

太径ハイスペックネイリング®工法の開発

稲川 雄 宣 山 本 彰

Development of New Soil Nailing Method “Large Diameter High Spec Nailing®”

Yusen Inagawa Akira Yamamoto

Abstract

Soil nailing is used as a reinforcement measure for railway and highway embankments against earthquakes. There is currently a need for a soil nailing technology that can be used for low-strength and gravel ground. Therefore, the new soil nailing method "Large Diameter High Spec Nailing" was developed. It can provide large pull-out resistances for these ground conditions and can be constructed as a compact machine. This paper describes the results of field tests conducted to confirm the performance of this technology. The results of a finite element method analysis are also reported to clarify the mechanism of the pressure transmission and the ground displacement by the high-pressure grouting.

概 要

地山補強土工法は、鉄道盛土や道路盛土の耐震補強対策等として採用されるようになってきており、比較的強度の低い地盤やグラウトが逸脱しやすい礫地盤において適用できる技術が求められている。そこで、これらの地盤条件下においても確実に大きな引抜き抵抗力が得られ、施工機械もコンパクトな「太径ハイスペックネイリング 工法（本工法）」を開発した。本論文では本工法の機能を検証するため実施した各種実験結果、グラウトの加圧注入時における圧力伝達や地盤変位の発生メカニズムを明らかにするため実施したFEM解析結果について報告する。

1. はじめに

我が国では1980年以降、主に切土法面の補強対策として複数の地山補強土工法が開発され道路や鉄道を中心に広く実用されてきた^{1), 2)}。近年、小規模な機械での施工が可能であるという利点から、地山補強土工は既設盛土の補強、土留め工の控え工、石積み等擁壁の補強など適用範囲は多岐にわたってきている。特に、既設盛土の耐震性向上を目的とした事例が増えてきている。しかし、地震時の検討を行った場合、盛土等強度の低い地盤では大きな引抜き抵抗力が得られないため補強材が長尺になる傾向がある。また、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が多い。

そこで、筆者らは小規模な機械での施工が可能で、強度の低い地盤においても大きな引抜き抵抗力を確保できる地山補強土工法（ネイリング工法）として「ハイスペックネイリング工法」を開発した³⁾。この工法は芯材に装着した袋材にグラウトを加圧注入することによって補強体（パッカー部）径を直径 150mm に膨張させることで、一般的なネイリング工法に比べて2倍以上の引抜き抵抗力を得られるため、補強材を短くすることが可能となる。ハイスペックネイリング工法は強度の低い地盤での有効性が認められ、既に鉄道を中心に盛土の補強対策⁴⁾、土留め工の控え工として広く適用されている（Fig. 1）^{5), 6)}。

しかし、設計時の地震力の増加や都市部での限られた敷地内での補強対策等での適用に当たって、補強材長を

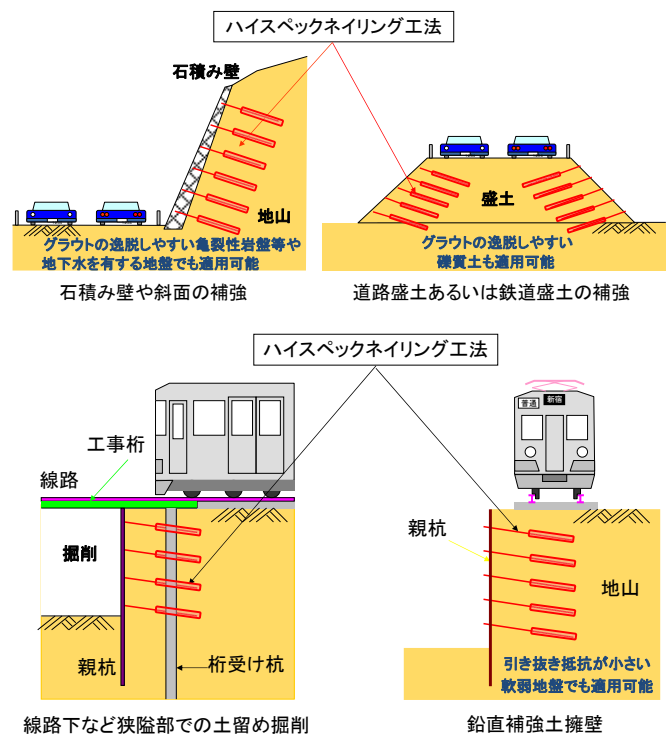


Fig. 1 ハイスペックネイリング工法の適用例
Application of “High Spec Nailing”

抑えながらより引抜抵抗力が確保できる地山補強土工法の開発が望まれるようになってきている。そこで、従来のハイスペックネイリング工法よりもさらに引抜き抵抗力を増大させるため、「太径ハイスペックネイリング工法」を新たに開発した(Fig. 2)。本工法では従来のハイスペックネイリング工法の補強体径が150mmであるのに対して、補強体径を300mmまで拡張できる。本論文では本工法の開発に当たって、その性能を確認するために実施した各種実験結果、およびグラウトの加圧注入時における圧力伝達や地盤変位の発生メカニズムを明らかにするため実施したFEM解析結果について報告する。以下、一般的なネイリング工法を「ネイリング工法」、従来のハイスペックネイリング工法を「従来工法」、太径ハイスペックネイリング工法を「本工法」という。

2. 工法概要と開発内容

ハイスペックネイリング工法の特徴は以下の通りである。

- 1) 施工機械が小型、軽量であり、施工機械の搬入出および場内の移動が容易である (Photo 1)。
- 2) 施工機械が小型であるため、仮設土留めでは1.5mの自立掘削断面内での施工が可能であり、鉄道路線下など狭隘な場所での施工性に優れている。
- 3) 自由長が不要であり、補強材長はグラウンドアンカーよりも全長が短くなる。
- 4) 専用の袋材を使用することにより引抜抵抗力の増加が図れる。また、定着層が亀裂性岩盤や礫質土であっても、グラウト材は逸脱しない。
- 5) 地山補強土工法であるが緊張力を導入することができるため、土留め工の変形を抑制できる。

今回新しく開発した太径ハイスペックネイリングは従来の袋材径150mmを、200mm～300mmに拡張したものであり (Photo 2)、地盤との付着面積を増大させることにより、1本当たりの抵抗力の増加を図る。新たに開発した点は以下の通りである。

- 1) 袋材に高強度繊維を用いることにより、高い注入圧に耐えられる構造とした。従来工法のグラウトの注入圧は0.5MPaであるのに対して、本工法のそれは最大1.5MPaである。
- 2) 地盤内で均等に袋材が拡張する専用のグラウト材を開発した。
- 3) 袋材と芯材との固定部についても高い注入圧に耐えられる構造とした。

3. グラウト圧の伝達性能確認試験

本工法の特徴は、地盤を直径115mmで削孔し、芯材に装着した袋材にグラウトを圧力1.0～1.5MPaで加圧注入して直径200～300mmの補強体を造成することにある。このため、袋材に注入したグラウトの圧力が地

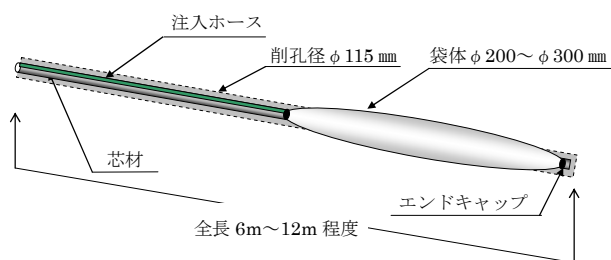


Fig. 2 太径ハイスペックネイリング工法の概念図
Concept of “Large Diameter High Spec Nailing”



Photo 1 ハイスペックネイリング工法専用機械 (h=1.1m)
Machine of “High Spec Nailing”

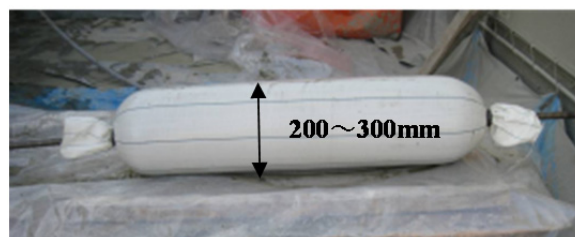


Photo 2 太径ハイスペックネイリングの補強体
Reinforcement body of
“Large Diameter High Spec Nailing”

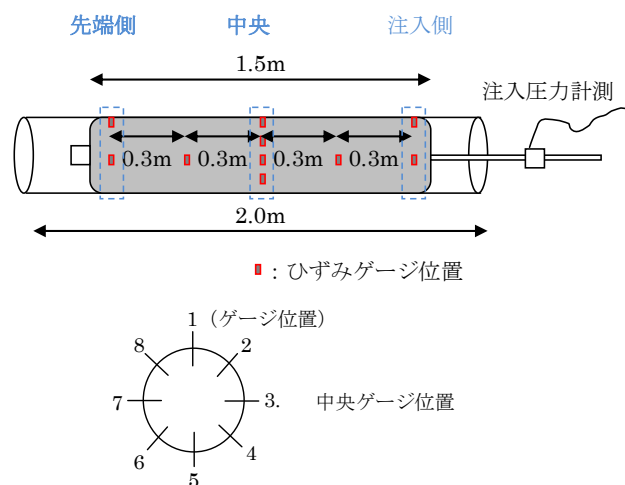


Fig. 3 グラウト圧の伝達確認試験の概要
Concept of Pucker Injection Test

盤を押し広げる方向に確実に圧力伝達されることが重要となる。そこで、袋材に注入されたグラウトの地盤への圧力伝達を確認するための注入実験を行った。

3.1 実験方法

実験では、地盤中に削孔した孔を模擬した全長2.0m、直径φ200mmアルミ管にひずみゲージを設置し、その中に1.5mの袋材付補強材を設置して、袋材内にグラウトを加圧注入する。ひずみ計測結果からアルミ管に作用する圧力(内圧)を算定するとともに、その分布状況を確認する。Fig. 3に実験の概要を示す。

Photo 3に実験状況を示す。実験は注入圧を段階的に作用させ、アルミ管周囲に設置したひずみゲージを計測する。ひずみゲージの値より孔壁にかかる圧力を算定し、注入圧と比較することにより、グラウト圧の周辺地盤への圧力伝達性能として評価する。

3.2 実験結果

Fig. 4に、実験で得られた各注入圧段階でのアルミ管中央における作用圧力分布を示す。0.8MPaまではほぼ均等に圧力が作用しているが、1.0MPaから徐々にひずみゲージの設置位置によって圧力差が生じ始め、1.5MPaでは圧力分布が大きくばらついている。これは、ハイスベックネイリング工法で使用している袋材は所定の圧力(本工法では1.5MPa、従来工法では0.5MPa)に近づくと袋材からグラウトに含まれる水が脱水するようになっており、1.5MPaでは脱水により袋材周面内側に脱水ケーキ層が出来始め、アルミ管への圧力が均等に伝わりにくくなったものと推察される。

Fig. 5に補強材長方向の圧力伝達率(ひずみゲージから算定した作用圧力/注入圧)を示す。圧力伝達率は注入圧の段階や補強材長方向の位置でやや異なるが、概ね70~90%(平均80%)程度となっている。

これらの結果から、今回開発した太径ハイスベックネイリングは袋材へのグラウト注入圧力1.0MPaまではある程度均等に周辺地盤に圧力伝達しており、80%程度の圧力で周辺地盤を押し広げる性能を有していると判断される。また、芯材に装着した袋材にグラウトを加圧注入することで太径の補強体を造成できる。

4. 盛土地盤での検証実験

4.1 実験方法

地盤中に補強材を設置し、袋材内にグラウト注入を行って、補強体の出来形確認実験を実施した。実験手順をFig. 6に示す。

埋戻しには山砂を用いた。埋戻しに当たってはケーシングを模擬した直径110mmの塩ビパイプに補強材を入れて地盤中に設置し、土被りが1.2mになるように4層に分けて転圧、埋戻しを行った。その後、埋戻し天端にレッカー検定用ウェイトを載せて異なる土被りを模擬した

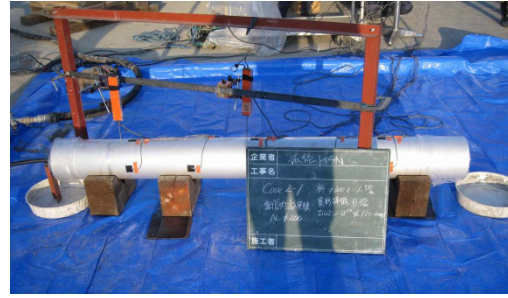


Photo 3 実験状況
View of Injection Test

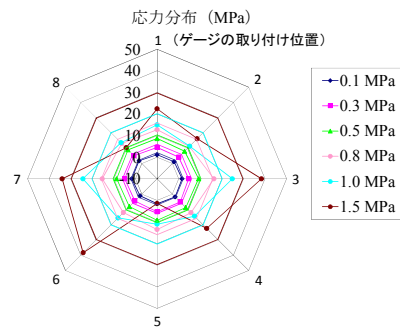


Fig. 4 アルミ管の作用圧力分布(中央)
Internal Pressure of the Aluminum Pipe (at center)

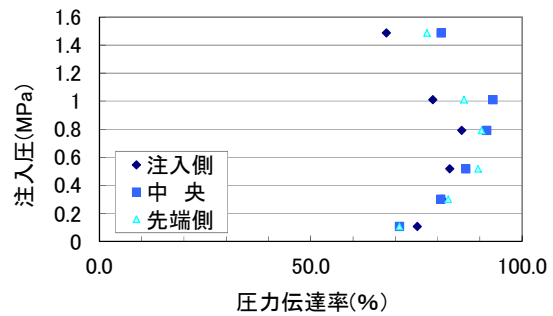


Fig. 5 孔壁への圧力伝達率
Relationship between Grout Pressure and Pressure Ratio

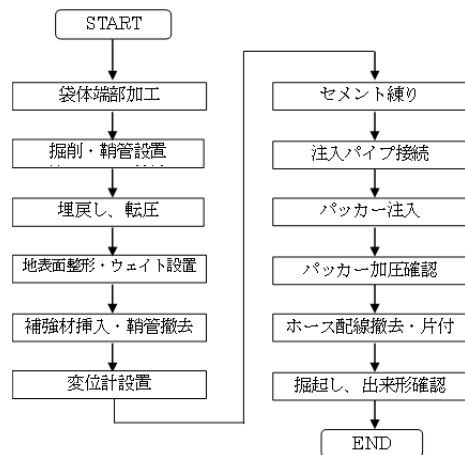


Fig. 6 地中注入実験手順
Process of the Field Test

(Photo 4)。最後に、塩ビパイプを撤去し、袋材にグラウトを加圧注入した。グラウトの注入圧は段階的に増加させ、最大1.0MPaまで加圧した。また、载荷したウェイトは50kN、100kN、200kN、300kNであり、これらのウェイトは土の単位体積重量を18kN/m³とし、载荷面積を考慮すると土被り厚1.0m、2.0m、4.0m、6.0m（初期の土被りを考慮すると、2.2m、3.2m、5.2m、7.2m）に相当する。実験では地表面の隆起量、グラウト注入圧、および試験後に試掘して補強体の出来形計測を行った。なお、盛土作成後に簡易貫入試験を実施し、すべてのケースにおいて概ねN値5程度の地盤に仕上がっていることを確認している。



Photo 4 実験状況
View of Field Test

4.2 実験結果

Table 1に土被りを変化させた場合の補強体の出来形径、隆起が発生した時のグラウト注入圧（隆起発生注入圧）および最大隆起量を示す。なお、土被り2.2m～7.2mのケースはウェイトの天端を計測しているため、局所的な隆起量でなく平均的な値となっている。

Table 2から、補強体径はすべてのケースで計画の補強体径300mmを越えており、所定の補強体を造成できることが確認できた。Photo 5は、試験後の試掘の状況を示しており、全長にわたって均等に補強体が造成出来ていることが分かる。隆起が発生した時のグラウト注入圧は土被り圧の概ね7～10倍となっている。したがって、比較的強度の低い地盤であれば土被り圧の7～10倍のグラウト圧を与えることにより、地盤を押し上げることで所定の補強体径を得られると想定される。また、ウェイトで土被りを模擬した今回の実験では、隆起に抵抗する地盤のせん断面積が常に一定であることから、隆起は発生しやすい条件であったといえる。隆起量については土被り1.2mで110mmとなっているが、土被りが大きくなると隆起量は小さくなり、土被り2.2mで30mm、3.2m以上では10mm以下となっている。

Table 1 実験ケースおよび実験結果
Experimental Cases and Experimental Results

土被り厚	出来形袋体径	隆起発生時の注入圧 (最大隆起量)
土被り1.2m	322.3mm	0.2～0.3MPa (110mm)
土被り2.2m	321.6mm	0.3～0.4MPa (30mm)
土被り3.2m	321.0mm	0.4～0.6MPa (10mm)
土被り5.2m	321.3mm	0.5～0.7MPa (8mm)
土被り7.2m	319.0mm	0.5～1.0MPa (10mm)



Photo 5 出来形確認
View of the Specimen after Test

以上の実験により本工法ではN値5程度の盛土地盤中においての所定の補強体を造成できることを確認できた。なお、拡径に伴う地盤の隆起については、2.0m以下の低土被りにおいて地表面に変状を生じる可能性がある。

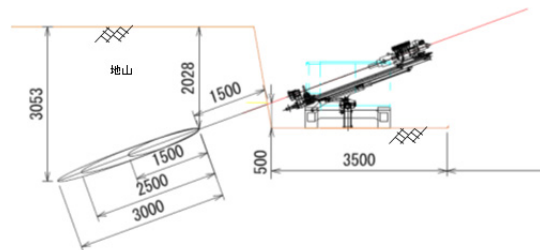


Fig. 7 施工断面
Executing Section

5. 自然地山での試験施工

5.1 試験施工の概要

専用の削孔機械を用いて、試験施工を行うとともに、引抜き試験および出来形確認を行った。対象地盤はN値3～4程度の関東ローム層である。Fig. 7に試験施工の施工断面を示す。また、Photo 6に試験施工状況を示す。実験ケースは補強体径φ150mmで補強体長さ1.5、3.0mの従来工法、φ300mmで補強体長さ1.5、3.0mの本工法、および比較のため実施したφ130mmの一般的なネイリング工法である。定着部の土被りは2.0m～3.0m程度である。グラウト注入圧はφ150mmについては従来工法と同様0.5MP



Photo 6 試験施工状況
View of Executing of High Spec Nailing

a, $\phi 300\text{mm}$ については本工法で採用している1.5MPaとした。また、ネーリング工法のグラウトは無加圧で注入した。Table 2に試験施工の実験ケースを示す。

5.2 試験施工の結果

Table 2に実験結果を合わせて示している。従来工法で施工したCase4では出来形がやや小さめとなっているが、それ以外は計画以上の径を確保することができた。Case 4の出来形が小さくなった理由は、芯材兼注入パイプとして用いた中空ボルトの終端部の注入穴が空いていなかったためである。その結果、Case4の補強体終端部分の膨らみが小さく平均径が小さくなった。このことから、本工法ではグラウトの注入パイプの穴の位置が非常に重要であると言える。

注入時の隆起量についてはCase6が最も大きく4.5mmとなっている。また、それ以外は1.0mm以内に収まっており、変位量が非常に小さい。なお、Case6のみ地表面変位が大きくなった理由は不明である。

ネーリング工法の単位長さ当たりの引抜き抵抗力に対して、従来工法のそれは5.5~7.4倍、本工法のそれは9.3~10.4倍の引抜き抵抗力が得られている。一方、ネーリング工法の補強体径に対して、従来工法のそれは1.15倍、本工法のそれは2.5倍である。したがって、ハイスベックネーリング工法では、一般的なネーリング工法に比べて補強体径の寸法効果以上に大きな引抜き抵抗力の増加効果を有していると言える。

Fig. 8は補強体径と単位長さ当たりの引抜き抵抗力の関係を示しており、本工法はネーリング工法の4倍程度の引抜き抵抗力の性能を有していることが分かる。また、定着体径と引抜き抵抗力は比例関係にあり、本工法 ($\phi 300\text{mm}$) は従来工法の2倍弱の引抜き抵抗力を有していると言える。

Fig. 9にN値と単位長さ当たりの引抜き抵抗の関係(粘性土)³⁾に今回の検証実験および現場での引抜き試験結果を追記した関係図を示す。ネーリング工法と比較して、従来工法は2.5倍、本工法は5倍以上の引抜き抵抗力を有しており、本工法の引抜き抵抗力は従来工法のそれに比べて2倍以上の引抜き抵抗力を有する結果となっている。

以上の結果から、一般的なネーリング工法に比べ、従来のハイスベックネーリング工法では2倍以上の引抜き抵抗力を、大径ハイスベックネーリング工法では4倍以上の引抜き抵抗力を発揮できると言える。また、ハイスベックネーリング工法では補強体径に比例した引抜き抵抗力の増加が得られると言える。

6. FEM解析による検証

6.1 解析方法

本工法におけるグラウト加圧注入時における地盤への圧力伝達、地盤中や地表面の変状メカニズムを把握するため、5. で述べた検証実験Case5~7を対象として、FEM

Table 2 実験ケースおよび実験結果
Experimental Cases and Experimental Results

ケース名	仕様	最大荷重 (kN)	袋体径 (mm)	長さ (m)	単位長さ当たりの引抜き抵抗力(kN)	最大隆起量 (mm)
case1	一般的なネーリング	13	122	1.5	8.7	
case2	一般的なネーリング	33	141.5	3	11.0	
case3	従来のハイスベックネーリング	109.5	162.25	1.5	73.0	0.1
case4	従来のハイスベックネーリング	164	139.4	3	54.7	0.1
case5	大径ハイスベックネーリング	154.5	320.5	1.5	103.0	0.8
case6	大径ハイスベックネーリング	275.5	336.5	3	91.8	4.5
case7	大径ハイスベックネーリング	251.5	336.6	2.5	100.6	0.5

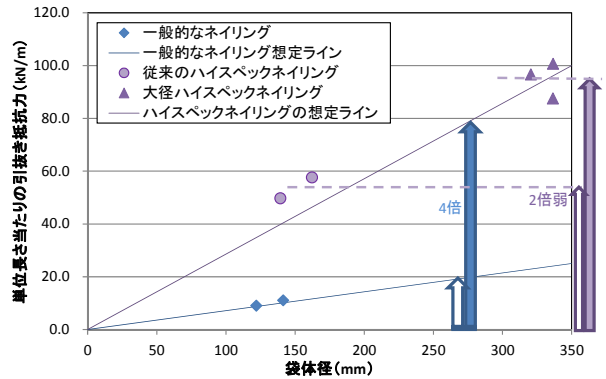


Fig. 8 袋体径と引抜き抵抗力の関係
Relationship Reinforcement Diameter and the Pull-Out Resistance

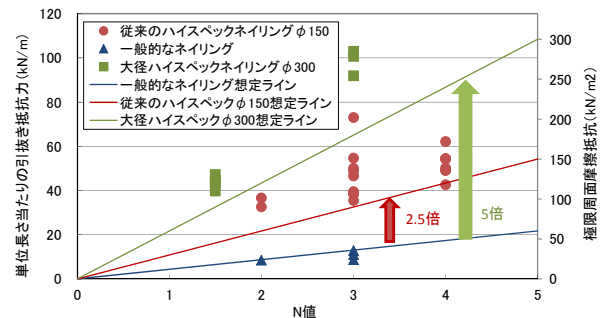


Fig. 9 引抜き抵抗力とN値の関係(粘性土)
Relationship the Pull-Out Resistance and N Value (Soft Clay)

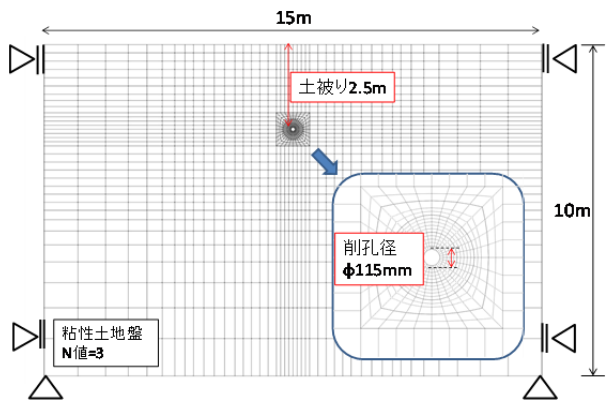


Fig. 10 FEMメッシュ
FEM Mesh

解析を実施した。Fig. 10に解析モデル、Table 3に解析に使用するパラメータを示す。地盤定数はN値から下記の式を用いてVsを求め、Vsよりせん断剛性 G_{ps} 、変形係数 E_{ps} を求めた。

$$V_s \text{ (m/s)} = 91 \times N^{0.337} \quad (\text{今井・殿内の式}) \quad (1)$$

$$G_{ps} = V_s^2 \times \gamma_t / g \rightarrow E_{ps} = 2G_{ps} (1 + \nu) \quad (2)$$

また、地盤モデルは地盤のひずみレベルに応じた変形係数の低減を考慮したG- γ モデル (Fig. 11) を用いた。解析は地盤中に空けた穴の孔壁から段階的に内圧 (地盤への伝達圧力) をかけ、地盤応力および地表面変位を調べた。なお、内圧は3. のグラウト圧の伝達性能確認試験結果を踏まえ注入圧の80%としている。

6.2 解析結果

3. の検証結果からグラウト注入圧の約80%が地盤を押し拡げる伝達圧力として孔壁に作用すると考えられることから、Fig. 12に削孔を模擬した空洞部に内圧1.2MPa (最大グラウト注入圧1.5MPaの80%) を作用させたときの地盤変位分布図を示す。この図から、地盤変位20mmの範囲は、深部方向に比べ浅部方向に1.5倍程度広がっており、地盤変位は地表面方向にやや大きくなる傾向を示している。なお、最大変位は空洞部で半径方向に120mm生じており、空洞部は初期の直径が115mmであったものが350mmに拡大したことになる。試験施工ではグラウト注入時の本工法の補強体径は330mmであり、解析結果は概ね整合する結果となっている。

Fig. 13は各内圧段階での地表面変位分布を示す。地表面隆起量は内圧に伴って、増加する結果となっている。また、最大隆起量は5.7mmとなっており、実験結果の最大値4.5mmと整合する結果となっており、本解析は6. 試験施工の結果と整合している。地表面変位が1mmを超える範囲は、補強材の打設位置から2m程度である。

Fig. 14に、内圧 (補強体から地盤への伝達圧力) 1.2MPa時における地盤中の応力分布を示しており、圧力伝達は概ね同心円状に均等に広がっている。また、Fig. 15に各内圧における孔壁面からの圧力分布を示す。注入圧の地盤への伝達圧力は孔壁から離れるに従って急激に小さくなっている。孔壁から100mm程度で地盤内の半径方向の応力伝達は0.15MPaとなっており、注入圧の10%程度となっている。これらのことから、拡径による周辺地盤が圧縮あるいは圧密されて袋材付近の地盤剛性が増加し、引抜き抵抗力の増大に寄与していると思われる。

以上の結果から、本工法ではグラウトの加圧注入に伴って全周方向に拡大するものの、地盤を持ち上げる方向にやや拡大する傾向があると想定される。また、グラウト注入圧の80%程度が地盤を押し拡げる方向に伝達され、圧力は地盤中に同心円状に均等に伝達される。

Table 3 入力定数
Input Parameter

層	N値	単位体積重量	変形係数	ポアソン比
		γ_t (kN/m ³)	E_{ps} (kN/m ²)	ν
粘性土地盤	3	16.0	82215.63	0.45

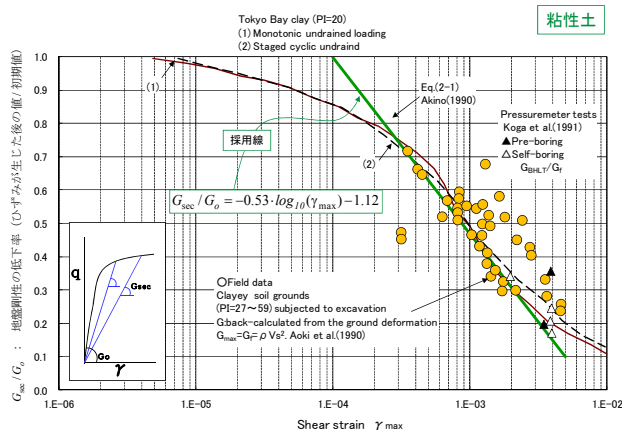


Fig. 11 G- γ モデル (採用線: 緑)
Coefficient of G- γ Model

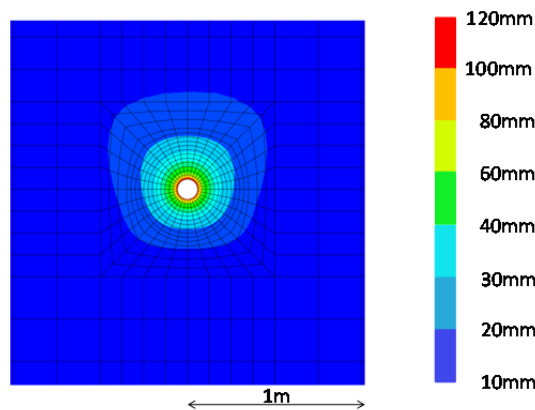


Fig. 12 変位分布図 (内圧1.2MPa)
Displaced Distribution (1.2MPa)

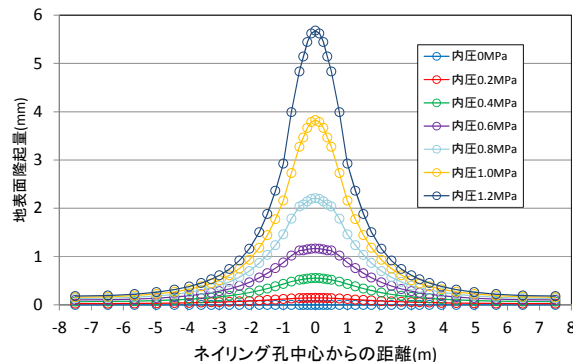


Fig. 13 各内圧と地表面変位分布
Displacement Distribution on Ground Surface

7. まとめ

従来のハイスpekクネイリング工法に比べて、大きな引抜き抵抗力が期待できる太径ハイスpekクネイリングを開発した。本論文ではその性能を確認するため実施した各種検証実験結果について述べた。

以下に検証実験により得られた知見を列挙する。

- 1) ハイスpekクネイリングは袋材へのグラウト注入圧力1.0MPaまではある程度均等に周辺地盤に伝達されており、注入圧の80%程度の圧力で周辺地盤を押し広げる性能を有していると判断される。また、比較的強度の低い地盤であれば、土被り圧の7~10倍のグラウト圧を与えれば所定の補強体径を構築できる。
- 2) 緩い盛土地盤においては、グラウト注入圧1.0MPaで所定の補強体（直径300mm）を造成できることを確認できた。また、自然地盤の関東ロームにおいては、グラウト注入圧1.5MPaで所定の補強体（直径300mm）を造成できることを確認できた。ただし、拡径に伴う地盤の隆起については、2.0m以下の低土被りでは地表面に変状を生じる可能性がある。
- 3) 一般的なネイリング工法（直径130mm）の引抜き抵抗力に対して、従来のハイスpekクネイリング工法のそれは2倍、太径ハイスpekクネイリング工法のそれは4倍以上確保できる。一方、ネイリング工法の補強体径に対して、従来工法のそれは1.15倍、本工法のそれは2.5倍である。このことから、ハイスpekクネイリング工法は一般的なネイリング工法に比べて、補強体径の寸法効果以上の引抜き抵抗力の増加効果を有している。
- 4) 太径ハイスpekクネイリング工法（φ300mm）の引抜き抵抗力は従来のハイスpekクネイリング工法（φ150mm）のそれに比べて2倍程度の引抜き抵抗力を有している。したがって、ハイスpekクネイリング工法の引抜き抵抗力は補強体径に比例する。
- 5) 実験を模擬したFEM解析結果より、太径ハイスpekクネイリング工法のグラウト加圧注入時における地盤への圧力伝達、地盤中や地表面の変状傾向を明らかにすることができた。

謝辞

本開発において、三信建設工業株式会社、大阪防水建

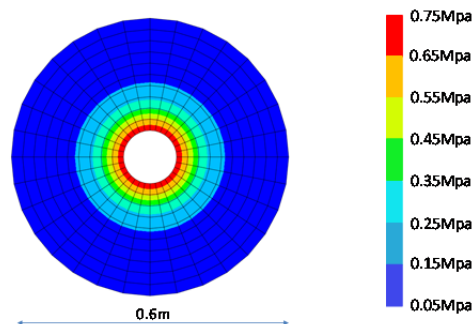


Fig. 14 半径方向の応力 σ_r 分布図（内圧1.2MPa）
Stress Distribution around the Reinforcement Material

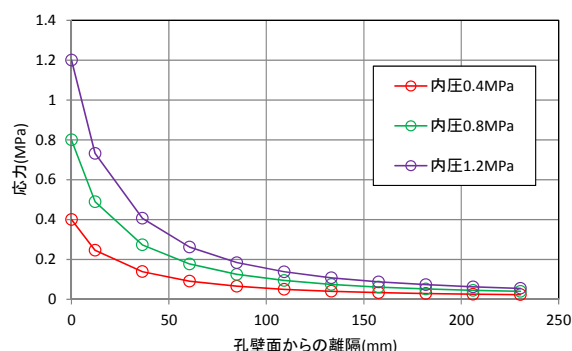


Fig. 15 各内圧での地盤への圧力の伝達分布図
Stress Distribution in the Ground

設社、守谷鋼機株式会社、芦森工業株式会社、岡部株式会社のご協力を得たことに感謝いたします。

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) 地盤工学会：地山補強土工法シンポジウム発表論文集，1993
- 3) 山本彰，他：ハイスpekクネイリング工法を用いた土留め工の開発；大林組技術研究所報，No.71，2007
- 4) 木俣浩孝，他：鉄道盛土におけるハイスpekクネイリング工法の適用について，土木学会第65回年次学術講演会，VI，pp.663-664，2010
- 5) 山本彰，他：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
- 6) 山本彰，他：ネイリングを用いた土留めの施工事例，第45回地盤工学会研究発表会発表講演集，pp.1391-1392，2010