

パイルネット工法の事例解析と設計指針について

AN ANALYSIS AND SOME DESIGN GUIDES TO PILE NET METHOD

伊勢田哲也*・棚橋由彦**・永松幹雄***
By Tetsuya ISEDA, Yoshihiko TANABASHI
and Mikio NAGAMATSU

Pile-net method has been used gradually as one of the countermeasures for the high organic soil deposits (peat and muck) in Hokkaido and for the high sensitive soft clay deposits (Ariake clay) in Kyushu, Japan.

Pile-net method may be often used in the future, because of its advantages which are for example, a rapidity of construction, a facility of execution management, an arresting effect on the lateral flow and so on.

However, a reasonable design guide to pile-net method has not been established until now.

This paper presents the applications of two finite element analyses previously proposed by the authors to the Ariake clay deposits used pile-net method which are subjected dead loads of testing embankments.

And presented herein is a few remarks on the design guide to pile-net method, as the results of some consideration and comparisons between the observed and the calculated settlements.

Keywords: pile net method, improvement of soft ground, finite element method, lateral flow, time-settlement curve

まえがき

軟弱地盤対策工の一つとして、木杭を使用して上載荷重を支持させようとする目論見が紀元前より行われ¹⁾、後年には鉄筋コンクリートの開発によって上載荷重をスラブで受け、杭で支持させるといった工法がスウェーデンなど北歐諸国で行われてきた²⁾。わが国でも北海道の泥炭地で鉄筋コンクリート・スラブと鉄筋コンクリート杭の組合せ（パイルスラブ工法、パイルキャップ工法）で、盛土および舗装体の荷重や交通荷重などによる盛土のすべり破壊防止、沈下抑制、周辺地盤の変位抑制などで成果を上げている³⁾。さらに最近では鉄筋で杭頭を連結し、その上方に金網、土木用シートを敷設した杭工法（パイルネット工法）も行われるようになり、北海道石狩川築堤工事⁴⁾、国鉄函館本線手稲・琴似間盛土工事⁵⁾など、また国鉄成田線佐倉・成田間の増線工事⁶⁾、建設省九州地建武雄工事事務所の六角川築堤工事⁷⁾などで、盛土沈下および周辺地盤の変位抑制に良好な効果がある旨報告されている。しかしながら、その効果が発揮され

る機構が不明のため、それに基づく合理的設計法についてはいまだ確立されていない。そこで本論文は、合理的設計法確立の一助とするため、建設省武雄工事事務所が行った六角川築堤工事の実施例を対象に有限要素法による解析を行い考察を加え、その設計指針のいくつかを示した。

1. パイルネット工法と沈下観測

(1) パイルネット工法

図-1 は建設省武雄工事事務所が芦原地区で実施したパイルネット工法図である。有明海周辺地域は日本でも有数の超軟弱地盤地帯で、特に西側に当たる六角川流域は自然含水比が100%を越え、しかも液性限界値より大きく、鋭敏かつ不安定な粘性土（有明粘土）である⁸⁾。芦原地区はこの六角川流域に位置し、軟弱層厚が15.9mである。パイルネット工法は、軟弱地盤中に木杭を打ち込んだ後、杭頭を鉄筋で連結しその上部にサンドマットおよび土木用ネットシートを敷設して盛土が行われる。

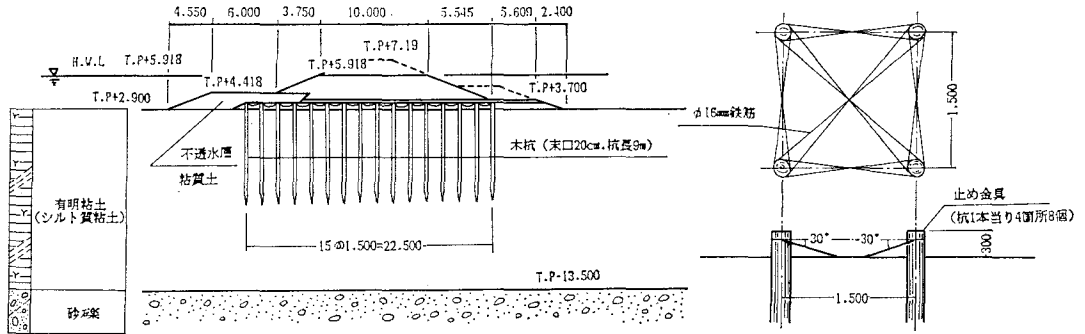
同地区における試験盛土は、最終盛土高3mまで40日で盛り上げる急速施工を行い、杭長 L は図-1に示す9mばかりではなく7m、5mの3種類であり、施工観測が昭和56年7月より継続して行われている。

杭間隔は群杭としての条件式

* 正会員 工博 長崎大学教授 工学部土木工学科
(〒852 長崎市文教町 1-14)

** 正会員 工博 長崎大学助手 工学部土木工学科(同上)

*** 学生会員 長崎大学大学院修士課程(同上)



図一 パイルネット工法概要図

$$D_0 \leq 1.5\sqrt{r \cdot L} \dots \dots \dots (1)$$

(ただし D_0 : 杭間隔, r : 杭平均半径, L : 杭長) を考慮して杭長の長い方から順に 1.5 m, 1.3 m, 1.1 m としている。

(2) 沈下観測

芦原地区では施工効果を判定するため、①盛土下および周辺地盤の沈下、②粘土地盤内の間隙水圧の変化、③盛土荷重によって発生する応力状態、④杭頭鉄筋に作用する力、⑤周辺地盤での側方変位状況、といった観測が行われている (図-2 参照)。

盛土中央部における杭長別の実測の時間・沈下曲線 (図-16 中、実線プロット参照) をみると、沈下は盛土完成後 4 年を経過しているが、最近 1 年間の沈下量は 2.5 cm (杭長 9.0 m) と微量ではあるが進行中である。間隙水圧計は数か月で欠測したため、観測による圧密終了時刻はわからないが、圧密層の一次圧密はすでに終了し、二次圧密によるものがわずかながら進行しているものと思われる。

なお土質特性値は 表-1 のとおりである。

表-1 土質特性値

| | |
|------------------------------|-------------|
| ρ_n (t/m ³) | 1.35~1.55 |
| Wn (%) | 75~145 |
| e_0 | 1.0~3.8 |
| q_u (tf/m ²) | 1.8~7.0 |
| Cc | 0.50~1.50 |
| Cv (cm ² /min) | 0.027~0.220 |

(1tf/m²=9.8kPa)

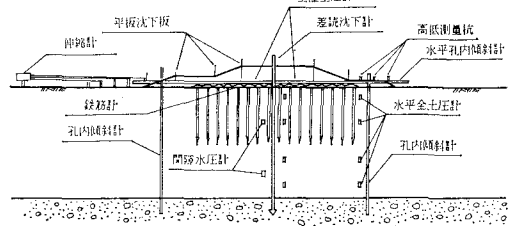


図-2 各計器の設置位置図

であるが、すべり面、または破断面方向の極端な剛性低下をその方向に発達した異方性材料で置換することにより表現しており、計算方式は荷重 (または変位) 増分法による。

本来なら、軟弱地盤の変形解析であるので、弾粘塑性解析を行う必要があるが、ここでは杭の挙動の定性的傾向と地盤内応力の算定を主眼とするため、上述の解析法による。なお、盛土基礎地盤の圧密変形解析は、3. で群杭施工範囲をケーソン構造物とみなし、杭先端以深

2. 杭の挙動と地盤内応力

実施例をもとに、解析計算の簡便性を考慮して解析モデルを作り、後述の有限要素解析を行い、計算結果からパイルネット工法における杭長、載荷盛土高が地盤内応力、杭の挙動ならびに鉄筋作用応力に及ぼす影響について考察を加えた。

(1) 解析方法、モデルおよび条件

a) 解析方法

解析方法は著者らの開発した境界面すべりおよび壁面摩擦力を考慮した解析法^{9),10)}による。

その概要は、境界面の力学モデルを、境界面に一対の対応する節点群を設け、各節点の滑動力と滑動抵抗力を計算し滑動力が抵抗力を上回れば、壁面摩擦力を運動と反対方向に付与しながら、二節点のすべりを許す方法である。

また、土の力学モデルは、bi-linear な弾塑性モデル

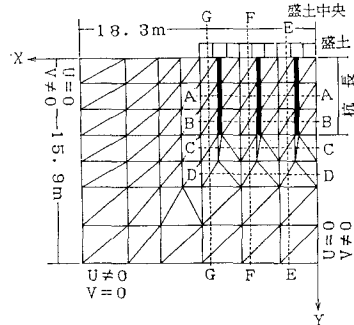


図-3 解析モデル

の地盤を対象に時間依存性を考慮した弾塑性有限要素解析^{(11),(12)}を行っている。

b) 解析モデル

解析モデルは、図-3 に示すような平面ひずみ矩形モデルで、杭要素は図中の墨塗り部分、両端面は X 方向の変位拘束、底面は Y 方向の変位を拘束とした。試験盛土は複雑な形で非対象荷重(図-1 参照)であるが、盛土荷重を帯荷重 ($r_s=1.7 \text{ tf/m}^3$) で近似した。軟弱地盤の層厚は 15.9 m、地下水位は地表面と一致、杭径 30 cm、杭間隔 2 m、鉄筋径 1 cm とし、杭は単位奥行き of 土と杭の占有体積配分より換算した剛性を用いた。

なお、計算に用いた要素物性値を表-2 に示す。

c) 解析条件

次のような条件を組合せて計算を行った。

- ① ケース A：無処理地盤
 ケース B：杭のみ
 ケース C：杭間を鉄筋拘束した場合（パイルネットト）
- ② 盛土高：0, 1, 2, 3, 4, 5 m
- ③ 杭 長：2, 4, 6 m (必要に応じて 5, 7, 9 m も行う)
- ④ 杭間隔 (杭長 6 m の場合)：2 m (群杭), 4 m (単杭)

ただし、境界面すべりおよび摩擦力を考慮した解析は、先述したように杭の挙動の定性的傾向を把握するため行うので、解析条件④の杭間隔は、群杭としての条件式(1)を満足していないが、ここでは杭長 6 m の場合、杭間隔 2 m を群杭、4 m を単杭と呼称する。

表-2 要素物性値

| 物 性 値 | 軟弱粘土 | 木 杭 | 鉄 筋 |
|--|-------------------|-------------------|--|
| 弾性係数 E (tf/m ²) | 5.0×10^2 | 7.8×10^4 | 2.1×10^5 (引張) 2.1×10^4 (圧縮) |
| ポアソン比 ν | 0.45 | 0.30 | 0.30 |
| 有効単位体積重 γ' (tf/m ³) | 0.42 | -0.48 | 0.001 |
| 有効せん断抵抗角 ϕ' (°) | 33.0 | 0.0 | 0.0 |
| 有効粘着力 C' (tf/m ²) | 0.0 | 1.0×10^3 | 1.0×10^3 |

(1tf/m²=9.8kPa)

(2) 解析結果

a) 鉛直応力

図-3 の E-E, F-F, G-G 断面に沿って、各盛土高における鉛直応力分布を描くと図-4 (a), (b), (c) を得る。同様に、図-3 の A-A, B-B, C-C, D-D 断面における鉛直応力分布は図-5 (a), (b), (c) となる。これらの図からわかるように、杭間の鉛直応力は無処理(ケース A)に比べ杭施工(ケース B, C)の方がともに小さい。しかし、杭施工(ケース B, C)の場合、杭先端付近に応力集中がみられ、それ以降になると無処理(ケース A)の分布状況に近づく。さらに詳細にみると、パイルネット工(ケース C)の方が、杭のみ(ケース B)

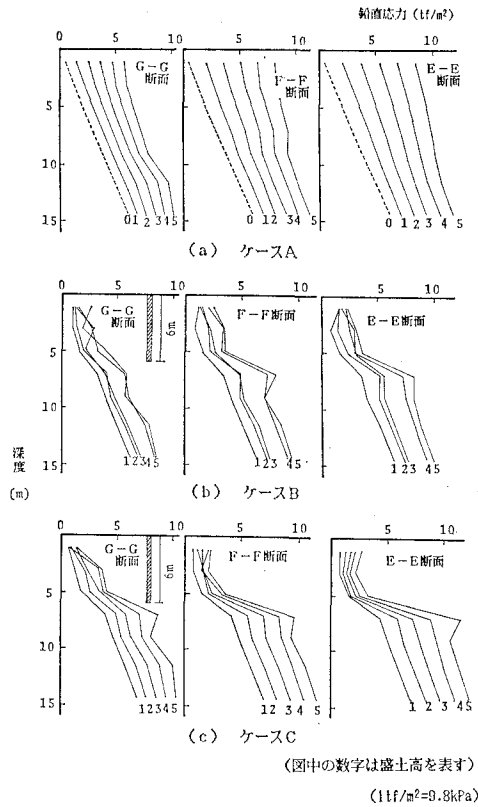


図-4 鉛直断面における鉛直応力

に比べ杭間の鉛直応力はより小さく、杭先端部の応力集中度は逆に大きい。

b) 水平応力

水平応力についても同様な整理を行ったが、杭間水平応力の減少、杭先端付近の応力集中、杭先端に深の応力分布はすべて鉛直応力分布と同様の傾向がみられた(図省略)。ちなみに、杭長 9 m の場合、3 m 盛土施工に伴う最大水平増加応力は、杭間で計測値 1.20 tf/m²、計算値 1.45 tf/m² であり、杭下で計測値 3.80 tf/m²、計算値 5.85 tf/m² であった。

c) ケース別の盛土高と杭の挙動

図-7 からわかるように、すべての杭は載荷により盛土中央に向かって杭頭が傾く回転をする。

以下、解析モデルにおける 3 本の杭の挙動の表現に際し、図-6 に示すように、杭の変位モードをそれぞれ I ~ III 型と呼称する。I 型は回転+水平変位 0、II 型は回転+盛土中央へ向かう水平変位、III 型は回転+盛土外側へ向かう水平変位をそれぞれ意味する。また図-3 に示す 3 本の杭は、右(荷重中心に近い方)より No. 1, No. 2, No. 3 杭と名付ける。

盛土高に応じて杭の回転と水平変位ともに増大するが、特に盛土高 4 m, 5 m で顕著な増大傾向を示す(図省略)。ちなみに、青原地区の盛土形状で無処理地盤と

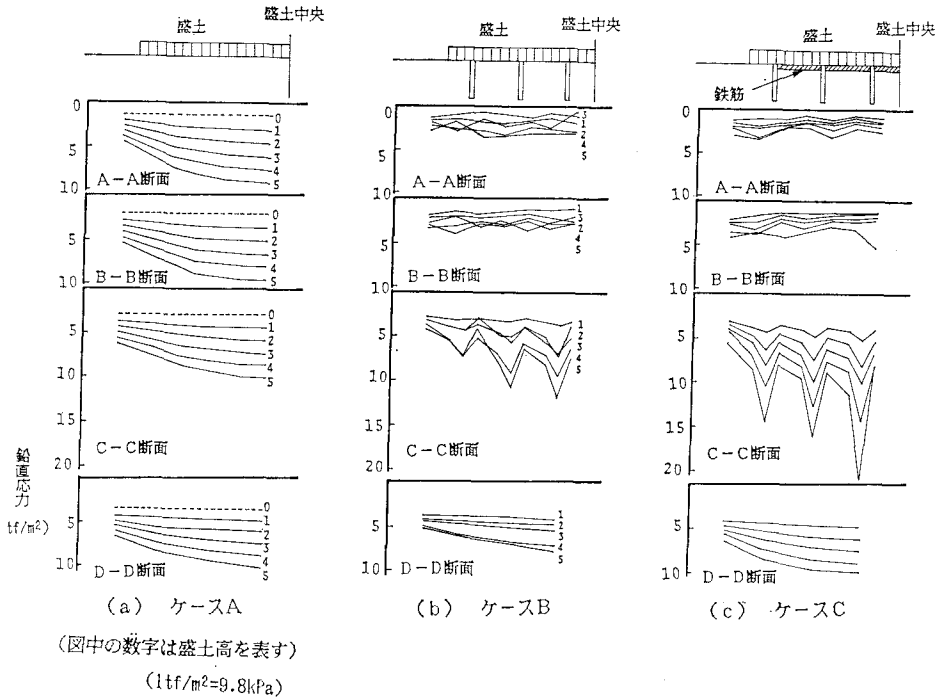


図-5 水平断面における鉛直応力

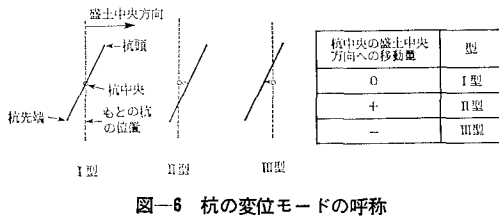


図-6 杭の変位モードの呼称

みなし、円弧すべり破壊に対する安全率を算定すると、堤外側への安全率が $F_s=1.16$ 、堤内側のそれが $F_s=0.96$ となり、試験盛土高 3m で無処理の場合は、すべり破壊が発生すると報告されている⁷⁾。

次いで、ケース別の杭の挙動を盛土高 3m の場合 (図-7) を例に採り説明する。図-7, 8, 10, 11 は杭の水平変位を強調するため縦横比を替えている。

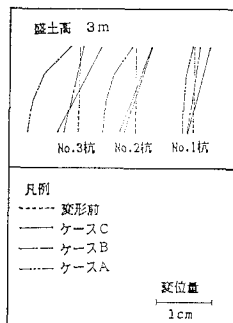


図-7 ケース別の杭の挙動

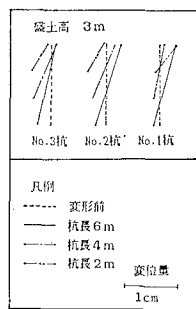


図-8 杭長が変化した場合の杭の挙動

杭施工 (ケース B, C) の場合、No. 1, No. 2 杭の挙動はおおむね II 型で、No. 3 杭になると III 型も生じることが、ケース C の場合、杭頭拘束のため、杭頭が変形前を大きく逸脱するようなことはない。

図-7 中の二点鎖線は無処理 (ケース A) の場合の土 (杭と等しい位置) の挙動を示している。無処理地盤の場合はおおむね III 型で、側方変位が著しくなることが認められる。これは側方変位に対し杭の抑止効果が認められることを示している。

d) 杭長を変化させた場合の特徴

図-8 に盛土高 3m における杭のみ (ケース B) の条件で杭長を 2, 4, 6m と変化させた場合の杭の挙動を示す。

No. 1 杭は、杭の長さには関係なく II 型の変位モードを示す。No. 2 杭は、杭長 2m になると III 型の変位モード、No. 3 杭は、すべて III 型の変位モードを示す。すなわち、杭長が短くなるほど、かつ杭が盛土中央から側方へ離れるほど、回転および盛土外側に向かう変位が著しくなる。このことから杭長が短くなるほど、杭の側方変位抑止効果が減少するといえる。杭の挙動の計測がないため、パイルネット工施工端から 3.3m 離れた地点に設置された孔内傾斜計 (図-2 参照) により昭和 59 年 2 月時点で計測された水平変位の深度分布を杭長をパラメーターとして図-9 に示す。図-8 の No. 3 杭の挙動と比較すると、当然のことながら、計算値のほうが小さいが、前述した変位モード、変位のオーダーともに

よい対応を示している。

e) 杭頭部間の伸縮

パイルネット工法の鉄筋で杭頭拘束する意味を考察するため、ケースBについて、杭長をパラメーターとした3つの杭間での伸縮量-盛土高関係を 図-10 (a), (b), (c) に示した。

まず盛土中央と No. 1 杭の間 ((a) 図) では盛土高にかかわらず、収縮側にあり引張鉄筋の必要はない。No. 1 杭と No. 2 杭の間 ((b) 図) では、杭長6mのとき盛土高3mまで杭の動きが少なく収縮も伸張も生じないが、盛土高4m以上では収縮となる。また杭長4mでは、盛土高3m以上になると伸張側となり、杭長2mではすべて伸張となる。したがって杭長が短くなって単杭になると、盛土荷重も関係するが伸張が生じることになる。No. 2 杭と No. 3 杭の間 ((c) 図) では、盛土高にかかわらずすべて伸張となる。このことは、トラフィカビリティに問題がなければ、パイルネット工法において全幅ネット処理する必要のないことを示

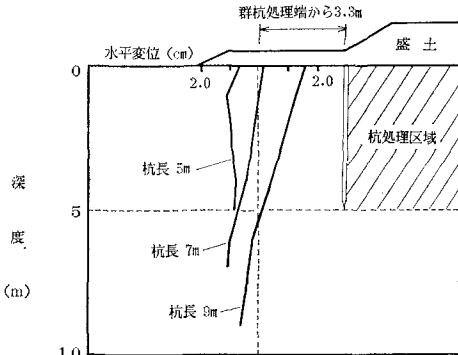


図-9 水平変位の深度分布 (計測値)

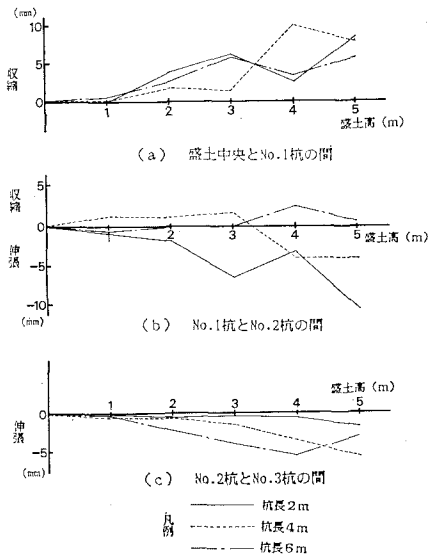


図-10 杭長別の杭間の伸縮量

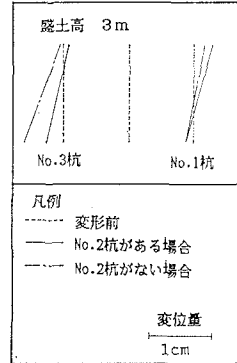


図-11 No. 2 杭がない場合の杭の挙動

唆している。すなわち、中央部分はネット処理する必要がなく、かつ杭長 L と基礎地盤層厚 H の比 L/H が大きくなるほど、外側のネット処理幅を小さくしてよいといえよう。

f) 杭間隔を広げた場合の特徴

杭間隔を広げる意味で、No. 2 杭を除いた状態で計算した杭の挙動を 図-11 に示す。なお、図は盛土高3m、杭長6mであるが、間隔が広いので単杭となっている。

杭の挙動の特徴として、No. 1 杭より No. 3 杭が目目される。すなわち、盛土荷重により No. 3 杭はⅢ型の変位モードを示し、他の条件に比べ変位が一番大きい。当然 No. 1 杭と No. 3 杭の杭頭を拘束すれば引張力が働くことになるであろう。また杭間の鉛直応力分布を描いたものが 図-12 である。図から杭間が広くなると杭間の地盤内応力が増すことがわかる。

以上の解析結果から次のようにまとめられる。

- ① パイルネット工の場合、杭間の地盤の鉛直・水平応力ともに最小で、杭先端部の鉛直応力集中度は最大であり、それ以深になると無処理地盤の応力状態に近づく。
- ② パイルネット工では、杭間の地盤の鉛直・水平応力ともに最小のため、変形(圧密)はほぼ無視でき、群杭処理区域はケーソンのような一体構造物とみなすことができる。
- ③ すべての杭は荷重により、盛土中央に向かって傾く回転をする。
- ④ 盛土高の増加に伴い、杭の回転、盛土外側への水平変位ともに増大するが、盛土高が4mを超えると、

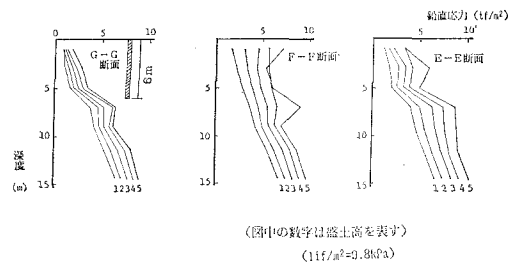


図-12 No. 2 杭がない場合の鉛直応力

顕著な増大傾向を示し、かつ土要素のローカルな破壊が卓越する(図省略)。

⑤ 杭施工の場合、明らかに無処理地盤の側方変位を抑制する効果が認められる。

⑥ 杭長層厚比 L/H が大きくなるほど、側方変位の抑止効果は大きくなる。

⑦ 盛土高、杭長に関係なく、盛土中央 ~No. 1 杭頭間は常に収縮、No. 2~No. 3 杭頭間は伸張である。

⑧ パイルネット工法において、中央部分にはネット処理を施す必要はなく、杭長層厚比 L/H が大きくなるほど、外側のネット処理幅を小さくしてよい。

⑨ 杭間隔が大きくなるほど、杭間の地盤内応力は増大し、それに伴い杭間の地盤の圧密が無視できなくなり、杭処理区域をケーソンのような一体構造物とみなすことはできなくなる。

3. パイルネット工施工地盤の沈下性状

2. で無処理地盤、杭のみ、パイルネットのケースと盛土高、杭長、杭間隔を種々変化させ、上記のような結論を得た。しかし、それらは土のモデルとして bi-linear な弾塑性モデルを用いているため、定性的な傾向しか把握できない。パイルネット工法により、側方変位を抑止できたとしても、次に沈下の予測が必要となる。

本章ではパイルネット工施工地盤の沈下性状について考察する。

(1) 木材の透水試験

パイルネット工法における木杭の存在は、盛土荷重を支持するだけのものか、あるいは排水機能を有しているのかどうかを調べるために木材の透水試験を実施した。

透水試験は定水位透水試験によった。木材は直径 5 cm、長さ 10 cm の杉材と松材で、試験は繊維方向(元口から末口方向と末口から元口方向)およびそれと直角方向で試みた。試験結果を表-3 に示す。繊維方向特に元口から末口方向の透水係数はほぼ 10^{-6} cm/s のオーダーである。一方、サンドドレーンの透水係数が $10^{-2} \sim 10^{-3}$ cm/s、ペーパードレーンのそれが $10^{-1} \sim 10^{-2}$ cm/s、側圧や湾曲の影響を受けると $10^{-3} \sim 10^{-4}$ cm/s といわれているのに対し、地盤を構成する有明粘土のそれは $10^{-8} \sim 10^{-9}$ cm/s である。このことから木杭周囲からの

表-3 木材の透水試験結果

| | | |
|---|--------------|-----------------------|
| 杉 | 繊維方向 (元口→末口) | 3.42×10^{-6} |
| | 繊維方向 (末口→元口) | 7.70×10^{-7} |
| | 繊維直角方向 | 2.22×10^{-8} |
| 松 | 繊維方向 (元口→末口) | 8.33×10^{-7} |
| | 繊維方向 (末口→元口) | 2.70×10^{-7} |
| | 繊維直角方向 | 6.85×10^{-9} |

(単位: cm/s)

排水は期待できないが、杭先端部からの排水機能を若干有するものと考えられる。

(2) 有限要素解析法

杭の挙動と杭間の応力を調べた結果、杭と杭間の土が一体化して沈下すると考えられる。そこで杭先端以深の地盤を対象とし、粘性土の圧密およびせん断変形の時間依存性を考慮した構成モデルを用いた経時変形解析¹¹⁾、¹²⁾を行った。

a) 構成モデル

著者の一人により提案されている構成モデルの概要は以下のとおりである。

$$\begin{aligned}
 dv &= \frac{1}{1+e} \cdot \frac{1}{p'} \left\{ \kappa + (\lambda - \kappa) \cdot \frac{R + a \cdot b^{(\log t_{fc}/\log 2)}}{R + a \cdot b^{(\log t/\log 2)}} \right\} \cdot dp' \\
 &\quad + \frac{1}{1+e} \cdot \frac{\mu}{p'} (t/t_{fd})^{1-m_d} \cdot dq \\
 dr &= \frac{1}{p'} \left\{ \nu + \frac{\mu}{1+e} \cdot \frac{N_0}{M_0 - (q/p')} \cdot (t/t_{fs})^{1-m_s} \cdot dq \dots \dots \dots (2) \right.
 \end{aligned}$$

なお、上式 t_{fc} , t_{fd} , t_{fs} は次式で表わされる。

$$\begin{aligned}
 t_{fc} &= (H^e/H^*)^{n_c} \cdot t^* \\
 t_{fd} &= (H^e/H^*)^{n_d} \cdot t^* \dots \dots \dots (3) \\
 t_{fs} &= (H^e/H^*)^{n_s} \cdot t^*
 \end{aligned}$$

ここに dv , dr はそれぞれ体積および正八面体ひずみ増分、 p' , q はそれぞれ平均有効主応力、正八面体せん断応力であり、 dp' , dq はその増分、 e_0 は間隙比、 H^* , H^e はそれぞれ室内試験用供試体および各要素の有効排水距離、 t^* は室内試験の一荷重増分当たり規定した測定時間を意味する。したがって、構成モデル中の所要パラメーターは次の 14 個となる。

- 弾塑性パラメーター: $\lambda, \kappa, \mu, \nu, M_0, N_0$
- 時間パラメーター: R, a, b, m_d, m_s
- 寸法効果パラメーター: n_c, n_d, n_s

式 (2), (3) より一般座標における増分関係を誘導し、さらに平面ひずみ条件における構成式を導き、有限要素法の定式化を行い解析する。

b) 解析モデルおよび条件

解析モデルとして、杭先端以深を 図-13 のように分割した。解析に用いた有明粘土の所要パラメーターを表-4 に示す。

解析条件は次のとおりである。

- i) 盛土荷重は、芦原地区における盛土高 (3m) の急速載荷とする。
- ii) 芦原地区の施工例をもとに、杭長 L を 5m, 7m, 9m の 3 種類、杭径は 20 cm で行った。
- iii) X-X 断面(杭先端面)には、2. の杭先端面における鉛直応力の計算結果を用い、初期状態では土かぶ

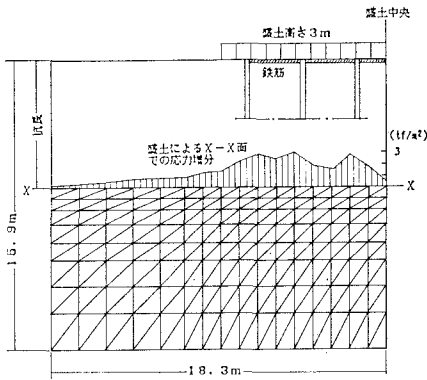


図-13 沈下解析のモデル

表-4 所要パラメータ

| 弾塑性パラメータ | | 時間パラメータ | |
|-----------|------|-----------|--------|
| λ | 0.47 | k | 8.98 |
| κ | 0.08 | a | 111.32 |
| μ | 0.29 | b | 0.61 |
| ν | 0.01 | m_d | 0.76 |
| M_{01} | 0.73 | m_s | 0.79 |
| N_0 | 0.29 | 寸法効果パラメータ | |
| | | n_c | 2.0 |
| | | n_d | 1.5 |
| | | n_s | 1.5 |

り圧を、盛土載荷後は荷荷による荷重増分を加える。なお、図-13中に杭長7mの場合の鉛直応力増分の分布を示す。

iv) 排水条件として、次の2種類で行った。

- ① 地表面（排水距離 d_1 ）と基盤（排水距離 d_2 ）および杭先端（排水距離 d_3 ）の最小距離を排水距離とする（図-14 (a) 参照）。
- ② 地表面（排水距離 d_1 ）と基盤（排水距離 d_2 ）の最小距離を排水距離とする（図-14 (b) 参照）。

すなわち、①は木杭を先端のみからのドレーン材とみなした場合、②は木杭をドレーン材とみなさない場合に相当する。

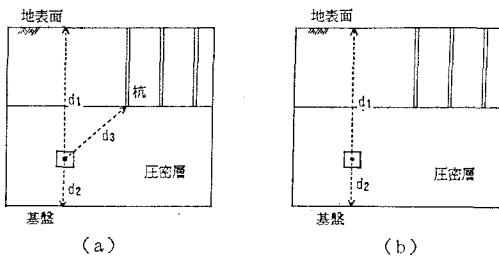


図-14 排水条件のモデル

(3) 簡易計算法

2. の解析結果から、パイルネット工の群杭間の地盤の水平・鉛直応力はともに極端に小さく、したがって変形も微小で、ほぼ杭と一体となって動くものとみなすこ

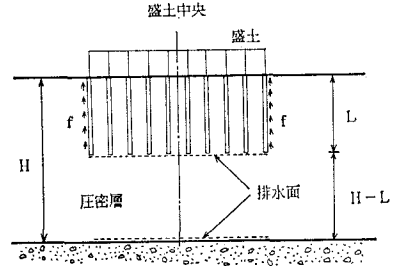


図-15 簡易計算のモデル

とができる。また杭先端付近に応力集中があり、それによって深になると無処理地盤に近づくこと、および建設省武雄工事事務所の報告¹³⁾から次の簡易計算の仮定を設けた。

図-15に示すように、杭で囲まれた部分は一体化したケーソン状のものとして考え、ケーソン側面は摩擦による抵抗力を考慮し、盛土の沈下は先杭端以深の粘土層を対象にする。

簡易計算の仮定として対象とする圧密層は見出せたが、圧密排水面をどう考えるかを検討する必要がある。すなわち、透水性基盤層のみを考慮した片面排水と考えるべきか、あるいは杭先端からの排水も考慮すべきかを実測値との対比から検討した。用いた式は

$$t = \{(H-L)/2\}^2 \times T_V / C_V \dots\dots\dots (4)$$

ここに t は圧密度 U に達するまでの時間、 H は軟弱地盤の厚さ、 L は杭長、 T_V は時間係数、 C_V は圧密係数をそれぞれ意味する。圧密係数 C_V の値は $0.112 \text{ cm}^2/\text{min}$ で、圧密度 $U=99.5\%$ とすると4.2年となる。そこで簡易計算は4.5年（昭和61年1月時点）で全沈下量を推定するものとした。

(4) 解析結果

a) 時間・沈下曲線

(2)、(3)に示した種々の解析条件のもとに時間・沈下曲線を求めたものが図-16である。まず有限要素解に注目すると、図中二点鎖線は木杭をドレーン材とみなさない場合（FEMモデル (b)）で、沈下量が実測値に比べて時間的にかなり遅れている。一方、図中破線は木杭を先端のみからのドレーン材とみなした場合（FEMモデル (a)）で、実測値と比較的良好に対応しており、木杭の機能が盛土荷重の支持のみでなく、排水機能についてもある程度は評価すべきであることを示している。

次に簡易計算法により、 C_V の値として $0.112 \text{ cm}^2/\text{min}$ を用いて両面排水の条件で時間・沈下曲線を求めたものが図中の一点鎖線である。ただし、杭長7mの場合のみ記入した。図から、両面排水つまり木杭を先端のみからのドレーン材とみなすと、簡易計算では沈下量をやや過大に評価する傾向がみられる。しかし、これは設計の面からは安全側であるので、簡易計算（両面排水）によってよいと考える。

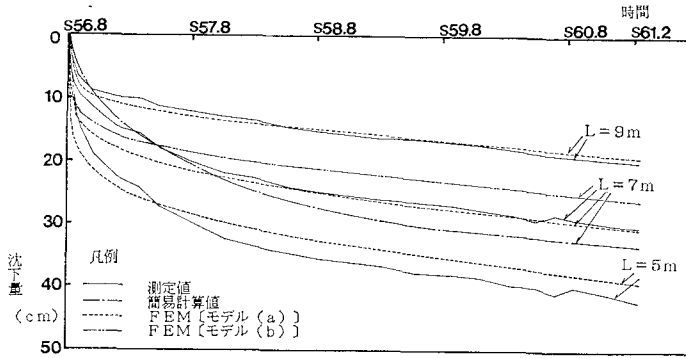


図-16 時間・沈下曲線

b) 全沈下量

杭長 $L=9\text{m}, 7\text{m}, 5\text{m}$ に対応する圧密層厚 $(H-L)$ と沈下量の関係を 図-17 に示す。図には実測値(●), 簡易計算値(△), FEM 計算値(□, ○) が示されている。まず, 実測値とモデル (a) による計算値が良好な対応を示しているのが注目される。これより, モデル (a) による FEM 解析結果はほぼ妥当なものといえよう。一方, モデル (b) は沈下量をやや過小に評価する傾向がみられる。次に簡易計算値は, 実測の沈下量に比べ過大に評価しているのが認められる。実測値は二次圧密による沈下量を含んでいるから, 実測値の方が簡易計算値より大きくなるべきである。しかし簡易計算には種種の仮定や, 限られた土質特性値を用いたもので 1~2 割の誤差を生じて可としないでならないだろう。

ちなみに, 無処理地盤(層厚 15.9m)の簡易計算値は全沈下量 $S=120\text{cm}$ となった。一方, 圧密層厚 10.9m (杭長 5m) の実測値でさえ約 40cm (図-17 参照) であることから, 圧密層厚は $(H-L)$ とみなすのが妥当といえよう。

4. 結 論

芦原地区におけるパイルネット工施工事例を解析, 検討することによりパイルネット工設計に対する指針とし

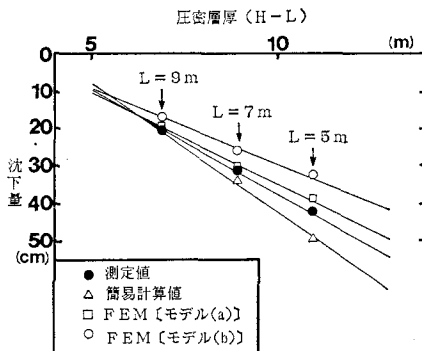


図-17 圧密層厚と沈下量の関係

て次のような結論を得た。

- (1) パイルネット工の杭間隔は群杭としての条件式 $D_0 \leq 1.5\sqrt{r \cdot L}$ を満足していなければならない。
- (2) パイルネット工の場合, 群杭施工区域はケーソン状の一体構造物とみなしてよい。
- (3) 杭長層厚比 L/H が大きくなるほど, 側方変位の抑止効果は増大する。
- (4) ネット処理(杭頭間の鉄筋拘束)は中央帯に施す必要はない。
- (5) 杭長層厚比 L/H が大きくなるほど, 外周部のネット処理幅は小さくしてよい。
- (6) 圧密層厚は杭先端から, 基盤まで $(H-L)$ とみなしてよい。
- (7) 木杭は先端のみからのドレーン材としての機能をいくらか果たしており, 設計上は杭端面を排水面とみなしてよい。
- (8) 杭処理区域はケーソンとみなし, ケーソン側面の摩擦力を考慮した簡易計算法(テルツァギー・ベック法)による圧密量, 時間・沈下曲線はやや実測を過大評価する傾向はあるものの, おおむね妥当に沈下量を見積る。
- (9) 盛土の沈下量は, 杭長 L または杭長層厚比 H/L と線形関係が成立する(図-17 参照)。したがって, 許容沈下量に対応する杭長を決定することができる。
- (10) 無処理地盤の簡易安定計算(円弧すべり計算)を行い, 杭長が臨界円以深でなければならないことは論をまたない。

あとがき

パイルネット工法は, 施工の迅速性, 施工管理が容易なこと, 側方変位抑止効果が顕著なこと, 木杭を用いれば先端のみからではあるがドレーン材として機能し, 圧密をある程度は促進させるものと考えられるなど多くの利点があり, 今後軟弱粘土地盤の盛土施工に際し, その対策工法としての需要は高まるものと想像される。

本報告では, 佐賀県六角川流域の芦原地区におけるパイルネット工の事例を対象に, 2つの有限要素解析および簡易計算結果の考察から, いくつかの設計指針を示し得た。しかしその多くは, 定性的な指針にとどまっており, 具体的な設計指針を示すまでには至っていない。

今後, 異種材料(杭や鉄筋)と土の相互作用をシミュレートし得る三次元弾粘塑性解析法の開発を急ぎ, 具体的かつ合理的な設計法の確立にまで結びつけていきたい。

なお本計算には, 長崎大学情報処理センター FACOM

・M 360 を使用したことを附記する。

謝 辞：本研究を進めるうえで、本学卒業生外園省二（現山崎建設KK）、松尾 禎（現新日本開発工業KK）の両君および、倉持 隆氏（応用地質KK）には解析、実験にあたり協力していただいた。また建設省武雄工事事務所の方々には観測結果など多くの資料を提供していただいた。なお六角川技術委員会の方々にも貴重な助言をいただいた。ここに併記し謝意を表す次第である。

参 考 文 献

- 1) H.A.M.C. Dibbitts: Road Construction on Soft Subsoils, Proc. 2nd Inter, Soil Mech. Conf. (Rotterdam) Vol. 6, pp. 42~45, 1948.
- 2) たとえば、佐々木晴美: 泥炭地盤対策工法の歴史的変遷, 北海道開発局土木試験所月報, 第 330 号, pp. 22~31, 1980.
- 3) 佐藤定雪・渡辺直善・新山 淳・宮本 勲: パイルスラブ工法について—軟弱地盤対策工法—, 第 16 回北海道開発局技術研究会論文集, pp. 31~38, 1972.
- 4) 土佐林宏: 石狩川の軟弱地盤改良工事, 土木技術, 第 38 巻 10 号, pp. 72~78, 1983.
- 5) 川端 登・嶋 隆司: 函館本線・手稲~琴似間の軟弱地盤における盛土工事の設計・施工 (杭網工法), 土木技術, 第 36 巻 6 号, pp. 136~143, 1981.
- 6) 中川晴夫・柳沢秀広・石沢高明: パイルネット工法「成田線・佐倉~成田間線増工事」, 土木技術, 第 38 巻 10 号, pp. 79~83, 1983.
- 7) 粕谷晋一・土井英雄・古賀義徳・岡本正美: パイルネット工法の設計理論に関する一考察, 第 36 回建設省技術研究会報告, 建設省, pp. 87~93, 1982.
- 8) 土質工学会九州支部編: 九州・沖縄の特殊土, 九州大学出版会, pp. 23~35, 1983.
- 9) 伊勢田哲也・棚橋由彦・樋口敏昭: 壁面摩擦を考慮した FEM 解析, 第 14 回土質工学研究発表会, pp. 989~992, 1979.
- 10) Fukuoka, M., Akatsu, T., Katagiri, S., Iseda, T., Shimazu, A. and Nakagaki, M.: Earth Pressure Measurement on Retaining Wall, 10th ICSMFE, Case History Volume, pp. 237~296, Stockholm, 1981.
- 11) 棚橋由彦・伊勢田哲也: 弾塑性応力ひずみ時間関係式に基づく粘土地盤の経時変形解析, 第 36 回土木学会年次学術講演概要, III, pp. 154~155, 1981.
- 12) 棚橋由彦: 土の構成則とその地盤の変形解析への応用に関する研究, 九州大学学位論文, 乙第 573 号, 236 p, 1985.
- 13) 建設省武雄工事事務所: 芦原地区地質調査報告書, 1981. (1986.6.2・受付)

10 年半ぶりの全面改訂版なる!

構造力学公式集

B5判 538ページ上製・ビニールケース入り 13 000 円 会員特価 11 000 円 (千とも)

本書に集積されている知識は、われわれが持つことのできた天才や多くの先達の知的努力の結晶であり、また長い経験の中から営々と築き上げられた正に人類の貴重な遺産である。構造技術者が基本として知り、かつ常に座右に持ち、常に判断の基礎となるべき公式の集成である。

- 主要目次● 1. 力と変形 2. 部材の性質 3. 骨組構造解析 4. 柱
5. はり 6. トラス 7. アーチ 8. ラーメン 9. ケーブル構造
10. 平板 11. シェル 12. その他 13. 振動 【資料】

●お申込みは土木学会または全国主要書店へ●

