

# 鉄筋で補強した切土のり面の挙動解析に関する研究

山本 彰 鳥井原 誠  
平間 邦 興

## Nonlinear Analysis of Field Loading Test on Actual-scale Slope Reinforced with Steel Bars

Akira Yamamoto Makoto Toriihara  
Kunioki Hiram

### Abstract

The present paper is concerned with an analysis method for an observational procedure for reinforced slopes. The authors try to explain the results of field loading tests on actual-scale specimens by FEM nonlinear analysis.

As a result, it is shown that in three-dimensional analysis, nonlinear behaviors from the initial stage up to failure and failure mode can be expressed well. It is also made clear that the steel bars driven into the slope increase the confining effect of the soil in ground, and with the soil and steel bars integrated, the slope stabilize against failure.

### 概 要

鉄筋で補強したのり面の変形や破壊形態の予測に対する FEM 解析の適用性について検討するため、現位置で実施した鉄筋で補強した切土のり面の実物大載荷実験について非線形弾性モデルを用いた FEM によるシミュレーション解析を実施した。その結果、FEM 三次元解析では実験時の初期段階から破壊に至る非線形挙動および破壊形態をよく表現できることが明らかとなった。また、のり面に挿入された鉄筋は地盤内の拘束効果を増加させ、地盤を一体化し、のり面を安定化させるという鉄筋の補強効果を明らかにすることができた。

## 1. はじめに

切土のり面の安定対策工法として、多数の鉄筋をのり面に挿入してその安定化を図る鉄筋挿入工法がある。この工法の特徴は地山を掘削する場合に段階的な施工が行なえることおよび、地山の地質状態や掘削時の変形に応じて柔軟に対応できることにある。そのため、当工法の施工に当っては掘削に伴う地盤の変形挙動や鉄筋に発生する軸力などの予測と各種計測による施工管理が極めて重要となる。

筆者らはこれまで鉄筋挿入工法に関する研究として室内要素試験、室内模型実験によって鉄筋の挿入ピッチ、長さが補強効果に与える影響などについて検討を行ってきた<sup>1),2)</sup>。また、鉄筋で補強した実物大規模の切土のり面の現位置載荷実験を行ない、種々の計測結果をもとに鉄筋の補強効果、施工管理方法、設計法の検証といった点について検討を行ってきた<sup>3)</sup>。

この報告では、先の現位置載荷実験について FEM による数値シミュレーション解析を行ない、各種計測結果との比較検討を行なうことによって FEM 解析の鉄筋挿入工法における地盤の変形や破壊挙動の予測への適用性について検討している。

## 2. 実験概要

図-1 は実験概要を示しており、のり面は図-2 の粒度分布を持つ現地発生土（成田砂）を均質に締め固めて盛土

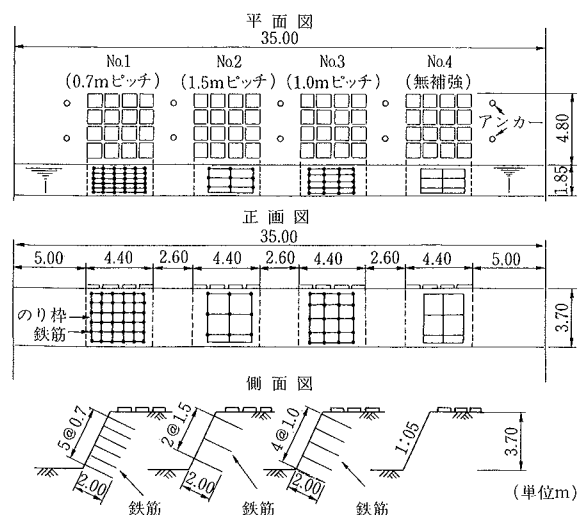


図-1 実験概要図

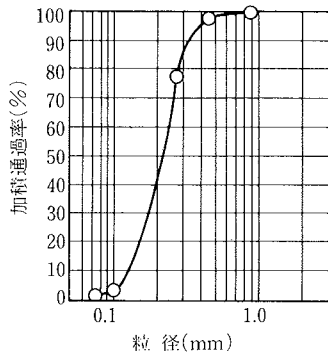


図-2 粒径加積曲線

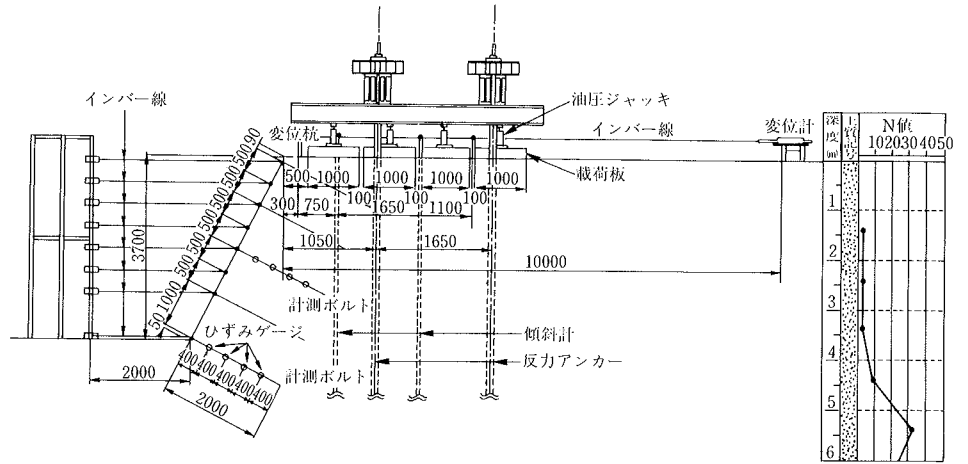


図-3 実験ヤード断面図および計測器配置 (1.0 m ピッチ)

した後、長さ 2.0 m の鉄筋を挿入しながら高さ 3.7 m、勾配 1:0.5 で再掘削したものである。実験ケースは無補強と鉄筋を 1.5, 1.0, 0.7 m ピッチで挿入した場合の 4 ケースである。図-3 は実験時の計測器の配置図を示しており、計測項目はのり肩および地表面の沈下と水平変位、載荷板の沈下、のり面変位、地中変位、鉄筋の軸力、のり枠の軸力などである。また、図-3 には実験ヤードの標準貫入試験結果も併せて示している。

実験時の荷重は基本的に 0.1 tf/m<sup>2</sup>/min で荷重を増加させた後、一定荷重で 12 分間放置する段階荷重である。

図-4 は載荷実験の一例として実験ケースごとの載荷板沈下と載荷重の関係を示している。この図から、荷重に伴って載荷板の沈下は非線形的に増加し、載荷重増分に対して沈下が急激に増加する載荷重 (降伏荷重) が存在することが分かる。このような降伏荷重は他の計測結果においても同様に確認されており<sup>3)</sup>、これらの計測結果から補強したのり面内にはこの段階で明確なキレツが発生しはじめたものと推定されている<sup>3)</sup>。表-1 は各実験ケースにおいて各種計測で求められた平均的な降伏荷重と最大荷重を示している。

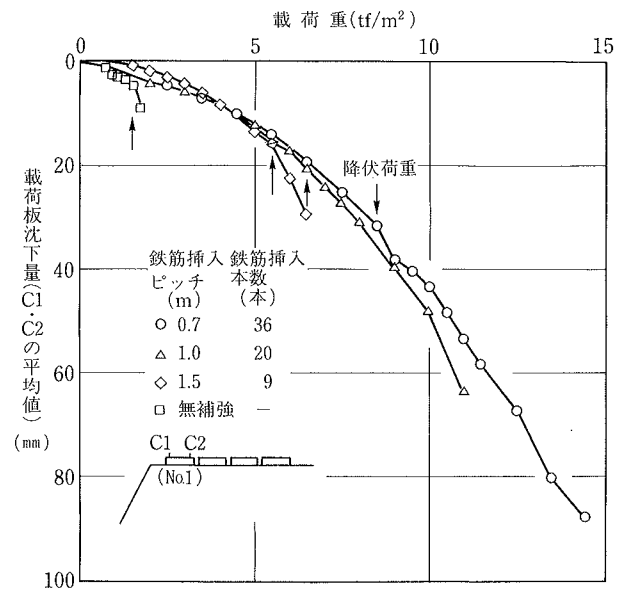


図-4 載荷板沈下と載荷重の関係

表-1 降伏荷重と最大荷重

	無補強	1.5mピッチ	1.0mピッチ	0.7mピッチ
降伏荷重 (tf/m <sup>2</sup> )	1.5	4.2	6.5	9.0
最大荷重 (tf/m <sup>2</sup> )	1.7	6.5	11.0	14.5

### 3. 材料モデルについて

土は一般に非線形な応力～ひずみ関係を示すことが知られており、特に、今回の現位置載荷実験では極めて破壊に近い状態まで載荷重を加えたことから、解析に当たっては応力～ひずみ関係は非線形的に表現する必要がある。一方、体積ひずみについては実験ヤードの地盤が比較的緩く、現位置地盤と同じ密度、含水比に調整し作成した試料の三軸圧縮試験においても体積膨張がほとんど見られないことから、解析上、正のダイレイタシーは考慮する必要がないと考えられる。以上のことから、今回の解析では地盤材料として軸差応力・体積ひずみ～最大主ひずみ関係を双曲線によって近似する Duncan-Chang の非線形弾性モデル<sup>4)</sup>を用いることとした。

Duncan-Chang モデルの基本式を以下に示す。

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{\varepsilon_1}{a + b \cdot \varepsilon_1} \quad \dots\dots\dots(4)$$

$$\varepsilon_1 = \frac{\varepsilon_3}{f + d \cdot \varepsilon_3} \quad \dots\dots\dots(5)$$

ここに、 $\sigma_1$ 、 $\sigma_3$  は主応力、 $\varepsilon_1$ 、 $\varepsilon_3$  は主ひずみ、 $a$ 、 $b$ 、 $f$ 、 $d$  は材料定数を示している。また、これらの定数は次式で与えられる。

$$a = \frac{1}{E_1} ; E_1 = E_0 + K \cdot P_a \left( \frac{\sigma_3}{P_a} \right)^n \quad \dots\dots\dots(6)$$

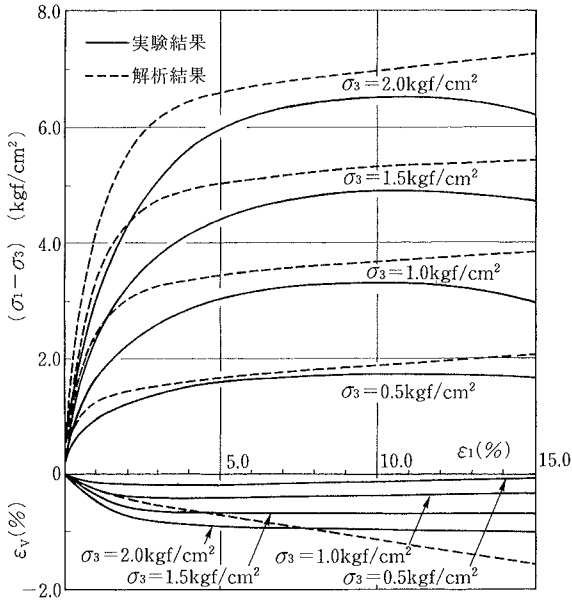


図-5 三軸圧縮試験結果

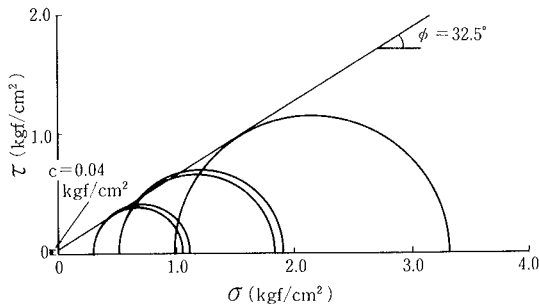


図-6 モールの応力円

$$b = \frac{R_f \cdot (1 - \sin \phi)}{2c \cos \phi + 2\sigma_3 \sin \phi} \quad \dots\dots\dots(7)$$

$$f = \nu_i; \nu_i = G - F \cdot \log\left(\frac{\sigma_3}{P_a}\right) \quad \dots\dots\dots(8)$$

ここに、 $E_0$  は初期接線係数の定数項、 $K$ 、 $n$  は弾性係数に拘束圧依存性を与えるための材料定数、 $P_a$  は大気圧、 $R_f$  は破壊比、 $c$  は粘着力、 $\phi$  は内部摩擦角、 $G$ 、 $F$  はポアソン比に拘束圧依存性を与えるための定数である。

また、鉄筋については一般的によく用いられる弾性トラス部材モデルとした。

#### 4. 材料定数の決定

解析に用いる材料定数は現位置地盤で採取したブロックサンプリング試料と同じ密度、含水比に調整し作成した試料の三軸圧縮試験から求めた。図-5 は三軸圧縮試験結果で求めた応力・体積ひずみ～軸ひずみ関係を示している。また、図-6 はモールの応力円を示しており、この図から  $c=0.04 \text{ kgf/cm}^2$ 、 $\phi=32.5^\circ$  とした。単位体積重量は  $1.41 \text{ tf/m}^3$  である。一方、FEM 解析に用いる材料定数は主に図-7 に示しているフロー図に従って決定した。図-8、9 は三軸圧縮試験から求めた初期接線係数、初期ポアソン比と

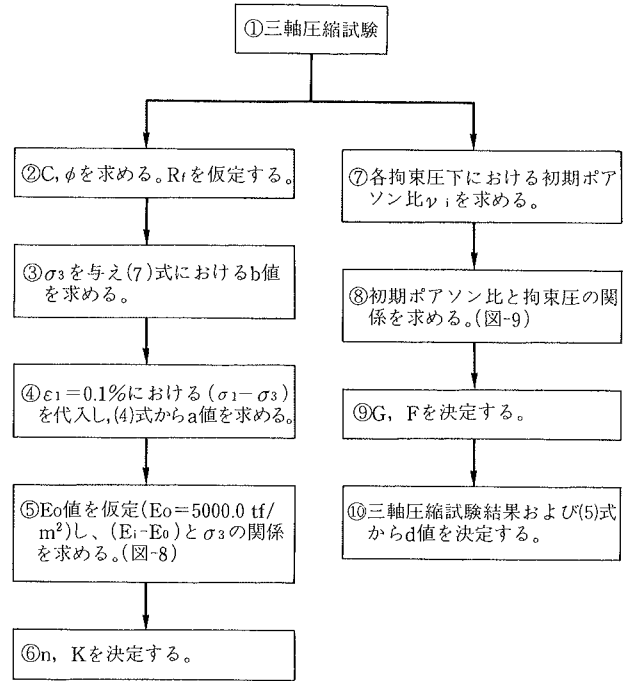


図-7 材料定数決定のためのフロー図

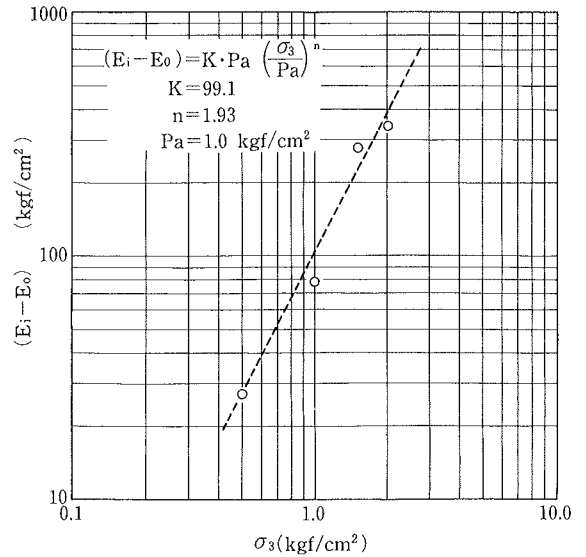


図-8 初期接線係数と拘束圧の関係

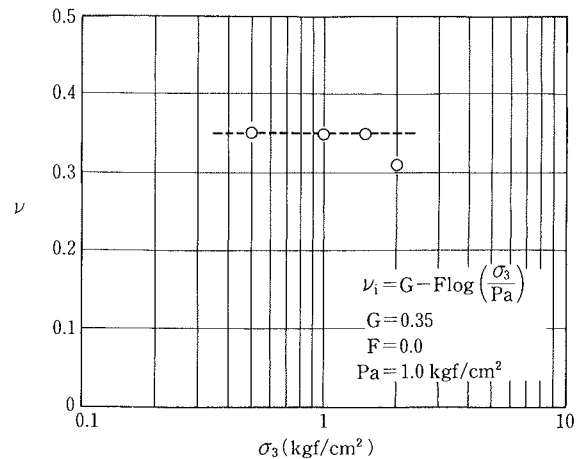


図-9 初期ポアソン比と拘束圧の関係

拘束圧の関係を示しているが、初期ポアソン比については明確な拘束圧依存性が見られないことから拘束圧によらず一定とした。

表-2 は以上の結果得られた現位置地盤の材料定数を示しており、図-5 にはこれらの材料定数を用いて解析した三軸圧縮試験に対するシミュレーション結果も併せて示している。この図から、応力～軸ひずみ関係については実験結果よりも解析結果の方がやや大きめの値となっている。一方、体積ひずみ～軸ひずみ関係については三軸圧縮試験結果において、初期ポアソン比を拘束圧によらず一定としたため、すべての拘束圧で同一の関係となっているが、軸ひずみの比較的小さい範囲ではほぼ実験値の平均的な値となっている。また、現位置載荷実験の解析に当っては図-3 に示している現位置地盤の標準貫入試験結果から N 値の大きい深部（地盤 II）については弾性係数をやや大きめの値に設定している。

5. 実験結果と解析結果

通常、のり面の変形状態などを FEM によって解析する場合にはのり面の奥行き方向のひずみ成分を 0 と仮定する平面ひずみ（二次元解析）問題として考えるのが一般的である。しかし、鉄筋挿入工法のように棒状材料を地盤内に挿入する問題を平面ひずみ問題として解析すると鉄筋は地盤内に敷設された板状材料と同様な取り扱いとなるために実際の補強のり面の構造とは異なるモデルになってしまう。そこで、より実際の補強のり面に合ったモデル化を行なうために FEM による三次元解析を行なった。また、二次元解析と三次元解析の比較を行なうために、通常平面ひずみ解析も併せて行なっている。なお、二次元解析では鉄筋の断面積として各ピッチに相当する断面積（＝鉄筋 1 本の断面積／ピッチ）に換算した値を与えている。

図-10 は FEM 三次元解析に用いたメッシュ図を示しており、図中には以下の種々の検討で用いる検討断面の位置も併せて示している。以後、特に断わらない限り断面と言えばこの検討断面を示すものとする。また、平面ひずみ解析では同メッシュ図の XY 断面について解析を実施した。

図-11 は FEM 三次元解析による全体の変形状態を示している。

5.1 載荷板沈下とのり肩水平変位

図-12 は三次元解析結果のうち、のり肩に最も近い載荷板の沈下と載荷重の関係を示している。この図から、いずれの実験ケースにおいても解析結果と実験結果はよく対応しており、解析結果は実験時の載荷に伴う非線形な沈下挙動をよく表している。また、図-13 は載荷重 3.5, 6.5, 11.0 tf/m<sup>2</sup> における載荷板沈下分布図を示している。この図から、載荷板の沈下分布は最大荷重 11.0 tf/m<sup>2</sup> の場合には実験結果と解析結果でやや異なる分布となっているが、載荷重が 3.5, 6.5 tf/m<sup>2</sup> の場合には解析結果と実験結果はよく対応している。

図-14 は三次元解析結果のうち、のり肩水平変位と載荷重の関係を示している。この図から、実験結果と解析結果

表-2 材料定数表

鉄筋			
断面積	A(m <sup>2</sup> )	5.067×10 <sup>-4</sup>	
弾性係数	E(tf/m <sup>2</sup> )	21,000,000	
地盤			
		地盤 I	地盤 II
弾性係数決定のための定数 (載荷時)	K	99.1	0.0
弾性係数決定のための定数 (除荷時・再載荷時)	K <sub>UR</sub>	198.2	0.0
双曲線の指数	n	1.93	1.0
破壊比	R <sub>f</sub>	0.8	0.8
粘着力	C(tf/m <sup>2</sup> )	0.4	10.0
内部摩擦角	φ(度)	32.5	40.0
大気圧	P <sub>a</sub> (tf/m <sup>2</sup> )	10.0	10.0
ポアソン比非線形のための定数	d	6.0	6.0
ポアソン比非線形のための定数	G	0.35	0.35
ポアソン比非線形のための定数	F	0.0	0.0
引張り破壊時のσ <sub>s</sub>	σ <sub>3T</sub> (tf/m <sup>2</sup> )	0.01	0.01
初期接線係数の定数項	E <sub>0</sub> (tf/m <sup>2</sup> )	5,000.0	200,000.0
せん断破壊時の剛性倍率	α	0.1	1.0
最大ポアソン比	ν <sub>max</sub>	0.45	0.45
単位体積重量	γ t(tf/m <sup>3</sup> )	1.41	1.41

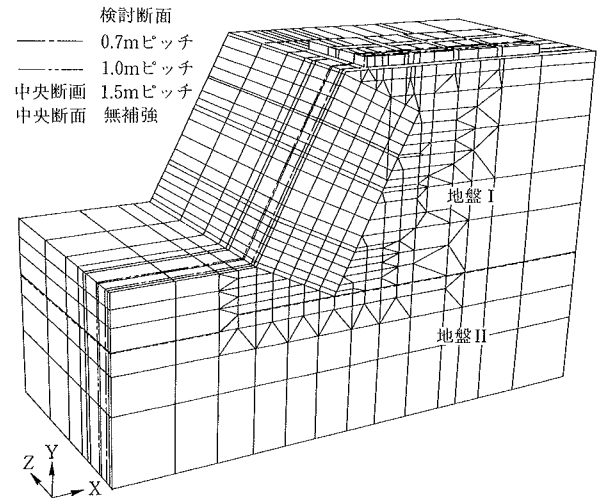


図-10 FEM 解析に用いたメッシュ図

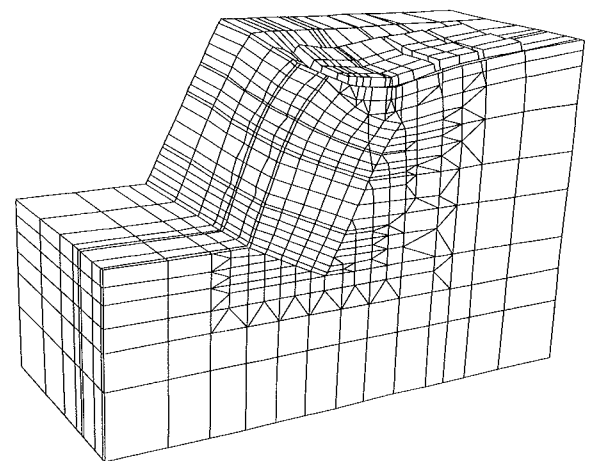


図-11 FEM 三次元解析による変位図 (1.0 m ピッチ, 11.0 tf/m<sup>2</sup>)

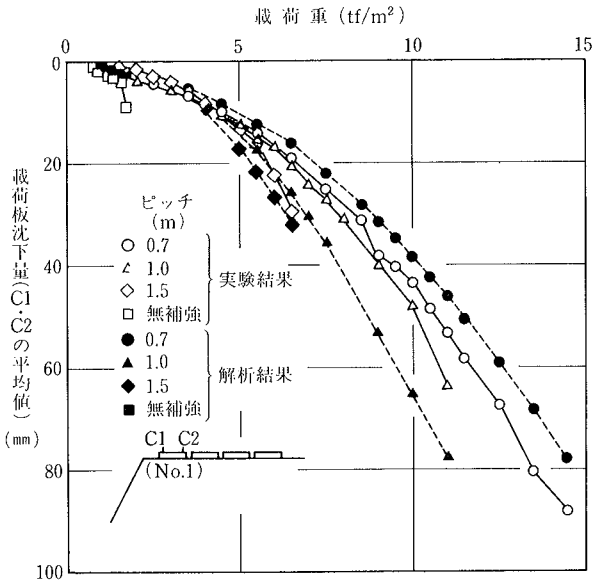


図-12 載荷板沈下と載荷重の関係

はいずれのケースにおいてもよく対応しており、解析結果は実験時の載荷に伴うのり肩水平変位の非線形的な挙動をよく表している。このように、のり表面での鉛直・水平方向の変形挙動は非線形弾性モデルを用いた FEM 三次元解析によってかなり精度よく表現できる。

5.2 のり面変位と地中変位

図-15は 1.0 m ピッチでの載荷重 3.5, 6.5, 11.0  $\text{tf/m}^2$  におけるのり面変位, 地中変位を示している。この図から、実験結果と解析結果は載荷重 3.5, 6.5  $\text{tf/m}^2$  の場合にはのり面変位, 地中変位ともよく対応しているが、最大荷重 11.0  $\text{tf/m}^2$  ではのり尻付近での変位が実験結果よりも解析結果の方がやや小さくなっている。これは、実験では解析で求められた以上にのり尻付近に応力集中が発生し、局所的に大きな変形を生じるためであると考えられる。しかし、全体的な変形分布形状で見た場合、解析結果は実験時の変形状態をよく表していると言える。特に、のり表面の変形は鉄筋を挿入した位置で小さくなっており、鉄筋の効果をよく表している。

5.3 鉄筋の軸力

図-16は三次元解析によって求められた 1.0 m ピッチにおける載荷重 3.5, 6.5, 11.0  $\text{tf/m}^2$  での鉄筋の軸力分布図を示している。この図から、まず軸力の分布形状は上段の鉄筋では実験結果とほぼ同様な山形分布となっているが、軸力は実験結果よりも解析結果の方がかなり小さくなっている。また、下段の鉄筋の場合には解析結果ではのり表面近くで小さく深部で大きくなっているのに対し、実験結果ではその逆の分布形状となっている。これは実験ではのり表面にのり枠を設置しているのに対し、解析ではのり枠を考慮していないためであると考えられる。すなわち、実験ではのり枠を設置しているため、鉄筋にはすべり荷重が確実に伝達され、鉄筋の軸力はのり枠を設置しない場合に比べて大きく、またその分布形状はのり表面近くで大きく深部

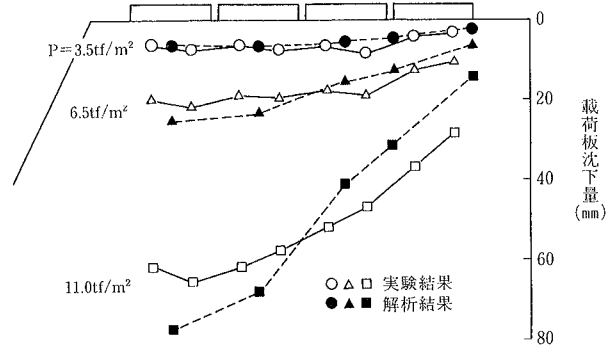


図-13 載荷板沈下分布図 (1.0 m ピッチ, 三次元解析)

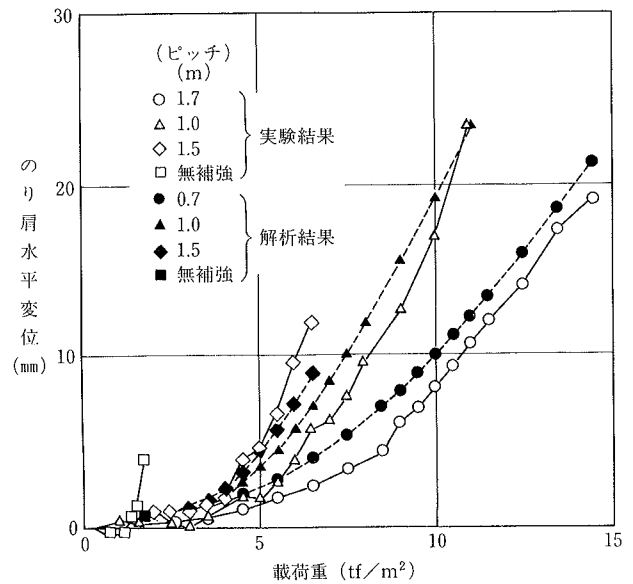


図-14 のり肩水平変位と載荷重の関係 (1.0 m ピッチ, 三次元解析)

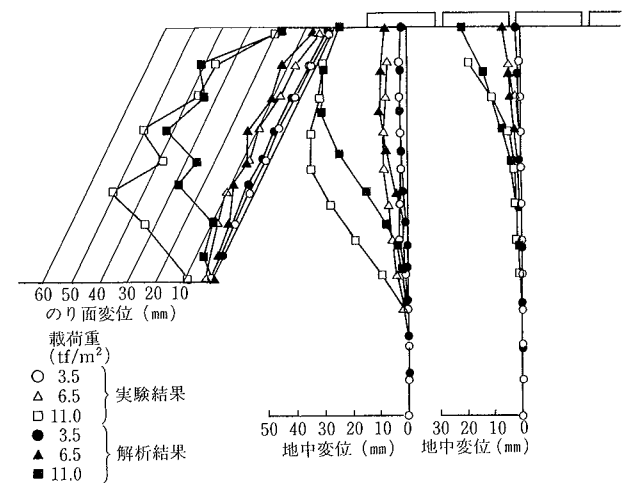


図-15 のり面変位, 地中変位分布図 (1.0 m ピッチ, 三次元解析)

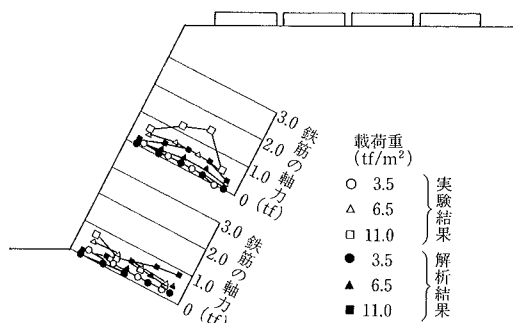


図-16 鉄筋の軸力分布図  
(1.0 m ピッチ, 三次元解析)

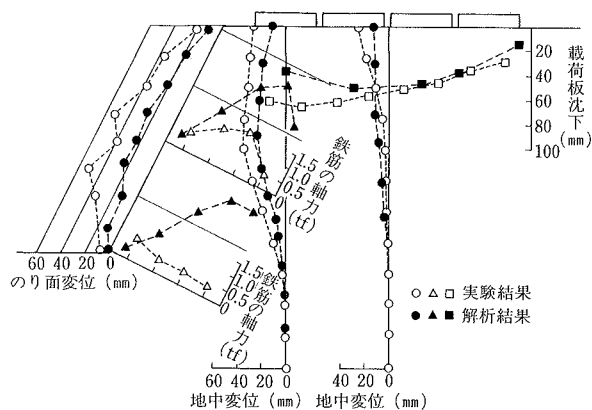


図-17 各種計測結果と解析結果  
(最大荷重時, 二次元解析)

で小さくなったものと考えられる<sup>5)</sup>。

#### 5.4 二次元解析と三次元解析の比較

図-17, 18は二次元および三次元解析で求めた1.0 m ピッチでの最大荷重段階(11.0 tf/m<sup>2</sup>)におけるのり面変位, 地中変位, 載荷板沈下, 鉄筋の軸力分布を示している。これらの図から, 二次元解析の場合には三次元解析に比べ全体的に変形が小さく, 鉄筋の軸力はかなり大きくなっており, こういった棒状材料を用いたのり面対策工法を解析する場合には二次元解析よりも三次元解析の方が実験結果によく対応するようである。

#### 5.5 安全率分布およびせん断ひずみ分布

##### 5.5.1 鉄筋の補強効果について

図-19, 20は三次元解析で求めた無補強時, 1.0 m ピッチにおける載荷重1.5 tf/m<sup>2</sup>での安全率分布図を示している。この図から, 同一の安全率で見た場合, 補強時の範囲は無補強時のそれよりも小さくなっており, 特に, 安全率が1.2以下の範囲はかなり小さくなっている。この解析結果から, のり面は鉄筋を挿入することによって明らかに安定化していることが分かる。また, 図-21は図-19に示している要素①, ②での無補強時および1.0 m ピッチにおけるモールの応力円を示している。この図から, 補強時の拘束圧 $\sigma_3$ は無補強時のそれに比べいずれの要素においても大きくなっており, 補強したのり面では局所的に拘束効果が増加していることが分かる。

次に, 図-22, 23は無補強時, 1.0 m ピッチにおける載荷重1.5 tf/m<sup>2</sup>でのせん断ひずみ分布図を示している。これらの図から, せん断ひずみ $12.0 \times 10^{-2} \%$ 以上の範囲は無補強時に比べ1.0 m ピッチの場合にはかなり狭くなっている。特に, 鉄筋周辺部でのせん断ひずみが明らかに小さくなっており, 鉄筋が地盤内に発生するせん断ひずみを抑制していることが分かる。また, 同じ計算条件で求めた安全率分布(図-19, 20)と比較すると, せん断ひずみと安全率分布はやや異なる分布形状を示している。これは今回の解析に用いた材料モデルの応力~ひずみ関係が双曲線によって近似された非線形関係で表現されているためである。

以上のことから, のり面に挿入された鉄筋は地盤内のせん断ひずみを抑制するとともに地盤内の拘束効果を増加し, その結果のり面を安定化させるということがよく理解できる。

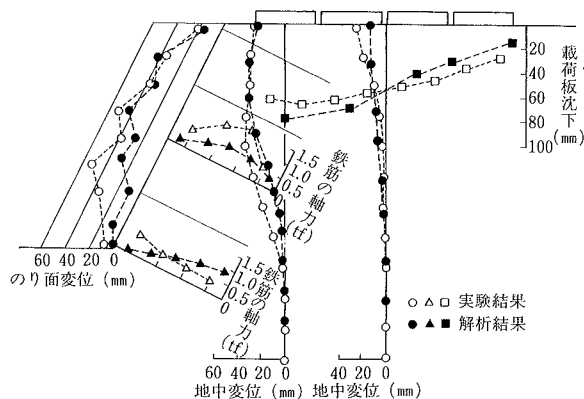


図-18 各種計測結果と解析結果  
(最大荷重時, 三次元解析)

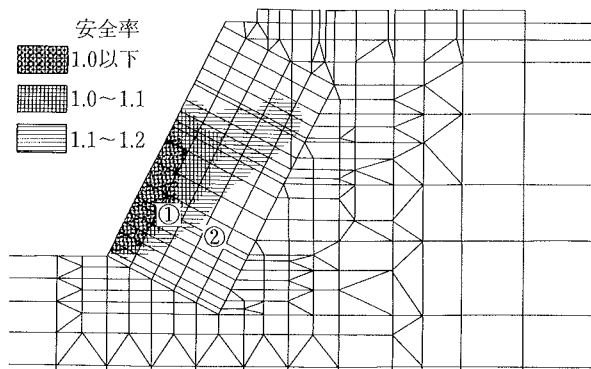


図-19 安全率分布図(無補強時, 1.5 tf/m<sup>2</sup>)

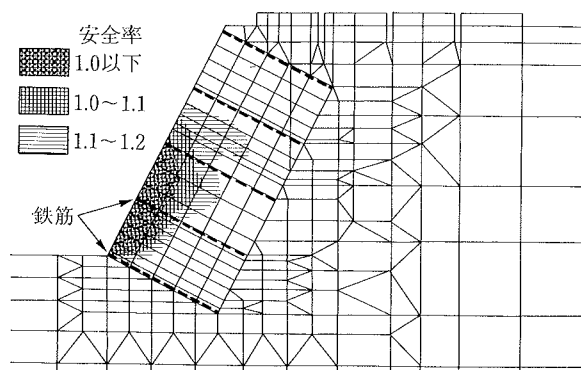


図-20 安全率分布図(1.0 m ピッチ, 1.5 tf/m<sup>2</sup>)

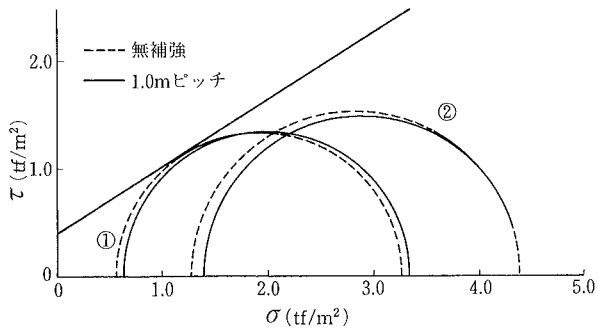


図-21 鉄筋による拘束効果について

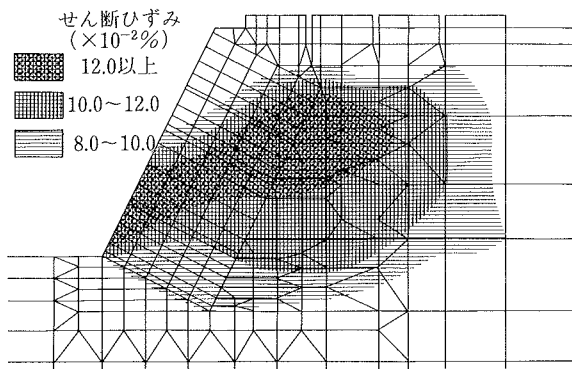


図-22 せん断ひずみ分布図 (無補強時, 1.5 tf/m²)

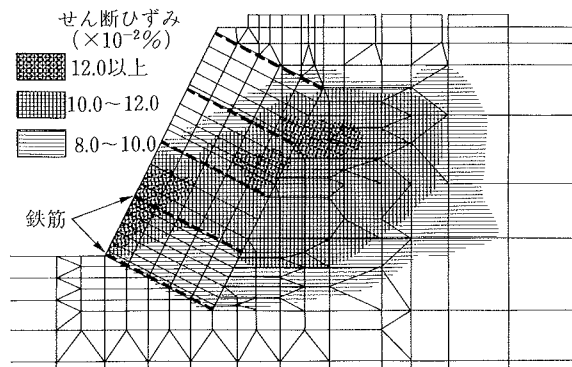


図-23 せん断ひずみ分布図 (1.0 m ピッチ, 1.5 tf/m²)

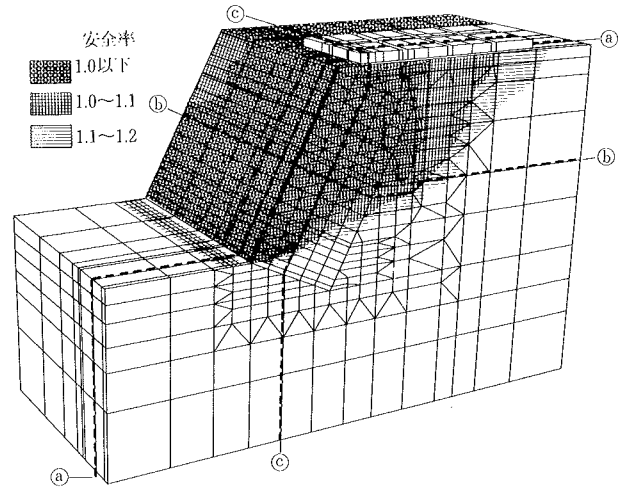


図-24 三次元安全率分布図 (1.0 m ピッチ, 6.5 tf/m²)

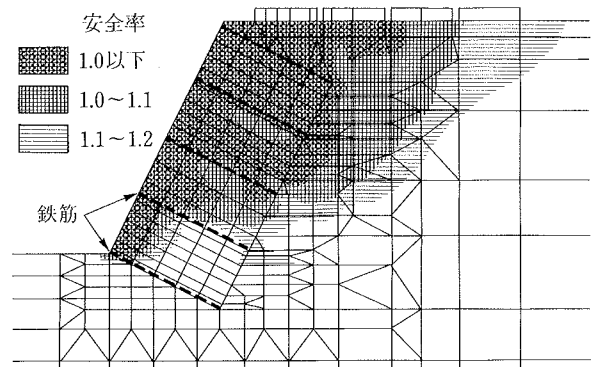


図-25 安全率分布図 ((a)-(a)断面)

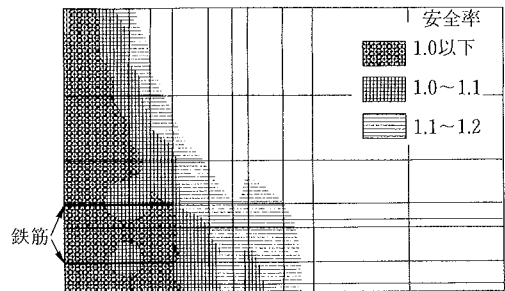


図-26 安全率分布図 ((b)-(b)断面)

**5.5.2 鉄筋の三次元的効果** 図-24は三次元解析で求めた1.0 mピッチにおける載荷重6.5 tf/m²での安全率分布を三次元的に示したものである。図-25~27は図-24に示している各断面での安全率分布図を示しており、図中には鉄筋の挿入位置も併せて示している。これらの図から、明らかに鉄筋周辺での安全率が局所的に高く、鉄筋間では安全率がやや小さくなっており、三次元的な鉄筋の補強効果がよく分かる。

**5.5.3 ピッチの影響** 図-28, 29は三次元解析のうち載荷重6.5 tf/m²での1.5, 0.7 mピッチにおける安全率分布図を示している。これらの図および図-25から、鉄筋の挿入ピッチが小さいほど安全率の低い範囲が狭くなってお

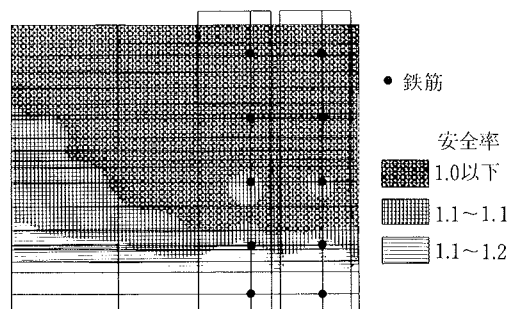


図-27 安全率分布図 ((c)-(c)断面)

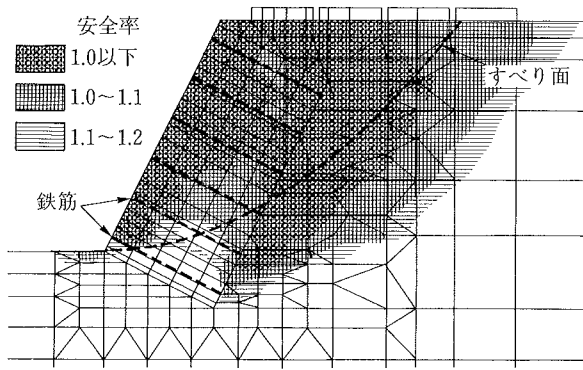


図-28 安全率分布図  
(1.5 m ピッチ, 6.5 tf/m<sup>2</sup>, 三次元解析)

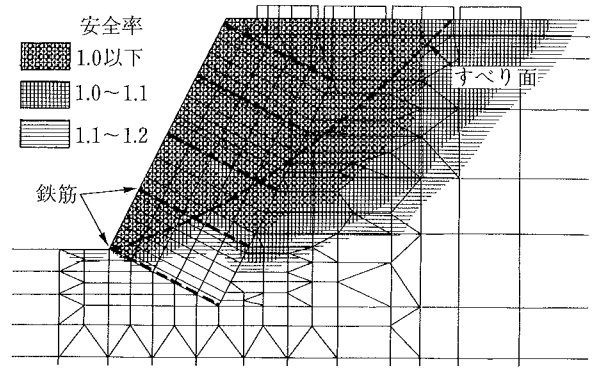


図-30 安全率分布図  
(1.0 m ピッチ, 11.0 tf/m<sup>2</sup>, 三次元解析)

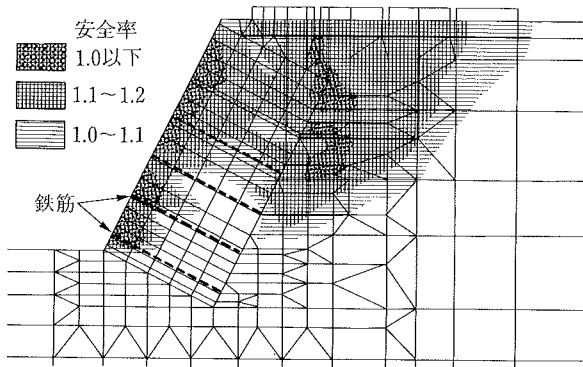


図-29 安全率分布図  
(0.7 m ピッチ, 6.5 tf/m<sup>2</sup>, 三次元解析)

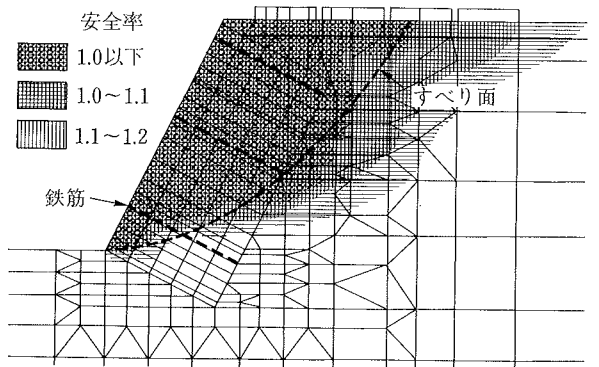


図-31 安全率分布図  
(0.7 m ピッチ, 14.5 tf/m<sup>2</sup>, 三次元解析)

り、鉄筋の挿入ピッチが小さいほど補強効果が大きいことが分かる。特に、0.7 m ピッチでは鉄筋を挿入した部分の安全率が他のケースに比べ高くなっており、鉄筋を挿入した範囲が一体化している様子がよく分かる。

5.5.4 破壊領域とすべり面 図-30, 31は1.0 m, 0.7 m ピッチにおける最大荷重時での安全率分布図を示している。これらの図および図-28には実験時の各種計測結果から求めたすべり面も併せて示しており、いずれも実験で求めたすべり面と解析で求めた安全率1.0以下(破壊領域)の範囲はよく対応している。

## 6. まとめ

この報告では鉄筋挿入工法における地盤の変形や破壊予測へのFEM解析の適用性および解析結果をもとに鉄筋の補強効果について検討を行なった。

その結果を以下にまとめて示す。

① FEM三次元解析では荷重に伴う荷重板の沈下、のり肩水平変位、地中変位やのり面変位の非線形挙動を精度よく表現できることが明らかとなった。

② FEM三次元解析で求めた安全率1.0以下(破壊領

域)の範囲と実験で求めたすべり面とはよく対応する結果が得られた。

③ 鉄筋が地山内のせん断ひずみを抑制するとともに拘束圧を増加させて地盤を安定化させるという鉄筋の補強効果を三次元解析によって明らかにすることができた。

## 参考文献

- 1) 平間, 鳥井原, 山本: 補強ボルト引き抜き時の影響範囲の把握, 土木学会第42回年次学術講演会, III, p. 874~875, (1987)
- 2) 平間, 鳥井原, 山本: 鉄筋で補強した斜面の室内模型実験(その1), (その2), 第23回土質工学研究発表会, p. 1715~1722, (1988)
- 3) 八戸, 大石, 鳥井原, 山本: 鉄筋で補強した斜面(アースネイリング工法)の現位置載荷実験(その1), (その2), 第24回土質工学研究発表会, p. 1525~1532, (1989)
- 4) Duncan, J. M. and Chang, C. Y.: Nonlinear analysis of stress and strain in soil, proc. of ASCE, Vol. 96, No. SM5, p. 1629~1653, (1970)
- 5) 鳥井原, 山本, 平間: 鉄筋で補強した斜面の室内模型実験(その4), 第25回土質工学研究発表会, p. 2059~2060, (1990)