矢板による地盤の変位抑制効果 ーモデル実験と数値解析による検討ー

磯部 有作¹, Hossain Md. Shahin², 中井 照夫³, 酒井 亮佑⁴, 吉田 泰規⁵

1 名古屋工業大学大学院・創成シミュレーション工学専攻博士後期課程, 地層科学研究所

2 名古屋工業大学大学院・創成シミュレーション工学専攻准教授

3 地域地盤環境研究所, 中部大学

4 中部国際空港株式会社

5 中日本高速道路株式会社

概 要

盛土や構造物構築時および構築後地震などの繰返しせん断変形を受けた基礎地盤の沈下および側方変位抑制工法のモデル実験と数値解析を行った。検討した工法は矢板を側方に挿入するもので、矢板だけの場合、矢板とタイロッドを組み合わせ場合、矢板とネイリングを組み合わせた場合の3種類である。これらの工法について、経済性を含めた最適な矢板の剛性・長さはもとより、タイロッドやネイリングとの組み合わせ効果について、実験・解析の両面から検討した。モデル実験はアルミ棒積層体を地盤材料として実施し、有限要素解析は構成式として subloading t_{ij} model を用いて実施した。荷重条件は、上載荷重として鉛直荷重を連続的に大きくする単調荷重と、一定の上載荷重を受ける地盤に繰返しせん断変形を与える2ケースである。結果は、矢板だけの補強では大きな効果は期待できず、タイロッドやネイリングとの組み合わせによって大きな効果が期待できることが分かった。特に、ネイリングとの組み合わせは載荷幅によらず、施工も容易であるため、有効な抑制工法になることが分かった。また、鉛直単調荷重で有効な工法は地盤が繰返しせん断変形を受けるような場合でも有効であることも示された。地盤材料の材料特性を適切に表現できる有限要素解析はこのような工法検討の有効なツールであることも示した。本研究は特定の地盤、特定の条件下の補強効果について論じたものではなく、提案する補強法の有効性とそのメカニズムを実験と解析の両面から検討したものである。

キーワード：矢板，ネイリング，FEM，モデル実験，支持力

1. はじめに

構造物や盛土等の荷重により、地盤が変形し破壊に到ることの他に、地盤の側方変位を生じさせ周辺構造物に影響を与えることがある。まず補強効果と側方変位抑制が期待できる矢板に着目し、矢板の補強による上載荷重を受ける基礎地盤の側方変位抑制効果の検討を試みてきたが、十分な補強効果は得られなかった¹⁾。そこで、矢板とネイリング²⁾、矢板とタイロッドを複合させた基礎地盤の補強による地盤の支持力増加と変位抑制効果について検討する。本研究ではアルミ棒積層体をモデル地盤として用いたモデル実験と解析と通して検討するが、解析で用いる構成式は、砂地盤から粘土地盤まで地盤材料に拘らず、またモデル実験のような低拘束応力下から原地盤の応力レベルまで唯一的な材料パラメータを用いて応力-ひずみ関係を表現できる。その結果、解析の有効性をモデル実験で検証しておけば原地盤の挙動は解析で検討できる。図1³⁾のフローは

著者らが考えている現場の解析・予測システムを示すものであるが、本研究では特に点線で囲んだモデル実験と解析を通して補強効果のメカニズムを明らかにすることと解析の信頼性について検討することを目的とする。なお、同

図1 予測のための数値解析・モデル実験の役割を示す図

じ構成モデル解析法を用いた軟弱地盤を対象とした現場レベルでの解析的検討は別報⁴⁾（その主な内容を付録に添付）で行っている。

特徴的な条件下で解析の信頼性をモデル実験で検証しておけば、個別の現象は解析的に予測できるとするのが、本研究のスタンスであり、ある特定の荷重条件・被災事例を対象に行うものではないことを断っておく。

2. 上載荷重を受ける地盤の支持力増加・変形抑止効果の検討

盛土や構造物などの上載荷重を受ける基礎地盤の補強効果について、アルミ棒積層体を用いたモデル実験と対応する非線形有限要素解析を通して検討する。

2.1 2次元モデル実験の概要

2.1.1 モデル地盤

モデル実験用の地盤材料にはアルミ棒積層体を用いる。アルミ棒積層体は、長さ 50mm、直径 1.6mm と 3.0mm の 2 種類のアルミ棒を、重量比 3 : 2 で混合したものを積み上げたものである。モデル地盤材料の特性^{5),6)}としては、単位体積重量が $\gamma = 20.4 \text{ kN/m}^3$ で、やや密な砂に近い応力ひずみ特性を有する。モデル地盤として用いるアルミ棒積層体の特徴と利点を以下に示す。

- 1) 積層体は前面および後面を壁で支える必要がなく自立するため、地盤と壁面間の摩擦が皆無である。
- 2) 地盤前面からアルミ棒積層体の写真撮影が可能であり、画像解析手法を利用し地盤内の変位やひずみの変化が分かる。
- 3) アルミ棒積層体の混合比（重量比 3 : 2）は、豊浦砂の粒径加積曲線を参考に決めている。
- 4) アルミ棒積層体はマスとしては中密な砂に似た変形・強度特性を示すため、一般的な非線形性やダイレイタンス特性を示す通常の土の 2 次元モデルとみなすことができる。
- 5) 繰返し実験を行っても粒度特性が変化しない（破砕や細粒分の飛散がない）ため、実験の再現性が高い。

一方で、1g 場のアルミ棒を用いた模型実験は実物と比べて拘束圧が低く、模擬できる現象が平面ひずみ条件に限られるという課題もあると言われている。さて、本検討で用いる地盤材料の構成モデル（subloading t_{ij} model）は、砂と粘土に拘わらず、モデル実験の低応力レベルから現場の応力レベルまでの広い応力範囲で、材料の密度に拘わらず、一般的な 3 次元応力条件下の土の強度・変形特性を統一的に評価できることを示している^{3),7)}。したがって、本研究のような小スケールの 2 次元実験であっても、同じ応力レベルでその挙動を解析することが可能である。これは、地盤工学の諸問題について、実験・解析の両面からその現象を解明することができることを意味する。また、低応力レベルの模型実験であっても、同一構成モデルを用いた解析

結果が定性・定量的にその挙動を説明できれば、その構成モデルを種々の地盤条件の現場スケールの解析や挙動予測に信頼性を持って解析が適用できるとことになる。

2.1.2 モデル実験機の概要

モデル実験機の概要を図 2 に示す。アルミ棒積層体は幅 100cm、深さ 50cm、奥行き 5cm（アルミ棒の長さ）である。モデル地盤の底面や側面の変位境界では、作用する土圧が大きく変化しても変位を許さないように装置は十分な剛性を確保している。モデル実験での上載荷重はモーターで強制変位を与える。また、フーチングの水平方向への移動を許すための载荷ロッド途中にスライダを設けている。

図 2 モデル実験機の概要図

2.1.3 フーチングの概要

2 次元モデル実験で用いたフーチングの形状を図 3 に示す。材質はアルミで、幅 $B = 12 \text{ cm}$ 、高さ 3cm、奥行き 5cm である。底面には粗い摩擦を想定して #150 のサンドペーパーを張り付けている。また、载荷位置には角度が 120 度の V 字型の溝を設けることにより、ロッドの先端との接触点を中心に基礎の回転を許している。

図 3 フーチングの形状

2.1.4 補強材のモデル化

(1) 鋼矢板のモデル化

矢板はアルミ板を用いてモデル化し、矢板長 L は長さの影響を検討するために、基礎幅 $B = 12 \text{ cm}$ を基準に $L = 12 \text{ cm}$ （短い矢板、 $L/B=1.0$ ）、 24 cm （長い矢板、 $L/B=2.0$ ）の 2 種類の矢板長を採用した。また、2 種類の厚さのモデル矢板を採用することで矢板の曲げ剛性の影響についても検討した。現場でよく使われる剛性の柔な鋼矢板（鋼矢板 II A、特性値 $\beta=0.55\sim0.60 \text{ m}^{-1}$ 程度）と剛性の大きい鋼矢

板(鋼矢板 V_L , 特性値 $\beta=0.35\sim0.40\text{ m}^{-1}$ 程度)を想定し, 1/100 のスケールで変形への影響が最も大きい曲げ剛性の相似率(モデルのスケールを現場のスケールの $1/n$ としたモデルの曲げ剛性は $(1/n)^4$ 倍で与える)がほぼ等しくなるようにアルミ板の厚さを決定した。相似則から, 鋼矢板 II_A および鋼矢板 V_L の曲げ剛性に相当するアルミ板の厚さはそれぞれ, 0.33mm および 0.59mm と計算されるが, ここでは, 市販の材料の都合上, 0.3mm および 0.5mm のアルミ板を採用した。

(2) ネイリングのモデル化

ネイリング工法は鉄筋挿入補強土工法と呼ばれ, 細長比が大きく引張り剛性の大きい補強材を地山に挿入し, 主として補強材の周面摩擦と引張り抵抗によって地山の安定性を向上させる工法である。本研究では, 引張り剛性が十分大きく曲げ剛性がほとんどないトレーシングペーパー (40g/m^2) の表裏両面に直径 1.6mm のアルミ棒を 1cm 間隔で張り付けたもの(摩擦角約 20°) でネイリングのモデル化を表現した。ネイリングの長さ L_N は, 有効なネイリング長を検討するため, 基礎幅を参考に, $L_N=6\text{cm}$ (短いネイリング), 9cm (長いネイリング) の 2 種類ネイリング長とした。奥行きはアルミ棒積層体と同じく 5cm である。また, 挿入角度は水平面から 30° とした。

2.1.5 モデル実験の計測

実験では基礎の鉛直変位量とフーチングに載荷される荷重を計測している。フーチングに強制変位を与える載荷ロッドにロードセルを取り付け, 載荷重を計測し, 基礎両端部に鉛直方向に設置した変位計により鉛直変位を計測する。また, モデル実験では地盤内の変形挙動を観測するため, デジタルカメラで基礎地盤を一定沈下毎に撮影し, PIV を用いた画像解析を行うことによって地盤中の節点変位を求める。そして, 図 4 に示すように地盤中の変位から有限要素法で用いられる B マトリックス(ひずみ・節点変位マトリックス)を使って地盤内のせん断ひずみ分布を算出する。PIV とは Particle Image Velocimetry (粒子画像流速測定法) の略称で, 水や空気等の流体の速度計測法の一つである。2 枚の画像を一定の領域に分割し, その領域内におけるアルミ棒の平均的な移動速度として出力された各領域の節点変位 (u_i, v_i) から領域内のひずみを求めている。

2.2 数値解析の概要と解析条件

2次元弾塑性有限要素解析は解析コード FEMtij-2D を用い, 土の構成式には等方硬化型弾塑性モデル subloading t_{ij} model^{3),7)} を用いる。

解析は, モデル実験と同一スケールで 2 次元平面ひずみ条件, 微小変形, 排水条件下で実施した。地盤要素にはアイソパラメトリック要素を, 矢板およびネイリングにはビーム要素を, タイロッドにはトラス要素を適用した。また, 矢板やネイリング材および基礎と地盤間の境界の不連続

面挙動は弾塑性ジョイント要素⁸⁾で表現した。

図 4 PIV による画像処理方法

2.2.1 弾塑性構成式 subloading t_{ij} model の概要

有限要素法などにより実際問題の解析(地盤の応力・変形解析)を行うには, 土の特徴的な変形・破壊挙動を的確に表現できる構成モデルを用いる必要がある。土の構成モデルが考慮しなければならない主な特徴点は,

- 1) 中間主応力の変形・強度特性に及ぼす影響
- 2) 塑性ひずみ増分方向の応力経路依存性
- 3) 正負のダイレイタンス特性
- 4) 繰返し載荷特性
- 5) 密度および拘束圧の影響

等であり, subloading t_{ij} model はこれらの特性を表現することができる。構成モデルの詳細については参考文献^{3),7)}を参照のこと。

2.2.2 材料パラメータ

subloading t_{ij} model で必要となる材料パラメータは, 圧縮指数 λ , 膨潤指数 κ および弾性成分のポアソン比 ν_e , 等方応力 98kPa における正規圧密線上の間隙比を表わす N , 破壊応力比 Rcs , 降伏面の形状を規定するパラメータ β , そして過圧密の解消速度を表す a である。 β と a が Cam clay model に対して追加されたパラメータである。

解析に用いたアルミ棒積層体のパラメータを表 1 に示す。アルミ棒積層体地盤の単位体積重量は $\gamma = 20.4\text{kN/m}^3$ である。この材料パラメータを使用した要素試験解析結果と, アルミ棒の要素試験結果の比較を図 5 に示す。モデル地盤中の拘束圧はこれら要素試験に比べて更に小さいので, モデル実験に対応する応力レベル(要素試験の約 1/100 の拘束応力)での解析結果も破線で示した。解析に用いた構成モデルが拘束圧の影響を含め, 地盤材料の応力・ひずみ特性をよく表現していることが分かる。なお, 表 1 のアルミ棒積層体の材料パラメータは, 同じ材料を用いて行ってきたトンネル掘削問題⁹⁾, 山留め掘削問題⁵⁾, 支持力問題¹⁰⁾等の解析と同じである。

表 1 subloading t_{ij} model のパラメータ

λ	0.008	compression index	
κ	0.004	swelling index	
N	0.3	reference void ratio on normally consolidation line at $p=98$ kPa & $q=0$ kPa	Same parameters as Cam clay model
R_{CS}	1.8	critical state stress ratio $R_{CS}=(\sigma_1/\sigma_3)_{CS(comp.)}$	
ν_e	0.2	Poisson's ratio	
β	1.2	shape of yield surface (same as original Cam clay at $\beta=1$)	
a	1300	influence of confining pressure

図 5 要素シミュレーション結果

2.2.3 解析メッシュ

代表的な有限要素解析メッシュとして、無補強地盤および矢板とネーリングを組み合わせた補強地盤をモデル化した解析メッシュの例を図 6 に示す。境界条件は全モデル実験の解析において底面を完全固定、側面は水平方向のみ固定としている。

2.2.4 初期地盤作成

数値解析地盤の初期状態は、ほぼ応力がゼロ ($p_0 = 9.8 \times 10^{-6}$ kPa) の等方応力状態でその時の間隙比が $e_{in} = 0.328$ とした地盤材料を自重圧密させることにより作成した。図 5 に示すようにモデル地盤は中密な状態に近い状態にあるため、数値解析における地盤の作成では地盤の間隙比が実験のそれとほぼ一致するように、地盤は自重の 150%で過圧密した後 100%の自重に戻した。すなわち、図 7 に示すように、自重がほぼない状態から徐々に単位体積重量の 150%まで自重を増加させ、その後 100%に戻すことにより実験のアルミ棒積層体に対応する解析地盤を作成した。

図 8 は自重圧密完了時の深さ方向の鉛直応力 σ_v 、 K_0 値、密度の変化を表すパラメータ ρ 、間隙比 e の分布図を示す。同図より、初期地盤の K_0 値は 0.92~0.99 の範囲

にあり、これはモデル実験のアルミ棒積層体地盤の作成時の K_0 値が 0.9 前後であることに対応する。また、実験時の地盤の間隙比 0.28~0.29 (単位体積重量 $\gamma \approx 20.4$ kN/m³) に近い。したがって、自重で過圧密化する方法で作成した解析地盤の初期状態はモデル実験の初期状態にほぼ近い状態にあると言える。

図 6 解析メッシュ図 (上: 無補強, 下: 補強)

図 7 初期応力 (平均有効応力) 解析の結果図

図 8 初期地盤作成解析から得られた地盤の初期状態

2.3 検討内容およびモデル実験と解析の比較

2.3.1 検討ケース

無補強地盤を基本ケースとし、図 9 に示すように、矢板の長さ L および厚さ t 、ネイリングの長さ L_N をパラメータの感度とし、表 2 に示したケースで検討した。なお、タイロッドは両矢板頂部の水平距離が一定となるように、実験ではピアノ線でモデル矢板頂部を連結し、解析ではその間の距離が一定となる条件を付加した。

図 9 補強に関する諸元図

表 2 補強効果の検討ケース

		補強材との組合せ条件			
矢板長 $L=12\text{cm}$	厚さ $t=0.3\text{mm}$	矢板のみ	ネイリング $L_N=6\text{cm}$	ネイリング $L_N=9\text{cm}$	タイロッド
	厚さ $t=0.5\text{mm}$	矢板のみ	ネイリング $L_N=6\text{cm}$	ネイリング $L_N=9\text{cm}$	タイロッド
矢板長 $L=24\text{cm}$	矢板 $t=0.3\text{mm}$	矢板のみ	ネイリング $L_N=6\text{cm}$	ネイリング $L_N=9\text{cm}$	タイロッド
	矢板 $t=0.5\text{mm}$	矢板のみ	ネイリング $L_N=6\text{cm}$	ネイリング $L_N=9\text{cm}$	タイロッド

2.3.2 モデル実験および解析結果

各検討ケースにおいて、基礎の荷重～変位関係、地盤内の偏差ひずみ分布、矢板の変形、矢板の断面力（解析のみ）を示し、モデル実験と有限要素解析の両面から考察する。表 2 に示すように、補強効果は、矢板長 L と厚さ t を変えたケースについて、矢板のみの場合、短いネイリングと矢板を組み合わせた場合、長いネイリングと矢板を組み合わせた場合、タイロッドと矢板を組み合わせた場合について、無補強地盤の結果と比較することにより検討した。

(1) 基礎の荷重～変位関係

基礎の荷重～変位関係の結果を図 10～図 13 に示す。縦軸はフーチングにかかる鉛直荷重 q_v を基礎幅 B とモデル地盤の単位体積重量 γ で無次元化した $2q_v/\gamma B$ 、横軸は鉛直変位 v を基礎幅 B で無次元化した v/B を用いて整理している。モデル実験では実験前の基礎設置時に基礎の自重が作用しているため、図 10～図 13 の実測値では自重分の無次元化した載荷重 0.74 を予め縦軸に加えている。以下に結果に基づく考察を述べる。

図 10～図 13 はそれぞれ矢板の長さ L と厚さ t を変えたケースについて実験結果および解析結果を示している。無補強地盤と矢板のみで補強したケースを比較すると、モデル実験、解析ともに荷重～変位関係および支持力は矢板の長さや厚さに拘わらず、大きな差異はない。したがって、矢板だけの補強では、補強効果は小さいと言える。

矢板にネイリングやタイロッドを組み合わせた場合について検討する。いずれの場合も補強効果は見られ、当然のことながら長くて厚い矢板 ($L=24\text{cm}$, $t=0.5\text{mm}$) では補強効果が最も大きい。また、 $L=12\text{cm}$ で $t=0.5\text{mm}$ の補強効果は $L=24\text{cm}$ で $t=0.3\text{mm}$ の補強効果より大きいことが分かる。したがって、ある程度の矢板長があれば、矢板を長くするよりも矢板の剛性を大きくする方が補強効果は大きくなると言える。次に、ネイリングの長さについては、 $L_N=9\text{cm}$ の方が効果は大きい。また、 $L_N=6\text{cm}$ でも効果はある。また、 $L_N=9\text{cm}$ の結果はタイロッドの場合と変わらないか、むしろタイロッドと組み合わせた場合よりも効果は大きい。これは、ネイリングの場合矢板上部の変位を抑制する効果に加えて引張り補強材としての補強効果も働くことによるものと考えられる。矢板上部をタイロッドで繋ぐ補強は線路盛土基礎地盤の補強土工法として使われているが、ネイリングで矢板上部の変位を抑制する方法は盛土幅に拘わらず適用できる可能性があると言える。

(2) 偏差ひずみ分布

効率的な補強効果が得られる $L=12\text{cm}$ で $t=0.5\text{mm}$ の場合について、実験および解析で得られた偏差ひずみ分布を図 14 に示す。カラーコンターは偏差ひずみの大きさを表しており、コンター図の配色が青色側では偏差ひずみは小さく、赤色に近づくほど大きくなる。荷重～変位関係におけるピーク強度付近の無次元化した沈下量 v/B をもとに、実験結果では $v/B=0.06$ 、解析結果では $v/B=0.10$ の偏差ひずみ分布を示している。

(a) 実験結果

(b) 解析結果

図 10 L=12cm, t=0.3mm 荷重～変位関係

(a) 実験結果

(b) 解析結果

図 11 L=12cm, t=0.5mm 荷重～変位関係

(a) 実験結果

(b) 解析結果

図 12 L=24cm, t=0.3mm 荷重～変位関係

(a) 実験結果

(b) 解析結果

図 13 L=24cm, t=0.5mm 荷重～変位関係

図 14 $L=12\text{cm}$, $t=0.5\text{mm}$ 偏差ひずみ分布

図 15 $L=12\text{cm}$, $t=0.3\text{mm}$ 矢板の側方変位分布結果 図 18 $L=24\text{cm}$, $t=0.5\text{mm}$ 矢板の側方変位分布結果 図 16 $L=12\text{cm}$, $t=0.5\text{mm}$ 矢板の側方変位分布結果 図 17 $L=24\text{cm}$, $t=0.3\text{mm}$ 矢板の側方変位分布結果

図 19 解析による矢板のモーメント分布結果

- green field
- sheet pile
- △ sheet pile + Nailing (6cm)
- ▽ sheet pile + Nailing (9cm)
- sheet pile + tie rod
- sheet pile
- ▲ sheet pile + Nailing (6cm)
- ▼ sheet pile + Nailing (9cm)
- sheet pile + tie rod

基礎の端部近くで偏差ひずみが大きくなるのはいずれの場合も同じであるが、ネイリングで補強効果が表れたケースでは矢板下部から偏差ひずみの大きい領域が滑り線と考えられる所に発達する様子が実験結果から分かる。すなわち、短くても剛性の大きい矢板で矢板上部の側方への変位を抑えると、根入れに近い効果により補強効果を発揮すると言える。解析結果からは明確な滑り線は見られないが、ネイリングと組み合わせた場合に偏差ひずみの大きい領域が矢板下端付近から発達することが分かる。一方、無補強や補強効果の小さいケース（矢板のみの補強）では滑り線に相当する偏差ひずみの大きい領域は浅いことも分かる。

(3) 矢板の側方変位分布

基礎の支持力がほぼピークとなる状態（実験結果： $v/B=0.06$ 、解析結果： $v/B=0.10$ ）での矢板の側方変位の実験および解析結果を図 15～図 18 に示す。無補強の結果（グラフ内、黒色の破線：greenfield で示した）は矢板設定位置における地盤の水平変位を表している。各検討ケースで、モデル実験、解析結果ともに、ネイリングあるいはタイロッドと併用した場合、深度 4～8cm 付近で 0.4～0.5cm 程度の水平変位が生じ、無補強地盤よりも変位は大きくなるものの、天端付近で水平変位は大きく減少している。

矢板天端付近の水平変位について詳細に見ると、モデル実験では、各矢板の特性でネイリング長 $L_N=9\text{cm}$ とタイロッドで補強した場合で抑制の効果が顕著となり、解析ではネイリング長 $L_N=6\text{cm}$ 、 $L_N=9\text{cm}$ とタイロッドで補強した場合に抑制の効果が表れる結果となった。しかし、全体的に見ると、いずれの場合も解析結果は実験値の側方変位をよく説明していることが分かる。

(4) 矢板の曲げモーメント分布

地盤が変形した時点（ $v/B=0.10$ ）の解析で得られた矢板の曲げモーメント分布結果を図 19 に示す。タイロッドおよびネイリングを組合せたケースでは深度 3～4cm 付近で最も大きな曲げモーメントが発生していることから、地盤が側方に変位しようとするのに対し抵抗をしていることが分かる。一方、図 15～図 18 に示している矢板のみの場合の側方変位について、矢板の剛性が大きくなっても、矢板に曲げモーメントはほとんど発生せず、側方変位は、地表面付近でも変位抑制の効果が現れず、矢板はほぼ回転挙動となり側方変位に対して抵抗していないと言える。

以上、やや密詰めの砂質土に近い応力・ひずみ挙動を示すアルミ棒積層体を地盤材料としたモデル実験とそれに対応する弾塑性有限要素解析結果を通して、鋼矢板を用いた地盤変形の抑止効果について検討した。別報⁴⁾では飽和した軟弱粘土地盤上の台形盛土を想定した場合の有効性について、解析的に検討しているが、軟弱地盤においても同様の抑止効果を期待できることを示している。参考までに、別報⁴⁾の結果の一部を付録に示す。

3. 繰返しせん断変形を受ける地盤の補強効果の検討

地震などの動的な地盤挙動を検討するには、振動台実験や動的解析などが通常行われる。しかし、動的問題に対しては、ここまで述べてきた系統的な静的問題の実験や解析のように、実験結果と解析結果の定性・定量的な一致を求めるのは難しい。これは、系統的な振動台実験を行うには、試料の状態を含めた初期条件、基盤入力等の再現が難しいことや、解析では繰返し載荷時の構成モデルが単調載荷時のそれに比べて完成度が低いことによる。本研究は、動的問題に対しても、静的問題と同じ初期条件・境界条件のもと、同じ実験法、同じ構成モデルを用いた解析法で検討することを是としてしている。したがって、地震波を基盤に与える代わりに、モデル地盤に繰返しせん断変形を与えることで地震時の地盤変形を単純化して模擬した。ここでの目的は、静的な条件下で変位抑止効果のあった工法が地震のような繰返しせん断を受けても静的な場合と同様のその効果を期待できるかを検討することにある。なお、この繰返しせん断変形を与える方法は、別の構造物を対象とした検討¹¹⁾も実験的にすすめている。

このような背景のもと、静的鉛直載荷条件と同じ地盤材料同じ形式の装置を用いた 2 次元モデル実験と同じ構成モデル同じ材料パラメータを用いた弾塑性有限要素解析を行った。ここでも、実験および解析の概要を説明した後に、実験結果および解析結果に基づいて補強効果の検討を行う。

3.1 2 次元モデル実験の概要

鉛直載荷実験と同様、アルミ棒積層体モデル地盤による実験を実施した。モデル実験機は図 20 に示すように、基本的には静的実験で用いた装置と同じであるが、側方の境界条件の影響を小さくするため 120cm 幅としたことと、モデル地盤の両側面の下端部を中心に回転でき地盤に繰返しせん断変形が与えられる機構にした点だけが異なっている。また、せん断変形を与える側面のハンドル部にロードセルを設置しているため、地盤に与える水平荷重を測定することができる。繰返し載荷実験では、一定の水平荷重になるように繰返し荷重を変位制御で与えている。また、地盤の平均的なせん断ひずみは、側面フレーム横に設置したダイヤルゲージから得られる水平変位量から算出できる。

基礎の鉛直変位は、非接触式のレーザー変位計を用いて計測している。基礎の鉛直荷重はロッドを通して死荷重で与えているが、基礎の水平方向への移動を許すため単調鉛直載荷の場合と同様ロッドの中間にスライダを設けている。なお、繰返しせん断荷重は地盤の総重量 m_g の k_H 倍の最大水平荷重が重心位置（地表面から地盤高さの 2/3 の深さ）に作用するように載荷した。

図 20 セン断実験機の概要図

3.2 数値解析の概要と解析条件

2次元有限要素解析の解析コードおよび解析パラメータ、初期地盤の作成方法は前述の鉛直荷重条件下の検討と同じである。ただし、せん断実験機の大きさに合わせて有限要素メッシュの幅は120cmとしている。

排水繰返し荷重条件では、荷重とともに土の剛性は増大し体積ひずみ（圧縮）は小さくなる特性を持っている。これまで用いてきた subloading t_{ij} model でも繰返し荷重挙動を説明できるが、2サイクル以後のひずみを過大評価する（図 21 の赤色の実線）。そこで、本解析では2サイクル以後のひずみの発生を小さくするよう塑性係数を修正している。その結果、第1サイクルの応力ひずみ関係は従来と同じでも、2サイクル以後ひずみの発生を抑えている。

モデル地盤に $k_H=0.4$ の繰返しせん断変形を与えた時の k_H ～平均せん断ひずみ関係の実測値と改良した構成モデルによる解析結果を図 22 に示す。修正した構成モデルはモデル実験と比べ初期せん断ひずみを過大に評価しているものの、モデル地盤の繰返しせん断特性を大筋で表現している。

図 21 修正した構成モデルの繰返し荷重計算結果

図 22 繰返し荷重条件（上：モデル実験，下：解析）

3.3 検討内容およびモデル実験と解析の比較

3.3.1 荷重条件と検討するケース

図 23 は無補強地盤の鉛直荷重実験結果（黒色のプロット）と解析結果（黒色の破線）を示している。通常建物の設計荷重は極限荷重の約 1/3 とすることが多いが、アルミ棒積層体を用いた本実験では極限荷重の 1/3 の上載荷重では無補強でも繰返し荷重時の沈下量が小さいため補強効果を明確に判断できない。その結果、補強メカニズムをより明確に見るため、図 23（赤色のプロット、赤色の実線）に示すように、極限荷重の約 70%まで鉛直荷重を荷重し、繰返し荷重中も鉛直荷重は一定になるようにした。なお、極限支持力の 70%は、特定の状態、特定の基準荷重値と考えているわけではなく、補強効果やそのメカニズムを明確に実験で再現するために採用したものである。繰返し荷重は、図 22 に示すような荷重条件で地盤に道路橋示方書などの設計震度を参考に、無補強地盤で徐々にすべり破壊が生じるような $k_H=0.4$ を選定し繰返しせん断変形を与えている。

静的な鉛直荷重実験・解析で比較的有效な効果が得られたケースを中心に検討した。表 3 に検討したケースを示す。

表 3 繰返し载荷の補強効果の検討ケース

		矢板のみ	ネイリング長さ L_N	
			$L_N=6\text{cm}$	$L_N=9\text{cm}$
矢板長さ	$L=12\text{cm}$	$t=0.5\text{mm}$	$t=0.5\text{mm}$	$t=0.5\text{mm}$
	$L=24\text{cm}$			$t=0.5\text{mm}$

図 23 鉛直荷重条件（上：モデル実験，下：解析）

3.3.2 検討結果の考察

図 24 に载荷サイクルの増加に伴う基礎の沈下量の増加量（静的鉛直载荷と同様、変位 v を前基礎幅 B で無次元化した v/B ）の実測値と解析結果を表している。モデル実験および解析結果より、静的鉛直载荷の場合同様、矢板だけではほとんど沈下抑制効果はないが、ネイリングと組み合わせることにより沈下が抑制されていることが分かる。すなわち、静的鉛直载荷問題の解析と同じ構成モデル同じ材料パラメータを用いた解析結果が、繰返し回数に対しての沈下量の勾配はやや大きめであるが、モデル実験で得られた変位抑制効果をほぼ定性・定量的にシミュレートしていると言える。これは、図 25 に示す偏差ひずみの発生領域をモデル実験と解析を比較してみると、解析結果では载荷版直下の局所的な偏差ひずみはやや小さく局所的な発生領域も小さい。つまり、ひずみ硬化の傾向が残るため、これらの影響が解析では出ていたと考えられ、繰返し回数に対しての沈下量の増分が実験と比べてやや大きい傾向を示したものと考えられる。ただ、解析ではネイリング長 $L_N=6\text{cm}$ で十分な効果が現れているが、実験では $L_N=6\text{cm}$ の場合に効果の程度は小さい。また、矢板長を長くしても（ $L=24\text{cm}$ ）沈下抑制効果はあまり変わらない点も静的鉛直载荷のケースと同じである。

図 25 に 8 サイクルまで地盤に繰返しせん断変形を与えた時に発生する地盤内偏差ひずみ分布の実測値と解析結

果を示す。同図から、沈下抑制効果が発揮される時には繰返しせん断変形を与えても、基礎直下を含めて偏差ひずみの発生がほとんど見られない。一方、抑止効果がなかったケースでは、地盤のせん断履歴により基礎直下に偏差ひずみの大きい領域が発達する。したがって、ここでも、矢板とネイリングの組み合わせにより、静的鉛直载荷の場合同様、矢板とネイリングで補強した場合、根入れ効果により補強かないケースに比べ各サイクルでの沈下が抑制されると言える。

以上、静的鉛直载荷時に効果のある補強土工法は、一定荷重下で地震時のような地盤が繰返しせん断変形する場合にも効果があることが分かった。なお、検討にあたって、与えた鉛直荷重（極限荷重の約 7 割）や繰返しせん断変形を大きく設定した目的は、現象をより明確に捉えるためであり、小さい鉛直荷重下で小さい繰返しせん断変形時でも無補強に対する抑止効果は同じと考えている。今後は、設計に反映させていくためには、小さい鉛直荷重下でより小さい繰返しせん断変形時についても解析的に検討する必要があると考えている（実験では明確に観察されないため）。

4. まとめ

基礎地盤の支持力増加および変位抑制効果を目的とした矢板を用いた補強土工法について、実験、解析の両面から検討した。荷重条件は基礎に静的な鉛直荷重を与える载荷と地盤に繰返しせん断変形を与える载荷である。両载荷条件において、矢板のみでは補強効果が小さいという結果がモデル実験、有限要素解析から明らかになった。また、矢板とネイリングを複合させた補強について、モデル実験ではネイリング長の差異により変位抑制効果に多少の違いがあらわれたが、十分な補強効果が得られた。これらの結果から、支持力増加と側方変位抑制効果を目的とした補強効果は、地震時のような繰返しせん断変形を受ける地盤においても変位抑制効果あることが分かった。また、設置する矢板であるが、矢板を長くするよりも、短くても剛性の大きい矢板の方が効果的であることも分かった。

次に、タイロッドとネイリングの比較については鉛直载荷のみの検討であるが、ネイリングでもタイロッドと同等の支持力増加、変位抑制効果が得られた。むしろ、ネイリング長を長くした場合は、タイロッドによる補強よりも大きい支持力増加および変位抑制効果があることが示された。

本検討では、一定の载荷幅での検討を行ったが、载荷幅を拡張した検討についてもネイリングを組合せた工法はタイロッドと組合せた工法は同等の効果が得られている¹²⁾。現在実用化されているタイロッドと組合せた工法では、広い盛土下の基礎地盤ではその施工が困難である。一方、ネイリングと組み合わせる工法は载荷幅によらず施工が可能と考えている。

(a) 実験結果

(b) 解析結果

図 24 繰返し回数～変位の関係

(a) 実験結果

(b) 解析結果

図 25 8サイクル終了時の偏差ひずみ分布

地盤材料の力学特性を適切に表現できる構成モデルを用いた数値解析法による結果はモデル実験結果と定性的・定量的により対応を示しており、ここで述べた解析手法は補強土工法のメカニズムの解明はもとより工法の効果の検討にも有効である。

謝辞

本研究は（財）鋼管杭・鋼矢板技術協会の研究助成（タイトル：鋼矢板を用いた盛土地盤のすべり対策）を受けた。研究助成ならびに同協会技術委員会でご貴重な議論・意見をいただいたことに感謝致します。

参考文献

- 1) 酒井亮佑, 吉田泰規, 中井照夫, Shahin, H. M., 菊本統, 永津亮祐 : 鋼矢板による盛土基礎地盤補強工法の実験および解析による検討, 第45回地盤工学研究発表会発表講演集, pp.999-1000, 2010
- 2) 館山勝/技術手帳: ネイリング・マイクロパイルング・ダウアリング, 土と基礎, Vol.51 No.12, pp.84-85, 2003
- 3) Nakai, T. : CONSTITUTIVE MODELING OF GEOMATERIALS /Principles and applicaitons, CRC Press, 2012
- 4) Shahin, H. M., Nakai, T., Kikumoto, M., Sakai, R., Yoshida, Y., Saito, I., Nagano, N., & Toda, K. : Investigation of a reliable reinforcing method for embankment ground, First International Conference on Geotechnique, Construction Materials and Environment, pp. 71-76, Mie, Japan, Nov., 2011
- 5) Nakai, T., Farias, M. M., Bastos, D., Sato, Y. : Simulation of Conventional and Inverted Braced Excavations Using Subloading t_{ij} Model, Soil and Foundations, 47(3), pp. 597-612, 2007
- 6) Iwata, N., Nakai, T., Zhang, Inoue, T. & Takei, H. : Influences of 3D effects, wall deflection process and wall deflection mode in retaining wall problems, Soil and Foundation, 47(4), pp.685-699, 2007
- 7) Nakai, T. & Hinokio, M. : A simple elastoplastic model for normally and over consolidated soils with unified material parameters, Soil and Foundation, 44(2), pp.53-70, 2004
- 8) Nakai, T. :Finite element computaitons for active and passive earth ressure problems, Soil and Foundation, 25(3), pp.98-112, 1985
- 9) Shahin, H. M., Nakai, T., Zhang, F., Kikumoto, M., & Nakahara, E. : Bheavior of ground and response of existing foundation due to tunneling, Soil and Foundation, 51(3), pp.395-409, 2011
- 10) Shahin, H. M. , Nakai, T., Kikumoto, M. & Zhang , F. : Bearing capacity of different types of foundations under several loading conditions, Proc. of NFCOMGEO-V, pp.111-116, Australia, July, 2010
- 11) Shahin, H. M. , Nakai, T., & Kuroi, S. : Tunnel behavior subjected to repeated shear deformation – model test and finite element analysis, 3rd International Conference on Computational Methods in Tunnelling and Subsurface Engineering, pp. 283-292 Germany, April, 2013
- 12) 磯部有作, Shahin, H. M., 中井照夫 : 鋼矢板を用いる地盤の効果的な変位抑制工法, 第59回地盤工学シンポジウム発表論文集, pp.423-428, 2014

付録 変位抑制工法の軟弱地盤への適用性

軟弱地盤での本変位抑止工法の有効性は文献⁴⁾で述べているが、その主要部分を付録として紹介する。

付図1に示すように、軟弱粘土地盤上に盛土を構築する場合について、抑制工法の効果を解析的に検討した。解析は付図2に示す判断面の有限要素メッシュを用い、矢板板は鋼矢板 V_L を想定し、矢板長 $L=15m$ とした。解析は対策工なし、鋼矢板だけ設置、鋼矢板とネイリング（ネイリング長 $12.7m$ ）で行っている。付図3には基礎地盤に仮定した藤森粘土および盛土材に仮定した豊浦砂の三軸圧縮試験結果（白丸のプロット）と本論文の解析でも用いている subloading t_{ij} model による計算結果を示すが、本解析でも用いた subloading t_{ij} model が負のダレイタンシーを示す軟弱な粘土から正のダレイタンシーを示す砂までの地盤材料の応力・ひずみ挙動をよく表現できることが分かる。

付図4は盛土施工中の地盤の変位ベクトルを表すが、無補強ではほぼ破壊に近い大変形となるのに対し、矢板とネイリングを組み合わせた抑止工法では変位がかなり抑制できることが分かる。付図5は盛土完了時およびその後の圧密終了時の地表面沈下プロファイルを示す。(a)図は無補強と矢板だけの比較を、(b)図は無補強と矢板とネイリングを併用した時の結果を示す。また、付図6は盛土法尻および法尻から $3m$ の位置での側方変位の解析結果を示す。(a)図は無補強、(b)図は矢板のみ、(c)図は矢板とネイリングを併用した結果を表している。付図5, 6から矢板とネイリングを併用した抑制工法が本論文のモデル試験結果や解析結果同様、軟弱地盤でも有効であると言える。

付図1 軟弱地盤上の盛土概要図

付図2 有限要素メッシュ

(a) 無補強と矢板の比較

(b) 無補強と矢板+ネイリングの比較

(a) 藤森粘土

(b) 豊浦砂

付図3 応力～ひずみ～ダイレイタンスー関係

付図5 盛土完了時およびその後の圧密終了時の地表面沈下
プロファイル

(a) 無補強

付図4 変位ベクトル図

(b) 矢板

(c) 矢板+ネイリング

付図6 盛土完了時およびその後の圧密終了時の法尻と法尻から3m
地点の側方変位

(2014. 7. 8 受付)

Restraint effect of ground displacement by sheet pile - Comparison by both model test and numerical analysis -

Yusaku ISOBE¹, Hossain Md. SHAHIN², Teruo NAKAI³, Ryosuke SAKAI⁴ and Yasunori YOSHIDA⁵

- 1 Department of Scientific and Engineering Simulation, Nagoya Institute of Technology, and Geoscience Research Laboratory, Co., Ltd.
- 2 Associate Professor, Department of Scientific and Engineering Simulation, Nagoya Institute of Technology
- 3 Geo-Research Institute
- 4 Central Japan International Airport, Company, Limited
- 5 Central Nippon Expressway, Company, Limited

Abstract

The restraint effect of ground displacement by reinforcement of the sheet pile, the sheet pile combined with the tie rod, and the sheet pile combined with the nailing are investigated by model tests and corresponding finite element analyses. An elastoplastic model, subloading t_{ij} model, is used in the analyses. Two loading conditions which are the simple vertical loading to the footing and cyclic loading associated with repeated shear deformation to the ground are applied to both series of the model test and finite element analysis. It is revealed that when the bearing capacity of the ground increases, the lateral and vertical displacements are restrained. The reinforcement by the sheet pile combined with the nailing is equal or more effective compared with the sheet pile combined with the tie rod.

Key words: Sheet pile, Nailing, FEM, Model test, Bearing capacity