

金沢大学工学部

正会員 松本 樹典

金沢大学工学部

正会員 西田 義親

京都大学防災研究所

正会員 関口 秀雄

金沢大学大学院

学生員 栗原 勝美

1. はじめに 昭和54年10月に、石川県七尾市と能登島を結ぶ能登島大橋架橋工事が起工され、昭和57年3月完成に至った(図-1)。この能登島大橋の橋脚には、鋼管杭による多柱式基礎が採用され、その基礎地盤は能登半島に広く分布する珪藻泥岩であった。珪藻泥岩は、半固結状態の多孔質軟岩であるが、このような地盤における杭基礎施工の実績は数少く、その支持力評価には非常な苦慮が払われた。そのため能登島大橋架橋工事においても、土質定数と杭支持力との相関を得ることを目的として、本工事に先立ち、昭和54年8月に鋼管杭の支持力試験<sup>1)</sup>が実施された。本報告では、珪藻泥岩における杭基礎の鉛直支持力の実態を解明する目的で行った現場鉛直載荷試験の有限要素解析結果について述べる。

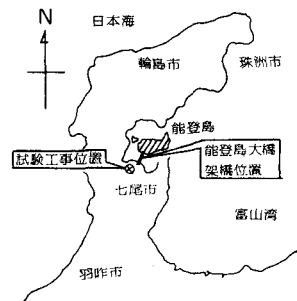


図-1 能登島大橋架橋位置と鉛直載荷試験工事位置

2. 珪藻泥岩の弾・粘塑性挙動 珪藻泥岩の持つ極めて重要な特徴として、降伏点以下の応力のもとでは、非常に明瞭な線形弾性挙動を示す一方、ひとたび降伏応力を越え、その圧縮性が急激に増大するとともに著しいクリープ変形を示すことが挙げられる。図-2は、このことをふまえた弾・粘塑性構成式に基づき、圧密降伏応力 $p_c = 25 \text{ kgf/cm}^2$ をまたがる場合の等方圧密について、筆者らの開発した有限要素プログラム<sup>2)</sup>によって解析した結果と実測結果を比較したものである。実測によると、過剰間隙水

表-1 珪藻泥岩の土質定数

|             |                                       |                                                 |
|-------------|---------------------------------------|-------------------------------------------------|
| 圧縮指数        | $\lambda$                             | 1.135                                           |
| 膨潤指数        | $K$                                   | 0.094                                           |
| 二次圧縮指数      | $\alpha$                              | 0.018                                           |
| 先行圧密圧力      | $e_0$                                 | 2.238                                           |
| 体積弾性係数      | $p_c \text{ (kgf/cm}^2\text{)}$       | 25                                              |
| 初期間隙比       | $K' \text{ (kgf/cm}^2\text{)}$        | 871                                             |
| 初期透水係数      | $k_0 \text{ (cm/min)}$                | $0.65 \times 10^{-5}$                           |
| 基礎体積ひずみ速度   | $\dot{v}_0 \text{ (min}^{-1}\text{)}$ | $1.00 \times 10^{-5}$                           |
| 杭と地盤との間の摩擦角 | $\phi'_f \text{ (degree)}$            | 10° (Layer 1)<br>26° (Layer 2)<br>30° (Layer 3) |

圧力がゼロとなった後も著しい二次圧縮を示しているが、本解析結果は定性・定量の両面で珪藻泥岩の粘塑性をよく表わしていることがわかる。三軸圧密試験とその有限要素解析によって求めた珪藻泥岩の土質定数を表-1に示す。

次節では、上記のキャリブレーション結果をふまえた現場鉛直載荷試験の有限要素解析結果について述べる。

### 3. 現場鉛直載荷試験の有限要素解析

(1) 試験杭 鉛直載荷試験工事は、架橋地点と類似の地層を持つ陸上部で行なわれた(図-1参照)。図-3は、打設後の試験杭と地盤の概況を示したものである。用いた試験杭の諸元は、表-2に示す通りである。試験地盤のN値は、13から20までの範囲にあり、平均で16程度である。ここで注目すべきことは、この長さ10mの鋼管杭の杭先閉塞効果がありみられず、管内土の高さが地表面付近(-0.72m)にまで達していることである。このことは、珪藻泥岩における鋼管杭の鉛直支持力は鋼管の内周面と外周面の両面に作用する周面摩擦によることを示唆しており、興味深い。鉛直載荷試験は、杭の打設後12日間放置した後に行っているため、杭打ち時に発生した地盤内の過剰間隙水圧は、載荷試験時にはほぼ消失しているものと考えられる。

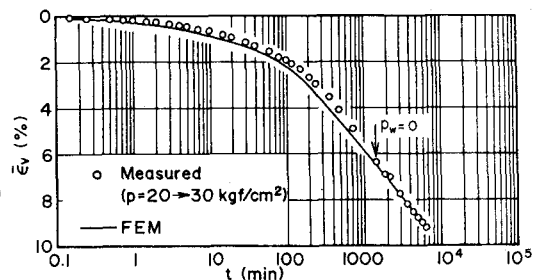


図-2 珪藻泥岩の平均体積ひずみ( $\bar{v}$ )～時間( $t$ )関係

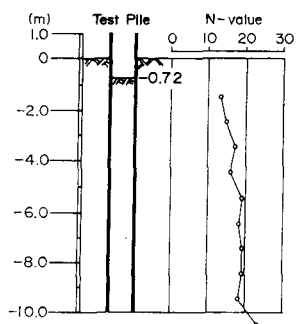


図-3 試験杭と地盤のN値

(2) 鉛直載荷試験の解析結果 現場鉛直載荷試験の有限要素解析を行う際、

できるだけ忠実に杭打設のプロセスをシミュレートするために、まず円柱状空孔拡張理論を用いて杭打設による杭周辺地盤の応力状態の予測を行った。このようにして求めた有効応力状態を改めて初期条件として、それに引続く載荷試験の有限要素解析を行った。図-5は、解析に用いた杭と地盤の有限要素モデルを示したものである。解析の便宜上、杭を中実な弾性杭としている。そして、杭周面摩擦特性を考慮するために、杭側面にはジョイント要素を導入している。変位境界条件としては、地盤底面での鉛直方向変位、中心軸と地盤側面における半径方向変位を固定した。排水は、AB面、BC面とAE面でのみ許されている。また、地盤の初期有効応力状態としては、杭側面に作用する垂直応力が $5 \text{ kgf/cm}^2$ となっている。解析に用いた珪藻泥岩の土質定数は、Layer 1, 2, 3とも、表-1に示した通りである。ただし、地盤と杭との間の摩擦角 $\phi$ の値は、Layer 1, 2, 3で異なっており、それぞれ表-1に示した値を用いた。

図-5は、杭頭荷重( $P_t$ )～杭頭変位量( $S$ )～時間( $t$ )関係の解析結果と実測結果を比較したものである。実際の載荷試験は、油圧ジャッキを用いた荷重制御方式で行っている。また、各荷重段階において杭頭変位量の増加率が15分間で $3/100 \text{ mm}$ 以下になったとき、次の荷重段階へ移行している。杭頭荷重が $280 \text{ tf}$ において、杭頭変位量が急激に増加しはじめ、それ以上の載荷が不可能となった。解析結果については、杭頭荷重が $100 \text{ tf}$ までは、杭頭変位量が実測値よりかなり大きくなっている。しかし、それ以上の荷重増分に対しては、解析結果は実測の杭頭変位量( $S$ )～時間( $t$ )関係をよく表していることがわかる。解析による杭頭変位量増加率は、杭頭荷重 $P_t$ が $240 \text{ tf}$ 以下では、15分間で $3/100 \text{ mm}$ 以下となっている。

実際の載荷試験においては、本載荷の直前に $P_t=100 \text{ tf}$ までの予備載荷を行っているため、杭周辺地盤は、これによる応力履歴を受けている。一方、解析においては、この応力履歴を考慮していないため、 $P_t=100 \text{ tf}$ までに対して、解析結果は実測値より過大な沈下量を与えたものと思われる。

図-6は、各荷重段階における杭の軸力分布の実測値と解析結果を示したものである。実測結果によると、杭頭荷重の大部分は、杭周面摩擦力によって受け持たれていることがわかる。実際、極限荷重 $280 \text{ tf}$ 載荷時には、杭先端にはわずか $40 \text{ tf}$ の荷重しか伝達されていない。図より、解析結果は、非常によくこの荷重伝達機構を表わしていることがわかる。最後に、実測結果および解析結果の両者とも、極限荷重 $280 \text{ tf}$ 載荷時には、Layer 1と2の周面摩擦はピーク強度に達しているが、Layer 3の周面摩擦は、まだそのピーク強度に達していないことを示していることを付け加えておく。

参考文献 1) 石川県(1979): 能登大橋有料道路建設工事鋼管杭支持力試験成果報告書  
2) Sekiguchi, Nishida & Kanai (1981): "Analysis of partially-drained triaxial testing of clay", Soils and Foundations, Vol. 21, No. 3, pp. 53-66.  
3) 松本, 関口, 西田 (1983): ジョイント要素を用いた等方圧密試験の有限要素解析, 第18回土質工学研究発表講演集, pp. 227-228.

表-2 試験杭の諸元

|       |                               |                   |
|-------|-------------------------------|-------------------|
| 外 径   | $d \text{ (mm)}$              | 406.4             |
| 肉 厚   | $t \text{ (mm)}$              | 11.9              |
| 周 長   | $U \text{ (cm)}$              | 128.1             |
| 周 面 積 | $A_s \text{ (m}^2\text{/m)}$  | 1.28              |
| 弾性係数  | $E \text{ (kgf/cm}^2\text{)}$ | $2.1 \times 10^6$ |
| 杭 長   | $L \text{ (m)}$               | 11.0              |
| 打込み長さ | $L_d \text{ (m)}$             | 10.0              |

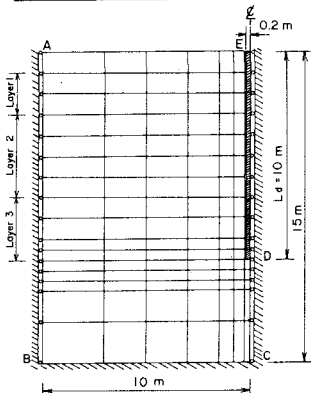


図-4 杭と地盤の有限要素モデル

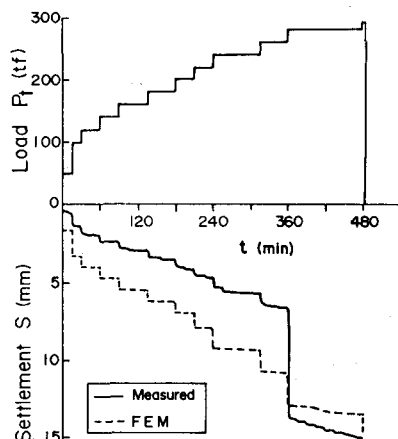


図-5 杭頭荷重( $P_t$ )～杭頭変位量( $S$ )～時間( $t$ )関係

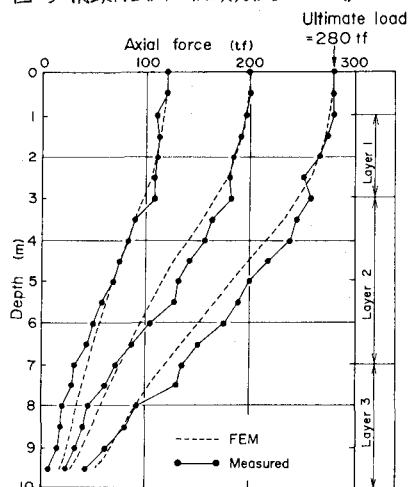


図-6 鋼管杭の軸力分布