

軟弱地盤上の盛土工事における 圧密後の地盤性状について

赤塚 光洋¹

¹正会員 戸田建設株式会社 土木工事技術部（〒104-8388 東京都中央区京橋1-7-1）

軟弱地盤上の盛土工事において、供用開始後の残留沈下を抑制する目的でバーチカルドレーンによる圧密沈下促進工法が用いられることが多い。また、粘性土地盤は圧密によって強度が増加するので、バーチカルドレーン工法は盛土基礎地盤の強度発現を早める安定対策としても用いられている。

本稿は、バーチカルドレーンを採用した軟弱地盤上の造成盛土工事において、工事着手前および工事完了後に実施した現地盤の土質試験の結果を比較検討し、圧密された地盤の物理的、力学的特性についてとりまとめたものである。

キーワード：軟弱地盤，バーチカルドレーン工法，圧密促進効果，強度増加

1. はじめに

本工事は、千葉県成田市における開発面積37haの土地区画整理事業に伴う造成工事で、原地盤は非常に軟弱な(N値=0~1)有機質土およびシルトが層厚4.0~20.0mで堆積していた。

盛土の高さは平均7.0mで、最大沈下量は3.5mに及び、圧密度が90%に達するまでの放置期間が10,000日以上と予想されたため、バーチカルドレーンによる圧密沈下促進工法を実施した。

工事着手前の土質調査は、盛土工事の設計・施工に供するために行われたものであるが、今回の事後調査・室内土質試験については、バーチカルドレーンの効果を、動態観測による圧密進行の確認に加え、圧密後の地盤特性の変化から検証するために実施したものである。

本稿は、圧密地盤の土質試験の結果を踏まえ、バーチカルドレーン工法の改良目的である「圧密促進」と「強度増加」の双方について検証を行い報告するものである。

2. 地質の概要

(1)地形および地層構成

施工箇所の地層想定図を図-1に示す。施工箇所は成田山と一級河川根木名川に挟まれた埋没谷に位置し、沖積層の層序としては、最下位に沖積砂層(AS2)、腐植土およびシルト(AC3)が不均一にあるいは互層状に堆積する。その上位は均質な海成シルト(AC2)が層厚10~15mと比較的厚く分布し、埋没谷の主部を構成する。沖積層の最上位は氾濫原堆積物である有機物、腐植物、細砂を相互に混入した沖積第一粘性土層(AC1)、沖積砂質土層(Ais)、腐植土層(AP)が分布する。

(2)代表的な土質柱状図

施工箇所の代表的な土質柱状図を図-2に示す。深度18mまでN値が0であり、地表部には腐植土層が約3.0m堆積し、中間部は均質な海成シルトが分布している。層厚が10mにおよぶシルト層にはサンドシムなどが全くみられず、圧密に非常に期間を要することが予想された。

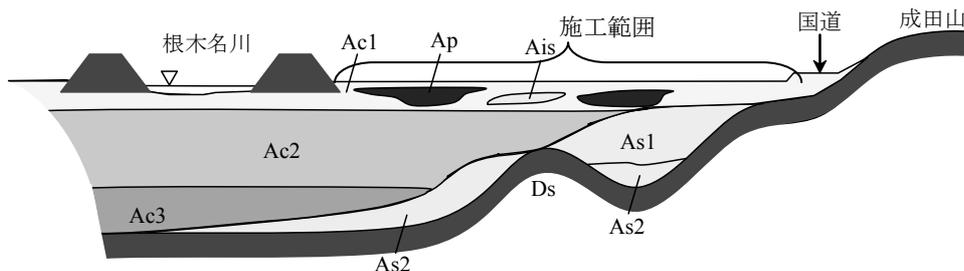


図-1 地層想定図

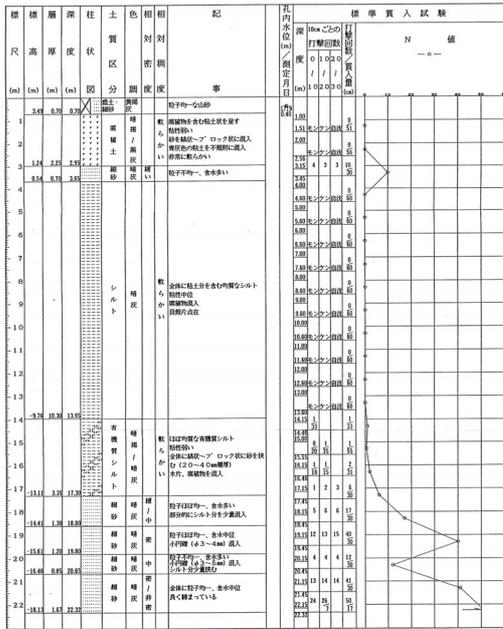


図-2 代表的な土質柱状図

3. 圧密沈下対策について

図-2の地点における沈下量および沈下時間を算出すると、施工盛土高さが7.0mの場合、最終沈下量が $S_f=3.20\text{m}$ 、圧密度90%に要する時間が $t_{90}=13,000$ 日となり、沈下が長期に亘り継続することが予想された。対策としては圧密を促進させることを目的にバーチカルドレーン工法を採用し、供用開始後の有害な残留沈下の発生を抑制するものとした。

バーチカルドレーン工法は、ドレーン材の種類によって分類されるが、本工事においては、袋詰サンドドレーン工法（以下、PD工法と称す）とプラスチックボードドレーン工法（以下、PBD工法と称す）の両者を採用した。PD工法は軟弱層の厚い箇所を対象に、PBD工法は家屋等の周辺構造物に近接する区域を対象に用いるものとし、PD工法のドレーン打設間隔を $d=1.2\sim 1.5\text{m}$ 、PBD工法の場合は、 $d=1.0\sim 1.2\text{m}$ とした。

4. 実測沈下量と理論沈下曲線の比較

図-2の地点における実測沈下量と、実際の盛土工程を考慮した理論沈下～時間曲線の比較を図-3に示す。理論曲線は、図-4および図-5に示す事前調査の圧密試験のデータを用い、最終沈下量 S_f の算定は Δe 法、圧密時間の算定はバロンの式を用いた。

また、ドレーンの効果を確認するため、無対策時の理論沈下曲線も同図中に併記する。なお、この地域の促進工法はPBD工法によるものである。

計算による最終沈下量は、実測値に非常に近い値を示している。実測沈下曲線も理論値に近いものを示し、ドレーンの効果は確実に得られていると考え

られるが、経過日数600日前後から理論値に比べ若干圧密の進行が遅れており、原因としては経年によるドレーン材の透水機能の低下などが考えられる。

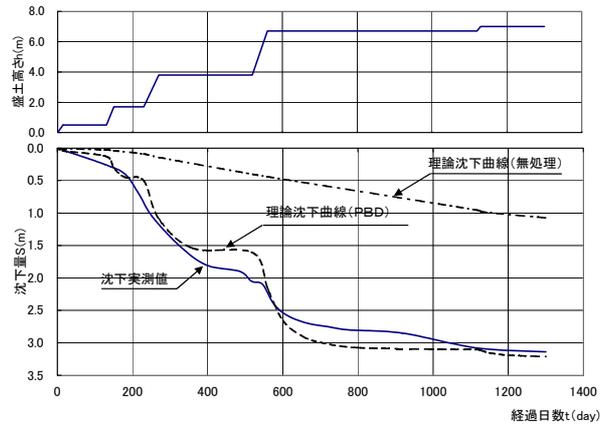


図-3 実測沈下曲線と理論沈下曲線の比較

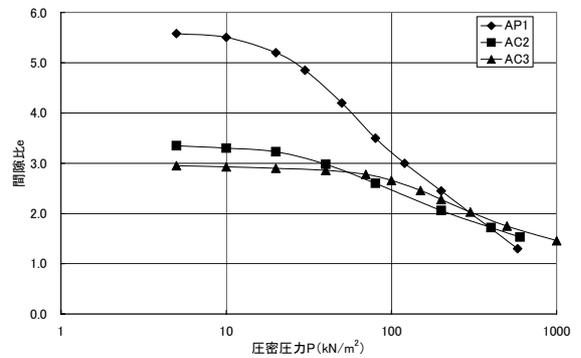


図-4 原地盤の $e\sim \log P$ 曲線

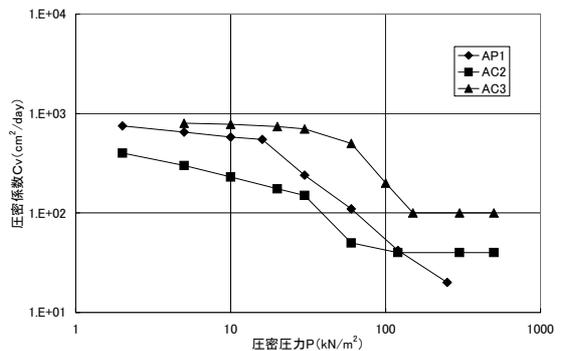


図-5 原地盤の $\log C_v\sim \log P$ 曲線

5. 室内土質試験の結果と考察

事後調査は、事前調査が行われている軟弱層の比較的厚い箇所(層厚 $D=13.0\sim 20.0\text{m}$)を対象に、合計27試料のサンプリングを行って室内試験を実施した。なお、事後調査を実施した時点において、原地盤は双曲線法による評価で圧密度 $U=95\%$ 以上に達していた。

(1)当該地盤の塑性図による分類

サンプリング試料の塑性図を図-6に示す。土質は主にシルトと有機質土に分類され、液性限界 w_L が高いことから、圧縮性が大きいものと推定できる。

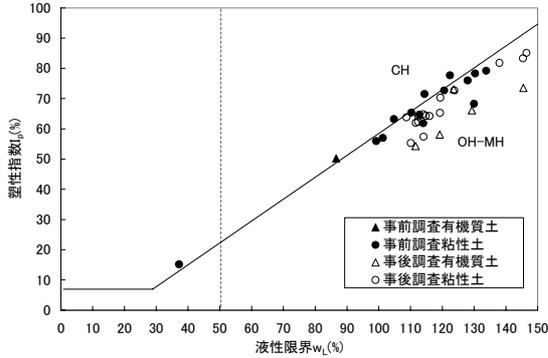


図-6 塑性図

(2)圧密による物理特性の変化

土は圧密が進行すると体積が減少することから、湿潤密度 ρ_t および間隙比 e の変化に着目し、圧密促進効果を評価するものとする。

a)湿潤密度 ρ_t の変化

図-7は事前および事後調査における湿潤密度の変化を深度別に整理したものである。

湿潤密度は深度方向全体に増加傾向がみとめられ、特に有機質土の増加率が大きいものとなっている。

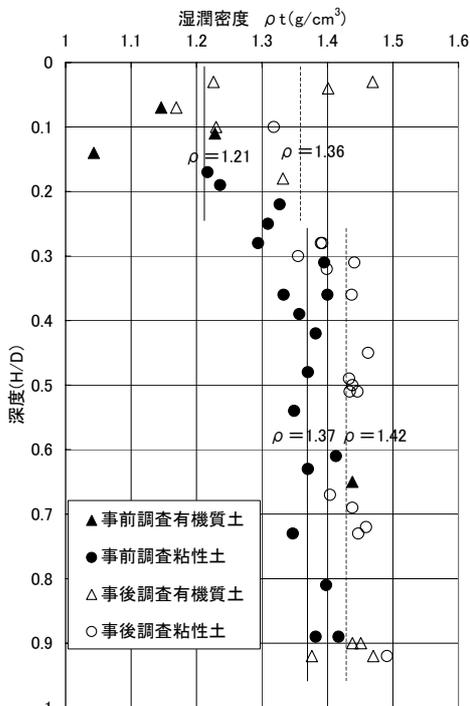


図-7 圧密による湿潤密度 ρ_t の変化

b)間隙比 e の変化

湿潤密度と同様に、間隙比の変化を図-8に示す。

間隙比も深度方向全体に減少傾向がみとめられることから、圧密が深度に関わり無く進行していると考えられ、鉛直排水層（バーチカルドレーン）の効果が確実に表れているものと推察できる。

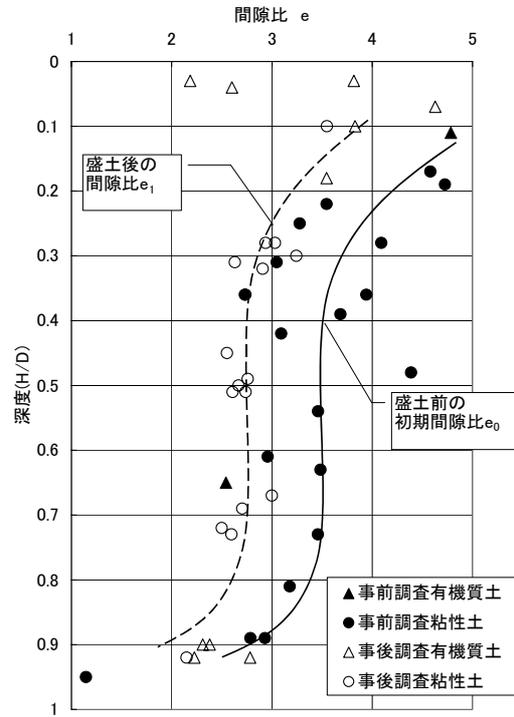


図-8 圧密による間隙比 e の変化

(3)圧密によるコンシステンシーの改善

細粒土の自然含水状態における相対的な硬さを表す指標にコンシステンシー指数 I_c があり、次式で表される。

$$I_c = (w_L - w_n) / I_p \quad (1)$$

ここに、 w_L は液性限界、 w_n は自然含水比、 I_p は塑性指数である。

I_c の値が0に近いほど土は軟らかく、1に近いほど硬い状態にある。

I_c の分布を図-9に示すが、圧密前の I_c に比べ、圧密後の I_c が硬い状態に移行しており、圧密の進行に伴って粘性土地盤のコンシステンシーが改善されていることが判る。

(4)物理特性と圧縮指数の関係

液性限界 w_L や自然間隙比 e などの物理的特性と土の圧縮性を示す圧縮指数 C_c はよい相関があることが知られている。今回の試料における $w_L \sim C_c$ および $e \sim C_c$ の関係を図-10、図-11に示す。 w_L と C_c の関係には、ばらつきがみられるが、 e と C_c は圧密の前後という地盤の応力履歴に関係なく非常によい相関が得られている。

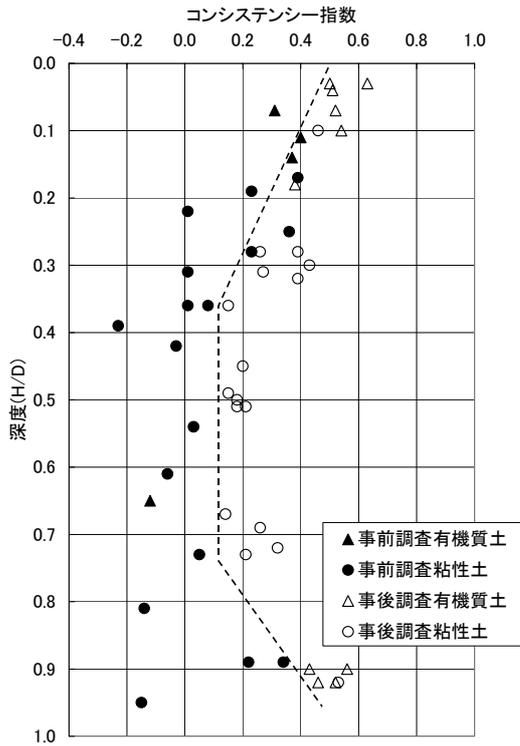


図-9 圧密によるコンシステンシー指数 I_c の変化

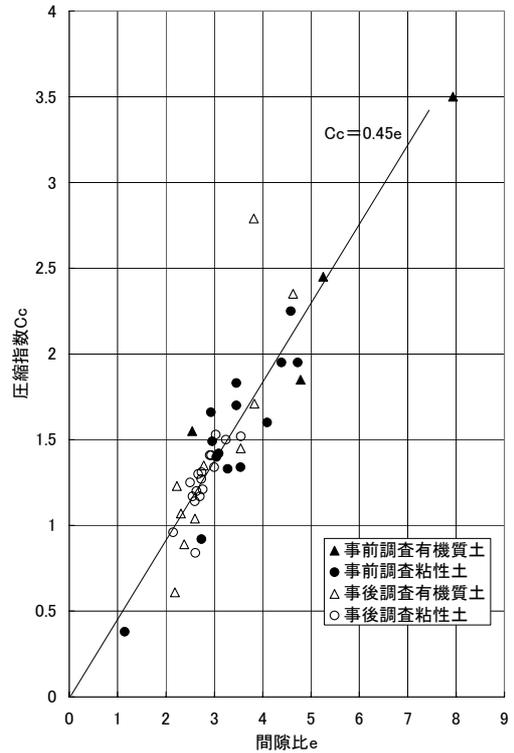


図-11 間隙比 e と圧縮指数 C_c の関係

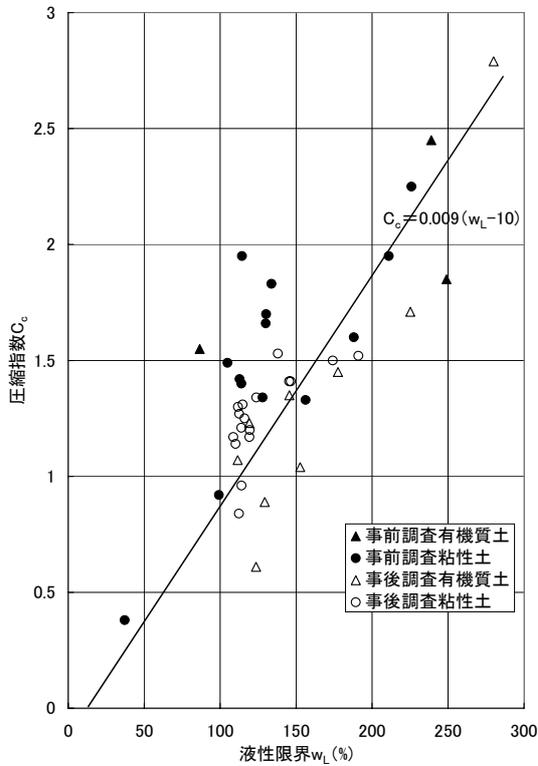


図-10 液性限界 w_L と圧縮指数 C_c の関係

(5) 圧密による力学特性の変化

圧密による力学特性の変化を以下に述べる。

図-12に、圧密の前後における一軸圧縮強度 q_u の変化、図-13に変形係数 E_{50} の変化を示す。

q_u に関しては、表層部の有機質土が約 75kN/m^2 、粘性土層で約 45kN/m^2 の強度増加がみられ、変形係数では有機質土が約 1800kN/m^2 、粘性土層で約 3600kN/m^2 の増加がみられた。

有機質土は、粘性土よりも大きな強度増加の傾向を示すが、変形に関しては強度増加に比べ小さな変化に留まっている。

ここで、 q_u と E_{50} の関係を図-14に示す。

q_u と E_{50} の関係は、粘性土層でおよそ $E_{50} = 65q_u$ 、有機質土で $E_{50} = 30q_u$ となっており、竹中が提案した粘性土の初期の弾性係数 $E = 210C_u$ ($C_u = q_u/2$ とすると、 $E = 105q_u$)に比べると、今回の E_{50} はかなり小さいものとなっている。

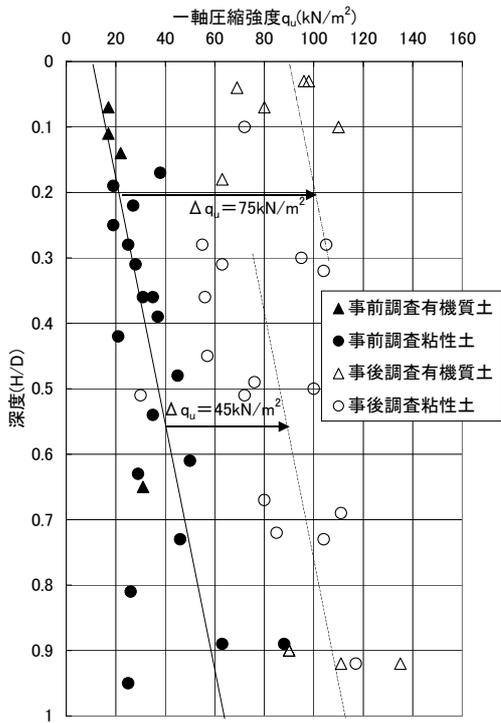


図-12 圧密による一軸圧縮強度 q_u の変化

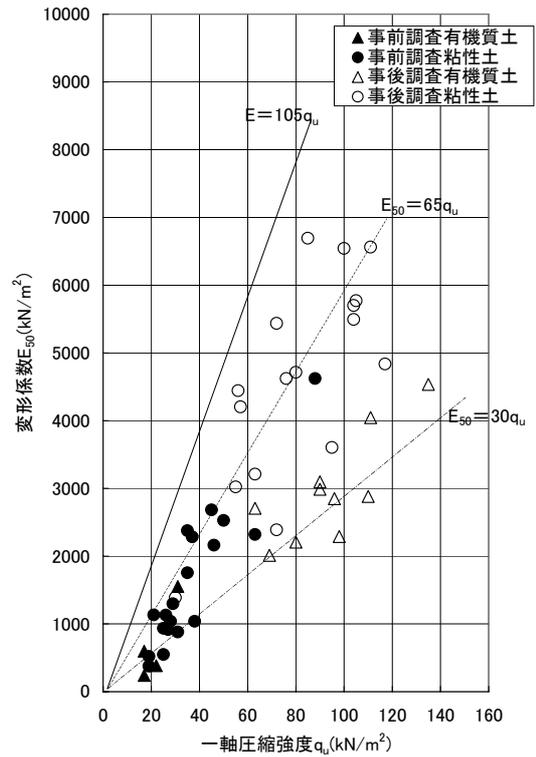


図-14 一軸圧縮強度 q_u と変形係数 E_{50} の関係

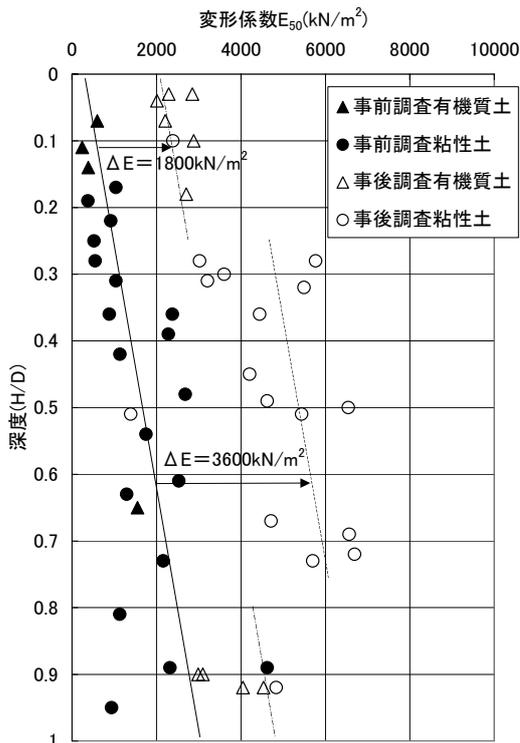


図-13 圧密による変形係数 E_{50} の変化

6. 粘性土の強度増加率 C_u/P について

圧密による強度増加は、粘性土に作用する圧密応力 P が圧密降伏応力 P_y を超えるまで強度は増加しないものと仮定すると、次のように表すことができる。

$$C_u = C_{u0} + m (P_0 - P_y + \Delta P) U \quad (2)$$

ここに、
 C_u : 強度増加後の非排水せん断強度
 C_{u0} : 原地盤の非排水せん断強度
 m : 強度増加率 (= C_u/P)
 P : 圧密応力
 P_0 : 有効土被り圧
 P_y : 圧密降伏応力
 ΔP : 盛土による鉛直増加応力
 U : 圧密度

ここで、今回の圧密による強度増加がどの程度であったかを、式(2)の関係に基づき検証するものとする。

式(2)の各項は室内試験の結果や既往文献から、以下のように推定できる。

(1) 原地盤の非排水せん断強度 C_u

粘性土の非排水せん断強度を $C_u = q_u/2$ とすると、一軸圧縮試験の結果から原地盤の非排水せん断強度 C_{u0} は深さ z にほぼ比例して強度が増加しており、その関係は $C_{u0} = 5.0 + 1.7z$ (kN/m^2)であった。

(2)強度増加率 $m(C_u/P)$

強度増加率は地盤の土質や深さなどの条件によって異なるが、日本道路公団では強度増加率の範囲として、シルトは $m=0.25\sim0.40$ 、PEATでは $m=0.35\sim0.50$ を与えている。

(3)有効土被り圧 P_0

原地盤の有効土被り圧 P_0 は、原地盤の平均有効湿潤重量が $\gamma' = 4.5\text{kN/m}^3$ なので、 $P_0 = 4.5z(\text{kN/m}^2)$ と表すことができる。

(4)有効土被り圧 P_0 と圧密降伏応力 P_y の関係

原地盤における有効土被り圧 P_0 と圧密降伏応力 P_y の関係を、図-15に示す。

P_0 と P_y の関係は、ほぼ $P_y = 1.5P_0$ の関係であり、軽い過圧密の状態 ($\text{OCR}=1.5$) である。

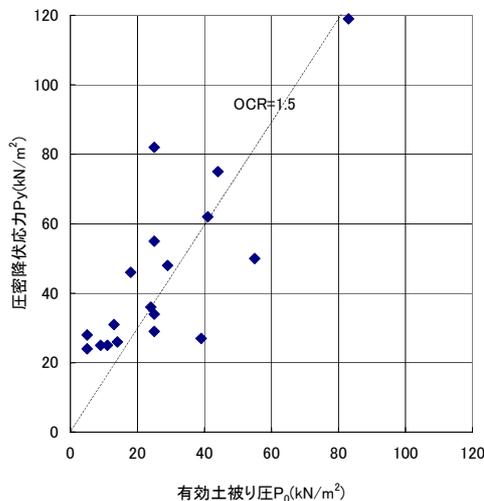


図-15 有効土被り圧 P_0 と圧密降伏応力 P_y の関係

(5)盛土による鉛直増加応力 ΔP と圧密度 U

鉛直増加荷重 ΔP は、盛土の単位体積重量が $\gamma = 18.0\text{kN/m}^3$ 、平均高さが $h = 7.0\text{m}$ であるので、 $\Delta P = \gamma h = 126.0\text{kN/m}^2$ とし、圧密度は双曲線法による推定から $U = 0.95$ とする。

上記の関係を式(2)に代入すると、以下の式を得る。

$$C_u = (1.70 - 2.14m)z + 119.70m + 5.0 \quad (3)$$

式(3)より、 $m(=C_u/P)$ を決定すれば C_u は深さ z の一次関数で表されることになる。

ここで、 $m = C_u/P = 0.20$ および $m = C_u/P = 0.40$ とした場合の C_u と z の関係を図-16の非排水せん断強度の深度分布図に記入する。圧密後の非排水せん断強度が、ほぼ $C_u/P = 0.20\sim0.40$ の範囲に分布していることが判る。

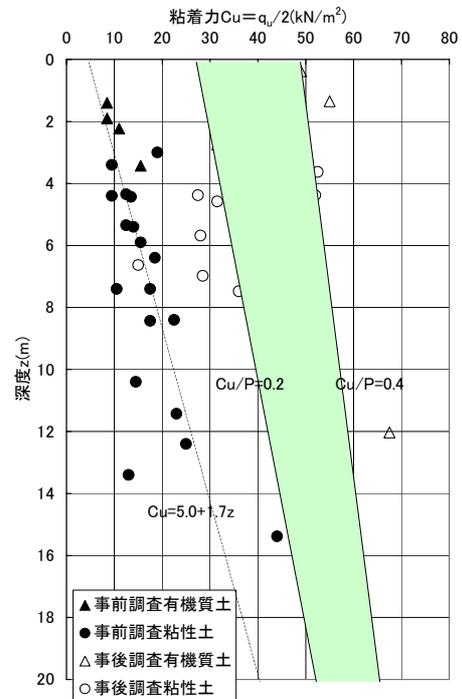


図-16 非排水せん断強さの分布

7. まとめ

軟弱地盤上の盛土工事において、バーチカルドレーン工法により圧密が促進された地盤の物理的および力学特性の検証を実施した。その結果を以下に示す。

(1)圧密による物理的特性の変化について

事後調査の物理試験の結果から、圧密により地盤の物理特性が深度方向全体に亘って変化していることが確認できた。特に空隙比については軟弱層の中間部でも確実に減少しており、鉛直排水層を設けた効果が確実に表れていると考える。

また、空隙比と圧縮指数の相関が高く、盛土の前後で相関性に変化が見られないことから、今後、物理試験から概略の沈下性状を判断する上で、有意義な資料になりうると考えられる。

(2)圧密による力学特性の変化について

地盤の一軸圧縮強度は、圧密により深度方向全体に増加しており、確実な強度増加が認められた。また、変形係数も上昇しており、地盤のせん断変形に対する抵抗力も増加していると考えられる。有機質土が強度増加の割合に比べ変形係数の増加が小さいことは、有機質土の特性と考えられる。

今回、圧密に伴う粘性土の強度増加率の推定を試みたが、シルト層では少なくとも、 $C_u/P = 0.2$ 以上の強度増加が期待できると考えられ、今後の軟弱地盤上の盛土の安定検討に活かしていきたいと考える。