

# 軟弱地盤における変状対策に関する研究（その1）

—変位吸収法の室内実験とシミュレーション—

柴田 健司 上野 孝之  
西林 清茂

## Measures Against Deformation of Soft Ground (Part 1)

—Laboratory Test and Simulation of Deformation Absorption Method—

Kenji Shibata Takayuki Ueno  
Kiyoshige Nishibayashi

### Abstract

A predictive analytical technique for the deformation absorption method was examined at the laboratory test level and is reported in this paper. The laboratory test was carried out using a saturated cohesive soil model foundation of dimensions 1.5 m×0.4 m×0.3 m and provided with deformation absorption holes. In the laboratory test, the superficial deformation of the model foundation and the volume changes of the deformation absorption holes at the specified penetration depth of a model pile were measured. The numerical simulation was executed three-dimensionally using a modified Cam-Clay model as the elasto-plastic model.

As a result, the effect of deformation absorption holes as a measure against deformation was ascertained in the laboratory model test with analysis simulating well the ground surface displacement and deformation absorption behavior in laboratory test, and it was confirmed that this analytical technique is effective in predicting usefulness of measures against deformation of surrounding ground at the design stage.

### 概 要

この報告は周辺地盤変状対策としての変位吸収法の予測解析手法を、模型地盤に変位吸収孔を設置した室内モデル実験とそのシミュレーション解析により、室内実験レベルで検証したものである。室内モデル実験は、1.5 m×0.4 m×0.3 m の飽和粘性土模型地盤に模型杭を貫入し、所定の貫入深さにおける模型地盤の表面変形と変位吸収孔の体積変化を測定した。解析は粘性土の弾塑性構成式に修正 Cam-Clay モデルを用いて、三次元弾塑性解析を行い、室内実験結果と比較した。

その結果、室内モデル実験において変位吸収孔の変状対策効果が確認されるとともに、解析は実験の地盤表面変位、変位吸収挙動をよくシミュレートしており、この解析手法が設計段階における近接施工時の変位吸収法による周辺地盤変状対策効果の予測に有効であることが確認できた。

## 1. はじめに

サンドコンパクション工法などの地盤改良工法や打込杭のように、地盤中に強制的な容積増加や外力を作用させると、周辺地盤は側方へ押出されたり、浮上がりなどの変形が生じる。近辺に既設構造物があると悪影響を与える原因になる。対策工法としては、発生側の原因を排除するか、あるいは影響を減じる方法を施工方法的に工夫したり、既設構造物に種々の補強策を構じたりすることが多い。また件数は多くはないが、施工位置と既設構造物の中間に孔や溝を設けて地盤の変位、ひいては発生応力を吸収する方法（以下変位吸収法と称する）も行われている。

著者らもこの変位吸収法を実際工事に適用して効果を上げてきた。適用にあたっては、施工段階で経験的にその変位吸収法の孔や溝の仕様を決定し、挙動計測を行って、修正しながら施工するのが現状であり、まだ明確な設計法は確立されていない。変位吸収法は孔や溝が“つぶれ”ながら変位を吸収するので解析にあたっては弾塑性解析が必要となる。そこで著者らは変位吸収法の設計法確立を目的として研究を進めてきた。まず第1段階として、先に修正 Cam-Clay モデルに準拠した保有コードに関して粘性土のせん断挙動に関する要素シミュレーションの基礎的研究を行った。今回は第2段階として、変位吸収孔を設定したモデル実験とそのシミュレーション解析について述べる。

## 2. 現場における変位吸収法適用例<sup>1),2)</sup>

変位吸収法適用の際の孔や溝は周辺土よりも強度小の状態、例えば、現地盤を攪乱したり、排土してベントナイト泥水等で置換して周辺地盤よりも弱くするとともに容易に崩壊しないように保つことが必要である。この変位吸収孔は地盤改良等により発生した変位が吸収孔まで伝達すると吸収孔が縮小して変位を吸収する。

図-1 は開削工法で施工された鉄道トンネル上に市場を建設するため、盛土や建物の荷重等によるトンネルへの影響を軽減する目的で、深層攪拌混合工法をトンネルに近接して適用したものである。当初、施工は左右同時に、また施工順序は列を飛ばして一箇所に集中しないように配慮して行ったところ、トンネルに漏水、および上

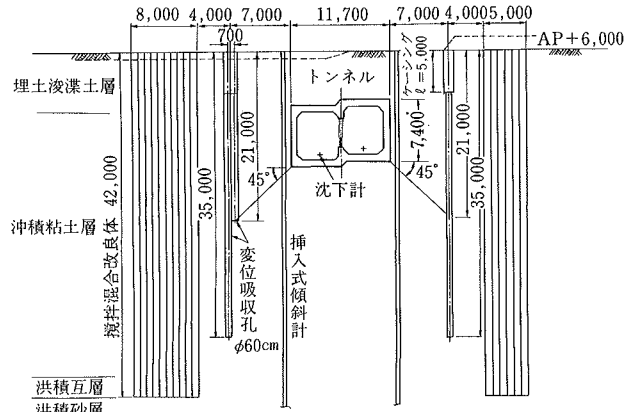


図-1 トンネル変位防止例

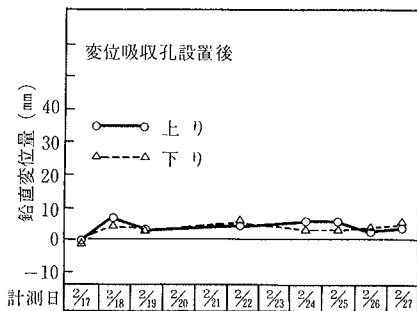
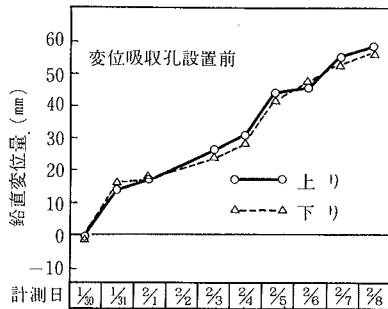


図-2 トンネル変位

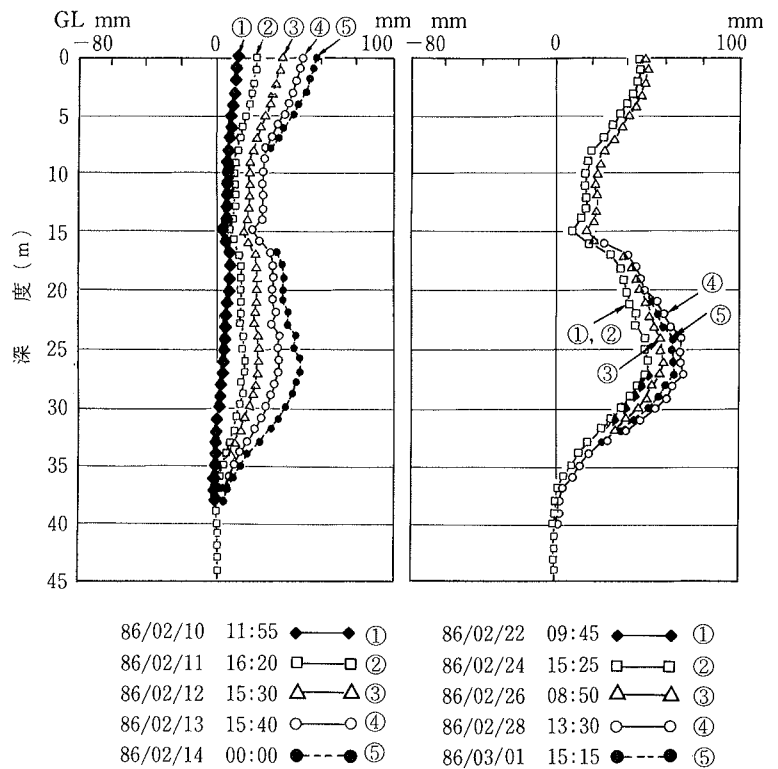


図-3 傾斜計調査結果

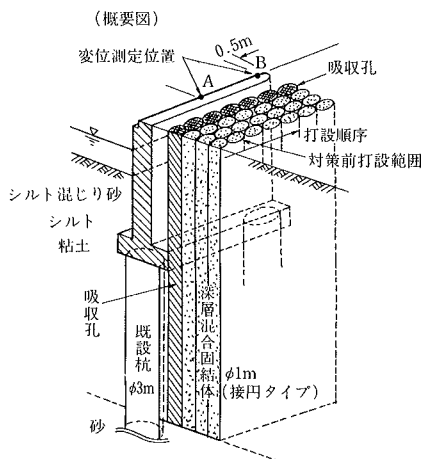


図-4 橋台変位防止例

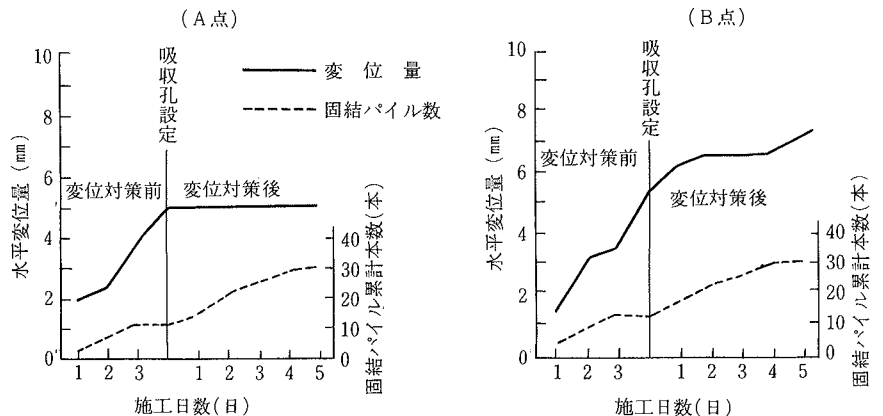


図-5 変位吸収孔による橋台変位防止効果

昇傾向が現われたため、対策として、吸収孔をトンネルと改良域の中間に適用した。吸収孔は改良域から4mの位置にオーガで穿孔すると同時に孔壁安定のためにベントナイト泥水を充填した。また、上部は重機械が近接して走行するため、鋼管を挿入した。

図-2はトンネルの鉛直変位を吸収孔設置前後で比較したものであるが、吸収孔設置前の鉛直変位は1日10mm前後であり、設置後はほとんど変位は現われない。図-3はトンネル側面に設置した傾斜計の動きを変位吸収孔設置前後で比較したものであるが、吸収孔設置前はトンネルより下のGL-15m以深で改良体施工に伴って変形が多くみられたが、設置後は改良体を施工しても変位増分は小さかった。これら吸収孔設置前後のトンネルの鉛直変位、傾斜計の計測結果より、吸収孔の効果が明瞭に現われている。

図-4は深層攪拌混合工法を橋台背面地盤の改良に適用した際、当初、打設順序を不連続にする配慮だけで施工したところ、地盤の押出しによって橋脚および橋台を変位させ始めたので、対策として吸収孔を適用した例である。橋台に最接近している深層混合固結パイルを吸収孔に設定し、オーガで穿孔すると同時に孔壁安定のためにベントナイト泥水を充填した。

深層混合固結パイルを順次施工していくと、吸収孔はしだいに縮小する。そこで、橋台の変位状況を計測しながら、数回穿孔し直して機能回復を図った。なお、最後にその吸収孔も深層混合工法で改良している。

図-5は橋台先端で測定した水平変位を吸収孔の設置前後で比較したものであるが、吸収孔の効果が明瞭に表われている。

表-1 土質性状

比重	2.708
W <sub>ℓ</sub>	107.0%
W <sub>p</sub>	52.7%
I <sub>p</sub>	54.3%

表-2 入力定数

λ	0.173
k	0.0144
M	1.65

### 3. 変位吸収孔モデル実験概要

変位吸収孔モデル実験に用いた試料は東京湾で採取した粘土の0.3mmふるいを通させたものである。表-1に主な土質性状を示す。模型地盤は圧密圧力 $p=0.3\text{ kgf/cm}^2$ 、両面排水条件で再圧密した後、 $150\text{ cm}\times 40\text{ cm}\times 30\text{ cm}$ に整形した。図-6に変位吸収孔モデル実験の土槽概要を示す。実験は模型地盤左側に直径10cm、深さ30cmの変位吸収孔2本を水平対称軸に非対称に設置し、ゴムスリーブを介して、水を充填した。変位吸収孔の周囲は排水可能な条件である。模型地盤中央に1辺が10cmの矩形の模型杭を貫入させ、載荷重、変位吸収孔の体積変化量、および模型地盤表面の変位分布を測定した。なお、杭の貫入速度は $V=5\text{ mm/min}$ とし、各25mmずつ12段階に分けて断続的に貫入させた。変位吸収孔の体積変化量は、杭貫入時の排水量を水管で測定した。また模型地盤表面の変位分布は模型地盤表面に標点を設置して、杭が25mm貫入するごとに写真撮影して測定した。図-7に杭貫入位置、変位吸収孔設置位置、および地盤表面変位計測点を示す。地盤表面変位計測点は44点である。

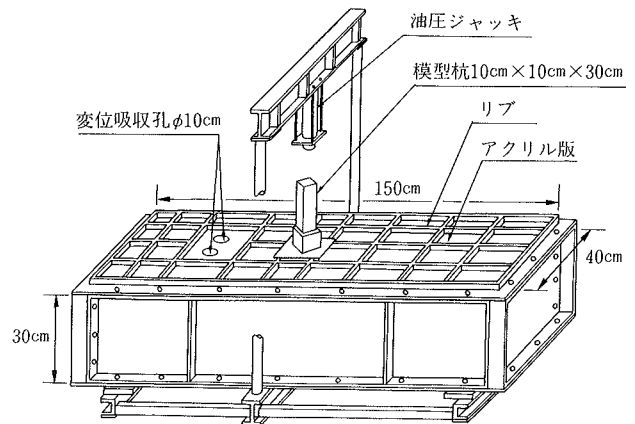


図-6 土槽概要

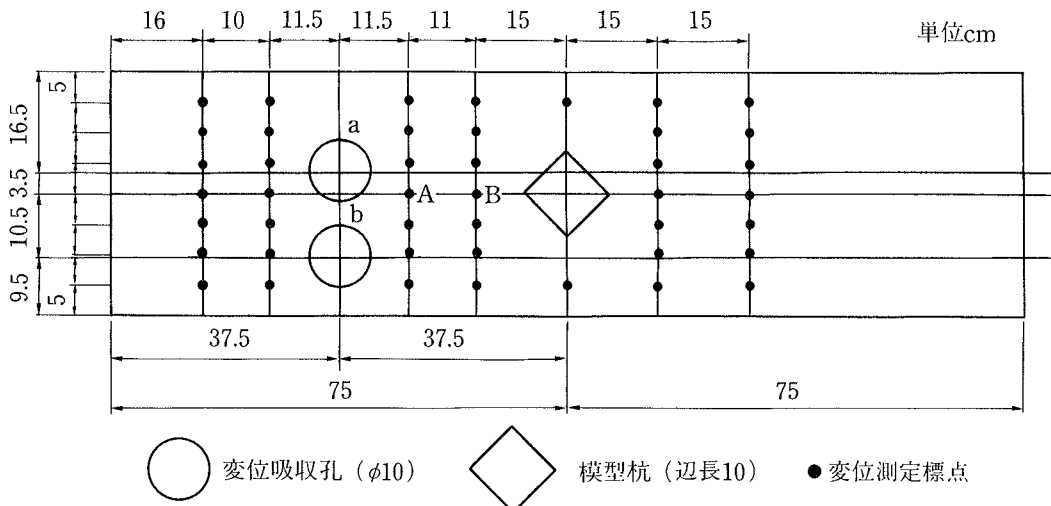


図-7 変位吸収孔設置位置、杭貫入位置、変位測定点

#### 4. 解析方法

解析は20節点の三次元要素を用い、杭の貫入による模型地盤の変形を表わすためにギャップ要素を組込んだ。解析では杭貫入により貫入位置の地盤が周辺に均等に押出される現象を想定して、ギャップ要素に杭貫入による体積変化に相当する強制変位を与えた。モデル実験のシミュレーション解析には弾塑性構成式に修正 Cam-Clay モデルを用いた<sup>3)</sup>。表-2 に入力定数を示す。入力定数は模型地盤整形時に、サンプリングした試料による三軸等方圧密試験結果から、 $\lambda$ ,  $\kappa$  を、非排水三軸圧縮試験結果から、 $M$  をそれぞれ求めた。図-8 に三軸等方圧密試験結果を、図-9 に非排水三軸圧縮試験の応力-ひずみ関係、有効応力経路を示す。ちなみに非排水三軸圧縮試験結果に関しては、要素シミュレーション結果も併せて示した。解析結果は試験結果の応力-ひずみ関係、有効応力経路ともよくシミュレートしており、入力定数の妥当性を確認できた。

#### 5. 実験結果、解析結果および考察

図-10は杭を模型地盤に貫入するための載荷重と杭貫入量の実測値を示したものである。載荷重は杭を地盤に

貫入させるにつれて徐々に大きくなり、貫入量が2 cm に達した以降は、ほぼ比例的に増加している。初期段階で載荷重が大きいのは杭貫入下の地盤が破壊しておらず、地盤の抵抗も大きいためであり、貫入量が2 cm に達した以降の載荷重の直線的な増加は杭の周面摩擦によるものである。なお、実験土槽の剛性は大きく、変形は小であり、実験中はアクリル版の代表位置5点の変位測定も併せて行っている。図-11は杭貫入量とアクリル版の鉛直変位量の関係を示したものである。実験土槽で最も強度の小さいアクリル版の変形も計測により、極めて小さいことが確認され、実験中の土槽の変形は無視できるものであった。

#### 5.1 水平変位量

シミュレーション解析は杭貫入5 cm ごとに6段階で実施した。図-12はその解析例であり、杭貫入量10 cm, 20 cm, 30 cm 時点のものを三次元的に、杭の中心と変位吸収孔 a の中心断面部分の変位分布および変位ベクトルを示している。杭が周辺に及ぼす影響と変位吸収孔前背面の変位分布の差が明確である。

図-13, 図-14は各々、杭貫入量が10 cm, 30 cm 時点の実験と解析の模型地盤表面の変位分布を全体的に示したものである。実験および解析結果を比較すると、変位

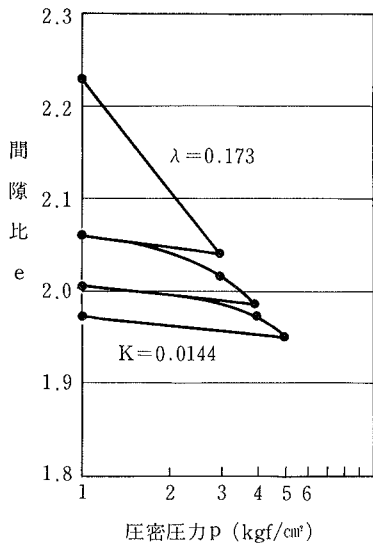


図-8 三軸等方圧密試験結果

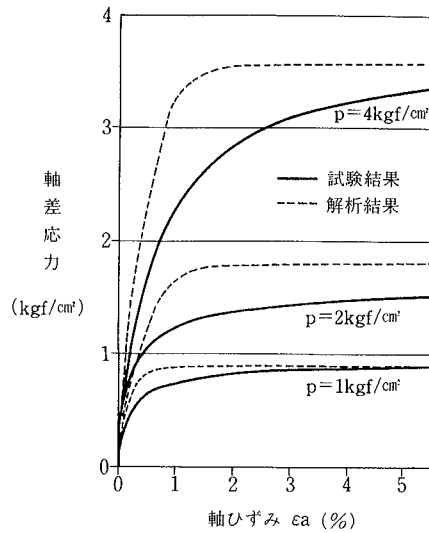


図-9 (a) 応力-ひずみ関係

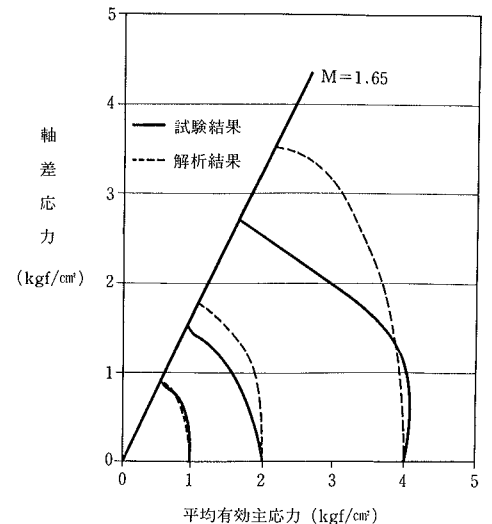


図-9 (b) 有効応力経路

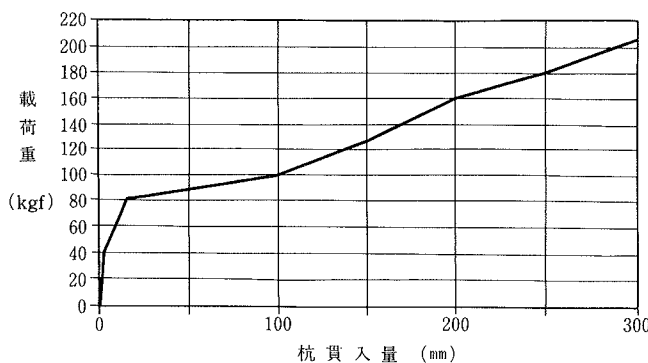


図-10 杭貫入量と載荷重の関係

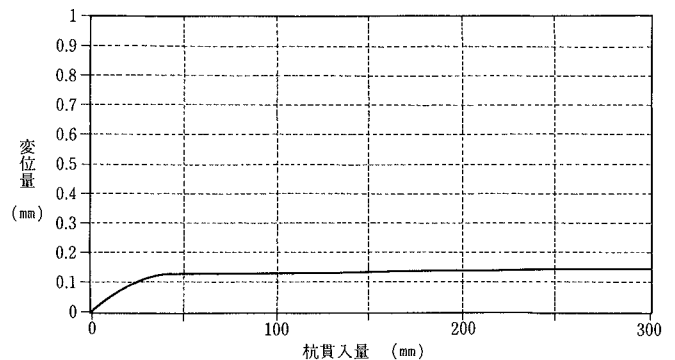
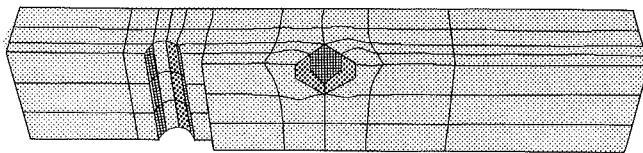


図-11 杭貫入量とアクリル版の鉛直変位量の関係

吸収孔前面の変位分布には若干の差異が認められるもののほぼ等しく、よくシミュレートしていることがわかる。なお、変位吸収孔の効果は変位吸収孔の前面、背面の変位分布を比較することによって明確であり、杭貫入により発生する変位吸収孔前面地盤の変位を変位吸収孔が吸収し、変位吸収孔背面の地盤には影響を及ぼさないことが、実験的にも、解析的にも確認できた。

図-15、図-16は各々、杭貫入量 10 cm、30 cm 時点の変位吸収孔前面地盤の変位分布拡大図であり、実験と解析結果を併記している。全体的には杭によって押出された変位は変位吸収孔へと向かっており、変位量は変位吸収孔位置で最大になり、ほぼ弓状の分布となる。局所的

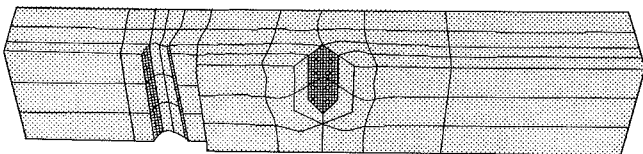
に見ると実験の変位分布は変位吸収孔位置で急激に変位が増加している。図-17は杭貫入による変位が変位吸収孔設置側地盤にすべて発生するように、杭貫入位置のメッシュ分割を考慮して行った二次元平面ひずみ条件での解析結果である。解析において杭貫入による変位が変位吸収孔側地盤のみに発生すると仮定すると、変位吸収孔前面地盤の変位分布は実験と同様な結果が得られた。これらの解析結果から判断すると、実験において杭貫入により発生した地盤変位は杭背面方向よりも変位吸収孔前面方向により集中して発生したものと考えられ、解析において与えた強制変位は二次元解析のほうがより実際の現象に近かったものと考えられる。



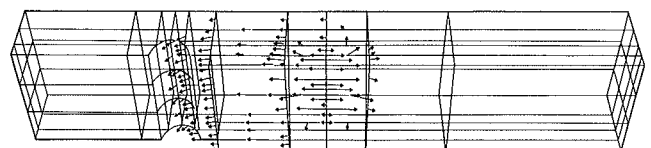
(解析結果：貫入量 10 cm)



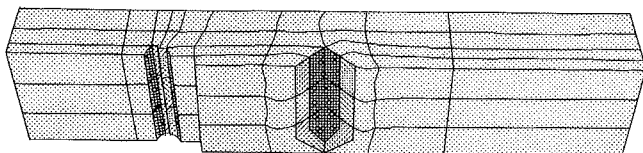
(解析結果：貫入量 10 cm)



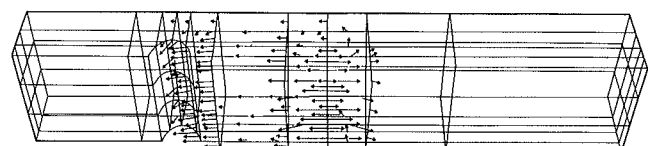
(解析結果：貫入量 20 cm)



(解析結果：貫入量 20 cm)



(解析結果：貫入量 30 cm)



(解析結果：貫入量 30 cm)

図-12 (a) 模型地盤変形図

図-12 (b) 変位ベクトル図

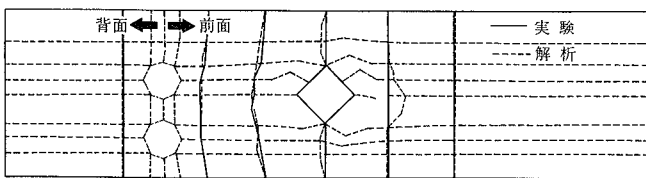


図-13 模型地盤表面変形図 (貫入量 10 cm)

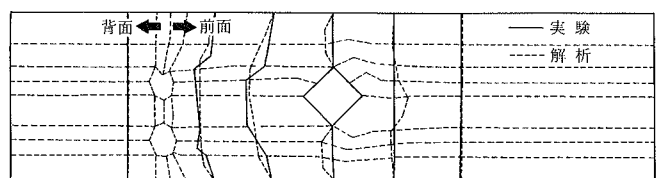


図-14 模型地盤表面変形図 (貫入量 30 cm)

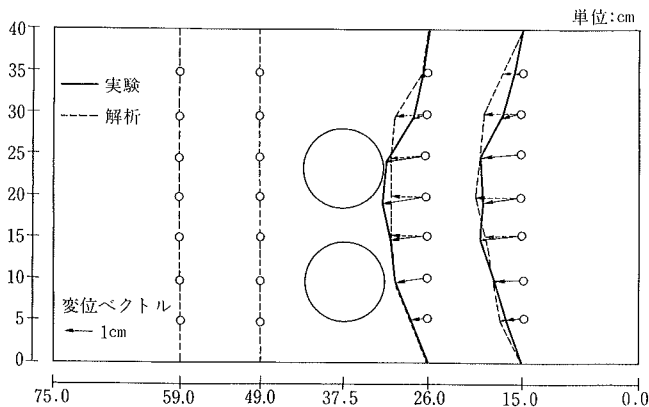


図-15 変位吸収孔前面地盤表面変形図 (貫入量 10 cm)

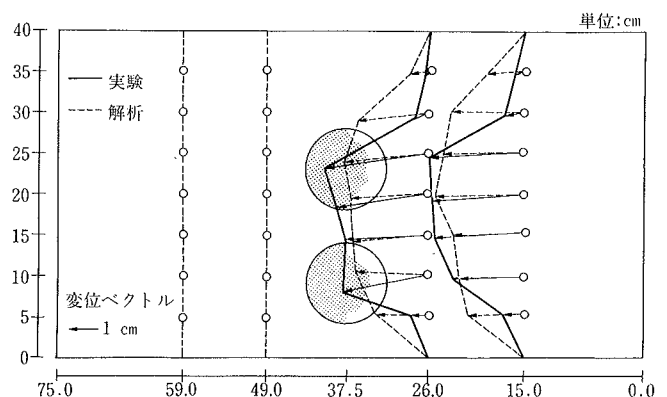


図-16 変位吸収孔前面地盤表面変形図 (貫入量 30 cm)

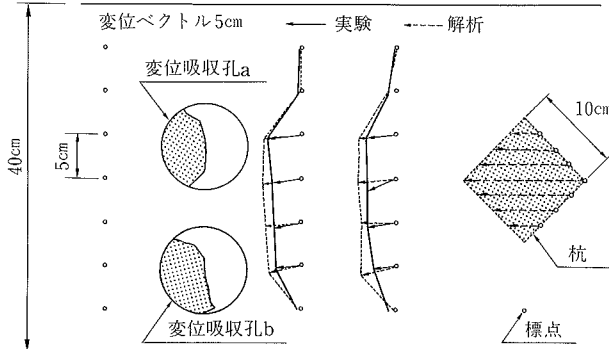


図-17 変位吸収孔前面地盤表面変形図 (二次元解析)

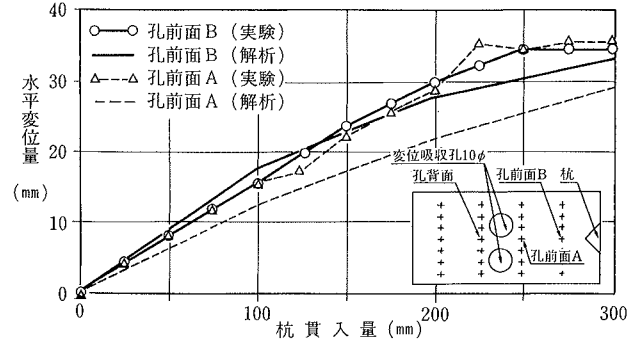


図-18 模型地盤の水平変位量

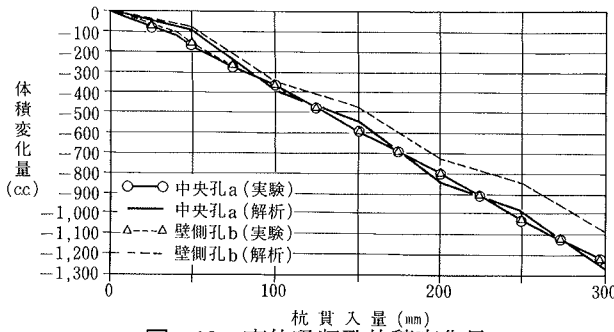


図-19 変位吸収孔体積変化量

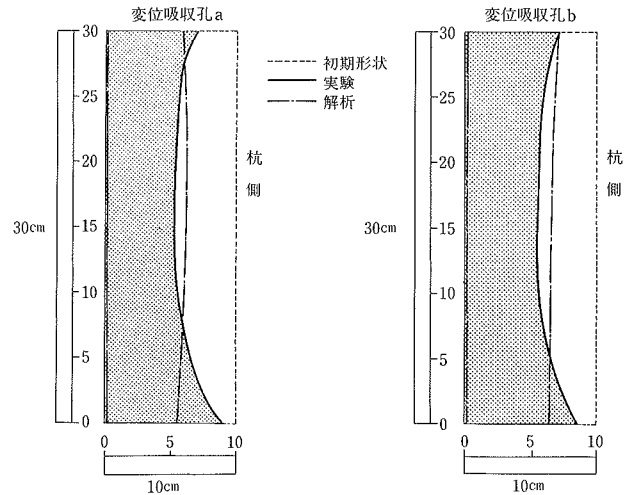


図-20 変位吸収孔断面形状 (貫入量30cm)

図-18は変位吸収孔前面の代表位置 A, B における杭貫入の全時点における変位量を示したものである。変位量は実験、解析とも杭の地盤貫入につれて徐々に増加している。解析では変位吸収孔前面 B の変位量のほうが変位吸収孔 A の変位量よりも若干大きい、実験では両位置とも同量の変位量となっている。実験では変位吸収孔付近の地盤のわずかな不均一性が応力集中によって鋭敏に影響し、変位が急激に増加する部分とそうでない部分が発生したものと考えられる。実際、現場でもこのような現象が見られた。また解析では上記の強制変位の与え方が実際に実験において発生した変位方向と若干差異があったためと考えられる。しかし局部的には、実験と解析には若干の違いがあるものの全体的に見ると、解析は実験を良くシミュレートしているといえる。

5.2 体積変化量

図-19は杭貫入量と変位吸収孔の体積変化量の関係である。地盤中央部の変位吸収孔の体積変化量は実験と解析がほぼ一致する。壁側の変位吸収孔の体積変化量は実験のほうが解析より若干大きいとはいえ、差は小さい。全体としてこの体積変化量の面からも解析は実験結果を良くシミュレートしており、精度の良い解析、誤差の少ない実験ができたことが明らかである。なお、実験終了後、変位吸収孔の形状変化を見るために石膏を流し込み変位吸収孔の型を採った。図-20は杭貫入量が 30 cm 時点の変位吸収孔 a, b の実験と解析の断面形状を示したものである。図-16には実験の上部のみの断面型を示したが、実験および解析とも変位吸収孔は深さ方向にわた

って、杭に面した部分が“つぶされる”ように変形し、反対側の変位はきわめて小さい。このことから変位吸収孔による変位吸収効果が見える。実験の変位吸収孔中央部の変形が解析の変形より大きいのは、実験では上面アクリル版と下面鉄版の摩擦により両端部よりも中央部のほうが変形しやすいためであり、摩擦を考慮していない解析では上面から下面に向かって一様に変形している。

6. まとめ

近接施工時の環境保全は最近とみに重要視されている。ここで紹介した変位吸収法はハード技術が経験的に先行し、挙動および設計については未開の分野といえるが、今回の実験と解析のシミュレーションによって変位吸収孔および周辺挙動の一端を明らかにするとともに、予測解析の端緒をつけることができた。

参考文献

- 1) 西林, 他: 土質工学会編, 土質基礎工学ライブラリー34, 近接施工, p. 323~374, (1989. 9)
- 2) 西林: 建設工事における土と環境計測, 土と基礎, p. 93~100, (1991. 5)
- 3) 柴田, 西林, 上野: 中空ねじりせん断挙動の三次元解析, 土木学会第46回年次学術講演会講演概要集, p. 978~979, (1991. 9)