

浸透力を用いた相似模型実験による杭の引き上げ支持力の検討（その1）  
～引き上げ速度と周面摩擦の影響～

中央大学理工学部土木工学科 正会員    國生 剛治，原 忠  
学生会員    ○長谷川 直哉，泉 昌宏

1.はじめに

従来，杭の模型実験を行うために遠心载荷装置が用いられてきた．遠心载荷装置は地盤の拘束圧を再現可能な反面，特殊な装置ゆえに手軽に実験が行えないなどの問題を有している．本研究ではそれに代わり，浸透力を用いた重力場での簡便な相似模型実験方法を適用し，引き上げ実験を行っている．ここでは，杭の引き上げ支持力に与える引き上げ速度の影響を詳細に検討し，さらに杭周辺の間隙水圧の変化を調べる．

2.実験方法

図-1 は実験装置の概略図を示す．内径 300mm，高さ 600mm のアクリル製円筒セルの中にまず水を張り，その中に室内乾燥状態の石粉（含水比  $w=0.065\%$ ）を水中落下法で堆積させて飽和模型地盤を作製し，下向きの浸透力を加える．地盤内部にはシンフレックスチューブ付の水圧計が杭周辺の間隙水圧を計測するために取り付けられている．チューブ先端と杭の周面との離隔距離は 10mm である．また，杭上端部に取り付けられているロードセルで杭全体にかかる鉛直荷重を測定する．

杭の引き上げは変位制御で行い，载荷速度 2～20mm/s では速度を調節できる電動モーター式ハンドルを用い，1mm/s 以下は 25 回転で 4mm 変位する手動ハンドルを用いた．杭は図-2 のように直径 11mm，長さ 250mm の鉄製である．杭の側面には摩擦抵抗を増やすために豊浦砂を接着剤により貼り付けている．引き上げ前の初期状態では杭先端を地盤底面から 30mm 離して設置した．

地盤材料には，砂より透水係数の小さなシルト粒径の非塑性石粉を用いた．地盤作製後にゴム製のハンマーにより打撃を与え，締め固める．その後，実験装置上部に取り付けられたレギュレーターを用いて，セル内部の空気溜りに 150kPa の圧力を加えた．そして，下部の排水口を開けて浸透圧密を起し，地盤中の間隙水圧が一定になり圧密が終了するまで時間をおいてから，杭の引き上げ実験にかかった．

表-1 に 7 回の実験ケースを示す．ここで添え字 m は模型，p は実物を表わす． $\rho_m (= \rho_w + (\rho_{sat} - \rho_w))$  は浸透力のかかった模型地盤のみかけの密度であり（ $\rho_w$  は水の密度），セル内部の空気圧を 150kPa とした場合， $\rho_m = 58\text{g/cm}^3$  となる．実地盤が地表まで飽和していて，その密度が  $\rho_{sat}=1.8\text{g/cm}^3$  とすると，浮力を考えた密度は  $\rho_{sub}=0.8\text{g/cm}^3$  であり長さの縮尺 n は  $n=58/0.8=72$  となる<sup>1)</sup>．したがって実物の杭長は  $l_p=l_m \times n=0.25 \times 72=18\text{m}$ ，杭径は  $\phi_p=\phi_m \times n=0.011 \times 72=0.8\text{m}$ ，また模型地盤の厚さは  $L_m = 264\text{mm}$  なので，実地盤では  $L_p=0.264 \times 72=19\text{m}$  の厚さに相当する．全ケースで

キーワード 浸透力，模型実験，相似則

連絡先 中央大学理工学部土木工学科土質研究室 〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27 Tel03-3817-1799

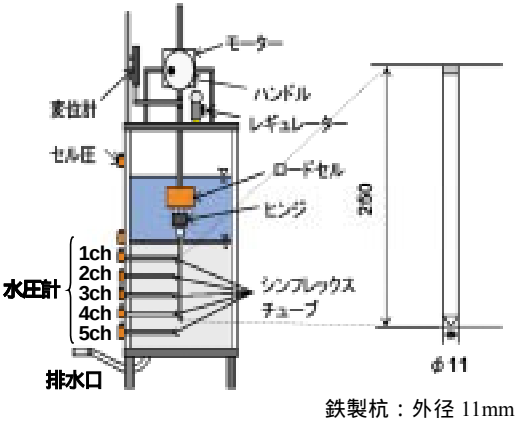


図-1 実験装置概略

図-2 模型杭概略

表-1 実験 case

|    | case                             | 1                    | 2                    | 3                    | 4                    | 5                    | 6                    | 7                    |
|----|----------------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
|    |                                  | 92                   | 88                   | 91                   | 91                   | 93                   | 92                   | 93                   |
| 模型 | 模型地盤高さ $L_m(\text{mm})$          | 26.3                 | 26.9                 | 26.4                 | 26.5                 | 26.1                 | 26.3                 | 26.0                 |
|    | 飽和密度 $\rho_{sat}(\text{g/cm}^3)$ | 1.943                | 1.920                | 1.940                | 1.937                | 1.951                | 1.944                | 1.955                |
|    | 湿潤密度 $\rho_t(\text{g/cm}^3)$     | 1.588                | 1.550                | 1.583                | 1.577                | 1.601                | 1.590                | 1.607                |
|    | 乾燥密度 $\rho_d(\text{g/cm}^3)$     | 1.491                | 1.455                | 1.486                | 1.481                | 1.503                | 1.493                | 1.509                |
|    | $\rho_m(\text{g/cm}^3)$          | 58.0                 | 56.6                 | 57.8                 | 57.6                 | 58.5                 | 58.1                 | 58.7                 |
|    | 透水係数 $K_m(\text{cm/s})$          | $1.5 \times 10^{-5}$ | $2.0 \times 10^{-5}$ | $2.4 \times 10^{-5}$ | $1.8 \times 10^{-5}$ | $1.2 \times 10^{-5}$ | $1.2 \times 10^{-5}$ | $9.8 \times 10^{-6}$ |
|    | 引き上げ速度 $V_m(\text{mm/s})$        | 10                   | 10                   | 6                    | 2                    | 1                    | 0.167                | 0.083                |
|    | 最大引き上げ力(N)[最大変位時の値]              | 257                  | 243                  | 212                  | 149                  | 83                   | 72                   | 74                   |
| 実物 | 透水係数 $K_p(\text{cm/s})$          | $1.0 \times 10^{-3}$ | $1.0 \times 10^{-3}$ | $1.0 \times 10^{-3}$ | $1.0 \times 10^{-3}$ | $1.0 \times 10^{-3}$ | $1.0 \times 10^{-3}$ | $1.0 \times 10^{-3}$ |
|    | 引き上げ速度 $V_p(\text{mm/s})$        | 9.6                  | 6.8                  | 3.4                  | 1.5                  | 1.1                  | 0.2                  | 0.1                  |
|    | 最大引き上げ力(kN)[最大変位時の値]             | 1297                 | 1227                 | 1069                 | 752                  | 420                  | 361                  | 372                  |
|    |                                  |                      |                      |                      |                      |                      |                      |                      |

杭の引き上げの最大変位は 40mm(実物対応で 2.8m)とした。また、模型と実物の透水係数の比( $k_m/k_p$ )は相似則を考慮すると、 $k_m/k_p=v/n$  で表される<sup>1)</sup>。ここに、 $v$  は模型と実物の引き上げ速度の比( $v=V_m/V_p$ )である。したがって、モデルと実物での透水係数の比により、引き上げ速度の比が決まることになる。ここでは、実物の透水係数  $k_p$  は砂地盤を想定して、 $k_p=1.0 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$  と設定し、模型地盤の透水係数は浸透圧密中に測定した。

### 3. 引き上げ実験の結果と考察

図-3 は、case3 における圧密中の間隙水圧の時刻歴である。この図から約 2000 秒後から間隙水圧は安定しているので、圧密は終了していると考えられるが、約 6000 秒まで圧密を継続してから、杭の引き上げ実験を開始した。

図-4 は、case3 における引き上げ実験中の間隙水圧の時刻歴を示している。この図から、杭の先端が通過する付近の間隙水圧(地盤底面から 15mm, 65mm)が引き上げ実験中に減少していく傾向がみられる。これは、引き上げに際し、杭先端付近に cavitation による負圧が発生するためと考えられる<sup>1)</sup>。また、図に示してはいないが引き上げ速度が速いほど、水圧は大きく変化する傾向もみられた。しかし引き上げ速度 1mm/s 以下の遅い引き上げでは、杭先端付近に負圧の発生は見られなかった。

図-5 は、変位と引き上げ力の関係を示している。引き上げ速度が速いほど、引き上げ力が大きい値をとる傾向がみられた。また、case1 以外での引き上げ速度では、引き上げ変位が 5mm 程度まで力は急増するが、それ以降はそれぞれある値の引き上げ力に漸近する傾向を示した。case1 だけ引き上げ力の立ち上がりの傾向が違うが、その原因は現時点では不明である。

図-6 は、7 回行った実験に基づく実物対応の杭の引き上げ速度を対数軸にとり最大引き上げ力(最大変位時の値)との関係を示している。この図から、引き上げ速度が速いほど、最大引き上げ力が明らかに大きくなる傾向が得られた。

### 4. まとめ

- ・ 杭の引き上げ実験では、引き上げ速度が速いほど、大きな引き上げ荷重が得られた。
- ・ 引き上げ速度が速いほど、杭の先端付近で間隙水圧が大きく減少する傾向がみられ、杭の引き上げ支持力には cavitation の影響が大きいことが明らかとなった。

参考文献 <sup>1)</sup> 國生, 須田ら: 浸透力を用いた相似模型実験法による杭の引き上げ支持力に与える引き上げ速度の影響

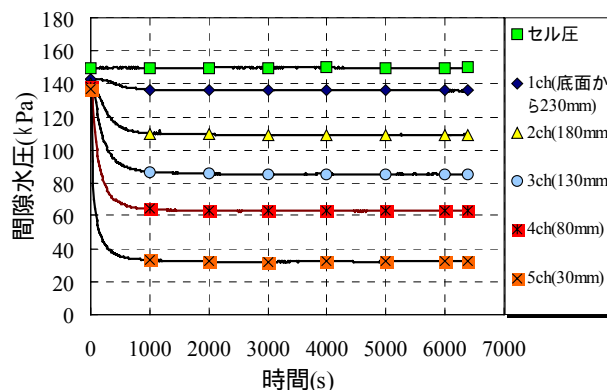


図-3 case3 における圧密中の水圧の時刻歴

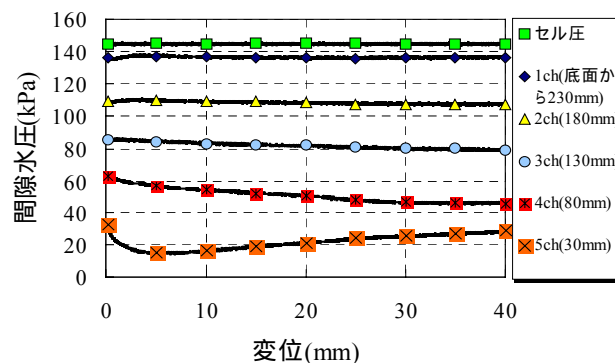


図-4 case3 における実験中の水圧の時刻歴

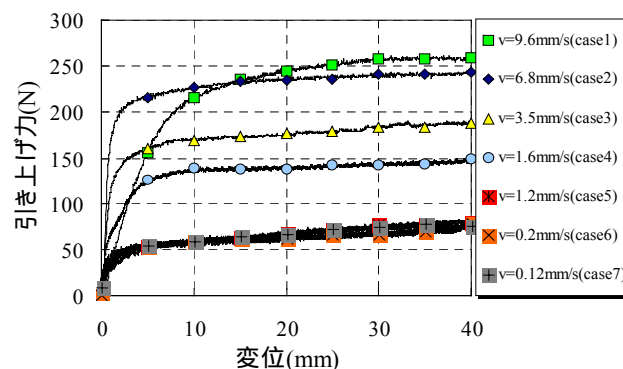


図-5 変位と引き上げ力の関係

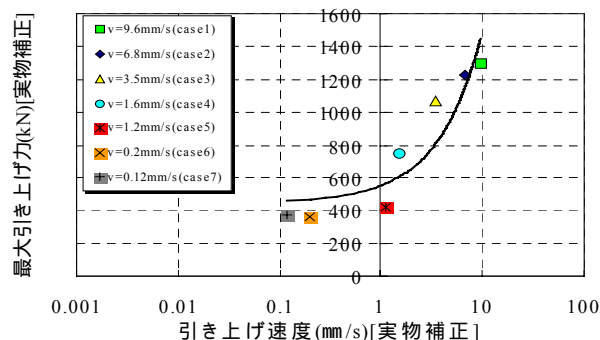


図-6 実物の杭に換算した引き上げ速度と最大引き上げ力の関係