

杭 打 公 式 に つ い て

正 員 北海道大学助教授 北 郷 繁

I. 緒 言

私達の研究室では、ここ数年来、貫入試験による地盤調査を実施してきた。この貫入試験には、御承知のように、静的なものと、動的なものがある。静的なものは、オランダ、スウェーデンに発してヨーロッパに多く、或る寸法の物体を、地中に除々に押し込む時の抵抗を、種々の方法で測定し、地盤強度の断面構造を知るものであり、動的なものは、打撃を加えて打ち込む際の挙動を観測して同じ目的を達するわけである。近時、次第に一般化しつつある、アメリカの標準貫入試験法はその代表例である。

所で、この動的貫入試験は、方法としては、杭打ちと殆んど同じである。違う所は、目的が杭だけの支持力を求めるに反して、地盤の一般的性質及び状態を判断する資料とすること、杭の材料、寸法、形状は区々であるに反し、鋼管、円形でつぎ手が多数あること、加えるエネルギーは任意に変化せしめ得るに反して、一定している事、緩衝材をおいて杭頭の破損を防ぐに反して、之をおかない事等であるが、錘の打撃と、それによる貫入量との関係から、地中の状態を推定しようとする方法としては同一である。それで筆者は、在来の動的杭打公式を調べる必要にせまられたわけである。以下杭打公式と言つたら動的な公式を意味することにする。

所が筆者は、実の所、杭打ちについては全くの門外漢であつて、基礎杭についての現場的経験は、杭打機械の運動を傍観した事が两三度あるにとどまる。従つて筆者には杭打公式を独創する能力のないことは勿論、之を論ずる資格さえ有しないものであり、従つて本文では、筆者の目を通した、僅かばかりの文献の中から、筆者に特に興味があつた事について申しあげ、本稿を引き受けた責を果したい。之が少しでも読者諸兄のお役に立てば筆者の仕合せとする所である。

筆者が杭打公式を調べてみたいと思つたもう一つの動機は、杭の支持力が使用する公式によつて、非常な差が出るものであることをしばしば耳にしたのであるが、一体この原因が奈辺にあるのかを知りたかつた事にある。

このようなわけで二三の文献をみて行くうちに、実に

痛快で、情容赦のない愉快な論文に行き当たり、前記の支持力不一致の原因が分つたような気がするので、先ずこの論文から紹介する。之は末尾参考文献¹⁾であつて、著者の Cummings という人は、所謂標準貫入試験機の先端にとりつける、二ツ割りの試料筒 (Raymond Split Spoon Sampler) を作つたレイモンド・コンクリート杭会社の研究部長であり、イリノイ大学の講師²⁾でもある。

Cummings の結論を先に書いてみると、杭打公式なるものは、技術者が之によつて、どの杭打現場についても、相当に安全で且つ均一な結果を得るための、単なる物差しにすぎないのであつて、現在の所、杭打公式は理論的に不完全であり、満足のいく杭基礎を作るためには豊富な経験と入念な土質試験の結合に基いて、正しい判断を下すしかないということで、Terzaghi³⁾ もこの結論を引用して、杭打公式の不完全な事に言及している。

極端な表現をすれば、在来の杭打公式は、理論的に、殆んど皆、ウソだという事である。Cummings は、之を従来の有名公式について証明している。それで、本文では、まずこの証明から始める。

II. Cummings による在来公式の検討

(1) 一 般

一般に杭打公式は、次の形のエネルギー式から出発して、之に色々な補正を行つたものが大部分である。即ち

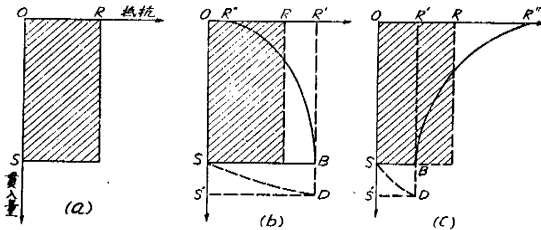
$$Wh = RS \dots\dots\dots (1)$$

左辺は、 h の高さから自由落下する、重さ W の錘のエネルギーを表わす。 R は貫入抵抗であつて、 S は錘の一回の打撃で貫入する距離——普通は垂直距離、以下貫入量とよぶ——であつて、右辺は R なる抵抗にさからつて S だけ貫入させるためのエネルギーである。

S はこの場合、打撃の瞬間に、杭やその周辺の土が弾性的に圧縮して一時的に貫入する部分（この分量は弾性的に復元する）も含むのか、或いは普通に観測されている、弾性圧縮回復後の貫入深さをとるのか、ハッキリしていない。前者の場合の S は観測に特殊の方法を要して（高速度撮影器）一般には用いられない所であるが、後で出て来るように、杭材の弾性変形によるエネルギー損失を補正する際などには、 S のとり方が、厳密に言えば問

題になるわけである。

次に R であるが、この R は、一回の打撃で貫入する深さの、すべての部分について一様であるのか、或いは深さによつて違つていて、その平均を示すものなのか、ハッキリしていない。 R の貫入深による差違は二通り考えられ、全深一定の場合と併記すると図—1 のようである。即ち (a) では、抵抗は貫入深のすべての部分につい



図—1 S と R の関係

て一様であつて、 $R \times S$ 即ち図の斜線部分の矩形が抵抗の仕事量である。之が、他にエネルギーの損失が皆無である場合に $W \times h$ に等しいとするものである。(b), (c) の図は、 R が途中で変るとした場合の二通りの考え方を示すものであり、之に (a) をかぶせたのが同図の斜線部であつて、(a) とは大部模様が違う。(b) は始め抵抗が小さく、次第に増大して一定値 R' に近付くもので、大体の所、砂の場合にあてはまる。即ち、砂だと、杭の貫入と共に密度が大になって抵抗を増すものと考えられるからである。(c) は之と逆であつて、粘土にあてはまりそうな場合である。即ち始めに抵抗の大きいのは、打撃と打撃の間の時間の経過によつて、乱された粘土が落着きを取り戻し、凝集力を発揮することによるものと考えられる。何れの場合にしても、 R' は R に等しくないことは当然で、 c を定数として

$$R' = cR \quad \dots\dots\dots (2)$$

とせねばならない。 c は前論のように 1 より大きい場合もあるし、小さい場合もあつて、杭の動的支持力の最も妥当な推定値は、(b), (c) 図における R' と見做すべきである。

前図の縦線 OS は一般に観測される貫入量 S であつて、 OS' は杭及び土の弾性変形を含めた貫入で、 SS' が弾性変形部分である。

従つて三角形 SBD の面積は弾性変形によるエネルギー損失の量を示すものである。之を Q とすると

$$Wh = cRS + Q \quad \dots\dots\dots (3)$$

と書かれる。

然し、実際の杭打について R の変化をみ、 c, Q を求めることは、打撃の瞬間の頭頭の挙動を高速度映画にうつして解析し、図—1 のような仕事図によらなければならないから、一般には実施困難で、この方法によつて、

杭打公式を検討した技術者は少数である。ただ A. M. Wellington が、彼の経験にもとづき、(c) 図に似た仕事図から公式を誘導した。之がアメリカで広く使われる Engineering News 式である。

杭打公式は、 Q を如何に仮定するかによつていくつもの考え方ができるわけで、一般技術書に多数の公式* が示されているのは、エネルギー損失に関する仮定が如何に区々であるかを示すものである。しかし、表面上どんな形式をとり、仮定が如何に多様のように見えても、その源は大きく分けて 3 種にすぎないのであつて、数多くの公式は、これから出発して、色々に修飾したり、補正したり、簡単化したりしたものすぎない。

尚以下の論述では公式中に安全率を含めず、抵抗値 R の極限値を示すことにする。

(2) 各 論

エネルギー損失で先ず第一に考えられるのが、杭の圧縮によるものである。長さ L 、断面積 A 、弾性係数 E なる杭が R なる荷重をになつた時の歪エネルギーを静力学的に求め、(3) 式で $c=1$ とし、 Q の代りに之を入れると

$$Wh = RS + \frac{R^2 L}{2AE} \quad \dots\dots\dots (4)$$

で之を R についてとくと

$$R = -\frac{SAE}{L} + \sqrt{\frac{2WhAE}{L} + \left(\frac{SAE}{L}\right)^2} \quad (5)$$

で、Weisbach (1850 年頃) の式である。

さてこの式について Cummings は次のように言っている。即ち、(3) 式の Q として (4) 式の右辺第二項を使うことは次の難点がある。

a. 上に求めた歪エネルギーは静力学に基くものであつて、衝撃によつて材料が圧縮されるのとは事情が非常に違うこと、

b. 静力学的に求める際の、力 R の作用点は杭の先端としているから、杭の先端以外に抵抗の働く場合、即ち一般に言う摩擦杭には、全くあてはまらないし、打込みの過程で純粹に、先端だけで抵抗する場合は少い筈だから、厳密には大半の場合にあてはまらない。

第二のエネルギー損失の考え方は、Newton の衝撃理論にもとづくもので、杭打作業は錘と杭の衝撃なのだから、両者の間のエネルギー損失は、この理論から求まるとするものである。 Q をその損失とすると

$$Q = \frac{1}{2} (1-n^2) \frac{Mm}{M+m} (V-v)^2 \quad \dots\dots\dots (6)$$

* D. W. Taylor²⁾ によれば、Dean という人が少なくとも 2 ダースの公式をリストにあげ、更に之より数の多い類似式を示しているとの事である。

n : 反撥係数, 衝撃体の弾性の度による定数
 M, m : 衝撃体の質量
 V, v : 速度

であつて, M, V を錘の質量及び速度とすると, $M = W/g, V^2 = 2gh$ (g は重力の加速度, h は錘の落下高) であり, m, v を杭のそれとすると $m = P/g, v = 0$ で, P は杭の重量である。従つて (6) 式は

$$Q = Wh \frac{P(1-n^2)}{W+P} \dots\dots\dots (7)$$

之を $c = 1$ として (3) に入れると

$$Wh = RS + Wh \frac{P(1-n^2)}{W+P} \dots\dots\dots (8)$$

で

$$RS = Wh \frac{W+n^2P}{W+P} \dots\dots\dots (9)$$

である。この式は色々な公式のもとになるもので、例えば、ヨーロッパで使われているらしい Eytelwein の式 (1920年頃)

$$R = \frac{Wh}{S(W+P)} \dots\dots\dots (10)$$

は (9) 式で $n = 0$ とすると求められる。 $n = 0$ は完全剛体を意味する。又 $n = 1$ 即ち完全弾性体と見做すと、簡単な事で有名な Sander の式

$$R = \frac{Wh}{S} \dots\dots\dots (11)$$

が得られる。又既述の Engineering News 式は (10) 式で、右辺の分子を W で割り、分母の $S \cdot P/W$ 既ち、エネルギー損失の代りに、経験的に求めた定数 (単位は長さ) を用いたもので、本質的にはこの系統に属するものである。

Eytelwein や Sander の式が正しいか否かは、その仮定である Newton の衝撃理論を杭打公式に持ち込むことの当否にかかつている。Cummings によれば、之は完全に間違っているのだそうで、その理由の大体は次のようである。即ち Newton が n を求めた実験は、一本の糸につりさげられた球体相互の衝突に関するものであつて、衝突体としての球は、自分をつりさげる糸以外には何らの抑制も受けない。所が杭打ちの場合、杭は周辺の土の反力で、その運動は非常に制約される。この点で明瞭な差違があるし、又 Newton 自身の論述中に“ハンマーの打撃によるような歪を受ける物体”について、この理論を適用すべきでないことを明記しているとの事だから、この理論の導入それ自身が理論の発見者の意志に反したわけである。

更に (10) 式において、重い錘で、軽い杭を打つ場合には P/W の項が小さくなり、 W が P に比べて非常に大きい時は、この項は消失して (11) 式と同じ事になる。(11) の式

は、エネルギー損失が全然ない形式を持つから実情に反する。即ち、非常に軽い杭を、非常に重い錘で打つと、杭は瞬間的に多量の変形を生ずる筈で、従つて式から求まるのとは逆に、多量のエネルギー損失があるわけである。だから、かりに (10) 式を使うとしても、杭と錘の重量の比に充分の注意を払ふ必要がある。

第三にあげているのは、第一と第二の考え方を同時にとり入れたもので、彼は当然之も間違いであるとしている。第三の部類に属するものの中で代表的なものは、次の式形を有するもので、ヨーロッパで広く使われ、Redtenbacher (1859) の創始にかかるものとされている。

$$Wh = RS + \left[Wh \frac{P(1-n^2)}{W+P} \right] + \left\{ \frac{R^2 L}{2AE} + \frac{R^2 L'}{2A'E'} + K \right\} \dots\dots (12)$$

で、 L', A', E' は夫々緩衝材 (クッション又はキャップ) の長さ、断面積、弾性率であつて、 K は杭のまわりの土を圧縮したために費したエネルギーである。又この式は完全式といわれているが、それは内容の完全さからつけた名前ではなくて、複雑して如何にも完全らしく見える外観をもつために、完全であると思い違いされて命名されたのである。(12) の式形を見れば分るように、(4) 式の杭の弾性圧縮によるエネルギー損失に、緩衝材のそれを附加し、更に (8) 式の Newton 損失を重合したものである。この重合が、そもその間違いであるとするのが Cummings である。即ち Newton の理論によれば、(12) 式右辺の [] 内の損失中には、{ } 内の杭や土の弾性圧縮によるエネルギー損失を含むものなのだから、この二つを並べて書くことは、損失を二重に見積つている事になるわけである。更にもつと源にさかのぼると [] 内の Newton 損失や { } 内の静的弾性圧縮損失は、動的杭打公式には適用できないことは、すでに論述した通りなのだから、之を併用する事は間違いを二重に犯している事になるわけである。又式形の上で (12) 式に似ているが、之より更に複雑していて、広く用いられているものに Hiley の公式があるが、之は錘の落下中の損失や、衝撃の能率に関する係数を含み、杭の寸法、土の弾性圧縮等も含め考慮しているので、Taylor²⁾ 等の推奨する所の式であるが、装飾が華麗なだけで、内容は、この第三類に属するものである。

以上を要約すると、杭打公式のエネルギー損失の計算法には、次の三ツがある。

- a. 杭の弾性圧縮だけを考えるもの。(4) の Weisbach の式、その他。
- b. Newton 損失だけを考えるもの。(10) の Eytelwein の式、(11) の Sander の式、その他。
- c. 両者を同時に考えるもの。(12) の Redtenbacher の

式, Hiley の式等。

之らは何れも次の理由によつて、理論的に間違っている。

- a. 杭の弾性圧縮は静力学から求めたもので、動的問題である杭打には適用できない。
- b. Newton の衝撃理論は条件がまるで違うから不適である。
- c. 前二者の併用は、夫々の適用が不合理の上に、その一方は他を含むものであるから、一層不可である。

更に Cummings は、動的に計算された杭の支持力と、直接我々の必要とする静的支持力との間の関連について、次のように言っている。一般に我々が杭に期待するのは、その上にかかる静荷重に安全に耐えることなのだが、その限度を判断するために、我々は多くの場合動的に杭を打込んでその抵抗の大小をはかり、之に安全率を見込んで、静的支持力としている。そして、動的に求めた抵抗が、使用する公式によつて甚だしい差違を示すばかりでなく、実際に観測された静的支持力よりウンと大きいこともあるし、又その逆のこともある。之がかりに事実とすれば、その原因は、杭打公式のよつて立つ仮定が、真実より甚だ遠いことにありと断ぜざるを得ない。そして、より正しい動的公式を作り上げる上の基本的問題は、杭の動的な抵抗と、その静的耐力との間の関連を適確に把握することが緊急であつて、この問題は、数学や応用力学だけによつては、とき得ない性質のものであり、打込み中の杭の運動を正確に観測、解析することが絶対必要であるとしている。

しからば Cummings は杭打公式として如何なるものを推奨するかというと、Saint-Venant と Boussinesq*によつて展開された弾性棒の縦方向の衝撃理論と、(3)式の c と Q を、今までのような仮定によらないで、現物について観測決定する場合の二つをあげている。よつて次項にこの衝撃理論に関する彼の説明を紹介する。

III. Venant-Boussinesq の衝撃理論⁶⁾

Cummings は、杭打ちは Newton 理論よりもはるかに、この理論に近いとしている。

この理論は、一端を固定した、弾性率 E 、単位長の重量 w の棒に、剛体に近いハンマーで棒の長手の方向に打撃を加えた時の応力の伝播と、固定端の応力状態を論じたものである。この理論の仮定は、

- (1) 棒の側面は自由で、縦方向への応力伝播をさまたげない。

* 尙余談であるが、J. Boussinesq (1842-1929) は、土質力学ではなじみの深い人であるが、Barré de Saint-Venant (1797-1886) の弟子で、共に仏人である。

- (2) ハンマー中の応用は無視される。

- (3) 棒は横方向の振動を行なわない。

- (4) 棒は直線的で弾性体である。

- (5) ハンマーは直接棒頭をたたき、接触面は互に平行で平滑である。

- (6) 棒の一端は固定している。

であつて、Saint-Venant は $W/P < 5$ の時に固定端に生ずる最大応力を次のように求めている。

$$p_{\max} = \frac{2EV}{a} \left(1 + e^{-\frac{2P}{W}}\right) \dots\dots\dots (13)$$

V は錘の打撃の瞬間の速度で $\sqrt{2gh}$, a は応力の伝播速度で

$$a = \sqrt{\frac{Eg}{w}}$$

e は自然対数の底で、他の記号は前同。上記の仮定について Cummings は次のように説明している。

- (1) の仮定は、杭の場合、側面の摩擦の存在による誤差は安全側にある。即ち計算値は実際の応力より大きく出る。

- (2) は実際の錘の材料、寸法から言つて、そのままあてはめてよい。

- (3) 杭の場合に横方向の振動があつたにしても、それに費されるエネルギーは錘の与えるエネルギーの数%にすぎないから、このまま適用してよい。

- (4) は継手のある杭とか、合成された杭には不適な仮定である。

- (5) 殆んどの杭打作業では、緩衝材が入るから、ここで応力が減殺され、実際に杭に伝わる応力は理論値より小さい。

- (6) 杭の先端は決して固定していない。打撃によつて貫入するし、弾性変形もある。このため実際に、杭先端に生ずる応力は、この仮定によるものより小さい筈である。

以上のような考察によれば、大半の仮定が、理論値の過大なる事を意味してをり、(13)式は従つて実際の値より非常に大きい値を与える。それでイギリス⁷⁾では、前記の仮定をいくらか変えた式を誘導した。即ち(5)の仮定の代りに弾性クッションの項を入れ、更に(6)の仮定を、杭先端の応力はその貫入量に比例すると変更して微分方程式をとき、実用に適する公式を与えた。Cummings は、そのうちの一つとして、重い錘でクッションが比較的やわらかく、固い地盤に打込まれる、短い杭の場合について

$$p_{\max} = \frac{EV}{a} \sqrt{\frac{W}{P \left(1 + \frac{E}{TL}\right)}} \dots\dots\dots (14)$$

を示している。 T はクッションの固さに関する定数で、普通程度のクッション・ブロックでは T は $10,000 \text{ lbs/in}^3$ 位としている。杭の動的支持力は、杭の先端の断面積に $p_{\max}$ をかければよい。従つて、この式は支持杭だけに用いられるべきものである。

Cummings はこの式の特長を説明するために同一寸法の木杭コンクリート杭を、同一の W と h と T を用いて打つた場合の、(10), (13), (14) 式の比較を行つた上に、之を実証する実験例を詳細に解説している。ここでは、(10) 式との比較だけをきつて紹介するにとどめる。

勿論、前論から分るように、(13) 式による値は (14) 式のそれより、はるかに大きい。仮定が違うからである。しかし、それでも (14) 式による値は、側面摩擦や応力伝播の損失を無視しているために、真実のものより大きいであらうと予想される。木杭とコンクリート杭を同一条件で打つたとすれば、即ち (10) 式で W, h, S が同一になるように打つたとすれば、(10) 式によると、木杭の方がコンクリート杭より強く計算される。木の P がコンクリートのそれより小さいからである。所が (14) 式を使うと結果は逆であつて、計算例では、コンクリートの方が木より 32% ばかり大きい。それで問題は、同一条件で、 S が同一になるまで打つた場合、重くて剛性のある杭と、この反対の杭とは、どちらが余計に耐力があるかということになる。これは理論的にも実例からも、コンクリートの方が大になるのは間違いない。即ち、同一の打止りになるまで打つと、コンクリートの方が応力伝播が良好であり、先端部の応力強度が大であるから、一打撃による貫入量は、土質が同一なら、コンクリートの方が大である。それで同一の S に達するまでにコンクリートの方は木より深くて強固な部分まで貫入する筈だからである。

以上の比較からみても、在来の公式は杭材の剛性については全く考慮しない所であつて、根本的に間違つてをり、Venant-Boussinesq の衝撃理論の方がよりよく杭打ちにあてはまると結論している。然し、実際イギリスでこの種の公式を使つているのかどうか、又他の条件のもとでの公式が揃つているのかどうか、7) の文献がないので一切不明である。それでも、以上によつて Cummings の言わんとする所は分るような気がするのである。

次に動的に求めた杭の抵抗と、実際我々の必要とする静的支持力との関連については、Cummings は何も具体的な説明をしていない。それで、この事について論じた論文⁹⁾があるので紹介する。

IV. Buisson による杭の動的抵抗と 静的支持力の関係

Buisson はフランスの港湾局建設部長のようで、Terzaghi の Theoretical Soil Mechanics を仏訳したり、

第8回土質基礎工学国際会議の討論の座長をつとめたりしている所を見ると、単なる建設技術者ではないようである。この論文を簡単に紹介すると次のようである。

(1) 貫入試験から得られた結果

Buisson の云う貫入試験法は、この論文には明記されていないのであるが、文中から察すると、静動両式の貫入法であるようだが、先端部の構造、寸法、とか貫入方法、その他は不明である。Buisson は、この試験から得た静的支持力 R_s と、Eytelwein の公式 (フランスではオランダ式というらしい)

$$R_d = \frac{W^2 h}{(W+P)S}$$

との比、 λ を、 S の函数としてプロットしてみると、種々の土質について、或る一定した関係にある事を認めた。即ち 図-2 にみるように、

$$\frac{R_s}{R_d} = \lambda$$

は、 S が 2.5 mm 以上では一定値であつて、それ以下では直線的に 0 になつた。 λ の値は土質によつて異なり、石灰で 1.2 (之は実験値が $S=2.5 \text{ mm}$ 以下のものが大半で

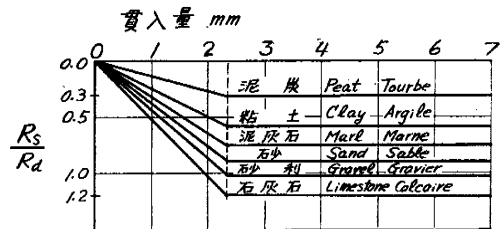


図-2 S と R_s/R_d の関係 (貫入試験の場合)

あるので疑問であるが、他のすべての土質について成立するのだから、この場合だけが例外である筈はないとしている) から、泥炭で 0.3 あつて、他のものはこの間を変化する。尙一言余談に申しあげると、近時しばしば問題になる泥炭の支持力は之から類推できそうであるが、ヨーロッパの泥炭と本道のそれとが土質力学的に近いものかどうか筆者の保証の限りでない。砂は 0.85 で、凝集力の大きい粘土で 0.5 であるから、一般に我々が遭遇する土では、この間に変化するとして、求める静的支持力は、Eytelwein の式から求めたものの 6, 7 割位という事になるが、之は寸法の小さいものについての話だから、そのまま一般の地盤にとり入れることは危険であらう。

(2) 以上の結果を杭打ちに拡張すること

以上の結果を用いをと、杭の支持力 R は $S < S_0$ の時

$$R = \frac{W^2 h}{(W+P)S} \cdot \frac{\lambda S}{S_0} = \lambda \frac{W^2 h}{(W+P)S_0} \quad \dots (15)$$

$S > S_0$ の時

$$R = \lambda \frac{W^2 h}{(W+P)S} \quad (16)$$

h, S は cm, W, P は ton

で表わされる。(15)式は、打込みの際の実際の貫入量 S でなくて、限界貫入量 S_0 を使っているのは不思議に思われるが、 S が S_0 より小さい時は、前記の実験結果から、 λ は S/S_0 の比で小さくなる筈だから、(15)式でよいわけである。 S の観測については、3秒間に1回の割合で連続して打込み、10回、少くとも5回の平均をとるべきものとしている。

更に Buisson は図-3に示すように直径 25 cm のコンクリート杭について S と λ が直線的な関係にあることを確めた。勿論この時の S は S_0 以下にあつたわけで、

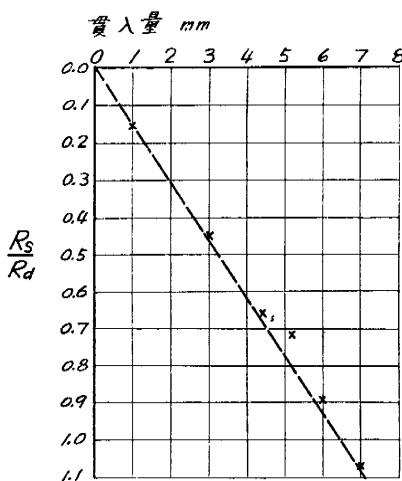


図-3 S と $\frac{R_s}{R_d}$ の関係
(実際の杭について)

この野外実験から、既述の結果が実際の杭にまで拡張してもよさそうであることが分つたわけである。それで次の問題は、実際の杭にあてはまるように、 λ や S_0 をきめて行くことにあつた。

(a) 杭の場合の S_0

S_0 は杭の径や材料が変われば違つて来る筈だから、貫入試験の場合のそれをそのまま使えない事は勿論である。Buisson は一応の値として図-4を与えている。この曲線の作り方は次のようにする。

先づ λ を求める。或る土について λ を求めるには、 S を、予想される S_0 より大きくなるように打込めば、既に分つているように、 λ は一定値となるから、この時の値を、求める λ とすればよい。即ち (16) 式で、杭の静的支持力 R' が別に観測されると

$$R' = \lambda \cdot \frac{W^2 h}{(W+P)S}$$

で、 λ だけが未知だから計算できる。 $S > S_0$ するには、錘の重量 W を大きく目にすればよい。

次に S が予想される S_0 より充分小さくなるようにして杭打ちをやると (こ

のためには h を調節する) の場合の静的支持力は (15) 式から、 S を使わないで計算されるから、之と実際に観測された静的支持力を等置することによつて S_0 が求まる。即ち、実測支持力を R' とすると

$$R' = \lambda \frac{W^2 h}{(W+P)S_0}$$

で、 λ は分つているから S_0 は求まるわけである。

図-4をみると、或る一つの直径の前後では、ほぼ S_0 と直径が比例し、直径が充分大きくなると S_0 の増加はゆるくなり、かつ曲線は原点を通らない。この事は、直径が次第に小さくなつて、0 に近付く場合を考えると、杭周の摩擦に打ちかち、土の平衡をやぶつて貫入するためには、 S は 0 であることはできないから、曲線は原点を通らなくてよいのである。

この方法は、チクソトロピーのない土についてだけ行なえるもので、この場合の支持力は時間によつて僅かに変るだけであり、その変化分は打込完了後 48 時間で再打撃をやり、補正することが可能である。 h が一定で S が S_0 より小さい場合の R は、(15) 式の示す通り一定しているが、 S_0 より大きい場合、 R はこの一定値より小さくなり、その割合は (16) 式から分るように S_0/S である。

ここで筆者の疑問を言つてみると、この項の λ や S_0 を求める際の W や h と S の関係についてである。即ち前論によると、 λ を求める際には S が大きくなるように W を大きくし、又 S_0 より小さい S を求めるには、 h を小さくするようにしている。即ち、この考え方は、貫入量 S と、加えるエネルギー Wh が直線的に比例する事を暗に仮定しているように見える。之は既述の

$$Wh = cRS + Q$$

の式からみて正しくなく、又我々の貫入試験の野外及び室内実験の結果からも正しくない事が分る。又杭が同一の場合 W が大きいと、損失 Q が大きくなる事は既に証明済みであるから、 Wh が 2 倍になつても S は 2 倍にならない。又 λ をきめるために W を大きくすると言つて、こうすると Cummings の Eytelweten 式に対

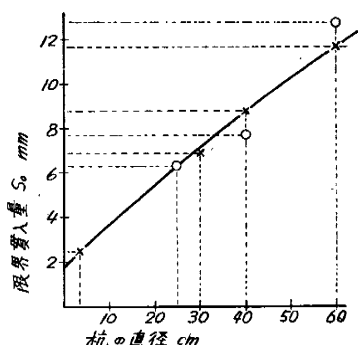


図-4 杭の直径と S_0

する批判がそのまま適用されて不合理の結果になる。だから λ や S_0 を求めるために、 W や h を余り大きい範囲に動かすと、結果の精度が低くなる心配がありそうである。

(b) 杭の場合の λ

貫入試験では、 λ の値は、土質によつて一定していた。しかし、実際の杭について土質がきまれば、杭の直径や材料に無関係に一定するであろうか。之について Buisson は杭の直径や材料による以外に、杭周辺の摩擦、し

たがつて、杭がつき抜けた部分の土の性質及び杭の表面の状態にも関係する筈だとしている。それで、この場合の λ を求めるには前記のように、実際に杭を打つて荷重試験を行ない、色々な条件のもとでの λ を求めておく必要があるわけである。

表—1 は 図—4 の S_0 を求める時に使つた資料で、同時に λ も示している。又 表—2 には、貫入試験の λ と対比して、土質による λ の範囲を示している。

この表をみると、得られた λ の分散は相当に大である。

表—1 S_0, λ を求める実験資料

番号	有効径 (cm)	S_0 (cm)	S (cm)	W (ton)	P (ton)	h (cm)	$\frac{W^2h}{(W+P)S}$ 又は S_0 (ton)	静的 支持力 (ton)	λ	入土の性質	出所
1	32	0.75	1.6	4	3.53	65	85	110	1.3	微粒砂	Boonstra
2	40	0.8	0.47	4	6.5	65	123	160	1.3	砂利及び砂	"
3	40	0.8	1.03	4	5.52	65	106	140	1.32	微粒砂	"
4	60	1.3	0.4	5	5.9	65	115	150	1.3	砂	"
5	122	1.29	0.5	30.5	32.7	35	402	525+	1.3	微粒砂	"
6	40	0.9	0.8	4	8.11	65	94	266+	2.84	{シルト (24m 深, 砂, 砂利, 粘土混り)	"
7	40	0.9	2.8	4	4.2	65	45	60	1.33	{貝ガラ混りのやわらかい粘土	"
8	35	0.8	0.9	3	2.2	50	96	45	0.42	第4紀の粘土	Le Havre
9	30 (25×25)	0.7	0.6	1.6	1.7	100	110	115	1.04	砂	Arras
10	"	0.7	0.525	1.6	1.7	100	110	107	0.97	"	"
11	55 (球根つき)	1.1	0.15	3	2.36	100	153	220	1.44	砂 利	Le Havre
12	51 (40×40)	1.0	0.94	5	7.4	100	203	400+	1.97 (1.33)	{チクソトロピーのある粘土	"
13	35	0.8	0.65	3	4.3	100	153	150	1 (0.65)	" "	"
14	35 (30×30)	0.8	1.6	3	1.95	100	112	114	1	砂 利	Lisieux
15	45 (40×40)	1	0.42	3.5	5.8	100	110	170+	1.52	石灰石	Caën
16	45 (40×40)	1	0.6	6	6.4	100	290	700+	2.4	Kimmeridge 粘土	Boulogne
17	36	0.8	0.2	2.5	3.5	100	130	140	1.08	泥灰石	Déchy
18	40	0.9	0.6	2.1	1.4	120	163	140	0.83	"	Villaret
19	44.5 (35×35)	1	0.3	4.5	11	80	110	120	1.1	"	Royan
20	40 (35×35)	0.9	0.3	2.5	3.6	100	114	240+	2.1	{チクソトロピーのある砂利 (表層)	Chambéry
21	40 (35×35)	0.9	0.5	3	2.3	50	94	75	0.79	微粒砂	Dunkerque
22	50	1.1	(<1.1)	2.7	4.1	300	285	500+	1.76	{分解した片岩 (チクソトロピー) {砂質粘土 (チクソトロピー)	Nantes Tunis
23	52.5	1.1	0.5	10	16	100	352	350+	1	"	"
24	35	0.8	0.58	4	4.55	100	230	230+	1	"	"
25	40 (35×35)	0.9	0.5	4	3.85	100	226	230+	1	粘土質の砂	Sfax

註： 静的支持力の項の“+”印の数値は概略値である。之は筆者の註で、この表は原文のままをのせたので、筆者の意見は入っていない。

表—2 種々なる土質に対する λ

土の性質	杭 について の λ		貫入試験 で 得 ら れ た λ
		平 均	
泥土 (Vase)			0.3
軟かい粘土	0.42-1.33	?	
かたい粘土	0.65-1.33	?	0.60
砂 質 粘 土	1-1-1	1	0.75
極微粒, シルト質砂	0.79	0.8	
砂	1.07-1.30-1.43	1.30 $\pm$ 20%	0.85
砂 と 砂 利	1.30-1.70-1.90	1.60 $\pm$ 20%	
砂 利	1.10-1.30-1.44	1.25 $\pm$ 25%	1.00
泥 灰 石	0.88-1.08-1.10	1.00 $\pm$ 20%	0.75
石 灰 石	1.52	1.5	1.20
分 解 し た 片 岩	1.76	1.80	
シ ル ト	2.76	2.76 ?	

だから、この研究結果を実際に利用するためには、更に詳しい、数多くの資料を集め、之にもとずいて妥当な範囲をきめる必要がある。又同表によると λ の値は、実物の杭の場合、貫入試験のそれより 30% 位大きいことが認められる。

(c) 支持力の補正

Buisson の行なつた杭の載荷試験は、打込み後一箇月で行つたが、これは支持力の時間による変化を除去するためであつた。それで、実際の場合、杭打ちの結果から直ちに支持力を算定するためには、時間に関する補正係数を導入する必要がある、この係数の値は、砂の場合 1 より小さく、粘土の場合 1 より大きい事が考えられる。この補正係数の求め方については、次のようにのべている。

まず、粘土については、打つた杭の周辺部から、 t , $2t$, $4t$, の時間ごとに不攪乱試験をとり、これらについて剪断試験を行なつて、剪断抵抗の増加を見る。 t を対数に目盛ると、剪断抵抗はほぼ直線的に増加するから外挿法によつて、一箇月なり、半年後の剪断抵抗を求め、之と打始めの時のそれとの比から係数を求める。粘土では、当然 1 より大きくなる筈である。

砂については“surbattage (過度に打込むこと?)”によつて求まる”と簡単に書いてあるだけで筆者には分らない。

(d) 杭の有効徑

表—1 の最初にある有効徑とは次のような考え方による。即ち、杭の断面が円以外の形の時、これを或る仮定を設けて円に換算した時の直径をいうので、一辺 a の正方形の杭の有効徑は、杭が所謂支持杭である場合、杭の先端部の断面積を等しいとして

$$\frac{\pi d^2}{2} = a^2 \quad d = \frac{2a}{\pi} = 1.13a$$

摩擦杭である場合には、側面積を等置して

$$\pi d = 4a \quad d = \frac{4a}{\pi} = 1.27a$$

となり、杭の性質が兩者の間にある時、 a にかける係数は 1.13 と 1.27 の中間とする。

(3) 結 論

以上のようなわけで Eytelwein のような簡単な公式を使つて、杭の径や土の性質を考慮しながら、 λ や S_0 や支持力補正係数を使つて、杭の静的支持力を求められそうである。こうすると、載荷試験などによる甚大な経費や日時の損失を来すことなく、又盲減法な安全率を用いる事による不当な支出を節減することができる。しかし、この方法にも、まだまだ不備の点があるが、特に粘土については、 λ の分散がはなはだしく、今後の多方面に亘る詳細な研究にまつものであるとしている。

この Buisson の論文は、いかにもフランス人らしい着想と展開を示すもので、在来の杭打公式の殆んどすべてが土質に全く無関係であつた点や、動的に得られた抵抗を安全率でカバーして静的な支持力とし、その安全率には経験以外に何も根拠がない点等を考える時、兩者をたくみに結合した点は、今後の杭の支持力計算に一つの道を開いたものと考えられる。

V. 結 び

筆者の予定としては、最後に現代の土質工学の大家である Terzaghi とか Taylor とか Peck とか、Tschebotariof とか、Skempton とかが、杭打公式をどうみているかについて申しあげるつもりであつたが、すでに制限の紙数もこしたので之でやめる。ただ一つだけ興味あると思われる事を申しあげると、之は既出の Taylor の言であるが、彼の考によると、杭の支持力計算の方法としては、将来、本文で対象とした動的公式は次第に使われなくなり、それに代つて静的方法、即ち

$$Q_s = A_f c + A_t \cdot q$$

Q_s : 杭の静的極限支持力

A_f, A_t : 周辺摩擦や先端支持応力を与える杭の夫々の面積

c : 摩擦強度の平均

q : 杭先端の支持応力強度

の形式の公式がより多く使われるだろうと预言している。この事は、杭打ちに際しての土自身の物理、力学的性質の解明が進歩し将来、動的公式の存在が不要になる可能性がある事を意味するものと思う。

参 考 文 献

- 1) A. E. Cummings: "Dynamic Pile Driving Formulas" Journal of Boston Society of Civil Engineers. Jan. 1940.
- 2) A. E. カミングス著 松尾新一郎訳: 基礎工学, 共立全書 503 昭 29. 序文. 尙 Géotechnique 1955. V-3 によると, A. E. Cummings は, 1955 年 7 月 20 日 New York で急死した. 61 才.
- 3) Terzaghi: Theoretical Soil Mechanics 1942. p. 136.
- 4) 原口, 米田: 新稿「土と杭の工学」 p. 148 の Weisbach, Eytelwein の式は, 杭の自重を考えているのが違うだけである.
- 5) D. W. Taylor: Fundamentals of Soil Mechanics 1948. p. 664.
- 6) 之については, 次の書物に詳しく書いてある.
ティモシェンコ著 谷下市松訳; 「工業振動学」 昭 18. p. 332.
- 7) Glanville, Grime, Fox & Davis: "An Investigation of the Stresses in Reinforced Concrete Piles During Driving" Buil. Research Technical Paper No. 20. London 1938.
- 8) M. Buisson et M. Chapon: "Relation entre les résistance statiques et dynamiques des pieux" Proc. 3rd. Int. Conf. on S. M. & F. E. 1953. Vol. II. p. 16.

昭和 31 年度北海道主要土木工事 (続)

北海道電力株式会社 (工費 1 千万円以上のもの)

工 事 名	総 工 事 費 千円	工 期	業 者 名
安足間発電所導水路修繕	19,636	自昭和年月 31. 5 ~ 至昭和年月 31. 7	土木一飛島土木, 逢沢組
鮎別発電所新設工事	252,055	30. 8 ~ 31. 12	土木一清水建設 主要機器一大島工業 (鉄管) 日高製作所 (水車発電機)
鮎別発電所導水路修繕	17,000	31. 8 ~ 31. 10	土木一清水建設, 昭和土木, 鹿島建設, 勇建設
雨竜発電所鉄管路バタフライバルブ更新	18,058	30. 6 ~ 31. 9	主要機器一大島工業 (バタフライバルブ)
雨竜取水口, 制水門新設	23,000	31. 4 ~ 31. 10	土木一西松建設 主要機器一田原製作所 (門扉)
上岩松発電所新設工事	2,890,000	29. 9 ~ 31. 9	土木一飛島土木, 地崎組, 大成建設 主要機器一三菱日本 (門扉) 石川島 (鉄管) 明電舎 (発電機) 東芝 (水車)
層雲峡発電所跡地整理工事	10,525	31. 5 ~ 32. 6	土木一清水建設
岩知志発電所新設工事	1,870,000	31. 10 ~ 33. 9	土木一飛島土木, 地崎組, 佐藤工業 主要機器一日立製作所 (水車, 発電機)
室蘭変電所整地工事	28,000	31. 12 ~ 32. 3	土木一大成建設