

軟弱粘土地盤上の圧密沈下・リバウンド設計手法の向上

遠心模型実験とシミュレーション解析

森 拓 雄 高 橋 真 一
鳥 井 原 誠

Settlement and Rebound Simulation of Soft Clay Ground - Centrifuge Modeling and Numerical Analysis -

Takuo Mori Shinichi Takahashi
Makoto Toriihara

Abstract

This paper describes results of centrifuge model tests and numerical analyses, that simulates settlement and rebound of 5-10m soft clay ground. Two models were tested; a 2-dimensional plane strain model that simulates an embankment, and a 3-dimensional model that simulates partial loading. The models were spun with 50-70 centrifuge gravity for self weight consolidation. Then, a water-loading system loaded and un-loaded the ground cyclically, while maintaining spin. Deformation and water pressure were measured during spinning. The results were as follows. The Large centrifuge model accurately simulated settlement and rebound when the soft clay ground was partially loaded. Numerical analysis showed similar results to the centrifuge tests. Therefore, both the centrifuge test and the numerical analysis are useful for renewal design.

概 要

この論文は、リニューアル時の地盤変形の挙動予測精度向上を目指して行った遠心載荷実験と、シミュレーション解析結果をまとめたものである。実験は、層厚さ 5~10m 程度の軟弱地盤上に、盛土の掘削・追加を想定した 2 次元平面ひずみモデルと、3 次元モデルの 2 種類である。50G 場において、所定の盛土荷重を載荷・除荷を行い、沈下・リバウンドなどの変形や過剰間隙水圧を計測した。その結果、大型遠心載荷実験によって、局所荷重による周辺地盤の沈下・変形挙動や、盛土の沈下や側方移動、除荷時のリバウンドなどの現象を精度良く再現することができた。また、上記実験の弾塑性 FEM 解析では、概ね実験結果とよく対応した。したがって、リニューアル工事における地盤の変形挙動を遠心載荷実験と数値解析で精度よくシミュレートでき、大いに活用できることが確認できた。

1. はじめに

軟弱地盤上の盛土工事に伴う沈下挙動に対しては、これまでの豊富な実績から設計方法や数値解析評価手法の精度が近年向上し、数値解析結果を設計に反映する事例も増加している^{1),2),3)}。しかし、最近の軟弱地盤上の盛土や構造物構築工事においては、これまでの単調増加荷重時の変形挙動に加えて、Fig. 1 に示すような荷重の撤去によるリバウンド挙動や再圧密などの荷重履歴の影響、そして構造物構築時の不同沈下挙動に対して精度良い予測とその対策が求められる機会が多くなってきている。

構造物に対する影響が特に大きい不同沈下の問題に対しては一般的にその対策として、軟弱地盤を改良して不同沈下の発生を減少させる方法と個々の構造物で不同沈

下に対応できるシステムを備える方法がある。臨海部の若令埋立地では、深い洪積粘土層の沈下が生じていることが多く、一般的には地盤改良が困難で、コストのかか

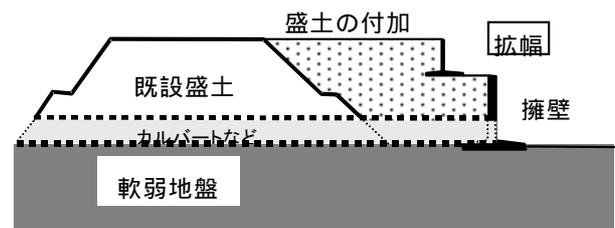


Fig. 1 盛土のリニューアル工事例
Embankment Renewal

る個々の構造物による対応が求められる。具体的な構造物対応策としてはジャッキアップシステム、可とう性構造の採用など高価なシステムが必要となり、対応方法の設計に当たってはその仕様や数量など経済的な設計が不可欠である。また、盛土などのリニューアル工事などでは、荷重の増減や荷重範囲の多様さから軟弱地盤の挙動がより複雑となり、その評価や合理的な設計方法の確立が求められている。

この報告は、上記の問題に対して、応力除荷・再載荷の影響や構造物の不同沈下挙動に関する基礎的な実験として、自重圧密粘土地盤に部分荷重や荷重の増減を再現した遠心模型実験を行い、得られた知見について示す。

2. 遠心模型実験の相似則と装置

遠心模型実験は、模型地盤などに遠心力を載荷することで、実地盤と同等の応力状態が再現でき、また、相似則の関係から、長期間の現象を短時間で再現することが可能である。したがって、土質材料のように拘束圧依存性の高い材料を取り扱ったり、圧密現象のように長期間にわたる現象を再現する場合に、遠心模型実験は有効である。

遠心場での相似則は、実物の $1/n$ の幾何学的相似模型を ng の遠心力場に置いて圧密現象を再現する場合、次に示す関係にある。²⁾

$$\begin{aligned} \text{長さ } l_m &= l_p/n \quad (1) \\ \text{応力 } \sigma_m &= \sigma_p \\ \text{ひずみ } \epsilon_m &= \epsilon_p \\ \text{時間 } t_m &= t_p/n^2 \quad (\text{圧密検証の場合}) \end{aligned}$$

今回は $1/50$ および $1/70$ の模型を作製し、約 6 時間の遠心実験を行った。したがって、実物に換算すると 2~3 年間の圧密現象を再現したことになる。

Photo 1 に実験で用いた遠心模型実験装置の全景を、また Table 1 に主な仕様を示す。アーム式の大型遠心模型実験装置で、2つのバケットを有し、各々静的実験、動的实验を効率よく進められるようできている。ここで

示す一連の実験は、Photo 2 に示す静的バケットを使用した。実験中の計測は、回転装置内に設置したコンピュータ制御装置、アンプおよび A/D 変換装置を利用した各種センサーによる計測と、バケット内に設置した複数の CCD カメラによる画像収録である。

3. 実験の概要

Table 2 に実験ケースと条件を示す。部分載荷モデルは大型剛土槽を利用して 3 次元模型 (Fig. 2) を、盛土モデルは中型剛土槽を用いて 2 次元平面ひずみ模型 (Fig. 3) を設定した。粘土試料は、工業用のカオリン系粘土を用いた。Table 3 に粘土試料の主な性質を示す。各々の粘土模型地盤は、初期含水比を液性限界 w_L の 1.5 倍 ($w=43\%$) に調整した練返し粘土試料を土槽内に投入した後、載荷板を用いて 4~8kPa で再圧密して準備した。模型地盤は、遠心模型実験装置で自重圧密 (圧密所要時間約 6 時間) を行い正規圧密状態にした後、所定の荷重を載荷した。実験では変位計 (接触式、レーザー式)、間



Photo 1 遠心模型実験装置
Centrifuge Facility

Table 1 遠心装置の仕様
Specific of Centrifuge

| 項目 | 仕様 |
|--------|------------|
| 最大回転半径 | 7.01 m |
| 搭載容量 | 700 tonf・g |
| 搭載重量 | 7.0 tonf |
| 搭載面積 | 2.2×2.2 m |

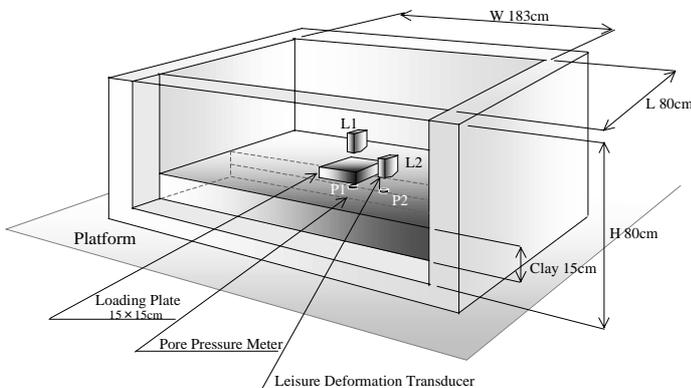


Fig. 2 大型剛土槽を用いた部分載荷
Partial Loading Model

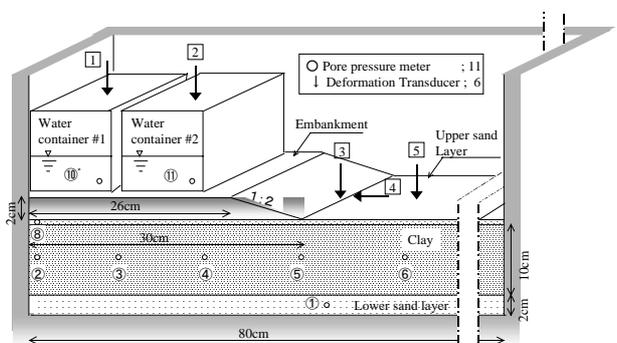


Fig. 3 載荷除荷実験模型
Embankment Model

隙水圧計を設置して、変形や過剰隙水圧の経時変化を計測した。



Photo 2 静的バケツトおよび中型土槽
Static payload & Middle Size Container

Table 2 実験ケースと条件
Model Conditions

| 実験の種類 | 部分載荷モデル | 盛土モデル |
|----------------|-----------------------------|---|
| モデルの次元 | 3次元 | 2次元平面ひずみ |
| 模型土槽()は内寸法 | 大型剛土槽 (W183×D80×H80cm) | 中型剛土槽 (W80×D20×H50cm) |
| 遠心加速度 | 70g | 50g |
| 模型地盤寸法()は換算高さ | 初期高さ: 14cm (9.8m) | 初期高さ: 10cm (5.0m) |
| 地盤状態 | 正規圧密地盤 (自重圧密実施) | 同左 |
| 荷重 | 載荷 鉄板 (15×15m) 64kPa (70g場) | 載荷・除荷・再載荷 Case1: 50kPa (50g場) Case2: 93kPa (50g場) |

Table 3 粘土試料の性質
Property of Clay

| | |
|--------|------------------------|
| 液性限界 | 28.9% |
| 塑性限界 | 18.8% |
| 塑性指数Ip | 10.1% |
| 土粒子密度 | 2.649g/cm ³ |

4. 実験模型と実験結果

4.1 部分載荷モデル

4.1.1 実験模型と荷重条件 大型剛性土槽 (内寸: 幅 183cm×奥行 80cm×高さ 80cm) を用い 3 次元載荷条件下で圧密実験を行った。模型粘性土地盤は、土槽底面に不織布を排水層として敷設した後、所定の初期含水比に調整した粘土試料を厚さ 15 cm 投入して準備した。模型地盤は、載荷板を用いて約 4kPa の予圧密を行った後、遠心加速度 70g で自重圧密を行い正規圧密地盤を作製した。遠心実験前の粘土試料厚さは約 14cm で、70g の遠心力を載荷すると(1)式より実地盤で約 10m の粘土層に相当する。自重圧密終了後に一度遠心回転を停止して、Fig. 2 に示すように、模型地盤中央部に載荷荷重(鉄板: 15cm×15cm×t4mm, 2.0kg)を設置して、部分載荷荷重の圧密実験とした。圧密中は、粘土層中央に設置した隙水圧計と、地表面の沈下をレーザー変位計で計測した。

4.1.2 実験結果 Fig. 4 は、沈下と隙水圧の経時変化である。沈下は遠心加速度の上昇とともに生じた後、1.5 時間程度圧密沈下が見られる。これに対応した隙水圧

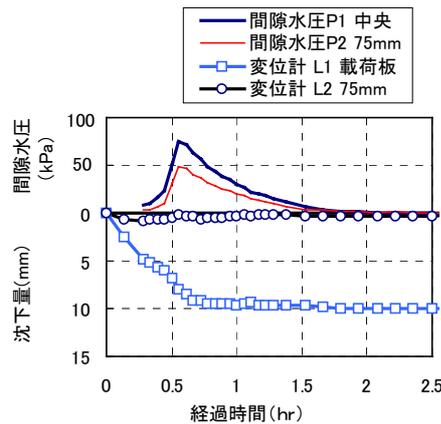


Fig 4 沈下・隙水圧の経時変化
Settlement and Pore Press. Time History

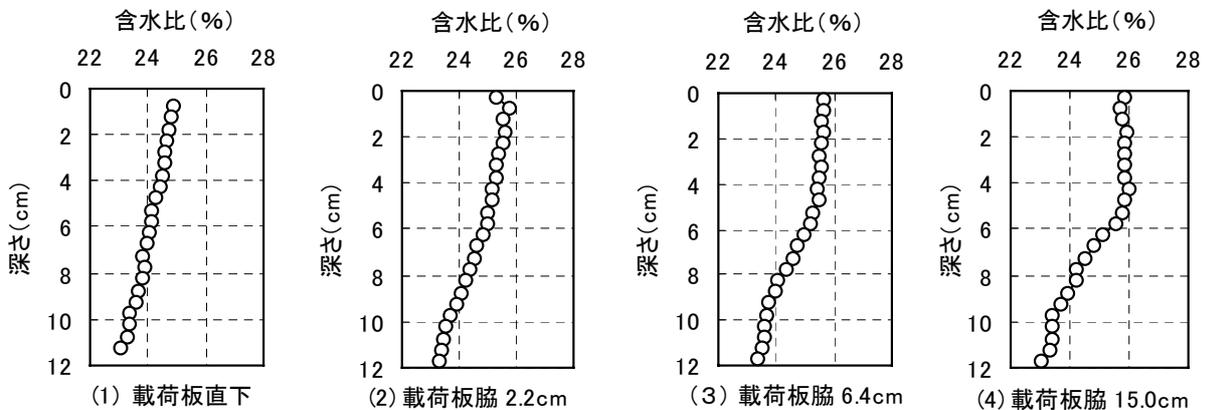


Fig. 5 部分載荷による圧密完了後の含水比分布
Water Content Vertical Distribution after Partial Loading

が計測されているが、消散過程に要する時間は沈下の収束時間に比べて長く、圧密中の有効応力進行の遅れが現れている。

Fig. 5 は、圧密終了後に計測した載荷板周辺の深さごとの含水比水平分布である。同じ深度で含水比が小さな範囲は載荷板直下範囲に比較的限定され、載荷板から2cm離れた地点以降は含水比の変化がほとんど無い。載荷荷重の影響範囲は比較的載荷範囲近傍で限られ、周辺への影響範囲は比較的狭い結果となっている。

4.2 盛土の載荷・除荷モデル

4.2.1 実験模型 Fig. 3 で示した中型剛土槽（内寸法：幅80cm×奥行20cm×高さ50cm）に、粘土層厚10cmの模型地盤を作製し、50g場の遠心力を載荷した。実物に換算すると(1)式より層厚5mの地盤に相当する。模型作製は、1)下部砂層設置（厚さ2.0cm、排水層）、2)所定の初期含水比に調整した粘土試料の投入と予圧密（圧密圧力8kPa）、3)上部砂層設置（厚さ1.0cm）、4)遠心装置による自重圧密、5)載荷・除荷実験の順序で実施した。

盛土の追加・掘削過程は、Fig. 6 に示す除荷・載荷システムを用いて模擬した。水槽内の水位を電磁弁で遠隔制御し、最大20cm上下（50g場で98kPaの荷重に相当）することが可能である。

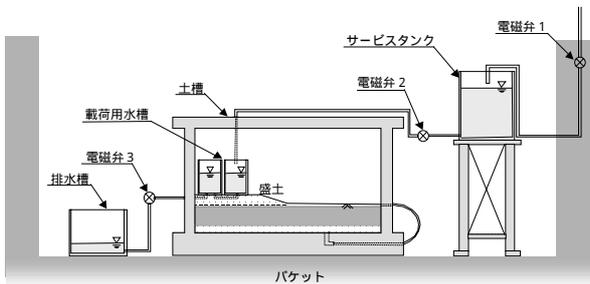


Fig. 6 載荷・除荷システム
Water Loading System

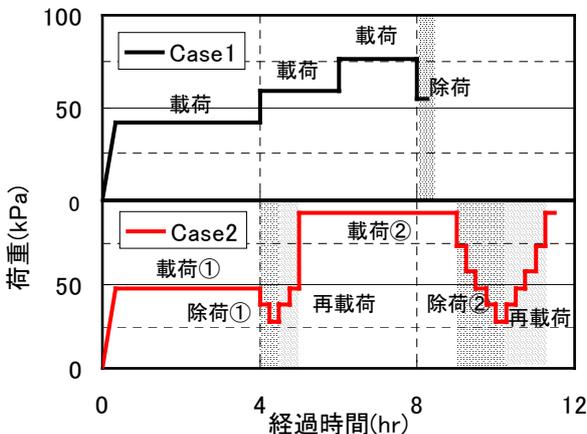


Fig. 7 荷重条件
Loading Time History

荷重条件は、Fig. 7 に示すような載荷・除荷・再載荷の載荷荷重を変えた2ケース行った。

4.2.2 実験結果と荷重条件 Fig. 8 に Case2 45kPa 載荷時の沈下と間隙水圧の経時変化を示す。沈下は、約3時間を要し1.3mmで収束した。このとき、法尻部分にも0.2mm程度の沈下が観測された。一方、過剰間隙水圧は90分程度で消散している。

Fig. 9 は、Case1の荷重除荷時の沈下（リバウンド）と間隙水圧の経時変化である。実験では、30秒間（実物換算約2日）で21kPaの荷重を除荷した。リバウンドは除荷終了後約1分で収束し、最終リバウンド量は約0.05mmであった。一方、間隙水圧は約4kPaのサクションが発生した後、6分程度で消散している。消散時間は、載荷

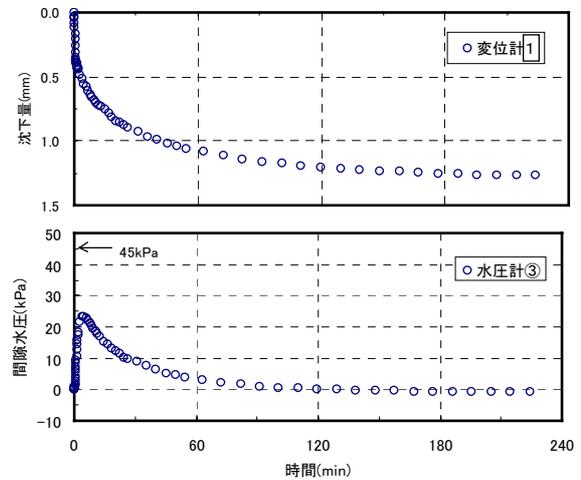


Fig. 8 載荷時の沈下・間隙水圧の経時変化: Case2
Consolidation Time History

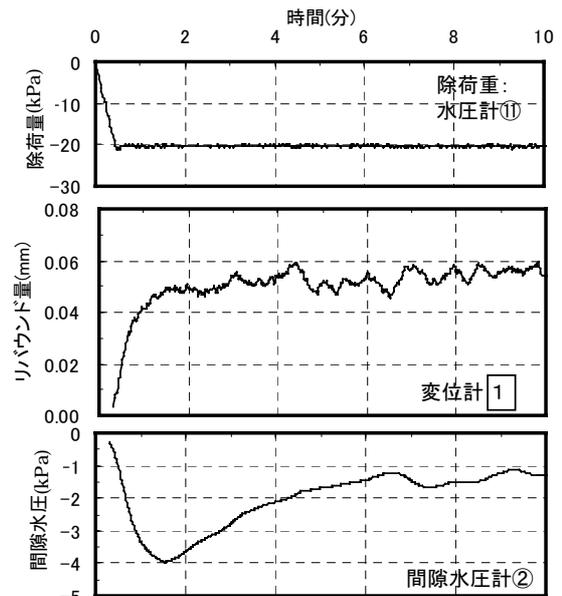


Fig. 9 除荷時の沈下・間隙水圧の経時変化: Case1
Rebound Time History

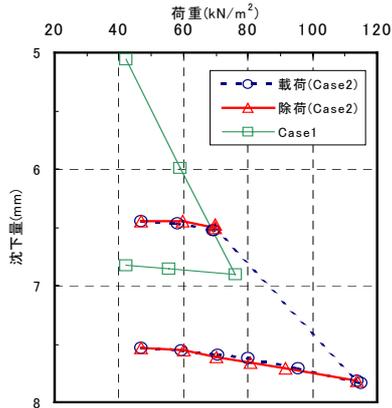


Fig. 10 荷重と沈下量: Case 1 & 2 Deformation Characteristics

時に比べ 1/6 程度である。圧密に比べ非常に早い挙動であるが、サクシヨンの発生と消散過程は通常の圧密と同様に遠心実験で再現し計測評価することができた。

Fig. 10 に、荷重と沈下量の関係を Case 1, Case 2 合わせた示す。Case 毎に荷重経路が異なるが、ほぼ同じ圧密沈下関係にある。また、リバウンドに関しても、荷重の大きさに関わらず、正規圧密時の沈下量に対して約 1/20 の勾配である。

Fig. 11 は、荷重毎の地表面における鉛直変位の分布状況である。荷重が増加すると、沈下量が増大している。盛土センターから 40cm 離れた地点では、荷重 76kpa 載荷時に側方移動が原因と考えられる隆起が計測されている。

5. 数値シミュレーション

5.1 解析モデル

弾塑性モデル（修正カム・クレイモデル）を用いて圧密解析を行った。解析は、部分載荷モデルは軸対称条件で、盛土の載荷・除荷モデルは 2 次元平面ひずみ条件とした。解析パラメータは、物理特性と標準圧密試験結果をもとに Table 4 に示す値を設定した。

5.2 解析結果

5.2.1 部分載荷モデル Fig. 12 は、載荷板の沈下量とその直下の過剰間隙水圧の経時変化を示し、実験結果と比較した。解析結果は遠心荷重増加時の沈下、間隙水圧をやや小さく評価しているが、荷重増加後の消散過程はほぼ表している。

5.2.2 盛土の載荷・除荷モデル Fig. 13 に載荷時、および除荷時の変形量のカウンター図を示す。盛土中心の沈下量、変形パターンとも実験結果と同様の結果が得られた。また、法尻付近で、載荷時に観測した隆起が、解析で定量的に再現できた。

Fig. 14 に Case 1 の荷重～沈下量の解析結果を示す。沈下に関しては解析と実験結果は比較的一致しているが、リバウンドに関しては解析が大きい。

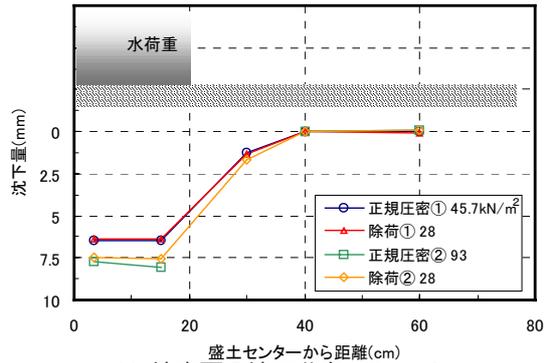


Fig. 11 地表面の沈下分布: Case 2 Deformation Distribution

Table 4 解析定数
Input Material Numbers

| | | |
|--------------|-------|--------------------|
| 圧縮指数 | C_c | 0.18 |
| 膨潤指数 | C_s | 0.08 |
| 強度パラメーター | M | 1.426 |
| 初期間隙比 | e_0 | 0.77~0.90 |
| ポアソン比 | ν | 0.32 |
| K_0 値 | | 0.471 |
| 透水係数(cm/sec) | k | 4×10^{-7} |

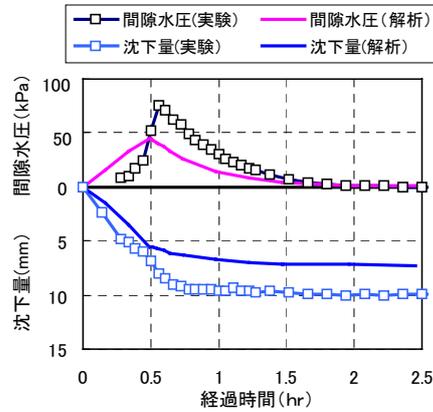


Fig. 12 載荷板の時間～沈下・間隙水圧 (部分載荷)

Time History of Loading Plate Settlement (Partial Loading)

Fig. 15 は Case 1 荷重増加時における沈下、間隙水圧変化の比較である。沈下挙動は、ほぼ一致している。Fig. 16 では Case 1 除荷時における沈下、間隙水圧変化を比較した。解析は、リバウンド量を大きく評価し、また、収束時間も長い。そこで、膨潤指数 C_s を 1/10 とした解析を追加し、その結果を付記したが、当初の解析結果に比べて実験結果に近くなっている。

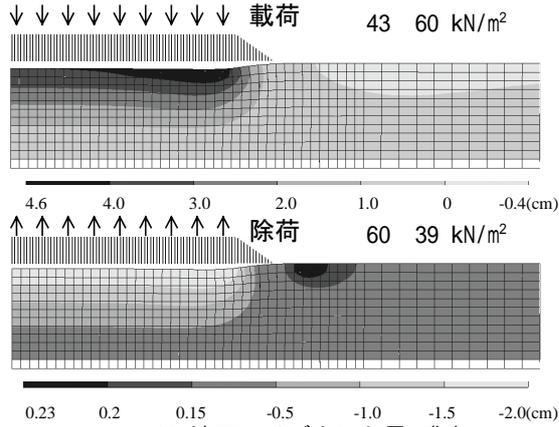


Fig. 13 沈下・リバウンド量(盛土)
Deformation Distribution
(Embankment)

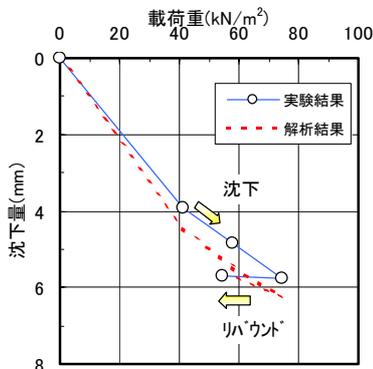


Fig. 14 荷重と沈下の関係
Deformation Characteristics

6. まとめ

軟弱地盤の沈下問題の中で、構造物の不同沈下や盛土のリニューアル等を想定した荷重除荷条件での沈下変形挙動に対して、遠心模型実験を行い、以下の結果が得られた。

- (1) 遠心模型実験によって、部分荷重による周辺地盤の沈下変形影響評価や、盛土の荷重・除荷の変形特性を精度良く得ることができた。
- (2) 直接基礎を想定した部分荷重の遠心圧密模型実験によって荷重の分散影響範囲を検討した結果、荷重荷重の大きな影響は荷重荷重範囲とごく周辺に限られる。この傾向は、FEM弾塑性解析でも示された。
- (3) 盛土荷重による圧密実験によると、自重圧密および荷重による沈下量は、遠心実験と計算値は、ほぼ一致したが、リバウンドに関しては、計算値は遠心実験と比較して値が大きく、一般的な圧密試験結果のデータだけでは過大評価の可能性がある。

以上の結果、リニューアル工事における地盤の変形挙動の傾向を遠心荷重実験と数値解析で精度よくシミュレートでき、設計解析手法の有効なツールとして活用できることが確認できた。

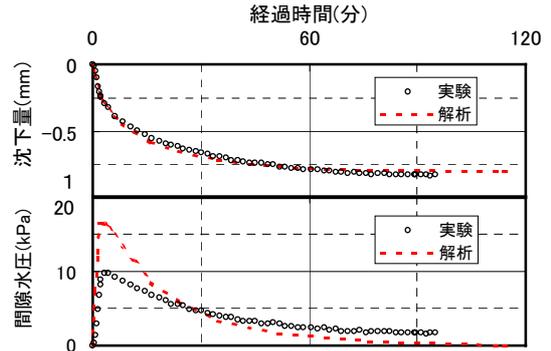


Fig. 15 荷重時の沈下・間隙水圧の変化
Consolidation Time History (Embankment)

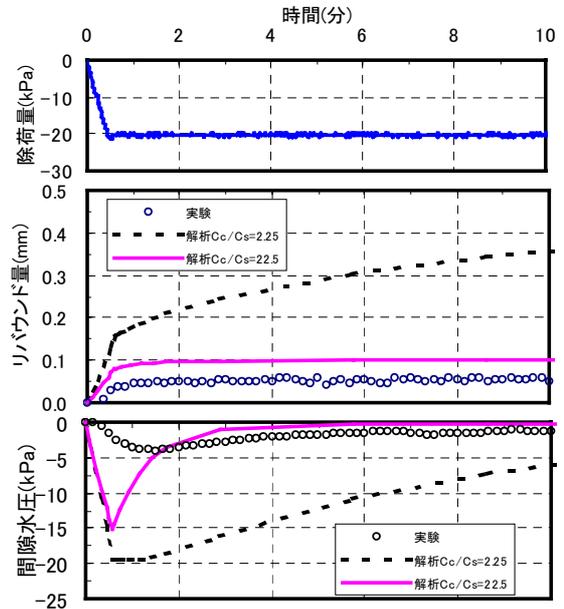


Fig. 16 除荷時の沈下・間隙水圧の変化
Rebound Time History (Embankment)

今後、リバウンドに関して、正確な膨潤指数 C_s を求めるために要素試験で応力依存性を考慮する必要がある。

参考文献

- 1) 長沼ら：遠心力装置を用いた盛土の建設，第18回土質工学研究発表会，(1983)
- 2) 堀井ら：軟弱地盤上に構築した盛土の遠心模型実験，第31回地盤工学研究発表会，(1996)
- 3) 杉江：実務分野における三次元土/水線成 FEM 解析の利用状況，地盤工学会 土と基礎 43-7，(1995)
- 4) 高田，日下部：遠心模型実験 3.原理，土質工学会土と基礎 35-12，(1987.12)