

Ⅲ－15 載荷試験結果にもとづくくいの支持力計算法の一つの提案

建設省土木研究所 正員 駒田 敬一
 " 道路局 正員 山川 朝生
 " 土木研究所 学生会員 ○島崎 一男
 " " 正員 飯島 均

1. まえがき

現場載荷試験結果と室内模型試験結果をつかって、くいの支持力計算法について一つの提案式を提示し、現行の「道路橋下部構造設計指針」による方法と比較した。提案式は、「道路橋下部構造設計指針」の改訂のために検討されたものである。

くいの鉛直支持力については、理論的な研究と現場での載荷試験結果の集積が進められているが、くいの種類、施工法の多様性と地盤の破壊特性の複雑さのために、統一的な支持力公式を確立することは非常に困難である。現状では、支持力を先端抵抗と周面抵抗に分離し、地盤の性質をN値のような簡単なパラメーターで代表させ経験的な係数処理を行ない、支持力を推定している。

しかし最近、大口径のくいが使用されその載荷試験が実施されるにつれて、計算値と実測値にかなりの開きがあることが目立ってきた。そこで、大口径のくいを中心に比較的最近実施された鉛直載荷試験結果（222例）を収集し、極限支持力の実測値と計算値の対比を行なった。

2. 現行の指針による鉛直支持力算定方法

くいの鉛直極限支持力を求めるいくつかの方法の内、くい基礎においては次のMeyerhofの式が多用されている。これは、くい周面および先端地盤のN値をつかって次式より計算される。

$$R_u = 40N A_p + \frac{1}{5} \bar{N} s A_s + \frac{\bar{N} c}{2} A_c \quad \cdots \cdots \cdots (1)$$

R_u : くいの極限支持力(t)	A_p : くいの先端面積 (㎡)
A_s : $U \ell_s$ (㎡)	ℓ_s : 砂層中のくい長(m)
N : くい先端地盤のN値	$\bar{N} s$: くい先端までの砂層のN値平均値
$\bar{N} c$: くい先端までの粘土層のN値平均値	A_c : $U \ell_c$ (㎡)
ℓ_c : 粘土層中のくい長(m)	U : くいの周長(m)

ここで、先端地盤のN値としてはくい先端のすべり面発生領域の地盤強度を代表させるため補正值： $\bar{N}$ を用いる。 $(\bar{N} = \frac{N_1 + N_2}{2})$ 、 N_1 : くい先端位置のN値、 N_2 : くい先端より上方へ3.75Dの範囲における平均N値)

3. 新しい鉛直支持力の算定方法

くいの鉛直支持力を与える公式は、実用的にN値を用いて、式(1)と類似の式で与えられるものとする。すなわち、くいの鉛直支持力は、くいの先端支持力と周面摩擦力との和によって与えられる。この場合に各項のN値に掛けられる係数が妥当かどうかが問題となる。そこで本提案式を作るに当たって次の点に着目して作業を行なった。

- ① 載荷試験結果の解析によって、N値と周面摩擦力との関係を新たに求める。¹⁾
- ② 大口径くいの先端支持力をくいの支持地盤への根入れ長さとの関係によって検討する。また、特に鋼管くいなどのように、先端開放くいの支持力特性を模型実験²⁾で解明し、この結果を支持力の提案式に適用する。
- ③ 以上によって得られた、N値に基づく支持力式により、計算値と実測の載荷試験の値とを比較し、提

案する支持力式の妥当性を検討する。

(1) くい周面摩擦力の算定

くいの周面摩擦力については、軸力分布の測定を行なっている載荷試験結果の解析から、地盤とくい種別ごとに図-1～4に示すようなN値と最大摩擦力の関係が得られた。

これらの結果をもとに、支持力計算式に用いる周面摩擦力として表-1に示す値を用いることとする。なお、括弧の中の数字は現行の指針で使っている周面摩擦力である。

表-1 提案式で用いたくい周面摩擦力

くい種別	地盤種別	周面摩擦力
既製くい	砂質土	$\frac{N}{5} \text{ t/m}^2 \leq 10 \text{ t/m}^2$ ()
	粘性土	Cまたは $\frac{N}{2} \text{ t/m}^2 \leq 10 \text{ t/m}^2$ (Cまたは $\frac{N}{2} \text{ t/m}^2 \leq 3 \text{ t/m}^2$)
場所打ちくい	砂質土	$\frac{N}{2} \text{ t/m}^2 \leq 10 \text{ t/m}^2$
	粘性土	$\frac{C}{2}$ または $\frac{N}{2} \leq 5 \text{ t/m}^2$

注 () 内は現行の指針に規定されている値である。

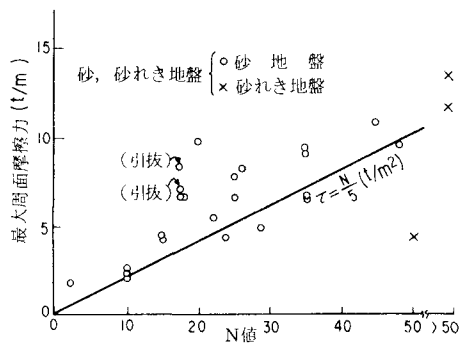


図-1 打込みくいの周面摩擦力 (鋼管くい)

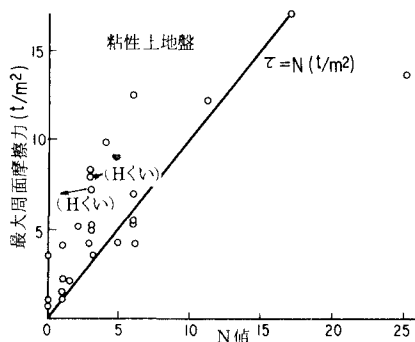


図-2 打込みくいの周面摩擦力 (鋼管くい)

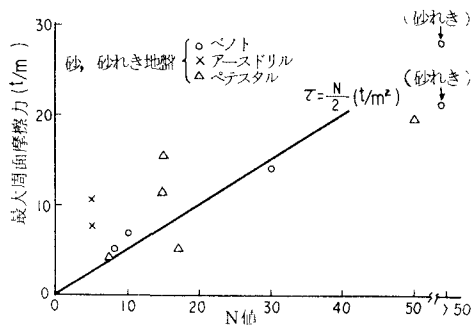


図-3 場所打ちくいの周面摩擦力

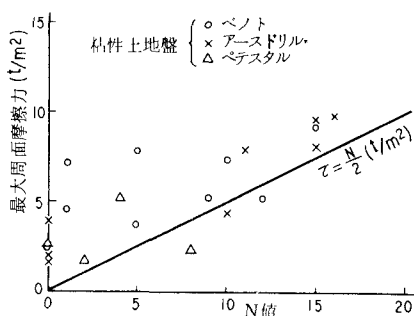


図-4 場所打ちくいの周面摩擦力

(2) くいの先端支持力に関する模型実験²⁾

式(1)の支持力公式では、くい先端の極限支持力度を $40 \text{ N (t/m}^2)$ としているが、特に砂地盤に十分根入れされたくいでは、先端支持力度は、ほぼ 40 N に一致することが確認されている。実際のくいについても、径が比較的小さい打込みくいが使われていた時には、上記の支持力公式を適用して大きな支障はなかったが、近年、大口径のくいが施工され、載荷試験がいくつか実施されるにつれて、実際の極限支持力に比べて計算値が過大な値を与えることが指摘されるようになった。この大きな原因は、径が大きくなるにつれて相対的に支持層への根入れが不足し、根入れが十分ある場合の支持力算定式をそのまま適用することが無理なこと

と、さらに鋼管ぐいのように肉厚が小さいくいでは、先端部の閉塞効果の問題が生じることである。

支持力理論によれば、先端地盤が塑性破壊を起こす場合のすべり面は、図－５のようになると考えられる。

図－５の右側にあるようにくいが支持層に十分根入れされ、すべり面がその中でクローズする場合にはくい

先端の支持力として支持層の強度が最大限に発揮されるが、左側のように根入れが不十分な場合にはすべり面の発生する範囲に応じて支持力が低減されることになる。図－５で等価自由表面の傾斜角 β が 90° になれば先端支持力が最大限発揮されることになり、そのために必要な支持地盤への根入れ長 De はくい

径 B の比として図－６のように 図－５ くい先端地盤の破壊機構

支持地盤の内部摩擦角 ϕ の関数

として与えられる。なお図－６の横軸には $\phi = \sqrt{15N+15}$ と近似した時の N 値を併記しており、支持地盤の強度が高いほど $\beta = 90^\circ$ となる（すべり面がクローズする）のに必要な根入れ長が大きくなることがわかる。

基礎研究室内実験土槽に砂（平均粒径 0.3 mm 、均等係数 2.1 ）を一様に締め固めて作成した地盤（湿潤密度 1.5 g/cm^3 、含水比 10% 、 N 値約 10 ）中に $\phi 48.6\text{ mm}$ から $\phi 216.3\text{ mm}$ の模型ぐいを打撃により打込んだ。その後鉛直載荷試験と、くいを掘り出してから管内土の押し抜き試験を行ない、貼付したひずみゲージにより力の伝達状況を調べ、最後に内部土の密度を測定した。なお、鉛直載荷の場合のくい外周面の摩擦は無視できる大きさであった。このときのくいの先端支持力と管内土の抵抗についての試験結果を図－７～８に示す。

3) 山原は、管内度を非圧縮性とみなした上で、図－９の釣り合いから管内土の極限抵抗 P を次式で与えた。

$$P = \frac{r}{\mu \nu U} (e^{\frac{\mu \nu U}{A} \ell} - 1)$$

r ：管内度の単位体積重量

(t/m^3)

A ：管内断面積 (m^2)

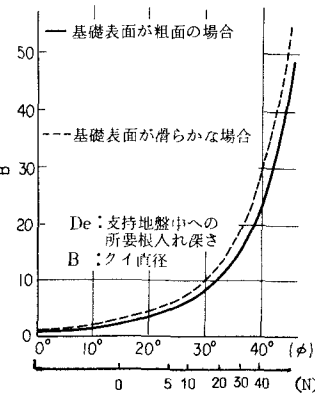
U ：管内周長 (m)

ℓ ：管内土の高さ(m)

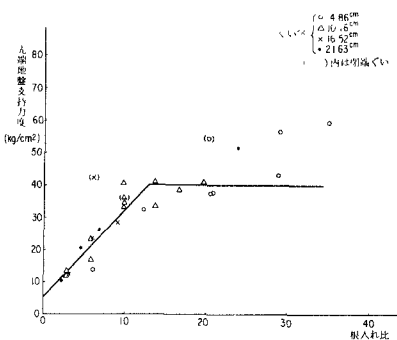
土木研究所の模型実験では、 $\mu \nu = 0.5$ が得られたのでこの関係を用いて、図化すると図－８の曲線が得られた。この関係を開端ぐいの先端支持力算定に用いるよう図化したものが、図－１０である。

(3) 実ぐいへの適用

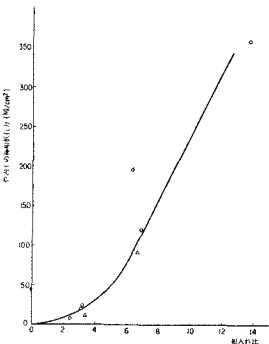
図－１０で、折線は先端地盤の支持力を与えるもので、図－６から求める必要根入れ長以上では 40 N とし、それ以下では図－７の実験結果に基づいて、支持力を直線的に低減した。一点鎖線で示したのは図－８



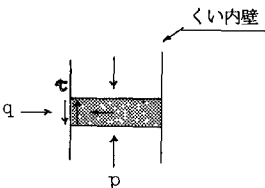
図－６ $\beta = 90^\circ$ のための所要根入量



図－７ 先端地盤支持力－根入れ比



図－８ 管内土の極限抵抗力－根入れ比



図－９ くい内壁に伝達される摩擦力

の実験結果に基づく管内土の極限抵抗の理論曲線である。実際には、管内土の抵抗も地盤強さによって変化することが予想され、今後の課題である。ただし、密な土は管内に入る時に緩められ、緩い土は管内で密になる傾向にあるので、現地盤の強さはそれほど影響しないのではないと思われる。

図-10から求まる先端地盤の支持力と管内土の極限抵抗のうち、小さい方が開端鋼管ぐいの先端支持力となる。また、場所打ちぐい、P.Cぐいのように先端が閉塞しているか、断面の肉厚が大きい場合には、支持層への根入れ比に対して図-10の折線から求まる先端地盤の強度をくい先端支持力度とした。先端開放の鋼管ぐいでは、折線に示す先端地盤の強度と一点鎖線に示すくい内部土の抵抗力のうち、小さい方をくい先端支持力度とした。図-10と表-1から計算した、くいの極限支持力と実測値を比較したのが図-11である。ばらつきはあるもののくい径によらず計算値と実測値はほぼ一致しており、ここで提案した支持力算定法は大径ぐいに対しても適用可能であると判断される。

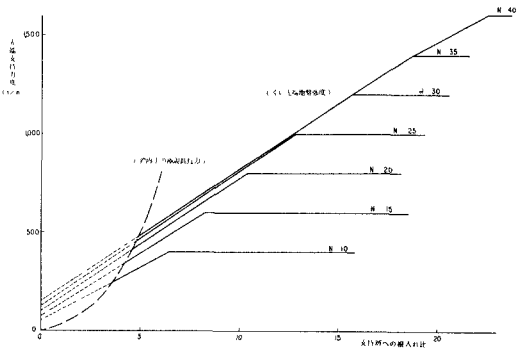


図-10 提案式で用いた先端支持力算定図

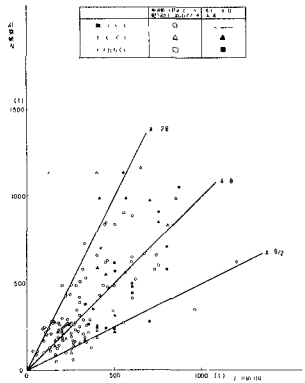


図-11 提案式による極限支持力
計算値と実測値の比較

参考文献

- 1) 足立義雄, 山川朝生: 「くいの周面抵抗」 土木技術資料 Vo. 16, No. 1
- 2) 「くい先端部の閉塞効果について」 土木研究所資料 第848号
- 3) 山原: 「鋼管ぐいの閉塞効果と支持力機構」 日本建築学会論文報告集 昭和39年3月, 4月