

地すべり抑止杭の抑止機構に関する研究

山本 彰 鳥井原 誠
平間 邦 興

Study on Preventive Mechanism of Landslide Stabilizing Piles

Akira Yamamoto Makoto Toriihara
Kunioki Hiram

Abstract

A series of model tests and FEM analyses were carried out to discuss the preventive mechanism of landslide stabilizing piles in this paper. The model tests were direct shear tests with spacings between piles, arrangements of piles, connected conditions of pile heads, and stiffness of bearing stratum being varied. An extended Drucker-Prager Model, interface and gap elements were used in three-dimensional elasto-plastic analysis.

A number of conclusions were obtained as follows: ① As the number of piles is constant, an arrangement in two rows with pile heads connected is best for stabilities of landslide and piles. ② In case pile heads are not connected, a single-row arrangement is better than two rows. ③ The displacement and stress condition around piles on shear conditions can be expressed well in three-dimensional elasto-plastic analysis.

概要

この研究は地すべり抑止杭の抑止メカニズムを明らかにすることを目的として実施したモデル地盤のせん断試験、およびその解析結果についてまとめたものである。せん断試験では地盤中に設置した模型杭の間隔、配置、杭頭連結の有無、不動層の剛性などの条件を変化させている。解析は三次元弾塑性解析であり、土を拡張 Drucker-Prager 要素でモデル化し、移動層と不動層の間には Interface 要素を用いている。

その結果、得られた成果は以下の通りである。① 杭の打設本数が同一の場合、抑止杭はすべり全体の安定性および杭の安定性上、千鳥配置で杭頭を連結するのが最も効果的である。② 杭頭を連結しない場合には千鳥配置よりも列配置の方が杭の安定性上有利である。③ 三次元弾塑性解析によってせん断状態下にある抑止杭周辺の変形や応力状態をよく表現できる。

1. はじめに

我が国の地すべり危険箇所数は5,800箇所、総面積は26万 haにも及ぶことから、毎年のように地すべりによる被害が報告されており、各種地域開発や高速道路の建設などの土工事においても地すべりによって工期延長や設計変更を余儀なくされることがある。このような地すべりに対する対策工法の一つに抑止杭工法があり、全国の大規模地すべり地の30%以上に適用されている。

抑止杭は待ち受け型の対策工法であることから、その効果は杭周辺の地盤が変状を生じて初めて発揮される。すなわち、抑止杭の効果は地盤の変形に伴う杭と地盤の相互作用の結果発揮される。このため、抑止杭では杭の配置、ピッチ、杭頭連結の有無、移動層や不動層の剛性、杭の剛性や幅などの要因が杭に作用する圧力、杭の抑止効果、杭やすべり全体の安定性に大きな影響を与える。

そこで、この研究では大型一面せん断試験装置を用いた抑止杭のせん断試験と試験結果に対するシミュレーション解析を実施し、抑止杭の抑止メカニズム、抑止杭の配置の効果、杭頭の連結効果などについて検討している。

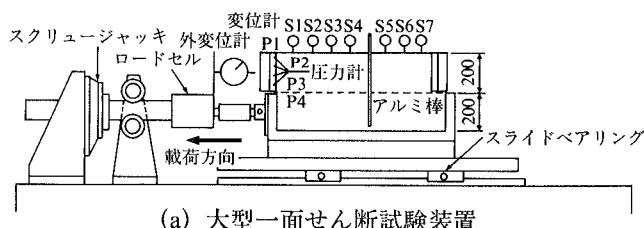
2. 実験方法

図-1は抑止杭のせん断試験に用いた大型一面せん断試験装置(下部可動型)を示しており、せん断箱の寸法は90 cm(長さ)×30 cm(幅)×40 cm(高さ)である。実験に用いた試料は0.425 mmのふるいを通した鬼怒川砂とカオリン粘土を重量比7:3の割合で混合し、含水比が13.5%になるように調整したものである。表-1はその物性値を示している。供試体は締固め後の層厚が5.0 cmになるように、ランマーで突き固め作成した。実験に用いた模型杭は10 mm(幅)×7 mm(厚さ)×500 mm(長さ)の矩形のアルミ棒であり、実験に当たっては図-1に示すようにせん断面を貫くように配置した。なお、模型杭の決定に当たっては、杭の変形モードについての相似則を満足するよう厚さと根入れ長さを決定している。表-2は今回実施した実験ケースを示している。

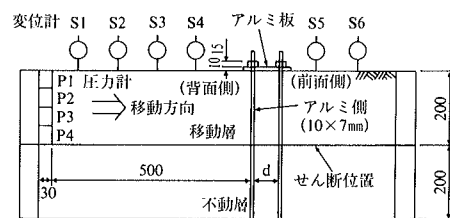
3. 実験結果

3.1 せん断力、抑止力とせん断変位の関係

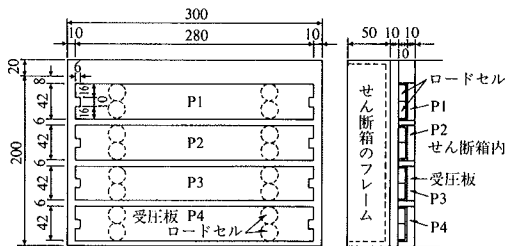
図-2はCase1~4におけるせん断力とせん断変位の関係を示している。この図から、せん断力はせん断変位



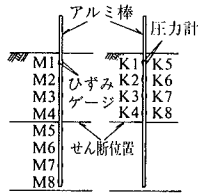
(a) 大型一面せん断試験装置



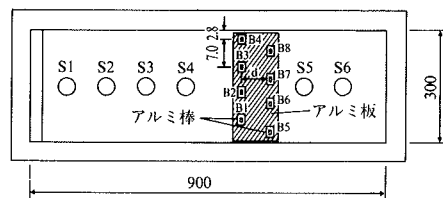
(d) 断面図 (杭頭連結の実験ケース)



(c) 上部せん断箱の圧力計設置状況



(b) ひずみゲージ、圧力計の配置



(e) 平面図 (杭頭連結の実験ケース)

図一 実験概要

表一 混合土の物性値

細粒分 (%)	69.9
シルト分 (%)	15.9
粘土分 (%)	15.2
土粒子の密度	2.709
最大乾燥密度 (g/cm ³)	1.913
最適含水比 (%)	13.5
液性限界 (%)	21.4
単位体積重量 (N/cm ³)	1.9×10 ⁻²
内部摩擦角 (度)	27.0
粘着力 (kPa)	45.0

表二 実験ケース一覧

実験ケース	基盤層	移動層	模型杭本数 (本)	配置	縦ピッチ (cm)	杭頭連結
1	土	土	—	—	—	—
2	土	土	2	列	0	無
3	土	土	4	列	0	無
4	土	土	8	列	0	無
5	土	土	8	千鳥	3.5	無
6	土	土	8	千鳥	7.0	無
7	土	土	8	千鳥	14.0	無
8	土	土	8	千鳥	3.5	有
9	土	土	8	千鳥	7.0	有
10	石コウ	土	—	—	—	—
11	石コウ	土	8	列	0	無

5 mm 程度までは杭の有無、本数に係わらずほぼ同じ増加傾向を示しているが、Case1 の場合にはせん断変位 5 mm 付近でピークに達した後軟化して残留強度に漸近するのに対し、他の実験ケースではいずれもせん断変位 5 mm 以降も増加する傾向を示している。これらのことから、杭の抑止効果が発揮されるせん断変位レベルと土のピーク強度が発揮されるせん断変位レベルは必ずしも一致しないことが分かる。

次に、図一 3 は杭の抑止力 {= (杭を配置した場合のせん断力) - (杭を配置しない場合のせん断力)} とせん断変位の関係を示している。この図から、Case2~4 では Case4 の抑止力が最も大きく、杭の本数が多いほど抑止力は大きくなっている。また、Case9 の抑止力は Case6 の場合に比べ 25% 程度増加しており、杭の配置が同一の場合杭頭を連結した方が抑止力は大きくなる事が分かる。一方、Case11 の抑止力は Case4 に比べ 80% 程度大きく、特に小さなせん断変位段階での増加が顕著となっており、地盤の変状が同じであっても杭の抑止力は不動層の剛性が高いほど大きく、変形が小さな段階においても抑止効果がよく発揮されることが分かる。

3.2 杭に作用する圧力

3.2.1 杭に作用する圧力とせん断変位の関係 図一 4 は Case4 における杭に作用する圧力とせん断変位の関

係を示している。この図から、せん断変位の小さい段階では杭に作用する圧力は小さく、杭全体に渡って作用している。しかし、せん断変位の増加に伴い杭に作用する圧力は大きく増加し、特にすべり面に近い K4 の圧力はせん断変位 15 mm 以降急激に増加している。

そこで、図一 5 は各ケースの杭に作用する圧力 K4 のせん断変位に伴う変化を示している。この図から、Case2~4 に着目すると Case4 の場合には Case2, 3 に比べ K4 の圧力は小さく、半分程度となっている。これは杭本数が多くなると (水平ピッチが小さくなると) 隣接する杭が相互に干渉し合うためであり、これが抑止杭における群杭効果であると考えられる。一方、Case6 の K4 の圧力は杭本数の等しい Case4 の 2 倍程度となっており、むしろ杭本数が半分の Case3 に近い値となっている。これは千鳥配置では杭の打設本数が同一の場合、列配置に比べ実質的に隣接する杭の水平ピッチが大きくなるためである。また、Case11 の場合には他のケースに比べせん断変位の小さい段階から大きな圧力が作用している。これは不動層の剛性が高いほど杭の変形が抑制され、杭と移動層との相対的な変位量が大きくなるためである。しかし、杭の抑止効果が最も発揮されるのはせん断変位 20 mm 付近となっており、不動層が土の場合と同様にならずせん断変位の進んだ段階であることがわかる。

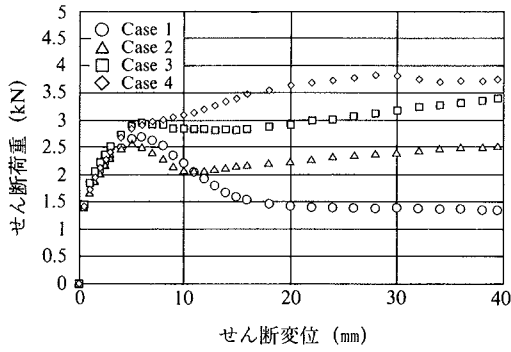


図-2 せん断荷重とせん断変位の関係

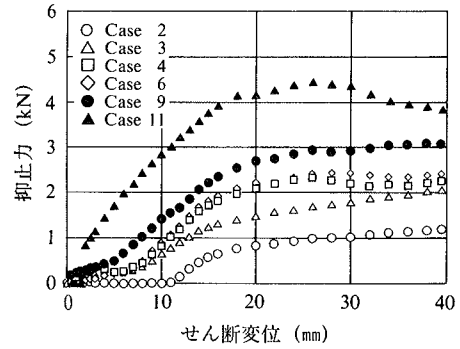


図-3 抑止力とせん断変位の関係

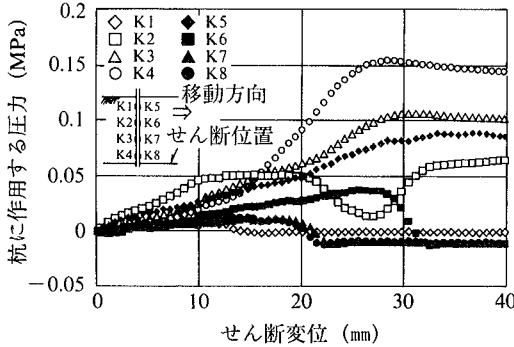


図-4 杭に作用する圧力とせん断変位の関係 (Case4)

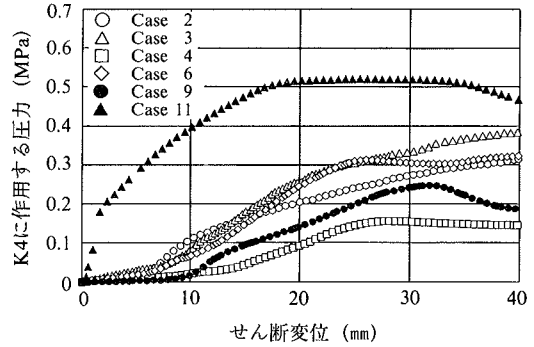


図-5 杭に作用する圧力 K4 とせん断変位の関係

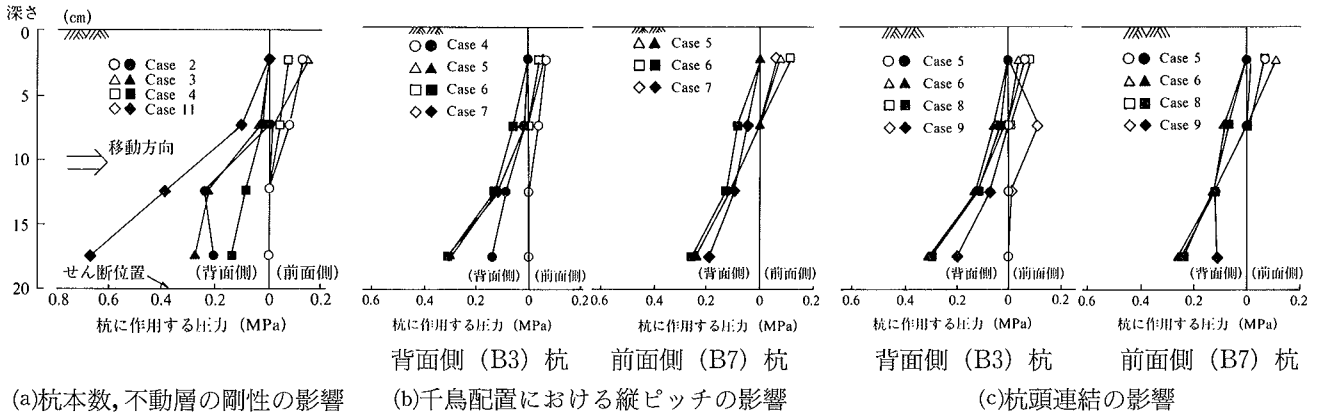


図-6 杭に作用する圧力分布図 (せん断変位 25 mm)

3.2.2 杭に作用する圧力分布 図-6 (a)～(c) はせん断変位 25 mm 段階において杭に作用する圧力の分布を示しており、杭の背面側に作用する圧力はすべり面付近を底面とする三角形分布、杭の前面側に作用する圧力は地表面付近を底面とする逆三角形分布となっている。これらのことから、すべり土塊が一体となって移動する場合、すべり荷重は主に抑止杭のすべり面付近に作用し、杭はその荷重の一部を杭頭あるいは地表面に近い部分で前面側に伝達するものと考えられる。

また、図-6 (a) から、Case4 の背面側および前面側の圧力は抑止杭の群杭効果によって Case2, 3 のそれに比べいずれも小さな値となっている。一方、Case11 の場合の杭背面側には不動層の剛性の違いから Case4 の場合の 2～4 倍程度の圧力が作用する結果となっている。

次に、図-6 (b) から、B3 杭に作用する圧力は Case4 の場合が最も小さくなっているものの、Case5～7 ではほ

ぼ同じ圧力分布を示しており、縦ピッチの影響はほとんど見られない。また、いずれのケースにおいても杭に作用する圧力は B3 杭よりも B7 杭の方が小さくなっており、千鳥配置では前面側の杭よりも背面側の杭に大きな圧力が作用することがわかる。

さらに、図-6 (c) から、Case8, 9 では Case5, 6 に比べ B3 杭の背面側に作用する圧力は小さく、前面側の圧力は大きくなる傾向を示している。これは杭頭を連結することによって前面側の杭の変形が抑制され、杭間の土塊が拘束されるためである。

3.2.3 杭配置と抑止力、杭の作用荷重について 図-7 はせん断変位 25 mm 段階における抑止力、杭一本に作用する荷重を各実験ケース毎にまとめたものである。この図から、杭本数の少ない Case2, 3 では非常に大きな荷重が杭に作用しており、水平ピッチを大きくすると地盤変状に伴うすべり荷重が杭に集中しやすくなるもの

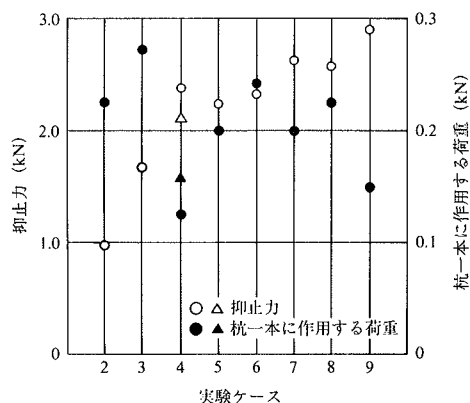


図-7 各実験ケース毎の抑止力, 杭の荷重 (せん断変位 25 mm)

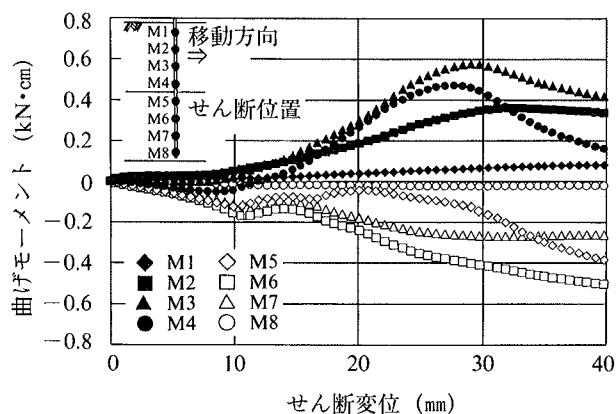
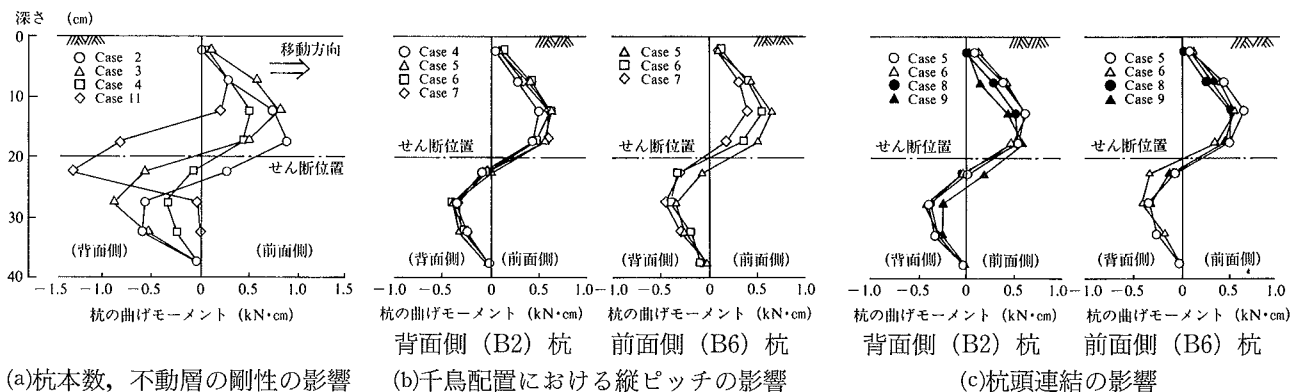


図-8 杭の曲げモーメントとせん断変位の関係(Case4)



(a)杭本数, 不動層の剛性の影響

(b)千鳥配置における縦ピッチの影響

(c)杭頭連結の影響

図-9 杭の曲げモーメント分布図 (せん断変位 25 mm)

と考えられる。また, Case4~9では杭本数が等しいにも係わらず杭頭を連結した Case8, 9では抑止力が大きく, 杭に作用する荷重は小さくなっている。このことから, 同一本数の抑止杭を打設する場合, 千鳥配置とし杭頭を連結するのがすべり全体の安定性および杭の安定性上最も効果的であり, 縦ピッチはある程度大きくする方が有利であるといえる。次に Case4と Case5~7を比較すると, Case4よりも Case5~7の杭に作用する荷重の方が明らかに大きくなっており, 杭頭を連結しない場合には千鳥配置よりも列配置の方が杭の安定性上有利であると考えられる。

3.3 杭の曲げモーメント

図-8は Case4の場合の杭の曲げモーメントとせん断変位の関係を示しており, 杭の曲げモーメントはせん断変位がある程度進行した段階で生じている。したがって, 図-4, 8から地盤の変形がある程度進行した段階で抑止杭に圧力が作用し, その結果として杭の曲げ抵抗が発揮されることがわかる。これが杭と地盤の相互作用によって抑止効果が発揮されるという待ち受け型受動杭の抑止機構の特徴である。

図-9(a)~(c)は各実験ケースにおけるせん断変位 25 mm段階での曲げモーメント分布を示しており, 図-9(a)から杭に作用する圧力と同様に Case11の場合の曲げモーメントが最も大きく, Case4のそれの2.6倍程度となっている。また, 図-9(b)から, B2杭については Case4の場合の曲げモーメントが最も小さくなっている

ものの, 他のケースについては縦ピッチの影響はほとんど見られない。一方, B6杭については縦ピッチが大きくなるほど曲げモーメントのゼロとなる点が地表面側に移行し, 曲げモーメントの値は小さくなる傾向を示している。次に, 図-9(c)から, Case8, 9の曲げモーメントは Case5, 6のそれに比べ小さくなっており, このことから千鳥配置では杭頭を連結した方が杭の安定性上有利であることがわかる。

3.4 せん断箱の圧力および地表面変位分布

図-10はせん断変位 25 mm段階におけるせん断箱に作用する圧力および地表面変位分布 (鉛直方向)を示している。この図から, Case1, 6ではせん断箱に作用する圧力が長方形分布となっているのに対し, Case9, 11ではすべり面付近での圧力が大きく, 三角形に近い分布形状となっている。これは杭の抑止効果によって杭背面側移動層内の土の変形が抑制され, すべり面近くでの水平方向の応力が増加するためであり, 抑止効果が大きいほどこの傾向は強くなるものと考えられる。一方, 地表面変位については, Case11が最も大きく Case9, 6, 1の順で小さくなっており, せん断箱に作用する荷重が大きいほど, すなわち杭背面側の移動層内の水平方向の応力が大きいほど地表面隆起は大きくなっている。

4. シミュレーション解析

4.1 モデル化

図-11は解析に用いたメッシュ図を示しており, メッ

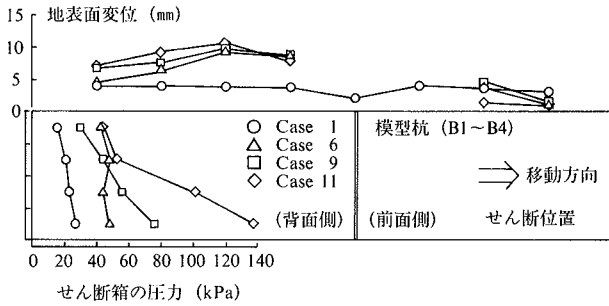


図-10 せん断箱に作用する圧力，地表変位分布図 (せん断変位 25 mm)

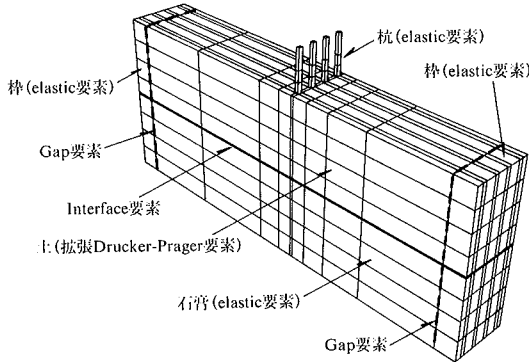


図-11 メッシュ図

シュ図は中央断面で2分した片側について作成した。解析は実験ケースのうち Case10, 11 の2 ケースについて実施している。せん断箱，模型杭および石膏は線形弾性体要素，土は砂とカオリン粘土の混合土であり，不飽和状態で試験に用いていることから土の摩擦抵抗，粘着抵抗による強度を考慮できる拡張 Drucker-Prager 要素でモデル化している。また，土とせん断箱，および土と模型杭の間は Gap 要素によって，土と石膏の間のせん断面は Interface 要素によって不連続性をモデル化している。

4.2 材料定数の決定

(1) 拡張 Drucker-Prager 要素 拡張 Drucker-Prager 要素の降伏関数 $f(\sigma_{ij}, d)$ を以下に示す。

$$f(\sigma_{ij}, d) = t - p \tan \beta - d \quad \dots\dots\dots(1)$$

$$d = \left(1 - \frac{1}{3} \tan \beta\right) \sigma_c^0 (e^p) \quad \dots\dots\dots(2)$$

$$t = \frac{q}{2} \left[1 + \frac{1}{K} - \left(1 - \frac{1}{K}\right) \left(\frac{r}{q}\right)^3\right] \quad \dots\dots\dots(3)$$

ここに， p ， q ， r は応力の一次，二次，三次の不変量に対応するスカラー量である。 $\sigma_c^0 (e^p)$ は一軸圧縮応力を示しており，相当塑性ひずみ e^p との関係によって図-12のように与えられる。 K は中間主応力の影響を考慮するパラメータ， β は土の内部摩擦角に対応するパラメータであり，図-13から $K=0.786$ ， $\beta=46.93^\circ$ と求められる。

また，ダイレイタンシー角 $\psi = \left(\frac{d e^p}{d e^{pv}}\right)$ は三軸圧縮試験結果から $\psi=9.0^\circ$ と求められる。

(2) Gap 要素，Interface 要素 Gap 要素，Interface 要素の材料定数は改良型一面せん断試験 (小型) 装置を用いた摩擦試験によって求めた。

表-3 は以上の結果得られた材料定数一覧を示している。図-14は土の一軸圧縮試験結果とそのシミュレーション

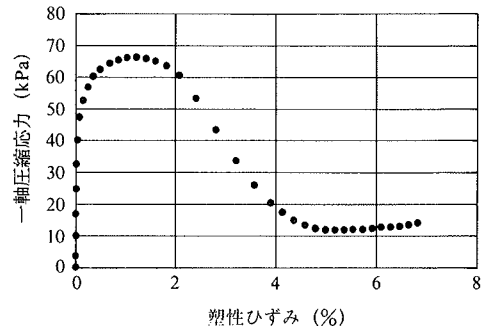


図-12 一軸圧縮応力と塑性ひずみの関係

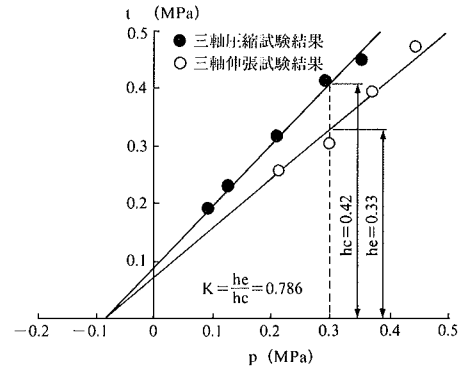


図-13 t~p 関係

表-3 材料定数一覧

土 (拡張 Drucker-Prager 要素)	単位体積重量 (N/cm ³)	1.9×10 ⁻²
	弾性係数 E (MPa)	4.5
	ポアソン比 ν	0.275
	K	0.786
	β	46.93
	ダイレイタンシー角 ψ (°)	9.0
	hardening parameter d	図-12
土と石膏の境界 (Interface 要素)	摩擦係数	0.7
	粘着剛性 (MPa/cm)	5.0
石膏 (線形弾性体要素)	単位体積重量 (N/cm ³)	1.57×10 ⁻²
	弾性係数 E (MPa)	830
	ポアソン比 ν	0.26
	粘着力 C (MPa)	2.0
	内部摩擦角 ϕ (度)	18.0
模型杭 (アルミ棒) (線形弾性体要素)	単位体積重量 (N/cm ³)	7.86×10 ⁻²
	弾性係数 E (MPa)	2.1×10 ⁵
	ポアソン比 ν	0.28
せん断箱 (銅製) (線形弾性体要素)	単位体積重量 (N/cm ³)	2.69×10 ⁻²
	弾性係数 E (MPa)	7.2×10 ⁴
	ポアソン比 ν	0.34
土と模型杭の境界 (Gap 要素)	摩擦係数	0.444
	粘着剛性 (MPa/cm)	5.0
土とせん断箱の境界 (Gap 要素)	摩擦係数	0.225
	粘着剛性 (MPa/cm)	5.0

ン解析結果を示しており，両者はよく対応している。

4.3 解析結果

図-15は解析で求めた Case10 の場合のせん断荷重とせん断変位の関係を示しており，せん断変位の小さい段階ではやや実験結果の方が大きくなっているものの，全

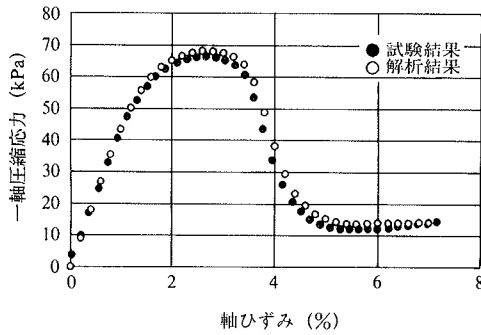


図-14 一軸圧縮試験結果とシミュレーション解析結果の比較

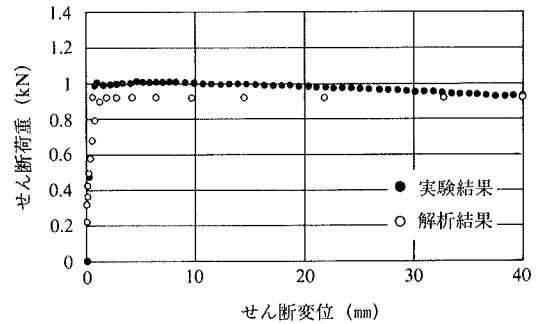


図-15 せん断荷重とせん断変位の関係 (Case10)

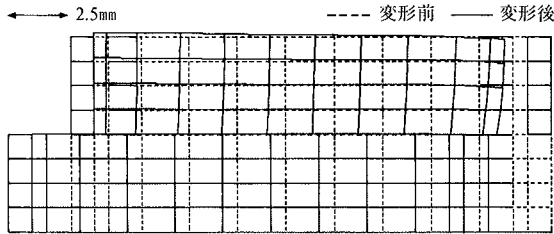


図-16(a) 変形図 (Case10)

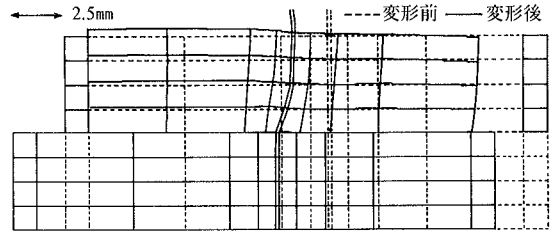


図-16(b) 変形図 (Case11)

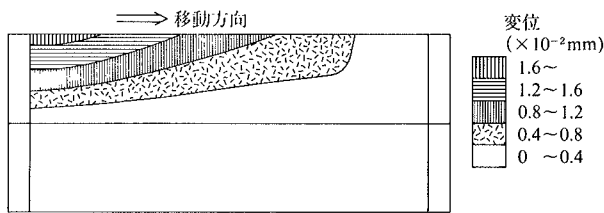


図-17(a) 垂直方向の変位分布図 (Case10)

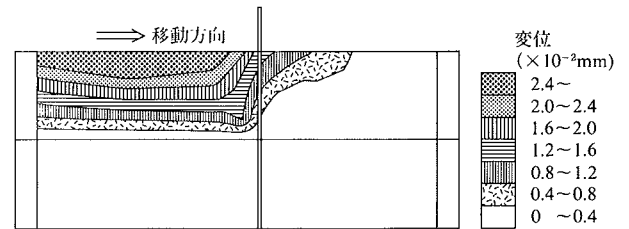


図-17(b) 垂直方向の変位分布図 (Case11)

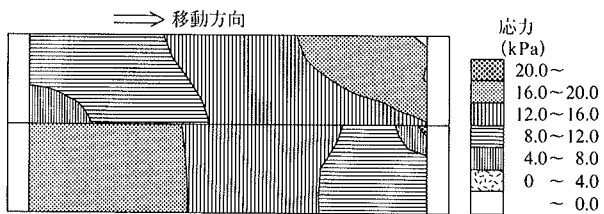


図-18(a) 水平方向の応力分布図 (Case10)

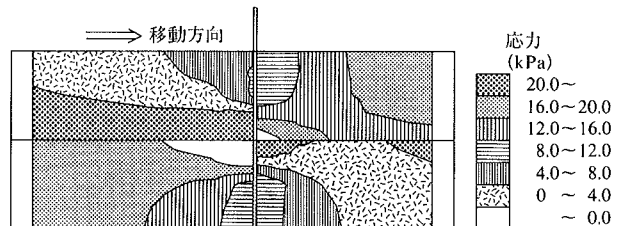


図-18(b) 水平方向の応力分布図 (Case11)

体的に解析結果と実験結果はよく対応している。

図-16は解析で得られた Case10, Case11 のせん断変位約 2.5 mm 段階における変形図を示しており、供試体のせん断状態やせん断に伴う杭の変形状態がよく表されている。また、図-17は解析で得られた垂直方向の変位分布を示しており、杭を設置した場合には杭の抑止効果によって、杭背面側で地表面が大きく隆起しており、図-10の変形モードとよく対応しているといえる。次に、図-18は解析によって得られた水平方向の応力分布を示しており、この図から Case10 の場合の水平方向の応力は載荷側からせん断方向に向かって順次応力が小さくなっていくが、深さ方向については移動層内、不動層内ではほぼ一定となっている。一方、Case11 の場合には杭の抑止効果によって、杭背面側の移動層内には大きな水平応力が発生しており、水平応力はすべり面近くで大きく、地表面方向に順次小さくなっていく。また、杭の前面側

では地表面近くに杭の変形に伴う圧縮応力が発生している。これらのシミュレーション結果によって得られた杭周辺の応力状態は図-6, 10の実験結果とよく対応しており、杭を設置したモデル地盤のせん断状態がよくシミュレートされているといえる。

5. おわりに

この研究では模型杭を設置したモデル地盤のせん断試験とそのシミュレーション解析を行った。その結果、①抑止杭はすべり全体の安定性および杭の安定性上、千鳥配置で杭頭を連結するのが最も効果的である。②杭頭を連結しない場合には千鳥配置よりも列配置の方が杭の安定性上有利となる。③拡張 Drucker-Prager 要素、Interface 要素を用いた解析によって杭のせん断状態下での挙動をよくシミュレートできることが明らかとなった。