

軟弱地盤上線状構造物の不同沈下予測法に関する研究

遠心模型実験とシミュレーション解析

高橋 真一 森 拓雄
鳥井原 誠

Study on Settlement Simulations of Soft Clay Ground

- Centrifuge Modeling and Numerical Analysis -

Shinichi Takahashi Takuo Mori
Makoto Toriihar

Abstract

Underground passage in soft ground is affected by differential settlement, so accurate simulation and adequate measurement are very important. This paper describes some centrifuge model tests and simulation analysis on underground passages in soft ground. The main results are as follows. 1) Around the loading area, the measured settlement is lower than the calculated one. 2) Flexible joints of underground passage are effective for stress decrease of underground passage structures.

概要

若令埋立地など軟弱粘土地盤上における線状地下構造物は、不同沈下が構造物に大きく影響するため、精度良い沈下予測とその対策が重要である。この論文は、軟弱粘土地盤上線状地下構造物の不同沈下挙動について、直接基礎形式構造物、地中埋設トンネルの遠心模型実験とそのシミュレーションを行ったものである。その結果、1) 模型実験における周辺地盤の連れ込み沈下範囲は、数値解析結果に比べ狭く、解析検討の解釈では留意が必要である、2) 地中埋設構造物の縦断方向の挙動は、可撓部有無による地盤変形に大きな差は認められないが、構造物に発生する応力の緩和には大きく影響する、ことが明らかになった。

1. はじめに

軟弱地盤上の一般的な盛土工事に伴う沈下挙動や不同沈下に関しては、これまでの施工実績から対策工法¹⁾とその設計方法、数値解析評価手法が近年向上し、数値解析結果を設計に反映する事例も増加している²⁾。しかし、軟弱地盤上の線状地下構造物を対象とした建設工事では、Fig. 1 に示すように、沈埋トンネル、開削トンネル、シールドトンネル、そして駅舎部など支持形式が異なる構造物が線状につながり、各々の構造物構築時の不同沈下挙動に対して効率よい対策工の設計適用に際して、性能設計を念頭に置くようなより一層の精度良い予測解析が求められている。

一般的な構造物の不同沈下対策としては、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

方法が挙げられる。しかし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、コストのかかる個々の構造物対応が求められる。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

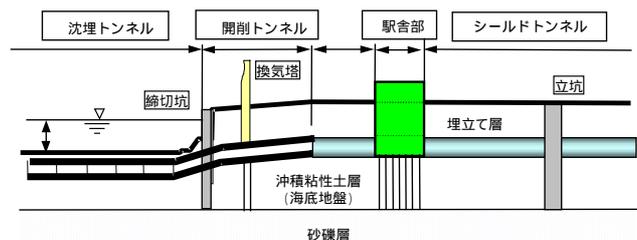


Fig. 1 粘性土地盤における線状地下構造物
Underground Passage on Soft Ground

てはその仕様や数量など経済的な設計が不可欠である。

しかし、不同沈下対応に関わる設計方法は、構造物は軟弱地盤に対して一般的に部分的な載荷状態に対しても2次元的な取り扱いをすることが多い。そのため3次元挙動に比べ過大な変形量を見込むこととなり、改善の余地が従来から指摘されている。

この報告では、軟弱埋立地線状地下構造物の不同沈下挙動に関して、埋立て履歴に配慮した正規圧密粘土地盤を作製し、その上で部分荷重や地中線状構造物を再現した遠心模型実験を行い、変形挙動を再現するとともにシミュレーション解析による予測手法について得られた知見について示す。

2. 遠心模型実験の概要

2.1 遠心模型実験装置と相似則

Photo 1 に実験で用いた遠心模型実験装置の全景を、Table 1 に主な性能を示す。なお、実験装置の詳細については、本報 pp.121~124「遠心模型実験装置の活用事例」を参照頂きたい。

Table 1 遠心装置の性能
Performance 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 tonf |
| 搭載面積 | 2.2×2.2 m |



Photo 1 遠心模型実験装置
Centrifuge Facility

Table 2 模型の概要
Variety of Model Ground

| 実験の種類 | 部分載荷 | 線状地下構造物 |
|-------|-------------------------------------|--------------|
| 模型の次元 | 3次元 | 2次元 / 3次元 |
| 模型土槽 | 大型剛土槽 (内寸: W183×D80×H80cm) | |
| 遠心加速度 | 70 g | |
| 模型地盤 | 初期高さ: 14cm (換算高さ 9.8m) | |
| 粘性土地盤 | 正規圧密地盤 (自重圧密実施) | |
| 上載荷重 | 載荷板荷重 鉄板(15×15cm) 64kPa(70g場) | トンネル自重 + 埋立層 |

実験は、1/70の模型を作製し、遠心加速度70g、約6時間の遠心圧密を行った。実物に換算すると遠心実験における相似則³⁾から実験時間の遠心加速度70²倍に相当する約3年間の圧密挙動の再現に相当する。

2.2 実験条件と実験方法

Table 2, Fig. 2 に実験ケースを示す。軟弱地盤上の線状地下構造物を想定した直接基礎構造物と地中構造物の2種類の構造物を設定した。地中構造物は周辺地盤との重量差で生じる不同沈下分布を横断面、縦断面で把握できるように横断2次元平面ひずみモデルと、縦断3次元モデルの2種類である。

粘土試料は、塑性指数が低く、圧密係数が大きな工業用のカオリン粘土を用いた。Table 3 に主な性質を示す。

粘土模型地盤は、液性限界 w_L の1.5倍($w=43%$)に含水比調整した粘土試料を土槽内に所定の厚さ投入した後、載荷板を用いて4kPaで予圧密した。その後、模型地盤を遠心模型実験装置に搭載して、遠心加速度70gにおいて自重圧密(圧密所要時間約6時間)を行

Table 3 粘土試料の性質

Property of Clay

| | |
|------------|------------------------|
| 液性限界 | 28.90% |
| 塑性限界 | 18.80% |
| 塑性指数 I_p | 10.10% |
| 土粒子密度 | 2.649g/cm ³ |

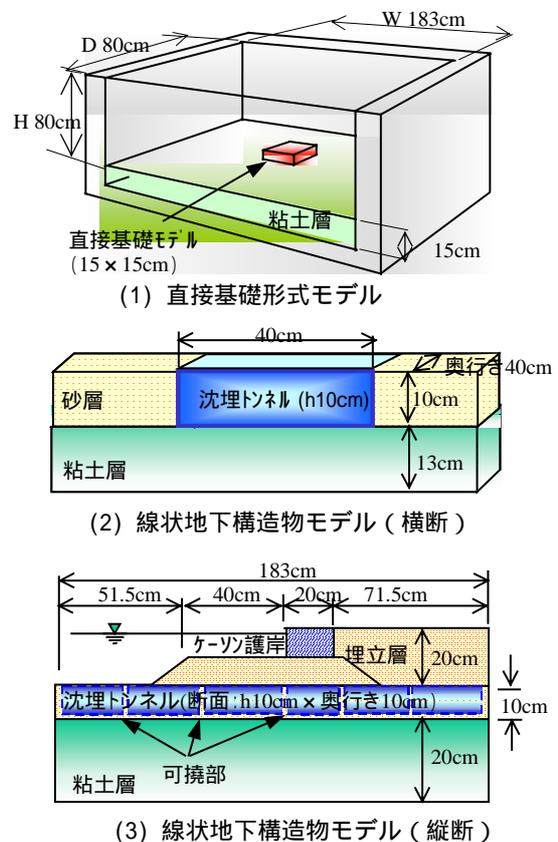


Fig. 2 模型地盤
Model Ground

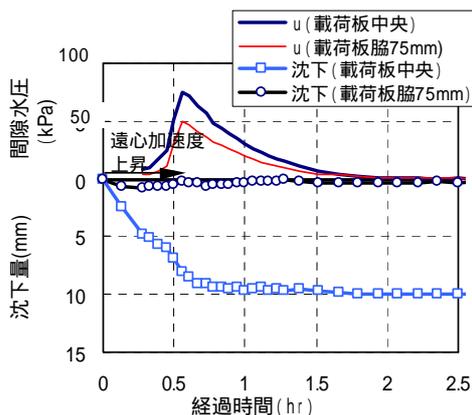


Fig. 3 沈下・間隙水圧の経時変化
Settlement and Excess Pore Pressure

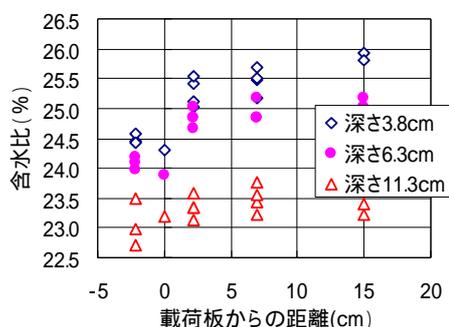


Fig. 4 含水比の深度別分布
Horizontal Distribution of Water Content

い、正規圧密地盤を準備した。自重圧密完了後、一旦装置の停止し、所定の荷重条件を載荷した。実験では変位計（接触式，レーザー式），間隙水圧計，2次元モデルでは，粘土層内部の評点を設置して，変形や過剰間隙水圧の経時変化を計測した。

3. 実験結果

3.1 直接基礎載荷モデル

Fig. 3 は，沈下板中央部の沈下と間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。これに対応した間隙水圧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. 4 は，圧密終了後に計測した載荷板周辺の含水比分布である。自重圧密の影響で載荷板との位置関係に関係なく，深くなるほど含水比の低下する傾向となっている。また載荷荷重による含水比の差は浅い部分ほど大きい。深い部分では差が小さく底面近くではほぼ様な含水比分布となっている。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。載荷荷重の圧密に及ぼす影響は比較的載荷



Photo 2 線状地下構造物 横断モデル模型地盤
Model Ground of Underground Structure on the soft clay ground

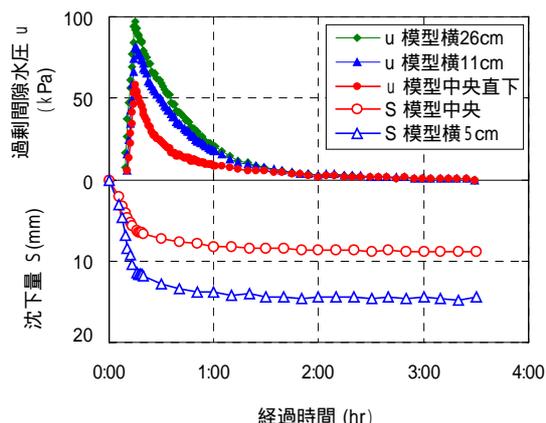


Fig. 5 地表面沈下・過剰間隙水圧の経時変化
Settlement and Excess Pore Pressure

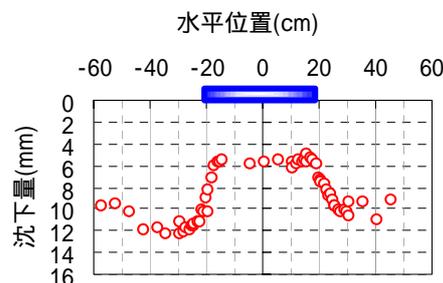


Fig. 6 圧密実験後の沈下分布(模型 2 : 幅 40cm)
Settlement of Surface of Soft Ground

範囲近傍で特に大きく，周辺への影響範囲は比較的狭い結果となっている。

3.2 線状地下構造物 横断モデル

Photo 2 に模型地盤を示す。Fig.5 は，線状地下構造物模型(幅 40cm)の中央部分で計測した沈下量と過剰間隙水圧の経時変化である。沈下は遠心加速度の上昇中(所要時間 16 分)に生じた後，3.5 時間(換算時間 2.0 年)で圧密沈下がほぼ収束し，最終沈下量は 8.8mm(換算沈下量 62cm)であった。載荷荷重が小さな模型下面ほど過剰間隙水圧の発生は小さい。周辺埋立部と同様の粘土表面の沈下計測結果値を示した模型から 10cm 離れた地点での過剰間隙水圧の発生状況は，模型下部に近い変化を示し，間隙水圧の発生範囲と沈下発生範囲の差が生じている。

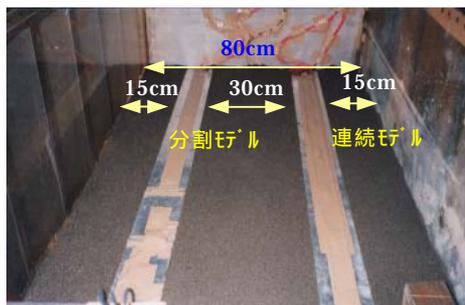


Photo 3 線状地下構造物 縦断モデル模型地盤
Model Ground with Underground Structure

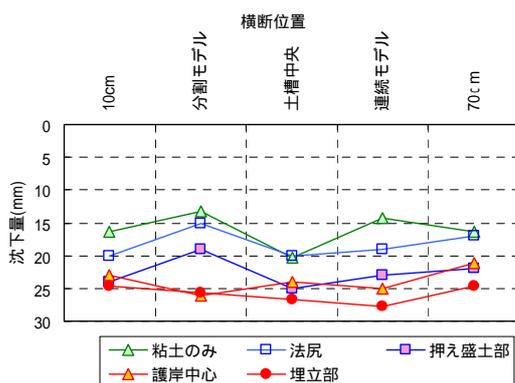


Fig. 8 沈埋トンネル周辺の横断沈下分布
Distribution of Settlement at some Sections

Fig. 6は、圧密が終了し遠心装置を停止した後に模型を撤去しながら計測した模型の粘性土表面の沈下分布である。模型直下では平坦な分布で約6mmの沈下となっている。埋立荷重が大きくなる模型外周では模型の両脇とも急激に沈下量が大きくなり、模型から5cm(換算距離4m)程度以上離れた範囲では約10mmと模型直下の沈下量に比べて70%程度大きな沈下量が計測されている。模型重量が周囲の埋立層に比べて荷重が小さな影響は模型周辺の比較的狭い範囲に限定されている。不同沈下の発生範囲は沈下対象層(実験時層厚約11cm)の30%程度に相当し、荷重低減状態の応力影響範囲は載荷時の概略的な応力分散45度に比べ狭い範囲となっている。

3.3 線状地下構造物 縦断モデル

3.3.1 実験手順 沈埋トンネルでは、縦断方向の不同沈下によって構造物に過大な応力が発生しないように可撓部(一種のヒンジ部)を設ける対策が用いられることが多く、実験においても可撓部の有無の異なる2つのトンネルモデル(横断面:幅10cm×高さ10cm)を同じ土槽内に30cmの間隔を空けて平行に設置し、同時にその挙動を観察するPhoto 3に示すような3次元モデルとした。圧密実験は、圧密中の若令埋立地盤に線状構造物が建設されたことを想定し、

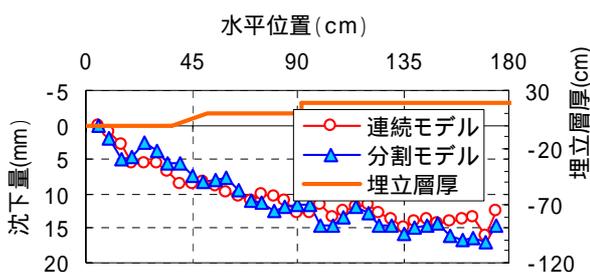


Fig. 7 沈埋トンネル設置部の沈下分布
Distribution of Settlement

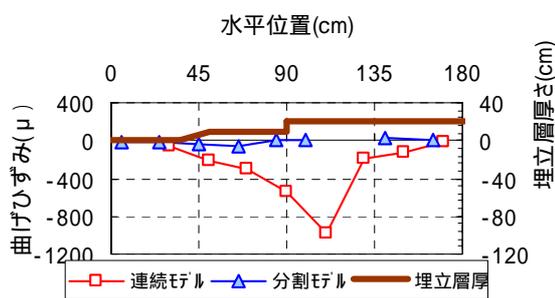


Fig. 9 沈埋トンネルの曲げひずみ分布
Distribution on Strain of Structure

Step1: 予圧密(載荷板: 圧密荷重=4 kN/m²)

Step2: 埋立盛土による遠心圧密(圧密途中の未圧密状態で一旦停止)

Step3: 埋立部分を一旦撤去してトンネルモデルを設置し盛土復旧後、再度遠心圧密

の手順で実験を進めた。

3.3.2 実験結果 Fig. 7に圧密完了後の模型直下の沈下分布を示す。可撓部有無に関わらず、沈下分布はほぼ同様の傾向を示し、護岸法線右側の埋立部分で大きな沈下となっている。

Fig. 8は、沈下の横断分布である。構造物上に埋立荷重が無いケーソン護岸前方部(Fig. 2(3)参照)では、トンネル設置部分がトンネル脇の砂層部分に比べ、沈下量が小さく、前節で示した横断モデルと同様の傾向を示している。しかし、構造物上に埋立土を設置した厚さが大きくなるほど、その傾向は小さくなり、逆にトンネル部分の方が大きな沈下量となっている。トンネル上の埋立が無い場合には粘土地盤には、単位重量の差が載荷荷重に反映されているが、剛性の大きなトンネル上に上載埋立部分が生じる部分では、応力集中により、沈下が大きくなっていることが考えられる。通常単位体積重量の影響のみで沈下量を算定する場合に比べて、大きな沈下量が発生する可能性があり、設計方法の改善点としてあげられる。

Fig. 9は、圧密中に計測したトンネル模型の曲げひずみである。可撓部を設けていない連続模型では、護岸部付近で大きな曲げひずみが発生しているのに対して、20cm 間隔で可撓部を設けたモデルでは、ほとんど曲げが生じていない。

可撓部の影響によって、不同沈下分布に大きな差異は現れないものの、構造物にはその影響が明確に現れており、可撓部の効果が確認できる。

4. 数値シミュレーション

4.1 解析モデル

弾塑性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、線状地下構造物モデルは2次元平面ひずみ条件とした。直接基礎形式の解析では修正カムクレイモデルを、線状地下構造物の解析では関口・太田モデルによる弾塑性解析を行った。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 に示す値を用いた。

4.2 直接基礎形式モデルの解析結果

Fig. 10 は、沈下と過剰間隙水圧の経時変化の比較である。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。

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 | | 0.32 |
| K_0 | | 0.471 |
| 透水係数 (cm/sec) | k | 5.2×10^{-6} |

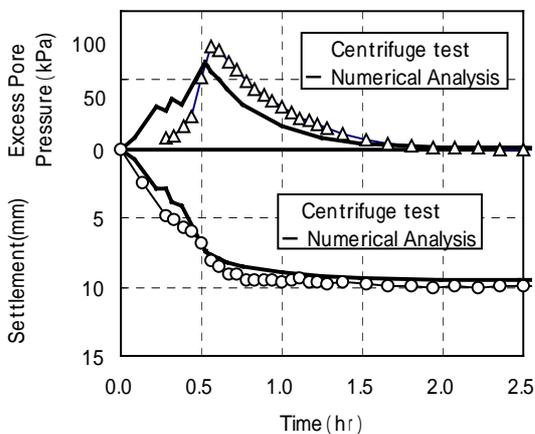


Fig. 10 沈下および間隙水圧の経時変化
Settlement and Excess Pore Water Pressure

Fig. 11には、載荷に伴う増加応力の分布を示す。地表面付近は載荷板の剛性の影響で載荷板端部が中央部に比べて大きな応力分布となっており、等分布荷重に比べ荷重端部での載荷荷重が大きな条件となっている。荷重は載荷範囲以外では急激に小さくなり、また深くなるとその差は小さくなっていることが示されている。

Fig. 12は、等分布荷重下の弾性応力理論解⁴⁾の水平分布、深度分布である。荷重は載荷範囲以外では急激に小さくなり、また深さ方向では6cm程度(実物換算4.2m)以深でその差は小さくなっていることが示されている。先に示した数値解析の結果と比較すると一

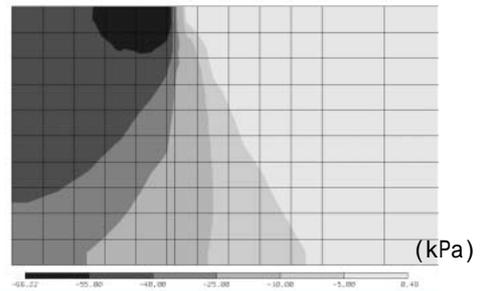


Fig. 11 増加応力分布
Stress Distribution

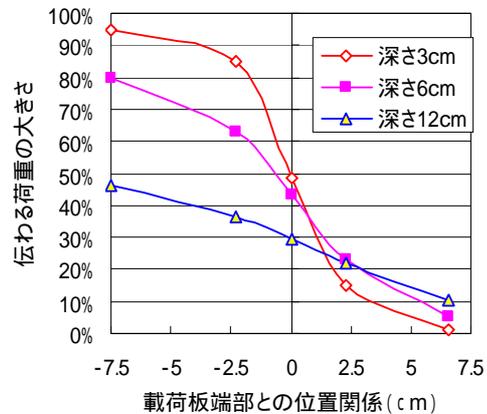


Fig. 12 弾性応力解による応力増分の分布状況
Stress Distribution

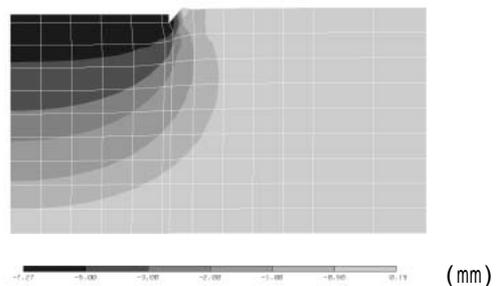


Fig. 13 沈下量の分布(解析)
Settlement Distribution

様な荷重分布を想定しているため、荷重端部の荷重が小さいにも関わらず、粘土層深部への応力伝播が弾性応力に比べて小さい。

Fig. 13は、圧密完了後の沈下量の分布図である。載荷板近傍では載荷に伴うせん断変形の影響で一度隆起した後圧密が進むため最終状態では、沈下が生じる範囲が非常に狭い範囲に限定されている。実際の沈下分布の目視による観測結果では、載荷板周辺の粘性土地盤は連続的に連れ込まれて変形するのではなく、貫入するような変形となっていたことから実際の地中応力分布は Fig.13 で示した解析結果の分布よりも載荷荷重周辺に集中していることが考えられる。

4.3 線状地下構造物モデルの解析結果

Fig. 14に、載荷直後の間隙水圧分布を示す。載荷直後には、粘土地盤への上載荷重は盛土部分に比べてトンネル部が小さいことから、載荷によって発生する過剰間隙水圧も周辺の埋立部分直下に比べて小さな分布となっている。

Fig. 15は、圧密完了後の変位ベクトルである。トンネル部分で沈下は小さく、若干周辺部からの変位の影響によってトンネル中心軸に向けての若干の変位が生じている。

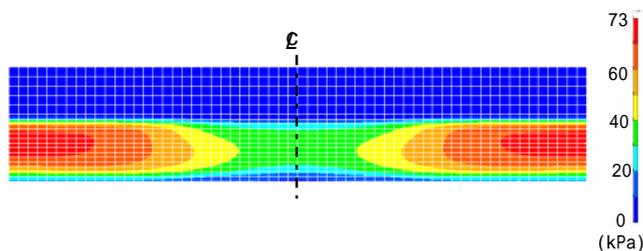


Fig. 14 モデル周辺埋立直後の過剰間隙水圧分布
Excess Pore Water Pressure

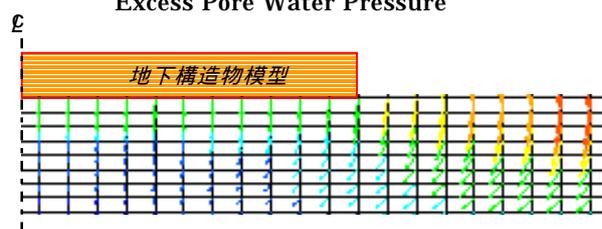


Fig. 15 粘土層の変形ベクトル
Ground Displacement

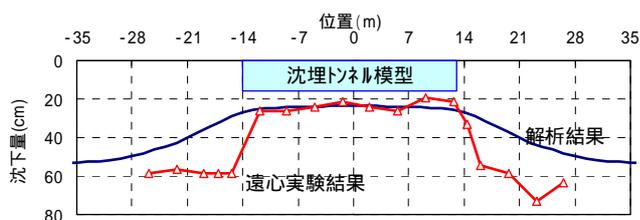


Fig. 16 圧密終了後の沈下分布
Settlement Distribution after Consolidation

Fig. 16は、線状地下構造物周辺の粘土表面の沈下解析結果である。解析では、正規圧密地盤に盛土と地中構造物の載荷を設定したため、実験における遠心加速中の沈下量は含んでいない。解析結果からも模型直下では周辺域に比べて沈下量が小さくなる不同沈下が現れているが、沈下量が変化する範囲は模型脇 20m の範囲で、実験結果の 5m 程度に比べて不同沈下量の変化は緩やかで、影響範囲も広い評価となっていることがわかる。

5. まとめ

基礎形式の違いによる不同沈下挙動について、遠心模型実験を行い、各々精度良くその挙動を把握することができるとともに、数値解析では精度良くシミュレートできた。得られた主な結果は以下の通りである。

- 1) 設計で通常用いられる弾性解で得られる応力分布のみによって得られる沈下量の評価ではせん断変形にともなって生じる側方変形の影響が考慮できず、荷重境界部でその差が大きく、荷重履歴を考慮した FEM 解析が重要である。
- 2) 直接基礎を想定した遠心圧密模型実験を行い、荷重の分散影響範囲を検討した結果、荷重載荷に伴う沈下変形の影響範囲は、数値解析に比べても比較的狭い範囲で生じる。
- 3) 線状地下構造物について横断モデル(2次元)と縦断モデル(3次元)の模型を作製し、遠心圧密実験を行った結果、線状地下構造物の見掛けの単位体積重量が埋め立て土に比べて小さいことに起因する沈下量の差異(不同沈下)が精度良く再現できた。不同沈下の影響範囲は弾性解や FEM 弾塑性解に比べて小さく、周辺地盤への影響範囲は比較的狭い範囲である。また、構造物の縦断方向の不同沈下は構造物に応力を発生させる結果が確認でき、可撓部の設置で曲げ応力の解消できることが実験的に検証できた。

参考文献

- 1) 土質工学会九州支部編：地盤と構造物の不同沈下とその対策(1991)
- 2) たとえば、杉江茂彦：実務分野における三次元土/水連成 FEM 解析の利用状況，土と基礎，43-7(1995)
- 3) 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)
- 4) 吉見吉昭：土質力学，p.58，彰国社