

実務のための圧密沈下予測とその対策技術

4. 沈下対策工に対する予測手法と実際

坪井 英夫 (つばい ひでお)

㈱不動テトラ ジオ・エンジニアリング事業本部国際部

塚本 琢治 (つかもと たくじ)

㈱不動テトラ ジオ・エンジニアリング事業本部横浜事業所

大林 淳 (おおばやし じゅん)

㈱不動テトラ ジオ・エンジニアリング事業本部東京事業所

4.1 はじめに

本章では、4.2において沈下による不具合とその課題について説明し、これらの課題を解決すべく沈下対策工法について4.3に説明する。

4.4では、各沈下対策工法の予測手法を説明し、4.5から4.8では、沈下対策工法の予測と実際について解説する。

ここで、取り扱う沈下対策工法としては、緩速載荷工法、バーチカルドレーン工法、サンドコンパクションパイル工法、固結工法を取り扱う。固結工法については、圧密沈下工法の範疇に入れることは問題があるところであるが、ここでは改良率が小さい固結工法で、下部に無処理の圧密層がある場合沈下予測と実際ということについて解説する。4.6では、本章のまとめを説明する。

4.2 沈下による不具合と問題

軟弱地盤に構造物を建設する場合に、沈下問題は避けて通れない課題である。沈下は、長期にわたる場合があったり、不同沈下を伴うために、道路などの勾配変化や杭基礎で支持された構造物との間の不連続性を引き起こしたりすることがある。

表—4.1¹⁾は軟弱地盤に構造物を建設する場合に生じる主要な問題のうち圧密(沈下)に関わる部分を抜粋したものを整理したものである。これによれば、沈下による問題は、①沈下に伴う構造物の変状問題、②構造物間の不連続問題、③既設構造物への影響問題に大別できる。

①の沈下に伴う構造物の変状問題とは建設した構造物荷重によって発生する沈下が直接その構造物の機能に支障を及ぼす場合である。②の構造物間の不連続問題の代表例としては、周辺地盤の沈下によって杭支持された建築物との間に生じる段差問題が挙げられる。このような場合には、単に段差による景観の問題のみならず、上下水道管やガス管などのインフラ設備の連続性が阻害されることもあり、修復に多大な費用が発生し、しかも周辺地盤の沈下が長期的に進行する場合には、長期にわたる維持補修費用の発生につながることになる。③の既設構造物への影響は近接施工により生じる問題である。

これらの問題を解決するための沈下対策方法には大別して以下のような方法がある。

表—4.1 沈下による不具合と問題点 (文献1)より抜粋)

	沈下による不具合	模式図
① 変状問題 構造物の問題	a) 過大沈下または、不同沈下による盛土の変状	
	b) 過大沈下または、不同沈下による構造物の変状	
② 不連続問題 構造物の問題	c) 構造物と盛土、各構造物間に生ずる不同沈下または不等変形による段差, 変状	
③ 既設構造物 への影響	d) 盛土または構造物荷重による側方地盤圧密沈下と変位	

- ① 構造物による対策 (可撓性ジョイントなど)
- ② 軟弱な地盤の除去と良質材料への置換
- ③ 軟弱な地盤特性の一時的または恒久的改良
- ④ 軟弱な地盤に不足している特性を有する材料による地盤の補強

本講座で取り上げる沈下対策方法は③および④の考え方に基づくものになるが、実務ではこれらが必ずしも単独で用いられるのではなく、多くの場合には①から④の組合わせで適用される。

4.3 沈下対策工法

前節で述べた沈下の不具合を解消する方法の一つに地盤改良工法がある。

地盤改良工法は、以下の観点から分類する方法がある。

- ① 改良目的 (支持力増加, 沈下・変形抑制, 浸透防止)
- ② 改良のねらい (暫定的・恒久的改良)
- ③ 在来地盤の状態を変えるような取扱い方法 (置換, 保護, 安定処理)
- ④ 地盤改良の原理 (密度増大, 固結, 排水, 止水)
- ⑤ 改良地盤の性質

改良目的の視点に基づく以下の分類は、土の基本的な力学特性を考えて軟弱地盤対策を検討する場合に重要である。

- ① 支持力増大 (安定対策)
- ② 沈下対策または変形対策 (沈下, 盤膨れ, はらみ)

講座

だしなどの対策)

- ③ 液状化対策 (耐久性の維持, 増進)
- ④ 止水対策 (水圧, 浸透性の減少ないし除去)

これらは, 改良工法の原理と相互に関係し, 適切な工法選定には重要で, 整理したのが表—4.2である。

本稿では表—4.2に示される沈下対策として用いられている原理に基づいた代表的な工法を対象とする。具体的には, 脱水を基本原理とするバーチカルドレーン工法, 締固めおよび脱水を基本原理とするサンドコンパクションパイル工法, 固結工法であり, それらの原理と設計法の概要について説明し, その効果の予測と実際についての事例を中心として説明する。

4.4 各沈下対策工法の効果予測方法

4.4.1 沈下対策工法の効果予測とその精度

沈下対策工法の効果と予測については, 現状ではまだ多くの課題が残されている。予測の精度は, 以下に示す要因に大きく左右されるといわれている²⁾。

(1) 調査試験による原地盤のモデル化 (成層条件, 設計定数の設定) による要因。

自然地盤を対象とした調査では, その地盤特性のパラツキは必ず存在することを念頭におく必要がある。

(2) 改良地盤の設計のために選定した手法の適否や精度による要因。

例えば, 二次元的な盛土の圧密沈下を一次元の解析で予測した場合には圧密変形に加えて, せん断変形による沈下が含まれる。

(3) 設計で前提とした改良プロセスと改良地盤のモデル化 (改良工, 施工精度, 改良地盤の品質等に関わる理解) による要因。

実際の施工の流れ, 対策工が原地盤に及ぼす影響, 改良工の材質の特質を理解する必要がある。

(4) 設計で前提とした外力や施工速度など上部構造物の施工精度による要因。

設計で予定した工程どおりに施工できる保証はなく, 予測はしばしば修正を迫られることがある。

以上のような要因を前提にして沈下の予測を行う必要がある。

4.4.2 無処理地盤または改良地盤の圧密沈下量の予測手法

圧密沈下量の予測手法は以下の三つの方法に分けられる³⁾。

(1) 理論・力学的的手法

圧密理論に基づく手法であり, 土の物性を定めて, そ

れに対応する力学理論を用いて地盤の圧密状況を予測する手法。

(2) 観測・統計的手法

浅岡法, 門田法, 曲線定規法, 星笠法, 双曲線法等に基づく手法であり, 土の物性を求めることなく, 沈下量と継続時間の観測値を統計的に処理することによって観測時点以降に発生する沈下挙動を予測する。

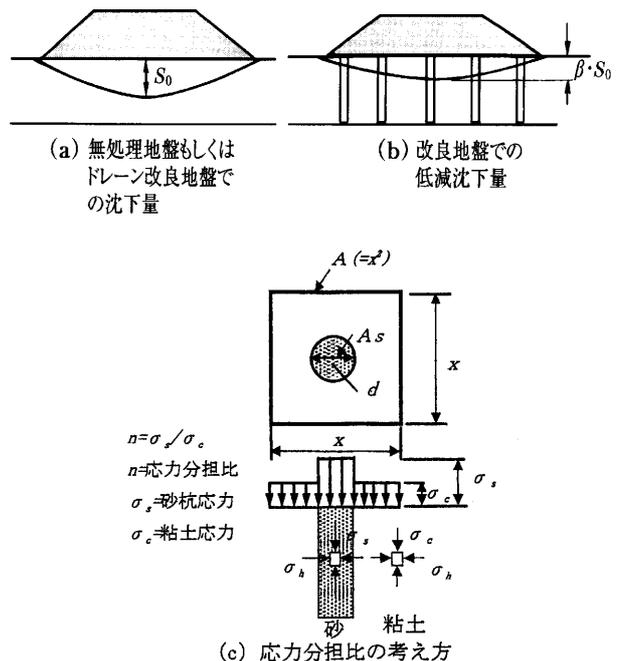
(3) 調査・実験的手法

試験盛土, チェックボーリング, 間隙水圧測定等に基づく手法であり, 改良効果の確認に必要な間隙水圧や強度などの物理量を現場計測や実験によって直接測定し, 測定時点以降の改良効果を予測する。

上記, 三つの方法を適宜使い分けるわけであるが, 実際には, 施工前では(1)の方法, 施工中, 施工後では(2), (3)の予測方法が一般的である。(2)については3章で説明されている。

4.4.3 沈下対策工法の沈下計算

沈下対策工法の選定と使用に際して, 当初の計画時の留意事項を十分整理し, その目的に合致したものを抽出することが重要である。表—4.3に軟弱地盤対策工法の種類と目的・効果の概要を示す。特に, 沈下対策に関連するものについては, 圧密排水工法 (バーチカルドレーン), サンドコンパクションパイル工法, 固結工法である。これらのうち, バーチカルドレーン工法, サンドコンパクションパイル工法, 固結工法についてその最終沈下量と沈下時間の関係は表—4.4のように整理することが出来る。なお, 表—4.4に示す沈下低減係数 β は, 図—4.1の無処理の沈下量と処理後の沈下量との比から求められる係数である。



図—4.1 無処理地盤と改良地盤の沈下量

表—4.2 改良原理と改良目的の関係

改良原理	置換	脱水	締固め	固結	止水
改良目的					
支持力の増大	○	○	○	○	
沈下対策 (または 変形対策)	○	○	○	○	
液状化対策	○	○	○	○	
止水				○	○

表-4.3 軟弱地盤対策工法の種類と目的・効果の概要

工法		工法の説明	目的と効果	適用地盤	
表層処理 工法	表層排水工法	地表面にトレンチ(幅0.5m, 深さ0.5~1.0m)を掘り, 良質の砂礫で埋戻す工法	<ul style="list-style-type: none"> ○施工機械のトラフィカビリティの確保 ○地盤のせん断変形および沈下の抑制 ○地盤の支持力の向上または強度増加の促進 	粘性土地盤 泥炭質地盤	
	サンドマット工法	軟弱地盤上に厚さ0.5~1.2mの敷砂をする工法			
	敷設材工法	軟弱地盤上に化学繊維シート, 樹脂ネットなどのジオテキスタイルを敷設する工法			
	添加材工法	軟弱な表層土に生石灰, 消石灰, セメントなどの改良用添加材を加えて混合し, 転圧する工法			
置換 工法	掘削置換工法	軟弱層の一部または全部を掘削し, 良質の材料で置き換える工法	<ul style="list-style-type: none"> ○すべり破壊の防止 ○全沈下層の低減 ○地盤のせん断変形の抑制(掘削置換工法の場合) 	粘性土地盤 泥炭質地盤	
	強制置換工法	盛土の自重または爆破によって軟弱層を除去し, 良質の材料で置換する工法			
押え盛土 工法	押え盛土工法	盛土のすべり破壊に対して所要の安全率が得られない場合に, 盛土本体の側方に押え盛土をし, 安全を図る工法	<ul style="list-style-type: none"> ○すべり破壊の防止 ○地盤のせん断変形の抑制 	粘性土地盤 泥炭質地盤	
	緩斜面工法	盛土の勾配をゆるくして盛土の安全を図る工法			
圧密排水 工法	圧密排水工法	繰速載荷工法	<ul style="list-style-type: none"> ○すべり破壊の防止 ○地盤のせん断変形の抑制 ○圧密沈下の促進 ○地盤の強度増加の促進 ○ドレーン工法と併用させ効果増大期待 	粘性土地盤 泥炭質地盤	
		載荷重工法			あらかじめ荷重を加えて圧密沈下を進行させておき, つぎにこの荷重を除去して構造物を施工する工法
		プレローディング工法			地盤中の地下水位を低下させることにより有効応力を増加させ, 軟弱層の圧密を図る工法
		サーチャージ工法			地表面に気密膜を設け, 敷砂層内の空気圧を減じて大気圧を地盤に載荷し, 軟弱層の圧密を図る工法(真空圧密工法とも称する)
	ドレーン 工法系	地下水位低下工法			地盤中の地下水水位を低下させることにより有効応力を増加させ, 軟弱層の圧密を図る工法
		大気圧載荷工法			地表面に気密膜を設け, 敷砂層内の空気圧を減じて大気圧を地盤に載荷し, 軟弱層の圧密を図る工法(真空圧密工法とも称する)
		サンドドレーン工法			軟弱地盤中に鉛直な砂柱を設け排水距離を短縮して圧密排水を促進させる工法
		袋詰めドレーン工法			サンドドレーン工法を改良したもので, 軟弱地盤中に袋詰め砂柱を設置する工法
		ボード系ドレーン工法			サンドドレーン工法と同じ原理で, 砂のかわりにカードボード, プラスチックボードなどのドレーン材を用いる工法
		繊維系ドレーン工法			ボード系ドレーン工法と同様に, 砂のかわりに特殊加工した麻, ヤシやジオテキスタイルのロープを用いる工法
サンドコンパ クションパ イル工法	サンドコンパクション パイル工法	地盤に締固めた砂杭を造り, 軟弱層を締固めるとともに砂杭の支持力によって沈下量を減ずる工法	<ul style="list-style-type: none"> ○全沈下量の低減 ○すべり破壊の防止 ○液状化の防止 ○圧密沈下の促進 	粘性土地盤 泥炭質地盤 砂質土地盤	
	砕石パイル工法	サンドコンパクションパイル工法の材料に砕石などを使用する工法			
締固め 工法	バイブローテーション 工法	ゆるい砂地盤中に棒状の振動機を入れ, 振動部付近に水を与えながら振動と注水の効果で地盤を締固める工法	<ul style="list-style-type: none"> ○液状化の防止 ○全沈下量の低減 ○液状化の防止 ○全沈下量の低減 ○圧密沈下の促進 	砂質土地盤 粘性土地盤	
	振動攪拌工法	ゆるい砂地盤中に棒状あるいは杭状の振動体を打込み, 地表からその側面に砂, 砂利, 砕石等を補給しながら振動によって締固める工法			
	重錘落下締固め工法	10~40tの重錘を数10mの高さから落下させ, 衝撃力によって地盤を圧縮または圧密させる工法			
	石灰パイル工法	地盤中に生石灰による柱を造り, その吸水による脱水と化学的反応によって地盤を締固め・固化させる工法(圧密排水工法に入る場合もあり)			
固結 工法	深層混合 処理工法	機械攪拌工 法	<ul style="list-style-type: none"> ○すべり破壊の防止 ○全沈下量の低減 ○地盤のヒービング防止 ○地盤のせん断変形の抑制 	粘性土地盤 砂質土地盤 泥炭質地盤 粘性土地盤 砂質土地盤	
		高圧噴射工 法			地盤中に小口径ノズルをもつ噴射管を挿入し, これに超高压を作用させて地盤を切削し, 切削した部分に硬化剤を充填して地盤を強化する工法
	薬液注入工 法	地盤中に土質安定剤となる薬液を注入し, 薬液の物理反応, 化学反応によって地盤の強度を増大させる工法			
	地盤凍結工 法	地盤を人工的に凍結させて地盤の強度や安定性を増大させる工法			
	電気浸透工 法	地盤中に一対の電極を設置し, 水を集めて脱水したり, 土中に薬液を流して電気化学的に地盤を固結させる工法			
構造物による 工法	矢板工法	盛土の側方の地盤に矢板を打設して地盤の側方変位を減じて安定性を高める工法	<ul style="list-style-type: none"> ○周辺地盤の沈下および変形の抑制 ○すべり破壊の防止 ○全沈下量の低減 ○地盤のせん断変形の抑制 ○すべり破壊の防止 	粘性土地盤 泥炭質地盤	
	打設杭工法	盛土の下部および側方に既設杭を打設する工法			
	パイルネット工法	地盤に打設した杭の頭部を網目状に鉄筋で連結し, その上方にジオテキスタイルを敷設する工法			
	スラブ工法	打設杭工法の効果を高めるために支持杭の上にスラブを打設し, その上に盛土を施工する工法			
盛土補強工法	補強度工法	軟弱地盤上の盛土内にジオテキスタイル, 鉄筋及び支圧板付アンカーなどを敷設して, 盛土補強により盛土の安定を図る工法	<ul style="list-style-type: none"> ○すべり破壊の防止 ○地盤のせん断変形の抑制 	粘性土地盤 泥炭質地盤	

(文献4)坪井英夫:土質・基礎に関する技術講習会-技術士受験のポイント-講習会資料, pp.111, 2006.6による)

表—4.4 改良地盤の最終沈下量と圧密沈下時間

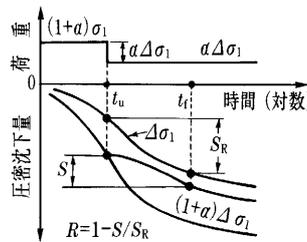
工法	最終沈下量	圧密沈下時間
載荷重(プレローディング) 工法 バーチカルドレーン工法	$S = S_0$ 無処理地盤沈下 S_0 と同じ m 法: $S_s = \Delta p \cdot m \cdot H$ (1) C_c 法: $S_s = \frac{C_c}{1+e_0} \cdot H \log \frac{p_0 + \Delta p}{p_0}$ (2) $e \sim \log p$ 法: $S_s = \frac{e_0 - e_1}{1+e_0} H$ (3) ここに、 Δp : 荷重, H : 層厚 C_c : 圧縮指数 p_0 : 初期鉛直応力 e_0 : p_0 に対する間隙比 e_1 : $p_0 + \Delta p$ に対する間隙比 m : $p_0 + 1/2 \Delta p$ に対する体積圧縮係数	荷重に対する圧密時間は層厚による。 (バーチカルドレーンの場合, ドレーンピッチ x , パイル径 d により沈下時間を算定) $t = \frac{H^2}{c_v} \cdot T$ (4) H : 圧密層厚, T : 時間係数 Barron (バロン) ⁵⁾ により, $S(t) = S_s \cdot V(t)$ (5) $= S_s (1 - \exp(-\lambda t))$ 時間 t における沈下量 $V(t)$: 時間 t における圧密度 $\lambda = \frac{8 \cdot c_v}{F(n) \cdot d^2}$ (6) $F(n) = \frac{n^2}{n^2 - 1} \log n - \frac{3n^2 - 1}{4n^2}$ (7) $n = \frac{d_w}{d}$ (8) d_w : ドレーン有効性, c_v : 水平方向圧密係数 正三角形配置の場合: $d_w = 1.05d$ (9) 正方形配置の場合: $d_w = 1.13d$ (10) d : ドレーンピッチ, d_w : ドレーン径
サンドコンパクションパイル工法	$S = \beta \cdot S_0$ β : 沈下低減係数 μ_c : 応力低減係数 低置換率 $\beta = \mu_c = 1 / \{1 + (n-1)a_s\}$ ($n = 3 \sim 4$) 高置換率 $\beta = 1 - a_s$	早期に終了 (ドレーンピッチ x , パイル径 d および置換率 a_s により沈下時間を算定)
固結工法	$S = \beta \cdot S_0$ β : 沈下低減係数 μ_c : 応力低減係数 低置換率 $\beta = \mu_c = 1 / \{1 + (n-1)a_s\}$ ($n = 10 \sim 20$) 高置換率の場合は改良柱体の圧縮量	改良柱体: 瞬時(弾性沈下) 未改良部: 無処理と同様

4.5 載荷重(プレローディング)工法の効果予測と実際

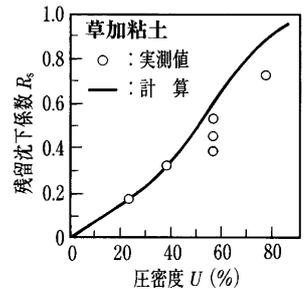
プレローディング工法は、構造物の施工に先立ってその位置に載荷盛土し、期待する値に圧密沈下が達すれば載荷土を掘削除去して構造物を施工する工法である。計画高さよりも余分に高く盛土を施工して圧密沈下を促進した後、余盛部を取り除いて所定の盛土高さに仕上げる方法もあり、これを特に区別してサーチャージ工法と呼ぶ場合もある。一般に盛土高さは地盤の沈下や構造物供用後の過圧密比などを考慮して決められる。盛土高さが限界盛土高さを越える場合には、いくつかの段階載荷を実施し、段階毎に一定の放置日数を取り、次段階の載荷盛土荷重に耐えうる地盤の圧密強度増加を待って次段階に進み盛土を完成させる。さらに、十分な放置期間がとれない場合にはバーチカルドレーンなどを併用する場合もある。

図—4.2⁶⁾はプレローディング工法の一般的な原理を示したものである。図—4.2において、計画盛土荷重 $\Delta\sigma_1$ で圧密した場合の圧密沈下量～時間関係では時間 t_u ～ t_f 間の残留沈下量は S_R で示される。一方、余盛荷重 $\alpha\Delta\sigma_1$ を加えて、荷重 $(1+\alpha)\Delta\sigma_1$ で圧密し時間 t_u で除去した場合の残留沈下量は S で示される。余盛荷重によって圧密沈下が促進されているため、 S は S_R より小さくなる。このときの残留沈下量の大小を表す指標として残留沈下係数 R_s が図中に示す式で定義される。

図—4.3⁶⁾は室内試験ならびに計算結果から $R_s = 1 - 1/S_R$ と余盛荷重除去時の圧密度 U の関係を示したものである。 U の増加とともに R_s もほぼ直線的に増加する。これより、余盛荷重の放置期間の大きな場合ほどプレローディング工法の目的である残留沈下軽減効果の大きいことを示している。プレローディング工法における施



図—4.2 プレローディング工法の原理と残留沈下係数 R_s の定義(文献6)による)



図—4.3 余盛荷重除荷時の圧密度 U と残留沈下係数 R_s (文献6)による)

工管理としては盛土を行う際の安定管理と圧密効果を確認するための沈下管理に大別される。圧密沈下管理では実測沈下～時間関係から圧密終了の判定や残留沈下量を推定し、必要に応じて圧密促進のための盛土を追加するなどの対策を講じる。事前の計算と実測沈下とは必ずしも一致しないので、実際の施工工程や地下水位などの荷重条件も合わせて、圧密定数や層区分などを見直し、理論値を実測値にフィットさせる施工管理が必要になる。

4.6 バーチカルドレーン工法の効果予測と実際

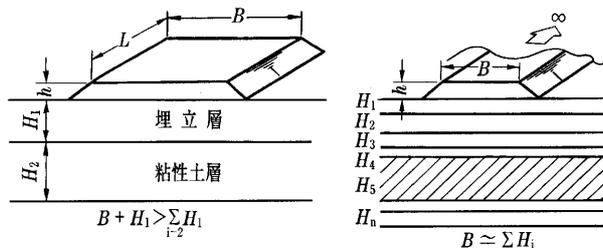
4.6.1 サンドドレーン工法の効果予測と実際

(1) 一次元状態下と二次元状態下での挙動について⁷⁾
 バーチカルドレーン(サンドドレーン)工法にて処理された軟弱地盤上の広域埋立地、つまり、一次元状態とみなされる地域の沈下量、沈下時間、強度増加についての予測と実際の挙動と二次元状態下と見なし得る高速道路盛土での無処理状態における沈下量、沈下時間の予測と実際の挙動について比較してみる。サンドドレーン処理地盤と無処理地盤との違い、一次元状態下と二次元状態下での挙動の差違および軟弱地盤における設計上

における留意すべき点を示す。

(2) 土層および載荷形状

図-4.4(a)に示すように、軟弱地盤上に広範囲の埋立荷重が載荷され、地盤としては埋立荷重に対して未圧密状態下であり、その上に広範囲に載荷盛土が行われ、一次元状態とみなし得る載荷方法を Type-A と呼ぶことにする。なおこの Type-A では、表-4.5に示すように粘性土はいずれもサンドドレーンにて地盤改良されている。



(a) Type-A の場合 (b) Type-B の場合

図-4.4 土層構成と載荷方法

一方、図-4.4(b)に示すように、軟弱地盤上に直接載荷され載荷幅 B も層厚程度であり、二次元状態とみなし得る載荷方法を Type-B と呼ぶことにする。

実際の対象現場として Type-A については表-4.5に示す神戸、広島、四日市の埋立地、Type-B については表-4.6に示す常磐自動車道の盛土とした。いずれも主たる沈下対象層は海成の沖積粘土である。

(3) 沈下量の予測方法及と実測値の整理方法

1) 沈下計算に用いた計算式

ここで、データのバラツキも小さいと考えられる $C_c/(1+e_0)$ を圧縮比 m_c と定義する。 m_c は p_{c0} あるいは深度に無関係であり、統計的取扱いが容易であるため C_c 法にて、各現場の沈下量を計算している。また、土性のバラツキを客観的に評価して計算値と実測値との比較を行うため、土性のバラツキを $C_c/(1+e_0)$ の分布で評価し、計算式より、沈下量の分布を求めることとした。

2) 実測沈下より得られる最終沈下

実測の沈下～時間曲線より最終沈下量を求める慣用法として、ここでは浅岡法・門田法・曲線定規法・星埜法・双曲線法にて検討したが、このうち最も大きな沈下予測量になる双曲線法にて整理することにした。

3) 計算値と最終実測沈下との比較

上記1), 2)の両者の比較を行うため以下の手順に従う。

(i) 各施工単位のデータ毎に $C_c/(1+e_0)$ の分布を室内土質試験結果より求める。

(ii) 各施工単位のモデル土層に従い、 C_c 法である次式より計算沈下量を求める。

$$S_t = \frac{C_c}{1+e_0} \cdot H \log \frac{p_0 + \Delta p \cdot I_z}{p_{c0}} \dots (4.1)$$

ここに、 p_{c0} : 載荷前の先行圧密応力、 p_0 : 有効土被り圧、 $\Delta p \cdot I_z$: 載荷による増加荷重、 C_c : 圧密指数、 e_0 : 初期間隙比、 H : 層厚

(iii) $C_c/(1+e_0)$ の分布を利用し、計算沈下量の平均値 μ 、標準偏差 σ を求める。

(iv) 2) で求めた最終実測沈下量を計算沈下量の分布上にプロットする。

(4) 室内試験による圧密係数 c_{vL} と実測の圧密係数 c_{vf} の整理方法

室内試験による圧密係数 c_{vL} は、沈下対象層の土被り圧 p_z と載荷重 Δp の半分の和の荷重 ($p_z + 1/2 \Delta p$) に対応する値とする。一方、実測圧密係数 c_{vf} は、Type-A については、双曲線法を適用して最終実測沈下量 S_t を求め、 S_t の80%圧密進行時を求め、Barron (パロン) の

表-4.5 Type-A の施工単位の概要

地域名	施工単位	土層(m)			載荷形状(m)			サンドドレーン仕様					
		現場	データNo.	H ₁	H ₂	H ₃	L	B	h	ピッチ	径	改良長	
神戸	A	①	20	15	-	214	156	6	2.7	m	φ	500	34.0
	B	②	21.5	12	-	260	15	8	2.6	m	φ	500	32.5
	C	③	20.5	11.3	-	150	105	10	2.8, 3.0	m	φ	500	30.0
	D	④	20	11	-	300	80	6	2.8	m	φ	500	29.5
	E	⑤	22.5	12	-	163	65	10	3.0	m	φ	500	34.0
広島	A	⑥⑨	8.5	26.5	-	420	405	5.5	3.0	m	φ	500	32.0
	B	⑦⑩	3.5	33	-	420	405	6.0	2.8	m	φ	500	32.0
	C	⑧⑪	3.5	32	-	420	405	6.0	3.0	m	φ	500	34.0
	D	⑫⑭⑯	11	21	-	70	40	4.0	2.0	m	φ	500	27.5-30
四日市	A	⑰⑱⑲	4.5	8	25.5	455	331	7.0	1.8	m	φ	400	35.5
						(90)	(90)						

表-4.6 Type-B の施工単位の概要

地域名	施工単位	土層 (m)								載荷形状(m)					
		現場	データNo.	H ₁	H ₂	H ₃	H ₄	H ₅	H ₆	H ₇	H ₈	H ₉	H ₁₀	B	h
常磐自動車道	A	①②③	4.1	7.7	19.3	2.3	-	-	-	-	-	-	-	35.2	8.9
	B	④⑤	2.5	3.3	3.8	1.3	13.8	2.9	5.2	-	-	-	-	35.6	7.0
	C	⑥⑦⑧	1.2	1.0	0.8	1.8	5.8	13.2	1.9	5.4	-	-	-	35.8	8.0
	D	⑨⑩	2.5	3.4	1.9	2.2	12.6	4.2	1.8	-	-	-	-	42.2	8.5
	E	⑪⑫⑬	1.7	1.3	3.0	3.9	11.6	7.0	2.0	-	-	-	-	51.2	10.5
	F	⑭⑮	3.3	1.3	3.2	0.6	11.8	4.3	1.9	4.4	3.0	3.0	3.0	38.5	10.5

ドレーン理論式から求める。Type-B については、検討場所が互層状態であることにより、室内試験より得られる c_{vL} 値と実測より得られる c_{vf} 値とを直接比較することは難しい。そこで、最も層厚が厚く、沈下量、沈下時間に大きく影響する粘性土層に着目し、図-4.5に示すような Terzaghi (テルツァーギ) の圧密理論による計算沈下時間曲線と、実測沈下時間曲線とから、(4.2)式の関係から導かれる、(4.3)式に室内実験の c_{vL} 値を与え、実測の c_{vf} 値を求めることとした。

$$t = \frac{H^2 \cdot T_v(U=0.8)}{c_v} \dots (4.2)$$

(4.2)式から(4.3)式が求められる。

$$\frac{t_{0.8S_t}}{t_{0.8S_t}} = \frac{c_{vf}}{c_{vL}} \dots (4.3)$$

ここに、 $t_{0.8S_t}$: 理論最終沈下量の圧密度が80%となる時の時間、 $t_{0.8S_t}$: 実測最終沈下量の圧密度が80%となる時の時間

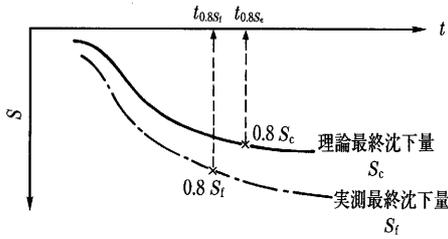


図-4.5 Type-B地区の実測 c_{vf} の求め方

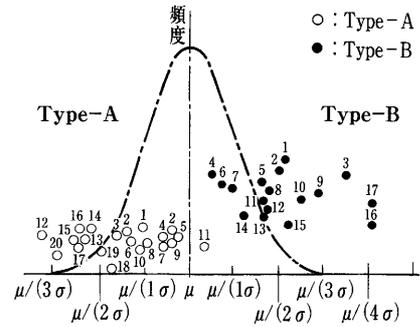


図-4.7 室内 c_{vL} と実測 c_{vf} 分布との比較⁷⁾

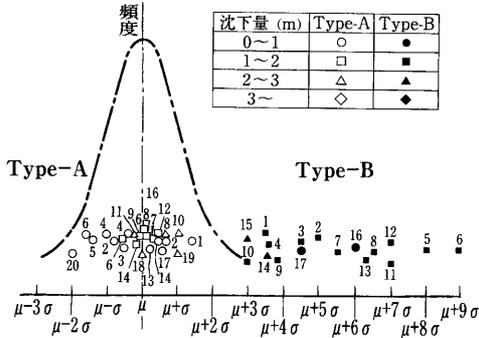


図-4.6 室内試験結果から算出した沈下と実測沈下の分布比較⁷⁾

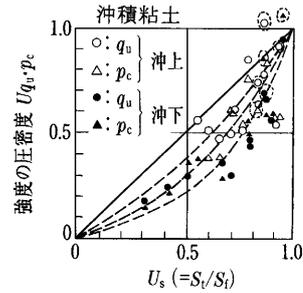


図-4.8 $U_s \sim U_{q_u}, p_c$ の予測と実測値の関係⁷⁾

(5) 計算値と実測値との比較

1) 沈下量について

全現場のデータについて同一基準で正規化して比較するために各現場データごとの沈下計算値の平均 μ 、標準偏差 σ を求め、平均値を中心軸にし、 $\mu \pm n\sigma$ ($n=1, 2, \dots$) 軸上に、対応する実測の最終沈下量をプロットしたものが図-4.6である。同図より Type-A と Type-B では明らかに傾向が異なり、Type-A では計算沈下と実測沈下は平均値 μ を中心として分布するのに対し、Type-B では $\mu+3\sigma$ より $+9\sigma$ に分布しており、実測の沈下量が計算値より大きく表れている。この原因として、各 Type の载荷状況が一次元状態と二次元状態との差があることが考えられ、一般的に用いられる沈下計算では、一次元圧密状態を評価するとどまり、二次元状態で発生すると考えられるせん断変形に伴う沈下量が評価できないことによると考えられる。

2) 圧密係数 C_p について

沈下量と同様に正規化するため、 C_p については対数分布として図-4.7に示すように、平均値 μ と σ の軸上で整理することとした。同図によれば各 Type の整理方法の違いもあるが、Type-A ではサンドドレーンの打設による乱れの影響もあり室内試験で得られる c_{vL} よりも小さくなる傾向が、無処理の Type-B では逆に大きくなる傾向がある。

3) 強度増加の予測値

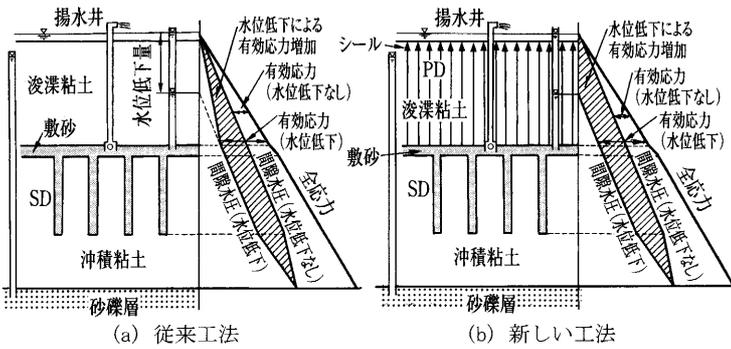
前節までの結果より、特に Type-A のような一次元状態でサンドドレーンによる地盤処理がされた場合の実測の沈下量は計算値とほぼ同程度になることが判明し、また圧密時間については遅れ気味になることが判ったが、サンドドレーン工法のもう一つの目的である強度増加という点に着目してみる。Type-A の四日市である図-

4.8は実際に、埋立粘性土 (18)、沖積粘性土層上層 (19)、同下層 (20) について、実測沈下時間曲線より求めた双曲線法の最終沈下量 S_f に対する各時点の沈下量 S の比で表される圧密度 U_s と、圧密降伏応力 p_c 、一軸圧縮強度 q_u の経時変化による圧密度 U_{q_u} 、 U_{p_c} との比較を行ったものである。同図中の破線は $e \sim \log p$ の非線型性から得られた理論線⁸⁾である。同図によれば、沈下の圧密度より、強度による圧密度の方が遅れる傾向にあり、設計時にあらかじめこれらの知見を考慮すべきことを示唆している。

4.6.2 プラスチックドレーン工法の効果予測と実際 —プラスチックドレーンの最近の適用例—

最近のプラスチックボードドレーンの適用方法の一例に浚渫粘土の処分場の延命化 (容量増大) を目的とした地下水位低下を併用した方法がある。図-4.9に従来方法と比較して模式的に示す。従来の方はあらかじめ海底の沖積粘土層に敷砂、サンドドレーンを施工した後、浚渫粘土を投入し、敷砂層の上に浚渫粘土による不透水層が形成された後、揚水井のポンプを稼働させ、敷砂層およびドレーン内の水位を低下させる。これによって浚渫粘土の自重と水位低下による有効応力増加によって沖積粘土層は圧密沈下し容量の増大を図ることができる。

一方、新たな適用方法は敷砂層の上に浚渫粘土による不透水層が形成された後、揚水ポンプを用いて敷砂層の水位を低下させて沖積粘土層を圧密する過程は従来と同様であるが、所定の浚渫粘土の投入が終わった時点でフロート台船を用いて浚渫粘土層内にプラスチックボードドレーンを打設し、敷砂層に到達させる。その後揚水ポンプを稼働させることにより敷砂層およびプラスチックボードドレーンの水位を低下させる。浚渫粘土層はプラスチックボードドレーンにより排水距離が短くなって



図—4.9 従来の地下水位低下工法の原理と新しい圧密促進工法の原理

いるため、圧密促進が可能となる。また、プラスチックドレーン内の水位が下がるため、従来工法に比べ水位低下による有効応力増加が大きいのもこの工法の利点である。

4.7 サンドコンパクションパイル工法の効果予測と実際

過去の施工実績から、沈下量の低減効果として図—4.10に結果を示す。また、沈下速度の遅れを圧密係数に着目して整理した結果を図—4.11に示す⁹⁾。ここに、 c_v は実測の沈下時間から逆算される圧密係数であり、 c_{v0} は、土質試験で求められる圧密係数である。サンドコンパクションパイル工法（以下SCP工法）による粘着力の増加量を Δc についてみると、最近では、荷重による強度増加のみならず打設による杭間の強度増加についても考慮する試みがある。図—4.12に現場で得られた上載荷重によらない砂杭間粘土の強度増加を示す^{12),13)}。杭打設後の強度増加 Δc_2 を推定する方法として次式が提案されている¹²⁾。

$$\Delta c_2 = 4/3 \cdot c_0 \cdot \ln(R/r) \cdot c/p \cdot U_2 \quad (4.4)$$

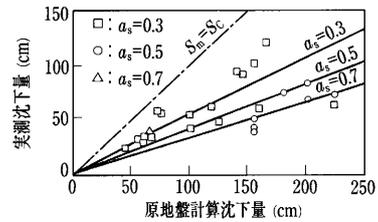
$$U_2 = 1 - \exp(-A \cdot c_v \cdot t / L^2) \quad (4.5)$$

c_0 : 原地盤強度 (kN/m²), R : 砂杭長 (m), r : 砂杭中心から調査位置までの距離 (m), c/p : 強度増加率, U_2 : 砂杭打設後の砂杭杭間粘土の圧密度, A : 圧密速度パラメーターで実測値からの逆算によると0.1~1.0の範囲にとることができる (図—4.13)。また、 c_v : 圧密係数 (m²/day), t : 経過時間 (day), L : 調査位置から砂杭表面までの排水距離 (m)

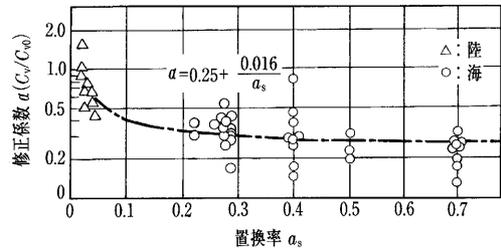
4.8 固結工法の効果予測と実際

(1) 低置換型深層混合処理工法における予測と実際¹³⁾

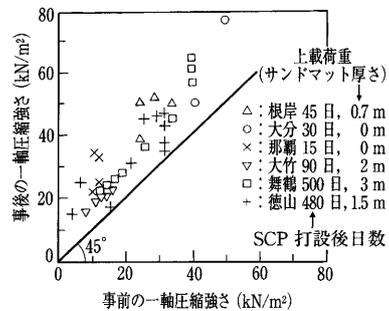
低置換型深層混合処理工法は盛土直下を深層混合処理工法等の安価なセメント混合固化体により“全面的にくまなく”改良 (改良率 a_p は、 $10 \leq a_p \leq 30\%$ の従来より低い改良率に抑える) することによって、図—4.14に示すように、盛土中央部直下の圧密沈下量を軽減する工法である。従来から最も安価な地盤改良形式とされてきた“プレロード+ドレーン工法”に対しても、①工期短縮が可能、②盛土の安定・沈下管理など施工管理が容易、



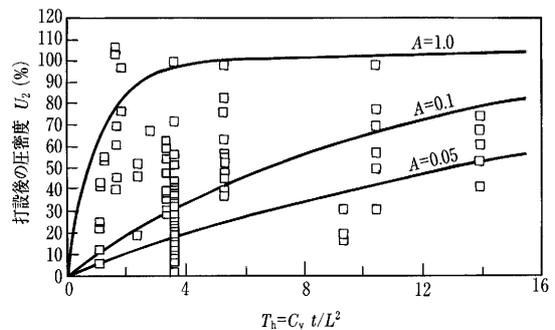
図—4.10 実測沈下量と原地盤沈下量



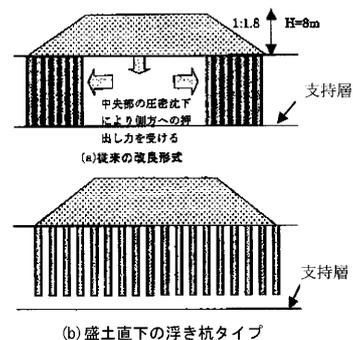
図—4.11 SCP地盤の圧密修正係数 (神田・寺師文献⁹⁾による)



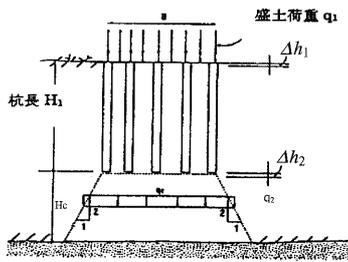
図—4.12 SCP打設前後の強度¹²⁾



図—4.13 SCP打設後の $U \sim T_h$ 関係¹²⁾



図—4.14 従来工法との比較



図—4.15 浮き型基礎の沈下計算方法¹³⁾

③沈下量抑制によりトータルの盛土材が節約でき、材料運搬時の周辺影響低減などの特性がある。

これまでに室内実験、およびその結果を基にした設計方法も提案され、タイ国や国内現場で多く適用されている。また、場合によっては、表層固化やジオテキスタイル敷設と組み合わせることにより、杭間の不同沈下も抑制できる。さらに、改良体を支持地盤へ着底しない浮き杭タイプ(図—4.14(b))を採用することにより、一層の経済化を図ることも可能である。

浮き杭タイプの沈下量の予測は以下のような検討になる。

改良部の沈下量 Δh_1 は複合地盤効果を期待して次式(4.6)にて算定する。また、下層の未改良部の沈下量 Δh_2 は慣用設計計算式(4.7)によって求める(図—4.15)。

$$\Delta h_1 = q_1 H_1 / \{a_p E_{col} + (1 - a_p) E_{soil}\} \dots\dots\dots (4.6)$$

$$\Delta h_2 = C_c / (1 + e_0) \times H_c \times \log \{(\sigma_v' + q_2) / \sigma_v'\} \dots\dots\dots (4.7)$$

ここに、 a_p : 改良率、 E_{col} : 改良体の変形係数、 E_{soil} : 粘性土層の変形係数、 q_1 : 盛土荷重、 q_2 : 粘性土下層での荷重、 H_1 : 改良層厚、 H_c : 下層厚

(2) 観測沈下量と計算結果

有明海沿岸道路試験工事における盛土中央直下での層別沈下計の計測結果によると、全体の沈下量35 cmのうち、下部無改良層で20 cm、その下の洪積層で10 cm程度の沈下となっており、低改良率セメントコラムによる改良域 GL-6 m までの間ではほとんど沈下が発生していなかった報告がある。

これまでの、タイ国や国内現場で観測された沈下量と計算結果について表—4.7中にまとめる。

4.9 まとめ

本章についてまとめると以下のとおりである。

- 1) 沈下対策の予測について

沈下対策として従来から多種多様な地盤改良工法が実施されてきているが、その効果を予測する場合には、改良原理ならびに実際の改良のプロセスをよく理解しておく必要がある。
- 2) 一次元状態と二次元状態について

道路盛土などのような狭い面積(二次元状態)では側方へのせん断変形量による沈下成分が無視できないと考えられ、このような面からも、設計

表—4.7 低改良率セメントコラム工法の適用例と計算結果

No	場所	盛土の高さ H_e (m)	打設間隔 $d \times d$ (m)	杭径 (cm)	改良率 a_p (%)	無処理での沈下量 (推定) (cm)	観測された沈下量 (cm)	観測された不同沈下量 (cm)	実測応力分担比	計算結果 (cm)			
										杭間	改良部	不同沈下量	
①	バンコク 高速道路	3.0	1.5×1.5	60.0	17.0	-	19.0	1.0	-	-	-	-	
		17.0											12.6
②	新潟西 バイパス	8.0	2.3×2.3	100.0	13.6	270.0	23.2	0.8	73	杭間荷重モデル	28.0	24.9	3.1
		6.0									21.7	120	35.0

量の妥当性および改良効果を評価する必要がある。

3) SCP 施工による杭間粘土の強度増加

SCP 打設のみによって、杭間粘土はその後の放置期間を経て、強度回復し原地盤以上に強度増加することが明らかとなってきた。これらを積極的に設計に取り込むことによりプレロード量の減少などが図れる。

4) 低置換型深層混合処理工法

盛土直下を深層混合処理工法等の安価なセメント混合固化体により“全面的にくまなく”改良(改良率 a_p は、 $10 \leq a_p \leq 30\%$ の従来より低い改良率に抑える)することによって、盛土中央部直下の圧密沈下量を軽減し、従来から最も安価な地盤改良形式とされてきた“プレロード+ドレーン工法”よりも低コスト化が可能な方向性がある。

参考文献

- 1) 稲田倍穂：軟弱地盤の調査から設計・施工まで、鹿島出版会、1970。
- 2) 実用軟弱地盤対策技術総覧編集委員会編：土木・建築技術者のための実用軟弱地盤対策技術総覧，産業技術サービスセンター，第4編第7章，1997。
- 3) 地盤工学会：地盤改良効果の予測と実際，pp. 4, pp. 19~20, 2000。
- 4) 坪井英夫：平成18年度土質・基礎に関する技術講習会—技術士受験のポイント—講習会資料，pp. 111, 2006。
- 5) 建設産業調査会編：土木・建築技術者のための最新軟弱地盤ハンドブック，第1編第9章，1981。
- 6) 稲田倍穂：最近の軟弱地盤工法，道路，No. 2, 1976。
- 7) 末松・栃木・坪井：軟弱地盤上の載荷盛土による沈下の予測と実際について，第31回土質工学シンポジウム，pp. 107~110, 1986。
- 8) 地盤工学会：地盤工学ハンドブック，pp. 1214, 1999。
- 9) 神田・寺師：粘性土地盤を対象とする SCP 工法の実用設計法—感度分析と実態調査—，港湾技研資料，No. 669, 1990。
- 10) 地盤工学会：地盤工学ハンドブック，pp. 1214, 1999。
- 11) 松尾・木村・西尾・安藤：建設発生土を利用した軟弱地盤改良工法の開発に関する基礎的研究，土木学会論文集，No. 547, III-36, pp. 199~210, 1996。
- 12) 松尾・木村・西尾・安藤：建設発生土類を活用した軟弱地盤改良工法の開発，土木学会論文集，No. 567, VI-35, pp. 237~248, 1997。
- 13) 井上・三木・落合・増田：浮き型低改良率セメントコラム (F-LCC) 工法の道路盛土での改良効果，第48回地盤工学シンポジウム，pp. 177~184, 2003。