

軟弱地盤下の軟岩を支持層とする長尺鋼管杭の急速載荷試験

キーワード：軟弱地盤，鉛直載荷試験，長尺鋼管杭

東日本高速道路 加藤真司

東日本高速道路 中谷史規

地盤試験所 正会員 ○亀井秀一

八千代エンジニアリング 後藤雄一

八千代エンジニアリング 牧 岳志

ネクスコ・エンジニアリング東北 正会員 澤野幸輝

ネクスコ・エンジニアリング東北 菊池慎司

1. はじめに

山形県置賜地方，米沢盆地の北端に面積約 6.8ha の小さな湖沼，白竜湖がある。この白竜湖の周囲の水田地帯は，極めて軟弱な地盤（以下「白竜湖軟弱地盤地帯」）を持つ地域として知られる。東北中央自動車道は，福島県相馬市を起点とし，福島市から国道 13 号に並行して山形県を北上し，秋田県横手市に達する。現在建設中の南陽高島 IC から山形上山 IC 間 24.4km のうち，約 3km の範囲がこの白竜湖軟弱地盤地帯のほぼ中央部を横断することとなる（図-1）。

本稿は，白竜湖軟弱地盤地帯に計画中の延長約 550m の橋梁の基礎杭について支持力を確認するために行った急速載荷試験の結果を報告するものである。

2. 支持層の状況と試験の目的

図-2 に，東北中央自動車道の白竜湖軟弱地盤地帯通過範囲のうち，北側約 800m の範囲についての地層地質縦断面図を示す。東北中央自動車道は，南陽高島 IC を過ぎて白竜湖軟弱地盤地帯を通過した後，トンネルが連続する区間となるが，その最初のトンネルの南坑口から約 600m の範囲は，丘陵地帯から延びる凝灰岩層が確認できる。凝灰岩層の上部は，有機質土と粘性土が砂層を交えながら厚く層を成しており，特に最上部の高有機質土と高有機質粘性土は極めて軟弱である。また，この凝灰岩層は，ところどころ厚い強風化部が存在するため，N 値 50 以上の支持層線は複雑な起伏を示す。また，白竜湖軟弱地盤地帯の中心部に向かって急激に落ち込んでおり，これより南側は支持層として期待できないほど深くなる。このため，白竜湖軟弱地盤地帯の中央部を横断するに当たり，南陽高島 IC 付近で国道を横架した後，約 2km の範囲を軟弱地盤対策を併用した盛土構造，残りの支持層が確認できる範囲を橋梁で通過する計画としている。橋梁部の基礎杭の長さは最大で約 90m（載荷試験杭はφ800 L=86.5m）に達するため，中掘り杭工法を併用して施工精度を確保する計画であるが，支持層の上が軟弱地盤であることから，道路橋示方書²⁾の参考資料 10 による杭先端の極限支持力の推定ができない。このため，橋梁の設計の着手に先立ち，試験杭を施工したうえで急速載荷試験を行い，実際の支持力を確認するものとした。

また，白竜湖軟弱地盤地帯の中心部に向かって急激に落ち込んでおり，これより南側は支持層として期待できないほど深くなる。このため，白竜湖軟弱地盤地帯の中央部を横断するに当たり，南陽高島 IC 付近で国道を横架した後，約 2km の範囲を軟弱地盤対策を併用した盛土構造，残りの支持層が確認できる範囲を橋梁で通過する計画としている。橋梁部の基礎杭の長さは最大で約 90m（載荷試験杭はφ800 L=86.5m）に達するため，中掘り杭工法を併用して施工精度を確保する計画であるが，支持層の上が軟弱地盤であることから，道路橋示方書²⁾の参考資料 10 による杭先端の極限支持力の推定ができない。このため，橋梁の設計の着手に先立ち，試験杭を施工したうえで急速載荷試験を行い，実際の支持力を確認するものとした。

3. 急速載荷試験の計画

急速載荷試験は，軟クッション重錘落下方式の加力装置³⁾を用い，打設完了後の杭頭に厚さ 2.2m の積層ゴムによる緩衝材を設置して段階的に高さを増しながら自由落下させ，杭頭の変位量と各深度における杭体の加速度とひずみを測定するという方法を採用した。重錘の落下による載荷時間は，杭頭に設置した緩衝材で波動現象を無視できる時間（相対載荷時間 $500 \geq T \geq 5$ ）に調整した。測定結果を一質点系モデルで解析して杭と地盤の静的な挙動を求め，別途推定した杭の支持層内極限支持力と比較した。なお，杭の打設による影響から地盤を回復させるため，急速載荷試験は打設完了から 4 週間後に実施した。

杭の支持層内極限支持力を推定するに当たり，次の二通りの考え方による推定方法を想定した。急速載荷試験では，これらの支持力をどの程度満足するのか，試験杭を用いて確認することとなる。



図-1 位置図

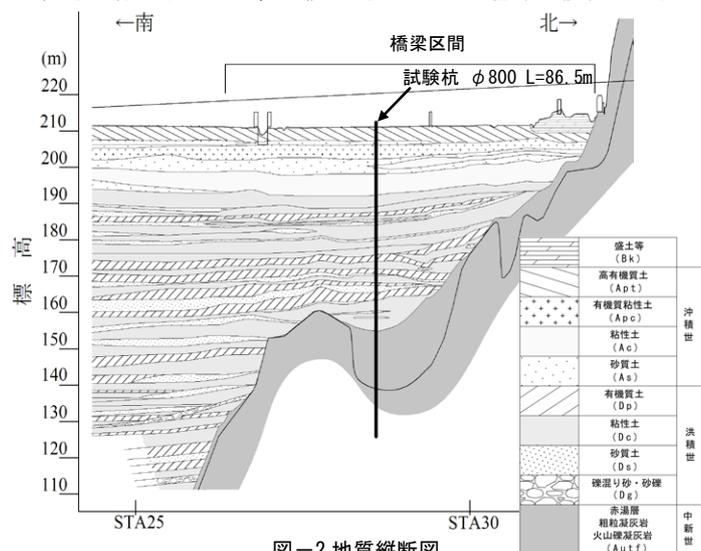


図-2 地質縦断面図

A rapid load test for the long steel pipe pile installed into the soft rock under the soft silty ground

Shinji KATO, Hitomi NAKATANI (East Nippon Expressway Co., Ltd.), Suichi KAMEI (Jibanshikenjo Co., Ltd.), Yuichi GOTO, Takeshi MAKI (Yachiyo Engineering Co., Ltd.), Koki SAWANO, Shinji KIKUCHI (Nexco-Engineering Tohoku Co., Ltd.)

(1) 道路橋示方書の支持力推定式による算出 (R_{u1})

道路橋示方書IV下部構造編の式 12.4.3 より、「地盤から決まる杭の極限支持力」として推定する。この際、「杭先端における単位面積あたりの極限支持力度」については、図一解 12.4.2 より、砂質土を準用したうえ支持層への根入れ比を 1.0, $N=40$ として $q_d=2,400\text{kN/m}^2$ とする。また、「周面摩擦を考慮する層」については、支持層への根入れ部のみと考え、表一解 12.4.6 より $f=100\text{kN/m}^2$ とする。以上の仮定により式 12.4.3 を計算すると、 $R_{u1}=1,407\text{kN}$ となる。

(2) 「軟岩・土丹を支持層とする打込み鋼管杭の軸方向押込み支持力の推定方法(案)」による算出 (R_{u2})

道路橋示方書IV下部構造編の参考資料 10 に記載されている式(参 10.1)を用い、支持層内の極限支持力を推定する。この際、「支持岩盤の一軸圧縮強度」については、支持層の実測 N 値の 20 倍として推定するものとし、 $q_u=3,340\text{kN/m}^2$ とする。式(参 10.1)より、 $R_{u2}=4,532\text{kN}$ を得る。なお、式(参 10.1)は、本来「支持岩盤上が軟弱粘性土地盤である場合や中掘り杭工法を併用する場合は適用外」とされている。

以上より、急速載荷試験の載荷荷重は別途計算で求めた極限周面抵抗力 $R_f=8085\text{kN}$ と上記の R_{u2} とから、計画最大荷重を $13,000\text{kN}$ とすることとした。その結果、重錘の重量 85ton 、最大落下高さ 4.5m の加力装置が必要となった(写真-1)。



写真-1 急速載荷試験実施状況

4. 試験結果

急速載荷試験の実施状況を写真-1 に示す。打撃工法による支持層への打込みが完了した後、加力装置を杭頭に設置し、 0.5m 間隔で高さを変えて重錘を落下させた。

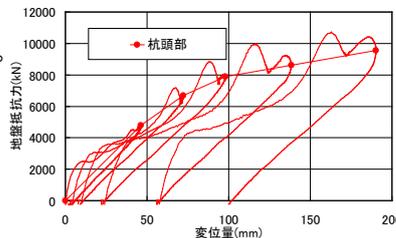


図-3 地盤抵抗力と変位の関係

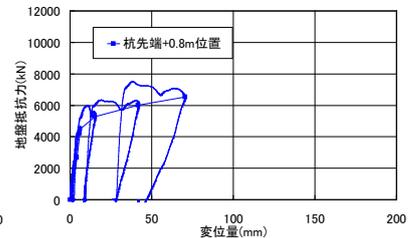


図-4 地盤抵抗力と変位の関係

図-3、図-4、表-1 に杭頭部と杭先端+0.8m 位置における地盤抵抗力と変位の関係および除荷点法の結果を示す。杭頭部では最大落下高 2.5m の時点(5 回目の載荷)で除荷点変位が 190mm となり、杭径の 10% を越えて十分な沈下量に至っている。このときの杭頭部の静的抵抗力は $9,554\text{kN}$ であった。また、図-4 より、杭先端付近の荷重と変位の関係は $P=6,538\text{kN}$ $S=70.3\text{mm}$ となっており、(2) の方法による極限支持力 $R_{u2}=4,532\text{kN}$ を大きく上回る結果となっている。(表-2)

表-1 杭頭と杭先端+0.8m 位置の除荷点法結果

落下高 (m)	杭頭部		杭先端+0.8m位置	
	静的抵抗力 (kN)	除荷点変位 (mm)	静的抵抗力 (kN)	除荷点変位 (mm)
0.5	4,797	46.2	2,673	3.9
1.0	6,692	72.2	4,514	6.0
1.5	7,885	97.9	5,280	15.1
2.0	8,604	138.3	6,004	41.7
2.5	9,554	190.2	6,538	70.3

図-5~7 に、各深度に設置した計器の設置位置、除荷点法で求めた軸力分布と周面抵抗力の深度分布を示す。なお、設計値として近隣の土質調査から求めた中掘り杭の最大周面摩擦力と表-2 の(2) 先端支持力の深度分布を図-6 に、中掘り杭の最大周面摩擦力を図-7 に、それぞれ破線で示している。図-7 より、周面抵抗力は当初想定より小さい結果となっている。このため、図-6 では支持層が浅の軸力がほとんど上昇していない。

表-2 橋梁計画に必要な支持層内極限支持力

極限支持力推定法	先端支持力
(1) 道路橋示方書の支持力推定式による算出 R_{u1}	1,407kN
(2) 軟岩・土丹を支持層とする打込み鋼管杭の軸方向押込み支持力の推定方法(案) R_{u2}	4,532kN
急速載荷試験結果	6,538kN

5. おわりに

本載荷試験の結果により、当該橋梁の設計に着手した。今回の試験では、杭先端付近の支持力が十分に期待できる結果となった。一方、周面摩擦力は想定を大きく下回り、設計上期待できない。いずれはネガティブフリクションの影響も生じるものと考え、これに先端支持力のみで抵抗する必要がある。

本橋が施工されれば、中掘り杭工法による長尺鋼管杭としては国内で最大級⁴⁾となる。設計も施工も非常に難しいものとなるが、引き続き様々な検討を重ねて解を見出したい。

参考文献

- 1) 平野寛三・近野和則・高坂敏明・太田秀樹：東北地方の内陸盆地に分布する軟弱地盤への道路計画，地盤工学会誌，Vol.58, No.7
- 2) 社団法人日本道路協会：道路橋示方書・同解説IV下部構造編，2012.3
- 3) 社団法人地盤工学会：杭の鉛直載荷試験方法・同解説第一回改訂版，2002.5
- 4) 一般社団法人鋼管杭・鋼矢板技術協会：鋼管杭-その設計と施工-，2009.4

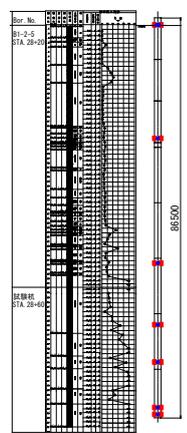


図-5 測定計器の配置

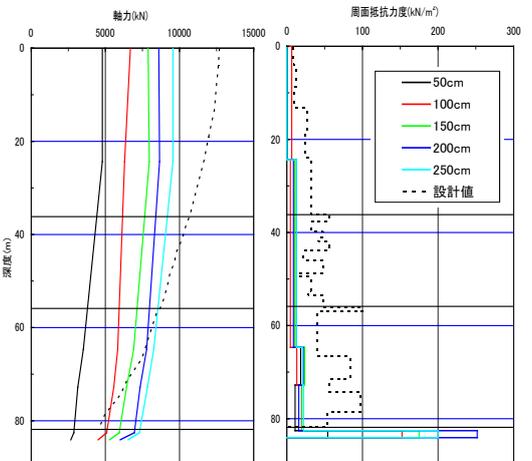


図-6 軸力分布

図-7 周面抵抗力分布