

単グイの支持力機構について

京都工芸繊維大学助教授 山 肩 邦 男

1 序

鉛直荷重をうけた単グイの支持力については、いままでに数多くの静力学的支持力公式やクイ打公式が提案されてきた。しかしながら、これらは地盤の終局的な状態を対象としたものであり、載荷途中の支持力の推移過程については、ほとんど研究の実績がみられなかった。とくに沈下量については理論的な説明がまったくおくれしており、クイへの実載荷によって沈下量を実験的に求めようとする方法が、一般に行なわれているにすぎない。この点、クイの横抵抗についての研究と比較して、非常に立おけているといえる。

本文では、最近における研究の結果から、クイが載荷されたときの支持力と沈下の機構が現実にとのようであるかという現象に注目し、これらの性状とその理論的な裏付けについて、のべてみたいと思う。

2 単グイの荷重と沈下量

単グイの載荷試験において、ヒズミ計などにより、クイ軸にそつた軸圧分布を計測した結果をみると、図1に示すように、軸圧 R および沈下量 S は地表から先端に向つて、しだいに減少し凹型の分布となることがわかる。(ただし中間層の土性を一様と仮定する。)すなわち、次式が成立する。

$$R_0 = R_f + R_p \quad \text{.....(1)}$$

$$S_0 = \delta + S_p \quad \text{.....(2)}$$

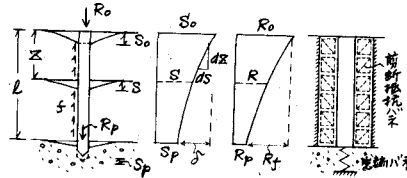


図 1

ここに、サフィックス0はクイ頭、pはクイ先端、fは摩擦抵抗によるものを表わし、 δ はクイ自体の収縮量である。

上の2式は、つねに満足されなければならない条件式である。そして地盤条件が同じであるとしても、つぎのような因子によつて、右辺の内容が変動することが考えられよう。

- a クイの種類(クイの圧縮剛性 AE)
- b 荷重の大きさ R_0
- c 載荷後の経過時間 t

また地盤条件の相異なる場合には、つぎの因子が大きく影響してくる。

- d 先端地盤の剛性(地盤係数 k)
- e 中間層の摩擦に対する剪断剛性(摩擦剛性 B)
- f 支持グイと摩擦グイの別

以上からもわかるように、クイの荷重～沈下性状は数多くの因子の影響をうけるものであり、またそのために理論化が立おけてきたものと考えられる。以下においては、主として支持グイを対象と

し、また通常の載荷試験程度の時間に限るものとして、考察してゆきたい。

3 支持力機構のモデル

2にのべた諸因子を包含するものとして、図1の右端のようなモデルを想定する。クイはA Bの剛性をもつ弾性体であるとし、先端に地盤係数 k をもつ先端バネ、中間層のクイ周には摩擦剛性 B をもつた剪断抵抗バネが配置されているものとする。したがって、地表から Z の深さにおけるクイの沈下量 S に比例してその位置の摩擦抵抗が作用し、また先端沈下量 S_p に比例して先端抵抗 R_p が作用する。一方、クイ自体の弾性方程式としては、つぎの式が誘導される。

$$\frac{d^2 S}{dZ^2} + \frac{f \Psi}{AE} = 0 \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 f ：クイ周の単位面積あたりの摩擦力、 Ψ ：クイの周長 である。

(3)式を初めて紹介し、この式によつて沈下現象を説明しようとしたのは、Seed および Reese¹⁾であり、彼等は数値解を求めて粘土中の摩擦グイの実験曲線と比較検討した。ついでKézdi²⁾は、砂地盤についての $f \sim S$ 曲線を直線と仮定し、弾性解を求めた。さらに筆者は、支持グイを主対象とし図1のような地盤条件に対して、理論的考察とその実験的裏付けを行なつてきた。^{3)~11)} 従来の古典的な考え方では、クイを剛体とみなすのが一般であつたが、クイの荷重～沈下曲線の意義を考察したり、摩擦抵抗と先端抵抗を分離したりする解析は不能であり、上述の弾性グイとしての考え方によらなければ、新しい発展はありえないといえよう。

(3)式を解くにあつては、クイ頭またはクイ先端の荷重や沈下量を境界条件として考慮すればよい。この場合、クイ周の $f \sim S$ 曲線やクイ先端の $R_p \sim S_p$ 曲線がどのような性状を示すかについて、実グイの載荷試験の解析から求めた実験値を紹介しておこう。図2および図3は、大阪附近における中間粘土層の $f \sim S$ 曲線の実例である。

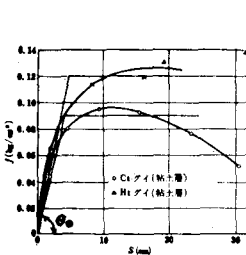


図2 $f \sim S$ 実験曲線 (その1)

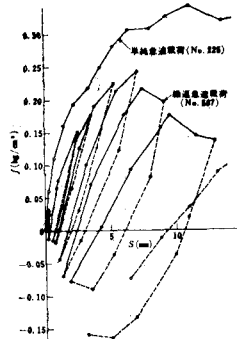


図3 $f \sim S$ 実験曲線 (その2)

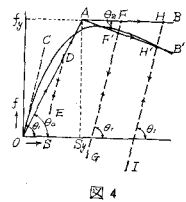


図4

図2³⁾にみられるごとく、 $f \sim S$ 曲線は一般に曲線状を示すが、近似的には完全弾性部(摩擦剛性 $B = \tan \theta_0$)と完全塑性部にわけた折線状に置きかえることもできよう。図3には繰返急速載荷の例⁵⁾をも示してあるが、この近似化としては図4のごとく置かえることが許されよう。⁸⁾ (A B'は粘性土の乱れによる低下を表わす。除荷時および再載荷時は初期切線OCと平行とする。)また図5には、クイ先端抵抗と先端沈下量の関係の実測曲線を示した。一般には曲線状であるが、原点近くで

は近似的に直線とみて差支えないであろう。

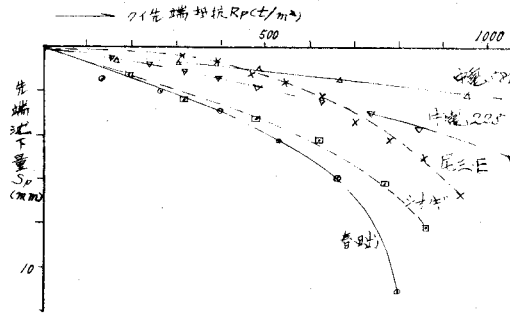


図5 クイ先端抵抗～先端沈下量の実測曲線

4 荷重にともなう f 分布の推移と荷重～沈下曲線

図1のモデルにおいて、沈下量はクイ頭からクイ先端に向つて減衰するから、摩擦応力 f は逆にクイ頭部において最大である。したがつて荷重にともない、 f 分布はクイ頭部から次第に塑性化してゆく。図2のような完全弾塑性の仮定のもとに、理論解を求めた結果を図6⁷⁾に示しておいた。同図の f 分布の推移過程において、つぎの2つの荷重値が特記されよう。

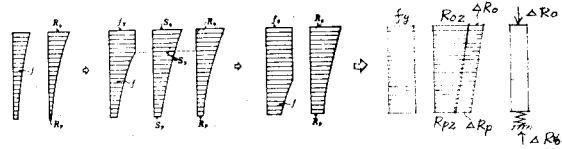


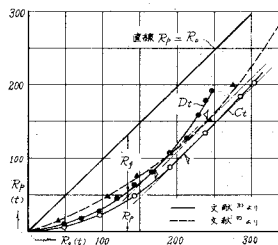
図6 f 分布の理論解

- $R_{0.1}$: クイ頭部の f が塑性値 f_y に達した時の荷重
- $R_{0.2}$: クイ全長にわたつて、 f 分布がすべて f_y に達した時の荷重

したがつて、 $R_0 < R_{0.1}$, $R_{0.1} \leq R_0 \leq R_{0.2}$, $R_{0.2} \leq R_0$ に応じて f 分布は、それぞれ全弾性、弾塑性、全塑性状態にあることになる。 R_0 が $R_{0.2}$ に達して以後の荷重増分 ΔR_0 は、 f 分布が全塑性状態であるためそのまゝクイ先端に伝達され、 $\Delta R_p = \Delta R_0$ となる。したがつて、荷重増分 ΔR_0 に関しては、クイの沈下性状は、先端抵抗バネに支持された柱体の性状と同等である。

f 分布のこのような推移につれて、その積分値である全摩擦抵抗 R_p は、次第に一定値に近づく。クイの釣合は(1)式を満たさねばならないから、 R_p は(1)式を満たしつつ次第に増大する。この間の関係を示す実験曲線を図7⁸⁾に示しておいた。同図において各曲線の矢印は $R_{0.2}$ における先端抵抗にあたるものである。

図7 $R_0 \sim R_p$ 曲線の実測例



つぎに、荷重～沈下曲線について、理論的考察を試みる。現実の荷重～沈下曲線と上述の理論に基づく曲線を比較したのが、図8である。文献³⁾の検討によれば、 $f \sim S$ 曲線の弾塑性仮定(図2)にもかゝらず、両曲線は非常に一致を示した。

図8の破線は理論曲線を示すものであり、a点およびc点が荷重 $R_{0.1}$ および $R_{0.2}$ にあたる。したがって、0a間、ac間、cd間が上のべた f 分布の全弾性、弾塑性、全塑性域にあたる。理論値0a間(直線)と実験曲線との相違は、図2の仮定にもとづくものであり、理論値cd直線に対して実験曲線が次第に下方へそれるのは、沈下の進行と共に f_y 値が次第に低下することおよび先端の沈下曲線 $R_p \sim S_p$ が次第に直線性から離れるためと考えられる。またa～c間では、両曲線はほとんど一致する。このような比較から、現実の荷重～沈下曲線の示す意義がかなり明らかとなってくるであろう。

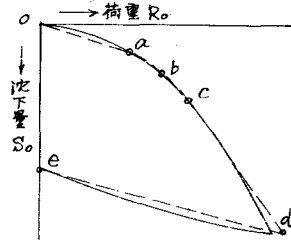


図 8

しかしながら、通常の載荷試験結果から、上述の $R_{0.1}$ 、 $R_{0.2}$ の値を判断することは、一般に難かしい。このためには、載荷試験にあたって先端抵抗または先端沈下量を同時に測定することが望ましくその測定結果は支持力を解析する上で非常に有効である。この点については、すでに文献⁶⁾、⁹⁾で述べたから参照されたい。このような測定を行なわない場合の判断の資料として、つぎのようなことがあげられる。

$R_{0.1}$ の状態では、クイ頭部の f が f_y に達するため、沈下量 $S_0 = S_y$ となる。従来の粘性土層についての資料からは、 $S_y = 1 \sim 5$ mm (平均3 mm)とみてよいようである。したがって、荷重～沈下曲線から大略の $R_{0.1}$ を推定することもできよう。 $R_{0.2}$ は、定性的には荷重～沈下曲線が曲線状から比較的直線状に移行する点としておさえられる。しかし、載荷法として繰返載荷法(途中の荷重階から除荷・再載荷を行なう方法)による場合は、後述するごとく残留沈下量曲線の性状から、 $R_{0.2}$ を判断することも可能であることを附記しておこう。

載荷にともなう f 分布の型としては、従来図9のようなものがあつた。

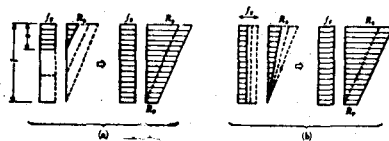


図 9 従来の f 分布型

(a)はクイ長をいくつかの小部分に細分割し、上の小部分の f がすべておこなってから下の小部分に軸圧が伝わるという考え方であり、(b)はクイを剛体と仮定して沈下が全クイ長を通じて等しく、かつ一様に増加するという考え方である。(a)はクイとしての一体性がないこと、(b)は先端部の f が発生していることから、先端沈下量がともなうべきであるのに、先端抵抗が発生していないことなどより、妥当とはいえない。この矛盾に対して、筆者は図6を参照して、図10のごとき分布型を提案しておいた。¹⁰⁾より精しくは文献¹¹⁾を参照されたい。

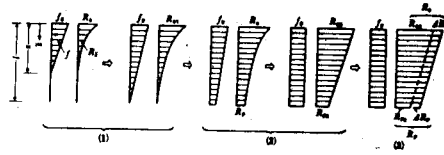


図10 σ 分布の提案型

5 残留沈下量曲線について

従来、載荷試験における弾性戻り量および残留沈下量については、その力学的意義は明確でなく、単にクイおよび地盤の弾性変形および塑性変形の性状の表われとしてのバク然とした認識しかなかった。文献⁸⁾において、図4のごとく $f \sim S$ 曲線の性状を仮定した結果、残留沈下量曲線のもつ意義が明確になってきた。

図11は上の理論から求めた荷重～沈下曲線および残留沈下量 (S_{OR}) 曲線・弾性戻り量 (S_{oe}) 曲線の形である。図2からもわかるように、除荷時の $f \sim S$ の勾配が急であることから、除荷時の荷重～沈下曲線(直線)は載荷時よりも勾配は急となる。同図の a_0, c_0 は荷重 R_{o1} および R_{o2} に対応する点であるが、残留沈下量曲線はこれらの荷重値を境として、直線→曲線→直線と変化していることがわかる。一方、弾性戻り量曲線は理論値としては直線状を示した。これらの定性的な傾向は、実際の載荷試験でもみられるところであつて、例えば文献¹²⁾の付録の鋼ぐい載荷試験結果集を比較参照されたい。

4で予告しておいたごとく、 R_{o2} の判定は繰返載荷法による場合、残留沈下量曲線が中間の曲線部から後の直線部に移行する点として検出できるのであつて、解析上の手掛りを与えるものと思う。

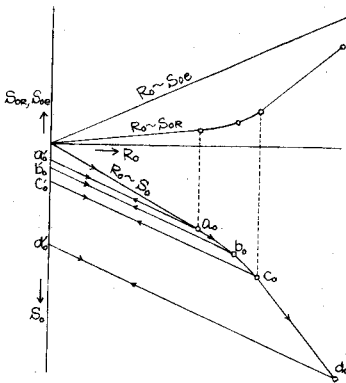


図 11

なお、クイ頭の弾性戻り量 S_{oe} および残留沈下量 S_{OR} は、つぎの式のような意味をもつものである。

$$S_{oe} = S_{pe} + \delta - \delta_f \quad \text{..... (4)}$$

$$S_{OR} = S_{PR} + \delta_f \quad \text{..... (5)}$$

$$S_o = S_{oe} + S_{OR} \quad \text{..... (6)}$$

ここに、 S_{pe} : クイ先端の弾性戻り量

S_{PR} : クイ先端の残留沈下量

δ : 除荷前のクイの圧縮量

δ_f : 周面摩擦によるクイの弾性戻りの拘束量

であり、除荷後 ($R_o=0$) は図12の右端のごとき状態となる。

これは図4において除荷時の $f \sim S$ がついに負量に達し、

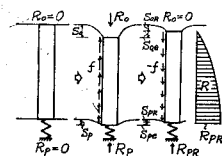


図12

$R_0 = 0$ において負の摩擦力を生ずること、そしてその合力とクイ先端の残留抵抗 R_{PR} との間に釣合を保つ状態となることを示すものである。 δ_1 は残留軸圧によるクイ自体の圧縮量にあたるものである。なお、これらの現象は載荷試験の結果からも裏書きされている。⁵⁾

6 結 語

以上、単グイの載荷時の荷重～沈下性状を検討するにあたって、その支持力機構をモデル化して、理論的に考察する方法をのべた。その結果として荷重～沈下曲線の示す力学的性状、摩擦応力分布の推移、残留沈下量曲線の示す意義などについての検討の結果をのべておいた。詳しくは参考文献を参照されたい。なお降伏荷重と本文の R_{02} との関係などについては省略したが、文献^{6), 9)}をみて頂きたいと思う。

(参考文献)

- 1) H. B. Seed and L. C. Reese : The Action of Soft Clay along Friction Piles, ASCE Vol. 81, 1955
- 2) A. Kezdi : Bearing Capacity of Piles and Pile Groups, Proc. 4th ICSMFE, 1957
- 3) 山肩 邦男 : 支持クイの沈下に関する理論的考察, 日本建築学会論文報告集, № 68, 昭36.6
- 4) 横尾・原田・山肩・佐藤 : 各種基礎クイの比較実験, 土と基礎 Vol. 9 №5, 昭36.10
- 5) 山肩 邦男 : 日本電信電話公社大阪中央電報局建設現場における H 型鋼基礎クイの荷重試験結果に関する報告, 昭 37.8
- 6) 山肩 邦男 : 支持クイの載荷試験における降伏荷重の力学的意義に関する考察 (第 1, 2 報), 日本建築学会論文報告集 79 号, 80 号, 昭 37.11 および 12
- 7) 山肩 邦男 : クイ基礎の理論, 建設機械化協会「クイ基礎の機械化」講演会発表, 昭 37.11
- 8) 横尾・山肩・長岡 : 支持グイの載荷試験における残留沈下量曲線の力学的意義, 日本建築学会論文報告集 № 112, 昭 40.6
- 9) 山肩 邦男 : クイの支持力と載荷試験, PC パイル基礎技術講演会発表, 昭 40.5~9
- 10) 横尾・山肩 : 関西電力株式会社春日火力建設所現場における基礎クイ載荷試験結果に関する報告, 昭 37.1
- 11) 朝倉書房 : 「基礎工学ハンド・ブック」中, 9.2 クイの支持力, 昭 39.11
- 12) 日本建築学会 : 建築鋼グイ基礎設計施工規準同解説, 昭 38.6