要に応じ配分しているので事務的に繁雑で計画的整備も行い難い．これらの問題に対して各地建では機械整備事務所を設置しこれを各直轄修理工場の中心として統一のとれた整備を行つて解決しようとしている．

〔5〕 運営に対する意見

機械化施工運営上に各種の欠陥がある事は前に述べた如くであるがこれに関して各地の意見や感ぜられる事項を纒めてみると大体次のようなものである．即ち (1) 計画を充分にたてる事が出来ない，(2) 機械予算が少い，(3) 土木関係技術者の理解が不充分である，(4) 故障が多く修理に際して種々の困難がある，(5) 燃料が思うように入手出来ない，(6) 優秀なる運転技術員が少い，(7) 施設の地域的差が甚しい．これらについて更に詳述する．

(1) 計画立案

工事計画全体に対する機械施工部面の計画は特に詳細にたてられなければならない．各種機械が組合せられて一連として作業する場合 1 車輛の全体におよぼす影響が如何に大であるかと云う事は各地においても充分に認識されているが只 1 車輛のみの場合には余り深く考慮せずに着工しているような傾向がある．歴史の浅い事故計画に対する正確な参考資料も無く，地質其他条件を異にする米国の資料をいきなり適用する訳にもゆかないので詳細な立案は難しいのも一原因であろう．又実施部面にも各種の障碍があるが仮に小工事であつても細い計画は一応たてるべきである．計画が立たないし，立てゝも実行出来ないと云う意見があるがこの点に関しては土木技術者の大いに協力して行く必要がある．

一年間の機械使用計画において大した移動をせず連続的使用をせられるものは別として短期間に各地を移動する必要の有るものに対しては其の都度計画され，従つて其の間における段取，整備，移動等の待時間が増して来る関係上実作業時間がどうしても少くなる傾向がある．今後の計画立案に際して考慮すべき事である．

(2) 機械予算

建設機械購入費は前述せる如くであるが，これを除いた他に各工事における機械関係費として船舶機械費を大体一率に工事費の 20% と見込まれている．これが為に特に機械費を多額に必要とするものも，比較的少額で済むものも共に此の規定に縛られて思う様に機械を動かす事が出来ないと云う声が高い．急速施工，廉価な工事費と云う点で是非機械を活用させなくてはならない際に，少くとも此の規定の改正或は増額されなくては機械化施工の完璧な運営は望めない．

(3) 土木技術者と機械

建設工事に直接従事せるものは土木技術者が大部分であるが，現場における機械技術者の意見を聴いてみると土木技術者の一部には未だ機械化施工に対する理解と援助の充分で無い者が有る様である．機械化施工は初期であるから充分にその効果を発揮出来ないので止むを得ない点も有るが工事の遂行上障碍になつては困る．多くの人々は大なる関心を持ち機械化施工に力を入れるようになつたのではあるが，さて準備，整備，維持，保管等の実際問題となると担当者が困るような事が多い．表面的な事ばかりで無く最も重要な裏面にかくれたこれらの事項に対して大いに理解を持ち，援助を与えるようにしなければならない．

(4) 故障と修理

前述の如き大修理は別として，最も数が多く又運営上影響の案外大きいのは小修理である．修理に対する原材料は割合に容易に入手出来るようであるが最も困るのは部品（パーツ）である．簡単な小部品でも遠隔な現場においては直ちに入手する事は困難であり，予算の関係上常時充分な部品を準備して置も事も出来ず，特に必要と思われるものも程度問題で充分に揃えておく事は難しいようである．特に払下機械の部品は仲々入手出来ず，北・南地方では東京，大阪の大都市迄購入に行かなくてはならないのでその期間の工事に及ぼす影響は大きい．機械整備事務所の発展は本問題を或る程度解決してくれると思うが現状としては相当大きな要素としてその成果を阻碍している．

各工作工場の保有工作機械に就て調査した結果は（表—6）の通りで，その内 12 主要工作工場では旋盤 2～6 台，型削および平削盤 1～2 台，穿孔機 1～6 台，熔接機 1 台を備えている．その他の機械は色々であるが先づ最も必要なもの一応備えている訳で民間修理会社と比較して見ると次のようなものである．

表—5　保有工作機械比較

	旋盤	型削盤	平削盤	穿孔機	熔接機	其の他	修理実績 ブルドーザー（台/月）
D 社	5	1			2	5	2.5
E 社	1	1		2	2	16	
K 社	3	1		1	1	26	6.5
主要工作工場	2～6	1～2	1～2	1～6	1	平均 11	

大体において余り損色は無い．修理実績は資料が無いし，同じ種類の機械修理 1 台にしても故障個処に因つて差異が生ずるので比較は出来ないが，地理的条件が民間修理会社に比較して甚だ悪い為，外注や部品購入に長い時間を消費し，修理の対象となる機械器具の種類が多岐であり工作機械も新しいものが少い等の点で条件はたしかに悪いと思われる．同じ会社の製品でも試作以来の製作台数が少く次々に設計を変更しているので修理に際して部品が揃わず早急な修理が出来ない事が多い．

(5) 燃料の入手

燃料の入手方法は本省より配給を受けるものと県庁を通じて配給を受けるものとの二種類あり，それ等の配給時期がうまく工事施工計画と一致しない場合がある．元来県庁を通じて配給されるのは災害等の工事であつ

表—6

機械 / 工場 / 作業	旋盤	型削盤	平削盤	穿孔機	グラインダー	ホーニング	溶接機	螺子切盤	ハンマー	ツサーコンプレ	充電機	送風機	電動機	研磨機	プレス	ボツプ盤	クレーン	金切鋸	配電盤	切断機	シヤービンスロツター	ボーリング	発電機	炎土	車輪旋盤	木工旋盤	円鋸盤	削鉋機	帯鋸	ルーター盤 木工ボー	鋸
A	2	1	1	1					1	1																					
B	2	1	1	2	1		3		1	1		2	9	1	1		1														
C	4	2		2	2			1																							
D	5	1	1	1	1		1		1	1		1	1			1				1		1									
E	4	1	1	1			1	2	1	1	1	1	1								1										
F	3	1		3	1		1	1				1	2	1				1	1												
G	4		1	2			1					1	2	1	1		2		1	1					1		1	1			
H	6	1	2	4	1			1	2					2	2										1						
I																															
J	6	1	2	3	3				1			2			1		2			1				1	1						
K	4	1	1	4			2	1	2	1		2	12	2	1		1	1		1			3		1	1	1	2			
L	4	1		6			3	1	2	1		2	5	3			1	1	1			1	5		2						
M	4	1		3	1		1		1			1	4	2	1																
N	2	1		2				1	1																						
O	3	1		2					1																						
P	1	1		2									1	1												1					
Q	1	1		1					1																						
R	2			2										1														1			
S	3	1		1			1		1	1		1	3	2					1				1				1				
T	3	2	1	3			1		1			2		3													1			1	
U	2	1		1				1						1			1	1													
V	1			2			1						1	1																	

て，急速な施工を要し機械力を特に必要とするのであるが，配給時期等で工事の進捗を阻碍されるのはこの場合が多い．建設省において施工する工事に関しては総て本省より一括して燃料の割当を受けるようにすれば此の問題は解決すると思う．又地域によつて潤滑油が不足しているとか，総体的に工事量に対して燃料が足りない等の意見もある．

(6) 技術員の技倆

技術員の技倆は全体的に未だ充分と云えない．中には優秀な者もあるが，元来建設機械は歴史が浅いので技術員に罪らず総て経験が少いので仕方の無い事ではある．蒸気機関については内務省時代からの経験者も有り国鉄行政整理の影響も受けて熟練した技術員が多いが，これに比較して内燃機関特にディーゼル機関の取扱には経験の深い者が少い．各地建においても此の点では本局において管下技術員の養成，再教育を行つているが場処，施設，教官等の点でなかなか思い通りには行かないようで急速に全般の技術的水準を高める迄には行つていない．今後機械の増加に対してはやはり機械整備事務所を設立して技術員の養成も同所で行うべきである．

(7) 現場に於ける設備

現場の設備は不完全である．機械化施工は日浅く諸経費も少い事であるからなかなか充分な設備を持つ予算は無いので無理からぬ事であるが，機械工作工場でも簡単な燃料濾過装置や洗車設備の無いものがある．土木技術者の無理解も原因じていると思うが，一見これらの設備に経費をかける事が機械技術者の現実をはなれた理想論が骨おしみのように考えられても実際必要な事であり故障を未然に防ぎ能率を上げ得る第一条件である事をよく考えなければならない．日常整備，定期整備の徹底を叫ぶ前に先づ設備をとゝのえてやらねば履行されない．ある程度長期に渉る工事においては現場に簡単な設備を準備し度いものである．とにかく建設機械の運転は重労働であるから作業前後の整備，定期的な整備にも出来るだけ労力を省けるようにしてやる位の気持，機械を愛する気持からも出来るだけ設備を良くして稼働率を挙げなければならぬ．

IV. 作業員について

〔1〕 運転員

(1) 運転員の種類

運転に従事して居る者を分類すると大体次のように大別出来る．

1) 自動車の運転手を使用するもの
2) 現場において採用した人夫を助手として教育し運転員としたもの
3) 特に運転員短期養成を行つたもの
4) 土木研究所技術員養成所において養成を受けたもの
5) 供給人夫として採つて居るもの
6) 従来より運転員のもの

以上で 6) は主として蒸気機関々係に従事する者で内燃機関には 1) が多く機械の増加につれて 2), 3), 4) が従事するようになつた．

(2) 機械と運転員

運転員は機械と一体になつているものであつて一つの機械に専属している事が望ましい．即ち高価な機械を取扱うもので，機械は各々特性を持つているものであるから其の整備，故障に際しても迅速且適切な処置がとれるし，能率も挙げる事が出来るからである．然し最近の如き機械台数の増加は此の方法を守り得ない状況にあるが，米軍でも機械に専属に従事せしめているようであり，内務省時代より蒸気ショベル，ラダー・エキスカベーター等には其の機械に付いて移動して歩き良好な成績を示しているのであるから，出来得る限り此の点を考慮して運転員を定め養成すべきである．此の問題に附随して給与，賞罰が考えられる．

(3) 運転員の給与．賞罰

建設機械の運転員は危険且重労働作業をしなければならない．例えばブルドーザーを例に取つて言えば振動騒音，砂塵の中で施工要領を考え乍ら一日運転し然も整備，修理は時間の無駄無く時には休憩時間にやらなければならないから，特に酷暑の下では機関の熱で極度の疲労を覚える．此のように心身共に酷使するのであるから現在の一般人夫並，或は官庁給与では如何かと思われる．加うるに請負事業者においても最近非常に運転員が不足し高給を以て雇入を行つているから是非これが対策を早急に講ずる必要がある．労働基準局一般職種別賃金改正により特殊自動車運転員は東京において最高 544 円，平均 435円で一般自動車運転員最高 525 円，平均 420 円に比較して僅かに上廻る程度であるから現在支払われているものに比すれば問題にならず少くとも何処においてもこの程度迄は支払われるべきである．運転員の給与一覧表を示せば表−7 の通りである．

表−7　給与一覧表

	賃金 (円)		
	運転手	助手	土工
A 道路工事	300		235
A 河川工事	420	340	235
B 河川工事	250	180	170
O 河川工事	250	180	210
M 河川工事	265	185	170
E 道路工事	350	250	280
K 河川工事	450	250	280
W 河川工事	327	200	170
N 河川工事	400	250	160
D 河川工事	350	250	160
平均	336	232	200

次に定められた賃金に対して如何なる手当をつけているかを検討してみると最も多いのは超過勤務手当であろう．これも予算の許す範囲内の事で総て良く行われているとは云えないが大体において出されているようである．其の他では出張手当（外泊費）を付けるもの，稼働時間 4 時間以上又は作業土量立米当り等の切投作業，褒賞作業によつて能率向上に務めている．一面に罰則を設けている処もあり，運転員の中には機械取扱の乱暴なのもがあり此処にも人の性格がよく表われるのであるが，非常によく故障を起し作業がはかばかしく無

いので一時作業を中止せしめ，民生の古いブルドーザーを与えてこれが破損するようであれば運転員を廃めさせる事にした処が故障が殆んど無く能率が著く増挙がつた例がある．以上のように給与の増額を計ると共に賞罰を明確にする必要もあると思う．

(4) 運転員と定員法

優秀な運転員は工事遂行上最も必要であるのに，其の人達が多くは臨時人夫的存在である事は其の人を優遇し，身分の安定を計る意味から何とかして職員にし度いと考えられる．然し乍ら定員法の設置により如何とも出来ない．此処に現場の悩がある．

(5) 運転員の数

一台の車輛に何人位が配置されているかと云うと仕事の難易季節によりある程度の差異はあると思うが，ディーゼル機関々係においては運転員1名で総てが出来るのが普通に考えられる．米国の例を見ても大体運転員1人で運転，整備を行いその為労賃が高いと云われているが，現在の処ではブルドーザーが大体運転員，助手の2名（助手も運転出来る）で作業している．短期間に大なる作業をなさんとする場合，米国の実例を見ても年間2,000時間の運転がなされているが，このような場合に行う連続運転では運転員を交代制にすると云う処置が採用されるがこれは特別な場合で規準とはならない．現在行われている一例をあげると（表—8）のような

表—8　機種別運転員数例

機械別	現場名	型式	運転手	助手
ブルドーザー	W 河川工事	D-7	1	1
		D-50	1	1
		東日本重工	1	1
	Y 河川工事	D-8	1	1
		D-7	1	1
	B 河川工事	D-7	1	1
	D 河川工事	HD-14	1	1
	D 河川工事	TD-18	1	1
	N 河川工事	D-50	1	0
パワー・ショベル	Y 河川工事	ディーゼル	1	1
		ディーゼル	1	0
	V 河川工事	スティーム	1	1
	N 河川工事	ディーゼル	1	1
ドラグライン	D 河川工事	スティーム	1	2
		ディーゼル	1	1
ラダー・エキスカベーター	V 河川工事	スティーム	1	4
		スティーム	1	3
	W 河川工事	スティーム	1	3
	U 河川工事	スティーム	1	2
タワー・エキスカベーター	河川工事		2	1

機械別	現場名	型式	運転手	助手	火夫	土工
機関車	V 河川工事	ステイーム 20 噸	1	0	1	0
		ステイーム 15 噸	1	0	1	0
	Y 河川工事	ステイーム 8 噸	1	0	1	0
		ステイーム 6 噸	1	0	1	0
	W 河川工事	ステイーム	1	0	0	1
	U 河川工事	デイーゼル	1	1	0	0

表−9 機種別運転員数

機械別	運転手	助手
ブルドーザー	1	1
キヤリオールー	1	2
パワー・ショベル（内燃機関）	1	1
〃（蒸気機関）	1	2
ドラグライン	1	1
ラダー・エキスカベーター（内燃機関）	1	1
〃（蒸気機関）	1	2
タワー・エキスカベーター（大）	2	2
〃（小）	1	2

ものである．これに依り機種別運転員数は大体（表−9）の如くであると云える．

(6) **運転員の希望と所感**

如何なる考を持っているか運転員および助手に対して無記名で調査した結果 44 名の意見が出たのでこれを各項についてまとめてみる．

1) 仕事中に倦きが来るか．

少し倦きる……26 名

倦きない……15 名

倦きる…… 3 名

この調査は出来るかぎり上司を通さず直接手渡して資料をとり度いと考えたのであるが思うように行かなかつた．此処に少し倦きると云う者が約 60% であるがこれが真実の処であろう．倦きないと云う者の中にも少し倦きる者が居り，又倦きると云う者も判断の仕方によつては少し倦きる方に入る者が居ると思われる．

2) 何時頃倦きるか

仕事の丁度中頃……11 名

午後 ……10 名

仕事の終り近く……10 名

午前 …… 1 名

3) 倦きる程度

仕事を続けるのが嫌になる程では無い……24 名

仕事を続けるのが嫌になる ……3 名

倦きない ……5 名

益々熱心にやる ……1 名

4) 倦きて来たらどうするか

煙草を喫う ……13 名

どうもしない ……7 名

人に話掛ける ……4 名

何か物を考える……2 名

5) 倦きを感ずる事は此の仕事に就いた当初と今と違うか

始めも今も一向に感じない……15 名

今の方が倦きる ……10 名

始めも今も同じ位に感じる……7 名

始めの方が倦きる ……2 名

6) 仕事をして居る間にどんな事を主に考えるか

仕事の仕方や機械についての工夫……32 名

昇給の事 ……4 名

仕事の済んだ後にしようと思う事……3 名

自分の家の事 ……1 名

何も考えない ……1 名

7) 仕事をして居る間に疲れを感じるか

少し感じる ……22 名

非常に感じる……15 名

感じない ……5 名

8) 今の仕事を面白いと思うか

稍面白く思う ……16 名

大して面白く思わぬ……10 名

非常に面白いと思う……10 名

これは一寸困つた問題で面白くないと思う人が多いことは運転員に対し土木工事の知識と責任を持たせるとか，時々興味を起す様にしむけるとか何らかの手段を講ずる必要があるのではないか．

9) 今の仕事についてこうして欲しいと思う事があるか．

もつと仕事の変化が欲しい ……17 名

もつと賃金，給料を多くする……17 名

被服がもつと欲しい　……15 名
もつと扱い易い機械にする　…… 9 名
もつと休日を多くする　…… 4 名
今の仕事と違う仕事がしたい…… 2 名
もつと休憩時間を長くしたい…… 2 名
何も望みは無い　…… 2 名
仕事の間に音楽が聴きたい　…… 1 名
もつと仕事の時間を短くする…… 1 名

本項は希望の 2 つ有るものはこれを採り，それ以上はその順により 2 つ取つた．此処で感じる事は仕事の変化の無い事で，これは土木工事の作業として止むを得ない事であるが何等かの対策を考えなくてはならない．賃金，被服の問題は多くの人がこれを望んでいるのであるからこれまた同様の事が云えるのではないかと考えられる．

〔2〕 機械整備員

調査の対象とした機械工作工場の整備員の状況は次の如くである．

(1) 身分および待遇

各工作施設所属の技官，雇員および傭人の数は大体（表—10）の如くで技官数最高は B 工作事務所の 4 名

表—10　機械整備員内訳

工場名	技官	雇員	傭人	人夫賃（円） 最高	人夫賃（円） 最低
A 機械出張所	3	21	19	375	185
B 工作事務所	4	34	11		
C 工作事務所	3	5	49		
D 工作出張所	2	19	34		
E 工作出張所	1	15	15	260	200
F 機械工場	1	27	12	300	110
G 工作出張所	1	14	10		
H 機械出張所	1	19	39		
I 機械出張所	3	9	15	323	148
J 機械出張所	3	48	88	320	120
K 機械工場	1	5	38		
L 機械工場	1	2	30		

で A 出張所，C 工作事務所，I 出張所および J 出張所の 4 工場は技官 3 名，D 事務所は 2 名，他は 1 名である．然してこの技官数の少い工場においても皆相当の規模を有し，工事量も多いがやはり定員法に縛られ任官出来ない人がおり充分に資格が有りながら職に気の毒である．現在の機構では修理する地域を限定され，常時その機能を充分に発揮せず工事量にもむらが生ずるから，その人員中特に傭人，人夫には変動があるかも

しれないが，雇傭人数は J 出張所の 136 名が例外的に多数で他は 30～58 名の範囲で少数の個処としては G 工作出張所，I 出張所の 24 名である．雇員と傭員との比較をしてみると雇員の多い個処は A 出張所，F 工場，G 出張所のみで E 出張所の同数を除いた傭員数が多く特に C 工作事務所は総員 54 名中雇員数 5 名で例外的な比率を示している．たゞし是は実収入の点ではどちらが良いと云う事は云えないし色々と事情がある事と思う．

(2) 賃　金

賃金は地理的条件によつても異ると同時にその工場の作業内容に因つても差異がある．I 機械出張所は最高 323 円で最も高賃金であるがやはり都市に近い事が主たる原因と思われる．作業内容を見ると木工，鍛造，製缶，鍛造，機械仕上，組立修理の順に賃金も下る．A 出張所の最高 375 円，J 出張所の最高 320 円は前記 I 機械出張所に次ぐ高賃金を出しているがこれは木工，鍛造を行つている結果であろう．F 機械工場の最高 300 円，E 工作出張所の最高 260 円はいづれも木工，鍛造を行つていない．大体以上の様な状況であるが賃金については資料が少く都市に所在する B 工作事務所，C 工作事務所，D 出張所等の資料があれば又変動があると思われる．先づ集つた資料について一応比較を行つたゞけに止める．

V. 施　工　能　率

施工能率は機械化施工のバロメーターであつて，施工能率が上昇して急速な施工が出来る事によつて単価も下り機械化施工の能力を発揮出来るのである．然し乍ら各機械の能率を比較するには一定した測定方法により各地で集収した資料について整理しなければならないが，各地の資料を見ると測定法に多少差のあるものがあり今後は更に此の点を徹底させる必要がある．

〔1〕 資料整理要領

(1) 日　数

1) 期　間

長期に渉る資料が無いので期間を区切り，機械の運転始めより終了迄出来る限り長期のものを取り稼動率 20 %以下のものは除いた．

2) 総 日 数

運転始めの日より終了日までを総日数とした．

3) 作業日数

機械が作業を行つた日数を云う．

4) 休止日数

人，機械，天候，待合せの関係により機械が休んだ日数．

5) 故障日数

機械が故障の為修理に要した日数．

6) 整備日数

機械の整備に要した日数.

(2) 時 間

1) 総時間

資料によつては総時間の記載して無いものがあるので, その場合には一日 8 時間勤務とし総日数を 8 時間に乗じたものとする.

2) 運転時間

作業運転をした時間.

3) 故障時間

4) 整備時間

資料に明記して無い場合は整備日数を 8 時間に乗じたものとする.

5) 休止時間

明記無いものは総時間より運転, 故障, 修理, 整備時間を引いたものとする.

6) 1 日当り運転時間

$$\frac{(\text{運転時間})}{(\text{作業日数})}$$

7) 1 日当り整備時間

$$\frac{(\text{整備時間})}{(\text{作業日数})+(\text{整備日数})}$$

(3) 運転成績率

1) 稼 働 率

$$(\text{日数率})=\frac{(\text{作業日数})}{(\text{総日数})}\times 100\%$$

$$(\text{時間率})=\frac{(\text{運転時間})}{(\text{総時間})}\times 100\%$$

2) 休 止 率

$$(\text{日数率})=\frac{(\text{休止日数})}{(\text{総日数})}\times 100\%$$

$$(\text{時間率})=\frac{(\text{休止時間})}{(\text{総時間})}\times 100\%$$

3) 整 備 率

4) 故 障 率

5) 機 能 率

$$(\text{時間率})=\frac{(\text{運転時間})}{(\text{運転時間})+(\text{整備時間})}\times 100\%$$

(4) 作 業 土 量

1) 1 日当り作業土量

$$\frac{(\text{作業土量})}{(\text{作業日数})}$$

2) 1時間当り作業土量

$$\frac{(\text{作業土量})}{(\text{運転時間})}$$

3) 運搬距離

運搬距離は作業土量に直接影響を及ぼすものであるが資料が1日の走行距離，総走行距離で表わされたり，又資料の無いものが多く比較出来なかつた．

(5) 燃料，動力，油脂消費量

1) 総消費量

2) 1日当消費量

3) 1時間当消費量

4) 土量 100 立米，1,000 平米当消費量

以上の整理要領である．先述した通り此処で取上げたものは主として短期間の資料であるが他所で調査した資料により長期間のものとの比較をして見える．

〔2〕 稼働率と機能率

表—11

機械名	稼働時間率 (%)			機能時間率 (%)			時間当作業量 (立米)			資料数
	平均	最大	最小	平均	最大	最小	平均	最大	最小	
ブルドーザー D-8	11.9	16.2	7.9	63.4	67.0	59.8	12.5	13.8	11.2	2
〃 D-7	26.7	49.6	10.9	76.2	100.0	49.2	29.5	65.5	3.2	20
〃 D-4	25.4	46.0	7.2	67.6	84.0	40.1	13.5	29.3	6.5	9
〃 R-4	14.6	26.9	9.9	80.0	89.5	58.0	17.0	30.9	8.7	4
〃 HD-7	27.9	27.9	27.9	83.5	83.5	83.5	30.2	30.2	30.2	1
〃 HD-10	27.8	27.8	27.8	75.0	75.0	75.0	10.6	10.6	10.6	1
〃 HD-14	18.7	22.8	14.5	56.4	78.2	27.8	12.6	23.6	3.6	4
〃 TD-9	15.3	26.1	4.4	75.1	75.3	75.0	8.4	16.1	0.6	2
〃 TD-18	22.1	38.5	5.7	84.6	90.0	79.1	20.3	30.6	9.9	2
〃 TD-14	1.8	1.8	1.8	71.0	71.0	71.0				1
〃 D-50	25.6	68.9	4.2	54.3	87.0	22.5	19.8	28.5	0.6	23
〃 BB II	2.1	11.4	1.1	62.0	90.0	39.5	35.1	76.2	12.7	9
〃 KT-140	7.0	7.9	6.1	36.3	58.0	14.5	22.7	32.1	13.3	2
ドラグライン	15.3	36.9	3.5	70.5	92.0	49.3	25.8	31.1	21.4	6
ショベル (デイーゼル)	8.4	28.0	1.4	55.8	68.5	45.0	19.7	30.5	15.3	4
ラグー・エキスカベーター	40.0	40.0	40.0	89.0	89.0	89.0	24.7	24.7	24.7	1
タワー・エキスカベーター	28.4	33.8	23.0	44.5	53.0	36.0	34.4	36.5	32.3	2
グレーダー HA-56	17.3	42.1	4.8	72.1	81.6	48.6	1371.1	2879.3	351.2	8
〃 KT-12	8.8	8.8	8.8	48.0	48.0	48.0	67.4	67.4	67.4	1

機械稼働率は機械化施工能率の根本となるもので，これを工事を主体とした場合と機械を主体とした場合の2方面より観察し，前者を稼働率，後者を機能率と云う．両者の相違は稼働率は機械の休車時間即ち段取変更待時間と休日，雨天の時間も含む総時間で運転時間を除したもので，機能率は総時間よりこれらの時間を差引いたもので運転時間を除したものである．稼働率は一般に機能率より低く長期に渉る程此の差は甚しい．長期の資料を取り得なかつた為建設機械課にて集められた資料を基として長期短期を比較する事とした，(表—11)より稼動率は 10～40% で大体において全期間の 1/4 動けばよいと云うことになつている．機能率では 50～80% で大体 65% と思われる．(表—12) は A，B，C，D 省における昭和 24 年度の実績を比較したものである．A 省は機械を工事場に配分して管理，運営を行わせて居り，B 省は機械を 1 ケ所に集結し工事に応じ

表—12　各省別24年度実績比較

種別	資料別および数	使用日数率(%)	稼働日数率A (%)	稼動日数率B (%)
ブルドーザー D-4	B 3	40.0	30.6	12.2
	C 6	68.0	64.5	43.8
	D 7	32.6	75.2	24.5
	平均	46.9	56.8	26.7
ブルドーザー D-6	C 1	60.0	61.0	36.6
	D 2	52.4	69.1	36.2
	平均	56.2	65.1	36.4
ブルドーザー D-7	B 4	50.0	65.1	32.6
	C 10	65.0	60.0	39.0
	D 7	61.7	78.5	48.4
	平均	58.9	67.9	39.9
ブルドーザー D-8	B	68.0	47.4	32.1
	C 17	73.0	57.0	41.6
	D 7	59.2	69.7	41.3
	平均	66.7	58.0	38.6
ブルドーザー HD-14	B 3	42.0	13.9	5.8
	C 3	60.0	58.0	34.8
	D 5	49.0	68.3	33.2
	平均	50.3	46.7	23.5
ブルドーザー TD-18	D 2	43.8	62.5	27.4
ブルドーザー D-50	A 9	47.0	62.0	29.2
ブルドーザー KTC-70	A 4	42.0	42.0	17.6
ショベル 15 B	B 3	48.0	30.3	14.5
ライマー	B 3	47.0	37.6	17.6
油谷	A 2	54.0	55.0	29.7
ドラグライン 日燃	A 3	43.0	85.0	36.5
ラダー・エキスカ 浦賀	A 2	91.0	90.0	82.0

て出動せしめて直轄工事を行つて居る．C 省，D 省は機械管理を行つていて工事に応じて貸与し，工事は主として請負工事になつて居る．なおこの統計は各省によつて方法が異つているので

$$(\text{使用日数率}) = \frac{(\text{現場日数})}{(\text{年間或は機械入手後25年3月迄})}$$

$$(\text{稼動日数率 A}) = \frac{(\text{作業日数})}{(\text{現場日数})}$$

(稼動日数率 B)＝(使用日数率)×(稼動日数率 A)

とした．即ち此処で前の稼働率は今同じものは稼動日数率 B であるから，この両者を比較して見ると大体 10～50% 位で多くは 30～40% で少しは良いがこれでも 1/3 位である．結局昭和 24 年度は未だ初期の為に機械稼働は少いと云う事が云えるのでは無いかと思われる．

〔3〕 各種機械能率

(1) ブルドーザー

1) 稼働率と機能率

稼働率は長期のものは (表—11) により TD-14, BB II, KT 140 を除けば大体において 15～28% であつて繰時間の 1/4 以下と云う事になるが，最大のものには D-50 68.9%, D-7 49.6%, D-4 の 46% 等が割合に良いようである．(表—14) では平均 53.74% で 30～60% になつており他との年間比較をしたものが (表—12) である．

2) 天候と稼働率

北海道外 5 地建を 3 区分し，北より A, B, C としブルドーザーについて天候と稼働率とを比較して見ると次のようになる．

表—13 天候および稼働率比較

	稼働率 (%)	非降水率(%)	差 (%)	資料数
A	64	49	+15	24
B	48	50	− 2	15
C	57	61	− 4	9

これを見ると雨雪の時も北方では作業を行つているが，南方え行くにしたがつて休車すると云う現象を示しており，地方的条件によつて已むなくこうなつた事と思うが，要するに全体的に稼働率は天候によつて大きく左右されていない．

3) 1日当り運転時間と整備時間

運転時間は平均 5.97時間/日になり最大が 7.52 で 5～7 時間となる．大体 5.97時間/日は 8 時間勤務とすると残りの 2.00時間/日が整備および休憩に当てられる事になる．ブルドーザーの作業としては 2.00時間/日位の整備，休憩時間があれば長期継続作業が出来ると思う．若しこの運転時間を 7～9 時間に延長すると勤務

表—14　ブルドーザー実績表

	民生 B—8	キヤタピラ D-7	D-8	インターナショナル TD-18	アリスチャルマー HD-14	HD-7	小松 D-50	小倉 KT-140	東亜工 BB-11	羽田 AT-70	平均
1日当運転時間	5.52	6.24	5.7	5.98	7.52	7.25	5.30	4.65	3.36	8.23	5.97
1日当整備時間	0.89	1.19	1.8	1.75	1.38	1.40	1.06	1.23	1.20	2.00	1.39
稼動日数率 %	66.14	66.30	80.0	58.35	44.65	90.20	62.80	73.03	48.96	70.70	66.11
機能時間率 %	60.64	73.90	72.6	60.20	73.65	80.45	62.03	58.27	41.30	72.60	65.56
稼働時間率 %	55.48	55.40	60.0	45.85	39.90	81.40	46.70	42.86	28.86	70.90	53.74
休止時間率 %	10.25	22.83	12.0	30.00	42.70	4.80	24.28	26.60	27.46	2.20	20.31
故障時間率 %	26.22	11.30	3.0	10.10	8.90	4.60	17.07	15.80	34.20	3.40	13.46
整備時間率 %	8.25	9.43	20.0	14.00	8.10	15.20	10.09	11.20	9.10	23.30	12.58
1日当作業土量 m³	62.66	250.00		93.00	132.55	262.75	92.20		144.66	119.40	144.69
1時間当作業土量 m³	11.80	39.40		19.71	17.20	35.05	17.74		36.03	14.90	23.88
軽油 1日当消費量 l	50.35	62.10		55.50	67.35	35.30	33.95		24.23	91.8	52.57
軽油 1時間当 〃	7.30	9.08		10.24	8.89	4.86	6.28		7.11	11.44	8.17
軽油 100 m³ 当 〃	63.81	51.60		69.00	54.60	26.00	47.60		23.56	76.70	51.61
モビール 1日当消費量 l	5.44	5.66		5.15	5.40	3.82	3.42		1.80	8.84	4.94
モビール 1時間当 〃	0.94	0.807		0.79	0.74	0.54	0.56		0.51	1.10	0.75
モビール 100 m³ 当 〃	7.75	3.597		7.70	5.20	2.49	4.16		1.70	7.38	4.99
モビール 軽油 100 l 当〃	12.49	9.05		9.20	8.80	12.47	8.74		1.39	9.63	9.72
資料数	10.00	11.00		2.00	2.00	2.00	22.00		3.00	1.00	57.00

表—15　モーターグレーダー実績表

	日本開発 HA-56	キヤタピラ 112	212	日本開発 HA-46
1日当運転時間	6.69	8.00	5.56	7.75
1日当整備時間	2.20	1.33	0.87	0.75
稼働日数率 %	36.70	60.40	58.70	66.60
機能時間率 %	50.40	69.70	76.50	75.60
稼動時間率 %	43.50	60.90	55.80	64.60
休止時間率 %	12.60	12.90	27.50	14.60
故障時間率 %	12.70	0	5.75	14.60
整備時間率 %	31.20	26.30	11.50	6.25
1日当作業量 m²	14,406.00	47,150.00	17,370.00	9,625.00
1時間当 〃	2,168.00	5,890.00	3,370.00	1,127.00
軽油 1日当消費量 l	50.90	59.90	33.30	2.03
軽油 1時間当 〃	7.71	7.49	6.19	0.26
軽油 1000m² 当り 〃	3.53	1.27	2.06	0.21
モビール 1日当消費量 l	3.71	1.91	2.03	0.25
モビール 1時間当 〃	0.55	0.24	0.32	0.03
モビール 1000m² 当り 〃	0.19	0.00	0.14	0.02
モビール 軽油 100l 当〃	7.280	3.40	6.07	12.30

表-16 ドグライン実績表

		神戸製鋼 15K	日本燃化	リンクベルト 但し民生60 HP	ステーム
1日当運転時間		3.78	4.120	5.39	9.2800
1日当整備時間		0.74	1.070		4.1900
稼働日数率	%	51.60	63.500	46.50	43.8000
機能時間率	%	43.80	66.300		60.6000
稼働時間率	%	29.80	32.900	31.50	50.8000
休止時間率	%	50.00	72.400		16.3000
故障時間率	%	23.30	0		8.4000
整備時間率	%	4.50	9.530		24.2000
1日当作業土量	m^3	120.70	117.100	106.50	121.5000
1時間当作業土量	m^3	22.80	33.100	19.50	13.1000
軽油又は石炭	1日当消費量 l,t	28.80	33.200	43.70	0.6240
	1時間当 〃	8.51	9.470	7.09	0.0698
	$100m^3$当 〃	35.00	44.100	34.50	0.5330
モービル	1日当消費量 l	2.04	2.630	1.15	1.1200
	1時間当 〃	0.83	0.810	0.21	0.1210
	$100m^3$当 〃	3.00	2.730	1.18	0.9250
	軽油 100 $\frac{l}{t}$ 当〃	11.68	3.940	5.31	1.8000
シリンダー油	マシン又はシン 1日当消費量 l	0.64	0.904	1.32	2.2500
	1時間当 〃	0.11	1.590	0.25	2.2400
	$100m^3$	0.60	1.450	1.40	1.5900

表-17. シヨベル実績表

		ステーム	デーゼル	電気
1日当運転時間		4.170	6.810	1.80
1日当整備時間		0.880	1.510	1.24
稼働日数率	%	64.400	56.230	83.40
機能時間率	%	57.900	62.200	42.20
稼働時間率	%	43.800	48.130	18.80
休止時間率	%	55.800	25.500	55.50
故障時間率	%	11.400	15.300	11.10
整備時間率	%	6.800	12.700	14.60
1日当作業土量	m^3	149.800	132.500	53.10
1時間当作業土量	m^3	35.700	27.270	29.40
軽油、石炭	1日当消費量 l t KWH	0.941	32.430	7.67
	1時間当 〃	0.234	5.800	4.25
	$100m^3$当 〃	0.642	25.200	14.50
モービル	1日当消費量 l	1.050	1.721	
	$100m^3$当 〃	0.818	1.436	
	$100m^3$当 〃	1.105	5.230	

シリンダー	1日当消費量 l	1.609	1.03
	100m³当 〃	1.282	0.88
	石炭 1 噸当 〃	1.853	3.04
	軽油 100 l 当 〃		

表−18　ラダーエキスカ，タワーエキスカ実績表

	ラダーエキスカ			タワーエキスカ
	120m³/nステーム	60m³/nステーム	120m³/nデーゼル	
1日当運転時間	7.110	7.100	9.16	4.340
1日当整備時間	1.040	0	2.09	
稼働時間率 %	73.450	83.400	78.90	66.450
機能時間率 %	65.700	100.000	79.00	42.900
稼働時間率 %	75.100	73.900	65.70	36.250
休止時間率 %	29.200	26.100	16.90	15.650
故障時間率 %	0	0	2.90	39.050
整備時間率 %	10.600	0	14.50	9.050
1日当作業土量 m³	305.490	115.800	154.20	143.900
1時間当作業土量m³	49.390	16.300	15.90	34.650
石炭 1日当消費量 t	1.393	0.757	軽油 19.70	電力 430.000
石炭 1時間当 〃	0.215	0.106	軽油 2.04	電力 KWH
石炭 100m³当 〃	0.443	0.650	軽油 12.80	286.500
マシン 1日当消費量 l	2.124	2.510	モビール 2.58	0.524
マシン 1時間当 〃	0.290	0.350	モビール 0.28	0.125
マシン 100m³当 〃	0.760	2.160	モビール 1.60	0.357
シリンダーマシン 1日当消費量 l	1.660	1.670	マシン 2.58	0.3 0
シリンダーマシン 100m³当 〃	0.600	1.440	マシン 1.60	

労働時間は 1〜2 時間の超過勤務となるが其の作業量は 40% 位増加し，2 日の作業で約 3 日分の作業を行う事が出来，稼働時間率が上昇する．ブルドーザーの作業では事情が許せばこの点を考慮する必要がある．

4) 作業土量

作業土量の測定方法としては i) 掘さく前後の測量により測定する法．ii) 築堤，盛土の出来上り量を測定する法．iii) ブルドーザー 1 回の押土量に回数を乗じて測定する方法，以上 3 種類が行われている．i)，ii) は 10 日毎或は小部分完了毎に行われているようである．iii) は最も簡単な方法であるがある程度の感によつて定められる故に，最初に数回押土してみてこの量を測り平均値を出して 1 回の押土量を定めなければならない．各方法に特徴があるが旧地盤としての土壌，ルーズになつた土壌，輾圧された土壌等状態が異ればその価が異つて来る．現在このいづれかに依つて土量を測定し 1 日作業量として記録せられているのでその平均値はある程度異つて来る．之等を統一する必要があるが簡単な ii) と iii) とによつて土量を定めるのが良いように思われ，今後この点に就て研究し度いと思う．(表−14) によれば 1日当作業土量平均 144.69立米/日で D-7 は 250立米/日となつており一般的概念として知られている 300立米/日に対して 82% を示し，1 時間当り作業土量に

表—19　機関車実績表

	スチーム						デーゼル			ガソリン	
	5 t	6	8	9	15	20	4	5	7	5	7
1日当運転時間	7.470	9.880	8.710	7.000	5.610	7.230	5.47	8.35	6.82	7.52	
1日当整備時間	2.450	1.630	1.780	3.200		1.750		1.16		0.39	
稼働日数率 %	78.950	69.460	70.800	100.000	74.600	64.360	67.75	67.15	68.80	57.55	62.00
機能時間率 %	89.100	85.100	90.000			81.700	72.30	78.50	86.80	95.15	
稼働時間率 %	73.980	66.540	77.150	89.000	49.860	57.600	45.50	61.90	57.84	51.50	
休止時間率 %	19.830	26.620	21.250			39.430		22.90		45.75	
故障時間率 %	0	2.400	0			0.700		9.95		0	
整備時間率 %	8.230	4.410	1.650			11.030		8.20		2.75	
1日当作業土量 m^3	219.200	89.160	108.500	149.000	147.050	242.400	77.10	104.90	88.90	123.75	25.20
1時間当作業土量 m^3	16.020	9.040	12.450	20.900	24.460	35.130	14.40	13.10	16.40	17.10	6.50
距離平均 m^3	807.000	2220.000	2000.000	1000.000	2400.000	3625.000	925.00	950.00	1117.30	525.00	1600.00
1日当運搬回数	15.000	9.400	13.000	13.000	8.000	8.500	14.00	16.00	10.40		
トロ容量及台数	0.6m^3×13	0.84×12.4	0.9×15	1.0×1.0	3×19	3×20	0.6×10	0.6×11.5	0.85×11.5		
石炭 1日当消費量 l	0.799	0.571	0.684	0.561	0.786	1.603	軽油 27.50	20.00	76.00	32.70	52.90
石炭 1時間当 〃	0.104	0.060	0.078	0.077	0.152	0.230	ガソリン l 5.19	2.42	5.52	4.37	3.23
石炭 100m^3当 〃	0.645	0.691	0.606	0.377	0.700	0.770	35.50	20.10	32.50	25.83	49.40
モービル 1日当消費量 l	4.365	0.744	1.940	0.550			モービル l 3.38	1.39	1.62	1.09	0.32
モービル 1時間当 〃	0.590	0.051	0.230	0.070			0.63	0.16	0.37	0.15	0.05
モービル 100m^3当 〃	3.037	1.320	1.720	0.370			4.35	1.56	2.03	0.86	0.60
ダイシリン 1日当消費量 l	2.740	0.890	0.520	0.280	1.150	1.940	12.52	2.15	6.12		
ダイシリン 1時間当 〃											
ダイシリン 100m^3当 〃	1.85	1.250	0.460	0.190	1.060	0.970					

表—20　キャリオール実績表

		D-7 による	HD-14 による
1 日当運転時間		7.25	8.00
1 日当整備時間		2.29	3.31
稼働日数率	%	54.30	58.00
機能時間率	%	67.80	63.00
1 日当作業土量	m^3	102.50	122.35
1 時間当作業土量	m^3	15.23	15.30
距離平均	m	600.00	700.00
軽油 1 日当消費量	l	65.86	74.50
軽油 1 時間当	〃	10.08	9.32
軽油 100m^3 当	〃	65.30	66.80
モビール 1 日当消費量	l	2.73	2.78
モビール 1 時間当	〃	0.38	0.33
モビール 100m^3 当	〃	2.64	2.05
モビール 軽油 100 l 当	〃	5.59	2.63

おいては 39.4立米/時で 60立米/時（距離 30 米）と普通云われているのに対し 65% となつている．資料を見ると最大 500~600立米/日 があつたが，これは土壌が良く運転時間約 9 時間位の場合で大体 2 倍位の作業量で前述の運転時間の延長が如何に大きな効果があるかよく表しているものと思う．（表—11）によると平均 29.5立米/時で幾分下つているが最大は 65.5立米/時になつている．1 時間当り作業土量の大きな方からは（表—14）では D-7, BB-II, HD-7, TD-18, D-50 となり，（表—11）では HD-7, D-7, KT-140, TD-18 の順で D-7, HD-7 が成績が良い．各省実績は土量測定法が異る為平均する事が出来ない．例えば D-7 では次のような資料があるが B 省は在来地盤より測定してあるし，C 省のものは弛んだ土壌を測定しているからである．

所属別	運転時間（時）	作業土量（立米）
B 省	4.9	135
C 省	7.4	269

なお D-7 を標準として他車との比率を出してみる．

表—21

種別	比率（%）
D-7	100
D-4	44
D-8	112
HD-14	95

5) 燃料および潤滑油消費量

燃料および潤滑油消費量は工事の内容，運転時間，作業土量に依つて異つて来るが各省実績の内より同一に6時間運転として資料数に比例して平均して見ると次の通りである．

表－22

種別	1日当消費量	
	主燃料（立）	潤滑油（立）
D-4	38	2.3
D-7	78	2.8
D-8	72	3.6
HD-14	84	6.6

これと（表－14）を比較して見ると主燃料はキヤタピラー社のものは同じ様であるが潤滑油の消費が少し多い．（表－14）では主燃料に対する潤滑油の消費量 7～12% 位であるのに 4～8% となつている．

(2) **モーター・グレーダー**

1) 稼働率と機能率

（表－11）では稼働時間率 17.3% となつているがこれは少いようで（表－15）では 43～65% 平均 54.6% である．機能率は 72.1% で（表－15）の 50～76% 平均 68% に比較すると 4% ばかり上廻つている．

(3) **ドラグライン，シヨベル，ラダー・エキスカベーター**

1) 稼働率と機能率

ドラグラインの稼働時間率は 30～50% でデイーゼル機関は 30% 位である．シヨベルは電気が 18.8% で他は 45% 内外でドラグラインおよびシヨベルは余り変らないがラダー・エキスカベーターは 70% 以上で良い成績を示している．（表－7）を見てもドラグライン 15.3%，シヨベル 8.4% に対し 40.0% で一番良い．

2) 運転時間と作業土量

積込機械の運転時間と作業土量とは常に一定せず運搬車輛によつて異る．即ち運転時間が長くてもそれが総て積込時間に費されるのでは無く，車輛の入替或は車輛の帰還を待つ時間が多いのであつて運転時間を増加してもその割合に作業量は増大しない．特にステームを動力としている機械は待時間が長くても機関を停止して置けない難点がある．運搬車輛台数を増加して待合時間を少くする事が先づ作業土量増加の第一条件である．なお積込機械および運搬機械の両方に容量の大きなものを使用すれば申分は無いことは勿論である．

3) 主燃料および潤滑油消費量と作業土量

シヨベル，ドラグラインの燃料，潤滑油消費量と作業土量の検討をするには良い資料が無く参考として他省におけるガソリン機関の例を上げる．

表-23

機種別	1日当り			
	運転時間 (h)	燃料消費量 (l)	潤滑油消費量 (l)	作業工量 (m^3)
ショベルライマー	4.9	34.8	1.45	94
ショベル 15B	3.9	32.2	1.43	144
ドラグラインライマー	5.9	45.3	1.34	185

〔4〕 能率向上

昭和 24 年度実績より見て今後機械化施工に際しては; 先づ稼働率をあげ作業土量を増してその能率を向上させねばならぬと思う. 以下これについた気付いて事項を述べる.

(1) 1日実作業時間の延長

これはブルドーザーの項で述べた通り作業時間の延長は稼働率, 作業土量に大きな差をおよぼすものである. たゞし組合せ作業において欠陥がむしろ運搬車輛にある場合は作業時間を延長しても余り著しい差は無いから先づこの欠陥から除去するべきであろう.

(2) 年稼働率の向上

長期稼働率は 26% 位であるから少くとも 50% 位迄は上昇させなくてはならない. この主原因は運営面より来る欠陥で機械の絶対数が少い今日止むを得ない点もあるが, 機械の移動即ち段取替および修理部品待等の待合時間の多い事である. 1時に大土量を動かし得ると云う特性から, 大土量工事に張付けにせずに急速に土量を動かす必要のある場処え次々に移動させられる結果機械の実作業時間を少くしているのではないかと思う. 出来る限りその場で長期作業を行い得るような現場を選び段取変更等による待合時間を少くしなければならない.

又部品待合時間は最少限に必要部品を準備して置けば解決する. これは運営に大いに関連しておりその機械1台のみとか各種機械が統一されずに集められた場合なかなか予備部品を揃えて置く事が出来ない. 又製作会社も出来るだけ部品購入に際しての便利を考えて決定し購入すべきである.

(3) 取扱と施工要領の検討

充分な整備, 慎重な操作とともに最も要領の良い施工をするよう運転員は注意しなければならない. 例えばブルドーザーにおいて押土回数が多いからと云つて必ずしも真の押土量は多くはならないので各々の場処に依つて方法も異なつて来る事を考慮しなければならない. 今後研究する余地がある.

VI. 経済性について

従来機械施工の価値を論ずるのに機械の最大能力とか, 短期間における能力或は米国のように機械化施工の完全に発達した国の実績を以てこれを人力施工の場合との経費の比較を行い, 総て機械化すべきであると云う傾向があつたが, 機械化施工と未だ緒についたばかりで稼働率も少い吾国においては現在の能率で比較的大なる機械償却費を考慮に入れた場合に果して有利に働いているかどうかを検討してみる必要がある. 然し乍ら数

も少く完全な資料とは云い得ないので取敢ず大体の傾向を知るのみにして順次完全な結果にし度いと考えている.

〔1〕 経費算出要領

経費はブルドーザー, ショベル, ドラグライン, 機関車, ラダー・エキスカベーター, タワー・エキスカベーターのそれぞれ 100 立米当りの各機種別平均に対するものおよびモーター・グレーダーは 1,000 平米当りのものを出した. 資料には経費のあるものは殆んど無いので已むを得ず単価等を仮定した為実際とは幾分相異があると思う.

(1) 燃 料 費

燃料費は総て公定価格による.

表-24

品名	単価
	円
ガソリン (l)	35.30
軽油 (〃)	12.30
マシン油 (〃)	37.30
モビール油 (〃)	41.00
シリンダー油 (〃)	47.60
車軸油 (〃)	18.60
600番油 (〃)	47.40
グリス (kg)	103.30

(2) 人 件 費

日当に対して作業日数を乗じたものをとる.

(3) 修理整備費

修理整備費は資料に出ているものの平均値を採用した.

(4) 雑 費

上に同じ.

(5) 償 却 費

償却費の決定は長期に渉る種々の資料により其の購入費, 利率, 修理整備の関係と残存価値等によつて始めて定まるものであるが未だその資料に乏しく一概に決定する事は危険である. 今迄償却費を決定する方法としてアメリカでの例をとりブルドーザーの償却時間を 10,000 時間とする方法や, 或はまた吾国において大分論議されている初年度に購入費の 1/2 償却し, 順次その残額の 1/2 宛をとると云う方法が行われているがいづれも吾国の現状に適当であるとは云い得ない.

此処では建設省資材算定様式に基いて償却年限は経済的使用年限の 7 割とし, 時価は資材課における昭和 24 年度購入価格を参考として現在時価を算定したものである. この方法によりすべて購入年度の如何にかゝわらず, 即ち明治に購入製作したものも昭和 24 年に購入したものも或は掃下修理せるものも其の種類大さ

のみの分類により同一単価と見做した．又償却費は時間当りとし年月日時は総て資材課において仮定されているものに依つた．

1) 償却時間

種別	年月日時	償却時間
ブルドーザー	7-8-25-5	7,000
トラクター	7-8-25-5	7,000
モーターグレーダー	7-8-25-5	7,000
キヤリオール	7-8-25-5	7,000
機関車（蒸気）	10-8-25-5	10,000
〃（デーゼル）	7-10-25-5	8,750
〃（ガソリン）	7-10-25-5	8,750
ショベル（蒸気）	8-10-25-5	10,000
〃（デーゼル）	7-8-25-5	7,000
〃（電気）	8-10-25-5	10,000
ラダーエキスカ（蒸気）	8-10-25-5	10,000
〃（デーゼル）	7-10-25-5	8,750
タワーエキスカ	20-8-25-5	20,000
ダンプトラック	6-10-25-5	7,500
トラック	4-10-25-5	5,000

2) 時間当り償却費

規格（品名）		時価	時間当り償却費
ブルドーザー	4t（D2級）	1,600,000円	228円
〃	6t（D4級）	2,400,000	343
〃	9t（D6級）	2,700,000	385
〃	15t（D7級）	3,100,000	443
〃	18t（D8級）	3,500,000	500
トラクター	1.5t	200,000	29
〃	3t	400,000	57
〃	5t	550,000	79
〃	6t	650,000	93
〃	7t	700,000	100
〃	8t	800,000	114
〃	10t	1,000,000	143
〃	13t	1,300,000	180
モーターグレーダー	5t	2,600,000	371
〃	9t	3,100,000	443
〃	簡易型	2,000,000	286
キヤリオール	4m³	600,000	86
〃	6 〃	700,000	100
〃	9 〃	800,000	114

規格（品名）		時価	時間当償却費
蒸気機関車；種別にて（軌間 1.067）T，（同 0.610）B.（動輪軸 2）C，（〃 3）等があるが，こゝでは ton 数によつた。			
〃	5t	848,000	85円
〃	6t	909,000	91
〃	8t	1,183,000	118
〃	9t	1,443,000	144
〃	15t	1,800,400	180
〃	20t	2,165,000	217
ディーゼル機関車	3t	354,000	40.5
〃	4t	394,000	45
〃	5t	491,000	56
〃	6t	557,000	64
〃	8t	671,000	77
〃	10t	829,000	95
ガソリン機関車	3t	259,500	30
〃	4t	279,000	32
〃	5t	361,000	41
〃	6t	331,000	44
〃	8t	432,000	49
〃	10t	559,000	64
スチームショベル	0.4m³	3,500,000	350
〃	0.5 〃	4,000,000	400
〃	0.75〃	4,600,000	460
ディーゼルショベル	0.4	4,200,000	600
〃	0.5	4,500,000	643
〃	0.75	6,000,000	857
スチームドラグライン	0.5m³	3,800,000	380
〃	0.75〃	4,400,000	440
ディーゼルドラグライン	0.5 〃	4,300,000	614
〃	0.75〃	5,800,000	828
スチームラダーエキスカ	60m³/h	4,000,000	400
〃	120 〃	6,000,000	600
ディーゼルラダーエキスカ	60m³/h	4,000,000	475
〃	120 〃	6,000,000	635
タワーエキスカ	2m³	20,000,000	1,000
〃	1m³～30m	13,000.000	650
〃	1〃～20〃	10,000,000	500

〔2〕 ブルドウザー作業経費

ブルドーザーに依る工事の能率は作業の種類および様式，地質，運搬距離等によつて異り，その経済的価

値も個々の場合について検討しなければならないのであるが，こゝでは平均作業経費について考え，最も多く用いられている 30 米附近の切取土運搬の場合を想定して各機種の平均作業経費と人力による作業経費とを比較した．(表－26) がそれである．

因みに各機種の土運搬距離は次の通りである．

表－25

機　　種	運搬距離 (m)
民生　B－8	36
キヤタピラー　D－7	25
小松　D－50	44
羽田　AT－50	38
東日本重工　BB II	20

また人力切取運搬歩掛りは 30 米間の小運搬を含む1立米当り 0.38 を用い人夫賃は 200円/日とすると 100 立米当り人力作業経費は 7600 円となる．(表－26) によるとブルドーザーに関する限り他の機械に比較してその稼働率は相当に良好であり，人力に比較して経費の面でも有利である．但しこの値は短期間の資料に基いたもので，長期間の場合必ずしもこの値を過信する事は出来ない．

なおブルドーザーの経済的価値としては数台又は他の機械との組合せ作業における場合の能率および経費についても充分検討しなければならないと思う．此処に使用した人力歩掛りは玉石混り砂利における歩掛りで，ブルドーザーを使用している工事現場の地質中最も多いものを使用したのであるが軟土における値 0.2 を用いると作業経費は 4,000 円となり，作業能率の良いキヤタピラー D-7，D-8，アリスチヤルマー HD-7，HD-14，東日本重工 BB II 等は有利であるが民生 B-8，小松 D-50，羽田 AT-50 は人力施工より高価になる．一般に平均値として用いられるブルドーザーに対する人力歩掛りは 0.3～0.32 位が適当と考えられ，作業速度の問題を別にして考えてもブルドーザーによる施工の方が人力施工よりも経済的に有利である．

〔3〕 モーター・グレーダー作業経費

グレーダーは各種作業に使用されているが個々の場合について見るとやはりそれぞれその条件を異にし，一概にこれを人力と比較することは出来ない．然し現在最も多い作業は砂利道補修で，補修人夫 1 人 1 日当りの補修能力は 50～100 平米であるから仮に 70 平米/人・日とし単価を 200 円とすると 1,000 平米当り 2,860 円となり，各機種平均作業経費との比率は (表－27) の如くである．

〔4〕 掘さく機械作業経費

掘さく機械作業に相当する人力歩掛りとしては人力床掘の平均値 0.4 を用いると，人夫賃単価 220 円として 100 立米当り人力作業経費 8,800 円となる．然し此の歩掛りは必ずしも全部に適用して妥当な値とは考えられないのであつて正確な経費は個々の場合について考察しなければならない．次に各種掘さく機械に対する作業土量 100 立米当りの想定経費を示すと (表－28，29，30) の如くである．これによると機械化施工経費は

表—26　ブルドーザー作業土量 100m³ 当り想定作業経費

項目＼機種	民生 B-8		キヤタピラー D-7		キヤタピラー D-8		インターナショナル TD-18		小松 D-50	
	単価	数量	金額	数量	金額	数量	金額	数量	金額	数量	金額
軽油 l	12.30	63.810	784.50	51.600	634.30			69.00	848.50	47.600	585.50
モビール 〃	41.00	7.752	317.80	3.597	147.50			7.70	315.90	4.160	170.50
ガソリン 〃	35.30			1.454	51.30			2.720	96.00	1.185	41.90
グリース kg	103.30	348.00	360.00	0.804	83.20			0.750	77.60	1.120	115.80
ギヤー油 l	47.60	2.70	128.80	0.889	42.30			0.405	19.30	1.170	55.70
運転手 人	350.00	1.44	505.00	0.814	285.00			1.235	432.00	1.560	546.00
助手 〃	250.00	1.44	360.00	0.814	203.40			1.235	308.80	1.560	390.10
修理整備費		1,098.00		489.00				600.00		1,153.30	
雑費											
機械償却費		3,270.00		617.00				1,234.00		2,175.00	
工費		6,824.00		2,553.00				3,931.10		5,234.80	
人力施工との比率%		83.7		36.3				48.2		64.2	

アリスチャルマー HD-14		アリスチャルマー HD-7		小倉 140		三菱 BB II		羽田AT-50		平均	
数量	金額	数量	金額	数量	金額	数量	金額	数量	金額	数量	金額
54.600	671.60	26.000	319.80			23.560	289.80	76.700	943.00	51.610	634.80
5.200	213.10	2.490	102.00			1.700	69.80	7.380	302.50	4.997	204.90
0.440	15.50					0.860	30.40			1.109	39.10
0.193	19.90	0.091	9.40			0.446	46.10	4.220	436.20	1.388	143.40
0.400	19.00					0.400	19.00	2.290	109.00	1.180	56.20
0.865	303.00		172.00			1.170	410.00	0.836	293.80	1.176	412.00
0.865	216.10		122.70			1.170	292.50	0.836	209.00	1.176	293.80
69.30		126.00				656.50		600.00		599.00	
1,413.00		979.00				1,071.00		2,830.00		1,632.00	
2,929.50		1,830.90				2,885.10		5,191.70		4,014.20	
35.9		22.5				35.4		63.4		49.2	

表—27　モーターグレーダー作業面積 1000m² 当り想定経費

項目	機械	日開 HA-56		キヤタピラー 112		キヤタピラー 212		日開 HA-46	
	単価	数量	金額	数量	金額	数量	金額	数量	金額
燃料費 軽油 l	12.30	3.5300	43.50	1.2700	15.70	2.0600	25.40	0.207	2.50
モビール 〃	41.00	0.1900	7.80	0.0430	1.80	0.1350	5.50	0.023	0.90
ガソリン 〃	35.30			0.0152	0.50	0.0300	1.10		
グリース kg	103.30	0.0438	4.50	0.0167	1.70	0.1220	1.30	0.012	1.20
ギヤー油 l	47.60	0.0703	3.30			0.0203	1.00		
計			59.10		19.70		34.30		4.60
運転手人	350.00	0.06.8	24.40	0.0214	7.50		21.30	0.119	41.80
助手 〃	250.00	0.0476	11.90	0.0143	3.50		10.20	0.079	19.70
土工 〃	200.00	0.0698	14.00	0.0214	4.30		12.20	0.119	23.80
修理整備費			105.35		18.00				
雑費			59.10				19.90		
機械償却費			220.00		75.30		110.00		329.00
諸掛費			137.00		58.50		51.00		
工費			631.00		187.00		259.00		419.00
人力施工との比率 %		22.0		6.5		9.0		14.6	

表—28　ドラグライン作業土量 100m³ 当り想定経費

項目	機械	神鋼 15K		日燃 DD 101		リンクベルト		スチーム	
	単価	数量	金額	数量	金額	数量	金額	数量	金額
燃料費 軽油 l	12.30	35.00	431.00	44.1	543.00	34.500	425.00		
石炭 t	4,500.00							0.533	2,495.00
モビール油 l	41.00	3.00	123.00	2.73	118.80	1.190	48.80	0.925	37.90
マシン油 〃	37.30			1.45	54.10	1.400	52.20	0.960	35.80
シリンダー油 〃	47.60	0.60	28.60					1.590	74.30
ガソリン 〃	35.30	0.52	18.30						
グリース kg	103.30	0.89	92.10	0.305	31.50	0.307	31.80	0.222	22.90
計			703.00		740.40		557.80		2,666.00
人件費 運転手人	350.00	0.90	315.00	1.160	406.00	0.540	189.00	0.823	288.00
助手 〃	250.00	0.90	225.00	1.160	290.00	0.540	135.00	0.823	206.00
土工 〃	200.00	1.80	360.00	2.350	470.00	1.080	216.00	1.646	329.00
修理整備費			1,080.00		620.00		485.00		77.00
雑費									
機械償却費			2,690.00		2,500.00		2,520.00		2,900.00
工費			5,373.00		4,952.40		4,103.80		6,466.00
人工作業との比率 %		67.0		62.0		51.2		80.6	

平均値；工費 5,223 円，　比率 65.3%

表−29　ショベル作業 100m³ 当り想定経費

項目 ＼ 機械		単価	スチーム 数量	スチーム 金額	ディーゼル 数量	ディーゼル 金額	電気 数量	電気 金額
燃料費	石炭 t	4,500.00	0.642	2,990.00				
	マシン油 l	37.30	0.818	30.00				
	ガソリン 〃	35.30			0.990	35.00		
	グリース kg	103.30	0.353	36.50	0.700	72.00		
	シリンダー油 l	47.60	1.282	61.10				
	軽油 〃	12.30			25.200	310.00		
	モビール 〃	41.00			1.436	59.00		
	歯車油 〃	47.40			0.880	42.00		
	電気 KWH	3.45					14.50	50.00
	計			3,118.10		518.00		250.00
運転手人		350.00	0.740	259.00	1.036	311.00	1.88	659.00
助手 〃		250.00	1.480	370.00	1.036	259.00	1.88	470.00
修理整備費				435.00		1,065 00		879.00
雑費								
機械償却費				1,290.00		2,350.00		2,200.00
工費				5,472.00		4,503.00		4,258.00
人力作業費との比率 %				68.5		56.4		50.3

平均値；工費 4,722 円，　比率 59.0%

表−30　ラダーエキスカベーターおよびタワー・エキスカベーター作業土量 100m³ 当り想定経費

項目 ＼ 機械		単価	120m³/h スチーム 数量	120m³/h スチーム 金額	60m³/h スチーム 数量	60m³/h スチーム 金額	120m³/h ディーゼル 数量	120m³/h ディーゼル 金額	タワーエキスカー 数量	タワーエキスカー 金額
燃料費	石炭 t	4,500.00	0.443	1,993.50	0.650	2,925.00				
	マシン油 l	37.00	0.764	28.50	2.160	80.60			0.269	10.00
	グリース kg	103.30	0.056	5.80	0.410	23.00			0.406	41.00
	シリンダー油 l	47.60	0.604	28.80	1.440	68.50				
	軽油 〃	12.30					12.80	160.00	0.086	1.10
	モビール 〃	41.00					1.60	65.60	0.357	14.60
	電力 KWH	3.45							286.500	988.40
	計			2,066.60		3,097.10		225.60		1.055.10
運転手人		350.00	0.714	250.00	0.864	302.20	0.65	228.00		468.00
助手 %		250.00	2.142	525.00	2.592	648.00	1.95	487.50		167.30
修理整備費										201.50
雑費										
機械償却費				1,220.00		2,460.00		4,330.00		2,870.00
工費				4,062.00		6,507.30		5,271.10		4,761.90
人力作業との比較 %				50.0		81.3		66.0		59.6

平均値；工費 5,151 円，比率 60.9%，ラダーエキスカー；工費 5,280 円，比率 62.7%

人力施工経費の大体 50～65% となつているが，若し戦前用いられていた人力掘さく積込歩掛り（土木工学ポケット・ブツク）を採用し，積込み高 1.5 米として各地質の平均値 0.1 人/立米を用いると辛い値であるから，人夫賃 250 円としても作業経費 2,500円/100立米となり機械施工の方が高価になる．即ち機械による掘さく，積込はこれと比較すべき人力歩掛の採り方，云いかえると機械の使用箇処および使用法によつて必ずしも経済的に有利とは云えない訳でこの人力歩掛りは更に検討する余地がある．

〔5〕 機関車による運搬作業経費

各種機関車による土運搬歩掛りはその積込様式，機関車および土運車の種類，台数，土運搬距離，勾配，地質等により異る．特に運搬距離と勾配に関しては，その大小によつて如何に作業経費が増減するかを充分検討する必要があるが，こゝにはそれだけの資料が無いので，その平均距離のみを示し，積込様式，機種別毎の平均歩掛り，作業経費および同一距離を人力トロにて運搬した場合との比較を取ると（表—31，32，33，34）の

表—31　手積による機関車土運搬実績表（土量 100m³ 当り平均）

機関車	種類	ガソリン機関車	ディーゼル機関車	スティーム機関車				平均
	型式	5 t	5 t	5 t	8 t	20t	平均	
歩掛	石炭 t			0.543	0.451	0.475		
	軽油 l		15.00					
	モビール 〃	0.860	0.51	0.830	1.300			
	マシン油 〃					1.780		
	シリンダー油 〃			2.460		1.280		
	グリース kg	0.180	0.42	0.136		0.175		
	ボロ 〃							
	車軸油 l	2.590			0.340			
	ガソリン l	25.830						
	運転手 人	0.785	0.78	0.867	1.080	0.436		
	助手 〃	0.785	0.78	1.734	2.160	1.308		
	保線捨場人夫 〃	4.710	4.68	5.202	6.480	2.616		
経費	修理費 円	619	156					
	償却費 〃	237	397	525	948	618		
	工費 〃	2,718	2,415	5,315	5,579	4,026	4,973	4,210
資料の数		2	1	3	1	1	5	8
土運搬距離		2,300	1,000	2,300	2,000	3,500	2,600	2,057
同一距離人力費 円		21,700	14,500	21,700	21,000	—	25,000	21,020
比率 %		17.1	16.6	19.7	26.6		23.2	20.0

如くである．保線および捨場人夫は 6 人と仮定した．上表における人力運搬歩掛りは戦前一般に用いられていた価（土木工学ポケット・ブツク）を採用したが，やゝ辛い歩掛りと思われるので人夫賃単価を 250 円として計算した．なお人力運搬距離は 700～2,000 米迄で運搬距離が大となつた場合両者を比較することは余り意味の無い事かも知れない．

表−32　ドラグライン積込による機関車土運搬実績表（土量 100 立米当り平均）

機関車	種類	ガソリン機関車	ディーゼル機関車			ステイーム機関車	平均
	型式	7 t	4 t	7 t	平均	6 t	
歩掛	石炭 t					0.620	
	軽油 l		31.00	37.200			
	モビール 〃	0.40	4.70	2.180		1.135	
	マシン油 〃					0.794	
	シリンダー油 〃	3.09		0.600		0.544	
	グリース kg	0.31	0.12	0.235			
	ボロ 〃			0.235			
	車軸油 l			4.300			
	ガソリン 〃	49.40					
	運転手 人	1.90	1.26	1.745		0.994	
	助手 〃	1.90	1.26	1.745		1.990	
	保線捨場人夫 〃	11.40	7.54	10.460		5.770	
経費	修理費 円	436	458	138			
	償却費 〃	735	313	468			
	工費 〃	7.387	4,003	4,877	5,422	6,119	5,594
資料の数		1	1	2	3	2	6
距離 m		1,600	1,000	1,220	1,110	2,150	1,500
同一距離人力運搬費 円		17,500	12,500	14,100	13,700	21,300	13,200
比率 %		42.2	32.0	34.6	33.3	28.7	34.4

表−33　ショベル積込による機関車運搬実績表（土量 100 立米当り平均）

機関車	種類	ディーゼル機関車			ステイーム機関車					平均
	型式	4 t	7 t	平均	5 t	6 t	9 t	15 t	平均	
歩掛	石炭 t				0.950	0.735	0.380	0.718		
	軽油 l	40.0	30.97							
	モビール 〃	4.0	2.22		5.900	1.680	0.370			
	マシン油 〃		0.83			0.550		2.340		
	シリンダー油 〃	2.0	1.20		1.800	0.550	0.187	1.040		
	グリース kg	0.65	0.33		0.535		0.150			
	ボロ 〃							0.245		
	車軸油 l		2.90							
	ガソリン 〃									
	運転手 人	1,332	1,034		0.780	1.180	0.660	0.900		
	助手 〃	1,332	1,034		1.560	2.360	1.980	2.710		
	保線捨場人夫 〃	7,992	6,204		4.680	7.080	3.960	5.400		
経費	修理費 円	458	138							
	償却費 〃	313	468		525	940	690	734		
	工費 〃	4,386	3,295	3,840	6,716	7,139	4,157	5,598	5,902	5,212

資料の数	1	6	7	1	1	1	3	6	13
土運搬距離 m	1,000	1,550	1,275	1,500	1,800	1,000	2,730	1,760	1,600
同一距離人力経費 円	12,500	17,000	14,500	13,200	19,000	12,500	—	18,400	17,500
比率 %	35.1	19.4	27.3	50.9	37.6	33.2		41.9	35.2

表−34　ラダーエキスカー積込機関車土運搬実積表（土量 100 立米当り）

機関車	種類	ディーゼル機関車	スティーム機関車			平均
	型式	5 t	8 t	20t	6 t	平均	
歩掛	石炭 t		0.760	0.813	0.74		
	軽油 l	25.20	2.000				
	モビール 〃	2.40	2.140				
	マシン油 〃			1.540	3.15		
	シリンダー油 〃		0.581	0.972	2.30		
	グリース kg	0.90	0.884	0.267			
	車軸油 l						
	運転手 人	1.23	0.800	0.556	1.53		
	助手 〃	1.23	0.600	1.680	4.59		
	保線捨場人夫 〃	7.38	4.800	3.340	9.18		
経費	修理費 円	156					
	機械償却費 〃	397	948	618	940		
	工費 〃	3,648	6,355	5,865	8,485	6,902	6,088
資料の数		1	1	7	2	10	11
土運搬距離 m		1,800	2,000	3,200	1,800	2,330	2,200
同一距離人力経費 円		19,000	21,000	—	19,000	21,850	21,500
機械と人力との比率 %		18.4	30.2	—	44.8	37.5	31.2

以上は前述の如く資料の数が少いので必ずしも適当な数値を示しているものとは云えないが，人力積込と機械積込の場合の機関車土運搬の経費を比較する際に一般には機械積込に依る方が積込時間を短縮する事が出来て機関車の運搬回数が増大し作業経費を減少し得る如く考えられるが実績では人力積込の方が廉価である点は再考する必要がある．機械積込を行うには機関車，トロおよび軌条を充分に揃えて待合時間を短縮し，連続的に積込む様にすべきであろう．多少積込時間を短縮し得たとしても待合時間が長ければ何もならないので，連続作業を行つても能率の落ちない特色を生かすべきである．人力運搬費が余りに大きすぎる様であるがこれは遠距離人力運搬の不適合性を示しているのであつて，機関車運搬を行う程の距離を人力で運搬する事は無理であり，勾配其他の条件が加われば実際には不可能である．一応の比較をして見たゞけに止める．

〔6〕 機械掘さく，機関車運搬の場合の経費

以上に依つて各組合せによる掘さく，土運搬，捨土の総工費を算出すれば（表−35）の如くである．但し資料が少いので各機別に算出してもその意味を失うから単に平均値を用いる事にした．将来更に多数の資料が蒐

表—35

土運搬距離 (m)		2037	1600	1500	2200
機関車運搬積込	積込機械	手積	ショベル	ドラグライン	ラダー・エキスカ
	積込費	8,800.00	4,722.00	5,223.00	5,280.00
	運搬費	4,210.00	5,212.00	5,594.00	6,088.00
	工費	13,010.00	9,934.00	10,819.00	11,368.00
人力運搬積込	積込費	8,800.00	8,800.00	8,800.00	8,800.00
	運搬費	21,020.00	17,500.00	13,200.00	21,500.00
	工費	29,820.00	26,300.00	22,000.00	30,300.00
比率 %		43.6	37.7	49.1	37.5

集され，土運搬距離と作業経費との関係を検討し得れば各距離に応ずる最も経済的な組合せおよび其の経費を想定出来るものと考えられる．人力作業経費の過大なのは一般には人力で運ばぬ遠距離を運搬したと仮定したからである．

VI. あとがき

機械化施工は各方面の努力により日進月歩の勢にて発達し，其の成果も順次挙つて来ている．こゝに各機械の能率，故障状況，修理施設の比較検討，運搬距離，1循環速度と運土量の関係，土質と機械の問題等についても検討しなければならないのであるが，調査期間および資料の不足の為．未だ明らかに出来ないので今後引続き調査を続ける事によりその実状を把握して決定的なものを摑み度いと思う．

24 年度に於ける実績を通めて感じた事項を挙げると

(1) 経費の点では総ての現場で必ずしも人力施工より機械化施工の方が廉く出来たとは云えない．然しながら急速な施工に依つて災害を未然に防いだ事に思を致せば実に大なる効果を挙げ得た事は事実であり，将来効率の良い施工方法によつてもつと廉価で急速な施工を行い得る余地がある．

(2) 機械化施工法は着手してから未だ日が浅いので適正な使用方法が行われる迄には到らないが，半面人力施工ではなし得ない工事が機械化施工によつて実施され大なる効果を挙げた．

(3) 運営全般に渉つて不備の点が多く，機械が充分に駆使されていない．

(4) 年間能率が低い．

(5) 総経費の中で償却費の占める割合は 0.3～0.5 で非常に大きいから製作部面としては先づ製作価格の引下げを考えなければならない．

(6) 人員の増加，給与の増額，機械関係員の訓練教育をなお一層考えなければならない．

大体以上の様なものである．機械化施工に対して残された問題は多いが使用者側の直轄工事担当者も機械製作業者もなお一層研究して高度の発展に努力しなければならぬ．

漂砂に関する研究 (4)

浅水表面波について

建設技官　佐　藤　清　一

目　次

I. 緒　　言……(1)
II. 浅水表面波の解……(4)
〔1〕 波　　形……(4)
〔2〕 波　　速……(8)
III. 水分子の軌道……(9)
IV. 波の砕ける水深……(12)
V. 波のもつ運動量と波による流れ……(20)
VI. 結　　言……(26)

I. 緒　　言

始め，深水表面波について考えるに，

Gerstner (1802) の波は

$$x=a-r_0e^{-kc}\sin(ka-\sigma t)$$

$$z=c-r_0e^{-kc}\cos(ka-\sigma t)$$

$$k=\frac{2\pi}{\lambda},\quad \sigma=\frac{2\pi}{T},\quad \lambda=\text{波長},\quad T=\text{周期}$$

なる式[1]で表わされるが，この波には 2 つの不合理点が存在する．即ち，(1) 波高が最大となる限界に於ては波形は cycloid となり，波頂は剃刀の刃の様に鋭いものとなる．併し実際にはその様になる余程前に波頂は砕ける．又この限界に於ては波高と波長の比は $1/\pi$ となり，実際よりも極めて大き過ぎる．

(2) この波は明らかに廻転運動であるから，静止の状態からは発生しえない．もしこの波を起しうるとすれば

---

[1] 式の記号および座標の取り方については，佐藤清一：表面波の圧力分布について，土木試験所報告 69 号，(昭和 18 年 1 月) 2 頁を参照．

特別な力が必要である．今半波高 a が $1/k$ なる波について考えれば，

$$u'=ce^{2kb}$$

c＝波速，b＝水分子の廻転中心の縦距

なる速度で予め流体を波の進行とは逆の方向に運動させる様な力が働かねばならない．[2]

そしてこの様にして生じた廻転性の波は波の進行方向に運動量をもたない．

そこで Stokes (1846) および Rayleigh (1876) は非廻転運動としての波を求めた．[3]

$$\eta=\frac{1}{2}ka^2+a\cos k(x-ct)+\frac{1}{2}ka^2\cos 2k(x-ct)+\frac{3}{8}k^2a^3\cos 3k(x-ct)+\cdots\cdots$$

a＝半波高，$k=\frac{2\pi}{\lambda}$，λ＝波長，c＝波速，g＝重力の加速度

$$c^2=\frac{g}{k}(1+k^2a^2)$$

この波は一般に Stokes の波と呼ばれる．併しこの級数の収斂性については Stokes は證明していなかつたので，後になつて Levi-Civita (1925) がこれを證明した．

Levi-Civita の波は次式によつて表わされる [4]．但しこの場合には，x 軸は波頂に接してとり，y 軸は波頂から下向きにとつてある．

$$kx=\sigma+\mu\sin\sigma+\mu^2\sin 2\sigma+\frac{3}{2}\mu^3\sin 3\sigma+\mu^4\left(\frac{8}{3}\sin 4\sigma+\frac{1}{2}\sin 2\sigma\right)$$

$$+\mu^5\left(5.21\sin 5\sigma+\frac{19}{12}\sin 3\sigma\right)+\cdots\cdots$$

$$k\eta=\mu(1-\cos\sigma)+\mu^2(1-\cos 2\sigma)+\frac{3}{2}\mu^3(1-\cos 3\sigma)+\mu^4\left[\frac{8}{3}(1-\cos 4\sigma)+\frac{1}{2}(1-\cos 2\sigma)\right]$$

$$+\mu^5\left[5.21(1-\cos 5\sigma)+\frac{19}{12}(1-\cos 3\sigma)\right]+\cdots\cdots$$

但し　　$\sigma=ck=\frac{2\pi}{T}$，c＝波速，λ＝波長

a を波頂の静水面からの高さ，d を波谷の静水面よりの深さとするとき

$$\alpha=\frac{2\pi a}{\lambda}\ ,\ \delta=\frac{2\pi d}{\lambda}$$

とおき，μ は次の式から求められる．

$$\alpha-\delta=\mu^2+\frac{13}{3}\mu^4+\cdots\cdots$$

---

2) H.Lamb: Hydrodynamics, 1932, 422 頁.

3) Lamb: 417 頁.

4) H.Thorade: Probleme der Wasserwellen, 1931, 29, 30 頁.

波形を求めるには σ に 1°, 2°, ……, 360° と代入すればよく, δ は

$$\delta=\alpha-\alpha^2+\alpha^3-\frac{31}{12}\alpha^4+\frac{23}{4}\alpha^5+\cdots\cdots$$

から求められる. 又波速 c は

$$c=\sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi}}\sqrt{1+\alpha^2-\alpha^3+\frac{7}{4}\alpha^4-\frac{49}{12}\alpha^5+\cdots\cdots}$$

となつた.

Stokes (1880) は更に精しい式を求めた[5].

$$\eta=\cos t+a\cos k(x-ct)-\left(\frac{1}{2}ka^2+\frac{17}{24}k^3a^4\right)\cos 2k(x-ct)$$

$$+\frac{3}{8}k^2a^3\cos 3k(x-ct)-\frac{1}{3}k^3a^4\cos 4k(x-ct)+\cdots\cdots$$

$$c^2=\frac{g}{k}\left(1+k^2a^2+\frac{5}{4}k^4a^4+\cdots\cdots\right)$$

これらによつて求められる Stokes の波も Levi-Civita の波もトロコイド波に殆ど近い形である.

次に浅水表面波については古く Laplace の研究がある[6]. 波形は次式で表わされる正弦波であり, Laplace の正弦波と呼ばれるものである.

$$\eta=a\cos k(x-ct)$$

$$c^2=\frac{g}{k}\tanh kh \qquad h=\text{水深}$$

これは, 運動が無限に小さいとして取扱つているので正弦波となるのである. 又水分子軌道は

$$\bar{x}=a\frac{\cosh k(y+h)}{\sinh kh}\cos k(x-ct)$$

$$\bar{y}=a\frac{\sinh k(y+h)}{\sinh kh}\sin k(x-ct)$$

で表わされる閉じた楕円である.

次には Korteweg と de Vries (1895) の研究があり[7], 波形は次に示す楕円函数で表わされる. この波は Korteweg と de Vries の cn 波と呼ばれている.

$$\eta=Hcn^2\left(2k\cdot\frac{x}{\lambda}\right)$$

cn は Jacobi の楕円函数で, K は p を母数とする第一種楕円積分の完全積分である.

p は

---

5) Lamb, 419 頁.

6) Lamb, 366, 367 頁.

7) Thorade, 183, 184 頁.

$$\frac{\lambda}{h}\sqrt{\frac{H}{h}}=\frac{4K\rho}{\sqrt{3}}$$

より求められ，H は頂から谷までの波高，λ は波長，h は水深である．

この波の水分子軌道は楕円ではなく，上部に於て尖り，下部に於て扁平化した閉曲線である．

又この波は波長 λ の小さい時は Laplace の正弦波となり，λ が無限大となれば Boussinesq の孤立波となる．従つてこの波は，運動の無限に小さい正弦波から孤立波までを連結するものである．

波速 c は

$$c^2=gh\left\{1+\frac{a}{2\rho^2 h}\left(1-\frac{E}{K}\right)\right\}$$

によつて表わされる．こゝに E および K はそれぞれ第 2，第 1 種楕円積分の完全積分である．

以上をみるに，浅水表面波は非廻転運動でなければならず，運動は無限に小さいものではなく，而も水分子の軌道は Stokes の深水波の如く少しづゝ波の進行方向に前進する環状となるべきことが考えられるので，本稿に於ては，Rayleigh の方法に従つて Stokes の波を拡張し，その性質を研究せんとするものである．

II. 浅水表面波の解

〔1〕 波　　形

求めんとする波は，有限波高の波であり変形することなしに一定の速度 c を以て伝播するものとする．

然るときは Rayleigh の行つた様に，c なる速度を波の進行と逆の方向に加え合せばこの波は一定位置にとゞまることになる．従つて問題は表面が波状を呈した流れとなる．そこで流れの函数を ψ とし，運動は非廻転とするから速度ポテンシヤルϕをもち，これを φ とする．x 軸をこの流れの方向（即ち波の進行とは反対の方向）にとり，y 軸を波頂を通つて上向きにとり，x 方向の速度成分を u，y 方向のそれを v とすれば

$$\left.\begin{aligned}u&=-\frac{\partial\phi}{\partial x}=-\frac{\partial\psi}{\partial y}\\ v&=-\frac{\partial\phi}{\partial y}=\frac{\partial\psi}{\partial x}\end{aligned}\right\}\quad\cdots\cdots(1)$$

である．

水深を h とし

$$\left.\begin{aligned}\phi&=-cx+c\beta\cosh k(h+y)\sin kx\\ \psi&=-cy+c\beta\sinh k(h+y)\cos kx\end{aligned}\right\}\quad\cdots\cdots(2)$$

こゝに　$k=\dfrac{2\pi}{\lambda}$，　λ＝波長，　c＝波速

とおけば，底では

$$v_{y=-h}=-\left(\frac{\partial\phi}{\partial y}\right)_{y=-h}=0$$

となつて底の条件を満足し，又

$$\frac{\partial\phi}{\partial x}=\frac{\partial\psi}{\partial y},\quad \frac{\partial\phi}{\partial y}=-\frac{\partial\psi}{\partial x}$$

となるから，ϕ および ψ はそれぞれ Laplace の方程式を満足する．

そこで波形の式を求めるに，表面 $y=\eta$ に於ては $\psi=0$ であるから (2) により

$$\eta=\beta\sinh k(h+\eta)\cos kx \quad\cdots\cdots(3)$$

これが表面の波形の式である．

これは右辺にも η が入つているので逐次近似の方法で級数の形で求める．

$k\eta$ の値は既に小さいので $(k\eta)^3$ 以上の項を無視すれば (3) は

$$\eta=(\sinh kh+k\eta\cosh kh+\frac{k^2\eta^2}{2!}\sinh kh+\cdots\cdots)\beta\cos kx \quad\cdots\cdots(4)$$

となる．これの第 1 近似値は

$$\eta=\beta\sinh kh\cdot\cos kx$$

である．これを (4) 代入すれば第 2 近似値は

$$\eta=\beta\sinh kh\cdot\cos kx+k\beta^2\cosh kh\cdot\sinh kh\cdot\cos^2 kx$$

$$+\frac{1}{2}k^2\beta^3\sinh^3 kh\cdot\cos kx+\cdots\cdots$$

となる．これを更に (4) 式の右辺に代入すれば $(k\beta)^2$ までの式として次のものがえられる．

$$\eta=\frac{1}{2}k\beta^2\cosh kh\cdot\sinh kh$$

$$+\left\{\beta\sinh kh+\frac{3}{4}k^2\beta^3(\sinh kh+\frac{3}{2}\sinh^3 kh)\right\}\cos kx$$

$$+\frac{1}{2}k\beta^2\cosh kh\cdot\sinh kh\cdot\cos 2kx$$

$$+\frac{1}{4}k^2\beta^3(\sinh kh+\frac{3}{2}\sinh^3 kh)\cos 3kx+\cdots\cdots \quad\cdots\cdots(5)$$

こゝで

$$a=\beta\sinh kh\left\{1+\frac{3}{4}k^2\beta^2(1+\frac{3}{2}\sinh^2 kh)\right\} \quad\cdots\cdots(6)$$

とおけば

$$\frac{1}{2}k\beta^2\cosh kh\cdot\sinh kh=\frac{1}{2}k(\beta\sinh kh)^2\coth kh$$

$$\fallingdotseq\frac{1}{2}ka^2\cdot\coth kh$$

$$\frac{1}{4}k^3\beta^3(\sinh kh+\frac{3}{2}\sinh^3 kh)=\frac{1}{4}k^3\beta^3\sinh^3 kh\left(\coth^2 kh+\frac{1}{2}\right)$$

$$\fallingdotseq\frac{1}{4}k^3a^3\left(\coth^2 kh+\frac{1}{2}\right)$$

となるから (5) は

$$\eta=\frac{1}{2}ka^2\coth kh+a\cos kx+\frac{1}{2}ka^2\coth kh\cdot\cos 2kx$$
$$+\frac{1}{4}k^2a^3\left(\coth^2 kh+\frac{1}{2}\right)\cos 3kx+\cdots\cdots \quad\cdots\cdots(7)$$

となり，波形は円函数の倍周期函数の和で与えられることになる．ここに a は，厳密には半波高ではないが，殆どそれに等しい．実用には数パーセントの差しかないので．a を以て半波高として差支えない．水深が極めて大きい場合には，$kh\to\infty$，従つて $\coth kh\to 1$ となるから (7) は

$$\eta=\frac{1}{2}ka^2+a\cos kx+\frac{1}{2}ka^2\cos 2kx+\frac{3}{8}k^2a^3\cos 3kx+\cdots\cdots \quad\cdots\cdots(8)$$

となり，Stokes 又は Rayleigh の求めたものに一致する．

(7) 式は定常流の波形の式である．c なる速度で x の正の方向に進行する波は

$$\eta=\frac{1}{2}ka^2\coth kh+a\cos k(x-ct)+\frac{1}{2}ka^2\coth kh\cdot\cos 2k(x-ct)$$
$$+\frac{1}{4}k^2a^3\left(\coth^2 kh+\frac{1}{2}\right)\cos 3k(x-ct)+\cdots\cdots \quad\cdots\cdots(9)$$

であることが容易にわかる．

この波の第 1 成分波の波長は λ，第 2 成分波の波長は $\lambda/2$，第 3 成分波の波長は $\lambda/3$，……であり，いづれも偶函数であるので，波全体としての波長は λ である．

又波の山は，$t=0$ についていえば，$x=0,\ \pm\lambda,\ \pm 2\lambda,\cdots\cdots$ で起り，波の谷は $x=\pm\lambda/2,\ \pm 1\frac{1}{2}\lambda,\ \pm 2\frac{1}{2}\lambda,\cdots\cdots$ で起り，η の x 軸よりの最大値 η_{max} および最小値 η_{min} はそれぞれ次の如くになる．

$$\left.\begin{aligned}\eta_{max}&=a+ka^2\coth kh+\frac{1}{4}k^2a^3\left(\coth^2 kh+\frac{1}{2}\right)+\cdots\cdots\\ \eta_{min}&=-a+ka^2\coth kh-\frac{1}{4}k^2a^3\left(\coth^2 kh+\frac{1}{2}\right)+\cdots\cdots\end{aligned}\right\}\quad\cdots\cdots(10)$$

従つて波高の中分面は x 軸より上にあり，$y=0$ からの上り高 d は，

$$d=ka^2\coth kh \quad\cdots\cdots(11)$$

にほゞ等しい．

次に，この波の平均面即ち静水面は $y=0$ より δ だけ上にあり

$$\delta=\frac{1}{\lambda}\int_0^\lambda\eta dx$$

によつて計算される．その結果は

$$\delta=\frac{1}{2}ka^2\coth kh \quad\cdots\cdots(12)$$

となり，(7) 式又は (9) 式の右辺の第 1 項に等しい．即ち，この波は $y=0$ なる x 軸より (12) 式の δ だけ上にあることがわかる．従つて h は厳密には水深ではなく，$h+\delta$ とすべきである．h が大きい場合には h を以て水深としても殆ど差支えがないが，特に水深の小なる場合，而も波高が水深に比較されうる大さである

場合には，δ を考慮に入れなければならない．

次に楕円トロコイド波との比較をしてみるに，トロコイド波の計算では原点の位置を静水面より $\frac{1}{2}ka^2\coth kh$ だけ上方にとつてある[8] のに反し，この波の場合には $\frac{1}{2}ka^2\coth kh$ だけ下方にとられている．

又トロコイド波では波高は $2a$ であるが，この波では

$$2a+\frac{1}{2}k^3a^3\left(\coth^2 kh+\frac{1}{2}\right)$$

である．

更に又静水面より波頂および波底までの高さは，トロコイド波の場合にはそれぞれ

$$a+\frac{1}{2}ka^2\coth kh$$

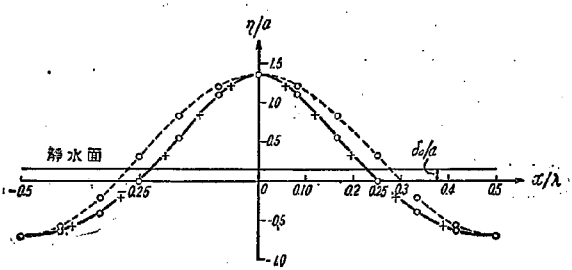
$$a-\frac{1}{2}ka^2\coth kh$$

であるが，この波の場合にはそれぞれ

$$a+\frac{1}{2}ka^2\coth kh+\frac{1}{4}k^3a^3\left(\coth^2 kh+\frac{1}{2}\right)$$

$$a-\frac{1}{2}ka^2\coth kh+\frac{1}{4}k^3a^3\left(\coth^2 kh+\frac{1}{2}\right)$$

である．



図—1

実線は筆者の計算した無渦の理論波，破線は Laplace の正弦波．＋は楕円トロコイド波

(分り易いために高さを拡大してある)

最後に，この波と楕円トロコイド波と Laplace の正弦波の 3 波の波形を比較すると，表—1 および図—1 の如くであり，この波は Laplace の波に比して，波頂部で尖り波谷部で平らになつて著しい差が認められるが，楕円トロコイド波との差は殆ど認め難い．但しこの図は

$2a/\lambda=1/15$, $h/\lambda=1/8$

即ち

$ka=\pi/15$, $kh=\pi/4$

8) 前掲註 (1), 5 頁.

表−1

無渦の理論波		Laplace の波		楕円トロコイド波	
x/λ	η/a	x/λ	η/a	x/λ	η/a
6/12	−0.7116	6/12	−0.7116	0.500	−0.7116
5/12	−0.6265	5/12	−0.5735	0.390	−0.5735
4/12	−0.3892	4/12	−0.1962	0.288	−0.1962
3/12	0	3/12	0.3193	0.193	0.3193
2/12	0.5489	2/12	0.8349	0.121	0.8349
1/12	1.1055	1/12	1.2121	0.057	1.2121
0	1.3503	0	1.3503	0	1.3503
−1/12	1.1055	−1/12	1.2121	−0.057	1.2121
−2/12	0.5489	−2/12	0.8349	−0.121	0.8349
−3/12	0	−3/12	0.3193	−0.193	0.3193
−4/12	−0.3892	−4/12	−0.1962	−0.288	−0.1962
−5/12	−0.6265	−5/12	−0.5735	−0.390	−0.5735
−6/12	−0.7116	−6/12	−0.7116	−0.500	−0.7116

なる場合を示したものであり，表−1 は Laplace の波，楕円トロコイド波を，共に今求めた理論波の坐標軸に合わせたものである．

〔2〕 波　　速

非廻転運動の定常流では運動の方程式は

$$\frac{p}{\rho}=\text{const}-\frac{1}{2}\left\{\left(\frac{\partial\phi}{\partial y}\right)^2+\left(\frac{\partial\phi}{\partial y}\right)^2\right\}-gy$$

である．こゝに

p=圧力

ρ=流体の密度

g=重力の加速度

これに (2) 式を代入すれば

$$\frac{p}{\rho}=\text{const}-gy-\frac{c^2}{2}\Big\{1-2k\beta\cosh(h+y)\cos kx$$

$$+k^2\beta^2\cosh^2k(h+y)\cos^2kx+k^2\beta^2\sinh^2k(h+y)\sin^2kx\Big\}$$

となる．

表面 $y=\eta$ では (2) 式により

$$\eta=\beta\sinh k(h+\eta)\cos kx$$

であるから上式は

$$\frac{p}{\rho}=\text{const}-g\eta+c^2k\eta\coth k(h+\eta)-\frac{k^2c^2}{2}\left\{\frac{\eta^2}{\sinh^2k(h+\eta)}+\beta^2\sinh^2k(h+\eta)\right\}=0$$

となる．これは $(k\eta)^3$ 以上の項を 1 に対して無視すれば，

$$\frac{p}{\rho}=\text{const}+(c^2k\coth kh-g)\eta-\frac{c^2k^2\eta^2}{2}(2\sinh^2kh+\operatorname{cosech}^2kh)=0$$

表面 $y=\eta$ では $p=\text{const}$ とすると c を適当に選ぶことによつて

$$(c^2k\coth kh-g)\eta-\frac{1}{2}c^2k^2\eta^2(2\sinh^2kh+\operatorname{cosech}^2kh)=0$$

でなければならない．これは $(k\eta)^2$ の項を無視すれば，近似的に

$$c^2=\frac{g}{k}\tanh kh \qquad \cdots\cdots(13)$$

とすることによつて満足する．故に波速は (13) 式によつて近似的に与えられる．

III. 水分子の軌道

(9) 式によつて表わされる波の，水中の任意の点 (x,y) に於ける流速成分 u，v は，(2) 式により

$$\left.\begin{aligned}u&=ck\beta\cosh k(h+\eta)\cos k(x-ct)\\ v&=ck\beta\sinh k(h+\eta)\sin k(x-ct)\end{aligned}\right\} \qquad \cdots\cdots(14)$$

である．

水表面 $y=\eta$ に於ては

$$\sinh k(h+\eta)=\frac{\eta}{\beta\cos k(x-ct)}$$

$$\therefore\quad \cosh k(h+\eta)=\sqrt{1+\frac{\eta^2}{\beta^2\cos^2k(x-ct)}}$$

又 (6) 式により

$$\beta=\frac{a}{\sinh kh}$$

とすることが出来るから u は

$$u=ck\sqrt{\frac{a^2\cos^2k(x-ct)}{\sinh^2kh}+\eta^2}$$

となる．そこでこれに (9) 式を代入し $(ka)^3$ 以上を 1 に対して無視すれば

$$u=cka\coth kh\cos k(x-ct)\left[1+2ka\tanh kh\cos k(x-ct)\right.$$

$$\left.+\frac{1}{2}k^2a^2\left\{(3+\tanh^2kh)\cos k(x-ct)-\frac{1}{2}\tanh^2kh\right\}\right]^{\frac{1}{2}}$$

となる．こゝで更に右辺の括弧内を展開し，$(ka)^3$ 以上を 1 に対して無視すれば

$$u=cka\coth kh\cos k(x-ct)\left\{1+ka\tanh kh\cos k(x-ct)\right.$$
$$\left.+\frac{3}{4}k^2a^2\left\{\cos 2k(x-ct)-\frac{1}{2}\tanh^2 kh\right\}\right\}$$

となる．

そこで ξ を以て水分子の x 方向の坐標とすれば，

$$\xi=\int\frac{u}{ck}\,d(x-ct)$$

である．故に

$$\xi=a\coth kh\int\left\{1+ka\tanh kh\cos k(x-ct)\right.$$
$$\left.-\frac{3}{4}k^2a^2\left\{\frac{1}{2}\tanh^2 kh-\cos 2k(x-ct)\right\}\right\}\cos k(x-ct)\cdot d(x-ct)$$

そこで $t=0$ の時に波頂に位置する水分子について考えれば，上式を積分して

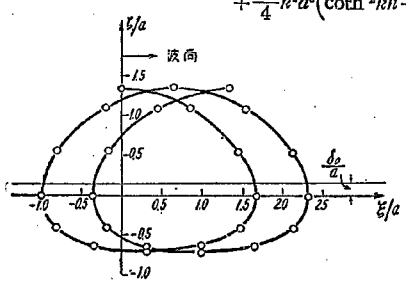
$$\xi=a\coth kh\left\{-\frac{1}{2}k^2a(x-ct)\tanh kh+\left(1-\frac{3}{8}k^2a^2\sinh^2 kh\right)\sin k(x-ct)\right.$$
$$\left.+\frac{1}{4}ka\tanh kh\sin 2k(x-ct)+\frac{1}{8}k^2a^2\sin 3k(x-ct)\right\}\quad\cdots\cdots\cdots(15)$$

となる．次にこの水分子の y 軸方向の坐標 ζ を求めるに，一度表面を形成した水分子は何時までもその面上になければならぬから，

$$v=\frac{d\eta(kx-kct)}{dt}$$

であり，従つて ζ は η に等しい．即ち

$$\zeta=-\frac{1}{2}ka^2\coth kh+a\cos k(x-ct)+\frac{1}{2}ka^2\coth kh\cos 2k(x-ct)$$
$$+\frac{1}{4}k^2a^2\left(\coth^2 kh+\frac{1}{2}\right)\cos 3k(x-ct)\quad\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(16)$$



図−2

故にこの波の水分子の運動の軌道の方程式は (15) 式と (16) 式から $k(x-ct)$ を消去すれば求められる．

軌道を図にかくには，(15) (16) 両式に於て

$$k(x-ct)=0°,\ 1°,\ 2°,\ \cdots\cdots,\ 360°$$

とおけばよい．

図−2 および表−2 は前章と同じく

$$\frac{2a}{\lambda}=\frac{1}{15},\quad \frac{h}{\lambda}=\frac{1}{8}\quad \left(ka=\frac{\pi}{15},\ kh=\frac{\pi}{4}\right)$$

なる場合についての水表面分子の軌道である．この図を見れば，軌道は楕円トロコイド又は前記の Laplace の波や Korteweg-de Vries の *cn* 波の如き閉じた曲線とはならず，進行方向にずれた環状曲線となることがわかる．このことは (15) 式を見ても明らかである．しかも軌道の形は楕円的ではなく，上部に於て尖り下部に於て扁平化した栗の実状となる．

表— 2

$\frac{\xi}{a}$	$\frac{\zeta}{a}$
0	1.3503
0.8638	1.1055
1.4631	0.5489
1.6667	0
1.4822	−0.3892
0.9924	−0.6265
0.3289	−0.7116
−0.3346	−0.6265
−0.8249	−0.3892
−1.0087	0
−0.8052	0.5489
−0.2059	1.1055
0.6580	1.3503

実際の水分子軌道の研究は極めて少い．Kohlschütter は観測船"Planet"号から実体写真でとらえた波形について水分子軌道を研究し，それが楕円とならずに栗の実状となることを図式で示しており，浅水波の場合についてもこの様なものになるであろうといつている[9]．又 de Caligny (1878) は長さ 29.7 m，巾 50 cm，水深 47 cm の水路で波高約 6 cm，波長 130 cm の波を起して研究した結果，水分子の軌道は近似的には楕円であるが完全に閉じたものではなかつたと報告している[10]．

又 Ahlborn (1909) は水中に鋸屑を沢山浮べて分子軌道の写真（約 1/2 周期の露出時間）を撮つたが[11]，これをみると分子軌道は明らかに上部に於て尖り下部に於て扁平となつていることがわかる．但し露出時間が一周期に満たぬために，分子軌道のずれがわからないのは残念である．併し，de Caligny の実験結果と Ahlborn の実験結果とを合せ考えれば本章に於て計算された分子軌道は正しいものであることが実証される．

なお Korteweg-de Vries の *cn* 波なる浅水波に於ては，分子軌道は上部で尖り下部で扁平となるが，閉ぢた曲線となり水分子は前進しない[12]．

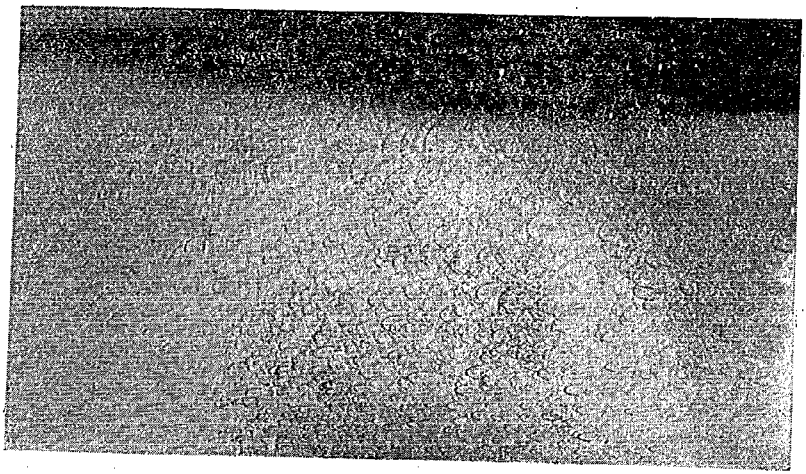
---

9) Thorade, 26, 27 頁.

10) Thorade, 189 頁; de Caligny: Expériences sur les mouvements des molécules liquides des ondes courantes, considérées dans leur mode d'action sur la marche des navires. Comptes Rendus, LXXXVII, 1019～1029頁.

11) Fr. Ahlborn: Die Widerstandsvorgänge an Platten und Schiffskörpern. Die Entstehung der Wellen. Jahrb. Schiffbautechn. Gesellsch., 370～431 頁; Thorade, 190 頁.

12) Thorade, 184 頁.



F. Ahlborn によつて撮影された浅水表面波の水分子軌道．露出時間は約 1/2 周期．写真の左半分と右半分とを組合せて考えれば，分子軌道は図—2 の如きものであることがわかる．

IV. 波の砕ける水深

$2a/\lambda$ の値の大きな波ほど高い波といえる．波の高さが何程に迄しうるものであるかは，$2a/\lambda$ の値が何程大きくなりうるかの問題である．高い波では波頂の水分子の速度も大であるが，これは波の伝播速度をこえることは出来ない．これを以て波の高まりうる限界とすることが出来る．

波の中の任意の点 (x, y) の速度は (14) 式で与えられる．波頂に於ては $\sin k(x-ct)=0$ であるから $v=0$ であり，x 方向の速度 u のみとなる．即ち波頂に於ける水分子の速度は

$$u=ck\beta\cosh k(h+\eta)$$

これを $k\eta$ について展開して $k^2\eta^2$ の項までをとり

$$\eta=a+ka^2\coth kh+\frac{1}{4}k^2a^3\left(\coth^2 kh+\frac{1}{2}\right)$$

$$\eta^2=a^2+2ka^3\coth kh+k^2a^4\left(\frac{3}{2}\coth^2 kh+\frac{1}{2}\right)$$

$$\beta\fallingdotseq\frac{a}{\sinh kh}$$

を代入すれば u は

$$u=cka\{\coth kh+ka+\frac{3}{2}k^2a^2\coth kh\}$$

となる．

そこで波高が最大になる限界，即ち波頂の砕ける限界は

$$u=c$$

であるから

$$1=ka\coth kh\{1+ka\tanh kh+\frac{3}{2}k^2a^2\}$$

こゝに於て更に $(ka)^3$ 以上を 1 に対して無視すれば

$$ka=\tanh kh-ka\tanh^2 kh-k^2a^2\tanh kh\left(\frac{3}{2}-\tanh^2 kh\right) \quad \cdots\cdots(17)$$

となる．この ka についての 2 次式を解けば，

$$ka=\frac{\left(1+8\tanh^2 kh-3\tanh^4 kh\right)^{\frac{1}{2}}-(1+\tanh^2 kh)}{(3-2\tanh^2 kh)\tanh kh} \quad \cdots\cdots(18)$$

を得る．但し右辺分子第 1 項の符号については，この項は如何なる kh についても正でなければならぬから正を取る．

(17) によれば，ka の第 1 次近似値として右辺の第 1 項のみをとれば

$$ka=\tanh kh \quad \cdots\cdots(19)$$

となり，楕円トロコイドの場合に一致する．[13]

又 (18) 式によれば，水深が極めて大きい場合には $\tanh kh=1$ であるから

$$ka=\sqrt{6}-2=0.4495 \quad \cdots\cdots(20)$$

従つて

$$\frac{2a}{\lambda}=\frac{\sqrt{6}-2}{\pi}=0.14308\fallingdotseq\frac{1}{7} \quad \cdots\cdots(21)$$

となり Michell の計算した限界に一致する．[14]

一方静水面の x 軸からの上り高 δ は (12) 式により

$$\delta=\frac{1}{2}ka^2\coth kh$$

である．従つてこれは，水深の小さいほど，又波高の大きいほど大である．そして波の砕ける限界では (18) 式により

$$\delta=\frac{a}{2}\frac{\left(1+8\tanh^2 kh-3\tanh^4 kh\right)^{\frac{1}{2}}-(1+\tanh^2 kh)}{(3-2\tanh^2 kh)\tanh^2 kh} \quad \cdots\cdots(22)$$

---

[13] 佐藤清一：漂砂に関する研究 (1)，土木研究所報告，79 号，125 頁 (昭和 25 年 3 月)

[14] 前掲註，125 頁．

となる．これは水深の極めて大きい場合には

$$\delta=\frac{\sqrt{6}-2}{2}a \qquad \cdots\cdots(23)$$

となり，水深の極めて小さい場合には

$$\delta=\frac{a}{2} \qquad \cdots\cdots(24)$$

となり，後者は楕円トロコイドの場合に一致する．[15] 従つて波高が大きくなつて波頂が砕けるに至る限界に於ては δ はかなり大きい値となり無視することが出来ない．

故に (18) 式の kh は δ なる量を考慮に入れて

$$kh=k(H-\delta) \qquad \cdots\cdots(25)$$

としなければならない．こゝに H は波が砕けようとするところの，静水面より測つた水深，即ち波の砕ける水深である．

上式により

$$\frac{H}{2a}=\frac{1}{2}\frac{kh}{ka}+\frac{1}{4}ka\coth kh \qquad \cdots\cdots(26)$$

を得る．これが即ち波の砕ける相対水深である．

水深が極めて深い場合には $ka=\sqrt{6}-2$ なる有限値であるから

$$\frac{H}{2a}=\infty$$

となり，水深が極めて浅い場合には $kh/ka=1$, $ka\coth kh=1$ となるから

$$\frac{H}{2a}=\frac{3}{4} \qquad \cdots\cdots(27)$$

となる．これは $H/2a$ の最小値である．

任意の水深に対する $H/2a$ の値は (26) 式と (18) 式と (25) 式とから繰返し近似の方法で求められる．

表−3 は任意の kh に対して (18) 式により ka を計算し (2 の欄)，この ka を用いて (26) 式により $H/2a$ を計算し (7 の欄)，これと ka から求められる $2a/\lambda$ (3 の欄) とから H/λ を計算したものである (6 の欄)，又 h/λ は kh の値から容易に求められる．

$H/2a$ と $2a/\lambda$ との理論式を求めることは困難であるので，これを図で示せば 図−4 の曲線の如くである．図−3 には H/λ と $2a/\lambda$ との関係で示してある．

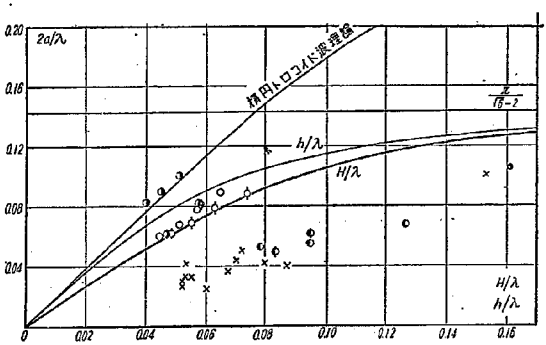
図−3 は h/λ と $2a/\lambda$, H/λ と $2a/\lambda$, および楕円トロコイド理論による h/λ と $2a/\lambda$ の関係を比較した

---

[15] 佐藤清一：漂砂に関する研究 (2)，土木研究所報告，79 号，153 頁．(昭和 25 年 3 月)

表—3

1	2	3	4	5	6	7	8
kh	ka	$2a/\lambda$	$\lambda/2a$	h/λ	H/λ	$H/2a$	$H/2a$
0	0	0	∞	0	0	0.75	0.75
0.1	0.0969	0.0308	32.47	0.0159	0.0234	0.768	0.768
0.2	0.1742	0.0554	18.05	0.0318	0.0440	0.790	0.793
0.3	0.2454	0.0781	12.80	0.0478	0.0642	0.822	0.831
0.4	0.2934	0.0934	10.71	0.0637	0.0817	0.875	0.876
0.5	0.3288	0.1047	9.55	0.0796	0.0982	0.938	0.933
0.6	0.3536	0.1126	8.88	0.0955	0.1141	1.013	0.998
0.7	0.3728	0.1187	8.43	0.1114	0.1293	1.093	1.077
0.8	0.3876	0.1234	8.10	0.1274	0.1454	1.178	1.171
0.9	0.3991	0.1270	7.87	0.1433	0.1609	1.267	1.280
1.0	0.4082	0.1299	7.70	0.1592	0.1765	1.359	1.411



図—3

 もので，これにあわせて荒木博士による観測，[16] Larras [17] による観測値を記入した．

これによると，楕円トロコイド理論よりもはるかによく観測値と一致することがわかり，又 h/λ の曲線よりも h を補正した（即ち δ の大さを考慮に入れた）H/λ の曲線の方がよりよく観測値と一致することがわかる．図中，× は荒木博士による観測値，丸点は Larras による観測値であり，丸点の内（向つて）右半黒丸，白丸，左半黒丸の点は滑らかな底に於て底勾配がそれぞれ 1/5, 1/10, 1/20 の場合のものである．又これ等 3 種の丸点に縦棒を附加えたものは底面が粗で底勾配がそれぞれ 1/5, 1/10, 1/20 の場合のものである．

16) 荒木文四郎：砂浜に於ける港灣修築と漂砂との関係について，土木学会誌，12 巻，6 号，1155頁．

17) M.J.Larras: Le deferlement des lames sur les jetées verticales. Annales des Ponts et Chaussées, Mai, 1937.

なお図−3 中の黒点は Helgoland で撮られた実体写真[18] からとつたもので

$$H=10\,\mathrm{m},\quad 2a=6.55\,\mathrm{m},\quad \lambda=62\,\mathrm{m}$$

$$\frac{2a}{\lambda}=0.1057,\quad \frac{H}{\lambda}=0.1613$$

表−4

Larras			荒木	
勾配	$2a/\lambda$	H/λ	$2a/\lambda$	H/λ
1/5 滑	0.083	0.0406	0.1	0.153
	0.090	0.0450	0.0334	0.0529
	0.100	0.0510	0.0415	0.0800
1/10 滑	0.060	0.0444	0.0502	0.0720
	0.068	0.0510	0.0334	0.0526
	0.078	0.0569	0.0334	0.0549
	0.089	0.0649	0.0266	0.0519
1/20 滑	0.053	0.0784	0.0250	0.0595
	0.055	0.0946	0.0443	0.0700
	0.068	0.1264	0.0374	0.0665
1/5 粗	0.062	0.0471	0.0415	0.0525
	0.081	0.0583	0.0300	0.0518
	0.082	0.0574	0.0400	0.0871
1/10 粗	0.062	0.0483		
	0.069	0.0552		
	0.079	0.0631		
	0.089	0.0738		
1/20 粗	0.050	0.0835		
	0.062	0.0948		

波形からみて砕ける限界に極めて近いと思われるので参考までに入れたものである．

この外 Stevenson, Gaillard の観測がある[19] が $2a/\lambda$ との関係が詳らかでないので図−3の理論曲線と比較することが出来ないが，$H/2a$ の範囲は一般に 0.8～2.0 にあり[20]，$2a/\lambda$ として最もよく見うけられる 0.03～0.135 の範囲に対して理論曲線図−4 からは $H/2a=0.77\sim1.7$ が与えられることを考えれば，こゝに求められた理論曲線は正しいものであるといえる．併しこゝに求められた理論曲線は底が水平の場合を取扱つており，又波形は不変であると仮定している．実際には底には勾配があり，波形も変化ししかも波の前後の形が対称でなくなるのであるから，そのための差は当然なければならない．

しかもその一方風の影響も加わるものであるから，観測そのものの明確さという点に於てもかなりの困難がある筈である．それにもかゝわらず，理論的に求めた結果がこの程度に観測と一致することは筆者の予期以上のものである．

$H/2a$ と $2a/\lambda$ についての理論式を求めることは前述のようになかなか困難であり，又求められたとしてもその形は極めて複雑である．そこでこれをよく代表しうる近似式を求めておくことが便利である．

図−4 をみて直ちにわかる如く，この理論曲線は $2a/\lambda=0$ で $H/2a=0.75$ の点を通り，$2a/\lambda$ の小さい間は $H/2a$ は $2a/\lambda$ に直線比例し，$2a/\lambda$ の増すに従つて $2a/\lambda=\dfrac{\sqrt{6}-2}{\pi}$ を漸近線とする．それ故近似式として

18) Eckhardt: Erfahrungen über Wellenwirkung beim Bau des Hafens in Helgoland Jahrbuch der Hafenbautechnishen Gesellschaft, Bd. 12, 1930/1931, 附図−4 および 5

19) 脚註 (13), 134 頁.

20) 脚註 (13), 134 頁.

は

$$\frac{H}{2a}=\frac{3}{4}+\frac{n\frac{2a}{\lambda}}{\frac{\sqrt{6}-2}{\pi}-\frac{2a}{\lambda}}$$

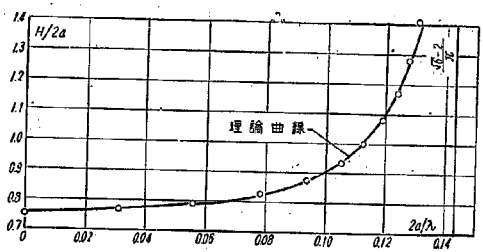
なる形が適していることが容易にわかる.

そこでこの形を用い，表−3 に示した理論値 (3 の欄と 7 の欄) によつて n の値を定めると $n=0.0672$ となる．即ち近似式は

$$\frac{H}{2a}=\frac{3}{4}+0.067\frac{\frac{2a}{\lambda}}{\frac{1}{7}-\frac{2a}{\lambda}} \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(28)$$

となる.

いまこの近似式の精度を検討するために，表−3 の 3 の欄に示した $2a/\lambda$ を用いて (28) 式により $H/2a$ の値を計算し，理論値と比較すれば表−3 の 7 および 8 の欄 (7 の欄が理論値で 8 の欄が近似式 (28) による計算値) の如くで，近似式 (28) は充分な精度をもつていることがわかる. 図−4 の白点は (28) による計算値である.



図−4 白点は近似式 (28) による計算値

以上の結果をみると

1) 低い波ほど浅いところで砕け
2) 高い波ほど深いところで砕ける
3) 砕ける相対水深 $H/2a$ には最小値があり 3/4 である.
4) 水深が極めて大きい場合には $H/2a$ は 1/7 になる.

ことがわかる.

次に沖の水深 h のところで観測された波高 $2a$，波長 λ なる波は岸の如何なる水深に於て砕けるべきかという問題が起る.

今波のエネルギー E を

$$E=\frac{1}{8}\gamma(2a)^2\lambda$$

を以て表わし，波が伝播する間の摩擦損失は極めて少いのでこれがないものとすれば，水深 h' のところで生ずべき波高 $2a'$ は

$$a^2\lambda = a'^2\lambda'$$

により

$$2a' = 2a\left(\frac{\lambda}{\lambda'}\right)^{\frac{1}{2}} \quad \cdots\cdots(29)$$

但し λ' は波高 $2a'$ の波の波長である.

更に又波の周期には余り変化が起らないから[21]

$$T = T'$$

とすれば (13) 式により

$$\frac{2\pi\lambda}{g}\coth\frac{2\pi h}{\lambda} = \frac{2\pi\lambda'}{g}\coth\frac{2\pi h'}{\lambda'}$$

$$\therefore \frac{\lambda'}{\lambda} = \coth\frac{2\pi h}{\lambda}\tanh\frac{2\pi h'}{\lambda'} \quad \cdots\cdots(30)$$

併し沖といえども h/λ の値は既に小さいのが通常であるから (30) 式は

$$\frac{\lambda'}{\lambda} = \left(\frac{h'}{h}\right)^{\frac{1}{2}} \quad \cdots\cdots(31)$$

としても充分である.

故に (29) 式と (31) 式とから

$$2a' = 2a\left(\frac{h}{h'}\right)^{\frac{1}{4}} \quad \cdots\cdots(32)$$

となる. 従つて

$$\frac{2a'}{\lambda'} = \frac{2a}{\lambda}\left(\frac{h}{h'}\right)^{\frac{3}{4}} \quad \cdots\cdots(33)$$

をうる.

そこで波が砕けるところの水深を H とし, 砕け波の波高を $2a'$ とすれば, (33) 式および (32) 式を (28) 式に代入し

$$\left(\frac{H}{h}\right)^{\frac{5}{4}} - \frac{14a}{\lambda}\left(\frac{H}{h}\right)^{\frac{5}{4}} - \frac{3a}{2h}\left(\frac{H}{h}\right)^{\frac{3}{4}} + 19.124\frac{a^2}{\lambda h} = 0 \quad \cdots\cdots(34)$$

なる式がえられる. これによつて, 沖の水深 h に於ける波 (波高 $2a$, 波長 λ) が岸に寄せてきて砕けるべき水深 H を計算することが出来る.

次に例を以てこれを示すことにする.

新潟県岩船港を中心とした海岸線延長約 11 km の範囲におよぶ航空写真の一枚を手に入れることができた.

---

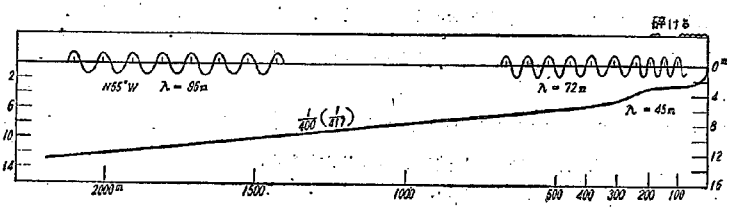
[21] 前掲註 (15), 150 頁.

これによると，撮影の年月日は昭和 22 年 11 月 13 日で，時刻は午前 10 時前後と推定される．海面の波は岸から数 km に至るまでかなり明瞭に認められ，その方向は約 N 55°W である．

これに対し新潟管区気象台の風の記録を調べてみると，11 日 10 時頃から風が吹き始め同日 17 時頃までに風速は 10 m/sec の程度に達し，風向は風の吹き始めの 10 時頃に S（陸風）であつたのが 10 m/sec 台に達した 17 時頃には WNW となつて海風となり，以後 12 日の 14 時頃まで WNW 乃至 N の方向に於て 5～16 m/sec の強風が吹き続けた．その後は風速は 3 m/sec 台におち，撮影したと推定される 13 日 10 時頃に於ても 3 m/sec の程度である．

即ち，この波を起すのに役立つた風は 10日 15 時の W から 12 日 19 時の N までの 29 時間で，毎時観測の回数からいふと SW が 1 回，W が 2 回，WNW が 15 回，NW が 5 回，N が 6 回である．従つてその平均風向は N 53.5°W となり波の方向と殆ど一致する．これに対し風速は 4 m/sec から最大 16.3 m/sec にまでおよび，その平均値は 10.3 m/sec である．

一方海図および深浅測量による海岸の縦断形状は図－5 の如くで，岸から約 2000 m のところの水深は約 12 m，これより約 1/400 の勾配で浅くなり，岸から 500 m のところでは水深約 6 m，200 m のところでは約 3 m となつている．



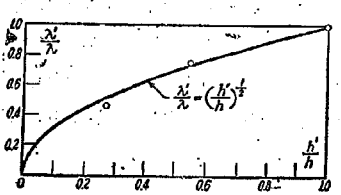
図－5

そこで航空写真とこの縦断とから調べてみると岸からの距離と水深と波長とは表－5 の如くである．

そこで先づ水深と波長との関係が (31) 式のような関係があるかどうかを調べてみると表－5 の計算値の欄および図－6 の如くで，(31) 式のほゞ正しいことがわかる．

表－5

距離 (m)	水深 h (m)	波長 λ (m)	$\frac{h'}{h}$	$\frac{\lambda'}{\lambda}$	計算値 $\frac{\lambda'}{\lambda}$
	視測値				
1700	11	96	1	1	1
500	6	72	0.55	0.75	0.74
200	3	45	0.27	0.47	0.52



図－6

以上により観測値としては

$$h=11\,\mathrm{m},\ \lambda=96\,\mathrm{m}$$

であるが，航空写真からは波高がわからない．そこでこれは風速から推定することにする．風速と波高との関係は陸岸附近では

$$2a=0.233\,V$$

但し V=風速 (m/sec)

とすることが出来る[22]ので，V=10m/sce として波高を求めれば，

$$2a=2.3\,\mathrm{m}$$

と推定することが出来る．これは航空写真に於ける陰影から考えてもこの程度のものであろうと推定され，決して常識を離れた値ではない．

これらの h, λ, $2a$ の値を (34) 式に代入すれば

$$x^8-0.1677x^5-0.1565x^3+0.02395=0$$

但し $\quad x=\left(\frac{H}{h}\right)^{\frac{1}{4}}$

となり，これを Horner の方法で解くと $x=0.7009$ をうる．即ち波の砕けるべき水深は

$$H=2.7\fallingdotseq 3\,\mathrm{m}$$

となる．

航空写真から砕波帯を調べると岸から約 200 m であり，これは縮尺図によれば水深約 3 m に当り，こゝに計算された理論的砕波水深は実際と大体一致していることがわかる．

砕ける瞬間に於ける波高は，(32) 式によれば

$$2a'=3.2\,\mathrm{m}$$

となり，これも常識的に判断される値である．

V. 波のもつ運動量と波による流れ

x の負方向に c なる速度で伝播する波に，これとは逆方向に c なる速度の場を重合した時の波形は (7) 式で与えられた．これに対し，$y=-h'$ ($h'<h$) に対応する波形 η' は (2) 式で $y=\eta'-h'$ とおけばよく，この場合の流れの函数 ψ は ch' である．故に

$$\eta'=\beta\sinh k(h-h'+\eta')\cos kx$$

従つて波形 η' は (3) 式との比較により，(5) に於て h の代りに $h-h'$ とおいたものとなる．従つて (5) 式の第 1 項は

---

[22] 佐藤清一：風速と波高との関係について．土木試験所報告，63 号 (昭和 16 年 10 月)，8 頁．

$$\frac{1}{2}k\left\{\beta\sinh k(h-h')\right\}^2\coth k(h-h')=\frac{1}{2}ka^2\frac{\sinh^2 k(h-h')}{\sinh^2 kh}\coth k(h-h')$$

第 2 項の係数は

$$a\frac{\sinh k(h-h')}{\sinh kh}$$

第 3 項の係数は第 1 項に同じであり，第 4 項の係数は

$$\frac{1}{4}k^2a^2\frac{\sinh^3 k(h-h')}{\sinh^3 kh}\left\{\coth^2 k(h-h')+\frac{1}{2}\right\}$$

となる．ここで

$$r=a\frac{\sinh k(h-h')}{\sinh kh} \qquad \cdots\cdots(35)$$

とおけば，r は水中の波の半波高である．従つて水中 $y=-h'$ の波形 η' は次の如くになる．

$$\eta'=\frac{1}{2}kr^2\coth k(h-h')+r\cos kx+\frac{1}{2}kr^2\coth k(h-h')\cos 2kx$$

$$+\frac{1}{4}k^2r^3\left\{\coth^3 k(h-h')+\frac{1}{2}\right\}\cos 3kx\cdots\cdots \qquad \cdots\cdots(36)$$

従つてこの水中波に対する静水面の位置は，

$$y=-h'+\frac{1}{2}kr^2\coth k(h-h') \qquad \cdots\cdots(37)$$

である．

故に $\psi=0$ の波から $\psi=ch'$ の波に至る間に重合した x の正方向の，速度 c なる一様な流れのもつ運動量は，一波長について

$$\rho\lambda c\left\{\frac{1}{2}ka^2\coth kh+h'-\frac{1}{2}kr^2\coth k(h-h')\right\}$$

$$=\rho ch'\lambda+\frac{1}{2}ka^2\rho c\lambda\left\{\coth kh-\frac{\sinh k(h-h')\cosh k(h-h')}{\sinh^2 kh}\right\}$$

である．

然るに c なる一様な流れを重合して出来た波形流の，$\psi=0$ の波から $\psi=ch'$ の波までの一波長当りの運動量は

$$-\int_0^\lambda\int_{\psi=ch'}^{\psi=0}\rho\frac{\partial\psi}{\partial y}dxdy=\rho ch'\lambda$$

即ちこの波形流は x の正方向に $\rho ch'\lambda$ なる運動量をもつのである．

従つて c なる速度で伝播する波が表面から $y=-h'$ までに有する一波長当りの運動量 M' は，以上の両者の差となり

$$M'=\pi\rho a^2c\left\{\coth kh-\frac{\sinh k(h-h')\cosh k(h-h')}{\sinh^2 kh}\right\} \qquad \cdots\cdots(38)$$

である．しかもこの運動量の方向は波の伝播方向と同一である．

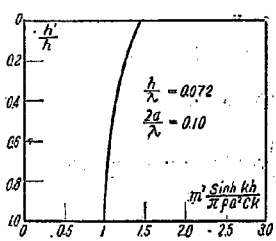
(38) 式で $h'=h$ とすれば波が一波長当りに有する運動量 M が得られる．

$$M=\pi\rho a^2 c\coth kh \qquad \cdots\cdots(39)$$

即ち非回転性の浅水表面波は，回転性のそれ（楕円トロコイド波）とは異り，(39) 式で示される運動量を波の進行方向にもつのである．そしてこれは波高の自乗に比例し，波速に比例し，水深に比し波長の大きくなるほど大となる．

次に水深に対する運動量の分布を求めるに，一波長当りの波のもつ運動量の水深についての強度，即ち単位水深当りの運動量 m' は (38) 式を h' で微分し

$$m'=\frac{\pi\rho a^2 ck}{\sinh^2 kh}\cosh 2k(h-h') \qquad \cdots\cdots(40)$$



図−7

である．従つてこの分布は表面で最大で水底で最小となり，図−7 の如くである．但しこの図は

$$\frac{h}{\lambda}=0.072,\quad \frac{2a}{\lambda}=0.10$$

の場合を示してある．

表面に於ける最大値は

$$m'_{max}=\pi\rho a^2 ck(1+\coth^2 kh) \qquad \cdots\cdots(41)$$

となり，最小値は

$$m'_{min}=\pi\rho a^2 ck\,\mathrm{cosech}^2 kh \qquad \cdots\cdots(42)$$

となる．

今波速を (13) 式により

$$c^2=\frac{g}{k}\tanh kh$$

とすれば m' は

$$m'=\frac{\pi^2}{\sqrt{8\pi g}}\gamma(2a)^{\frac{3}{2}}\left(\frac{2a}{\lambda}\right)^{\frac{1}{2}}\frac{(\tanh kh)^{\frac{1}{2}}}{\sinh^2 kh}\cosh 2k(h-h') \qquad \cdots\cdots(43)$$

と書き直される．こゝに $\gamma=\rho g$ である．

この運動量は，例えば防波堤に作用する波力等の外力を求める場合には，工学的に重要な役割をもつてくるものと考えられる．防波堤について衝撃力による新しい設計法が案出されるならば，こゝに計算された運動量は必ず役立つに違いない．

広井博士の研究によれば，防波堤に働く波力の強度 p は

$$p=\alpha\gamma(2a)$$

によつて表わされ，α は

$$\alpha=1.5$$

とされている.[23] 又その他の人の研究によると，

$\alpha=1.96$	Rayleigh
$=1.85$	Dubuat, Thobault
$=1.62$	Joessel
$=1.31$	Gaillard
$=1.25$	Mariotte

である.[24]

今これと対比するために，簡単のために，m'_{max} と m'_{min} との平均値を考えると

$$m'_m=\frac{1}{2}\left(m'_{max}+m'_{min}\right)$$

$$=\frac{\pi^2}{\sqrt{8\pi g}}\gamma(2a)^{1.5}\left(\frac{2a}{\lambda}\right)^{0.5}\coth^{1.5}kh$$

であり，衝撃力の作用する時間を τ とすれば，p は大体に於て次の如くに表わされる.

$$p=\left\{\frac{\pi^2}{\tau\sqrt{8\pi g}}\left(\frac{2a}{\lambda}\right)^{0.5}\coth^{1.5}kh\right\}\gamma(2a)^{1.5} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots(44)$$

これによれば，防波堤に作用する波力は波高に直線比例するのではなく波高の 1.5 乗に比例することになり，係数 α は一定常数ではなく，波の勾配，水深と波長の比，波力の作用する時間に関係をもつことになる.

α の数値を調べるために，一般によく遭遇する場合として

$$h=4\,\mathrm{m},\ 2a=3\,\mathrm{m},\ \lambda=30\,\mathrm{m}$$

なる場合を想定すれば

$$\alpha=\frac{0.3607}{\tau}$$

となり，波力の作用時間を 0.3 sec とすれば

$$\alpha=1.2$$

となる.

次に一波長間に於ける運動量の分布を調べてみる.

m_w を波の形をした流れの単位長さについての x の正の方向の運動量とすれば

$$m_w=\int_{-h}^{0}u\rho dy=-\int_{-h}^{0}\frac{\partial\phi}{\partial x}\rho dy$$

---

23) 広井勇：築港.

24) 土木学会水理公式集，昭和 24 年 9 月，161～162 頁.

$$=\rho ch-c\rho\beta\sinh kh\cos kx$$

又 m_e を以て，重合した定常流の上と同一水柱についての x の正方向の運動量とすれば，

$$m_e=c\rho(h+\frac{1}{2}ka^2\coth kh)$$

となる．

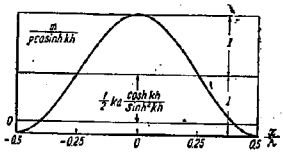
従つて c なる速度で伝播する波の，一波長間の単位長さについての運動量 m は

$$m=-(m_w-m_e)$$

によつて表わされ，波の進む方向の運動量を正として

$$m=\rho ca\sinh kh\left(\frac{1}{2}ka\frac{\cosh kh}{\sinh^2 kh}+\cos kx\right) \quad \cdots\cdots\cdots\cdots(45)$$

なる分布をすることになる．



図—8

$\frac{1}{2}ka\cosh kh/\sinh^2 kh$ は一般に1より小さいから一波長間の波の運動量の分布は図—8 に示す如くになり，波の山では波の進行と同一方向の大きな運動量をもち，波の谷では波の進行とは逆方向の小さな運動量をもつことになる．式 (45) 又は図—8 によつて明らかな様に，一波長間の平均の運動量は

$$\rho ca\sinh kh\left(\frac{1}{2}ka\frac{\cosh kh}{\sinh^2 kh}\right)=\frac{1}{2}\rho ca^2k\coth kh$$

で波の進行方向と同一方向をもつ．

ここに求められた波は，第 III 章で明らかにした様に，波の一周期の運動の後には波の進行方向に水の実質部分を移動せしめる性質を有する．従つて風は無くとも波のみによつて波の進行方向に水の漂いが生ずるのである．この速度を次に求める．

u' を以て，水表面から h' なる深さに於ける，一波長を通しての平均の漂いの速度とすれば，これの大体の値は M' を h' で微分し $\rho\lambda$ で割ることによつて求められる．即ち

$$u'=\frac{1}{\rho\lambda}\frac{\partial M'}{\partial h'}=\frac{m'}{\rho\lambda}$$

$$=k^2a^2c\frac{\cosh 2k(h-h')}{2\sinh^2 kh} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots(46)$$

この流速は表面で最大，水底で最小であり，水深についての分布状態は図—7 に示すものと同様になる．

水表面では

$$u_0'=k^2a^2c\frac{1}{2}(\coth^2 kh+1) \quad \cdots\cdots\cdots\cdots(47)$$

水底では

$$u_b'=k^2a^2c\frac{1}{2}(\coth^2 kh-1) \quad \cdots\cdots\cdots\cdots(48)$$

である.

水深全体についての，波の単位幅当りの水の漂いの量 q は単位時間について，

$$q=\int_0^h u'dh'=\frac{1}{\rho\lambda}\int_0^h mdh'=\frac{1}{\rho\lambda}\int_0^h dM'$$
$$=\frac{M}{\rho\lambda}$$

即ち (39) 式により

$$q=ka^2c\frac{1}{2}\coth kh \qquad \cdots\cdots(49)$$

となる.

従つて，波による水の漂いの，水深全体についての平均速度 u'_m は

$$u'_m=\frac{q}{h}=k^2a^2c\frac{1}{2kh}\coth kh \qquad \cdots\cdots(50)$$

となる.

次に波によつて起る沿岸流が何程になるかの見当をつけるために，次の様な考察をする．先づ実際の波には波頂長があり，無限の長さの幅をもつた波は起らない．この長さは通常波長の 3 倍程度である．これが汀線に対して θ なる角度で陸に押寄せ sand ridge のところで砕け始める．この時 sand ridge の頂上で陸に向つて波による漂いが流入し，汀線との間の水道を流れるものと概略考えることが出来る．そこで汀線と，波頂長 λ' に等しい長さをもつ sand ridge 上の鉛直面 ($\lambda'\times H$) によつて作られる汀線に沿つた壁体を考え，$\lambda'H$ 面より流入する流量 Q_w がこの壁体の他の一つの面から流出するものと考える．その流出量を Q_s，平均流速を v_s とすれば，v_s を以て波による沿岸流の速度と考えるのである.

この考察は沿岸流の概値を見積るためのものであるから，ことがらを出来るだけ簡単化し次の様に考える．即ち，sand ridge は汀線に平行であり，sand ridge に沿いその上に於ける (波の砕ける) 水深を H なる一定値とし，sand ridge から汀線までの距離即ち砕波帯の幅を l，汀線と sand ridge との間の海底の平均勾配を i とすれば，$\lambda'H$ なる面よりの流入量 Q_w は

$$Q_w=\lambda'H\,u'_{mb}\cos\theta$$

である．ここに u'_{mb} は sand ridge の上で波が砕け始める時の波による漂いの平均流速である．一方この楔形体の他の一つの面 (面積=$\frac{1}{2}lH$) から流出する流量 Q_s は

$$Q_s=\frac{1}{2}lHv_s$$

である．今 $Q_s=Q_w$ と考えるから

$$v_s=2\frac{\lambda'}{l}u'_{mb}\cos\theta$$

となる．然るに

$$i=\frac{H}{l}$$

とされるから

$$v_s=\frac{2i\lambda'}{H}u'_{mb}\cos\theta \qquad \cdots\cdots(51)$$

を得る．併し，波頂線の汀線に対する角度は一般に非常に小さいから $\cos\theta\fallingdotseq 1$ とすることが出来，従つて波による沿岸流の速度の極値は

$$u_s=\frac{2i\lambda'}{H}u'_{mb} \qquad \cdots\cdots(52)$$

としてよい．

これらを，今度は数値によつて検討してみよう．波の砕け始めるところの水深を $H=3$ m，その時の波高を $2a=3$ m，波長を $\lambda=45$ m とすれば

$$c=\sqrt{\frac{g}{k}\tanh kh}=5.27\ \text{m/sec}$$

となり，u'_{mb} は (50) 式により

$$u'_{mb}=0.70\ \text{m/sec}$$

となる．そこで $\lambda'=3\lambda$，$i=1/50$ として (52) 式により波による沿岸流の速度を求めると

$$u_s=\frac{2\times 3\times 45}{50\times 3}\times 0.70=0.22\ \text{m/sec}$$

となり，決して無視することの出来ない値となる．

VI. 結　　言

以上の考察によつて明らかとなつたことがらを要約すれば次の如くである．

(1) 実際の波は非廻転性でなければならないので，浅水の場合について非廻転性の表面波を Stokes の波の拡張として求めた結果，(9) 式で示される波の式を得た．但しこの波は c なる一定速度で伝播し波形は変化しないものとした．

(2) 波形は図−1 に示す如く，Laplace の波とは異つて波頂で尖り波底で扁平となるが，廻転性の波の楕円トロコイド波に非常に近いものである．

(3) 水分子の軌道は閉じた楕円とはならず，上部で尖り下部で扁平化した栗の実状となり，しかも波の進行方向に前進する（図−2）．このことは今までに行われている観測および実験と全く一致している．

(4) 波の砕ける限界に於ける波の勾配 $2a/\lambda$ は相対水深 H/λ によつて変り，その理論的関係は図−3 に示す如くになる．この理論値は，水深の極めて深い極限（即ち深水波の場合）に於ては $2a/\lambda=(\sqrt{6}-2)/\pi\fallingdotseq 1/7$ となり Michell の求めた限界値に一致する．

(5) ここに求められた理論曲線 $2a/\lambda\sim H/\lambda$ は楕円トロコイド波の理論によるものよりもはるかによく観測値

および実験値に合致している．これらの観測および実験値は水底が傾斜し，又従つて波形が変化する場合のものである．それにもかかわらずこの様に観測と一致することは予期以上のものである．

(6) 波の砕ける相対水深 $H/2a$ は一般に 0.8～2.0 の範囲にある．これに対し，こゝに考察された理論によれば，最もよくみうけられる $2a/\lambda=0.03\sim0.135$ のものに対して

$H/2a=0.77\sim0.70$ が与えられる．

(7) 波の砕ける相対水深は

$$\frac{H}{2a}=\frac{3}{4}+0.067\frac{\frac{2a}{\lambda}}{\frac{1}{7}-\frac{2a}{\lambda}}$$

によつて算出することが出来る．

(8) 沖波の波高を $2a$，波長を λ とし，その波が観測された場所の水深を h とすれば，この波が岸に寄せて来て砕けるところの水深 H は

$$\left(\frac{H}{h}\right)^{\frac{8}{4}}-\frac{14a}{\lambda}\left(\frac{H}{h}\right)^{\frac{5}{4}}-\frac{3a}{2h}\left(\frac{H}{h}\right)^{\frac{3}{4}}+19.124\frac{a^2}{\lambda h}=0$$

によつて近似的に算出することができる．

(9) こゝに求められた非回転性の浅水表面波は波の進行方向に運動量をもち，その値は一波長について

$$M=\pi\rho a^2 c\coth kh$$

となる．

(10) この運動量は，例えば防波堤に作用する波力を計算する等，工学的に重要な役割をもつてくるものと考えられる．

防波堤に働く波力の強度 p は

$$p=\alpha\gamma(2a)$$

$$\gamma=\rho g,\ \alpha=1.25\sim1.96$$

とされているが，これに対し波の衝撃力の作用時間を τ としてこゝに計算された波の運動量から p を概算すれば

$$p=\left\{\frac{\pi^2}{\tau\sqrt{8\pi g}}\left(\frac{2a}{\lambda}\right)^{0.5}\coth^{1.5}kh\right\}\gamma(2a)^{1.5}$$

となり，波力は波高に直線比例でなく波高の 1.5 乗に比例し，係数 α は一定常数でなく波の勾配，水深と波長の比，波力の作用時間に関係をもつことになる．α の値は $h=4$ m，$2a=3$ m，$\lambda=30$ m，$\tau=0.3$ sec に対して

$\alpha=1.2$ の程度となる．

しかも p は水深に対して一様分布でなく静水面で最大となり (40) 式又は図−7 の如き分布をなす．

(11) 水分子は一周期の運動の後には波の進行方向に移動する．従つて風によらない，波の運動それ自体によ

る流れが生ずる．その平均の速さは

$$u'_m = k^2 a^2 c \frac{1}{2kh} \coth kh$$

となる．

(12) 波によつて起る沿岸流の速さ v_s を見当つけるために

$$v_s = \frac{2i\lambda'}{H} u'_{mb}$$

なる算式を考えた．

瀝青混合物の安定度判定に関する簡易試験法

建設技官　谷　藤　正　三

建設技官　神　吉　満　志

目　　次

I．要　　旨 ……（1）
II．実験装置および測定方法 ……（2）
〔1〕 供試体の作製 ……（2）
〔2〕 安定度試験装置および試験方法 ……（5）
III．試験結果に対する考察 ……（5）
〔1〕 プランヂヤーの直径 ……（5）
〔2〕 試験結果に対する考察 ……（5）
IV．本試験法の実用性について ……（14）
〔1〕 利用価値および利用方法 ……（14）
〔2〕 安定度試験による配合決定方法について ……（16）
V．結　　論 ……（18）

I．要　　旨

瀝青舗装混合物における安定度即ち交通荷重下におけるせん断破壊に対する抵抗力の大きさはその耐久性と共に最も重要な要素である．

従来，安定度試験法としていろいろの方法が考案されているが，それぞれ長短があり，例えば最も一般的に使われる Hubbard Test でも粗骨材を含むアスファルト混合物のときには，粗骨材とリングの接触状態如何によつて試験結果に大きな誤差が入つて来るので判定が非常に難かしい．Triaxial Test や Stabilometor Test は現在では最も良い性能を持つが現場に備えつけることは経済的に難かしい．

本試験は現場で簡単に配合比まで決定出来るような方法を見出すために試みたものである．

本実験は基本配合として American Asphalt Institute の示方書による混合物をつくり，また最大粒径

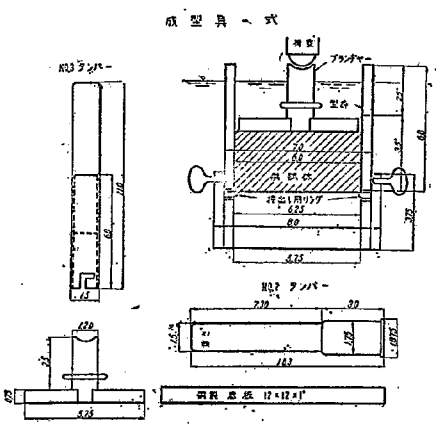
1″ の骨材を有する各種粗粒式アスファルト混合物に対して，60°C 恒温水槽中に 1 時間浸漬した後，径 3″ のプランジャーで水槽内において圧縮せん断試験を行い，その結果より，安定度試験法として充分効果のある方法であることを明らかにした．

試験結果を綜合すると，普通の交通状態においては，アスファルトコンクリート舗装の安定度は最低 450 kg，最大 700 kg にするように配合決定をすればよい．

II. 実験装置および試験

〔1〕 供試体の作製

供試体の作製には Hubbard Test 用の成型器具を使用した．(図—1)．



図—1

供試体は普通混合物 3,000 gr を使用し，出来上り供試体の高さを 7.0 cm～7.5 cm になるようにする．但し供試体が軽くてその高さが7.5 cm 以上に出来上る場合には 3,000 gr より減ずる．

(1) 混合物の作製法

1) 各試料混合時の温度

No. 4 篩以上の粗骨材 90～110°C (100°C)

No. 4 篩以下の細骨材 135～150°C (130～140°C)

アスファルト 120～150°C (120～135°C)

註 ( ) 内は本試験時の材料の温度

2) 混合順序

細骨材にアスファルトを先に混合して (混合時間 $1\frac{1}{2}$～2 分間) その後粗骨材を一度に 1/3 だけ混合して逐次完全に混合する．

3) 混合物は器と共に再び 90～110°C に温める．

4) 供試体の作製

i) 骨材が加熱されている間に型わく，底板，タンパー，プランジャーを約 65°C に加熱する．

ii) 底板および逆さにした型わくを作業台に置く．

iii) 混合物を取り出してよく混ぜて約 $\frac{1}{2}$ を型わく入れる．(このとき粗細骨材が分離しない様にすること)

iv) No.2 タンパーで 30 回強くつき固める．

V) 表面をパテナイフで掻起して残り 2/1 の混合物を入れ，No. 3 タンパーで 30 回つき固める．

Vi) かくて出来上つた試料の入つている型わくを速やかに逆さにして底板の上におき試料をプランジャーで底板に押しつける.

Vii) 表面の孔をなくするために No. 2 タンパーで 30 回つき，次に No. 3 タンパーで 30 回ついて水平仕上をする.

Viii) 成型は 38°C になるまで 4,500 kg の荷重をかけたまゝ冷却する.

iX) 荷重を取除き型わくから取出す.

なお供試体作製に際し注意すべき事は

X) 型わく，底板，タンパーは油布で軽く給油し，混合物が附着しない様にする.

Xi) 粗骨材は 110°C 以上に高温にする必要はない. あまり温度をあげるとアスファルトを過度に固化せしめる.

Xii) 供試体作製には骨材を破砕しない程度に完全に圧縮することが必要である. 4,500 kg の荷重をかけると最初行つたつき固め回数の影響は大した事はない.

冷却時間は圧縮機械に水槽が付いているものであれば最大荷重がかゝつている内に水槽に水を入れゝば短時間で実施出来る.

以上の供試体作製は主としてプラントにおける丁寧な操作であるが工事現場で簡単に行うには圧力計のついたオイルジヤツキ或はオイルジヤツキと歪荷重計を用いて簡単に成型出来る. (IV 章参照)

(2) 材 料

1) 砕石　石灰岩 (比重 2.79)

表−1　標準・粒度

篩 (mm)	篩目の大さ (mm)	重量 (%)
25 ～ 20	25 ～ 20	11.0
20 ～ 15	20 ～ 15	13.5
15 ～ 10	15 ～ 10	12.8
10 ～ 5	10 ～ 5	15.0
5 ～No.10	5 ～ 1.9	10.5
小　計		62.8
No.10 ～ 40	1.9 ～ 0.381	11.3
40 ～ 60	0.381 ～ 0.221	10.2
60 ～ 100	0.221 ～ 0.140	4.7
100 ～ 200	0.140 ～ 0.074	5.5
小　計		31.7
200 ～	0.074 ～	5.5
計		100.0

2) 砂　　荒川砂 (No.10篩～No.100篩, 比重 2.70)

小名浜砂 (No.100篩～No.200篩, 比重 2.76)

3) 石粉　　石灰岩粉 (比重 2.71)

4) 使用アスファルトはアスファルト (比重 1.03, 針入度 91 および 92 (A.P.) の 2 種)

なお骨材粒度は表−1 を標準粒度にとつた.

(3) 配合比

本実験に於ては主として標準粒度に対し, アスファルトおよびフイラーの配合比を種々変化させて供試体を作製し, 試験を実施した.

今本実験に使用せる供試体の配合比は表−2 の如くである.

表−2　配合比一覧表

材料(重量%) ＼ 供試体	1～2	3～5	6～18	19～20	21～28	29～31	32～34	35～37	38～43	44～46
砕石 (25mm～No.10)	60.6	59.8	59.3	58.5	58.1	57.8	57.5	56.5	55.8	55.2
砂 (No.10～No.200)	30.57	30.2	29.5	29.5	29.3	29.2	29.0	28.5	28.2	27.8
石粉 (No.200～)	2.83	4.0	5.2	6.0	6.6	7.0	7.5	9.0	10.0	11.0
アスファルト	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0
計	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0

材料(重量%) ＼ 供試体	47	48～49	50～52	53～54	55～57	58～60	61～62	63～64	65～69	70～76
砕石 (25mm～No.10)	54.5	53.8	53.2	60.3	60.0	59.7	59.8	59.3	58.4	57.6
砂 (No.10～No.200)	27.5	27.2	26.8	30.2	30.4	30.1	30.2	29.9	29.5	29.1
石粉 (No.200～)	12.0	13.0	14.0	5.2	5.3	5.2	5.0	5.2	5.1	5.0
アスファルト	6.0	6.0	6.0	4.3	4.3	5.0	5.0	5.6	7.0	8.3
計	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0

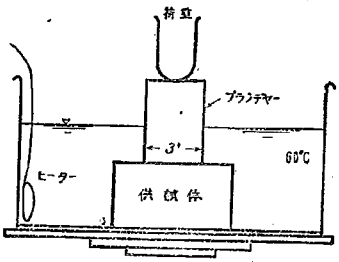
材料(重量%) ＼ 供試体	77～79	80～82	83～84	85～86	87～89	90～91
砕石 (25mm～No.10)	45.0	50.0	55.0	60.0	65.0	70.0
砂 (No.10～No.200)	42.5	37.5	32.5	27.5	22.5	17.5
石粉 (No.200～)	5.5	5.5	5.5	5.5	5.5	5.5
アスファルト	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0
計	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0

〔2〕 安定度試験装置および試験法

安定度試験は図−2 に示すような装置を用いて行つた．

供試体は試験実施前約 1 時間 60°C の温湯中に浸して，高温多湿状態の状況に適応するようにしてから，偏心荷重のかからないように供試体とプランジャーの位置を正し，貫入試験を行つた．

載荷と同時にストツプウオツチを押して，10 秒毎に荷重を記録し，破壊する迄荷重をかけ，垂直変位量と荷重を記録した．



図−2

III. 試験結果に対する考察

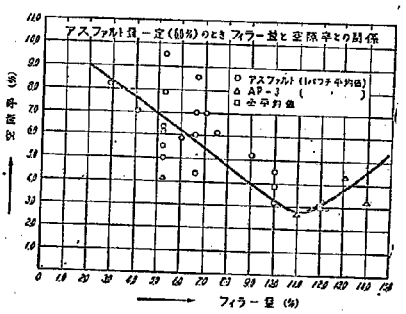
〔1〕 プランジャーの直径

本実験の特徴というべきプランジャーの意義については種々議論せらるべき問題であると考えるのであるが，これは最後に関連的に述べる事にし，こゝに於ては試験結果に影響を及ぼすプランジャーの直径に関して主として観察面から考察を加える事とする．プランヂヤーの直径選定には予め Hubbard 用供試体を数十個作製し，直径を 2″, 3″, 4″ に種々に変化して予備実験を行つて決定したのであるが，径 6″ 高さ 3″ の供試体に対しては何れもその破壊状況は 45° 方向に亀裂が発生し，大体において交通荷重下の舗装の剪断破壊と類似性をもつているという考えにたつものであつて，C,B,R 試験の場合と同様である．唯 C,B,R のときと異なるのは粗骨材を含んでいるためにプランジャーが小さい断面のときは荷重面の粗骨材 1 個の影響が大きく現われて試験結果が乱雑となり，Hubbard 試験の押出しリングの場合と同じ缺点を生ずるおそれがある．径 4″ のときは剪断試験というよりは圧縮試験の如き破壊を示す傾向を持つ．荷重分布の点から考えれば本実験に使用した骨材の最大粒径は 1″ であり従つて径 3″ のプランジャーは少なくとも 1″ の骨材 3 ケ に荷重が分布せられるものと考えられるのでこれらの缺点を除くために結局径 3″ のものを使用することにした．

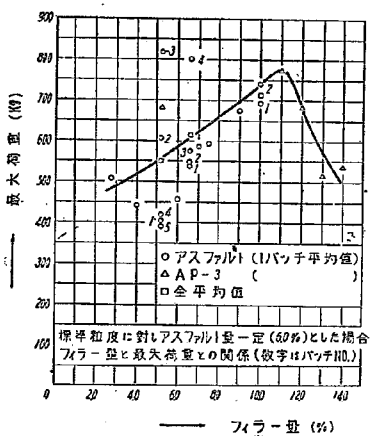
〔2〕 試験結果に対する考察

(1) 標準粒度に対してアスファルト量を一定（6.0 %）としフイラー量を変化した場合

標準粒度に対しアスファルトを一定(6.0%) としフイラーを変化した場合の試験結果は表−3 の如くである．表−3 よりフイラー量と空隙率およびフイラー量と最大荷重との関係を示せばそれぞれ図−3, 4 の如くである．すなわち図−3 に於て，フイ



図−3



図—4

ラー量と空隙率との関係はフイラー量の増加と共に空隙率は減少し，フイラー 11.0% にして最小値となり，更に増加するに従つて空隙率は漸次増加の傾向を示している．瀝青舗装混合物に対してフイラーはアスファルトと共にある程度増すと共に舗装の安定度を増加する役目を有するものであるが，又フイラー自体にも相当の空隙を有するものであつて多過ぎるとかえつてアスファルトの粘結力を阻害するとともに骨材との親和力を減少し，同時に舗装空隙率も増加するものである．Asphalt Institute の規格では舗装空隙率 2～5% を要求しており，これより云えば適当なフライ量は大体 7.5～14.0% の

表—3　アスファルト量を一定としフライー量を変化せる時の試験結果一覧表

配合＼項目	Batoh No	供試体 No	見掛比重 (d)	真比重 (D)	空隙率 (%)	最大荷重 (kg)	最大荷重のときの変位 (mm)
a. 6.0 f. 2.83		1 2	2.31 2.30 } 2.305	2.513	8.078 8.476 } 8.277	4.51 5.90 } 5.08	4.10 4.72
a. 6.0 f. 4.0		3 4 5	2.329 2.345 } 2.336 2.334	2.512	7.285 6.648 } 7.007 7.086	360 412 } 440 549	6.40 5.52 6.68
	1	6 7	2.32 2.31 } 2.315		7.643 8.041 } 7.842	313 494 } 403	4.30 4.08
	2	8 9 10	2.384 2.374 } 2.373 2.361		5.096 5.494 } 5.534 6.011	753 588 } 606 478	4.00 5.04 3.82
a. 6.0 f. 5.2	3	11 12	2.389 2.378 } 2.384	2.512	4.896 5.334 } 5.012	878 755 } 817	5.28 5.46
	4	13 14	2.359 2.354 } 2.357		6.091 6.290 } 6.191	434 380 } 417	3.46 5.70
	5	15 16	2.280 2.267 } 2.274		9.236 9.753 } 9.50	336 445 } 391	4.12 3.42
AP-3, 6.0 f. 5.2	6	17 18	2.41 2.37 } 2.39		3.66 5.65 } 4.16	680 682 } 681	6.46 5.52
					6.373	550	
a. 6.0 f. 6.0		19 20	2.385 2.343 } 2.363	2.512	5.056 6.728 } 5.892	409 502 } 456	6.6 5.78

	1	21	2.296	2.2955		8.562	8.582	6.237	540	540	615	4.35
		22	2.295			8.602			540			5.09
	2	23	2.329	2.337		7.248	6.95		570	545		3.76
a. 6.0		24	2.344		2.511	6.651			520			3.72
f. 6.6	3	25	2.374	2.359		5.456	6.074		598	574		3.70
		26	2.343			6.691			550			3.56
	4	27	2.424	2.402		3.465	4.34		864	800		5.26
		28	2.380			5.217			736			4.50
a. 6.0 f. 7.0		29	2.359	2.37	2.512	6.128	6.992		597	586		6.50
		30	2.333			7.126			560			6.70
		31	2.318			7.723			602			5.24
a. 6.0 f. 7.5		32	2.375	2.36	2.511	5.416	6.146		558	593		5.64
		33	2.370			5.613			680			5.16
		34	2.325			7.407			541			4.70
a. 6.0 f. 9.0		35	2.430	2.38	2.510	3.187	5.166		684	672		7.00
		36	2.372			5.498			562			6.60
		37	2.339			6.813			770			5.30
	1	38	2.424	2.43		3.388	3.135	3.826	706	691	716	6.80
		39	2.440			2.750			728			6.88
a. 6.0		40	2.427		2.509	3.268			640			7.20
f. 10.0	2	41	2.385	2.396		4.942	4.517		790	740		5.92
		42	2.395			4.544			800			5.20
		43	2.407			4.065			630			6.30
AP-3 6.0 f. 11.0		44	2.436	2.445	2.509	2.910	2.670		751	777		7.98
		45	2.476			1.315			724			4.58
		46	2.414			3.786			857			7.20
AP-3 6.0 f 12.0		47	2.436		2.509	2.910			685			7.20
AP-3 6.0 f. 13.0		48	2.402	2.40	2.509	4.265	4.345		5.29	517		7.18
		49	2.398			4.424			5.05			7.16
AP-3 6.0 f. 14.0		50	2.449	2.427	2.508	2.353	3.230		512	541		8.00
		51	2.419			3.550			425			8.06
		52	2.413			3.788			686			9.42

範囲であることを示している．又フイラー量と最大荷重との関係も全く妥当な傾向を示しているものと考えられ，図—4 ではフイラー量の増加と共に最大荷重は増大し，フイラー 11.0% にして最大の値を示し，更にフイラーの増加するときは最大荷重は減少している．

云いかえると本剪断試験法を行えばフイラー量の適正量は明瞭に判定し得ることを知る．なおこゝに於て一言つけ加えたい事は従来の我国の経験によれば，高温，多湿な気象的影響により交通荷重に対する安定性は使用骨材に対しフイラーおよびアスファルト量は大体 4.0~7.0% および 5.0~7.0% とされている．即ちフイラーおよびアスファルトの使用程度は重量配合に於ては大体同一割合が適当であるとされている．以下の実験に於てはアスファルト量は 6.0% フイラー量は 5.0~5.5% を標準として実施した（現場配合の決定法については IV 章で述べる．）

(2) 標準粒度に対しフイラー量を一定 (5.0～5.5%) としアスファルト量を変化した場合

表−4　フイラー量を一定 (5.0～5.5%) とし，アスファルト量を変化せる時の試験結果一覧表

配合 \ 項目	Batch No.	供No.	見掛比重 (d)	真比重 (D)	空隙量 (%)	最大荷重 (kg)	最大荷重変位 (mm)
a. 4.3 f. 5.2		53 54	2.245 2.270 } 2.258	2.571	12.680 11.708 } 12.194	465 628 } 547	4.48 4.96
a. 4.3 f. 5.3		55 56 57	2.290 2.260 } 2.27 2.245	2.580	11.240 12.403 } 12.209 12.984	352 362 } 347 327 } 447	3.70 5.00 4.00
a. 5.0 f. 5.2		58 59 60	2.27 2.28 } 2.26 2.26	2.551	10.015 10.625 } 10.682 11.407 } 9.879	440 511 } 455 414 } 500	4.44 4.36 3.68
AP-3 5.0 f. 5.0		61 62	2.310 2.335 } 2.32	2.551	9.447 8.702 } 9.075	590 495 } 543	4.14 4.52
a. 5.6 f. 5.2		63 64	2.26 2.335 } 2.30	2.512	7.643 11.226 } 9.435	399 584 } 492	4.96 5.42
a. 6.0 f. 5.2		(表−3 供試体 No.6～18 参照)					
a. 7.0 f. 5.1	① ②	65 66 67 68 69	2.39 2.35 } 2.36 2.35 2.41 2.40 } 2.405	2.474	2.766 4.394 } 3.851 4.394 } 3.31 2.587 2.991 } 2.789	810 632 } 652 515 } 597 622 543 } 541	6.25 5.10 5.18 6.52 4.78
a. 8.3 f. 5. AP-3 8.3 f. 5.0	① ② ③	70 71 72 73 74 75 76	2.37 2.35 } 2.36 2.398 2.404 } 2.415 2.412 2.403 2.396 } 2.4	2.428	1.332 2.165 } 1.749 1.195 0.948 } 0.920 } 1.261 0.618 0.989 1.277 } 1.133	292 403 } 348 318 335 } 360 } 372 425 390 424 } 407	8.30 11.28 5.58 6.94 8.54 7.72 8.80

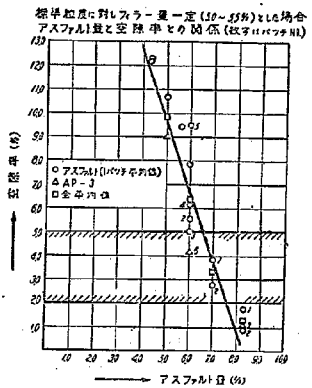
次に標準粒度に対しフイラー量を一定 (5.0%～5.5%) とし，アスファルト量を変化した場合の試験結果は表−4 の如くである．

表−4 よりアスファルト量と空隙率およびアスファルト量と最大荷重との関係を示せばそれぞれ図−5; 6 の如くである．

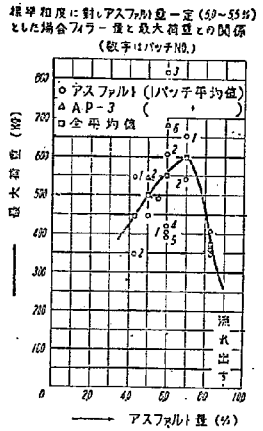
瀝青舗装混合物におけるアスファルトは骨材およびフイラーの結合材となり，同時に舗装に一種のプラスティシチーをあたえ，且つ骨材およびフイラーの空隙のほとんどを満たして舗装に防水性を与えるものである．

従つて使用の品質および使用量の如何に依つて舗装混合物の安定度に微妙の影響をあたえる．

図−5 においてはアスファルト量と空隙率との関係はほとんど直線的関係を示し，アスファルト量の増加と共に空隙率は減少する．しかして空隙率が 2.0～5.0% に収まるアスファルト量は大体 6.0～7.5% であり，規定範囲に一致している．



図—5



図—6

又図—6においてはアスファルト量の増加と共に相当急激に最大荷重は増大し，7.0% において最大に達し，更にアスファルト量の増加に従つて最大荷重は急激に低下している．

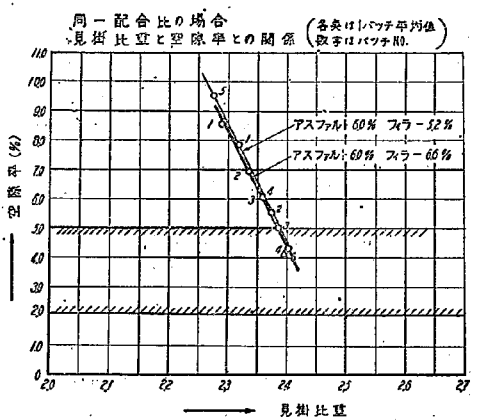
即ち今最大荷重の基準を 500 kg に押える時は本配合においてはアスファルト量は 5.0～7.5% が適当であり，しかして更に基準を引上げるに従い適切なるアスファルト量の範囲は急激に縮少している．

従つて本試験法によつてもアスファルト量の変化は相当明瞭に把握することが出来ることがうなづける．

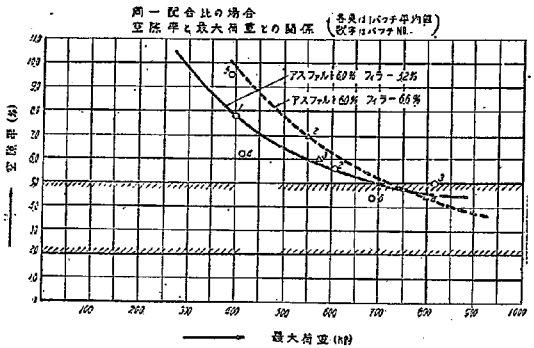
(3) 標準粒度に対しアスファルト量フイラー共に一定の場合即ち同一配合比の場合

以上は種々配合を変化した場合について検討を加えたのであるが前記表—3 の内同一配合比の場合について考えるに，今アスファルト 6.0%　フイラー 5.2% および アスファルト 6.0%　フイラー 6.6% の二種の配合の場合について，見掛比重と空隙率，空隙率と最大荷重および見掛比重と最大荷重との関係を示せばそれぞれ図—7，8，9，の如くである．

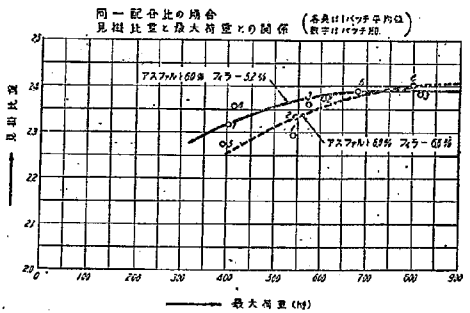
瀝青舗装混合物に於ける見掛比重はある程度まで舗装空隙率の大小の目安とはなるが，それによつて厳密な意味における混合物の安定度判定の尺度とはなし難



図—7



図−8



図−9

い。図−8 における空隙率と最大荷重図においては一般に次の如き性質がある。

1) 図の右側に寄つているもの程安定度が高い。
2) 図の下側に寄つているもの程空隙率が小さい。

即ち本質的には図の右下方にくる程空隙率が小さく安定度が高い舗装だといえ得る。しかしながら，これのみによつて舗装混合物の良否を判定する事は危険である。

舗装の空隙率はその配合によつて異なる事は勿論であるが，又配合一定とした場合においては締め固めの程度によつて空隙率に変化がある。即ち混合物を圧縮する場合，ある程度までは，ほとんど抵抗なしに圧縮することが出来るが圧縮が進むにつれて次第に抵抗力は増大し，荷重を増してもほとんど圧縮は進まなくなる。しかしてその限度を超えれば混合物中の骨材が破砕され結局舗装体が破壊してしまうのである。即ち瀝青舗装混合物における空隙率と最大荷重の関係は同一荷重によつて成立した場合双曲線的関係によつて示される筈であり，曲線が横には う程圧縮の働いた良好な混合物であるといえるのである。

即ち図−8 においてはアスファルト 6.0% フィラー 5.2% の場合においては 4 の点がそれぞれ空隙率，最大荷重共に良好なる混合物であるといえるのである。図−7,8, による時は瀝青舗装混合物における安定度は舗装空隙率の函数として表わされ，同時に舗装空隙率はその見掛比重と正比例的な関係にあるという事が出来る。換言すれば瀝青舗装混合物の安定度はその見掛比重の大小によつてある程度判定出来ると考えられるのである。

図−9 は以上の関係を示したものであつて今本配合における安定度の基準を 500 kg に抑えるならば，混合物見掛比重は大体 2.35 以上なければいけないと云う事がわかるのである。(以上の論拠は混合物中にはある程度の空隙率が存在する場合に成立つのであつて，空隙率が極端に小さくて 2% 以下という場合にはアスファル

トの有含量が大きな要素となり，以上の考え方は成立しなくなる．）

(4) アスファルト量，フイラー量を一定とし粗細骨材比およびフイラーをそれぞれ変化せる場合

本試験においてはアスファルト量（5.5%），フイラー量（7.0%）を一定とし粗骨材を 45～70% の範囲内で種々変化した場合，これが舗装空隙率および最大荷重に如何なる影響をおよぼすかについて試験した．（表－5）

表－5

AP-3 量 7 % フイラー 5.5 % をそれぞれ一定にし粗細骨材量比率を変化したときの試験結果一覧表

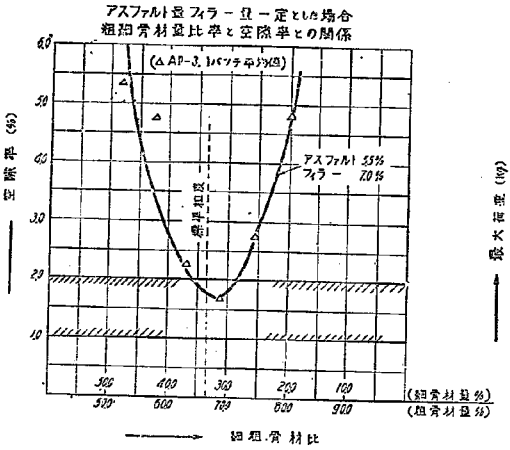
配合粗細骨材比率 ＼ 項目	供No.	見掛比重 (d)		真比重 (D)	空隙量 (%)		最大荷重 (kg)		最大荷重のときの変位 (mm)
%									
粗骨材 45.0	77	2.317			6.080		393		1.59
細 〃 42.5	78	2.339	2.334	2.467	5.189	5.391	485	469	5.20
	79	2.346			4.905		523		3.80
	80	2.347			4.980		682		4.80
粗 50.0	81	2.335	2.352	2.470	5.547	4.764	576		4.48
細 37.5	82	2.377			3.765		591		6.07
		2.446			1.052				
粗 55.0	83	2.357		2.472	4.652	2.279	712	696	5.78
細 32.5	84	2.444			1.133		680		3.68
		2.439			1.455				
粗 60.0	85	2.437	2.435	2.475	1.535	1.630			
細 27.5	86	2.428			1.899				
	87	2.408			2.786		707		5.80
粗 65.0	88	2.415	2.409	2.477	2.503	2.745	780	721	4.67
細 22.5	89	2.404			2.947		675		5.45
粗 70.0	90	2.360		2.480	4.840	4.759	524	563	3.66
細 17.5	91	2.364			4.678		601		4.38

図－10，11 はそれぞれ粗細骨材量と舗装空隙率および最大荷重との関係を示せるものであるが，図における粗細骨材量はアスファルトおよびフイラーを除いた場合の百分率で示してある．

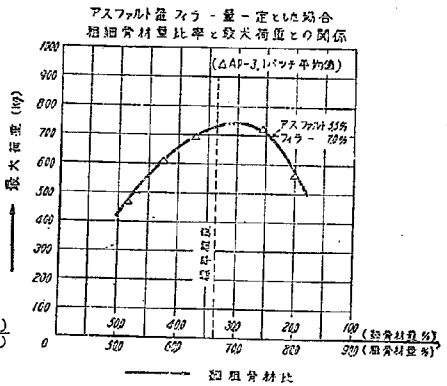
即ち図－10 においては粗骨材量 63.5% 細骨材量 31.5% において空隙率は最小であり，その値は 1.65% となつている．

即ち本実験に使用せる，混合物の骨材粒度は粗骨材量 62.8%，細骨材量 31.7% フイラー 5.5% であるから，今フイラーを除いたものの百分率をとれば，粗細骨材量はそれぞれ 66.5% および 33.5% となり，偶然にも標準粒度と極近似している．又図－11 においては，舗装空隙率最小の点附近において荷重は最大に達している事がわかるのである．

結局今迄の実験結果を綜合すれば，本実験に使用せる骨材においてはアスファルト量およびフイラー量はそれぞれ 7.0，5.5% において空隙率および最大荷重はそれぞれ最小空隙率，および最大荷重の値を示し，しかして粗細骨材量はそれぞれ 63.5% 31.7% の比率の場合である．一方から考えると，本実験に使用せる標準粒度は試験結果からみて最良の安定度を得る粒度と極めて近似するものであるから，上記試験結果は本実験に使用せる骨材の場合，粗細骨材量の比率は標準粒度の近傍においてもつとも良好なる比率であることを示してお



図−10



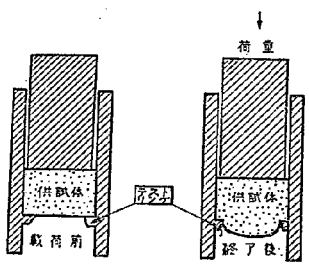
図−11

り，取りも直さずそれは本実験方法が混合物配合に正しい指針をあたえるものである事を立証した事となるのである．

(5) Hubbard 安定度試験法との比較試験

本実験においては其の目的および性質上試験結果に対し他の試験法による試験結果との比較も又必要である．

本実験装置は Hubbard test にヒントを得たものであり，供試体作製方法は全く同一にして試験方法も非常に相似している．従つて試験結果に対する Hubbard test との比較を行つた．(図−12)



図−12

即ち Hubbard test の特徴とする所は 60°C の湯中において混合物がリングによつて剪断されるときの最大荷重を以て所要安定度とし，圧縮試験機の試験台枠の移動割合即ち垂直変位は 1 in/25 sec となつている．ところが当所における Hubbarb test は，圧縮試験機はすべて油圧式にして Screw 式のものはない．

従つて試験台枠の移動割合も Hubbard test 用 5 ton 圧縮試験機においては油送バルブを全開しても変位速度は 0.46mm/sec であり，Hubbard test における規定速度の約 1/2 のに過ぎないものである．従つてこゝでいう Hubbard test との比較試験とは当所における Hubbard test との比較試験の事を意味するのでアメリカで云う安定度標準とは若干数量的に異なつている．

Hubbard test による試験結果は表−6 の如くで，これと本試験法により求めた結果 (表−6，図−4) とを比較すると図−13 の如くである．

表−6　Hubbard test に依る試験結果一覧表

項目 / 配合	Specimn No.	見掛比重 (d)	真比重 (D)	void (%)	Max load (kg)	MC 時の変位(mm)
a. 6.0 f. 5.2	92 93 94	2.374 2.390 2.349	2.512	5.483 4.857 } 5.61 6.489	1202 1478 } 1247 1062	6.30 5.10 7.68
AP-3 6.0 f. 6.6	95 96 97	2.402 2.405 2.421	2.511	4.342 4.221 } 4.049 3.584	1667 1709 } 1590 1409	5.27 6.10 4.80
AP-3 7.0 f. 5.1	98 99 100	2.426 2.409 2.404	2.465	1.582 2.272 } 2.11 2.475	1284 1209 } 1264 1298	6.82 5.85 6.07
AP-3 5.0 f. 5.2	101 102 103	2.280 2.260 2.265	2.551	11.6 10.4 10.3	1539 1430 } 1262	6.30 5.73 5.88
AP-3 4.3 f. 5.2	104 105 106	2.277 2.253 2.229	2.571	12.6 11·9 13.3	696 825 } 702	4.52 5.36 5.10

Hubbard test においては瀝青舗装混合物に対する所要安定度は次の如くである．

1)　最悪の重交通状態に対し

　最少　800 kg

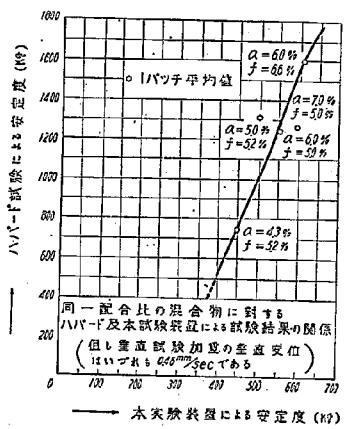
　最大　2000 kg

2)　普通の重交通状態に対し

　最少　600 kg

　最大　2000 kg

即ち普通の重交通状態に対する最小安定度 600 kg に相当するものは本装置においては大体 450 kg に匹敵するものと考えられるのである．



図−13

以上試験結果を綜合すれば本実験装置は瀝青舗装混合物に対する安定度試験として混合物の配合決定に指針を与え得るものであることを知つた．

即ち本装置による試験結果は何れも瀝青舗装混合物における安定度におよぼす各要素に対し現在のこの種舗装混合物に対して考えられている要件は充分満たし得る成績を示しているのであつて，与えられた骨材粒度に対するアスファルト量，フイラー量の配合比決定は可能であり，これによつて体験せる舗装混合物の見掛比重の測定により，その舗装の良否を判定し得ることも明らかである．更に図−10~11 により本試験の信頼性が一層深められた事を立証するものである．

即ち瀝青舗装混合物に対する安定試験の具備すべき条件ともいうべき試験結果の信頼性および敏感性につい

ては何れも満足なる成績を示しており，混合物の良否の判定基準となる所要安定度の範囲について今後更に現場との協力の下に実験する事によりやがて更に明確な限界が見出されることが出来る．

IV. 本実験の実用性について

〔1〕 利用価値および利用方法

現在欧米諸国においては幾多の安定度試験が実施されているがその中 Hubbard test は最も有名であり Roller Stability test および Triaxial Compression test 等も混合物の配合決定に非常に有効であると考えられており，広く一般に実用化されている．しかしてこれらは長年の研究によつて試験法として充分整備されたものであることはいうまでもない．

しかしながらそれらにおいても矢張りそれぞれ欠陥があつてその上装置そのものが大きく，現場において直ちに実施することは困難であり，いわゆる実験室安定度試験ともいうべき性質のものである．

従つてそれらの試験法が現在に至るも我が国において普及されていないという原因は色々あるが国情の相違という根本条件の他に，矢張り上記の如き欠陥の存する所以であると考えられるのである．然るに著者の実験装置は装置も操作も非常に簡単であり又試験結果も良好で既述の特長を考慮する時は現状においては もつとも適切なる試験法であると考えられる．更に本実験方法の利用価値を増すものとしては従来の試験方法によれば一般に加熱混合の瀝青舗装混合物に限定されていたのであるが，本装置に依る時は単に加熱式のみでなく広く瀝青舗装混合物全般に使用出来るという事である．即ち本実験においては便宜上粗粒式アスファルト混合物における径 6″ 高さ 3″ の Hubbard test 用供試体のみに対し実施したのであるが，これは加熱式のもののみでなく冷式簡易舗装混合物に対しても応用可能であり，更に供試体作製困難の場合においては現場切取舗装体そのものに対しても，その厚さに応じてプランジヤーの径を換える事によつて試験は可能であるものと考えられるのである．この場合本実験結果によればプランジヤーは大体舗装厚に相当するものが良好なる結果を与え得るものと考えられる．本実験装置を実際現場に利用する場合いわゆる現場安定度試験としての試験装置および試験方法は如何様にすればよいかについて参考までに述べると次の如くである．

(1) 現場安定度試験装置

現場においては一応供試体成型用圧縮試験機のないものと考えれば実際には成型不可能であり，又舗装後の舗装切取体について実施する方が便利である点から以下かゝる前提の下に述べる事とする．即ち現場安定試験として必要なる器具は次の様なものである．

1) トラツク　1台

圧縮試験機の荷重代用にして静，動何れの荷重を与える場合においても使用出来る．屋内で現場配合決定用には建物の横梁等適当に利用すればよい．

2) ジヤツキ　1台

これでトラツクを持ち上げるものにして同時にトラツク荷重がジヤツキに掛るわけである．但し油圧式，Screw 式何れにても使用出来，容量 5 ton 程度とする．

3) プランジャー

舗装厚に相当する直径のプランジャーを使用するものとすれば矢張り数種，揃えておく必要がある．

4) ループ型弾性検定器（ヒズミリング）1 台

ジヤツキに圧力計がついていれば必要はないが，さもなければ荷重指示装置として必要である容量5 ton程度．

5) 水 槽　1 ケ

試験は 60°C の温湯内で実施するため水槽が必要である．大さは試料によつて異るが 40 cm×40 cm 高さ 20 cm 程度のもので充分であろう．材料は厚さ 3.0 mm 程度の鋼板製のものが適当である．平底バケツで代用することも出来る．

6) 湯わかし器具

500 W 程度の電気ヒーターが必要である．或は薪にて湯をわかし水槽に移してもよい．

7) 温度計　3 本

60°C に温度を保つため，0～100°C の温度計が必要である．骨材およびアスファルトの温度測定用として 0～200°C の温度計が必要である．

8) 底 板　1 枚

試験に際し水槽の安定を得るため厚さは 3 cm 程度でいいが，面積は少くとも水槽以上のものが必要である．

9) 要すればトラック荷重を伝達するに必要なる高さを調節するための材木ブロック．

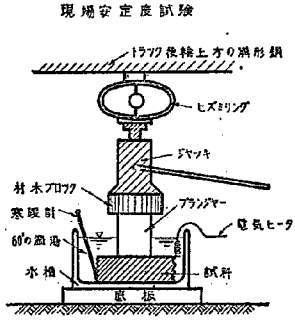
10) Hubbard test 用モールド 1 組

現場配合を決定する試験を行うときに用うる．

(2) 現場安定度試験方法

以上の如き装置を以て試験する場合，その方法を示せば図－14 の如くである．

即ち上図の如き方法で 60°C において試験するのであるが試料は試験前 1 時間以上 60°C の温湯中に浸漬した後底板上の 60°C の温湯を満たした水槽の中に据えプランジャーをその上に置く，そしてブロックを置きジヤツキを据えその上にヒズミリングをおく，そしてそれらがトラック荷重を伝達させるためトラックの後輪上方にある溝形鋼の下に上手に据えるのであるが偏心荷重にならぬ様それらの中心線が鉛直線上にある様にする．



図－14

次にヒズミリングのダイヤルゲージを零に調節し，ジヤツキのハンドルをもつて均一なる速度（1 mm/sec）を以つて荷重を増加し試料が圧縮剪断される時の最大荷重の読みをとるのである．

(3) 現場安定度試験実施に対する注意

試験時の注意事項は次の如し．

1) 偏心荷重にならぬようにする．

2) 試験はしつかりした地盤の上で実施すること．

3) 60°C の温度を正しく守ること．

4) ジヤツキが油圧式にしろ，スクリウー式にしろ，載荷速度は一定とすること．載荷速度の変化は試験結果に敏感に影響する故，要すればストツプウオツチでジヤツキの運転速度を一定にする必要がある．

5) トラツク荷重は一定とすること．

6) 試験中は振動を与えぬよう，ジヤツキ操作に注意を要す．

〔2〕 安定度試験による配合決定方法について

次に安定度試験による瀝青舗装混合物の配合決定法について主な注意を述べる．

今こゝに一例としてある交通状態に対して舗装厚，骨材の最大粒径，最小安定度および舗装空隙率 2.0～5.0 % が規格として与えられた場合について考えてみることとする．

示方書の範囲内の平均値によつて骨材粒度を決定し，その材料配合を有する試みの配合を得たとする．試みの配合の供試体の作製および試験は既述のようにして実施し，空隙率の算定と安定度試験の結果，若し混合物の安定度が良好な場合であつても圧縮された混合物内の空隙が 0.5% であるという場合には余り空隙率が低すぎるので骨材配合を変えずにアスファルトの百分率を減ずるかフイラーの百分率を減ずるか或は又両方共百分率を減ずることにより修正する．混合物の骨材空隙率およびアスファルト舗装内の空隙率の計算は次の如くして行う．それには先づ全骨材の比重を計算することが必要である．

$$g=d\left(1-\frac{w}{100}\right)$$

但し g=圧縮した骨材の見掛比重

d=圧縮した混合物の見掛比重

w=アスファルトセメントの重量%

又 e=圧縮した骨材の空隙率%，D_1=骨材の平均真比重とすれば

$$e=\frac{100(D_1-g)}{D_1}$$

又

W=粗骨材重量%

W_1=細骨材重量%

W_2=フイラー重量%

G=粗骨材の真比重

G_1=細骨材真比重

G_2=フイラーの真比重

とすれば

$$D_1=\frac{W+W_1+W_2}{W/G+W_1/G_1+W_2/G_2}$$

この試みの配合の場合 $D_1=2.65$ $d=2.37$ $w=6$ と仮定すれば

$$g=2.37\left(1-\frac{6}{100}\right)=2.2228$$

$$\therefore\quad e=\frac{100(2.65-2.2228)}{2.26}=15.9\%$$

今混合物の空隙が $V=0.5\%$ であつたとすれば ∴ アスファルトによつて満たされた空隙＝15.4%

故に混合物内にアスファルトが 6.0% あるのであるからアスファルト 1.0% につき約 2.5% の空隙を満たすという事がわかる．故にアスファルトを 5.0% に減少すれば空隙は 0.5+2.5=3.0%増加しそれは指定限度内に收まるのである．混合物はアスファルトの百分率が出来るだけ多くなるが望ましいのであるからこのような場合には骨材の百分率を減少せずにフイラーの百分率を約 4% 減少し，アスファルトを 5.5% に減少した第 2 の試みの配合を作つた方がよいのである．

かくしてこの第 2 の試みの配合の安定度および空隙率が規格に合格すれば現場に施工して安全である．大略以上の如き要領で混合物の配合決定をするのであるが勿論最終決定に至るには，幾度も上記操作を繰返さなければならない．試みの配合を行つて現場配合の修正をするには次の事項を心得ていると便利である．

① **安定度良好なる場合**

(1) 空隙率 2.0% 以下の時

i) フイラー又はアスファルトの%を減少するか或は両方共減少する．

ii) 空隙率大きくするために粗細骨材量の比率を変える．

(2) 空隙率 5.0% 以上の時

i) フイラー又はアスファルトの百分率を増加するか或は両方共増加する．スラグ，石灰石のような多孔質の骨材に対しては規格内で最大限のアスファルトの百分率が必要である．

ii) 粗細骨材量の比率を変える．

② **安定度不良なる場合**

(1) 空隙率 2.0% 以下の時

i) フイラーの百分率を増加しアスファルトの百分率を減少する．

ii) 粗骨材の百分率を増加する．

(2) 空隙率 5.0% 以上の時

i) フイラーの百分率を増加する．

ii) 粗細骨材量の比率を変える．

(3) 空隙率 2.0~2.5% の時

i) アスファルトの百分率が最低量に近い時は粗骨材の百分率を増加してみるか，又はアスファルトの百分率を減少してみる．

ii) アスファルトの百分率が最低量に近い時は大体骨材の質が悪いのであるから粗骨材か又は細骨材を変えてみる必要がある．もし粗骨材が碎石の場合は一般に細骨材にその原因がある．

又粗骨材が砂利の場合には原因は概ね砂利にあつて当然安定度は低い．

何れにしてもかゝる場合には両方を否定する前に示方書の規格の最大最小の百分率を有する粗骨材を以つて試みの配合を作り，試験してみるとよい．

③ 安定度が非常に高い場合

(1) 圧縮した供試体の中に大きな骨材があつて，それが混合物を圧縮剪断するときにじやまをしている場合

この場合，混合物の安定度はその混合物の真の安定度ではない．

即ちかようなうたがいのある場合には粗い骨材を有する混合物においては供試体の表面を取除いた後再び成型々枠に入れ，約 95°C に加熱して再成型する．そしてこの場合には供試体をひつくり返してプランジャーに当て，再び試験する．もしその試験結果が前の安定度より低い値を示す場合には，その値が混合物の安定度に近い値を示しているのである．

(2) 粗いしかも稜角に富む骨材の噛合せによる固有安定度

このような高安定度がもつとも望ましいものであるが，これは前記 (1) の場合と混同し易いのである．かような場合には規格の平均値よりわずか余分のアスファルトの百分率と最少量の細骨材で以つて混合物を作り試験すれば区別出来る．若しその混合物の密度が充分でなく，しかも安定度が尚高い場合には明らかに前の混合物の方がましである．

(3) 圧縮した骨材の密度が高く空隙率の小さい場合でしかも高安定度

この様な高安定度は空気に対して脆く従つて龜裂および崩壊に対する抵抗力が少ない．これは一般にフイラー量過多とアスファルト量の欠乏に原因しているのであつて，細骨材とフイラー量を減少しアスファルト量の増加によつて解決され得るのであるが，この場合アスファルトが空隙を満たしすぎない様にするため圧縮した骨材の密度を小さくするよう注意する必要がある．

以上は主として供試体を作製し，試験室内において試験する方法を対象として述べたのであるが現場に於て舗装切取体に対する．いわゆる現場試験に対しても適用して一向に差支えない．こゝに一言つけ加えたいことは舗装が永くこの使命を保持すべき耐久度の如何を考慮に入れるべきであるという事である．即ち安定度および空隙率が満足であつても耐久度の点において欠陥の存するものは必ずしも良舗装とは云えないからである．

これがためには，指定限度内において使用アスファルトはなるべく軟かいものを又なるべく多くを使用すべきである．

V. 結　　論

以上現場において簡易に配合試験を行うときの安定度試験とも云うべきものについて一指針を得たわけであるが，これが広く一般に利用されるときは我が国の瀝青舗装技術が従来の面目を一新するものと信ずる．

本報告は一実験室研究であつて実際現場に利用して厳密な安定値の上下限を得るまでには相当の日数を要するであろう．しかもそれには実験室のみでは不可能であつて現場でどんどん利用してくれることが最も望ましいことである．現場におられる各位の御協力を特に希望する次第である．