

論 説 報 告

第 21 卷 第 11 號 昭和 10 年 11 月

環境
土木構造物
の安定度

方塊積構造物の安定度について

會員 工學士 工 藤 久 夫*

On the Stability of the Block Construction

By Hisao Kudō, C. E., Member.

要 旨

本文は簡單なる假定より出發して塊空積構造物の安定度を吟味する式を導出し、それによつて主として方塊積防波堤の如きものが、方塊の形狀並に其の組合せによつて安定度に著しき差異を生ずべきことを示したものである。

目 次

1. 單一體と塊並列體との差異	1
2. 等高塊 1 段積構造物の反力分布	2
(1) 張力を生じない條件より, (2) 張力を生ずるも最小塊には張力を生じない條件より,	
(3) 反力強度	
3. 構造物全系としての轉倒限界	6
4. 塊形狀及組合せによる多層塊空積の安定度の差異と頂部コンクリートの效果	8
5. 結 語	10

1. 單一體と塊並列體との差異

方塊空積の構造物が外力を受けた時には滑動、轉倒を起さず又反力は地耐力に比して安全であらねばならぬことは總ての他の構造物と同一である。

滑動に對する安定度の檢定法は單一體たると塊積體たるとを問はず同一であり、單一體の應力度は良く知られた

$$\sigma_{\max/\min} = \frac{N}{F} \pm \frac{M}{IV} \dots\dots\dots (0)$$

N : 垂直合力, F : 水平斷面積, M : 曲げモーメント, IV : 斷面係數

上式を以て算出されるが、塊空積では縦目地に働く抵抗力は接觸面に作用する壓力から生じた摩擦力があるのみで、彈性體内部の様に應剪力はなく、張力に對しても全く抵抗し得ない。

此の摩擦力は多くの場合塊自重よりも少いから連結のない塊は相互運動を起し、横力の増加するに伴つて塊は各外趾を支點として轉倒し、其の際轉倒の自由度を得る爲に外趾の間隔が増加する。之等の事象から並列塊全系を單一體と假定して (0) 式を用ふる事に可成の無理を生ずる譯である。そこで塊並列體の塊毎に分布する外力を推定し、これによつて生ずる接觸面間の摩擦力をも考慮に入れ、尙ほ反力度が外趾に大で内趾に減ずる變化に對しては應用力學上の假定を導入し、塊毎に (0) 式を適用する方法を導くことにした。

此の構造様式は嚴密には不靜定構造物であるから、従來は塊全系を單一體と見做して應力度の算定をなし其の間

* 内務技師 内務省大阪土木出張所勤務

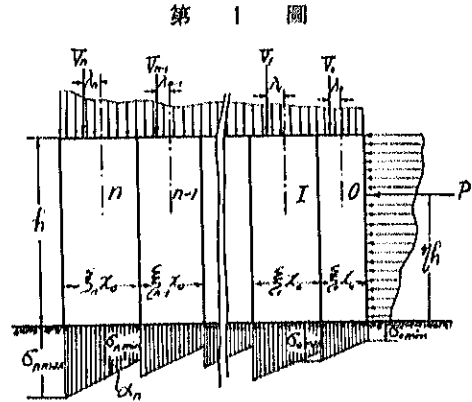
の曖昧性は安全率を以て補つて居たが、本文では力學上可能で然も簡単な假定から出發した塊積構造物の安定度を知るの方法を導き出し、模型の轉倒の實驗によつて其の解法の精度を検し、併せて理論的には省られなかつた方塊の形狀並に其の配列工合が構造物の安定度に及ぼす影響と、基礎補強方法をも吟味したものである。

2. 等高塊 1 段横構造物の反力分布

(1) 張力を生じない條件より

P は横力の合力で ηh の高さに働き V_r は r 塊に働く垂直力の合力で中心線から λ_r の距離の點に作用し、その右側にある時を正とする。

各塊が分擔する外力の總てを推定し得るとすれば、目地には摩擦係数があるのみで、塊間には彈性的の連結がないから塊毎に (0) 式を適用される。斯く算出した反力強度に比例して各塊の基礎面が壓縮され其の量に應じて各塊が微量でも傾くものとすれば、塊隣接面が完全に接觸して居る場合には、各塊の傾角が等しくなければならぬ。そこで適當の縮尺を用ひて描いた



反力圖の σ_{max} , σ_{min} を結んだ線が水平軸となす傾角 α は各塊に等しいことになる。從て無載荷又は等布載荷にては最大幅塊 ξ_{max} の横荷重側の反力が等になつても ξ_{max} 塊以下の各塊の右端の反力強度は零とはなり得ない。今 ξ_{max} 塊を取り出して考ふるに $\mu_{r,r-1}$ は r 塊と $r-1$ 塊の接觸摩擦係數とし、構造物の單位奥行に就て考ふるに、基礎單位面積に働く平均垂直力は

$$\omega_{max} = \gamma h + \frac{V_{max}}{\xi_{max} x_0} + \frac{H_1 \mu_{r,r-1} - H_r \mu_{r,r-1}}{\xi_{max} x_0} = \gamma h + (V_{max} + H_{max} \mu) / \xi_{max} x_0 \cdots \mu_{r,r-1} = \mu_{r,r+1}$$

$\xi_{max} = \xi$ の場合は

$$\omega_{max} = \gamma h + (V_{max} + \mu \sum_{r=1}^{r=n} P_r) / \xi_{max} x_0$$

と置けば良い。但し P_{max} は ξ_{max} 塊の負擔すべき横力を示し、 γ は塊の單位重量を表はすものとする。 ξ_{max} 塊の反力圖の傾角の正切は反力強度が直線變化をするものと $\sigma_{min} = 0$ の條件より

$$\tan \alpha_{max} = \frac{2\sigma_{max}}{\xi_{max} x_0}$$

であらねばならぬ。

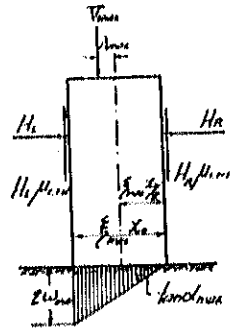
塊が完全に接觸して居れば傾角が相等しかるべきにより前説の通り構造物全系として將に張力を生ぜんとする場合には各塊の反力圖の正切は $2\omega_{max} / \xi_{max} x_0$ に等しくなければならぬ。そこで反力のみから生ずる r 塊の抵抗モーメントは

$$M_r = \frac{\xi_r^3 x_0^2 \omega_{max}}{6 \xi_{max}}$$

0 塊の負擔し得る横力を P_0 とし、0 塊の重心軸についてモーメントをとれば

$$-P_0 \eta h - V_0 \lambda_0 + \frac{\xi_0^3 x_0^2 \omega_{max}}{6 \xi_{max}} + \frac{1}{3} \xi_0 x_0 \sum_{r=1}^{r=n} P_r \mu_{0,r} = 0$$

第 2 圖



$$i. e. \quad M_0 = P_0 \eta h + V_0 \lambda_0 = \frac{\xi_0^2 x_0^2}{6 \xi_{\max}} \omega_{\max} + \frac{1}{2} \xi_0 x_0 \sum_{r=1}^{r=n} P_r \mu_{0,1}$$

0 が I 塊に寄りかゝつて I~n 塊の受ける横力の合力が外力の作用線上にあると假定すれば $\sum_{r=1}^{r=n} P_r$ は ηh の高さの働き I 塊の分撒荷重を P_1 とすれば

$$-P_1 \eta h - V_1 \lambda_1 + \frac{\xi_1^2 x_0^2}{6 \xi_{\max}} \omega_{\max} + \frac{\xi_1 x_0}{2} \sum_{r=1}^{r=n} P_r \mu_{0,1} + \frac{\xi_1 x_0}{2} \sum_{r=2}^{r=n} P_r \mu_{1,2} = 0$$

$$i. e. \quad M_1 = P_1 \eta h + V_1 \lambda_1 = \frac{\xi_1^2 x_0^2}{6 \xi_{\max}} \omega_{\max} + \frac{\xi_1 x_0}{2} \left\{ \sum_{r=1}^{r=n} P_r \mu_{0,1} + \sum_{r=2}^{r=n} P_r \mu_{1,2} \right\}$$

同様にして
$$M_x = P_x \eta h + V_x \lambda_x = \frac{\xi_x^2 x_0^2}{6 \xi_{\max}} \omega_{\max} + \frac{\xi_x x_0}{2} \left\{ \sum_{r=x}^{r=n} P_r \mu_{(x-1),x} + \sum_{r=x+1}^{r=n} P_r \mu_{x,x+1} \right\}$$

構造物全系として張力を生じない、換言すれば ξ_{\max} 塊の底に張力を生ぜず抵抗し得るモーメントは

$$\sum_{x=0}^{x=n} M_x = \eta h \sum_{x=0}^{x=n} P_x + \sum_{x=0}^{x=n} V_x \lambda_x = \frac{\omega_{\max} x_0^2}{6 \xi_{\max}} \sum_{x=0}^{x=n} \xi_x^2 + \frac{x_0^2}{2} \sum_{x=0}^{x=n} \xi_x \left\{ \sum_{r=x}^{r=n} P_r \mu_{(x-1),x} + \sum_{r=x+1}^{r=n} P_r \mu_{x,x+1} \right\} \quad \dots (1)$$

$$\eta h \sum_0^n P_x = P \eta h, \quad \therefore P = \frac{1}{\eta h} \sum_{x=0}^{x=n} M_x - \frac{1}{\eta h} \sum_{x=0}^{x=n} V_x \lambda_x$$

無散荷等高塊 1 段積の場合は $V_x = 0$ なる故に (1) 式より

$$\sum_{x=0}^{x=n} M_x = \eta h \sum_0^n P_x = \eta h P = \frac{\omega_{\max} x_0^2}{6 \xi_{\max}} \sum_{x=0}^{x=n} \xi_x^2 + \frac{x_0^2}{2} \sum_{x=0}^{x=n} \xi_x \left\{ \sum_{r=x}^{r=n} P_r \mu_{(x-1),x} + \sum_{r=x+1}^{r=n} P_r \mu_{x,x+1} \right\} \quad \dots \dots (1')$$

(1)' 式の最大塊 ξ_{\max} の位置による ω_{\max} の変化は

- a) ξ_{\max} が右端にあるときは $\xi_{\max} = \xi_0 = 1, \quad H_R = 0, \quad \therefore \omega_{\max} = \eta h - \sum_1^n P_r \mu_{0,1} / \xi_0 x_0$
 - b) ξ_{\max} が左端にあるときは $\xi_{\max} = \xi_n, \quad H_L = 0, \quad i. e. \omega_{\max} = \eta h + P_{\max} \mu_{(n-1),n} / \xi_{\max} x_0$
- 一般に $P_{\max} < \sum_1^n P_r$ 即ち ξ_{\max} が左端の時は右端の場合より ω_{\max} は大となる。
- c) ξ_{\max} が中間にある場合

$$H_R > H_L, \quad H_R - H_L = P_{\max}$$

$$P_{\max} \left(\eta h + \frac{1}{3} \mu \xi_{\max} x_0 \right) = \frac{\xi_{\max}^2 x_0^2 \eta h}{6} + \mu' \xi_{\max} x_0 H_R$$

即ち ξ_{\max} が横力の合力 P と反対側にある時は安定度高く、中間にあるとき之に並び、右端に配置するときは地耐力を最も利用し得ない結果となる。隣接塊間に傾く摩擦力は其の量相等しく、方向反対なるが爲に外力の一部を其處で消費する。外力の合力の着力點が基礎に於て中央 1/3 を外れても、地盤の荷重による變形が微少で轉倒を來す如き回轉角を生ぜぬ内は、 μ は極限值に達することなく其の量は静力學的には不定である。

今各塊の自重の作用線が底の中心を切る時、換言すれば横力を受けぬ時に $\mu = 0$ 、横力が増加して外力の合力が底の左端を切る時に μ は極限值に達し、其の間各塊の底に張力を生ぜず又は生じても著しくない場合は μ の増加度は直線變化をなし、 μ は簡単に靜止摩擦係數の ν 倍 ($\nu < 1$) と假定すれば

$$\sum_{x=0}^{x=n} M_x = \frac{\omega_{\max} x_0^2}{6 \xi_{\max}} \sum_{x=0}^{x=n} \xi_x^2 + \frac{x_0 \nu \mu}{2} \sum_{x=0}^{x=n} \left\{ \sum_{r=x}^{r=n} P_r + \sum_{r=x+1}^{r=n} P_r \right\} \xi_x$$

然して ν が小なる程反力分布に及ぼす影響は僅少で其の誤差は安全側になる。

(1) にて更に接觸摩擦力を無視すれば

$$\sum_{x=0}^{x=n} M_x = \eta h P = \frac{\omega_{\max} x_0^2}{6 \xi_{\max}} \sum_{x=0}^{x=n} \xi_x^2 \quad \therefore P = \frac{\eta x_0^2}{6 \eta \xi_{\max}} \sum_{x=0}^{x=n} \xi_x^2 \quad \dots \dots (1)'$$

上式より接觸地間に摩擦力のない時は定まつた形状の塊は配列の如何に拘はらず P は等しくなる。

(2) 張力を生ずるも最小塊には張力を生じない条件より

ξ_{min} 塊を取り出して考ふるに ξ_{min} 塊が中間にある時は基礎単位面積に働く平均垂直力は

$$\omega_{min} = \gamma h + \frac{V_{min}}{\xi_{min} x_0} + \frac{H R' \mu_R - H L' \mu_L}{\xi_{min} x_0}$$

$$= \gamma h + \frac{V_{min} + \mu P_{min}}{\xi_{min} x_0} \dots \mu_R = \mu_L \text{ の場合}$$

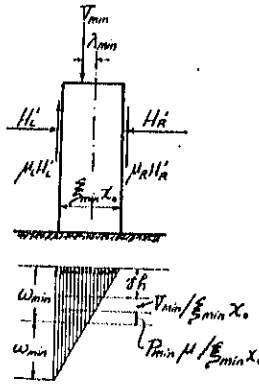
反力強度が直線變化をする事と $\sigma_{min} = 0$ の条件より

$$\tan \alpha_{min} = \frac{2\omega_{min}}{\xi_{min} x_0}$$

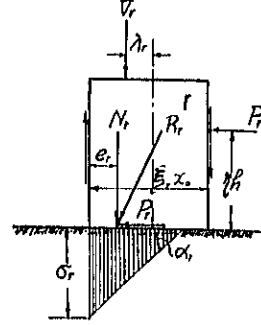
最少幅塊が横荷重側にある場合は

$$\omega_{min} = \gamma h + \frac{V_{min} - \mu \sum_{r=1}^n P_r}{\xi_{min} x_0}$$

第 3 圖



第 4 圖



と置けば良い。 ξ_{min} 塊の σ_{min} が零になる迄外力 P を負擔し、地盤の壓縮が前述の如く反力強度に比例すると假定されると、各塊の傾角が等しい条件より、塊が張力に耐へぬ場合には他の大なる塊底には張力を生ずるに至る。

任意の塊 r に就ては $e_r < \frac{\xi_r x_0}{3}$ であり、 $\sigma_r = 3e_r \tan \alpha_r$ であることから反力圖の面積 = $\frac{9e_r^2 \tan \alpha}{2}$

r 塊に働く垂直合力 $N_r = \gamma h \xi_r x_0 + V_r + \mu P_r$, 但し $N_0 = \gamma h \xi_0 x_0 + V_0 - \mu \sum_{r=1}^n P_r$, $\therefore \tan \alpha_r = \frac{3N_r}{9e_r^2}$

各塊の回轉角が等しかるべき条件より

$$\tan \alpha_r = \tan \alpha_{min} = \frac{2\omega_{min}}{\xi_{min} x_0}, \text{ i.e. } \frac{3N_r}{9e_r^2} = \frac{2\omega_{min}}{\xi_{min} x_0} = \frac{2(\gamma h \xi_r x_0 + V_r + \mu P_r)}{9e_r^2}$$

ω_{min} を代入し e_r に就て之を解けば

$$e_r = \frac{\xi_{min} x_0}{3} \sqrt{\frac{\gamma h \xi_r x_0 + V_r + \mu P_r}{\gamma h \xi_{min} x_0 + V_{min} + \mu P_{min}}} = \frac{\xi_{min} x_0}{3} \omega_r'$$

茲に ξ_{min} が中間にある場合は

$$\omega_r' = \sqrt{\frac{\gamma h \xi_r x_0 + V_r + \mu P_r}{\gamma h \xi_{min} x_0 + V_{min} + \mu P_{min}}}, \quad \omega_0' = \sqrt{\frac{\gamma h \xi_0 x_0 + V_0 - \mu \sum_{r=1}^n P_r}{\gamma h \xi_{min} x_0 + V_{min} + \mu P_{min}}}$$

$\xi_{min} = \xi_0$ の場合は

$$\omega_r' = \sqrt{\frac{\gamma h \xi_r x_0 + V_r + \mu P_r}{\gamma h \xi_0 x_0 + V_0 - \mu \sum_{r=1}^n P_r}}, \quad \omega_0' = 1$$

故に r 塊の最大反力強度

$$\sigma_r = 2\omega_{min} \omega_r', \text{ 但し } \sigma_r > 2\left(\gamma h + \frac{V_r + \mu P_r}{\xi_r x_0}\right) \text{ のみに成立す。}$$

\ast 塊の重心軸の周りの反力による抵抗モーメント

$$M_x' = \left(\frac{\xi_x x_0}{2} - e_r \right) N_x = \frac{1}{2} \xi_x x_0 N_x - \frac{1}{3} \xi_{\min} x_0 \omega_x' N_x$$

同じく塊接觸摩擦による抵抗モーメントは

$$M_x'' = \frac{\xi_x x_0}{2} \left\{ \sum_{r=x}^{r=n} P_r \mu_{(x-1)x} + \sum_{r=x+1}^{r=n} P_r \mu_{xx+1} \right\}, \text{ 但し } M_x'' = \frac{\xi_0 x_0}{2} \mu_{0,1} \sum_{r=1}^n P_r$$

が等しい場合の全抵抗モーメントは

$$\sum_{x=0}^{x=n} M_x = \sum (M_x' + M_x'') = \frac{x_0}{2} \sum_{x=0}^{x=n} \xi_x N_x - \frac{\xi_{\min} x_0}{3} \sum_{x=0}^{x=n} \omega_x' N_x + \frac{x_0}{2} \mu \sum_{x=0}^{x=n} \xi_x \left\{ \sum_{r=x}^{r=n} P_r + \sum_{r=x+1}^{r=n} P_r \right\}$$

外力によるモーメント $= \sum_{x=0}^{x=n} V_x \lambda_x + P \eta h$

$$\therefore P \eta h = \frac{x_0}{2} \sum_{x=0}^{x=n} \xi_x N_x - \frac{\xi_{\min} x_0}{3} \sum_{x=0}^{x=n} \omega_x' N_x + \frac{x_0}{2} \mu \sum_{x=0}^{x=n} \xi_x \left\{ \sum_{r=x}^{r=n} P_r + \sum_{r=x+1}^{r=n} P_r \right\} - \sum_{x=0}^{x=n} V_x \lambda_x \dots\dots\dots (2)$$

無載荷の場合は (2) 式の $V=0$ とし $N_x = \gamma h \xi_x x_0 + \mu P_x$ なることより

$$\begin{aligned} \sum_{x=0}^{x=n} M_x = \sum (M_x' + M_x'') &= \frac{\gamma h x_0^2}{2} \sum_{x=0}^{x=n} \xi_x^2 - \frac{\gamma h \xi_{\min} x_0^2}{3} \sum_{x=0}^{x=n} \omega_x' \\ &+ \frac{1}{2} \mu x_0 \sum_{x=0}^{x=n} \xi_x P_x - \frac{\xi_{\min} x_0 \mu}{3} \sum_{x=0}^{x=n} P_x \omega_x' + \frac{x_0}{2} \mu \sum_{x=0}^{x=n} \xi_x \left\{ \sum_{r=x}^{r=n} P_r + \sum_{r=x+1}^{r=n} P_r \right\} \dots\dots\dots (2) \end{aligned}$$

但し $\mu P_0 = -\mu \sum_{r=1}^{r=n} P_r$, i.o. $P = \frac{1}{\eta h} \sum_{x=0}^{x=n} M_x$, $\therefore e_r = \frac{\xi_{\min} x_0}{3} \omega_x'$, $\sigma_x = 2 \omega_{\min} \omega_x'$

ξ_{\min} が中間にある場合は $\omega_{\min} = \gamma h + \frac{\mu P_{\min}}{\xi_{\min} x_0}$

同横力側にある中は $\omega_{\min} = \gamma h - \frac{\mu \sum_{r=1}^n P_r}{\xi_{\min} x_0}$

ξ_{\min} が中間にある場合は $\omega_x' = \sqrt{\frac{\gamma h \xi_x x_0 + \mu P_x}{\gamma h \xi_{\min} x_0 + \mu P_{\min}}}$, $\omega_D' = \sqrt{\frac{\gamma h \xi_x x_0 - \mu \sum_{r=1}^n P_r}{\gamma h \xi_{\min} x_0 + \mu P_{\min}}}$

$\xi_{\min} = \xi_0$ の場合は $\omega_x' = \sqrt{\frac{\gamma h \xi_x x_0 + \mu P_x}{\gamma h \xi_0 x_0 - \mu \sum_{r=1}^n P_r}}$, $\omega_D' = 1$

塊間摩擦力を省略すれば $\mu=0$

$$P = \frac{\gamma x_0^2}{6 \eta} \sum_{x=0}^{x=n} \xi_x (3 \xi_x - 2 \sqrt{\xi_x \xi_{\min}}) \dots\dots\dots (2)''$$

$$\therefore c_x = \frac{x_0 \sqrt{\xi_x \xi_{\min}}}{3}$$

$$\sigma_x = 3 c_x \tan \alpha = \frac{2 \gamma h \sqrt{\xi_x \xi_{\min}}}{\xi_{\min}}, \quad N_x = \gamma \xi_x x_0 h, \quad M_x = \frac{\gamma h x_0^2}{6} \xi_x (3 \xi_x - 2 \sqrt{\xi_x \xi_{\min}})$$

(3) 反力強度

a) 全系として張力の起かない場合 即ち $\tan \alpha < \frac{3 \omega_{\max}}{\xi_{\max} x_0}$ の場合 $\tan \alpha_D = \frac{2 \omega_D}{\xi_{\max} x_0}$ と置けば、反力による塊

の抵抗モーメントは $M_r = \frac{\xi_r^2 x_0^2 \omega_D}{6 \xi_{\max}}$

故に x 塊のモーメントは一般に

$$M_x = -\frac{\xi_r^2 x_0^2}{6 \xi_{\max}} \omega_D + \frac{\xi_x x_0}{2} \left\{ \sum_{r=x}^{r=n} P_r \mu_{(x-1)x} + \sum_{r=x+1}^{r=n} P_r \mu_{xx+1} \right\} = P_x \eta h + V_x \lambda_x \dots\dots\dots (3)$$

各塊に (3) 式を適用すれば $(n+1)$ 個の ω_D を含んだ連立方程式を得られ、それより ω_D を消去すれば P_r を含

んだ n 元一次聯立方程式となり、それを解いて各塊の負擔横力 P_r を求められる。塊全系に就ては $\Sigma M=0$ なることより

$$P\eta h + \sum_{x=0}^{x=n-1} V_x \lambda x = \frac{\omega D \alpha_0^2}{\sigma \xi_{\max}} \sum_{x=0}^{x=n-1} \xi_x^2 + \frac{\alpha_0}{2} \sum_{x=0}^{x=n-1} \left\{ \sum_{r=x}^{r=n-1} P_r \mu_{(x-1),r} + \sum_{r=x+1}^{r=n-1} P_r \mu_{r,x+1} \right\} \xi_x$$

$$\text{or. } \omega D = \left[P\eta h + \sum_{x=0}^{x=n-1} V_x \lambda x - \frac{\alpha_0}{2} \sum_{x=0}^{x=n-1} \left\{ \sum_{r=x}^{r=n-1} P_r \mu_{(x-1),r} + \sum_{r=x+1}^{r=n-1} P_r \mu_{r,x+1} \right\} \xi_x \right] \times \frac{0 \xi_{\max}}{\alpha_0^2 \sum_{x=0}^{x=n-1} \xi_x^2}$$

$$\therefore \text{反力強度は } \sigma_{r,\max} = \gamma h + \frac{V_r}{\xi_r \alpha_0} + \frac{\mu P_r}{\xi_r \alpha_0} \pm \frac{\omega D \xi_r}{\xi_{\max}}, \quad \sigma_{\theta,\max} = \gamma h + \frac{V_0}{\xi_0 \alpha_0} - \frac{\sum_{r=0}^{x=n-1} P_r \mu}{\xi_0 \alpha_0} \pm \frac{\omega D \xi_0}{\xi_{\max}} \dots \dots \dots (3)$$

b) 全系として張力を生じた場合 i.o. $\tan \alpha > \frac{2\omega \min}{\xi_{\min} \alpha_0}$ の場合、 $\tan \alpha = \frac{2\omega \alpha^2}{\xi_{\min} \alpha_0}$ と置けば (2) 式を求めたと同様にして $e_r = \frac{1}{3\omega z} \sqrt{N_r \xi_{\min} \alpha_0}$ 、 x 塊の重心軸に對する反力によるモーメントは

$$M_x' = \left(\frac{1}{2} \xi_x \alpha_0 - c_x \right) N_x = \frac{1}{2} \xi_x \alpha_0 N_x - \frac{1}{3\omega z} \sqrt{N_x^3 \xi_{\min} \alpha_0}$$

塊の接觸摩擦によるモーメントは

$$M_x'' = \frac{\xi_x \alpha_0}{2} \left\{ \sum_{r=x}^{r=n-1} P_r \mu_{(x-1),r} + \sum_{r=x+1}^{r=n-1} P_r \mu_{r,x+1} \right\}, \quad \text{但し } M_0'' = \frac{\xi_0 \alpha_0}{2} \mu_{0,1} \sum_{r=0}^n P_r$$

$M_x' + M_x''$ より $(n+1)$ 個の ωz を含んだ方程式を得られ、それより ωz を消去すれば P_r を含んだ n 元高次聯立方程式が出来る。之を解いて P_r を求められるが、比較的組合せの少いものを除いては數値計算は頗る煩雜となる。然し斯かる計算は實際問題としては餘り重要のことではない。

μ が等しい場合の全抵抗モーメント $= \Sigma(M_x' + M_x'')$

$$= \frac{\alpha_0}{2} \sum_{x=0}^{x=n-1} \xi_x N_x - \frac{1}{3\omega z} \sum_{x=0}^{x=n-1} \sqrt{N_x^3 \xi_{\min} \alpha_0} + \frac{\alpha_0}{2} \mu \sum_{x=0}^{x=n-1} \left\{ \sum_{r=x}^{r=n-1} P_r + \sum_{r=x+1}^{r=n-1} P_r \right\} \xi_x = P\eta h + \sum_{r=0}^{r=n-1} V_r \lambda r$$

$$\text{i.o. } \omega z = 3 \left[\frac{\alpha_0}{2} \sum_{x=0}^{x=n-1} \xi_x N_x + \frac{\alpha_0}{2} \mu \sum_{x=0}^{x=n-1} \left\{ \sum_{r=x}^{r=n-1} P_r + \sum_{r=x+1}^{r=n-1} P_r \right\} \xi_x - P\eta h - \sum_{x=0}^{x=n-1} V_x \lambda x \right] \frac{\sum_{x=0}^{x=n-1} \sqrt{N_x^3 \xi_{\min} \alpha_0}}{\sum_{x=0}^{x=n-1} \xi_x N_x}$$

$$\text{最大反力強度は } \sigma_r = 3e_r \tan \alpha = 2\omega z \sqrt{\frac{N_r}{\xi_{\min} \alpha_0}} \dots \dots \dots (4)$$

$$\text{其の有効底幅は } 3e_r = \frac{1}{\omega z} \sqrt{N_r \xi_{\min} \alpha_0}$$

を以て表はさるゝ可は張力に面へない單一體の場合と同様である。

3. 構造物全系としての轉倒限界

塊の反力の合力が底の中央 $1/3$ を外れても地盤の荷重による變形の微少な場合には、合力の作用線が外趾を外れて初めて轉倒し、其れ迄は各塊の自頂と隣接塊間の摩擦力によつて

全系としての轉倒を避ける。第 5 圖に於て載荷なき場合を取扱ふに

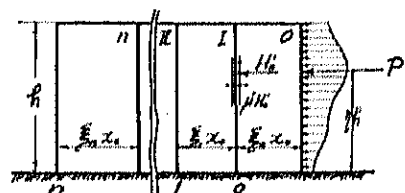
$$P = \text{横力の合力}, \quad M = P\eta h = \text{外力によるモーメント}$$

O 塊の外趾でモーメントをとれば、O 塊の抵抗し得べきモーメントは

$$M_0' = \frac{\gamma h \xi_0^2 \alpha_0^2}{2}$$

1~n 塊で抵抗すべきモーメントは

第 5 圖



$$M_{1-n} = M - M_0' = P\eta h - \frac{\gamma h \xi_0^2 x_0^2}{2}$$

○はI塊に寄りかかり傾角の小なる間は、横合力の作用線は外力のそれと同高と假定すれば、 H_0' は ηh の高さに働き其の爲に生ずる摩擦力はI塊の回転を遮る。I塊の抵抗し得るモーメントは同じく外趾1で考ふれば

$$M_1' = \gamma h \frac{\xi_1^2 x_0^2}{2} + \mu' H_0' \xi_1 x_0, \quad H_0' \eta h = M - M_0' \quad \therefore H_0' = \frac{M - M_0'}{\eta h}$$

但し μ' = 塊間の最大摩擦係数にて各塊に共通

同様にして
$$H_n = \frac{1}{\eta h} \left(M - \sum_{r=0}^{r=n} M_r' \right)$$

茲に M_r' は r 塊の將に轉倒せんとする時の負擔せるモーメントを示す

$$\therefore M_n' = \gamma h \frac{\xi_n^2 x_0^2}{2} + \frac{1}{\eta h} \left(M - \sum_{r=0}^{r=n-1} M_r' \right) \mu' \xi_n x_0$$

即ち塊系が將に轉倒せんとする時に負擔せるモーメントは

$$\sum_{n=0}^{n=n} M_n' = \frac{\gamma h x_0^2}{2} \sum_{n=0}^{n=n} \xi_n^2 + \frac{\mu' x_0}{\eta h} \sum_{n=1}^n \left(M - \sum_{r=0}^{r=n-1} M_r' \right) \xi_n$$

$M = P\eta h$ を上式に等置すれば轉倒荷重を求められ

$$\therefore P = \frac{\gamma x_0^2}{2\eta} \sum_{n=0}^n \xi_n^2 + \frac{\mu' x_0}{\eta^2 h^2} \sum_{n=1}^n \left(M - \sum_{r=0}^{r=n-1} M_r' \right) \xi_n \dots (5)$$

上式の轉倒荷重の第1項は自重によるもの、第2項は摩擦による抗倒力を示す。

今木材を用ひて幅 10, 7.5, 5 及 2.5 cm, 高 15 cm, 奥行 20 cm の模型の組合せにより全幅 10 cm のもの 6 種を作り $\eta = 0.8$ 即ち 12 cm の所に、中間に滑車 (損失 1.8%) を用ひて横荷し (第 6 圖参照) 引き倒しを行つた實驗結果と (5) 式による轉倒荷重とは良く一致するを認めた。

此の木材の $\gamma = 0.55 \text{ gr/cm}^3$, $\mu' = 0.4$

であるから數値計算の例として下表の (f) の場合を示すに

$$\xi_1 = 1, \quad \xi_2 = 2$$

$$M_0' = \frac{\gamma h \xi_0^2 x_0^2}{2} = \frac{0.55 \times 15 \times 2.5^2}{2} = 25.8 \text{ gr. cm.}$$

$$M_1' = \gamma h \frac{\xi_1^2 x_0^2}{2} + \frac{M - M_0'}{\eta h} \mu' \xi_1 x_0 = 25.8 + \frac{(M - 25.8)}{12} \times 0.4 \times 2.5 = 23.65 + 0.0834 M$$

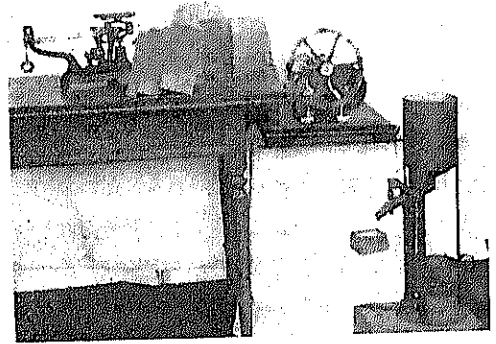
$$M_2' = \frac{\gamma h \xi_2^2 x_0^2}{2} + \frac{M - M_0' - M_1'}{\eta h} \mu' \xi_2 x_0 = \frac{0.55 \times 15 \times 5^2}{2} + \frac{M - 25.8 - 23.65 - 0.0834 M}{12} \times 0.4 \times 5 = 94.76 + 0.1525 M$$

$$\sum M_n' = 25.8 + 23.65 + 0.0834 M + 94.76 + 0.1525 M = 144.21 + 0.2359 M$$

$$\therefore P = \frac{\sum M_n'}{\eta h} = \frac{144.21}{12} + 0.2359 P, \quad \text{i.e. } P = 15.7 \text{ gr.}$$

方塊の奥行は 20 cm なるが故に $P = 15.7 \times 20 = 314 \text{ gr.}$ これは幅 10 cm の單一體では

第 6 圖



$$P = \frac{\gamma x_0}{2\eta} l = \frac{0.55 \times 10^3}{2 \times 0.8} \times 20 = 688 \text{ gr.}$$

なるが故にその 45.7% に當り、上掲の實測値は 310 kg であるから計算値 314 gr を 1 とした實測値% は 98.8% となり良く一致するを認められる。斯くして求めたものを一括表記すれば第 7 圖となる。但し實測値は滑車の損失補正済のものである。

第 7 圖

	a	b	c	d	e	f
方塊の位置						
實測値 P ^測	105	467	281	385	561	310 kg
> 1 %	100	672	40.0	553	807	44.6%
計算値 P ^計	688	434	269	378	558	310 kg
計算値 P ^計 / 實測値 P ^測	101	107.5	103	102	100.5	98.8%

4. 塊形状及組合せによる多層塊空積の安定度の差異と頂部コンクリートの効果

多層塊空積の場合には最上層に働く横力 P 及び垂直荷重 Γ を求め、前掲の方法により反力度を算出し、次層には其の反力度を垂直載荷 Γ' とし、其の上層及び自體に働く横力を考慮せるモーメントより換算せる横力 P' を求めて安定度を檢し、順次此の方法を繰返すが良い。然し此の場合には後掲の様な注意を必要とする。

最上層が次層と鋼材を以て充分連結したコンクリート造である場合には、2 段以下の單塊塊に比し兩者は稍々單一體として抵抗するものと見做されるが故に、略算法として其の部分に對して (0) 式を以て水平田地を有する單一體として反力を算出し之を第 2 段の垂直荷重と考へて時上記の方法を繰返す事が出来る。

然して偏位の少い載荷の時でも、地盤の耐力は大になる必要はあるが轉倒に對しては安全になつて来るので、若しも載荷が頂部コンクリートの如く剛性の大なるもの塊層の傾角を制限する場合には其の効果は著しく、防波堤の如く上部に大なる横力を受け個々としては外力に抵抗し得ない小塊を用ふる場合の如きは頂部コンクリートを以て押へることは絶対に必要となつて来る。

今例を以て計算法を示すに

例 1. 2 塊並列 1 段積 (第 8 圖 2)

方塊は全部水中にあり $\gamma = 1.3 \text{ t/m}^3$ の場合、等布横力を受け構造物全系として張力を生じない範圍の p を求む

$\eta\mu = 0.2$ の場合には $\xi_{\max} = \xi_0 = 1$ なるにより

$$(3) \quad M_0 = \frac{\xi_0^3 x_0^3 \omega n}{6 \xi_{\max}} + \frac{1}{2} \xi_0 x_0 \sum_{r=1}^{n-1} P_r \mu_{01} = P_0 \eta h + \Gamma_0 \lambda_0 = \frac{4.05^2}{6} \omega n + \frac{4.05}{2} P_1 = (P - P_1) 4 \dots (1)$$

$$M_1 = \frac{\xi_1^3 x_0^3 \omega n}{6 \xi_{\max}} + \frac{\xi_1 x_0}{2} \left[\sum_{r=1}^{n-1} P_r \mu_{11} + \sum_{r=2}^{n-1} P_r \mu_{12} \right] = P_1 \eta h + \Gamma_1 \lambda_1 = \frac{4.05^2}{6} \omega n + \frac{4.05}{2} P_1 \times 0.2 = 4 P_1 \dots (2)$$

(1) より $\omega n = 1.405 P - 1.015 P_1 \dots (1)'$

(2) より $\omega n = 1.917 P_1 \dots (2)'$

(1)' = (2)' i.e. $P = 2 P_1, P_1 = 0.5 P = P_0, \therefore \omega n = 1.315 \times 0.5 P = 0.658 P$

$\sigma_{\min} = 0$ たるには (3)' 式 (0.1C) より

$$\gamma h + \frac{\Gamma_0}{\xi_1 x_0} = \frac{\sum_{r=1}^n P_r \mu}{\xi_1 x_0} \quad \therefore \omega n = 1.3 \times 8 = \frac{0.5 P \times 0.2}{4.05} = 0.658 P = 0$$

$\therefore P = 15.2 \text{ t} \quad \text{i.e. } \eta = 15.2/8 = 1.9 \text{ t/m}^2 \quad \omega n = 0.658 P = 10.0, P_1 = 0.5 \times 15.2 = 7.6 \text{ t}$

(3) 式より $\sigma_{\max} = 20 \text{ t/m}^2, \sigma_{\min} = 0, \sigma_{1\max} = 20.8 \text{ t/m}^2, \sigma_{1\min} = 0.8 \text{ t/m}^2$

$\nu\mu=0.6$ の場合には同様にして

$$\begin{aligned} P &= 17.8t, \\ P &= 2.23t/m^2, \\ \omega_D &= 9.8 \\ \sigma_{0max} &= 20t/m^2, \\ \sigma_{0min} &= 0, \\ \sigma_{1max} &= 20.8t/m^2, \\ \sigma_{1min} &= 2.6t/m^2 \end{aligned}$$

となり。此の例では $\nu=1/3$ は $\nu=1$ のときの 85% に過ぎぬので塊の掘付を正しく、摩擦力を充分働かし得る様にする事は實際問題として極めて大切な事が知られる。

例 2. 頂部単塊, 下部 2 塊並列 2 段階 (第 8 圖 5c)

構造物全体として吸力を生じない範囲の等布荷重強度 p と反力を求め。但し $\gamma=1.3t/m^3$, $\mu'=0.2$ とす。

第 1 段は単塊なる故に

$$\sigma_{\min}^{\max} = \gamma h_1 \pm \frac{6p}{b^2} \frac{h^2}{2} = 1.3 \times 2 \pm \frac{6 \times p}{8.1^2} \frac{2^2}{2} = 2.6 \pm 0.183p \dots (a)$$

第 2 段の底で考へた外力によるモーメント $= \frac{\rho h_1^3}{3} + \rho h_1 h_2 + \frac{\rho h_2^3}{2}$

然して第 2 段は第 1 段の反力を載荷として考へる場合は上式の第 2 項以下を取扱へば良い。

i.e. $M' = \rho h_1 h_2 + \frac{\rho h_2^3}{2} = 12p + 18p = 30p$

故に $P = \rho(h_1 + h_2) = 8p$ を $\eta h = M'/P = 3.75$ m の高さに受けたものと同一条件となる。

$\xi_{\max} = \xi_0 = 1$ ならば例 1 と同様に

M_0 より $2.73 \omega_D + 0.405 P_1 = 3.75 P - 8.75 P_1 + 0.25 p$, $\omega_D = 1.375 P - 1.523 P_1 + 0.0915 p \dots (1)$

M_1 より $2.73 \omega_D + 0.405 P_1 = 3.75 P_1 + 0.25 p$, $\omega_D = 1.226 P_1 + 0.0915 p \dots (2)$

(1)(2) より ω_D を消去すれば $P = 2P_1$, $\therefore P_1 = P_0 = 0.5 P = 4p$

i.e. $\omega_D = 1.226 \times 0.5 \times 8p + 0.0915 p = 4.99p$

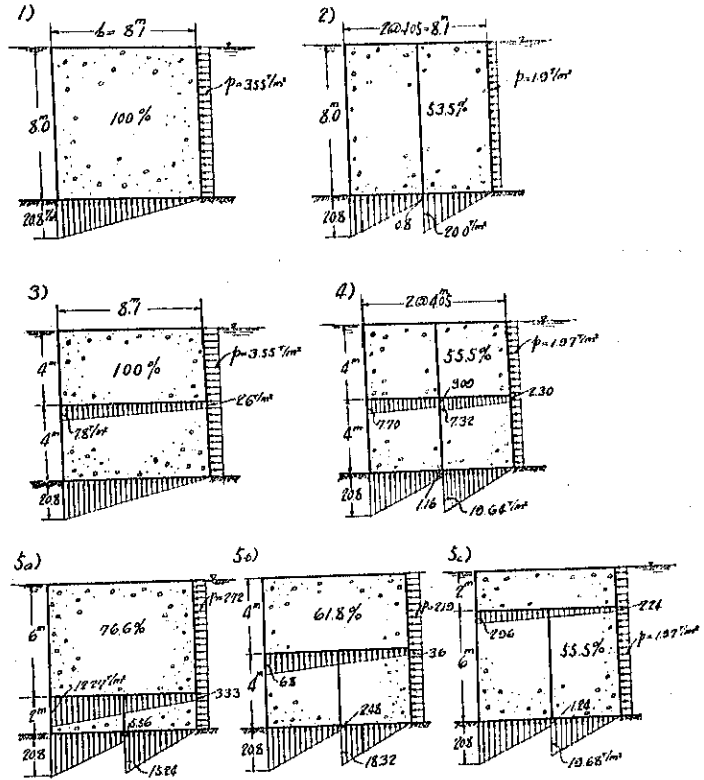
第 2 段の $\sigma_{\min} = 0$ の条件より $1.3 \times 6 + 2.6 - \frac{0.183p}{2} - \frac{4p}{4.05} \times 0.2 - 4.99p = 0 \therefore p = 1.97 t/m^2$

(3) 式より $\sigma_{0max} = 19.68 t/m^2$, $\sigma_{0min} = 0$, $\sigma_{1max} = 20.8 t/m^2$, $\sigma_{1min} = 1.24 t/m^2$

上式で ΣV の檢算による計算の誤差は 0.1% なり (計算尺使用による) 頂部コンクリートの反力は (a) 式より

$\sigma_{max} = 2.96 t/m^2$, $\sigma_{min} = 2.24 t/m^2$

第 8 圖 張力を生ぜざる条件より求めた塊組合せによる安定度の差異例



水平目地のみが多層塊積は単一體と同様の方法で反力を算出し得られるが、水平目地では應剪力なく且だ摩擦力のみに抵抗するが故に、塊層間の滑動抵抗は其れ丈減じて来る。

縦目地のある時は各塊の幅と高さの比の小なる。即それ自身にて轉倒し易いものを用ふる程安定度は低い。然し幅高比の大なる平たい塊を用ふる時は所要の高さの構造物を作る爲には層数の増加を來すから、方塊製作時の形状の誤差と特に水中工事にては水中基礎床均の不均整とにより、比較的良い基礎の時は多層塊の水平目地の一部には空隙を生ずる等の施工上の缺點を生ずる惧がある爲、設備の都合上塊積を選ばねばならぬ場合には、最も確實な単一體に近づく様心掛けねばならぬ。

第 8 圖 に示せる 7 例は $\mu=0.2$, $\gamma=1.3 \text{ t/m}^3$ として防波堤天端幅 8.1m, 高 8.0m の場合に塊の組合せにより張力を生じない程度の最大横等布荷重を前記の方法で計上したので上述の結果が一見して明かとなる。

且だ層数が増加する程、下層塊は上段塊により變位に對する自由度を制限せらるゝ爲に、上記の假定が精密には成り立ち難く、2 塊並列 (第 8 圖 2) に對し、3 塊並列 2 層積の方が幾分安定度が大になるが如きは、塊積構造技術の常識にそはない結果となるが、その精度は此の程度では明かにする事は出来ない。

以上の説明の反力分布状況より知る如く、地耐力の不足の所に多塊式を作るときは、底塊の各外趾附近の基礎補強法には充分留意するを要し、之が単一體を採用したときとの構造上の重大な差異となる。

又塊積塊の場合は単一體と同一強度の横荷を受けた時は最大反力強度は大となり、それが各塊の外趾で起る爲に地耐力の不充分の所に方塊積防波堤を築造すれば、兩塊造の場合よりも沈下量が大きくなると云ふ現象も説明する事が出来る。

5. 結 語

轉倒に對する安定度は単一體である場合に比し、塊の組合せ其合により著しき差異を生ずべきを知つたが、斯かる構造物は設計常法として単一體と考へた場合に張力を生ぜぬ事を第 1 條件として居るので、安全率は普通 3 以上になつて居る。従て塊積様式とした爲に単一體の安全率の 1/2 になつても、構造物としては 1.5 以上の安全率を有する譯である。

基礎地盤の良好なときは斯かる構造物は滑動に對する安定度が工費の關係上比較的少くて我慢をする程度に済ます事が多いから、災害は多くは滑動によつて生ずる爲、其れより安全率の大なる轉倒によつて破壊さるゝ危険が少いの塊積構造物の安定度の算出法には、特別の注意を加へなくても重大な支障が無かつたものである。

海中工事の如く、工事の簡單と設備費用の低廉なる點より方塊積を多く採用せられる場合には、何等かの方法で其の安定度を更に吟味すべきであり、以上の推論より工事設備の許す丈單一體に近い構造を採用する方が望ましい。

上記の導式は現今長足の進歩をなして居る弾性基礎とから、又は基礎地盤の土性力學上には立脚せず、應用力學上の可成複雑な假定により組立てたもので絶對的の解法とは考へられないから、斯道發達の階程として拙稿に對する御教示を賜はれば筆者のみの幸福ではない。