

「ハイスpekクネイリング工法」を用いた土留め工の開発

山本 彰 稲川 雄 宣
鳥井 原 誠

Development of Earth Retaining Wall using New High Standard Soil Nailing Method

Akira Yamamoto Yuusen Inagawa
Makoto Toriihara

Abstract

A soil nailing method is required for application to excavations in urban areas in narrow spaces. However, the pull-out resistance in soft clay is small. With the conventional soil nailing method as in timbering of earth retaining walls, deformation is larger than that for ground anchorage. Thus, the soil nailing method is rarely used for earth retaining walls. A new soil nailing method using bag objects has been developed for application to earth retaining walls. The pull-out resistance of this new soil nailing method is larger than that of the conventional soil nailing method. Furthermore, deformation of earth retaining walls can be reduced by pre-stressing.

概 要

ネイリング工法は施工機械が小さいため、都市部建設工事における低空頭な場所や狭隘な場所での施工に有効である。しかし、ネイリング工法は軟弱な粘性土地盤等において十分な引抜き抵抗力が得られず、土留め工に適用した場合には大きな変形を生じる可能性がある。このため、ネイリング工法の土留め工への適用実績は少ない。そこで、ネイリング工法の土留め工への適用を図るため、袋体を装着することによって引抜き抵抗力の増加を図るとともに、土留め工の変形を抑制するために緊張力を導入できるハイスpekクネイリング工法を開発した。

1. はじめに

都市部の建設工事では土地の有効活用を図るため、施工スペースや背面用地の狭い場所での施工、あるいは線路下のように低空頭下での土留め掘削を余儀なくされることが多い。狭隘な施工空間での掘削工事では、施工スペースの確保を図るとともに、小規模な施工機械の活用や背面用地に対する影響を少なくできる施工方法を選定することが工費縮減や工期短縮を図る上で重要となる。このような低空頭・狭隘な空間での施工、および背面への影響をできるだけ少なくする方法として、「ネイリング工法」を用いた土留め掘削が有効と考えられる。

ネイリング工法は、地山に鉄筋などの補強材を打設して切土法面や斜面の安定化を図る対策として広く用いられており、小規模な機械での施工が可能であるという利点を有している^{1,2)}。しかし、ネイリング工法は補強材長が短く、削孔径が小さいため、一般的に強度の低い地盤では大きな引抜き抵抗力が期待できないという欠点を有している。また、ネイリング工法は地盤や土留め工がある程度変形した段階で効果を発揮する待ち受け型の補強対策であることから、グラウンドアンカーに比べて土留め工の変形が大きくなる可能性が高く、都市部での土留め掘削工事に適用された事例は少ない³⁾。

そこで、都市部における掘削工事へのネイリング工法の適用を図るため、芯材に袋体（パッカー）を装着する

ことによって、引抜き抵抗力の増加を図るとともに、緊張力を導入できるハイスpekクネイリング工法（以下、本工法という。）を開発した。Fig.1に本工法を用いた土留め工（鉛直壁）の概要を示す。

本報告では、まず本工法の特徴について述べた後、開発の流れに沿って研究成果を記述する。まず、ネイリング工法の土留め工への適用性およびその変状形態を調べるために実施した遠心模型実験結果について述べる。次に、本工法を仮設土留め工に適用した際の計測結果について述べる。さらに、本工法の永久仕様の鉛直補強土壁

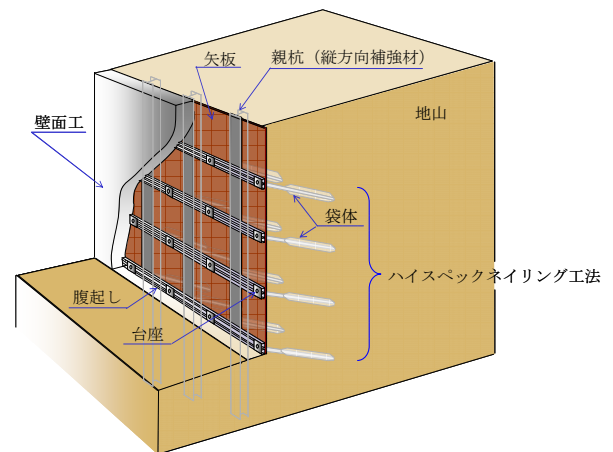


Fig. 1 ハイスpekクネイリング工法を用いた土留め工 Earth Retaining Wall with New Soil Nailing Method

への適用拡大，および開発した施工機械の低空頭・狭隘部での施工性確認を目的として実施した試験施工の結果について記述する。

2. ハイスペックネイリング工法の概要

(1) 工法の概要

Fig.2に本工法の概要を示す。本工法では芯材として専用の袋体を装着した棒状あるいはケーブル状の補強材を用いる。施工にあたっては、地山をφ115mmで削孔した穴に芯材を挿入した後、袋体にグラウトを0.5MPaで加圧注入する。

グラウトを袋体に加圧注入することによって、比較的強度の低い粘性土地盤では袋体の膨張による拡張の効果が期待できる。また、崖錐など削孔した穴の孔壁に凹凸がある場合にはその形状に応じて袋体が膨張変形し地山に密着することで、引抜き抵抗力の向上が期待できる。

Fig.3はN値3~4程度の関東ロームからなる地盤に打設した従来型のネイリング工法と本工法の引抜き試験結果を示しており、本工法は従来型のネイリング工法の約2.5倍以上の引抜き抵抗力が得られている。

(2) 工法の特徴

- ① 補強材長が短く、背面の用地の狭い場所での土留め掘削に有効である。
- ② 腹起しが小型・軽量となるため、人力による腹起こしの設置作業が可能になる。
- ③ 専用の袋体を使用することによって、引抜き抵抗力の増加を図ることができる。また、亀裂性岩盤や礫材であったとしても、グラウト材が逸脱しない。
- ④ 袋体を使用することにより、注入量、注入圧で品質管理が容易かつ確実なものとなる。
- ⑤ ネイリング工法であるが、緊張力を導入することが可能であり、土留め工の変形を抑制できる。

(3) 専用施工機械の特徴

Photo.1は、開発した専用の施工機械を示している。施工機械は、重量2.5ton、高さ1.31m、幅1.7m、長さ3.5mであり、施工上の特徴は以下の通りである。

- ① 高さ1.5m以下の空間での走行が可能であり、施工機械の搬入出および場内の移動が容易である。
- ② 使用する施工機械が軽量、小規模であるため、狭隘な空間での作業性に優れ、線路下などの低空頭空間でのネイリングの打設が可能である。

3. 遠心模型実験による検証

土留め工の控え材としてネイリング工法を用いた場合の変状形態、およびネイリングの効果を調べることを目的として遠心模型実験を実施した。

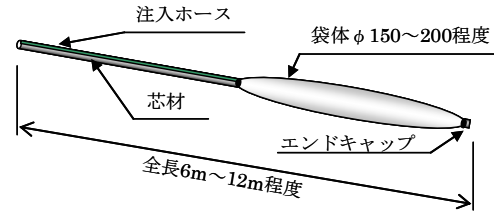


Fig. 2 ハイスペックネイリング工法の概要
Model of New Soil Nailing Method

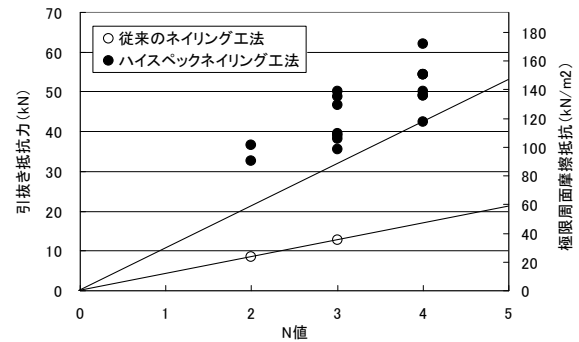


Fig. 3 引抜き試験結果 (粘性土)
Pull-out Test Results (Soft Clay)



Photo 1 ハイスペックネイリング工法専用の施工機械
Machine of New Soil Nailing Method

Table 1 遠心実験ケース
Specifications of Centrifuge Model Tests

実験ケース	対策工	施工状態
Case1	無対策時	完成時
Case2	ネイリングのみ設置	施工時
Case3	ネイリングのみ設置	完成時
Case4	ネイリングと親杭を設置	施工時
Case5	ネイリングと親杭を設置	完成時

3.1 実験方法

Table1は実験ケースを示しており、実験は無対策 (Case1)、ネイリングのみ配置した場合 (Case2, 3)、ネイリングと親杭を配置した場合 (Case4, 5)、および施工時と完成時を想定した場合の計5ケースについて実施した。完成時とはネイリングがすべて設置された状態であり、施工時とは最下段のネイリングを設置していない状態である。Fig.4に各実験ケースの断面図を示す。

実験に使用した地盤材料は山砂であり、土粒子密度2.663g/cm³、含水比12.6%、内部摩擦角35.6°、粘着力6.0kN/m²である。模型地盤は、土留め工前面に型枠を設

置し、含水比調整した材料を1層の締固め後の層厚が5cmとなるように投入して締固め、それを繰り返して模型上面まで盛り立てた。その後、斜面角度30°に掘削し、親杭を設置した後、整形し型枠を取り外す手順で作成した。模型は遠心加速度25Gにおいて実構造物の相似則を満足するように材料の寸法や剛性を決定している。ネイリングとしては長さ198mm、直径2mmのアルミ棒を、縦方向48mm、水平方向40mmのピッチで配置し、ネイリングの頭部は2.0mmのアルミ棒を2本配筋した10mm×10mmのモルタル製の梁で連結した。親杭としては直径5mm、肉厚0.5mmのアルミパイプを水平ピッチ40mmで配置した。

実験では1分間に1Gの割合で遠心加速度を概ね一定速度で増加させた。Fig.4に計測配置を示す。実験では、土留め工前面の水平変位、地表面の鉛直変位、ネイリングのひずみを計測した。

3.2 実験結果

3.2.1 変状形態 Fig.5にCase4とCase5の遠心模型実験結果を示す。この図から、Case4では遠心加速度の増加に伴って、水平変位は天端、中腹とも増加している。中腹の変位は崩壊に至るまで、天端のそれの1.5倍程度となっている。Case4では、このように土留め工が全体的に前面側に水平移動するとともに、天端に比べて中腹から下端部が大きく孕み出すように変形して最終的に崩壊に至る変状形態が見られた。Case1とCase2についても、Case4とほぼ同様な変状形態であった。

一方、Case5の天端と中腹の水平変位は遠心加速度の増加に伴って、大きくなっている。天端の変位は中腹のそれに比べて小さくなっているが、崩壊直前で中腹のそれに比べて急激に大きくなり、土留め工の下端部を中心に回転するような形態で崩壊した。Case5では、このように土留め工が全体的に水平移動するとともに、土留め工全体が転倒する変状形態が見られた。なお、Case3についても、Case5とほぼ同様な変状形態であった。

これらの中腹から下端部が孕み出す変状形態や転倒の変状形態は、1G場で実施した掘削を模擬した模型実験においても確認されている^{4),5)}。

これらの実験結果から、ネイリングを用いた土留め工は①中腹から下端部の孕み出し、②下端部を中心とする転倒、および③土留め工全体が水平移動する変状形態を示すと考えられる。Fig.6はこれらの変状形態を模式的に示したものである。

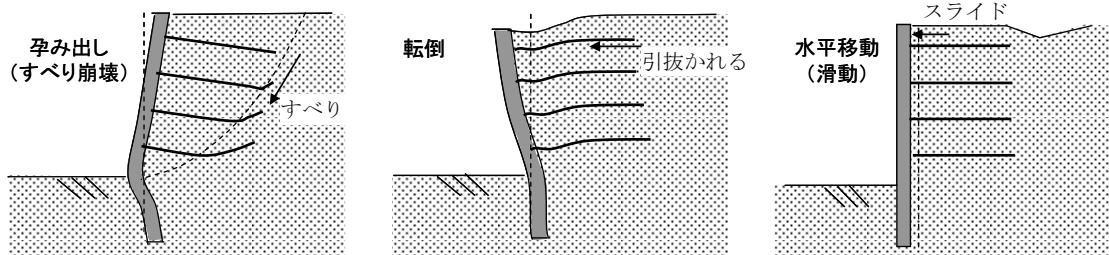


Fig. 6 ネイリングを土留めに適用した場合の変状形態
Collapse Form at Earth Retaining Wall with Nailing

3.2.2 ネイリングと親杭の効果 Fig.7は、Case5における実験中のネイリングの軸ひずみの経時変化を示している。この図から、ネイリングの軸ひずみはいずれも遠心加速度の増加に伴って徐々に増加し、60G付近で減少に至っている。特に、親杭近くの軸ひずみは遠心加速40Gを越えた時点で大きく増加する結果となっている。

Fig.8は10G、30G、50Gにおけるネイリングの軸ひずみ分布と親杭の曲げひずみ分布を示している。この図から、ネイリングの軸ひずみはいずれも親杭近くで最も大きくなる傾向を示しており、親杭に作用する力が確実にネイリングに伝達されていることが分かる。これらのネイリ

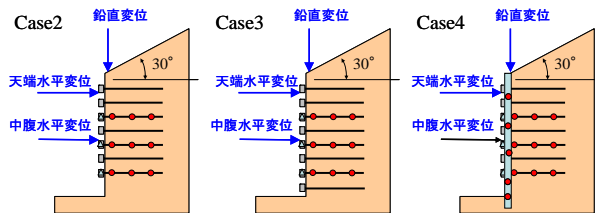
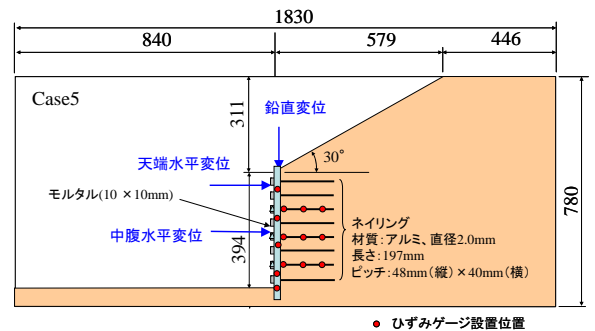


Fig. 4 各ケースの模型断面 (Case2~Case5)
Cross Section and Measure Position (Case2~Case5)

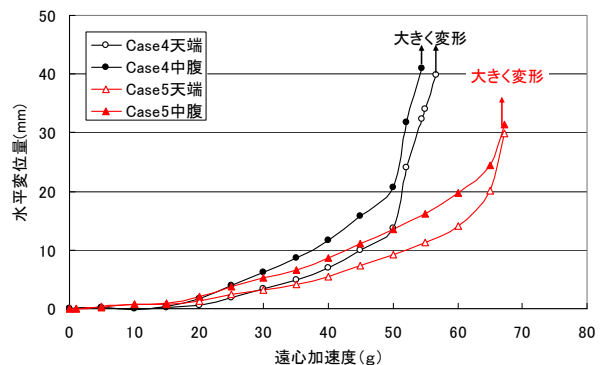


Fig. 5 変位計測結果 (Case4, Case5)
Horizontal Displacement of Earth Retaining Wall

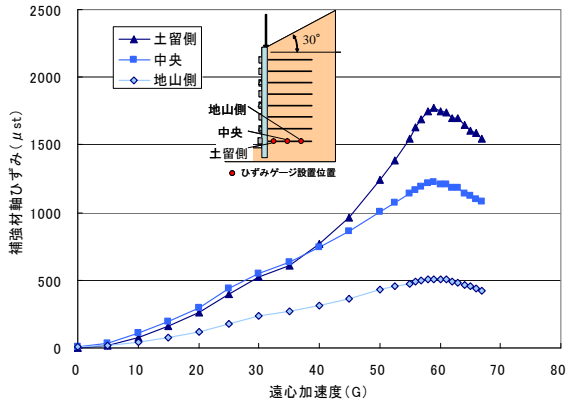


Fig. 7 ネイリングの軸ひずみの経時変化 (Case5)
Axial Strain of Soil Nailing during Model Test

ングの軸ひずみ分布は概ね日本道路公団の指針⁶⁾の法面工係数を1.0とした場合の軸力分布と整合している。一方、親杭の曲げひずみは床付け部分で大きく増加しており、親杭がすべりに対して有効に機能しているといえる。

3.2.3 設計の考え方 模型実験等で得られた変状形態から、ネイリングを用いた土留め工の設計では通常の土留め工としての安定性だけでなく、すべり変状に対する安定性についても検討する必要がある。また、すべりの安定検討に使用する法面工係数は1.0程度が妥当と判断される。さらに、親杭はすべり変状に有効に機能することから、すべり安定計算において親杭の抵抗を考慮することで、より経済的な設計が可能になると考えられる。

4. 実現場での施工事例と計測

4.1 工事の概要

Fig.9はハイスpekクネイリング工法を適用した土留め掘削断面を示している。掘削高さは最大5.6m程度である。盛土部のN値は5程度の粘土混じり砂質土、盛土の基盤はN値1程度の軟弱な粘性土層であり、その下にN値5~10の粘性土層が分布している。土留め工としては鋼矢板 (IV型) を使い、ネイリングは長さ10~11mの異型鉄筋 (D25) を水平ピッチ0.8mで4段打設しており、その仕様は3.2.3で述べた設計の考え方に基づいて決定した。

本工法を用いた土留め工の施工に当たっては頭部定着時に土留め工の変形の抑制を図るために、緊張力を導入した。施工時の計測は、芯材の軸力 (G21~G45)、ネイリング頭部に作用する荷重 (P2~P4)、頭部の水平変位 (H1)、軌道の鉛直変位 (V1) である。

4.2 計測結果

4.2.1 荷重と軸力の経時変化 Fig.10は施工時における2段目のネイリングの頭部作用荷重と軸力の経時変化を示しており、施工工程も併せて示している。この図から、ネイリングの軸力および荷重は掘削時に増加しており、軸力の増加は最大10kN程度となっている。一方、

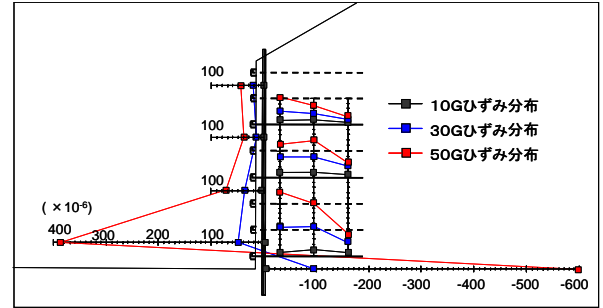


Fig. 8 親杭とネイリングのひずみ分布 (Case5)
Distribution of Strain on Pile and Soil Nailing

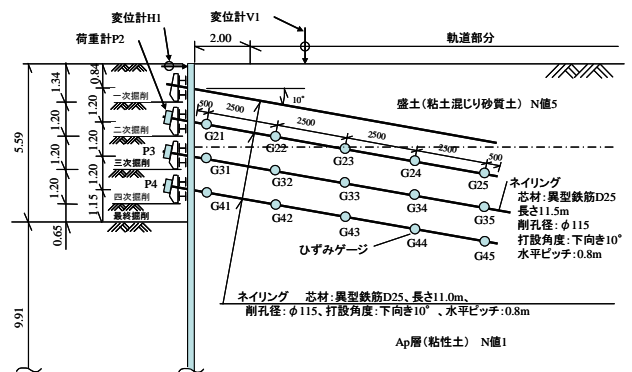


Fig. 9 断面及び計測位置図
Cross Section and Measures Position

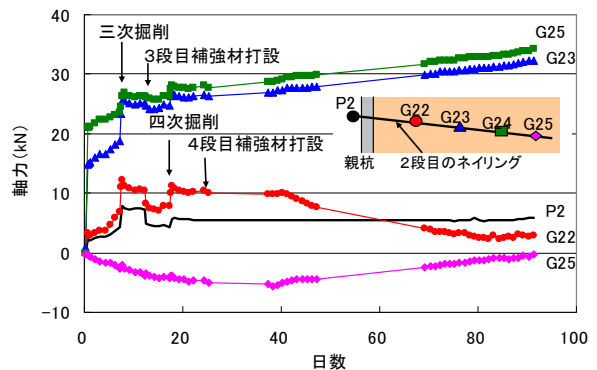


Fig. 10 ネイリングの軸力の経時変化図 (2段目)
Axial Force of Soil Nailing during Execution (No.2)

ネイリングには打設後に緊張力を導入したため、下段のネイリングを打設した際に軸力が低下する傾向を示している。また、電車の繰り返し荷重の作用等により、ネイリング中央付近での軸力が時間の経過と共に徐々に増加する傾向が見られるものの、ネイリング頭部の作用荷重と深部の軸力は一定値に漸近するか、減少する傾向を示している。特に、ネイリング頭部の作用荷重は打設直後にやや変化が見られるものの、経時的な変化はほとんど見られない。一方、ネイリング先端部のG25では圧縮力を生じているが、これはG25が電車荷重の作用する線路部を越えた位置に設置されているためである。

4.2.2 軸力分布図 Fig.11は軸力分布を示しており、2段目のネイリングでは5.5~8.0mの深い位置での軸力が

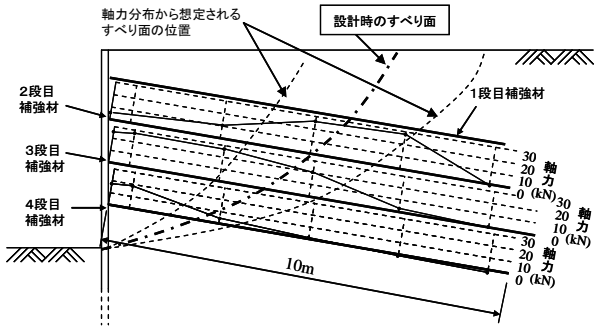


Fig. 11 ネイリングの軸力分布
Distribution of Axial Force of Soil Nailing

大きくなっている。一方、3段目と4段目のネイリングでは頭部に近い位置での軸力が大きくなっている。このように軸力の大きくなる位置はすべり面の生じる位置と概ね対応していると考えられる。そこで、図中には軸力分布から推定したすべり面の位置と設計時に想定したすべり面を併せて示しており、両者は概ね整合する結果となっている。

4.2.3 土留め工頭部の水平変位 Fig.12は掘削時における鋼矢板天端の水平変位の計測結果を示している。この図から、掘削期間中における水平変位の最大値は2mm程度となっており、当該工事における鋼矢板の変形に対する一次管理基準値(±6mm)よりも小さな値となっている。これらのことから、親杭の変形はネイリング工によって抑制されていることが分かる。また、ネイリングの荷重や軸力、および土留め工頭部の変位の掘削に伴う変化はいずれも小さく、これらの測結結果は整合するものとなっており、ネイリング工を適用した土留め工は安定した状態にあるといえる。

これらの結果から、3.2.3で述べた設計の考え方の妥当性は概ね検証できたと考えている。

5. 試験施工の実施

5.1 試験施工の目的

本工法の信頼性向上、適用展開を図るため試験施工を実施した。試験施工の目的は以下の通りである。

- ① 低土被り(地表面の被り厚1.7m)の地盤に打設した場合の地表面に与える影響調査
- ② ネイリング長が引抜き抵抗力に与える影響の調査
- ③ 専用施工機械の低空頭・狭隘部での施工性確認
- ④ 本設仕様の鉛直補強土壁の施工方法の確認

Fig.13に、本設仕様の鉛直補強土壁および低土被り厚下での本工法の施工断面を示す。Photo2に試験施工で構築した永久仕様の鉛直補強土壁を示す。

5.2 試験施工の結果

5.2.1 施工時の地表面への影響 Fig.14は、土被り厚1.7m下において本工法の施工を行った際の地表面での

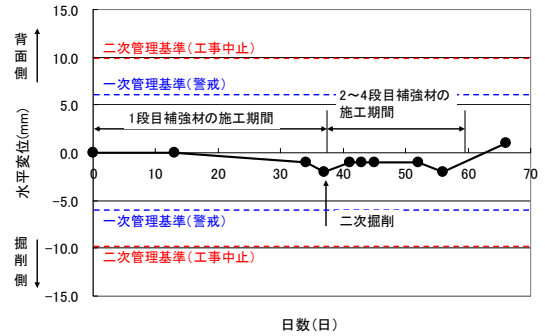


Fig. 12 鋼矢板天端水平変位の経時変化
Horizontal Displacement of Steel Sheet Pile

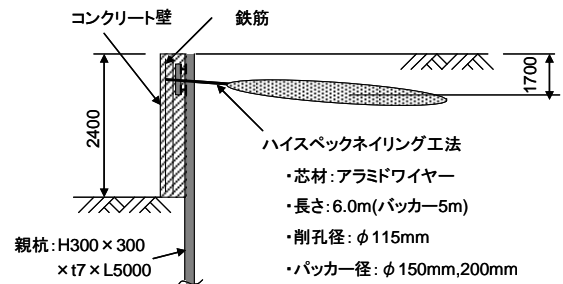


Fig. 13 永久仕様の鉛直補強土壁の断面図
Cross Section of Permanent Retaining Wall



Photo 2 永久仕様の鉛直補強土壁
Permanent Retaining Wall

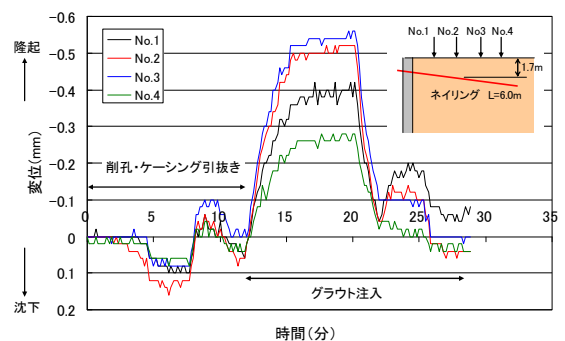


Fig. 14 施工時における地表面変位
Ground Surface Displacement during Execution

計測結果を示している。この図から、削孔時の沈下あるいは隆起は0.2mm以下であり、注入時に最大0.5~0.6mmの地表面隆起を生じているが、工事の対象構造物が道路や鉄道であることを考えると極めて小さい変形であると

いえる。

5.2.2 引抜き抵抗力と補強材長さの関係 Fig.15は、袋体長さと引抜き抵抗力の関係を示しており、図中には袋体径150mmと200mmのケースを併せて示している。この図から、引抜き抵抗力は袋体長に比例して大きくなっており、グラウンドアンカーに見られるような長さによる影響は認められない。また、袋体の径を大きくすると引抜き抵抗力が増加しており、袋体を設置した場合の引抜き抵抗力は概ね袋体の表面積（周長）に比例する結果となっている。

5.2.3 低空頭・狭隘部での施工性確認 Fig.16, Photo3に専用施工機械の施工性を確認するために実施した試験ヤードの断面図および試験状況を示す。施工性の確認は、芯材として異形鉄筋、PC鋼線、アラミドワイヤーを用いるとともに、最大削孔長さ10mについて実施した。施工機械の低空頭・狭隘空間での走行実験、およびネイリング工の施工実験の結果、開発した施工機械は低空頭・狭隘空間においても十分な走行性、施工性を有していることが確認できた。

6. まとめ

本報告ではネイリング工法を用いた土留め工の遠心模型実験、ハイスベックネイリング工法を用いた土留め工の実現場での計測結果および試験施工の結果について述べた。得られた結論は以下の通りである。

- (1)ネイリング工法を用いた土留め工は①中腹から下端部の孕み出し、②下端部を中心とする転倒、および③鉛直法面全体が水平移動する変状形態を示す。
- (2)ネイリングを用いた土留め工の設計では通常の土留め工としての安定性だけでなく、すべり変状に対する安定性についても検討する必要がある。すべりの検討に用いる法面工係数は1.0程度が妥当である。
- (3)袋体を設置した場合の引抜き抵抗力は、概ね袋体の長さおよび表面積に比例する。
- (4)実工事の計測によって、本工法を用い緊張力を導入することによって土留工の変形は抑制でき、安全に施工できることが確認できた。
- (5)本工法施工時の地表面への影響は低土被り厚下においても極めて小さいことが、実施工および試験施工によって確認できた。
- (6)試験施工によって、開発した施工機械の低空頭・狭隘空間での走行性と施工性が確認できた。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路土工のり面工・斜面安定工指針，(2001)
- 2) Scientific Committee of the French National

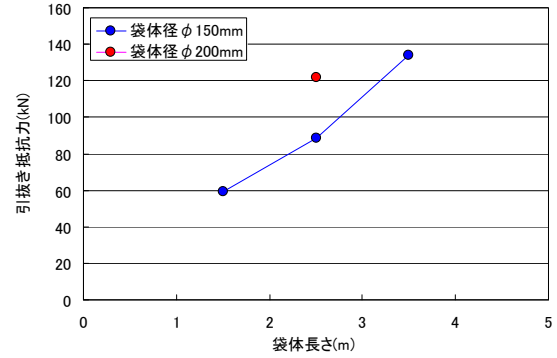


Fig. 15 袋体長さと引抜き抵抗力の関係
Pull-out Test Results of New Soil Nailing

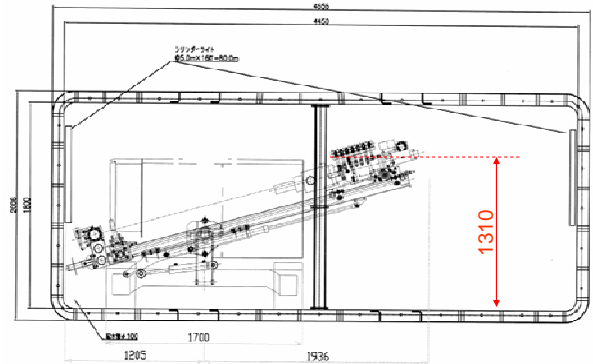


Fig. 16 施工性確認実験ヤードの断面
Cross Section of Site of Field Test



Photo 3 施工性確認試験の状況（高さ1.7m）
Field Test of Development Machine

Project COLOURTERRE: Soil Nailing
Recommendations-1991

- 3) 山本彰・稲川雄宣・諸岡洋一・浜谷邦久・鈴木孝之：鉄道盛土の土留め掘削工事へのネイリング工法の適用事例，土木学会第61回年次学術講演会，Ⅲ，pp. 95-96，(2005)
- 4) 鳥井原誠・山本彰・平間邦興：鉄筋挿入工法における配置パターンの影響について，土木学会第45回年次学術講演会，Ⅲ，pp. 368-367，(1900)
- 5) 鳥井原誠・山本彰・平間邦興：鉄筋挿入工法における配置パターンの影響について，土木学会第45回年次学術講演会，Ⅲ，pp. 738-739，(1901)
- 6) 日本道路公団：切土補強土工法設計・施工指針，(2002)