

# CVC（強制圧密脱水）工法の室内模型と 原位置試験における圧密促進効果の解明

棚橋 由彦<sup>1</sup>・塩野 敏昭<sup>2</sup>・蔣 宇静<sup>1</sup>  
篠原 努<sup>3</sup>・上原 高寛<sup>3</sup>

## Model test and field investigation for clarifying the compaction effect of CVC (Compact Vacuum Consolidation)

by

Yoshihiko TANABASHI<sup>1</sup>, Toshiaki SHIONO<sup>2</sup>, Yujing JIANG<sup>1</sup>

Tsutomu SHINOHARA<sup>3</sup> and Takahiro UEHARA<sup>3</sup>

This paper describes, a technique for clarifying the compaction promotion effect of CVC(Compact Vacuum Consolidation) which has been developed based on model experiments. Comparison of model tests by using the proposed approach with the phenomenon investigated in field is also carried out in order to establish a rational design method.

### 1. 序 論

近年、施工機械の進歩、新材料の開発、環境保全意識の高揚などの社会背景に加え、工期短縮、工費削減が社会的に要求され、地盤改良に関する技術の向上および新たな技術の開発が求められている。

CVC（強制圧密脱水）工法は、地表から打設した鉛直ドレーンとその頭部を連結させた水平ドレーン及び有孔集水管（排気・排水パイプ）に対し、地盤の地表面を気密シートで覆い真空ポンプを作動させ、そのドレーンと有孔管を通じて強制的に地中の水と空気を排出する軟弱地盤圧密促進工法である。プレローディングによる地盤改良に比べると盛土材の搬入や撤去がなく、地盤強度に応じた段階施工も必要ないため、工期短縮、工費削減が図れ、また周辺地盤の変状を軽減できる。

CVC工法は、卓越した軟弱地盤改良効果と施工性の良さも然ることながら、工期短縮、工費削減を目的として、軟弱地盤対策工として採用されるケースが全国的に増加している。しかし、CVC工法の改良区域

内が収縮するという特殊なメカニズムが未解明であり、合理的な設計手法も確立されていない現状にある。

そこで、本研究の目的は、CVC工法の原理を模擬した室内模型試験装置（真空圧密試験機）の試作とそれを用いた試験結果の解釈を行った。また別途実施した原位置試験で観測された現象との比較も行い、両者の整合性をはかりつつ、圧密促進効果を解明すると共に合理的な設計手法の確立に資することにある。

### 2. CVC（強制圧密脱水）工法<sup>1)</sup>

図-1にCVC工法概念モデルを示す。CVC工法は、軟弱地盤の地表面から鉛直ドレーンを多数打設し、これらの鉛直ドレーンの頭部と水平ドレーンを連結し、有孔集水管を敷設して、それらを気密シートで被覆する。その後、真空駆動装置で改良対象地盤を減圧し、ドレーン材、有孔集水管を通じて地中の水と空気を軟弱地盤から排出する工法である。鉛直ドレーンを通し深部まで真空圧が作用し続け、強制脱水（排水）により圧密が促進され、短期間で圧密沈下や強度増加が図れる。

平成14年4月19日受理

<sup>1</sup> 社会開発工学科 (Department of Civil Engineering)

<sup>2</sup> 丸山工業株式会社 (Maruyama Engineering Co.,Ltd)

<sup>3</sup> 大学院修士課程社会開発工学専攻 (Graduate Student, Department of Civil Engineering)

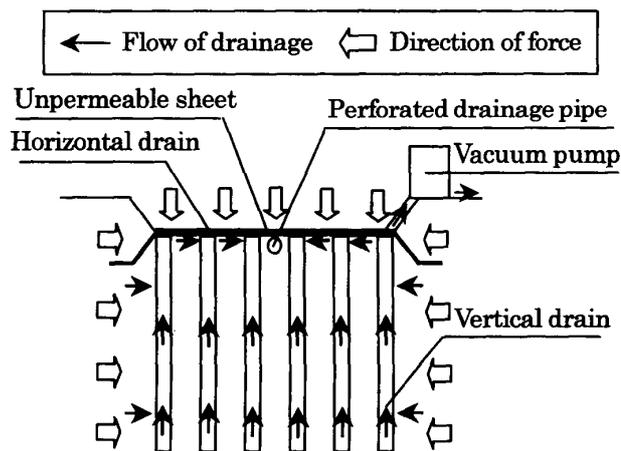


Fig. 1 Conceptual model of CVC method

3. 原位置試験と考察

(1) 地盤の特徴と施工概要<sup>2)</sup>

試験施工(平成12年度 一般県道 江北芦刈線道路改良事業工事)は、佐賀県小城郡で実施した。地盤改良面積は360m<sup>2</sup>であり、鉛直ドレーンを0.8m間隔で深度12.5mまで打設し、真空駆動装置を1台配置した。原地盤にはシルト質粘土からなる軟弱地盤(厚さ約12.5m)が存在し、GL-4.75m~-5.0mにシルト混り砂層がある。深度13m程度までN値は0である。

施工途中、真空度が低下したため26日目に点検・補修を行った。真空ポンプ稼働後63日目に盛土を行い、82日目に真空ポンプを停止した。点検・補修に関しては、有孔集水管周辺が土粒子により目詰まりを起こしたものと考え、目詰まり防止のためドレーン材を巻き対処した。

図-2に断面図、図-3に平面図と各計器の計測位置を示す。

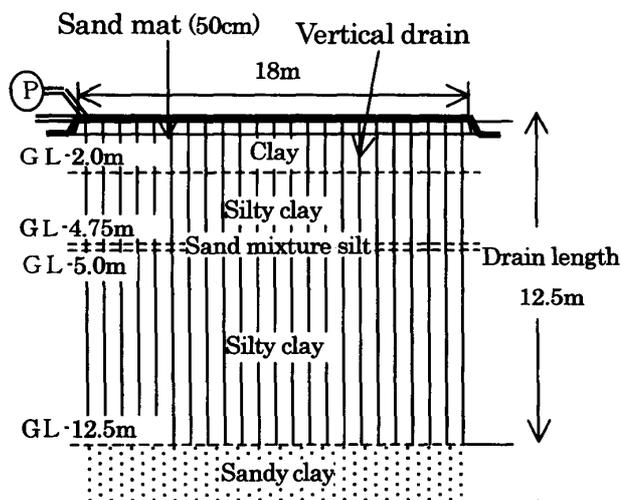
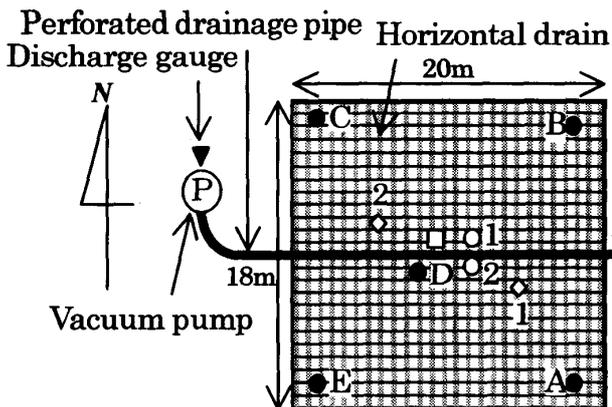


Fig. 2 Working procedure (section)



- : Settlement(surface)
- : Porewater pressure gauge
- : Settlement(according to layer)
- ◇ : Pressure sensor
- ⊥ : Vertical drain

Fig. 3 Working procedure (plane)

(2) 計測結果と考察

a) 真空圧および間隙水圧の経時変化

図-4に真空圧および間隙水圧の経時変化を示す。真空圧力は、真空タンク内で約-80kPa、気密シート直下(地表面)では補修後約-50~-60kPa程度を保持している。気密シート直下(地表面)では真空タンク内に比べ約30%低い値を示した。間隙水圧は、GL-5.3mはポンプ稼働後急激な低下が見られ、その後は測定深度付近に存在する砂層の影響により敏感に反応したと考えられる。GL-8.5mは徐々に真空圧が作用し間隙水圧も低下したと考えられる。両者とも間隙水圧低下量は40kPa程度であり、深度に関係なく真空圧が作用したことが確認できた。

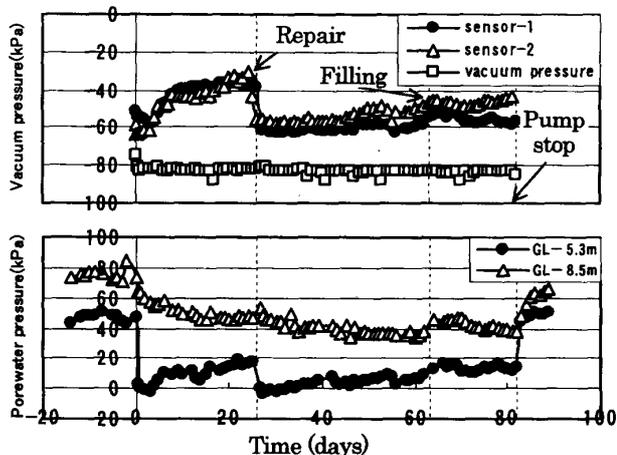


Fig. 4 Vacuum pressure and porewater pressure versus time relationships

b) 排水量の経時変化

図-5に排水量の経時変化を示す。累積排水量から毎分の排水量を算定した。排水量は補修作業前後で変化が生じているが、ほぼ一定の漸減度で排水が行われている。本来ならば改良区域は有限であり排水量は減少すると考えられるが、適用地盤では改良域外から水が流入したと推定される。GL-4.75~-5.0mの中間砂層が排水層（サンドマット）の役割を担ったものと考えられる。

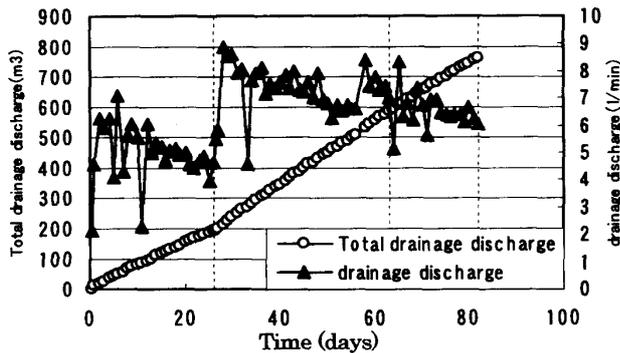


Fig. 5 Drainage discharge versus time relationship

c) 鋼製沈下盤（沈下量）の経時変化

図-6に鋼製沈下盤（沈下量）の経時変化を示す。測定位置は図-3に示した。これはサンドマット下の粘土層上端からの沈下量である。中心Dが最も沈下が大きく、ポンプ停止直前の沈下量は約80cmである。補修後は沈下が促進されており、盛土後もやや増加の傾向が見られる。また真空ポンプ停止後のリバウンドはポンプ停止後1週間で約3cmであった。

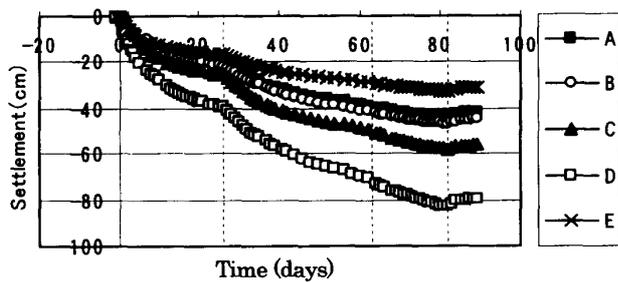


Fig. 6 Settlement versus time relationship

d) 地表面の沈下及び側方変位挙動

図-7に真空ポンプ稼動63日目の最大沈下量（ここでは改良域中心の沈下量約70cm）に対する改良域内外の沈下と側方変位の割合を表す。改良域端部で最大沈下量の5~8割程度の沈下が生じている。北方向を除けば、側方変位は最大沈下量の4割以下に収まっている。また改良域端部から約10mを超えると真空によ

る影響は少ないと考えられる。

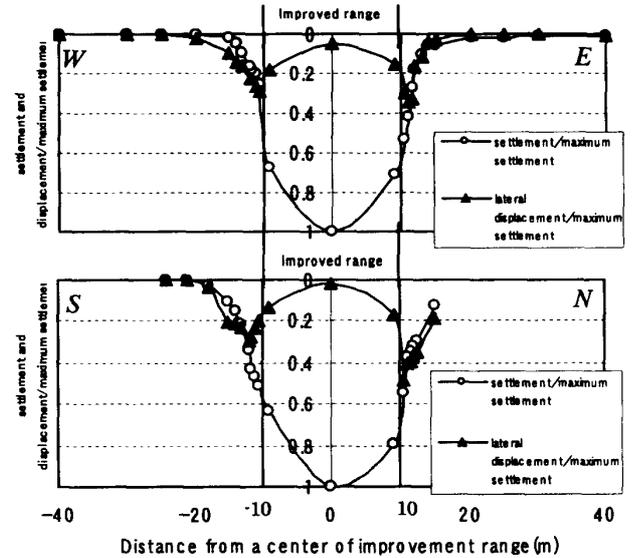


Fig. 7 Settlement and lateral displacement at improved area and its environ (t=63day)

e) 地盤物性値の変化

N値は0だったものが、施工後にはGL-1m~-1.5mで2に増加したが明瞭な変化は確認できていない。含水比、間隙比の低下（圧密）が確認され、上部シルト質粘土層ほど変化は大きい。また図-8に三成分コーン貫入試験による先端抵抗値（ $q_t$ ）を示す。ペーパードレーン打設後と真空圧密終了後と比較すると、真空圧密終了後の粘性土の $q_t$ は約2倍程度大きくなった。また2地点で試験を行っていたが、強度増加の発生時期に違いはあるが、最終的な $q_t$ の増加率はほぼ同程度である。これは、真空圧密工法の効果が出るまでの時間的遅れや試験結果のばらつき等による影響であると考えられる。

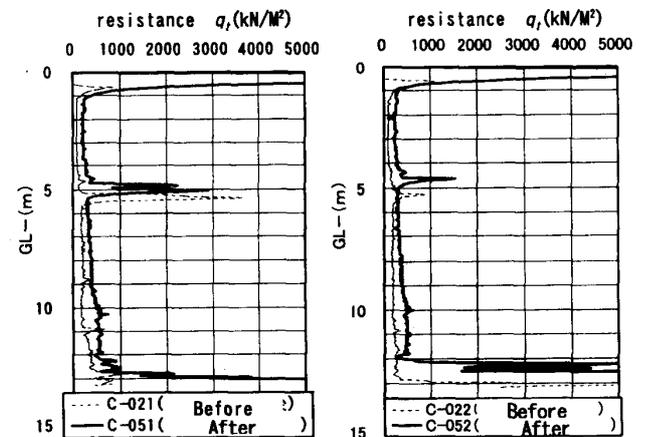


Fig. 8 Distribution of cone penetrometer resistance with depth

(3) まとめ

原位置試験により、①改良効果の確保のため必要な負圧の維持については、一時的に減少したものの、原因究明もでき、その後は安定した施工管理が実施された②地盤改良区域内の大きな沈下量に対して、周辺地盤の変状が比較的小さいことが確認された③真空圧密のみによる周辺地盤への影響は、改良域端部からドレーン深度と同距離程度まで及ぶ④真空圧は鉛直ドレーンの打設深度まではほぼ減衰することなく伝達することが確認された。

4. 室内模型試験と考察

(1) 試験装置と試験方法

CVC工法を模擬できる試験装置を試作した。図-9に試験装置の概要を示す。供試体中央にドレーン材(引張りピストンリングにキッチンペーパーを巻き作製)を、供試体内にセラミック間隙水圧計を設置した。間隙水圧計センサー内は十分に脱気した水で満たし使用した。ドレーン材を介して真空圧を作用させ、排水条件は試料の外周からドレーンに向かう放射流れのみである。全試料についてそれぞれ真空圧-80kPaで24時間真空圧密を行った。体積変化量は排水量から算定し、軸変位は外部変位計によって計測した。ひずみについては、真空圧負荷前の供試体高さと同体積を基準として軸ひずみ $\epsilon_a$ と体積ひずみ $\epsilon_v$ を算出し、側方ひずみ $\epsilon_r$ はこの両者から $\epsilon_r = (\epsilon_v - \epsilon_a) / 2$ と間接的に求める。

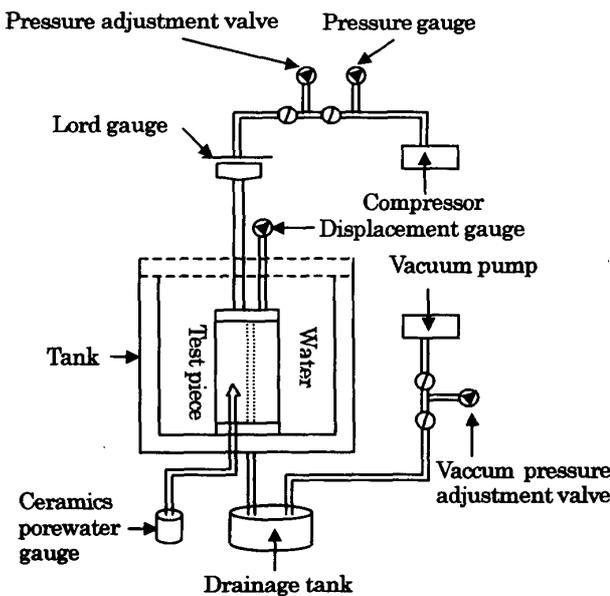


Fig. 9 Schematic diagram of experiment at apparatus

(2) 試料及び供試体

本研究で使用した試料は、佐賀県小城郡で不攪乱採取した有明粘土を用いた。シンウォールサンプラーより抜き出し直径7.4cm、高さ15cmの円柱供試体とした。試料概要を表-1に示す。

(3) 実地盤と模型試験の関係

実施工と室内模型試験間の時間スケールの設定については、ドレーン工法の設計手法(バロン式)に従う。

$$t = \frac{d_e^2}{C_h} \cdot T_h \text{より, } t_m = \left(\frac{d_{em}}{d_{ep}}\right)^2 \cdot t_p \quad (1)$$

ここに、m:模型、p:実地盤、de:等価有効円の直径、t:時間である。

また、 $d_{em} = 7.4$  (cm)、 $d_{ep} = 1.128d = 1.128 \times 80$  (cm) = 90.24(cm)を式(1)に代入すると、

$$t_m = 6.72 \times 10^{-3} t_p \quad (2)$$

が導かれ、これを実地盤と模型試験の時間換算式とする。

また、変位スケールについては模型試験より求めたひずみに各層厚を乗じ試験施工結果と対応させる。実地盤と試料概要を表-1に示す。

Table-1 Contents of test pieces

| Ground Level(m) | Soil              | Model experiment test piece No |       |
|-----------------|-------------------|--------------------------------|-------|
|                 |                   |                                |       |
| GL-2.00         | Cray              | T-1                            | T-1-1 |
|                 | Silty clay        |                                | T-1-2 |
| GL-4.75         | Sand mixture silt | T-2                            | T-2-1 |
| GL-5.00         |                   |                                | T-2-2 |
| GL-9.30         | Silty clay        | T-2                            | T-2-3 |
|                 |                   |                                | T-2-4 |
| GL-12.50        | Silty clay        | T-3                            | T-3-1 |
|                 |                   |                                | T-3-2 |

(4) 試験結果と考察

以下に試験結果を示す。ただし、各試験における経過時間を実地盤に対応させている。

図-10に軸ひずみ( $\epsilon_a$ )、図-11に排水量から算定した体積ひずみ( $\epsilon_v$ )、図-12に軸ひずみ( $\epsilon_a$ )、側方ひずみ( $\epsilon_r$ )関係を示す。経過日数80日の $\epsilon_a - \epsilon_r$ 関係は、いずれの試験ケースにおいても $\epsilon_a < \epsilon_r$ であり、 $\epsilon_a$ に対する $\epsilon_r$ の割合はT-1-1で1.01、T-1-2で1.31、T-2-1で3.43、T-2-3で2.25、T-2-4で2.61、T-3-1で3.19である。圧縮

性に関していずれの実験ケースに関しても鉛直方向より水平方向の圧縮性の方が高い傾向を示した。T-1, T-2, T-3のひずみの違いは土質構成によるものであり、より軟弱な高含水比試料T-1ほど各ひずみは大きい値となった。

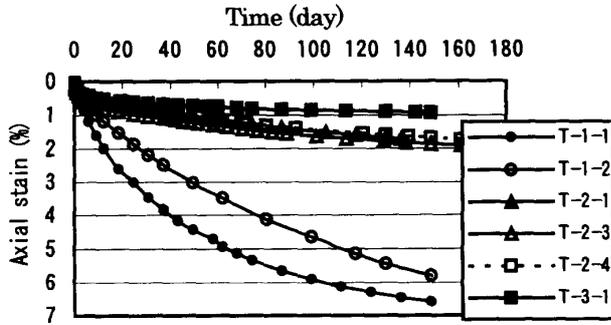


Fig.10 Axial stain versus time relationship

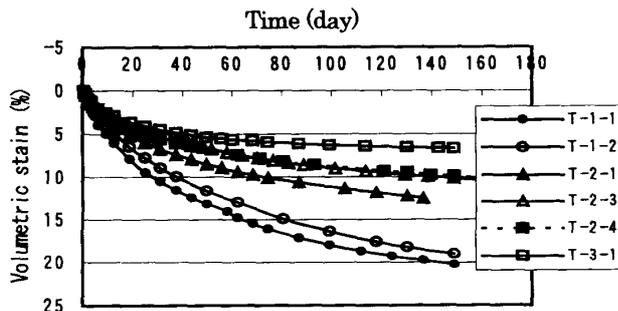


Fig.11 Volumetric stain versus time relationship

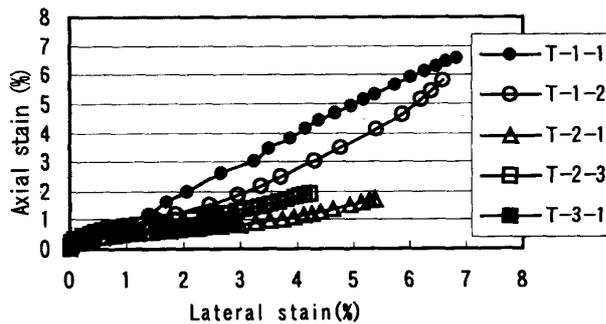


Fig.12 Relationship between axial and lateral strain

図-13に沈下量の経時変化を示す。模型試験より求めたひずみに各層厚を乗じ総沈下量を求めた。軸ひずみより算定した経過日数82日の沈下量は約32cmとなる。実施工改良域内では32~83cmの沈下が生じており、模型試験より算定した沈下量が小さい値となった。実施工で計測した層別沈下量より、改良域中心で地表~GL-3.5mは約37cm、GL-3.5m~GL-7.5mは約26cm、GL-7.5m~は約20cmの沈下が生じている。

室内模型試験より実施工層別沈下に相当する沈下量を算定すると、地表~GL-3.5mは約17cm、GL-3.5m~GL-7.5mは約10cm、GL-7.5m~は約5cmの沈下が生じている。深度が深くなるほど実施工と模型試験間の割合、差が大きくなっている。模型試験では、実施工における土被り圧を考慮しておらず、これは模型試験値の方が小さく、また深度が深くなるほど割合が大きくなった要因であると思われる。

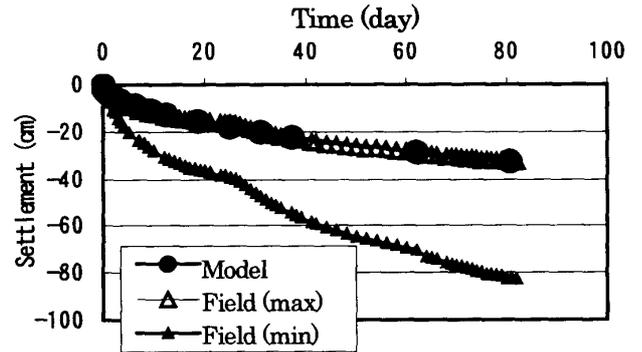


Fig.13 Settlement versus time relationship

図-14に排水量の経時変化を示す。模型試験より求めた体積ひずみに実施工の各層体積を乗じ総排水量を求めた。経過日数40日までは模型試験より求めた排水量の方が実施工より大きく、40日以降は実施工が大きな値を示した。実施工では26日目までは真空圧が低下したために排水量が小さく、その後の補修により実施工が大きくなったと思われる。経過日数80日の体積ひずみから算定した排水量は約490m<sup>3</sup>であるのに対して実施工では765m<sup>3</sup>である。改良域は有限であるが実施工では収束の傾向が見られておらず、改良域外からの水の流入も考えられ、模型試験が小さい値となったと考えられる。

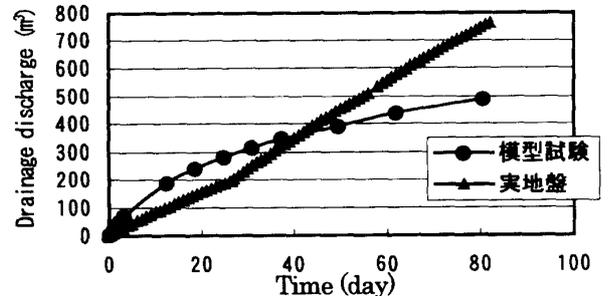


Fig.14 Drainage discharge versus time relationship

図-15に間隙水圧計の経時変化を示す。T-1-1は、真空圧の作用に伴う間隙水圧の低下が確認できる。しかし、その他の実験ケースでは真空圧の作用に伴う間隙水圧の低下を評価するのは難しい。間隙水圧計センサー

内を満たす水の脱気が不十分であったか、間隙水圧計細部からの空気の漏れが要因で試験結果に影響したと思われる。

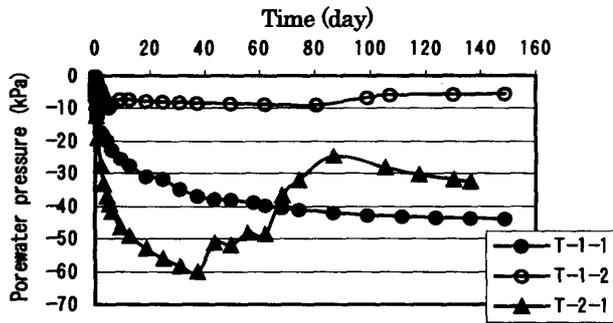


Fig.15 Porewater pressure versus time relationship

図-16に、試験後の供試体含水比を測定し排水量から逆算して求めた供試体の初期含水比および実地盤80日相当時の含水比を示す。より軟弱な高含水比試料T-1において含水比の低下が大きい。

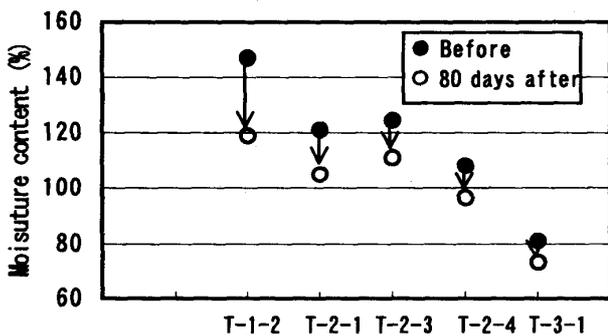


Fig.16 Moisture content change within each test piece

(5) まとめ

今回用いた試料は不攪乱であり原位置試験との比較を試みたが、試験結果は模型試験の方が小さい値となった。その要因として、まず実地盤における土被り圧を考慮しなかったことが挙げられる。また、ドレーン工法の設計手法(バロン式)に従い時間スケールを設定したのだが、CVC工法は改良区域内が収縮するという

メカニズムを有しているため検討の余地があると思われる。

通常、等方圧密の場合、軸ひずみ( $\epsilon_a$ )と側方ひずみ( $\epsilon_r$ )は等しくなるが、原位置試験では側方ひずみより軸ひずみが大きく、模型試験では軸ひずみより側方ひずみが大きい値となった。原位置試験では真空タンク内、地表面、地中と圧力は徐々に小さくなっており、圧力差に伴い改良域に働く力も側方より鉛直方向の方が大きいためである。しかし、模型試験では試料全体が大気と開放されており、等方的に力が作用するため完全には実現場を模擬できていないとも考えられる。そのため、試験装置の開発課題として、地盤内初期応力を作用させた上で上部のみ大気と開放させることでより実現場を模擬できるのではないかとと思われる。

今回の室内模型試験では、間隙水圧計の測定が十分にできなかった。現在、測定できなかった原因解明を行っており、脱気水はもちろんのことであるが、間隙水圧計細部からのわずかな空気の漏れが大きな要因であると考えた。円筒の本体(金具)とチューブの接続部において、真空圧作用に伴いチューブが収縮し漏れが生じることが確認された。これを含め今後改良・改善を行っていく予定である。

5. 結 論

本研究では、CVC工法の原位置試験により力学的特性、圧密効果等の挙動を把握した。次いで、原位置試験区で不攪乱採取した試料を用いて室内模型試験を行い、両者の比較を試みた。その結果、室内模型試験値が小さくなったが、原理的には工法を模擬できた。今後、各課題を解決し室内模型試験の確立を図りたい。

参考文献

- 1) 真空圧密技術協会, N&H強制圧密脱水工法ーリニューアル真空圧密工法ー, 技術資料, 2000.
- 2) 軟弱地盤対策工法ー調査・設計から施工までー, pp.95~101, 土質工学会.