

親杭横矢板形式による斜め自立土留めの設計および施工

(株)大林組	正会員	○青木	峻二
成田国際空港(株)	正会員	早川	勇
(株)大林組	正会員	上原	郷
(株)大林組	正会員	照井	太一

1. はじめに

斜め自立土留めは、土留め壁に傾斜をつけることで土留め壁に作用する土圧が低減する効果に着目し、切梁やグラウンドアンカーなどの支保工を省略した自立形式の土留めである(図-1)。土留め支保工の省略により工期短縮とコスト縮減が可能となる。さらに、躯体構築時には施工性が向上する。すでに施工機械の開発が終了し、傾斜をつけた土留め壁の施工が可能になっているため、今後、本工法の適用拡大が期待される。

斜め自立土留めは、これまで貫井ら¹⁾の鋼矢板による施工例があるのみで、親杭横矢板による適用例はなかった。本稿では、親杭横矢板形式の斜め自立土留めの適用事例(写真-1)を通じ、計測工により土留めの挙動を確認することで、設計手法の妥当性および構造成立性について検討した結果を報告する。

2. 工事概要および地盤特性

(1) 工事概要

本工事の概要は下記の通りである。

工事名称：第2木の根トンネル設置工事(その2)

発注者：成田国際空港株式会社

工事内容：航空機誘導路下に道路トンネル(プレキャスト製品)を築造する開削工事

掘削諸元：幅 15.5m、深さ約 9.5m、延長 97.0m

(2) 斜め土留めの適用範囲

本工事では、クレーン施工ヤード付近および施工区間端部を除く範囲に斜め自立土留めを適用した(図-2)。クレーン施工ヤードでは、プレキャストカルバートの設置のために使用する 350t クレーンの荷重を背面側の地表面載荷重として考慮する必要があることから、グラウンドアンカーを2段用いた直立の土留めとした。

なお、斜め自立土留めの傾斜角度は 10 度と設定した。土留めの傾斜角度は、舗装撤去範囲がプレキャストカルバート縁端から 2.5m までと指定されていたため、斜め土留めの安定性を確保できることおよびプレキャストカルバート設置工事の必要断面を考慮して決定した。

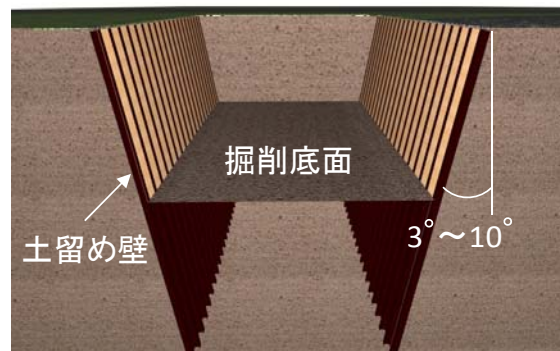


図-1 斜め自立土留め断面図



写真-1 親杭横矢板形式斜め自立土留め

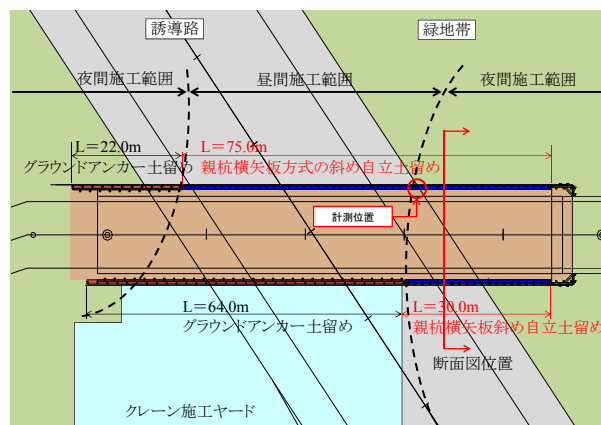


図-2 平面図

キーワード 親杭横矢板、斜め自立土留め、内部支保工省略

連絡先 〒108-8502 東京都港区港南 2-15-2 (株)大林組 生産技術本部技術第一部 TEL 03-5769-1322

(3) 地盤特性

図-3 に示すとおり当該地盤は表層部に粘性土層 Lm・Lc (層厚約 3.0m, N 値 3~4) があり、その下が砂質土層 Ds1・Ds2 (N 値 10~30 程度) で構成されている。砂質土層には、GL-13.5m 付近に N 値が 50 以上の硬質薄層が存在する。また、地下水位は掘削底面以深 (GL-14.0m 付近) である。

設計に使用した土質定数を表-1 に示す。

3. 設計手法

(1) 土圧の算定方法

斜め自立土留めの設計では、土留め壁の傾斜を考慮した土圧を算定する。仮設土留め設計に一般的に適用される指針「道路土工仮設構造物工指針²⁾」等では、主働土圧の算定にランキン・レザール式が適用されるが、土留め壁の傾斜は考慮できない。そこで、斜め自立土留め工法の設計には「道路土工擁壁工指針³⁾」におけるクーロン土圧算定式により主働土圧係数を算出する (図-4)。今回の設計においては、壁背面と鉛直面のなす角を $\alpha = -10^\circ$ とすることで主働土圧係数が $K_A = 0.189$ となり直立とした場合の主働土圧係数 $K_A = 0.251$ より約 25% 小さくなる。なお、掘削底面以深の主働土圧の作用範囲は、「山留め設計施工指針⁴⁾」の設計用側圧とした。

本設計における弾塑性法の構造解析モデルを図-5 に示す。ここに述べる斜め自立土留めの設計手法は、嶋田ら⁵⁾ の遠心模型実験でその妥当性が確認されている。

(2) 根入れ長の決定方法

斜め自立土留めの設計における根入れ長は、次に示す 3 つの検討から求められる根入れ長のうち最大のものとし、根入れ長は、③で決まる 10.0m とした。

①根入れ部の側圧に対する安定から必要な根入れ長

つり合い深さは、土留め壁頭部位置に関し、背面側からの主働土圧による作用モーメントと掘削側からの受働土圧による抵抗モーメントがつりあう深さとする。なお、検討に用いる側圧は (1) と同じである。

②掘削底面の安定から必要な根入れ長

当該地盤は、地下水位が最終掘削底面以深で砂質土主体の地質あるため、ボーリング、ヒービング、盤ぶくれの検討は省略する。

③土留め壁頭部の許容変位量から決まる根入れ長

弾性解析による土留め壁頭部の変位量が、掘削深さの 3% 以下となる根入れ長とする。

(3) 土留め壁の変位および断面力の算定

上述の (1)・(2) で算定した土圧および壁体長を検討条件とし、弾塑性解析により土留め壁に発生する変位および断面力を求めた。決定され

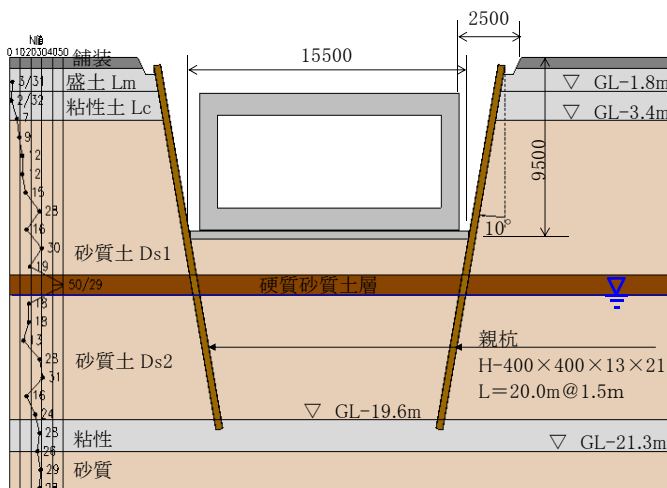


図-3 断面図

表-1 設計用土質定数

土質分類	N値	単位体積重量 γ (kN/m^3)	粘着力 C (kN/m^2)	内部摩擦角 ϕ (度)	変形係数 αE (kN/m^2)
Lm	3	14.0	55	0	8,400
Lc	4	16.0	65	0	11,200
Ds1	14	18.0	5	35	39,200
Ds2	16	17.5	0	35	44,800

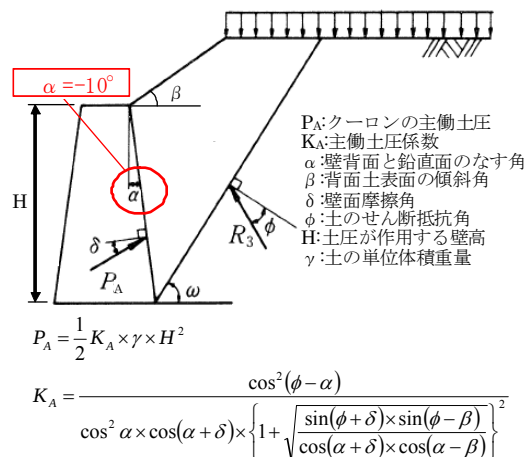


図-4 クーロン式による主働土圧の算定

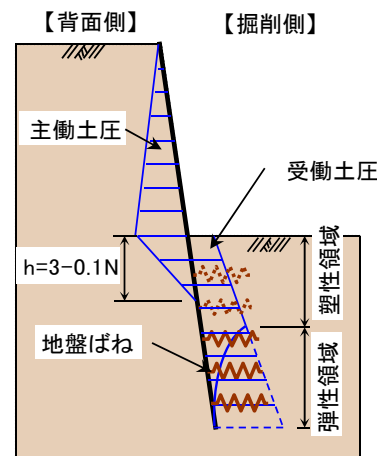


図-5 弾塑性解析の構造解析モデル

た親杭の仕様を表-2 に示す。

表-2 親杭の仕様

親杭仕様	H-400×400
親杭間隔	1.5m
傾斜角	10度
親杭全長	20.0m
根入れ長	10.0m

4. 施工

(1) 施工方法

親杭を傾斜させて打設するため、中型三点式杭打機のリーダに CHV（センターホール構造の油圧式高周波パイプロ）を取付けた機械（写真-2）を使用し、リーダを傾斜させて親杭を打設した。打設に際しては、当該地盤の砂質土層の N 値が 30 程度と硬質であるためウォータージェットを併用した。

親杭の打設角度の精度管理は次に示す 2 つの方法により行った。

①リーダ傾斜角の管理

三点式杭打機のリーダにリニアセンサを取付けてリーダの傾斜角を運転席のモニター（写真-3）で確認した。10 度±1 度を管理値として、オペレーターがリーダの傾斜を確認、修正しながら打設した。



写真-2 中型三点式杭打機+CHV



写真-4 傾斜測定器による測定



写真-3 傾斜モニター

②親杭傾斜角の管理

親杭の傾斜度は、打設開始前および打設中にデジタル傾斜測定器（写真-4）で直接計測した。

上記の①、②の 2 つの方法により、杭の打設精度を 10±1 度以内で管理することができた。

(2) 打設実績

三点式杭打機による親杭（H-400×400, L=20.0m, 2 本継杭）打設実績を表-3 に示す。昼間は 120m/日（6 本×L=20.0m）となり、直杭（グラウンドアンカー土留め用）の打設実績 104m/日（8 本×L=13.0m）と同等であった。また、夜間は図-2 に示す「夜間施工範囲」における機械の移動を限られた作業時間内で行わなければならないことなど、施工条件に厳しい制約があるため、打設実績は 60m/日（3 本×20.0m）であった。

表-3 打設実績

		1日	2日	3日	4日	平均
昼 (8 : 00 ~ 17 : 00)	斜杭	6本	6本	5本	7本	6本
	直杭	6本	9本	6本	9本	7.5本
夜 (23 : 30 ~ 5 : 20)	斜杭	3本	3本	3本	3本	3本

5. 計測項目および土質試験

(1) 計測項目

計測機器を設置した親杭を打設し、土留め壁の計測を行った。計測項目は、①杭水平変位、②杭に作用する土圧、③親杭のひずみとした。計測地点は図-2 の平面図に示す位置とした。計測機器配置断面図を図-6 に示す。

(2) 土質試験

最終掘削（GL-9.5m）時に採取した試料で不飽和土と飽和土の三軸圧縮試験を行った。三軸圧縮試験結果を表-4 に示す。

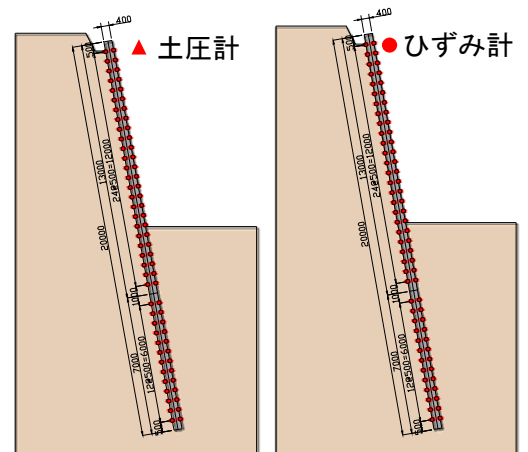


図-6 計測器設置図

表-4 三軸圧縮試験結果

	設計値 (既往の実績より設定)		試験結果	
	粘着力 C (kN/m2)	せん断抵抗角 φ(度)	粘着力 C' (kN/m2)	せん断抵抗角 φ'(度)
不飽和土	5	35	23	30
飽和土	0		8	

砂質土の粘着力には、飽和土に存在するセメンテーションによる真の粘着力と不飽和土に存在するサクションによる見かけの粘着力がある。見かけの粘着力は、砂質土に負の間隙水圧が存在する場合に生じることが知られている。三軸圧縮試験結果から、掘削範囲の砂質土には真の粘着力 8kN/m^2 と見かけの粘着力 23kN/m^2 が存在することを確認した。また、三軸圧縮試験の結果、せん断抵抗角は 30 度であった。斜め土留壁の計測値の値を精度よく再現するために砂質土の真の粘着力と見かけの粘着力(以下、砂質土の粘着力)、および試験結果より得られたせん断抵抗角を土質定数として用いて土留め壁の挙動を算出することとした。

6. 計測結果の考察

合理的な斜め土留め設計法の確立を目的として、土留めの計測結果について考察を行う。土留めの挙動を計測結果から考える上で比較を行う数値は、(A) 親杭の計測結果から得られた「計測値」、(B) 表-2 に示す設計用土質定数を用いて算出した「設計値」、(C) 三軸圧縮試験から得られた砂質土の粘着力とせん断抵抗角を考慮した「計算値」の3つとした。

①土留め壁の変位分布

最終掘削時 (GL-9.5m) の親杭の変位について「計測値」、「設計値」、および「計算値」の値を図-7 に示す。

自立土留め杭の挙動を最も評価しやすい杭頭部の変位量に注目する。「計測値」の変位量は 56mm で、「設計値」の変位量 295mm と比較すると $1/5$ 程度であった。この変位量の相違の要因として砂質土の粘着力の評価方法の違いがあげられる。砂質土の粘着力を考慮した「計算値」の変位量は 60mm となり、「計測値」の変位量 56mm に近い値となる。このことから、砂質土の粘着力を考慮することで、斜め土留め壁の変位量を精度よく再現できると考える。ただし、砂質土の粘着力は地盤の地下水の状態に大きく影響を受けるため、設計で考慮する場合には慎重でかつ総合的な検討が必要である。

②土留め壁の土圧分布

最終掘削時 (GL-9.5m) の杭に作用する側圧を示す「計測値」、算定時の主働・受働土圧を示す「設計値」および「計算値」の値を図-8 に示す。また、「計測値」の掘削側の側圧は、設計における掘削側の地盤反力と同等と考えられることから「設計値」と「計算値」については、地盤反力の値も図-8 に示す。

まず、背面側の側圧について比較する。掘削底面以浅では、「計測値」が「設計値」および「計算値」と近い値となった。しかし、掘削底面以深では、「計測値」のみが大きく異なり、GL-15.5m の位置で杭に作用する土圧が最大となった。これは、GL-13.5m 付近の硬質薄層が親杭の支点となり杭の変形による回転を抑えるため大きな反力が出ているためだと推定できる。また、今回の算定においては主働土圧を掘削底面以深では 1.6m の範囲までとしている。しかし、背面側の側圧の計測結果では杭の先端付近まで存在していることから、掘削底面以下の背面側の側圧は、設計時の主働土圧とは異なると思われる。

次に、掘削側の側圧について比較する。「計測値」が「設計値」の地盤反力よりも大きくなっている。これは、設計では主働土圧を掘削底面以深では 1.6m の範囲までとしているが、計測結果では背面側の側圧が杭の先端付近まで存在していることから、それに対する掘削側の地盤反力が大きくなっているためだと推定できる。

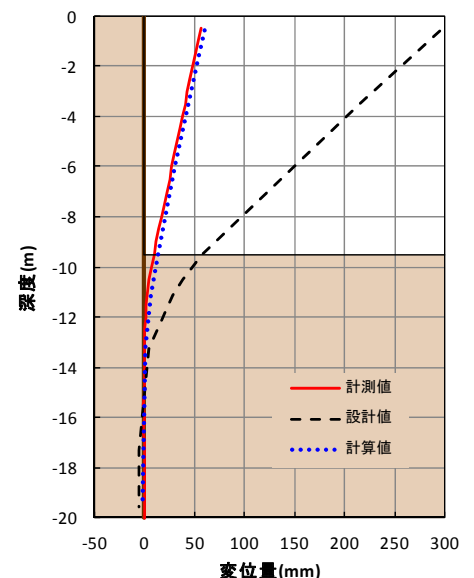


図-7 変位分布比較

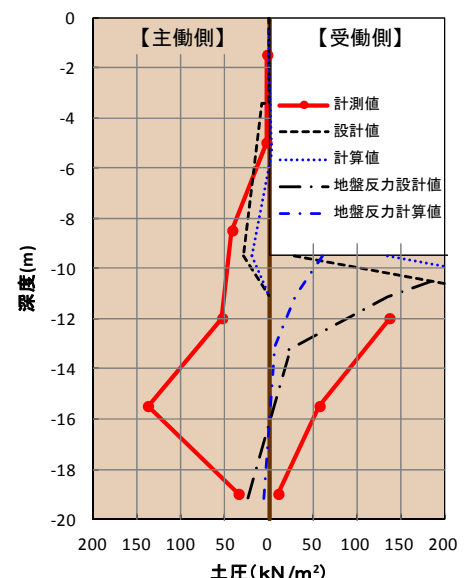


図-8 土圧分布比較

③親杭の曲げモーメント分布

最終掘削時（GL-9.5m）のひずみ計測結果から親杭の曲げモーメントを算出し、その値を「計測値」とした。親杭の曲げモーメントについて「計測値」、「設計値」および「計算値」の値を図-9に示す。

まず、親杭の曲げモーメントのモードについて比較する。「設計値」と「計算値」の曲げモーメント発生位置は、GL-11.0m 付近となり杭の上下端部へ向けて減少している。それに対して、「計測値」の曲げモーメントは、GL-10.5m 付近の最大値より杭の上端部については計算結果と同様に減少しているが、杭の下端部については計算結果と異なっている。これは、設計用土質定数では砂質土層を均一な層としているのに対して、実際には GL-13.5m 付近に硬質薄層が存在して親杭を拘束しているためである。親杭が拘束されている範囲では曲げモーメントが小さい値となり、それより下端では曲げモーメントが負になっている。

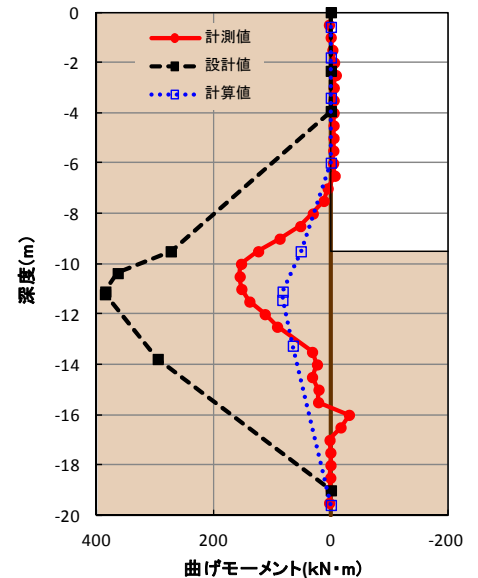


図-9 親杭曲げモーメント分布

次に、親杭の最大曲げモーメントについて比較する。「計測値」は、「設計値」の半分以下の値となっている。この要因として、「設計値」では砂質土の粘着力を考慮していないため作用測圧が大きく、親杭の曲げモーメントを過大に算出していると考えられる。これに対して、「計測値」は、砂質土の見かけの粘着力を考慮した「計算値」の2倍程度の値となっている。この要因の1つとして、GL-13.5m 付近の硬質薄層による拘束の影響で親杭に大きな曲げモーメントが発生していることが推定できる。

7. まとめ

(1) 施工方法

中型三点式杭打機のリーダに CHV を取付けた機械を使用することで親杭を傾斜させて打設することができた。また、親杭の傾斜角の管理は2種類の方法を用いて、 10 ± 1 度という十分な施工精度を得られることを確認した。

(2) 設計手法

土留め壁の変位量・親杭の曲げモーメントのモードは「計測値」と「設計値」で同様の傾向を示したことから、斜め自立土留め壁の設計手法は適切であると考えられる。しかし、土留め壁の最大変位量や親杭の最大曲げモーメントの「計測値」は「設計値」に対して非常に小さいため、土質条件の設定等において安全側な設計となっていると言える。

今回の検討では、砂質土の見かけの粘着力を考慮することで土留め壁の変位量をより精度よく算定できることがわかった。土留め壁の挙動を精度よく算定することで、親杭長さの低減や親杭仕様のランクダウンなど、より経済的な斜め土留の設計が可能となると考えられることから、工事の安全性を確保できる合理的な設計手法の確立に努めたい。

参考文献

- 1) 貫井孝治, 坂平佳久, 今村正陽, 橋爪啓樹: 火力発電所取水管路設置における鋼矢板自立斜め土留工法の適用事例, 土木学会第66回年次学術講演会, 6-005, 2011.9
- 2) 道路土工仮設構造物工指針 (平成11年3月): (社) 日本道路協会
- 3) 道路土工擁壁工指針 (平成11年3月): (社) 日本道路協会
- 4) 山留め設計施工指針 (2002年2月): (社) 日本建築学会
- 5) 嶋田洋一, 松本伸, 高橋真一, 杉江茂彦: 自立土留めに働く砂地盤の土圧に関する遠心模型実験, 土木学会第65回年次学術講演会, 3-456, 2010.9