

地下水位変動に伴う軟弱粘土の圧密遅延に対する現象の検証と対策 —新坂元駅周辺地区市街地整備工事—

Verification and Measures for Delayed Consolidation of Soft Clay due to Fluctuation of the Groundwater Level

國富 和眞*1 森本 達司*2
Kazuma Kunitomi Tatsushi Morimoto
上代 真之輔*1 久松 伸一*1
Shinnosuke Jodai Shinichi Hisamatsu

要旨

本工事は、宮城県山元町の震災復興事業のひとつで、旧市街地より山手側に常磐線新坂元駅（他社にて建設中）を中心とした新市街地を設計・施工で建設するものである。建設位置の地下水位は地表面付近にあり、地盤は軟弱な砂層と粘土層が合計 10m 程度の厚さで互層状に堆積していた。そのため、工事では緩い砂層の液状化防止と軟弱な粘土層の圧密沈下促進を目的としたグラベルコンパクションパイル（GCP）工法による地盤改良を採用している。

施工区域のうち比較的粘土層が厚い箇所では圧密沈下が遅延し、後続工事の工程に支障する事態が生じた。原因調査の段階で粘土層下の砂層の被圧水位が盛土施工前に比べて高くなっていることがわかり、これが圧密遅延の原因の一つと想定した。そこで、圧密試験結果や地下水の状態を考慮した FEM 圧密変形解析で実地盤の沈下現象を再現することで、被圧水位の変動による影響が大きいことを検証した。なお、工程回復のための圧密促進対策には、圧密遅延の原因である被圧水位を下げるのが有効と考え、負圧による地下水の集水能力が高いスーパーウェルポイント工法を採用した。
キーワード：圧密遅延 被圧地下水 スーパーウェルポイント工法 FEM 圧密変形解析

1. はじめに

山元町は宮城県南の沿岸部に位置し、平成 23 年 3 月 11 日に発生した東日本大震災では町の総面積に対して 37.2%の範囲に津波が押し寄せ、多くの人的被害や家屋の被害が生じた¹⁾。震災復興計画では、津波被災地域居住者の移転先を津波浸水被害が及ばない JR 常磐線新駅周辺や国道 6 号線沿いに集約することとし、現在、「災害に強く快適に暮らせるコンパクトなまちづくり」をコンセプトにした新市街地の整備工事が進行中である²⁾。

本工事は新市街地整備工事の一つで、新たに建設される JR 常磐線新駅「新坂元駅」周辺箇所の農地を盛土で嵩上げして新市街地を整備する工事である。図 1 に工事位置を、図 2 に新坂元駅周辺地区市街地イメージを示す。なお、工事概要は下記に示すとおりで、本工事は宅地造成実施設計や公営住宅建築設計を含む「設計・施工一括方式」で発注された。

【工事概要】

（土木工事）造成面積：9.4ha

- ・土工事（切土：0.8 万 m³、盛土：16.2 万 m³、サンドマット：6.8 万 m²）
- ・地盤改良工事（GCP 工：16,150 本（φ700、L=12m）、静的締固め工：4,468 本（φ700、L=12m）、深層混合処理



図 1 当該工事位置および周辺の状況



図 2 新坂元駅周辺地区市街地イメージ
（データ提供：山元町）

*1 土木事業本部 技術部 *2 東北支店 土木部

工：1,672本（φ2500、L=12m）

- ・その他（調整池工事、雨水排水工事、汚水排水工事、給水工事、舗装工事、道路施設工事、緑地公園工事他）（建築工事）災害公営住宅建設工事（56戸）

（実施設計）

- ・宅地造成実施設計（整地設計、防災設計、調整池設計、道路設計、雨水設計、汚水設計等）

- ・公営住宅建築設計（戸建・連棟：56戸）ほか

建設位置の地盤は、軟弱な砂層と粘土層が合計10m程度の厚さで互層状に堆積しており、地下水位は地表付近と高い状態であったため、工事では軟弱地盤対策（締め固め工法他による地盤改良工事）を計画・実施した。盛土造成に際しては、圧密の収束（所定の圧密度および残留沈下量への到達）を確認した後に盛土上部の整備を行う手順となるが、一部盛土範囲に圧密未了箇所が発生したため、後続工事の工程遅延防止を目的とした圧密促進対策を行う必要があった。

本報告では、圧密遅延の発生状況と工程回復のために採用した圧密促進対策工、ならびにFEM圧密変形解析により圧密遅延の原因について分析した結果を述べる。

2. 地盤特性および軟弱地盤への対応

2.1 建設位置の地盤特性

工事着手時に宅地造成実施設計のために、既設調査を補完した位置の追加ボーリング調査等の地盤調査を実施した。ボーリング調査位置を図3に、本報告での対象範囲を含む土質推定断面図を図4に示す。また、図5に軟弱地盤の検討に用いた対象範囲付近の土質特性（土性図）を示す。

地盤は上位から表土（Ts：耕作土）、腐植土層（Apt）、沖積粘土層（Am）、沖積砂層（As）、洪積砂層（Ds）、基盤層（山下層：Ys）の層序である。このうち、沖積層となる粘性土（Ts、Apt、Am）および砂質土（As）は軟弱地盤として位置付けされ、盛土に伴う圧密沈下、液状化および盛土安定（周辺影響）に関する対策工が必要となった。また、水理調査から、沖積粘土Amの下位層は被圧帯水層であることがわかり、造成区域全体ではGL-0.13m～+0.68mの、本報告の対象付近ではGL+0.35mの被圧水位をそれぞれ確認した。

2.2 軟弱地盤対策工の採用

軟弱地盤対策は下記の建設地地盤に関わる諸問題に対して複合的に効果が期待できる工法を選定した。

- ・沈下問題：沈下量軽減、沈下時間短縮可能な工法
- ・安定問題：すべり抵抗の増加が期待できる工法
- ・液状化：液状化防止を期待できる工法

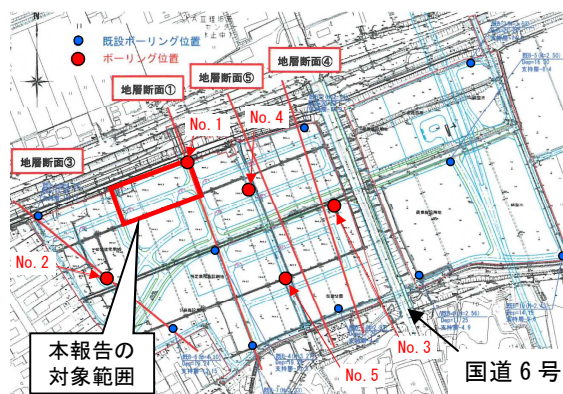


図3 ボーリング調査位置

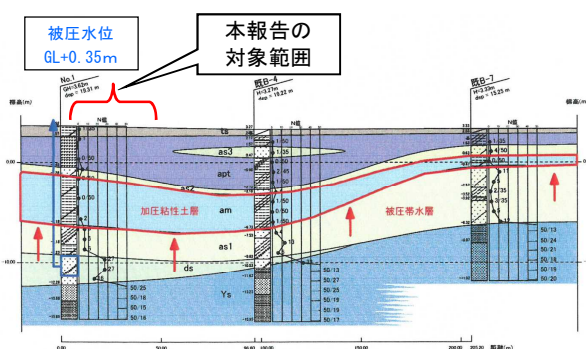


図4 土質推定断面図（地層断面①）

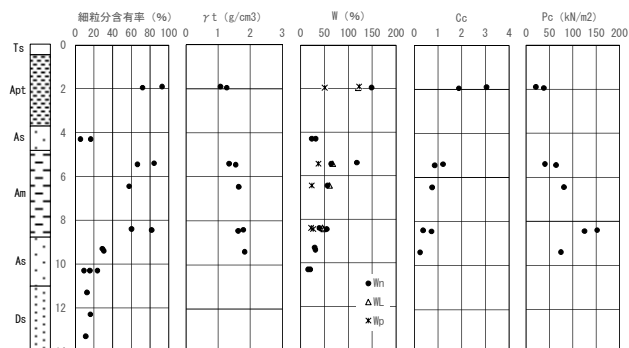


図5 土性図（対象範囲）

- ・周辺地盤の変形：変形抑制効果が期待できる工法

造成域内の対策工法は、主に沈下問題や液状化対策等に対応できる締め固め工法を、区域の境界および既設道路（国道6号）周りの対策工は、主に安定問題や周辺地盤の変形抑制対策に対応可能な固化工法を採用することとした。図6に各工法の平面配置を、図7に地盤改良断面図を示す。各工法の概要は以下に示すとおりである。

2.2.1 締め固め工法（グラベルコンパクションパイル（GCP）工法）の概要

締め固め（GCP）工法は、締め固めた礫材による杭体を形成することで周辺の軟弱地盤を締め固め、杭体の支持力による安定性の増加、沈下の軽減、N値の増加による液状化防止な

どの複合的な効果が期待できる。締固め工法の適用範囲は、区域の境界や既設道路際を避け、区域外への影響が及ばない平面区域を対象とした。また、民家近接範囲に対しては、振動・騒音の影響を考慮して静的締固め工法（Geo-KONG 工法）を採用した。

GCP 工（杭径 $\phi 0.7\text{m}$ ）による地盤改良は沖積層下端までを対象とした。改良率は圧密沈下検討および液状化検討で算定した必要改良率を比較して危険側の値を採用し、ブロック毎に改良率 4.9～19.6%（打設間隔 2.8～1.4m）の範囲で決定した。なお、各種検討で用いた許容値は既往の指針類^{3) 4)}などを参考に下記のとおりとした。

<検討で用いた許容値>

- ・沈下検討：①放置期間後の残留沈下量 $S_r \leq 10.0\text{cm}$
②放置期間後の圧密度 $U \geq 90\%$
- ・液状化検討：①地表面変位量 $D_{cy} \leq 5.0\text{cm}$
②液状化危険度 $PL \leq 5.0$

2.2.2 固化工法（深層混合処理工法）の概要

固化工法（深層混合処理工法）は、セメント混合による柱状改良杭体を造成し、地盤強度の増加（すべり破壊の防止）、沈下量の軽減、GCP 打設時の外部への変位抑制、液状化防止などの複合的な効果が期待できる。固化工法の適用範囲は、締固め工法が適用できない区域の境界や既設道路際を対象とした。

改良幅は、図 7 に示すように、締固め杭打設による影響範囲（締固め杭下端深度から上方 45 度の平面距離）をもとに設定した。柱状改良杭の平面配列は、液状化対策として最低限必要な本数を確保するために、改良率 50% の格子状（TOFT 工法）としている。また、大口径杭（ $\phi 2.5\text{m}$ ）によるコスト低減や施工時の周辺への変位抑制対策として、深層混合処理工法は「RAS コラム工法」を採用した。

2.3 盛土に伴う圧密沈下管理

軟弱地盤上に構築された盛土の沈下は、設計時の予測と異なることが多い。これは、設計時に仮定した軟弱粘土層の層厚の違いや、圧密試験によって得られる地盤定数のばらつき、たとえば $e \sim \log P$ 関係（沈下量算定に使用）および $\log C_v \sim \log P$ 関係（沈下時間の算定に使用）の場所によるばらつきが主な原因である。そのため、一般には、施工時に動態観測による圧密沈下管理を行って、沈下収束の確認や、問題発生時の対策検討を行うことになる。

本工事においても、管理ブロックを分割し、沈下板を各ブロックに 1 箇所設置して動態観測（沈下測定）を行った。

2.3.1 双曲線法による将来沈下挙動の予測

実測の沈下量から将来の沈下挙動を予測する手法には双曲線法を用いた。双曲線法は、時間～沈下曲線について、

沈下が式(1)のような双曲線に沿って変化していくことを仮定した手法である（図 8 参照）。

$$S_t = S_0 + \{t / (\alpha + \beta \times t)\} \quad (1)$$

ここに、

- S_t : 時間 t における沈下量 (cm)
- S_0 : 起点日（盛立て完了日）の沈下量 (cm)
- α, β : 沈下曲線のパラメータ
- t : 起点日からの経過時間 (日)

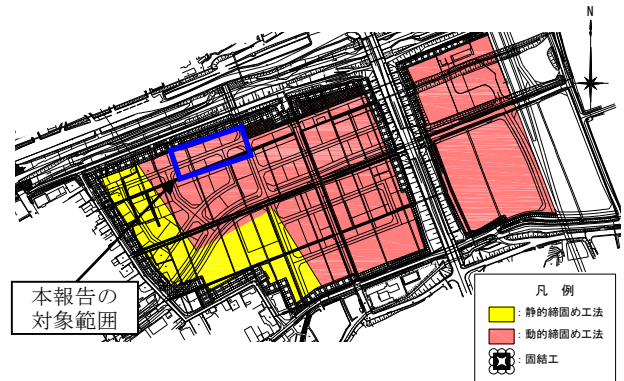


図 6 軟弱地盤対策工の種別、平面配置

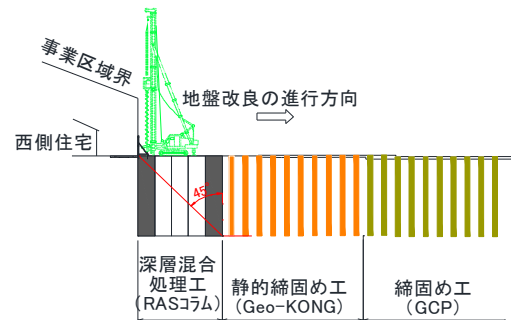
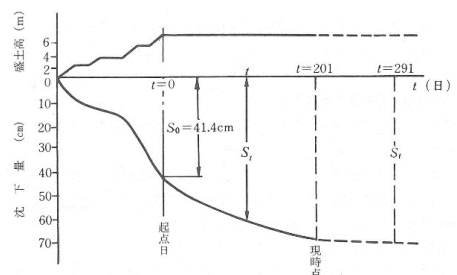
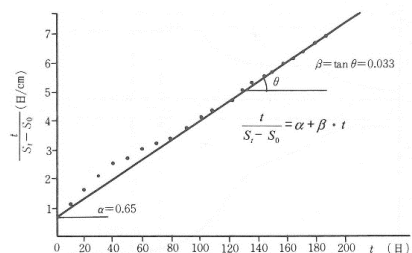


図 7 地盤改良工断面図（固化改良幅の設定例）



(a) 実測沈下曲線と双曲線法による予測の例



(b) 双曲線法におけるパラメータの推定の例

図 8 双曲線法による沈下予測⁵⁾

具体的には、式(1)を変換した式(2)を用い、図8(b)のように沈下データを整理して双曲線のパラメータ α 、 β を算定し、このパラメータを用いることによって任意の時間 t における沈下量 S_t を推定する。また、最終沈下量は $t \rightarrow \infty$ のときの沈下量であり、式(3)にて算定する。

$$t / (S_f - S_0) = \alpha + \beta \times t \quad (2)$$

$$S_f = S_{t \rightarrow \infty} = \Sigma \{ S_0 + 1 / (\alpha / t + \beta) \} = S_0 + 1 / \beta \quad (3)$$

2.3.2 圧密沈下管理（沈下収束判定結果の利用）

圧密沈下管理では、双曲線法で推定した最終沈下量 S_f や推定時 t の沈下量 S_t から残留沈下量 S_r と圧密度 U を以下の式で求め、前述の許容値と比較して沈下収束を判定する。

$$S_r = S_f - S_t \quad (\leq 10\text{cm}) \quad (4)$$

$$U = S_t / S_f \times 100 \quad (\geq 90\%) \quad (5)$$

沈下収束判定の結果、許容値を満足する場合は余盛り（プレロード）を撤去し公営住宅や諸施設の施工に移行する。一方、許容値に到達しない場合は、盛土放置期間の延長や追加盛土（サーチャージ）等の必要な対策を講じることとした。

3. 圧密遅延の発生とその対策

施工区域の北西側（①-1ブロック：図9）で、西側から造成を先行させて公営住宅の建築を行っていたところ、その東側の盛土の圧密沈下（沈下板 10-7：図9）に遅れが発生した。設計で想定していた放置期間が経過しても、沈下収束判定で許容値を満足しない結果であった。この範囲にも公営住宅を建てる計画になっており、予定工期に間に合わせるために対策工の検討および実施が必要となった。

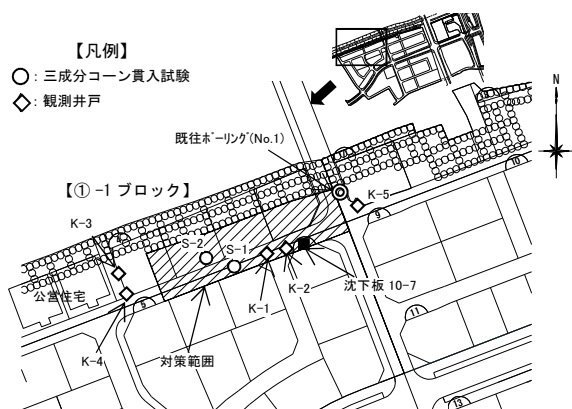


図9 圧密遅延位置とその周辺状況

3.1 圧密遅延の状況

当該箇所の盛土工の進行状況と実測沈下量の測定結果を図10に、双曲線法のパラメータ推定図を図11に示す。盛

土開始より約90日経過した盛立て完了日を起点日として沈下管理を実施した。

計画の放置期間のデータ（図10の盛立て直後の実測値）で沈下収束判定を行ったところ、表1のとおり圧密度64%、残留沈下量0.2mで許容値に到達しなかったため、放置期間を延長して沈下挙動を監視した。ところが、図11に示すように、盛土等の荷重条件が変化していないにもかかわらず、時間の経過とともにパラメータ推定ラインの勾配が緩くなる現象が発生した。近況データによる沈下収束判定を行うと、将来沈下予測の沈下曲線が変化し（図10参照）、圧密度や残留沈下量は許容値に近づく気配がまったく見られない状態になった（表1参照）。

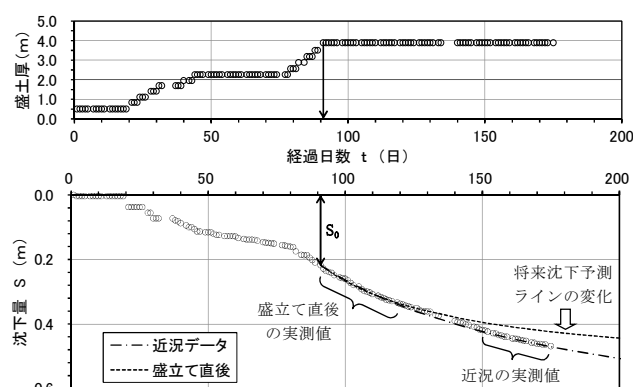


図10 盛土厚と実測沈下量（沈下板 10-7）

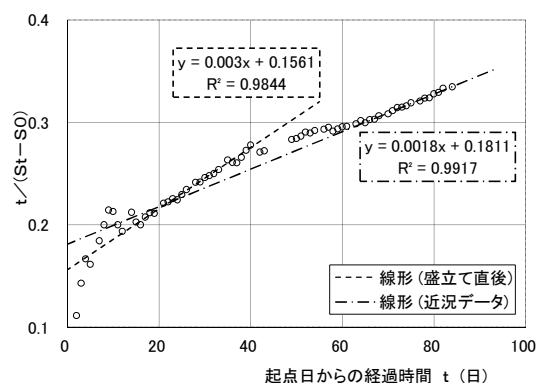


図11 双曲線法パラメータ推定図（沈下板 10-7）

表1 双曲線法による将来沈下予測結果

	盛立て直後	近況データ
t(日)	35	84
α	0.1561	0.1811
β	0.0030	0.0018
S_0 (m)	0.22	0.22
S_f (m)	0.55	0.77
S_t (m)	0.35	0.47
U(%)	64	61
S_r (m)	0.20	0.30

3.2 地盤調査による原因推定

原因推定を目的として、粘土層 (Apt、Am) の圧密進行状況に関する調査を実施した。調査は図9に示す位置で行い、調査項目と結果の概要、およびそこから推定された原因は次のとおりである。

3.2.1 ボーリング調査および圧密試験

既往ボーリング (No.1) と今回調査 (K-1) の土質柱状図から粘土層 (Apt、Am) の層厚およびN値を比較した。Apt、Am層それぞれの層厚比較は難しいが、盛土下端は旧地表面高から低い位置にあり、沈下の発生は確認できた。また、Am層でN値の増加を確認したが、これは圧密の進行よりは地盤改良工 (GCP工) の効果と想定される。

既往調査と今回調査で実施した圧密試験における圧密降伏応力 P_c は、図12に示すように、Apt層ではやや増加した値、Am層ではほぼ同等の値であった。また、盛土後の有効土被り圧と P_c を比較すると、有効応力増分に相当する圧密が進行していない状態が確認でき、Apt層でその傾向が顕著となっている。

3.2.2 地下水位および粘土層の間隙水圧調査

図13は、観測井 (K-1、K-2) にてApt層と粘土層下位の砂層 (As) の水位変動を観測したものである。また、図14は、三成分コーン貫入試験 (CPT) を用いて粘土層の間隙水圧等を測定した結果である。

図13より、As層の地下水位はTP+4.7m~+4.4m付近にあり、盛土前に確認した被圧水位 (TP+3.9m程度) と比べて1m近く上昇している。なお、観測期間内でのその水位はゆっくりと低下している状況である。Apt層の地下水位は、観測初期に大きく低下していることから観測孔からの漏水の可能性はあるが、As層の地下水位より上方でとまっている。これより、Apt層は静水圧以上の水位分布を有し、圧密進行中であると考えられることができる。

CPTによる調査結果 (図14) においても、粘土層位置の

間隙水圧が現状の地下水位における静水圧分布を超過し、圧密降伏応力 P_c が有効上載圧を下回っている状況が確認され、粘土層の圧密は進行中であることが確認できる。

3.2.3 調査による圧密遅延の原因推定

本調査で、As層の地下水位 (被圧水位) が当初の位置よりも高いことが判明した。GCP工の改良柱は粘土層上下の透水層を連結しており、As層の水位の変動は圧密沈下の量や速度に影響を及ぼす可能性が高い。粘土層の圧密とAs層の水位変動を関連付けると、次のとおりである。

- As層の地下水位が上昇 (盛土開始時) :
粘土層周りの排水層の地下水位 (水頭) が高くなることで粘土内の水分が排水され難くなり、沈下量の減少や沈下速度の低下が発生する。
- 高くなったAs層の地下水位が次第に低下 (盛立後) :
粘土層周りの排水層の地下水位 (水頭) が低くなることで粘土内の水分の排水が進み、沈下量の増大および沈下速度が速くなる。

双曲線法のパラメータ推定ラインの変化は、後者の様子をよく表している。つまり、一旦高くなったAs層の水位が

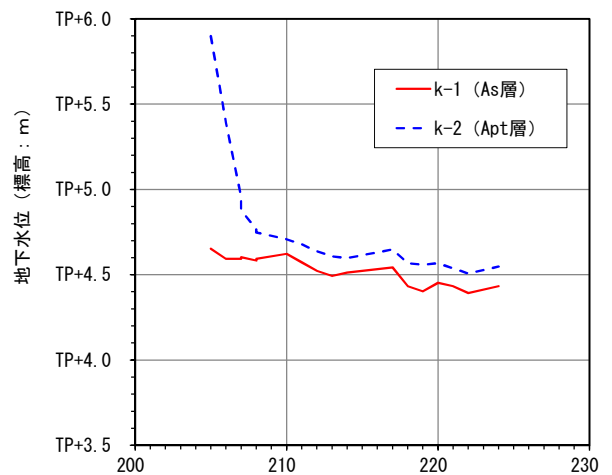


図13 地下水位の測定結果

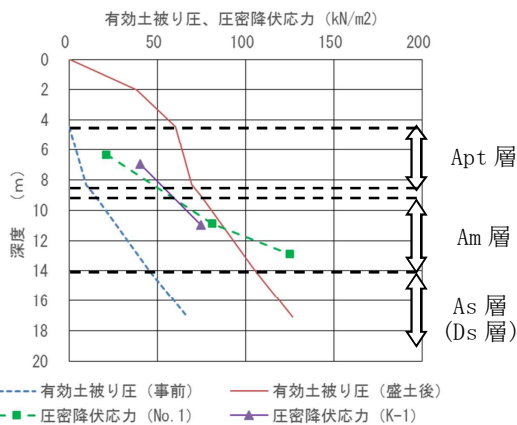


図12 圧密降伏応力 P_c と有効土被り圧との関係

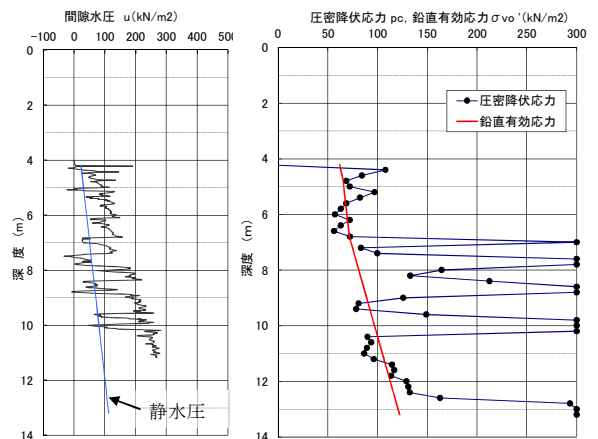


図14 三成分コーン貫入試験結果 (S-1位置)

低下することで、盛土の有効応力分（増分荷重）が増加することになり、沈下量や沈下速度が増大する方向に変化したと推定される。

なお、As 層の地下水は本報告の範囲の南側から流れていたが、地盤改良下の洪積地盤は透水層であり、本工事によってその流れは遮断していない。As 層の地下水位はもともと上部粘土層に塞がれたところの被圧水位なので、粘土層を貫通するGCP工やサンドマットの透水性の違いで被圧水位が変化することはない。また、この現象は夏から秋にかけて発生したものである。これらより、As 層の水位変動原因は、断定はできないが、自然現象（季節変動）の可能性もある。

3.3 対策工の検討および実施

圧密遅延対策には、①固化改良、②バーチカルドレーンの追加、③追加盛土（サーチャージ盛土）および④地下水位低下による方法が考えられる。このうち、工法①は他の工法と比べて高価で、対策規模から考えて非現実的である。工法②・③は被圧が高い状態では対策の効果が期待できない恐れがある。したがって、対策工には原因を直接排除できる工法④を採用することとした。

3.3.1 地下水位低下工法による対策工の概要

地下水位低下にはスーパーウェルポイント（SWP）工法を用いた。SWP工法は、真空ポンプにより井戸内に負圧を作用させ地下水を強制排水する工法で、従来のディープウェル工法に比べて対象範囲の地下水位を効率よく低下させることができる⁶⁾。また、SWPに加えて吸送気管を併用して粘土地盤の圧密を促進させる工法（A&S工法⁷⁾が開発されており、本工事でも適用を試みた。

図15に対策工の平面配置を示す。SWPは揚水井戸の影響範囲と必要水位低下量などを考慮して対策範囲の中央付近に1本配置し、吸送気管（17箇所）は対策範囲全域を網羅するように均等な間隔で配置した。施工済みの公営住宅際には送気管を用いてAs層内の圧力調整を行い、水位

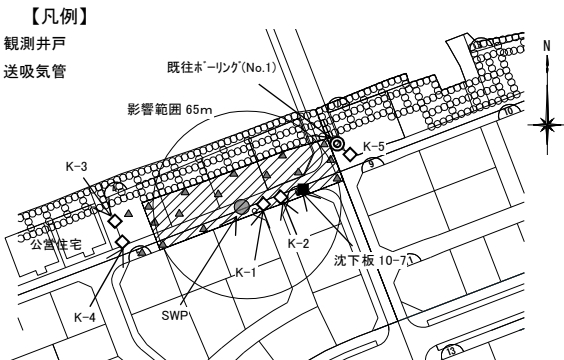


図15 SWP 対策工の概要（平面配置）

低下による減圧を低減させることで公営住宅側地盤の沈下発生を防止を図った。対策の効果は沈下板で、As 層の水位低下状況は観測井（k-1～k-5）で確認した。また、施工済みの公営住宅への影響に対しては、地表面の沈下を定期的に測定して確認した。

3.3.2 対策工の効果と周辺影響

図16は地下水位低下時の沈下曲線である。水位低下に伴って沈下量が増加する状況がよくわかる。同図に双曲線法による沈下収束判定を行った結果を示している。これより、水位低下後20日程度で許容値（圧密度 $U \geq 90\%$ 、残留沈下量 $S_r \leq 10\text{cm}$ ）に達しており、期待したとおりの対策効果が得られた。双曲線法による最終沈下量は0.68mで、この値は、後に示すFEM圧密変形解析（再現解析）の結果に整合している。

観測井による地下水位低下状況を図17に、地下水位低下中に実施したレベル測定による地表面沈下（公営住宅側境界、対策範囲内）の一例を図18に示す。

対策工の実施により、SWP 近傍の観測井（k-1）の地下水位はTP+3.0程度に低下した。また、対象範囲端部の観測井（k-5）の地下水位はTP+3.4m程度に低下しており、対象範囲内の低下水位の差は小さい。一方、公営住宅側境界の観測井（k-3）の地下水位は対象範囲内の水位より高く、初期水位からの低下量は比較的少なくなっている。これは、前述した送気によるAs層内の圧力調整効果の現われと思われる。また、図18の地表面沈下の発生状況を見ると、対

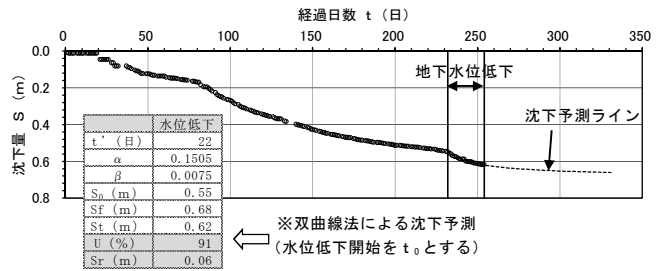


図16 地下水位低下時の沈下曲線

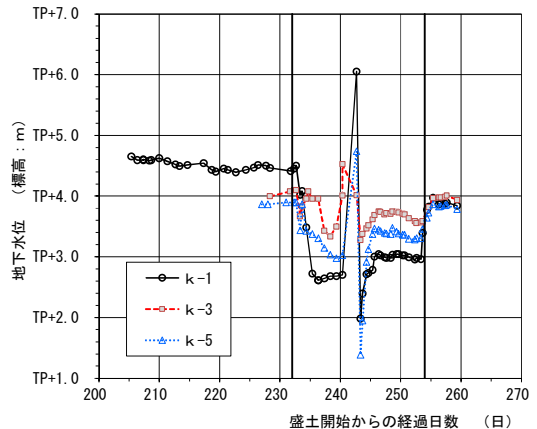


図17 地下水位の低下状況（観測井）

象範囲内の地表面沈下量が沈下板位置の沈下量と同等の5cm程度であるのに対し、公営住宅側境界位置では地表面沈下はなく、地下水位低下の影響はない。

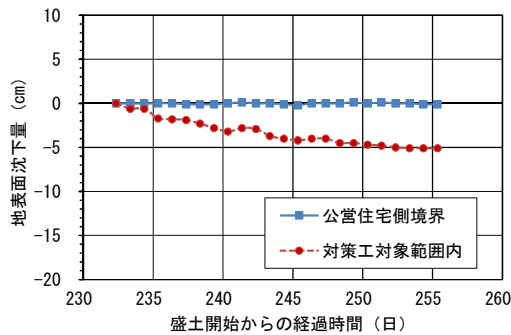


図 18 地下水位低下中の地表面沈下（レベル測定）

4. FEM 圧密変形解析による現象の検証

地盤内における地下水と地盤の挙動とそれらの相互関係を厳密に考慮できる 2 次元 FEM 圧密変形解析手法を用い、本報告における圧密遅延現象の発生メカニズムについて検証した。解析では、実測沈下量や水頭情報に基づいた同定解析を実施し、水位低下以後の予測解析の精度を高めた。その後、砂層の初期水頭条件を変化させた解析を行い、圧密遅延現象の原因を探った。なお、解析には、「DIF システム（デジタルソイル株式会社）」を使用した。

4.1 圧密沈下挙動の再現（同定解析）

沈下板位置（沈下量測定位置）の断面（地盤および盛土）を図 19 のようにモデル化し、地下水位低下時を含む圧密沈下挙動の再現解析を実施した。

4.1.1 物性条件

物性条件の一覧を表 2 に示す。粘土層（Apt、Am）は関口・太田モデル（弾塑性モデル）、その他の土層（および材料）

は線形弾性モデルで表現した。弾塑性モデルの物性条件の設定では主に次の内容を考慮した。

- ・ 物性値は圧密試験結果を基本に設定した。
- ・ 初期透水係数 k_0 は圧密降伏応力時の値とし、圧密試験 C_v の変化にあわせて透水係数の変化率 λ_k を設定した。
- ・ 膨潤指数 κ は $e \sim \log P$ 曲線の戻り勾配とした。
- ・ 限界状態指数 M 、ダイレイタンシー係数 D 、ポアソン比 ν' は理論式より設定した。 M を算出するときの内部摩擦角 ϕ' は文献⁸⁾を参考に Apt 層は 40° 、Am 層は 30° とした。
- ・ 静止土圧係数 K_0 は Jaky の式により設定した。
- ・ GCP による沈下量低減と圧密速度の促進を考慮した。沈下量低減は SCP の設計で用いられる沈下低減係数を考慮し、圧密速度の促進はバロンの解の t_{50} にテルツァギーの一次元圧密の解の t_{50} が一致するように換算透水係数を与えた。

これらの物性条件で解析すると、おおむね実測沈下量に近似したが、再現性を高めるために表 3 (a) の網掛け箇所の設定値を試験結果のばらつきの範囲内で調整した。具体的には、初期の計算沈下量を抑えるために Apt 層の過圧密量を 5 kN/m^2 増加させ、揚水時の沈下量を再現するために Am 層の圧縮指数を試験値の最大側の値とした。

4.1.2 境界条件

幾何境界条件は、解析領域底面で X・Y 方向変位固定、解析領域側面で X 方向変位固定である。水理境界条件は、上面・下面境界で排水、側面境界のうち粘土層は非排水、砂層は排水条件とした。地下水位の位置は地表面である。

4.1.3 解析結果

解析では実際の工事工程（施工手順および各ステップの期間）を忠実に再現した。ここでは、図 19 に示す沈下板位置での沈下量を中心に解析結果を概説する。沈下板位置

表 2 物性条件

(a) 粘土層：関口・太田モデル（同定後）												(b) その他土層：線形弾性モデル				
土層名	γt (kN/m^3)	λ	Λ	e_0	M	D	K_0	ν	ΔP_c (kN/m^2)	k (cm/sec)	λ_k	土層名	γt (kN/m^3)	E (kN/m^2)	ν	k (cm/sec)
Apt	12.4	0.67	0.800	3.64	1.636	0.071	0.36	0.26	25.0	8.00E-07	0.39	As2	17.00	11000	0.33	1.00E-03
Am	16.2	0.39	0.840	1.63	1.200	0.104	0.50	0.33	20.0	4.86E-07	0.39	As1	17.00	16000	0.33	1.00E-03
												Ds	19.00	56000	0.33	1.00E-02
												新規盛土	12.54	31000	0.33	1.00E-02
土層名	γt (kN/m^3)	λ	Λ	e_0	M	D	K_0	ν	ΔP_c (kN/m^2)	k (cm/sec)	λ_k					
Apt(SCP)	12.4	0.50	0.800	3.64	1.636	0.053	0.36	0.26	25.0	3.18E-06	0.29					
Am(SCP)	16.2	0.29	0.840	1.63	1.200	0.077	0.50	0.33	20.0	3.69E-06	0.29					

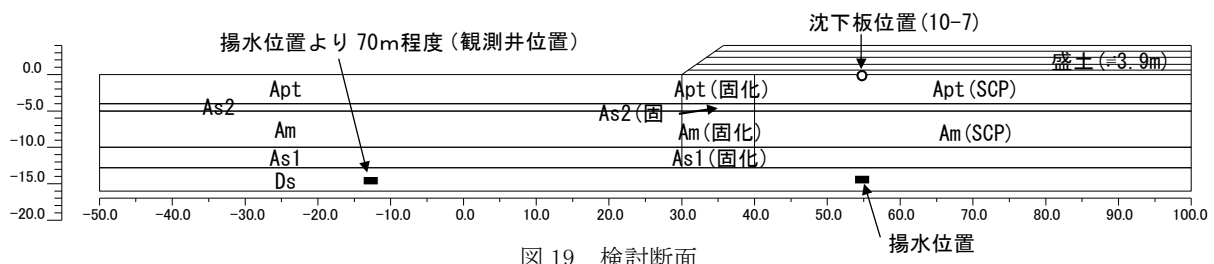


図 19 検討断面

の沈下量時系列図を図 20 に、揚水位置および 70m 離れた位置における Ds 層の全水頭の時系列図を図 21 に示す。

計算沈下量は盛土初期段階を除いて実測値を表現できている。揚水後の下部砂層（解析上は Ds）の水位が旧地表面付近に戻っている（図 17）ことや、揚水に伴う全水頭変化の計算値が実測値をよく再現できていることから、揚水時以降の予測解析の精度は確保できると考えられる。

図示していないが、最終沈下量相当（工事完了 10 年後）の値は沈下板位置で約 66cm（双曲線法では 68cm）であり、揚水を行うことで残留沈下量等の許容値は満足する結果であった。

4.2 圧密遅延現象の発生メカニズムの推定

実測沈下挙動を再現した解析条件を基本に、Ds 層の初期水位を増加させたケース（+1.0m、+2.0m）の解析を実施した。解析結果（沈下量時系列図）を図 22 に示す。

同定解析では揚水前後の実測沈下の再現性はよいが、盛土初期段階の計算値は実測値を上回っている。一方、Ds 層の被圧が +2m のケースでは盛土初期の実測沈下を再現できるが、盛立て完了後の実測沈下を表現できない。また、揚水開始前に観測した下部 As 層の水位は、盛土前を基準に +0.7m から +0.5m に低下する傾向であった（図 13）。

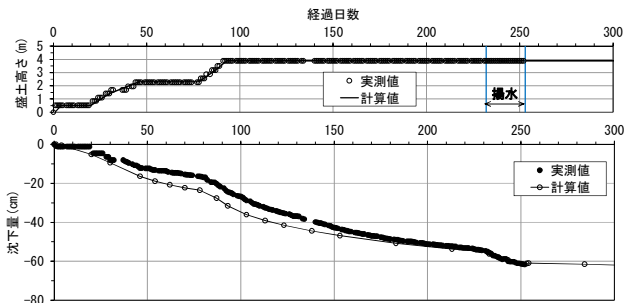


図 20 沈下板位置（10-7）の沈下量時系列図

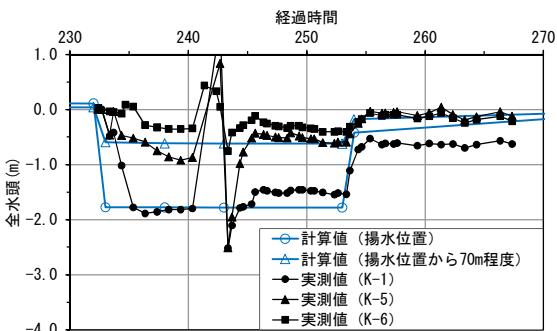


図 21 Ds 層の全水頭時系列図

これらより、圧密遅延の原因を次のように推定した。

- 下部砂層の地下水位は盛土初期に大きく高さを増し、その後、次第に盛土前の地下水位に低下していった。
- 沈下収束判定の段階では地下水位は低下中（荷重は増加中）で、それに伴って圧密沈下量が漸増したため、圧密遅延の状態（収束判定不能の状態）になった。

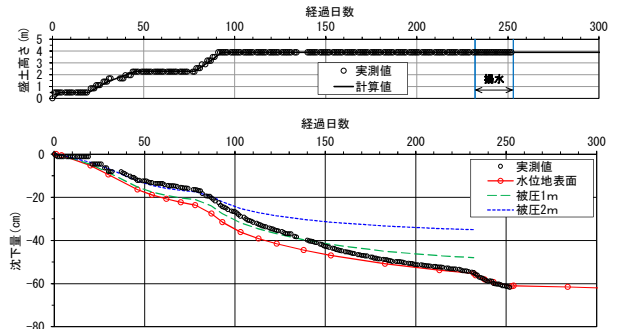


図 22 Ds 層の初期水位の変化と沈下性状への影響

5. おわりに

本報告では、軟弱地盤上の盛土工事で、施工中の地下水位（水頭）の変化が圧密の進行に大きく影響する事例を紹介した。高い被圧水位の存在や、その水位変動の恐れがある場合には、長期的な地下水位監視も重要になってくると思われ、今後の類似工事の参考にできれば幸いである。最後に、山元町をはじめ関係各位からのご指導・ご鞭撻を頂き、対策工への早期着手や公営住宅の施工を予定工期内で完了できたことに対し感謝の意を表します。

参考文献

- 山元町 HP：東日本大震災および津波の被害状況、<http://www.town.yamamoto.miyagi.jp/site/fukkou/324.html>
- 山元町 HP：主な復興・復旧事業の進捗、<http://www.town.yamamoto.miyagi.jp/uploaded/attachment/3931.pdf>
- 日本道路協会：道路土工、軟弱地盤対策工指針（平成 24 年度版）、p. 119、2012
- 日本建築学会：建築基礎構造設計指針、p. 66、2001
- 日本道路協会：道路土工、軟弱地盤対策工指針（平成 24 年度版）、pp. 373-375、2012
- スーパーウェルポイント協会：スーパーウェルポイント工法技術・積算資料（平成 23 年度版）
- アサヒテクノ HP：圧密脱水（A&S 工法）、http://www.asahitechno.jp/technical_infomation/as.html
- 地盤工学会：地盤工学ハンドブック、P94, P345, 平成 11 年