

附表-1.

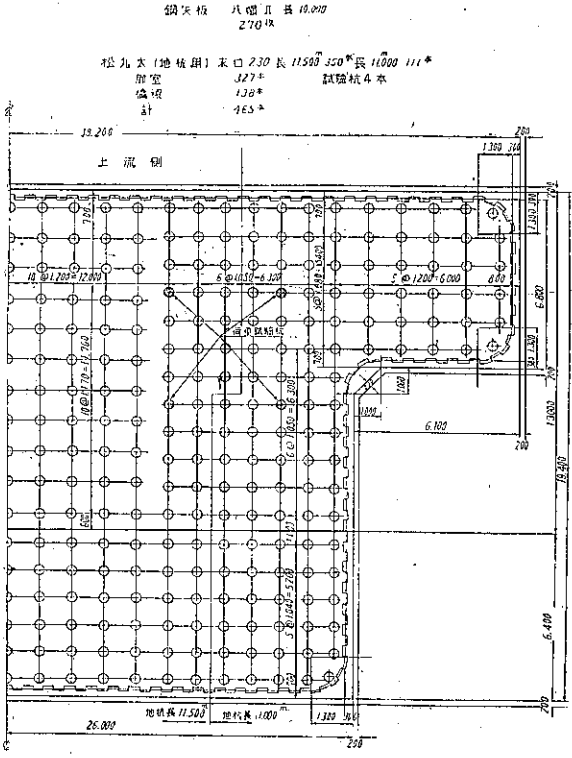
試 験 杭 調 査 表					
工 事 者				地 盤 の 状 況	
工 事 施 行 者					
工 事 箇 所					
試験杭打込時期	昭和 年 月				
工 事 概 要					
基 礎 工 概 要	基礎面積			土 質 調 査 圖 (杭の先端の位置及 び地下水位の位置)	
	杭の本数				
	試験杭の位置				
	設計荷重	全 荷 重			
試 験 杭	材 質	設計一本當り最大			
		木			
	形 状 寸 法	長	元口		表口
		断面形状			
重量	先端の構造				
(特殊なるものは別圖及び説明を付せられたし)					
試 験 成 績	杭 打 機	名 稱			
		打込方法			
		錘の重量			
		壓力			
打 止 沈 下		落 下 高			
		打 撃 數			
		沈 下 量	總沈下量=	平均一回沈下量	
		(打初より打止に至る間に於ける沈下打撃回数曲線等あれば必ず附せられたし)			
載 荷 試 験	時 期	自 年 月 日 至 年 月 日			
	載 荷 方 法				
	最大載荷重量				
	沈 下 重				
	荷重撤去後の浮上量				
	(荷重沈下量時間の關係あれば必ず付せられたし)				
簡 要					

- 1 杭先端の位置を地質調査圖に記入せられたし
- 2 土質に関する種々のデータ及びそれ等の調査方法、調査機械を概要欄に書き入られたし
- 3 試験杭を基礎杭として使用せる場合にはその位置を示す平面圖を付せられたし
- 4 斜方向の打込、水射法を用ふる等特殊の場合はその旨特記せられたし
- 5 其の他の調査結果あれば付せられたし

委員會の目的に必要と認められる論文報告を摘出し全国の土木科學生の手により抄録せしめた。第二部に於ては附表並に附圖の如き調査票を作成し地方委員に依頼し其の協力により全国各地に於て行はれた杭の支持力に關する實驗資料約 150 を得ることが出來た。

昭和 14 年 6 月委員長(青山 士君)及第二部主査(匹田敏夫君)の更迭により更に委員會 5 回及幹事會數回を開催し取まとめの段階に入り幹事作成案に就き數度の検討を行ひたり。

附圖-3.



杭の支持力公式調査報告

I. 公式の調査

主として 1925~1935 年に到る 10 年間の各國文獻を調査した。引用した文獻は下記の通りである。

雜誌類

- | | |
|---|---|
| Engineering News-Record | Civil Engineering |
| Proceeding of A.S.C.E. | Concrete and Constructional Engineering |
| Bulletin of A.R.E.A. | Canadian Engineer |
| Journal of The Western Society of Engineers | Institute of Civil Engineering |
| Engineering | Beton und Eisen |
| Bauingenieur | Bautechnik |
| Zentralblatt der Bauverwaltung | Schweizerische Bauzeitung |
| Génie Civil | Annales des Pont et Chaussées |
| 土木學會誌 | 建築學會誌 |
| 基礎研究 | 鐵道省土質調査報告 |

シビル

工學研究

土木工學

水利と土木

滿洲技術協會誌

書籍類

Dean: Piles and Pile Driving

Dörr: Die Tragfähigkeit der Phähle

Nökkentved: Berechnung von Phalbrasten

Bierbaumer: Vorschläge für die Beurteilung von Flach- und Phahlgründungen

Jacoby, H. S. & Davis, R. P.:⁹ Foundation of bridge and building

Hool and Rinne: Foundation, Abutments & Footings

Fouler, C. E.: A practical treatise on engineering and building foundation

Simpson: Foundations

Krey: Erddruck, Erdwiderstand und Tragfähigkeit des Baugrundes

Franzins: Der Grundbau

Williams, C. C.: The design of masonry structures and foundations

Baher, I. O.: A treatise on masonry construction

Charles Terzaghi: Science of foundation

鶴見一之: 土木施工法

谷口三郎: 土木施工法

原口忠次郎: 土と杭の力學

渡邊 賢: 地質工學

山内喜之助: 基礎工學

上記諸文獻を見ると、いづれも未だ杭の支持力公式について信頼すべき結論を與へて居らない。以上諸文獻に引用されて居る公式を蒐録すれば表-1 の如くである。

表-1.

著者	公 式	備 考
Sander	$W = \frac{Rh}{n\tau}$	$n=8$
Engineering News	$W = \frac{Rh}{n(\tau+2.54)}$	落 錘 $n=6$
	$W = \frac{Rh}{n(\tau+0.25)}$	汽 錘 $n=6$
Brix	$W = \frac{R^2Qh}{n\tau(R+Q)^2}$	$n=2$
Eytelwein	$W = \frac{R^2h}{4(R+Q)} + (R+Q)$	或は Weisbach Dutch 公式と呼ばれる
Dutch	$W = \frac{\alpha Rh}{\tau}$ 但 $\alpha = \frac{R+e^2Q}{R+Q}$	α は杭に傳へられる有效係數

表-1. (續 き)

著 者	公 式	備 考
Hiley (1922)	$W = \frac{\alpha + Rh}{\tau + 0.12}$ 但 $\alpha = \frac{R + e^2 Q}{R + Q}$	c は杭, 錘, 地盤の弾性壓縮の和
Rausch	$W = \frac{\alpha Rh}{n(\tau + c/2)}$ 但 $\alpha = \frac{R + e^2 Q}{R + Q}$	$n=3$, c は抗及地盤の弾性壓縮の和
Wilcoxon	$W = \frac{Rh}{\tau^m} = \frac{0.858 Rh}{(0.39t)^m}$ (ton-cm 單位)	$m=0.6 \sim 1.0$ 但, 吋-封度單位
Hartmann	$W = \frac{\alpha'(h_1 - h_2)N}{\tau_1 - \tau_2}$ $\alpha' = 0.85$ 引揚打 $= 0.90$ 機械打 $= 0.95$ 蒸汽錘	t_1 : 一落高 h_1 に相當する N 回打撃による貫入量 t_2 : 一落高 h_2 に相當する N 回打撃による貫入量
Redtenbacher	$W = -\frac{E \cdot F \cdot \tau}{l} + \sqrt{\frac{2R^2 h E F}{l(R+Q)} + \left(\frac{E F \tau}{l}\right)^2}$	
Weisbach	$W = -\frac{E F \tau}{l} + \sqrt{\frac{2R^2 h E F}{\tau} + \left(\frac{E F \tau}{l}\right)^2}$	
Stern	$W = \frac{1}{\alpha} \tau \left\{ \sqrt{1 + \frac{2\alpha}{\tau} \left[(R+Q) + \frac{Rh}{\tau} \frac{\gamma}{(R+Q^2)} \right]} - 1 \right\}$ $\alpha = \frac{l}{E F}$, $\gamma = [RQ(1+\eta^2) + (R-\eta Q)^2]$	
Hurtzig	$\tau = \frac{hR}{W} - \frac{P}{1300}$, $P = \frac{W}{n}$	h, t は mm
Rankine	$W = -\frac{2E F h}{\tau} + \sqrt{\frac{4E F R h}{l} + \left(\frac{2E F h}{l}\right)^2}$	
Ossant	$W = \frac{E F}{l} \left[-\frac{\tau}{2} + \sqrt{\frac{E F R h}{1 + (l+Q)/RQ} + \frac{l^2}{4}} \right]$	
Berg	$W = \frac{1}{2} \frac{Rh}{10\tau} \sim \frac{3}{4} \frac{Rh}{10\tau}$	
Alpine	$W = \frac{1}{3} [80(R + 0.228\sqrt{h}) - 1]$ 静荷重 $W = \frac{1}{10} [80(R + 0.228\sqrt{h}) - 1]$ 振動荷重	h は呎
Trautwine	$W = \frac{1}{2} \sim \frac{1}{12} \left(\frac{51.5 R^2 \sqrt{h}}{1 + \tau} \right)$	h は呎, t は吋

II. 公式の検討

1. 動力學的公式の検討

支持力公式が動力學的及靜力學的に由來する二型式で表されて居る事は既に周知の所であつて、動力學的公式の多くは

R : 錘の重量	Q : 杭の重量	F : 杭の斷面積
l : 杭の長さ	h : 錘の落高	τ : 杭の錘撃による貫入量
e : 錘と杭との反撥係數	E : 杭の彈性係數	W : 杭の貫入に對する抵抗

とし、更に錘撃により杭に傳達される有效エネルギーの割合、或は有效係數を α とすれば

$$\alpha = \frac{R + e^2 Q}{R + Q}$$

元から錘の打撃による仕事と杭の爲された仕事との間に次の關係がある。

$$\alpha R h + (R + Q) \tau = \frac{1}{2} \cdot \frac{W^2}{EF} + W \tau \dots \dots \dots (1)$$

又は

$$W = \frac{EF}{l} \left\{ -\tau + \sqrt{\tau^2 + \frac{2\alpha R h l}{EF} + \frac{2l\tau}{EF} (R + Q)} \right\} \dots \dots \dots (2)$$

上式は動力學的公式の根本を爲し、之から色々の假定の下に各種動力學的公式が誘導されて居る。(1) 式を見る
と熱音響等になるエネルギーの損失を除いて、單なる衝突と見る限り如何にも式の形だけは正しいやうである。

しかし杭の支持力を算定するものとしては次のやうに疑しい點がある。

(イ) 反撥係數に就て

完全彈性衝突では $e=1$ 、完全非彈性衝突では $e=0$ とし動力學的公式では時に $e=1$ 、或は $e=0$ にとつて公式を簡單化して居る。前者の例は Kreuter であり、後者の例は Dutch, Eytelwein であり、時には $e=0.5$ ととり、 $e=0.25$ に取つた例は Stern に見られる。

一般に材質によつて多少異なるが木材と錘との反撥係數は 0.5 前後、又木材が充分水を含んで居ると 0.5 以下になる。然し之等の値は何れも木材と錘との單純衝突の場合であつて、錘、木材、及び之を取囲む種々な物理的性質を有する土質との少くとも三相系の衝突に在つては單純な衝突とは異なる見掛の反撥係數を與へる様になる。その値は次の通である。

天然砂質系土質に對し	0.15~0.20
天然沈泥質系土質に對し	0.10~0.13
天然粘土質系土質に對し	0.08~0.10

一般に杭打に於ては錘重は杭重に比して大なるが普通であるので若し單なる杭と錘のみの單純衝突なりとすれば重錘の衝突後の速度は恒に下向であるべき筈であるが、事實は我々の經驗する如く錘が上方に反撥するを見るのは、三相系の衝突として考へねば解決出来ぬことである。又杭打の末期になつて錘撃による貫入量が少くなると反撥は前記見掛の反撥係數に接近して來ることも實驗(基礎研究第7輯)によつて知ることが出来る。従つて動力學的公式は先づ反撥係數に於て修正が加へられねばならない。

(ロ) 有效係數 α に就て

$$\alpha = \frac{R + e^2 Q}{R + Q}$$

であるから、 e を一定とすれば有効係数は $R:Q$ によつて變化を受けることは云ふ迄もない。 $R>Q$ なる場合に $R:Q$ の各値に對する有効係数を圖示すれば圖-1 の通りである。然し此の有効係数も錘と杭との衝突に際して杭のみに傳へられる有効エネルギーを示すものであつて、實際三相系の衝突にあつては杭のみならず、杭断面以下並びに杭周の土粒子も杭と共に運動するから、有効係数は杭及び杭周の地盤に對するものでなければならない。一例として $R:Q=1$ なる場合の杭及杭と地盤とに傳へられる有効係数を示すと圖-2 のやうになり之と前者を比較すれば杭のみに對する有効係数が甚しく小なることを知るであらう。

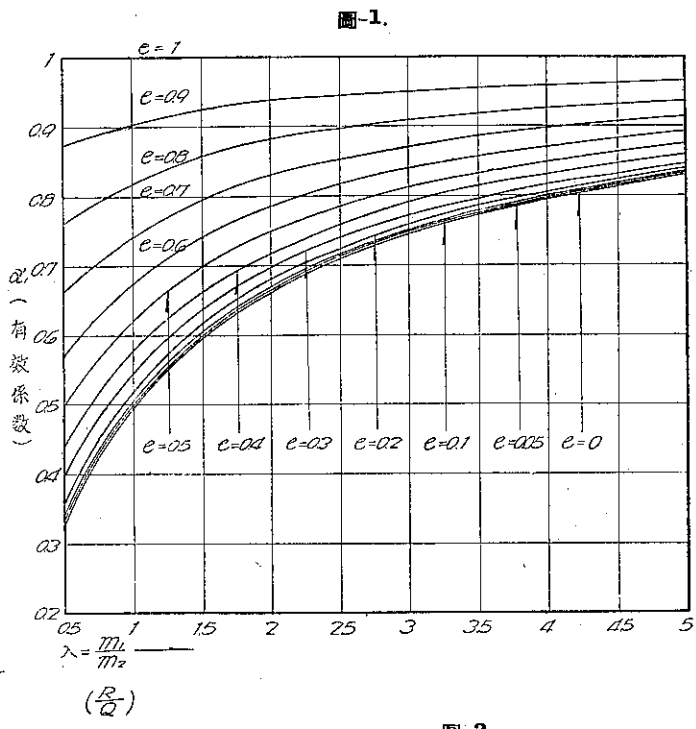


圖-1.

(ハ) (1) 式に就て

(1) 式に於て左邊第 2 項は衝突後錘と杭とが共に同一速度で貫入することを示すものであるが、實際の衝突時の現象(基礎研究第 7 輯)を調べて見ると、砂層は勿論、粘度質系土質でも少くとも打込の末期に當つては錘は反撥し、杭のみが衝突後持てる速度を以て地盤中に穿入することが瞭である。又杭と錘との反撥係数が零ならざる限り斯の如きことは不可能である。従つて (1) 式及 (2) 式は次の如く書きかへらるべきである。即ち

$$\alpha R h + Q \tau = \frac{1}{2} \cdot \frac{W^2 l}{EF} + W \tau \dots \dots (3)$$

或は

$$W = \frac{EF}{l} \left\{ -\tau + \sqrt{\tau^2 + \frac{2\alpha R h l}{EF} + \frac{2l\tau Q}{EF}} \right\} \dots \dots (4)$$

が従來の動力學的公式の出發點となるべきであらう。此際の有効係数 α は圖-2 から 0.1~0.2 となる。

(ハ) 杭の貫入に對する抵抗 W に就て

従來の例によると W そのものを杭の支持力 (ultimate bearing resistance) と考へ、杭の靜支持力と同義に用ひられて居た。Terzaghi は W を動抵抗なる言葉を使用し

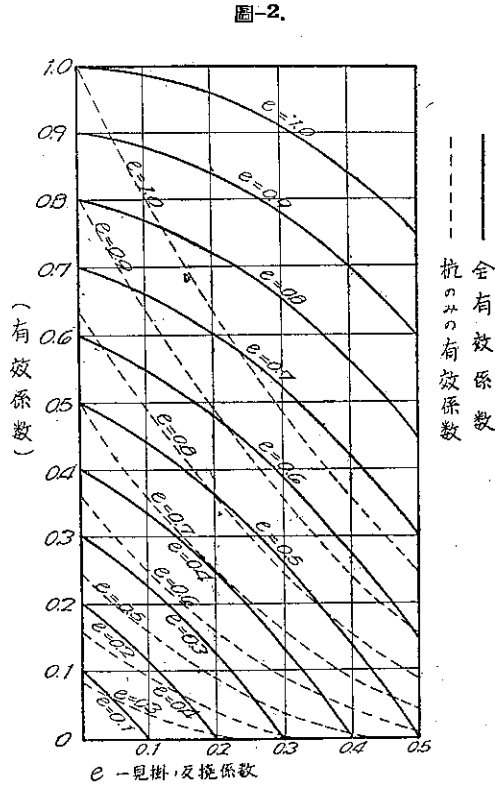


圖-2.

e - 一貫し反撥係数

て静抵抗と區別し、動抵抗は杭端に於て殆ど發揮され杭周に於けるものは極めて微弱であると言つて居るが、此の事は杭打の際地表の振動を記録した結果によると其の性質から杭端が恰も振動源をなす如き振動を示すことから、又各地層の杭の貫入量は砂層に於ては減少するが砂層を突破してローム層に到達すれば再び貫入量が増加することによつても實證される。かくして従來の動力學的公式のすべては杭端が土中に貫入する其の場合の動抵抗力を示したものと云ひ得る。そして此の動抵抗と我々が求める杭の支持力(静抵抗)との間に理論的關聯は見出されて居ない。Terzaghi は實驗の結果から動抵抗 W_d と静抵抗 W_s との間には多くの場合 $W_d = \varphi W_s$ と云ふ一定比例關係を有すると云つて居るが此の實驗は一定の土質又は極めて狭い範圍の土質について行はれたもので實際には土質によつて φ の値は相當廣範圍に變化するものと想像される。従つて動抵抗 W_d を以て静抵抗 W_s に置きかへ、正確を期するためには各種の地質について φ を豫め決定することが必要である。

(ホ) 時間の影響に就て

動力學的公式には時間の要素が考慮されて居ない。即ち動力學的公式が示す動抵抗は、杭が杭打作業によつて土中に貫入する其の瞬間の抵抗を示すものに過ぎない。然るに杭打作業により貫入された杭は地盤に或る影響を與へ、その影響は更に貫入に又影響を與へる。そして此の影響は杭打作業終了後時間の経過と共に變化することは豫想される。即ち地下水位の變化等杭打作業による以外の外的條件は除いても、地盤の壓縮、地盤の攪亂等の杭打作業による地盤の變化が長時間の後に復歸する事は豫想され、事實杭打作業中に於ても此の事は屢々經驗されることである。かくして動力學的公式は杭打作業によつて與へられる地盤の變化が其後時間と共に再び變化することを全く考慮の外にした缺點を有して居る。

以上動力學的公式に關し疑はしい點を列挙したのであるが、(イ)(ロ)及(ハ)の缺點は動抵抗を以て静抵抗に置き換へることの根本的矛盾はしばらく許容し其の下位に於ける假定の不正を指摘したものである。従つてこれだけの補正は、杭の支持力公式の全面的補正とはならない。(ニ)(ホ)に指摘した根本的缺陷が先づ補正されねばならない。従來數多くの動力學的公式が提案されながら尙極めて特殊な場合にしか實際と適合しない結果を示して居ると云ふことは、此の(ニ)(ホ)の缺陷の補正の難しさであると想像される。従つて若し動力學的公式に將來性ありとすれば先づ動抵抗と静抵抗との關係を地質に應じて發見することにあると云ひ得る。

2. 静力學的公式の検討

動力學的公式の數多きに比し静力學的公式は、極めて少い。

前記文獻による調査に於ても、Krey, Dörr, Bierbaumer の三公式にすぎず前二者は殆ど軌を一にするものである。従つて此所には Dörr と Bierbaumer について検討する。

(イ) Dörr の公式

土の摩擦力、凝集力及び杭端面の地耐力の總合が杭の支持力とする公式である。その形は

$$P = F \tan^2 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\theta}{2} \right) \gamma h + L \frac{1}{2} \gamma h^2 c' \tan \delta + L c h$$

此所に

F = 杭端面の面積

c = 土の凝集力

c' = 杭周の土の壓力係數

γ = 土の比重

δ = 土と杭との摩擦角

L = 杭の周長

θ = 土の摩擦角

h = 杭の深さ

μ = 杭と土との摩擦係數 = $\tan \delta$

即ち第 1 項は杭先端に於ける抵抗力を Krey の式から導いたもの、第 2 項は杭周の土に對する摩擦抵抗の中

支持力となる分力，第 3 項は凝集力による支持力である。

c' なる枕周にかゝる土の壓力係数は Dörr によれば能働土壓と受働土壓の中間値として次の様に決めて居る。即ち

$$c' = 1 + \tan^2 \theta = \frac{1}{\cos^2 \theta}$$

これを互層地盤の場合に適用すれば次のやうである。

$$P = F\gamma H_n \tan^2 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\theta_n}{2} \right) + \frac{1}{2} L\gamma \sum_{n=1}^{n=N} [(H_{n-1} + H_n) h_n c'_n \tan \delta_n] + L \sum_{n=1}^{n=N} c_n h_n$$

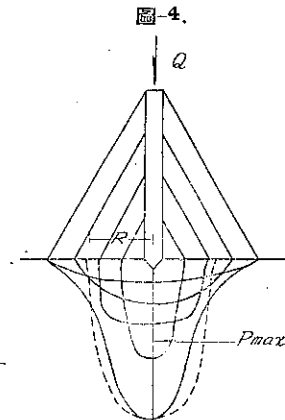
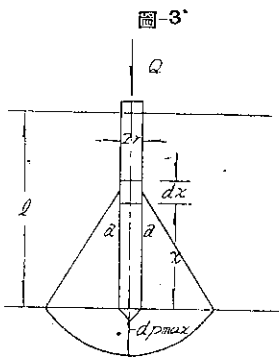
h_n, c_n, θ_n 等は第 n 層の前記 (單層の場合) の値。

$$H_n = h_1 + h_2 + \dots + h_n, \quad H_0 = 0,$$

土の比重 γ は各層に於て大差ないものとする。

(ロ) Bierbaumer の公式

Bierbaumer は近年發達した土質力學の方面から杭の支持力に對して新しい見方をした。その理論の要點は杭頭に働く Q なる荷重は杭周に生ずる摩擦力によつて釣合ふが、之が杭軸と一定の傾きをなして圓錐體狀に杭端水平面に分布すると云ふのである。その分布の状態は杭軸直下に 最大値を有する回轉拋物體と假定した (圖-3)。之を杭全長に對して合成すれば杭端中央に於ける最大壓力 P_{max} は同一地質に對して (圖-4)



$$P_{max} = \frac{2Q}{\pi l} \int_0^l \frac{dx}{(r+x \tan \alpha)^2} = \frac{2\theta}{\pi} \cdot \frac{1}{r(r+l \tan \alpha)}$$

此の Q による杭端水平面に生ずる壓力分布の状態は錐狀分布をなす。分布角 α は實驗によれば土質に依り異り、媒體である土の摩擦角に等しいと考へて安全側にありと考へられる。従つて

$$P_{max} = \frac{2Q}{\pi} \cdot \frac{1}{r(r+l \tan \theta)} \quad \text{但} \quad \theta: \text{土の摩擦角}$$

此所に θ が或る程度大きな場合には r は l に比して小さいから r^2 は無視して

$$P_{max} \approx \frac{2Q}{\pi} \cdot \frac{1}{r l \tan \theta}$$

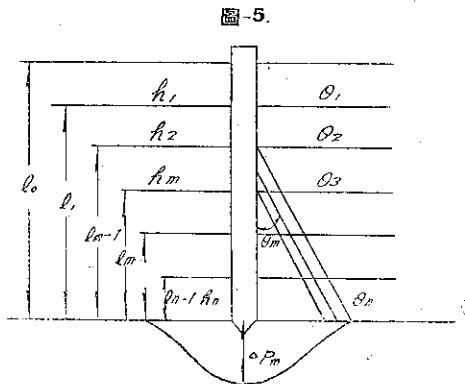
と置く事も出来る。

此の P_{max} が杭先の抵抗土壓強度より小なる場合には 其の杭は Q なる荷重に對して安全である。即ち限界支持力は

$$Q = \frac{\pi r l \tan \theta}{2} (r+l \tan \theta) \tan^2 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\theta}{2} \right)$$

又は $Q = \frac{\pi r l^2}{2} \tan \theta \tan^2 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\theta}{2} \right)$ と表される。

次に摩擦角の異なる互層地盤に於ける場合に以上の理論を適用して見れば次のやうになる (圖-5)。



$$p_{\max} = \frac{2Q}{\pi l} \sum_1^n \frac{l_m}{(l_{m-1} + l_m) r \tan \theta_m + l_{m-1} r \tan^2 \theta_m}$$

杭端地盤の摩擦角を θ_n とすれば杭の限界支持力は

$$Q_0 = \frac{\pi w l_0^4}{2} \left\{ \sum_1^n \frac{l_m}{(\rho + \gamma_m - i \tan \theta_m)(\rho + \gamma_m \tan \theta_m)} \right\}^{-1} \tan^2 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\theta_n}{2} \right)$$

又は θ_m が相當大きな場合として ρ^2 を省略すれば

$$Q_0 = \frac{\pi w l_0^4}{2} \left\{ \sum_1^n \frac{l_m}{\rho(\gamma_{m-1} + \gamma_m) \tan \theta_m + \gamma_{m-1} \gamma_m \tan^2 \theta_m} \right\}^{-1} \tan^2 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\theta_n}{2} \right)$$

此所に $\rho = \frac{r}{l} \quad \gamma_{m-1} = \frac{l_{m-1}}{l_0} \quad \gamma_m = \frac{l_m}{l_0} \dots \gamma_n = 0 \quad \gamma_0 = 1$

(ハ) 静力學的公式の批判

静力學的公式は其の假定其他に於て缺點を有するとしても其の根本思想が静力學的である點に於て動力學的の場合の如く杭本來の抵抗力との間に根本的錯誤を生むと云ふ事はない。此の點が静力學的公式の強みである。

先づ Dörr の式について検討して見る。

此の式は摩擦、粘着力等を主として考へられた静力學的公式の一つである。従つて地中の壓力分布と土の強度との關聯については全く觸れて居ないので、杭先地盤が弱い場合にも上部に摩擦角の大きな地層があれば相當の支持力を有する如く計算され、又逆に杭先地盤が強い場合でも上部の地層の摩擦角が小さい場合は過小の支持力を示す缺點を有する、又此の式に於ては土質力學の理論及び調査方法が進歩した際に於ても杭の沈下等を豫想し或は杭群の理論にまで發展させることは不可能である。

次に Bierbaumer の式について検討して見る。此の式に於て検討すべき假定其他を列記して見れば次の通りである。

- i) 荷重 Q は杭の長さに平均に分擔される。
 - ii) 荷重 Q は杭周の摩擦力により釣合ひ、之が杭軸と一定の傾きをなして圓錐體狀に杭端水平面に分布する。
 - iii) 杭端水平面に於ける壓力分布は杭軸直下に最大値を有する回轉拋物體と假定する。
 - iv) 杭端に於ける抵抗土壓強度は Rankine の式による。
 - v) 地盤のポアソン比を 0.5 と假定する。
- i) の假定は杭の長さの方向に於ける荷重の分擔が、その部分の土壓に比例すべき事を考へれば、ある一定の深さまでは土壓と共に遞増すべき事が考へられる。しかし杭打地盤の如く平衡して居る所に於ては土壓が必ずしも深さに比例するとは考へられず、或は却つて杭先端附近に於ては減少する場合も考へられる。又互層地盤の場合には各層に於て土壓係数が異り“杭の長さに平均に分擔される”と假定する代りに“杭に働く土壓に比例して分擔される”，と假定することは計算上極めて煩雜である。かうして現在に於て此の假定は止むを得ないものと考へる。勿論此の假定は危險側をも含み“深さに比例して分擔する”と改めれば安全側に置くことが出来る。將來安定した地盤に杭を打込んだ場合その杭周への壓力が長さの方向に如何なる分布をなすかと判断した場合に、此の假定は補正さるべきであらう。

ii) に於ける分布角の考へ方は、載荷せる地盤の地中壓力分布に於ける限界角と同様である。従つて此の角度も地質と深さにより變化する事が實驗により認められて居る。

Bierbaumer は初め硬プラスチックの土に對して分布角 $\alpha=30^\circ$ なりと、深さには無關係に決めたのであるが、其の後他の土質の場合に於ても α は其の土の内部摩擦角に等しいとする擴張を（本邦に於て當山委員）行つた。Kögler 等の實驗によれば地上載荷の場合、其の壓力分布の限界線角度は、載荷直下に於て 30° 前後で、深さを増すにつれて増加し遂に 90° 達し、それ以上の深さでは彈性體と同様に考へられる、と云つて居るのであるが、之を正しいとすれば深さに無關係に分布角 α を其の土質の内部摩擦角にとると云ふ事は安全側にありと考へられるのである。

iii) の杭先端に於ける荷重分布を回轉拋物體と假定する事は實驗其他より妥當と考へられるが、かうした壓力分布により支持力を決定する上に於て其の分布平面を杭先端にとつたことは問題である。これは單一地層の場合には勿論問題とはならないのであるが、互層地盤に於ては相當大きな誤差を生ずる恐れがある。即ち杭先端から少しの深さに、杭先端地盤と著しく強度の異つた地層がある場合である。

Bierbaumer の計算に於ては杭先端の抵抗土壓強度を以て計算して居るから杭先端の地盤が深く續いて居る場合にのみ適用出来るが、少し下に弱い地盤がある場合には其の深さだけ最大壓力強度は小さくなるが抵抗土壓強度がそれ以上に小さくなつて杭先端の水平面とつた値は危險側となる。しかし之は簡単に補正される。

iv) の抵抗土壓強度は Rankine の式を用ひて居るが、正確には杭先端地質のそのままに於ける最大破壊抵抗力が測定又は計算されねばならない。又かうして計算した支持力は破壊沈下を起さない限界支持力であるから、壓密による沈下は許さねばならない。従つて壓密沈下の大きい土質が杭先端地盤にある場合には之を考慮する必要がある。

v) の假定も土質や其他の條件により異り全く正しいとは云はれない。

以上靜力學的公式には種々の假定が未だ完全と云はれぬ點が多いが、動力學的公式に於て動抵抗をそのまま靜抵抗と假定した如き根本的の缺點は有しない。従つて土質の力學的研究の進歩と共に將來性を期待し得る。

3. 公式の數值的檢討

委員會に於て調査、蒐集した杭支持力調査表資料 150 中より、載荷試驗結果を有し、地質調査圖を併備した木杭、落下錐の場合の杭打資料を選び辛じて 34 種を得 Sander, E. N. R., Bierbaumer, Dörr の 4 公式について數值的檢討を行つて見た。34 と云ふ觀測數は極めて少いため公式の數值的檢討には充分でないと考へられるが大體の傾向は知ることが出来る。

表-2 はその計算數値表であるが、此所に想定最大荷重 Q_0 は載荷試驗に於ける、沈下-荷重圖より沈下 10 mm を許してとつた最大荷重である。しかし載荷試驗の方法の妥當なるざるため曲線の形から大體の想像によつて決定せざるを得なかつたものも多い。靜力學的公式による支持力の計算には地質の充分な資料がないため地質圖により其の内部摩擦角を想定した。

(イ) 支持力比による檢討

Sander, E. N. R., Bierbaumer, Dörr の公式により計算した支持力をそれぞれ S, E, B, D と表しこれと想定最大荷重 Q_0 との比 $S/Q_0, E/Q_0, B/Q_0, D/Q_0$ を支持力比と名付ける。即ち支持力比 1 は計算値の適正を示し、1 より小なるものは計算値が過小即ち安全側、1 より大なるものは計算値が過大即ち危險側である。

先づ上記 4 公式を支持力比によつて一般的に檢討して見る。支持力比の危險側最大のもの調べるに Sander に於て 5.945, E. N. R. に於て 1.238, Bierbaumer に於て 3.870, Dörr に於て 3.560 であり、安全側は Sander に於て 0.066, E. N. R. に於て 0.068, Bierbaumer に於て 0.465, Dörr に於て 0.360 である。又觀測資料 34 中

支持力比 >2 なるものを調べるに, Sander に於て 10, E. N. R. に於て 0, Bierbaumre に於て 6, Dörr に於て 5 であり, 支持力比 >0.5 なるものは Sander に於て 12, E. N. R. に於て 20, Bierbaumer に於て 2, Dörr に於て 9 である。これを表示すれば表-3 の如くであるがこれについて各公式の適正度を概観すれば次の通りで

表-3.

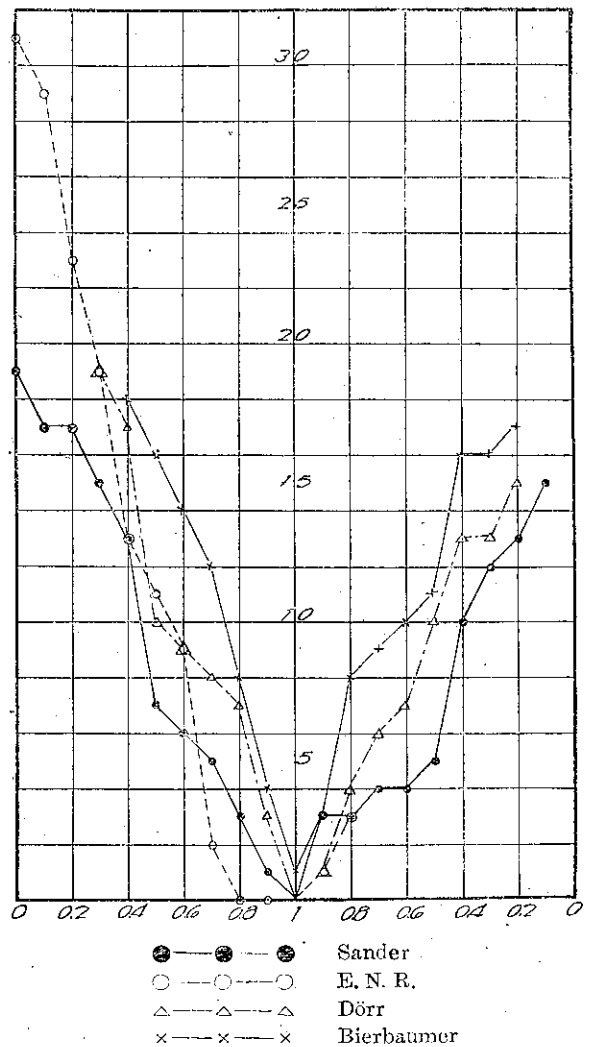
公式名	最大支持力比	最小支持力比	支持力比 >2 の総数	25 > 支持力比 の総数	計
Sander	5.945	0.066	10	12	22
E. N. R.	1.238	0.068	0	20	20
Bierbaumer	3.870	0.465	6	2	8
Dörr	3.560	0.360	5	9	14

ある。即ち, Sander は危険側に於て 6 倍安全側に於て 1/16 を示す場合があり又危険側 2 倍以上のもの 10, 安全側 1/2 以下のもの 12, 総数 22 で 4 公式中最も劣るものと思はれる。E. N. R. に於ては危険側 2 倍以上のものは 0 で極めて安全側の公式と云ふ事が出来るが安全側に於て 1/16 のものがあり且つ安全側 1/2 以下のものが 20 ありと云ふことは不経済な公式と云ふことも出来る。Bierbaumer 及び Dörr は共に危険側に於て 3.5~4 倍を示すものがあるが、危険側 2 倍以上及び安全側 1/2 以下の総数は他の 2 公式に比して著しく少く、適正值に近い場合が多いことを示して居ることは注目し値する。

次に 4 公式について支持力比の頻度曲線を描いて見ると圖-6 のやうになる。但し支持力比 1 以上のもの即ち危険側のものはその逆数をとり (+) に表し 1 以下のもの即ち安全側のものはそのまま (-) にとつた。此の頻度曲線に於ては曲線が支持力比 1 に於ける縦軸に接近するもの程公式として適正度を有すると考へることが出来る。これによつて見れば 4 公式の適正度は Bierbaumer, Dörr, E. N. R., Sander の順序である。

之を要するに Sander は甚だ危険な場合と極めて不経済な場合が多く公式として殆ど不適當であり, E. N. R. は極めて安全であるがそれだけ不経済であり, Bierbaumer 及 Dörr 即ち静力學的の

圖-6.



公式は尙將來に期待し得ると云ふ事が出来る。

次に支持力比と各要素との關係を圖示して検討して見る。

圖-7 a.

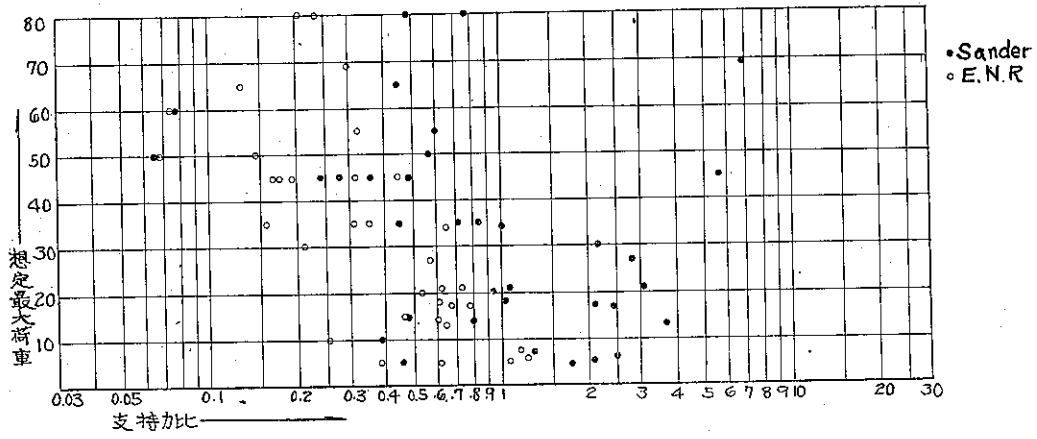


圖-7 b.

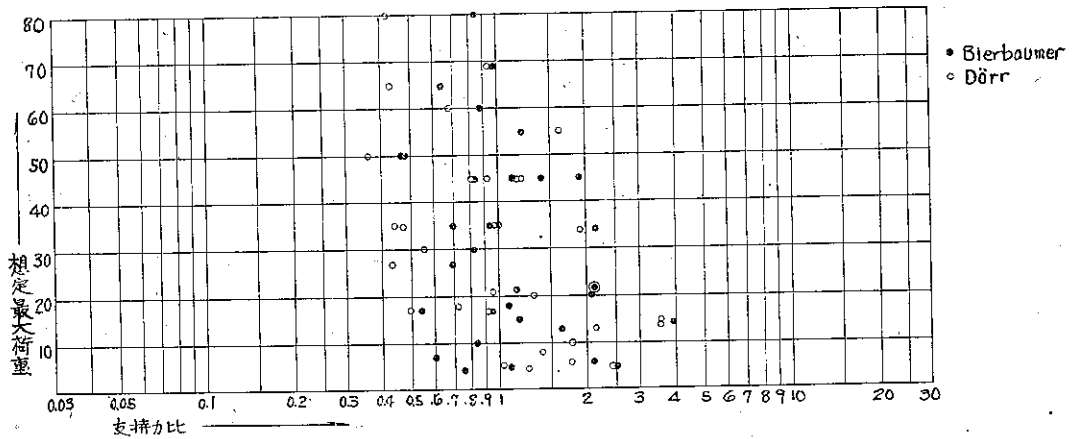


圖-8 a.

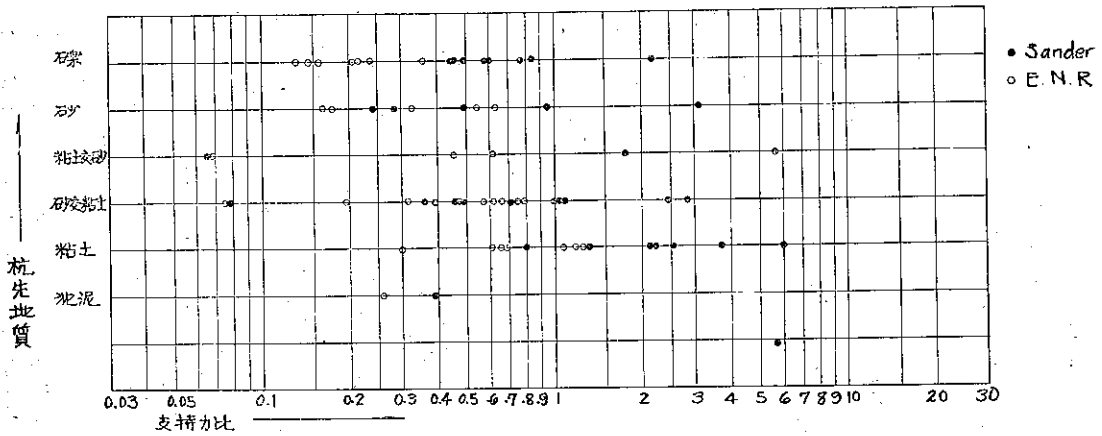


圖-8 b.

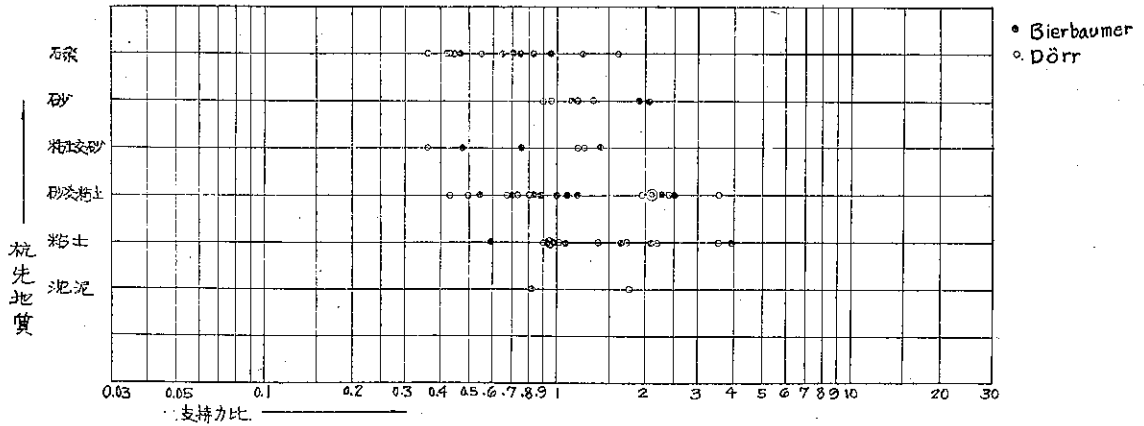


圖-7 より圖-13 までがそれである。いづれも點は散在し 適確な検討は行ひ得ないが強ひて大體の傾向をうかゞへば次の通りである。

◦ 想定最大荷重—支持力比 (圖-7)

Sander, 及び E. N. R. に於ては想定最大荷重が大きい 場合支持力比は小さく最大荷重が小さい 場合支持比は大きい 傾向が認められる。此の事は打止沈下 τ が動力学公式に於て占める位置から考へれば當然のこととも考へられる。特に E. N. R. に於ては 其の傾向が大きい。此所にも動抵抗を靜抵抗に置きかへた 缺點が示されるやうに感ずる。Bierbaumer 及び Dörr に於ては、點は全く散在し支持力比と 最大荷重とは、何等の關係がないやうである。

◦ 杭先地質—支持力比 (圖-8)

點は矢張り散在し大膽に判斷を下し得ない。たゞ大體の傾向として 4 公式共に杭先地質が強いもの程、支持力比の小さいものが多いやうである。即ち杭先地質が強い程、安全性が増加して居ると云ひ得るやうである。Sander の公式が砂質に於て良く合ふと云はれて居るが此の資料によつては、安全側であるとは云ひ得るが、適合すると

圖-9.

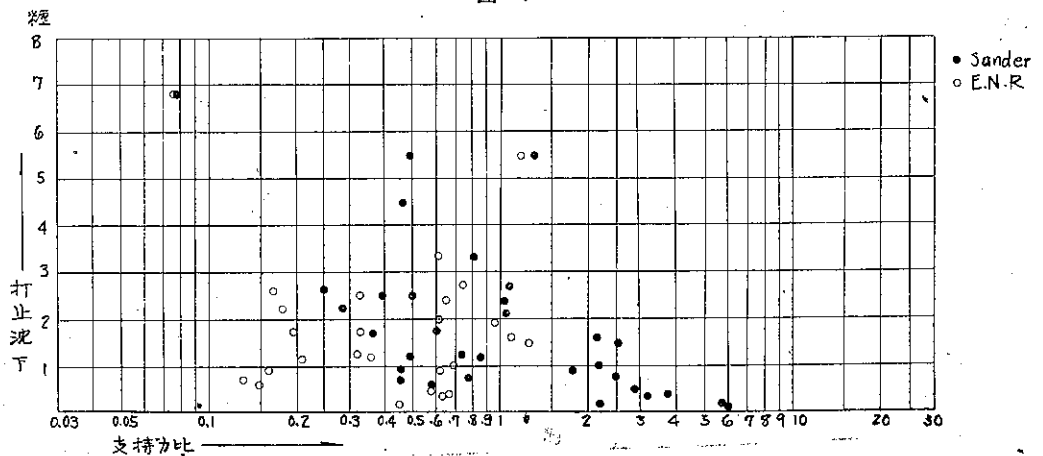


圖-10.

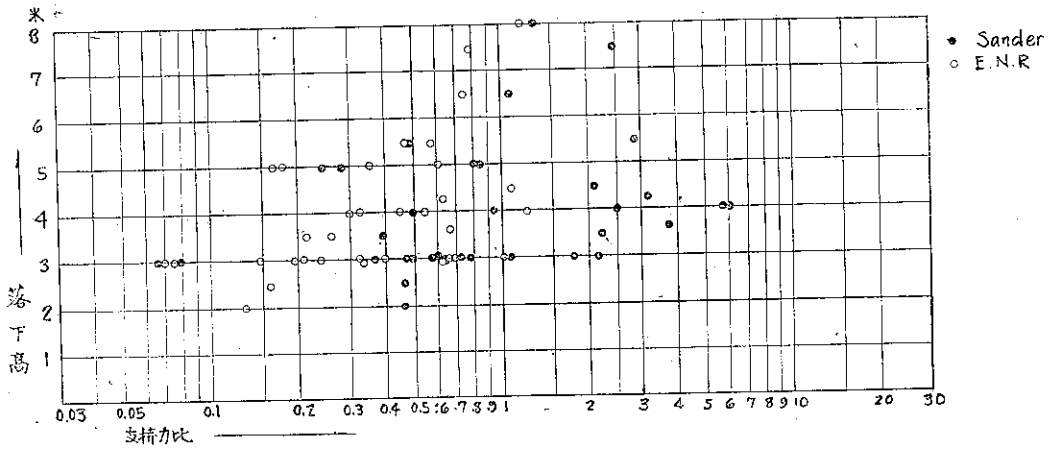


圖-11.

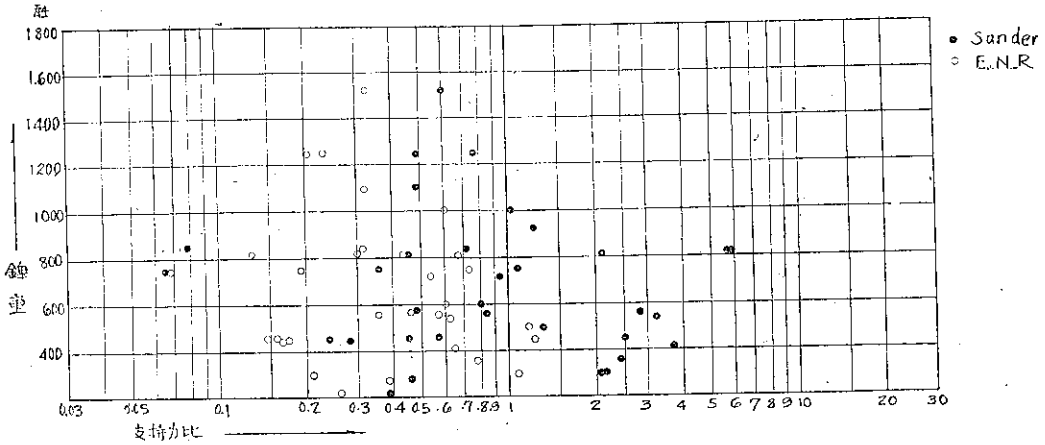
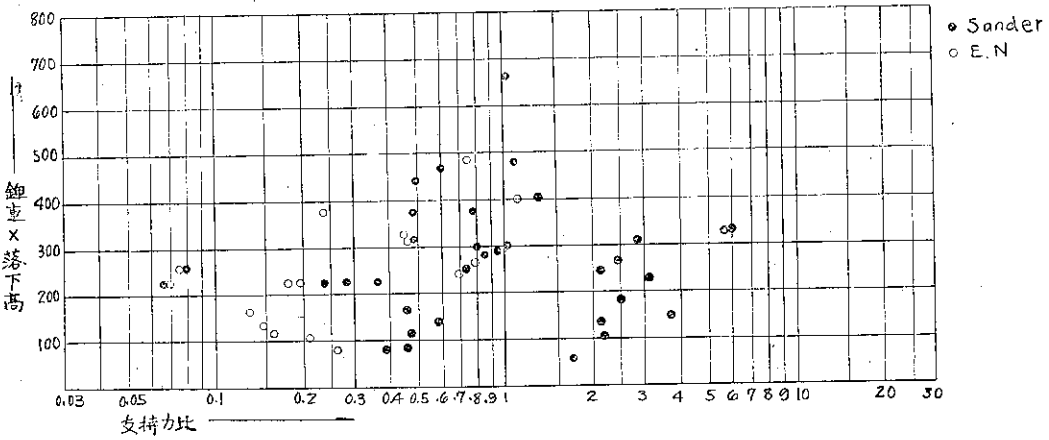


圖-12.



は云ひ得ない。

○ 打止沈下—支持力比 (圖-9)

打止沈下の小なる場合に於て支持力比の大きいものが多いやうである。たゞ打止沈下量と地質調査から判断した杭先地質の強さとは必しも比例しないことは注目すべきである。

○ 落下高一支持力比 (圖-10)

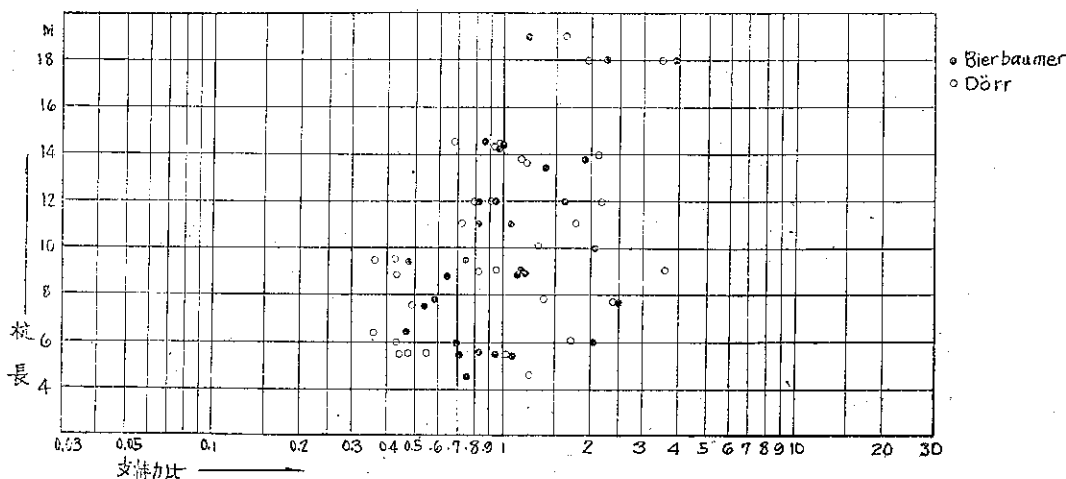
○ 錘重—支持力比 (圖-11)

○ 落下高×錘重—支持力比 (圖-12)

いづれも全く點は散在し何等の判断を下し得ない。

○ 杭長—支持力比 (圖-13)

圖-13.



これは静力學的公式についてのみ作圖したのであるが、Bierbaumer, Dörr 共に杭長の小さいもので支持力比の小さいものが多く杭長の大きなもので支持力比が大きい場合が多いやうにも感ぜられる。これは現在の静力學的公式の安全率を決定する上にある示唆を與へるかも知れない。

(ロ) 誤差率による検討

表-4.

		Sander	E. N. R.	Bierbaumer	Dörr
誤 差 率	危 險 側 度 數	15	3	17	15
	安 全 側 度 數	19	31	17	19
	危 險 側 最 大	4.940	0.234	2.870	2.545
	安 全 側 最 大	0.934	0.932	0.536	0.640
	±0.5 以上の度數	23	20	10	17
	危 險 側 平 均 値	1.547	0.168	0.742	0.754
	安 全 側 平 均 値	0.500	0.609	0.260	0.369
	總 平 均	0.962	0.570	0.501	0.538

$$(S-Q_0)/Q_0, \quad (E-Q_0)/Q_0, \quad (B-Q_0)/Q_0, \quad (D-Q_0)/Q_0$$

をそれぞれ Sander, E. N. R., Bierbaumer, Dörr の公式の誤差率と名付ける。

これも殆ど支持力比と同様のものであるが其の結果を表示すれば表-4 のやうになる。

4. 結 論

- (イ) 前記諸文献の調査に於て杭の支持力公式につき決定的結論を與へ得る如何なる實驗も研究も未だない。
- (ロ) 文献調査により蒐集し得た公式の主なもの表-1 の通りである。
- (ハ) 理論的考察によれば動力學的公式は動抵抗と靜抵抗を混同した點及び時間的要素を考慮の外に置いた點に根本的缺點を有し更に此の根本的缺點が是正された上にもなほ次の如き點が是正されねばならない。

i) 従來反撥係數 e を錘及び杭の單純衝突として考へて居たがこれは更に杭の貫入する土砂を考へた三相系に於て是正されねばならない。その値を再記すれば次のやうである。

天然砂質系土質に對し	$e = 0.15 \sim 0.20$
天然沈泥質系土質に對し	$e = 0.10 \sim 0.13$
天然粘土質系土質に對し	$e = 0.08 \sim 0.10$

ii) 有效係數 α についても三相系としての補正が加へられる。

iii) 基本式 (1) の左邊第二項は衝突後錘と杭とが共に同一速度で貫入することを示すものであるが、實際には錘は反撥し杭のみが衝突後與へられた速度を以て貫入すること瞭かなる故

$$\alpha Rh + (R+Q)\tau = \frac{1}{2} \cdot \frac{W^2 l}{EF} + W\tau \dots \dots \dots (1)$$

$$W = \frac{EF}{l} \left\{ -\tau + \sqrt{\tau^2 + \frac{2\alpha Rh l}{EF} + \frac{2l\tau}{EF}(R+Q)} \right\} \dots \dots \dots (2)$$

の基本式は次のやうに改められねばならぬ。即ち

$$\alpha Rh + Q\tau = \frac{1}{2} \cdot \frac{W^2 l}{EF} + W\tau \dots \dots \dots (3)$$

$$W = \frac{EF}{l} \left\{ -\tau + \sqrt{\tau^2 + \frac{2\alpha Rh l}{EF} + \frac{2l\tau}{EF}} \right\} \dots \dots \dots (2)$$

が動力學的公式の出發點となるべきであらう。

(ニ) 靜力學的公式に於ては動力學的公式に見られるやうな根本的缺點は見られない。二次的缺點に於ても既述のやうに補正され得ると豫想されるものである。

(ホ) 數値検討に於ては條件を具備した資料數が僅かに 34 に過ぎないため充分な検討を加へることが出来なかつた。しかし大體の傾向を述べれば以下の通りである。尙此の検討には動力學的公式として Sander, E. N. R. 靜力學的公式として Bierbaumer, Dörr を用ひた。

- i) 一般的に Sander の公式は著しく適正度を欠き、E. N. R. は安全側の公式であるがそれだけ不經濟である。靜力學的の 2 公式は安全とは云ひ難いが公式としての適正度は動力學的 2 公式に勝り將來性あることを示して居る。
- ii) Sander 及 E. N. R. に於ては實際の支持力が大きい場合に計算支持力は安全側で小さい場合に危險側が多い傾向にある。
- iii) 4 公式共に杭先地質が強い程、計算値の安全性は増加して居るやうである。

- iv) 動力學的公式に於て打止沈下の小なる場合に危険側のもが多いやうである。たゞ打止沈下量と地質調査より判断した杭先地質の強さとは必しも比例して居ない。
- v) 静力學的公式に於ては杭長が大になる程危険側になるやうである。これは現在の静力學的公式の安全率を決定する上に或る示唆を與へる。

叙上の如き結論に達せしが將來更に信頼すべき杭打公式を誘導すべく以下列擧せる 3 事項に留意し調査研究に邁進すべきものと思料す。

5. 將來への要望

- i) 動力學的公式の確立の爲に動抵抗と静抵抗の地質についての關係を研究すること。
- ii) 杭打基礎施工の場合には、必ず地質調査を行ひ事情の許すかぎり綿密な杭打試験並に載荷試験を行ふべきである。これは工事自身の爲のみならず將來公式の是正に必要な資料を得る爲に必要なである。
- iii) 静力學的公式の將來性は重視すべきであると思料するが故に土の力學について尙多くの研究を重ねること。
- iv) 杭打試験及載荷試験の標準方法を決定すること。

昭和 17 年 7 月 8 日

土木學會杭の支持力公式調査委員會

委員長	青山	士						
委員	綾	龜	一	伊集院	久	飯野	忍	片平信貴
	金	森	誠	之	黒田	靜夫	坂本	信雄
	笹	森	巽					
	鈴木	清	一	當山	道三	徳善	義光	匹田
	松田	亮	治	松村	孫治	最上	武雄	森田
	安宅	勝		山口	昇	好井	宏海	