

急速載荷試験を用いた杭の鉛直支持力算定手法に関する研究

環境防災研究室
指導教官

吉田敬弘
大塚 悟, 磯部公一

1. 研究の背景と目的

杭基礎の設計鉛直支持力は地盤定数と杭体の諸元に基づき算定される。その設計値の妥当性は杭の鉛直載荷試験でしか確かめることは出来ないが、大きな支持力が必要とされる重要構造物を除いては、工期、工費の制約面から省略される場合が多い。そのため、短時間で簡便に支持力を算定できる試験装置の開発が望まれており、近年では、急速載荷試験がいくつか開発されている。

急速載荷試験の中でも、杭頭に載せた反カマスを推進剤の燃焼ガス圧によって打ち上げ、反カマスの慣性反力を杭頭に載荷するスタナミック試験がある。これらの方法は、試験時間が非常に短時間であるという長所を有するが、比較的大型な杭を対象としているため試験装置が大型であり、狭隘な作業空間では試験を実施できない。また、燃焼圧力による動力源、重量物などの反力を取り扱うために、安全上の問題点や荷重載荷時間によっては杭体の材質が制限される場合があるといった短所がある。そこで現在、急速載荷試験装置の動力源に圧縮空気を用いた安全、軽量小型で機動性に優れた試験装置を開発している。

本研究では、空圧式急速載荷試験装置の開発の一環として、急速載荷試験における杭の鉛直支持力特性の把握を目的とし、急速載荷試験より杭の静的支持力の算出法について検討する。

このような目的のもとに、本研究では模型試験および数値解析を実施する。まず、定性的な傾向を把握するために、模型実験(静的載荷、急速載荷)をそれぞれ行った。試験方式は重錘を落下させる FM(Falling Mass)試験方式である。

また、模型実験を 3 次元弾塑性有限要素法(FEM)によって解析し、模型実験結果と解析結果を比較することで解析モデルの妥当性を確認し、急速載荷試験の解釈法として、FEM 解析がどの程度適用性があるか検討する。

2. 各載荷模型試験

本研究では、重錘を落下させることで急速載荷を行う FM(Falling Mass)試験をモデル化する。杭の静的な鉛直支持力特性の把握と、急速載荷模型試験の結果との比較のために、静的載荷模型試験も行った。以下に本章の内容を説明する。

2.1. 載荷試験の概要

・静的載荷試験

1個 1 kg の軽い錘と 15 kg の重い錘を併用し載荷していく。載荷ペースは 1 kg とする。杭の鉛直載荷試験方法・同解説では、静的載荷試験の終了目安として杭径の 10 % の変位という基準があるが、今回は用意した錘 100 kg までの載荷とした。

・急速載荷試験

①重錘落下用受皿と試験杭を連結させる。受皿と試験杭の間にはロードセルを設ける。

②受皿にガイドシャフトを設け、そのシャフトに重錘を沿わせて落下させる。

重錘と受皿の間にはクッション材を設置し、急速載荷を再現している。クッション材には硬質ゴムを使用している。重錘の重量は 3 kg である。

2.2. 使用土槽、模型杭の諸元

土槽は、鋼鉄製の直方体であり、寸法は、400 mm × 400 mm × 500 mm である。杭先端から土槽底面までは 150 mm であり、土槽底面が実験結果に及ぼす影響は、ほぼ無いと仮定出来る。土槽底面は通水のため、給排水用のパイプを設け、底板はパンチングメタルにメッシュを張ったものを使用している。

模型杭はアルミ製で、肉厚 4 mm のものを用いる。杭先端はアルミ製のキャップで閉塞されている。杭の杭径 D は、30 mm であり、地盤中の根入れ長さは 250 mm (8.3 D) である。杭先端から土槽底面までは 150 mm (5.0D) である。表-1 に杭の諸元を示す。

表-1 模型杭の諸元

材料	アルミニウム
杭径 D [mm]	30.0
肉厚 t [mm]	4.0
杭長 L [mm]	400.0
根入れ長さ [mm]	250.0
弾性係数 E [MPa]	6.77×10^4

2.3. 実験ケース

表-2 に本模型実験の実験ケースを示す。

表-2 模型実験のケース

Case-No.	載荷条件	地盤条件	相対密度 [%]
Case-1	静的載荷	乾燥砂	91.7
Case-2		飽和砂	87.6
Case-3(a)	急速載荷 (落下高さ 15 cm)	乾燥砂	94.6
Case-3(b)	急速載荷 (落下高さ 30 cm)		
Case-3(c)	急速載荷 (落下高さ 45 cm)		
Case-4(a)	急速載荷 (落下高さ 15 cm)	飽和砂	97.5
Case-4(b)	急速載荷 (落下高さ 30 cm)		
Case-4(c)	急速載荷 (落下高さ 45 cm)		

2.4. 載荷時間による杭体の波動現象に関して

急速載荷試験は、杭体に生じる波動現象を無視できる試験方法と定義されている。したがって、本急速載荷模型試験においても波動現象を扱視できるのかどうかを検討する必要がある。学会基準では載荷時間による杭体の波動現象を評価する指標として、相対載荷時間 T_r が採用されている。

$$T_r = \frac{t_L}{2L/c}$$

ここに、

T_r : 相対荷重時間 t_L : 荷重時間、

L : 杭長、 c : 縦波伝播速度

縦波伝播速度 c は以下の式で表現される。

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

E : 杭体の弾性係数 ρ : 杭体の密度

相対荷重時間が大きいほど、すなわち、荷重時間内に応力が杭体を往復する回数が多いほど、杭体に生ずる波動現象の影響は小さくなる。衝撃荷重試験と急速荷重試験の境界を表す相対荷重時間は $T_r = 5$ である。

縦波伝播速度はアルミ等の金属であれば 5000 m/s 程度である。杭の弾性係数 6.77×10^4 MPa、杭の密度 2.70 g/cm^3 を用いて値を求めると 5007 m/s と近似している。

そこに、 $T_r = 5$ 、模型杭の杭長 $L = 0.4 \text{ m}$ を加えて荷重時間 t_L を求めると、0.8 msec 以上となる。本模型実験の荷重時間は、概ね 15 msec であった。

3. 実験結果

3.1. 各荷重模型実験結果

以下の図に、各荷重模型実験試験結果を示す。

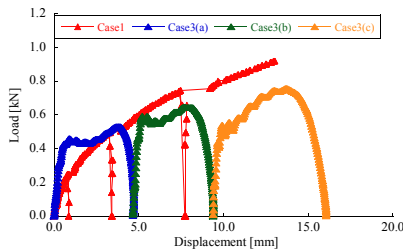


図-1 荷重～変位関係(乾燥砂地盤)

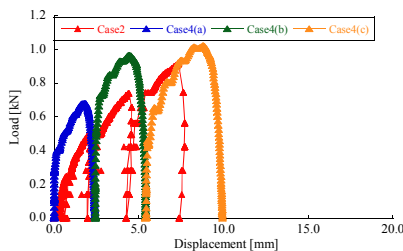


図-2 荷重～変位関係(飽和砂地盤)

4. 急速荷重試験におけるFEMによる解釈手法の検討

4.1. 模型地盤および模型杭のモデル化

静的荷重模型試験から、模型地盤の弾性係数を算出した。その値をもとに模型地盤をシミュレーションする。地盤内における弾性係数分布を 図-3 に示す。

杭体は降伏応力を超えない範囲で荷重されるため、杭材料の構成式には弾性の応力～ひずみ関係を用いれば十分である。必

要なパラメータは弾性係数 E とポアソン比 ν である。杭の諸元は模型杭の諸元を与える。値を表-3 に示す。

表-3 FEM解析における模型杭の諸元

材料	アルミニウム
杭径 D [mm]	30.0
肉厚 t [mm]	4.0
杭長 L [mm]	400.0
根入れ長さ [mm]	250.0
弾性係数 E [MPa]	6.77×10^4
ポアソン比	0.345

図-3 地盤内における弾性係数の分布

4.2. 解析結果

以下の図に解析結果を示す。ここでは、実地盤を模擬した飽和砂における各荷重試験の模型実験結果と解析結果の比較を示す。急速荷重に関しては紙面の関係上、Case4(b)の結果を載せるものとする。

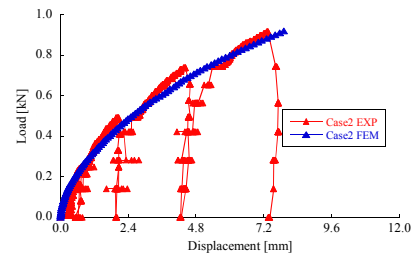


図-4 静的荷重における各地盤条件の荷重～変位関係

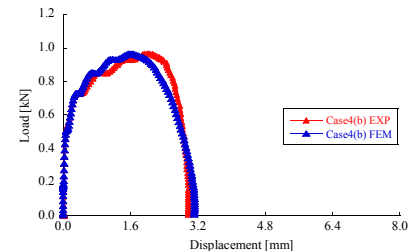


図-5 動的荷重における各地盤条件の荷重～変位関係

5. 結論

数値解析により、土-水連成を行ったFEM解析を用いて、本模型実験を荷重～変位関係をシミュレーションしたところ、高い精度での再現が出来た。これにより、杭基礎の変形予測に土-水連成FEMが有効であることが確認された。

急速荷重試験の解釈法として、FEM解析は有効であるといえる。よって、急速荷重試験の結果からFEM解析で静的支持力を推定することが出来る。

それにより、短時間での荷重試験で正確な支持力を把握することができ、工期の短縮を図りつつ、安全な構造物の建設を行うことが出来る。

<参考文献>

- 1) 地盤工学会：杭の鉛直荷重試験方法・同解説，2002