

山内 豊 聡 * (Toyotoshi Yamanouchi)

三浦 哲彦 ** (Norihiko Miura)

福田 直 三*** (Naozo Fukuda)

キーワード : 土質安定処理 / 粘性土盛土 / 石灰 / ジオテキスタイル / 室内実験 / ケーススタディ
(I G C, H - 4 / K - 6)

1. まえがき

河川堤防や各種盛土の施工においては、現地で発生する土を工事用材料として利用するのが望ましい。しかし、河川浚渫土や切土によって生じた土が高含水比で軟弱である場合には、捨土場所の確保・土の運搬・運搬道路の造成と補修等に要する一定の費用を払って捨土した上で良質な土を購入運搬しなければならない。捨土と客土のために要する費用に比較して現地発生土の改良がより低廉で効果的に行い得るのであれば、その方法は採用できるものとなる。

最近、土木工事に新しい材料や施工法が次々に開発された結果、従来は単に原理のみが知られていた軟弱地盤処理工法が実用性の高い工法として注目される場合が出てきた。本文で述べる多段式サンドイッチ工法は、そのような工法のうちの一例である。本工法は、生石灰とフィルターファブリック(ジオテキスタイルの一つ:不織布)を組合せて使用することにより、従来では困難とされてきた軟弱粘土による盛土を可能ならしめるものである。その適用範囲は、含水比30%程度の風化粘土から含水比 100%以上の沖積粘土に至るまで広範囲にわたるものである。

本報は、当初沖積粘土に対して実証されている多段式サンドイッチ工法^{1,2,3} について、再度その改良メカニズムについて行った室内実験、風化粘土による高盛土への適用例および改良効果に関する考案についてまとめたものである。

2. サンドイッチ工法の原理

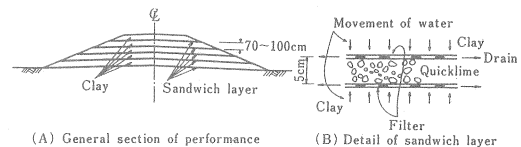
2.1 工法の原理

多段式サンドイッチ工法は、1967年に山内¹ によって発表された粘性土に対する盛土工法である。Fig. 1

に示すように、厚さ5cm程度の粒状生石灰と上下2枚のフィルターファブリックからなるサンドイッチ層を盛土内に面状あるいは帯状に敷設し、厚さ70~100cmの粘土層と交互にまき出す工法である。

サンドイッチ層による盛土の改良効果は、次の諸現象が段階的あるいは並進的に生じることによってもたらされる。

- (1) 生石灰の水和による粘土層からの吸水圧密。
- (2) 生石灰の膨張圧と吸水による負圧の相加作用による圧密促進。
- (3) 水和熱で間隙水の温度が上昇し、透水係数が増加することによる圧密促進。
- (4) 生成した消石灰のサクションによる吸水圧密。
- (5) 盛土自重によるフィルターを介しての継続的圧密。
- (6) フィルターファブリックによる構造的補強効果。



(A) General section of performance (B) Detail of sandwich layer
Fig.1 Explanatory diagram of proposed embankment method.

*九州産業大学工学部土木工学教室 教授、**佐賀大学理工学部建設工学科 教授、***復建調査設計(株)地質調査部 主任技師

(7) 消石灰の炭酸カルシウム化に伴う構造的補強効果

2.2 サンドイッチ層による圧密促進効果

フィルターファブリックと生石灰で構成されるサンドイッチ層は、次の3つのメカニズムによって粘土層の圧密促進に寄与すると考えられる。

まず、フィルターファブリックを粘土層厚約1 m毎に配置することによって、粘土層の排水距離を大きく短縮でき、圧密が促進される。

次に、生石灰の吸水作用による圧密促進、すなわち、生石灰の水和反応に伴って負の間隙水圧が発生し、粘土層の間隙水圧との間に水頭差を生じ、圧密が促進される。生成した消石灰のサクションによる吸水現象も圧密促進に寄与するであろう。

生石灰は吸水によって体積膨張をきたすため、膨張圧による圧密促進も期待できよう。Fig.2はサンドイッチ層の吸水、膨張に伴う圧密促進効果を模式的に示したものである⁴。吸水および膨張によって生じる圧密圧力BおよびCは、初期段階においてサーチャージ的に作用するので、自重圧密による強度増加より大きな改良効果が期待できる。

2.3 生石灰による含水比低下の効果⁴

生石灰は水和作用によって Table 1のような化学変化を生じる。この水和に伴う粘土からの吸水量 ΔM_{w1} は、生石灰の体積を V_{10} 、同密度を ρ_{10} とすると次式で表わせる。

$$\Delta M_{w1} = 0.32 \rho_{10} V_{10} \quad (1)$$

水和が終了した時点では消石灰は絶乾状態であるので、引続いてサクションによる吸水が行われる。これによると吸水量 ΔM_{w2} は、水の密度を ρ_w とすると、

$$\Delta M_{w2} = \Delta V_{w2} \cdot \rho_w = 2 \left(1 - 0.943 \frac{\rho_{10}}{G_{10} \cdot \rho_w} \right) V_{10} \cdot \rho_w \quad (2)$$

ここに、 G_{10} は生石灰の比重、 ΔV_{w2} は生石灰の水和による体積増加量である。上記2式より、体積 V_{10} の生石灰の吸水量 ΔM_w は、

$$\Delta M_w = \Delta M_{w1} + \Delta M_{w2} \quad (3)$$

いま、粘土層一層の厚さを h 、サンドイッチ層厚を b 、単位幅当たりのサンドイッチ層敷設面積比を m とすると、粘性土および反応後の消石灰の飽和度 S_r を100%とし、土粒子比重 G_s 、初期含水比 w_0 の粘土層のサンドイッチ効果による含水比低下量 ΔM_s (%)は次式で計算される。

$$\Delta M_s = \frac{b \cdot m}{h} \left[\frac{\rho_{10} + \left(1 + \frac{G_s \cdot w_0}{100} \right)}{G_s} \left\{ 0.32 + 2 \left(\frac{1}{\rho_{10}} - \frac{0.943}{G_{10} \cdot \rho_w} \right) \rho_w \right\} \right] \quad (4)$$

粘性土は、Fig. 3に示すように、含水比低下によって効果的にせん断強度が増加する傾向をもつが、この様な関係を用いることによって、粘土のせん断強度増加をも推定することができる。

2.4 サンドイッチ層の構造的補強効果

サンドイッチ層の生石灰は吸水して消石灰となり、さらに土中の炭酸ガスの作用で炭酸カルシウムに変化する。炭酸カルシウムの強度による盛土全体の補強効果を評価するために、粘土層と炭酸カルシウム層を含む盛土全体

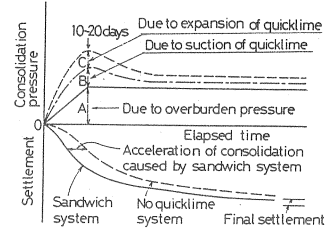


Fig.2 Illustration of the effect of the multiple strip-sandwich method.

Table 1 Hydration of quicklime.

	CaO + H ₂ O → Ca(OH) ₂ + 65.5 kJ/mol		
Molar weight	56	18	74
Specific gravity	3.2	1.0	2.24
Weight ratio	1.0	0.32	1.32
Volume ratio	1.0	1.1	2.0

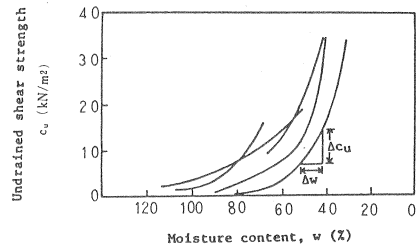


Fig.3 Shear strength-moisture content relationship in soft clay.

の平均的せん断強度を換算粘着力 c_u^* で表わすことにすると次式のとおりとなる。

$$c_u^* = \left\{ c_u l + (c_1 - c_u) m \sum_{j=1}^k \frac{b_j}{\sin \alpha_j} \right\} / l \quad (5)$$

ここに、 c_u は土の粘着力、 c_1 は炭酸カルシウムの粘着力、 b_j はサンドイッチ層厚、 α_j は第 j 番目のサンドイッチ層とすべり臨界円接線方向のなす角、 l はすべり面の弧長である。

次に、フィルターファブリックの引張強度による構造的補強効果を考慮に入れた場合には、円弧すべりに対する安全率 F_s は次式のようになる⁴。

$$F_s = \frac{1}{\sum_{i=1}^n W_i \sin \alpha_i} \left[\sum_{i=1}^n \left\{ (c_u l)_i + \tan \phi_{ui} (W_i \cos \alpha_i - u_i l_i) \right\} + m \sum_{j=1}^k C_j \right] \quad (6)$$

ここに、 c_{ui} 、 ϕ_{ui} は分割法のスライス i の強度定数、 l_i は同弧長、 W_i は同重量、 α_i はスライス i のすべり面が水平面となす角、 u_i はスライス直交方向の間隙水圧、 j はサンドイッチ層番号である。また、 $\sum_{j=1}^k C_j$ はフィルターファブリックの補強効果の粘着力換算値であり、 C_j は次式で表わされる⁵。

$$C_j = T_j \cos \alpha_j \quad (7)$$

ここに、 T_j は土中でのフィルターファブリック拘束力と同引張強度のうち小さい方の値(通常は後者)、 α_j は式(5)で定義したとおりである。

式(6)において、 c_u の代わりに式(5)の c_u^* を用いれば炭酸化のサンドイッチ層の構造効果を考慮に入れたことになる。

3. 基礎実験

3.1 これまでの実験の経緯

先章に述べたサンドイッチ工法の原理を確かめるために、これまで一連の室内実験および六角川における試験堤防実験を行っている^{1,2,3}。すなわち、室内実験では内径55cmの鋼製円筒を用い、実際に近い厚さの生石灰・粘土系供試体について、粘土層(有明粘土、 $w = 99.5\%$ 、 $w_L = 79.4\%$ 、 $I_p = 42.4\%$)の圧密沈下特性、間隙水圧分布、圧密後の強度特性などについて検討したもの¹、また、長さ150cm、高さ25cm、奥行30cmの前面ガラス張りの土槽を用いて、サンドイッチ工法を実際工事に適用する場合に効果的かつ経済的な配置を検討したもの³がある。これらの実験から、(1)サンドイッチ層内の生石灰の吸水膨張は10日間程度でほぼ終了する。また、(2)水和反応の過程における間隙水圧は、初期の段階では生石灰の影響によって上昇するが、その後吸水によって負圧に変化する。また、サンドイッチ層からの距離が大きくなるほど正圧から負圧に転じる傾向は遅れる。さらに、(3)サンドイッチ層の敷設仕様は面状とする場合および帯状とする場合とがある。実験によれば、帯状敷設の場合、上載圧の1.3~1.6倍の膨張圧を生じることから、この方式が盛土体の圧密に対して効果的かつ経済的である等の結果を得ている。

3.2 生石灰・粘土系の吸水膨張実験⁶

(1)実験方法・材料

サンドイッチ工法を実際に適用する場合には、サンドイッチ層を全面的に敷設した上に粘土層をまき出していく方法と、帯状のサンドイッチ層を部分的に設置した上に粘性土層をまき出していく方法の2通りが考えられる。

これらの2通りの方法に対応する条件(Table 2)で生石灰・粘土系試料の吸水膨張実験を行った。はじめに、生石灰の吸水膨張特性を把握するために、標準圧密試験により上載圧を加えた状態での吸水膨張実験を行った。次いで、生石灰・粘土系供試体に対してはFig. 4に示す方法で一連の三軸圧密実験を行った。

実験試料は、広島県広島市西部の不攪乱沖積粘土を用いた。自然含水比 82~122%、湿潤密度 1.39~1.45 g/cm³、土粒子比重 2.60~2.63、液性限界109~127%、塑性指数69~90、一軸圧縮強度 7~31 kN/m²である。生石

灰は0.25mmフルイ通過のものを用いた。

(2) 生石灰の吸水膨張実験

Fig. 5 は、標準圧密試験機を用い試料高 1.5 cm、直径 6.0 cm、密度 1.25 g/cm³ の生石灰試料に対する吸水膨張実験結果である。すなわち、圧密圧の载荷による圧縮量 (Stage 1)、注水による吸水膨張量 (Stage 2) を示している。同図によると圧縮ひずみ $\epsilon_c \sim$ 鉛直圧力 p_v 曲線の勾配 (Stage 1) は

$$\frac{\Delta \epsilon_c}{\Delta \log p_v} = 0.076 \quad (8)$$

である。また吸水による膨張ひずみ $\epsilon_e \sim p_v$ 曲線の勾配は

$$\frac{\Delta \epsilon_e}{\Delta \log p_v} = 0.42 \quad (9)$$

である。

Table 1 に示すように、生石灰はこれと同体積の水を吸水し、体積は約 2 倍となるが、これは大気圧下での現象であって、鉛直圧力が大きくなると Fig. 5 にみられるように膨張量は次第に小さくなり、 $p_v = 3000 \text{ kN/m}^2$ となると膨張は生じなくなることが分かる。

Fig. 6 は同実験における膨張量の経時変化を示したものである。これより鉛直圧力が高くなるほど吸水に時間を要しているが、これは生石灰密度の増加に伴う透水能力の低下に起因するものと考えられる。

(3) 粘土・生石灰系の三軸圧密実験

Fig. 4 に示した生石灰・粘土系三軸供試体に対する軸圧一定 ($\sigma_1 = 98.1 \text{ kN/m}^2$ 、排水条件) および軸ひずみ拘束 ($\Delta \epsilon_1 = 0$ 、排水条件) の下での圧密実験を行い、Fig. 7 の結果を得た。軸圧一定実験における膨張量の最大値と軸ひずみ拘束実験における膨張圧の最大値は、ともに経過時間 500 分付近で生じている。これらの実験から、

Table 2 Mechanism of improvement by clay-quicklime system.

Improvement method	Mechanism of Improvement	Test condition
Multiple sandwich method	Quicklime layer (all over) Expansion of embankment Water Filter fabric (Vertical section)	Vertical pressure σ_v : constant Water moves out from the system : drain
Multiple strip-sandwich method	Filter fabric Quicklime Strip-sandwich layer Expansion of embankment Water (drained through filter) Expansion (Vertical section, front view)	Boundary condition : $\epsilon_v, \epsilon_h \neq 0$ and $\sigma_v \neq \text{constant}$ Water moves out from the system : drain

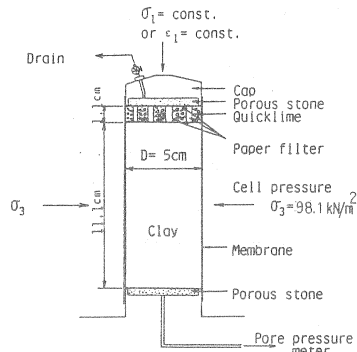


Fig. 4 Test specimen of clay-quicklime

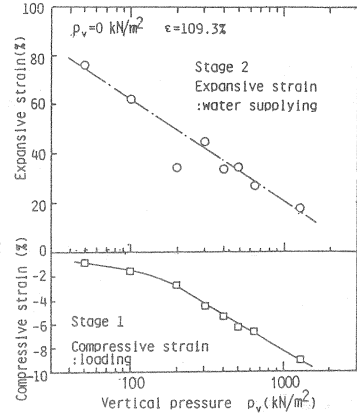


Fig. 5 compressive and expansive characteristics of quicklime in oedometer test.

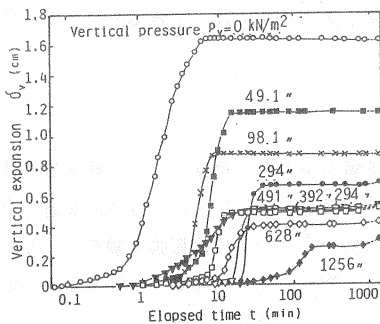


Fig. 6 Measured vertical expansion amount of quicklime due to water supplying.

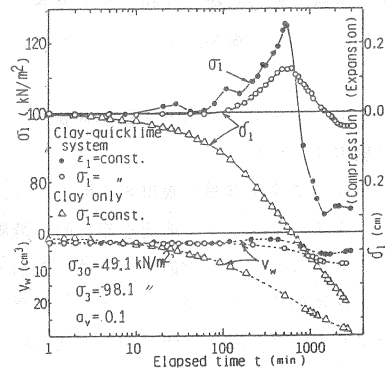


Fig. 7 Consolidation characteristics of clay-quicklime system.

生石灰の水和反応はその大部分が60分から500分の間に生じ、境界の拘束条件にあまり影響されないものであることが分かる。また、粘土のみの圧密沈下は3000分を過ぎてでもなお進行しているが、生石灰・粘土系の試料では2000分あたりで、おおむね圧密は終息しており、生石灰による圧密促進効果が実験的に確認できたといえよう。

生石灰の吸水膨張作用による圧密促進効果を間隙水圧の面から調べたのがFig. 8である。図に示された4本の曲線はそれぞれ次の実験条件による。

- a) 粘土のみ、
- b) 生石灰・粘土系 (軸ひずみ拘束、排水)、
- c) 生石灰・粘土系 (軸圧一定、排水)、
- d) 生石灰・粘土系 (軸圧一定、非排水)

いま、間隙水圧が9.8kN/m²に達するのに要する時間を比較すると、粘土のみの場合a)の所要時間を1とした場合に、b)、c)、d)はそれぞれ0.32、0.43、0.53となって生石灰による圧密促進効果が著しいことが理解される。中でもb)のケースが最も効果的である。このb)に近い実際工法としては、Table 2のBの方法、すなわち、サンドイッチ層を帯状に配置していく方法であるといえる。

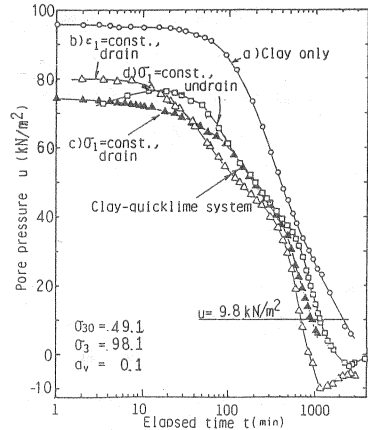


Fig.8 Change of pore pressure in clay with elapsed time.

4. 強風化粘性土による高盛土工事への適用⁷⁾

4.1 工事の概要

山口県西部の山間部において土地造成工事が1978年から実施された。施工は切盛土を基本とし、盛土の最大高は37 m、土工量は12万m³である。当地区では施工に入った段階において、地層の複雑な変化によって当初想定した粗粒材よりも凝灰岩強風化粘土が多く発生することが明らかとなり、この材料を有効利用するものとして、次項の対策工が比較検討された。

- 1) 盛土のり面の緩勾配化：地形条件から敷地面積が減少することとなり、効果的な対策とならない。
- 2) 抑止杭の施工：径32cmの鋼管杭を55cm間隔で打設する必要があり、工費的な問題がある。
- 3) 石灰の添加による盛土材の改良：石灰と粘性土の良好な混合に対する懸念および工費的な問題がある。
- 4) 良質材との置換：良質材の確保、不良材の捨土場所の確保が困難である。
- 5) 多段式サンドイッチ工法の適用：この方法によれば、現地発生材を用い、当初計画の土地造成が可能となり、工費も割安となる。このような利点に対して、実績のない工法といった問題があったが、施工管理を十分に行うこととし、同工法を採用することとした。

4.2 設計上の問題と施工仕様

(1) 粘性土盛土材の土性

発生土は強風化粘土であり、自然含水比は約30%である。物理的性質は液性限界40%、塑性限界28%、比重2.74であり、また10%粒径は2μm、60%粒径は9μmであり、統一土質分類ではMLに分類される。粘性土の圧密による粘着力増加係数 $\Delta c_u / \Delta p$ は、Fig. 9に示すように、三軸圧縮試験および直接せん断試験から0.5~0.7の範囲であり、設計検討では $\Delta c_u / \Delta p = 0.5$ を採用することとした。圧密係数 c_v および圧縮指数 C_c はそれぞれ520~2200cm²/d および0.19~0.28である。

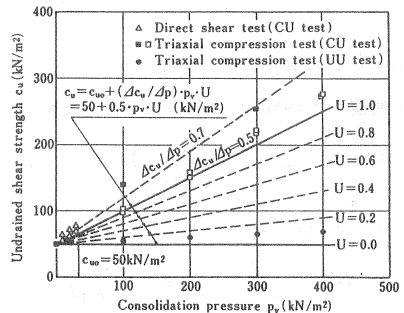


Fig.9 Rate of strength increase with consolidation for the cohesive soil.

(2) 盛土の改良仕様

多段式サンドイッチ工法による盛土の改良仕様はFig.10に示すとおりである。のり尻部には桁組擁壁が設けられ、その天端高までの裏込め土は対策は不要とされた。サンドイッチ層は5cm厚および30cm幅の粒状生石灰層とこれを上下2枚の不織布のフィルターファブリック(厚さ0.3cm、Fig.11)にて挟むように構成されている。この材料には、圧縮応力を受けた状態においても通水性を確保するために、ら線状のパイプが同図の様に設けられている。同材料は、盛土中において想定される最大の圧力1000 kN/m²が負荷されても、0.5 cm/sの透水係数が期待できることが実験的に確認されている。

サンドイッチ層の基本配置は、Fig.10に示すように盛土内に水平間隔 2.1 m、鉛直間隔 1.8 m の正三角形千鳥形式とし、のり面から 13 m の位置までの敷設としている。フィルターファブリックは、のり面まで延長して敷設している。また、盛土奥部 10 mは、生石灰層(5 cm×30 cm)のみの層をサンドイッチ層と同様な配置で敷設し、さらに、その間を盛土全体にわたってフィルターファブリック層を敷設している。

圧密速度の計算は、以下のとおりである。

まず、フィルターファブリックの砂杭等価径 d_w は次式によって示される。

$$d_w = \frac{2(a+b)}{\pi} \cdot \alpha \tag{10}$$

ここで、 a 、 b はフィルターファブリックの幅と厚さであり、 α は形状係数⁹である。式(10)に $a=30$ cm、 $b=0$ 、また $\alpha=0.75$ を代入すれば d_w は15cmとなる。

次に、フィルターファブリック層の排水分担面積 A と等価な円の直径 d_e は

$$d_e = \sqrt{\frac{4A}{\pi}} \tag{11}$$

と示すことができる。したがって、 $A=2.1$ m×0.9 mであるから、 $d_e=155$ cmとなる。

圧密度 U と時間 t の関係はBarronの解⁹に従うこととする。すなわち、

$$U = 1 - \exp \left\{ -\frac{8 T_h}{F(n)} \right\} \tag{12}$$

ここで、 $n=d_e/d_w$ (13)

$$F(n) = \frac{n^2}{n^2-1} \cdot \ln n - \frac{3n^2-1}{4n^2} \tag{14}$$

$$T_h = \frac{c_v t}{d_e^2} \tag{15}$$

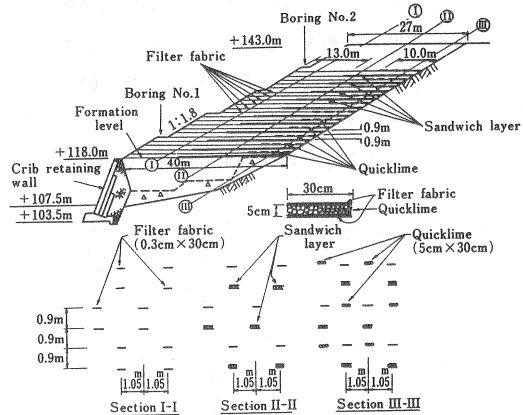


Fig.10 Specifications for embankment work by means of multiple strip-sandwich method.

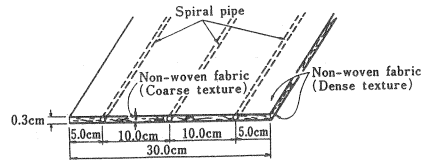


Fig.11 Filter made from nonwoven synthetic fiber.

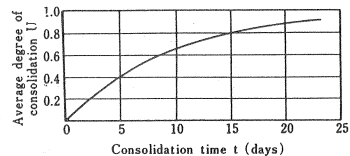


Fig.12 Change of average degree of consolidation with increase in time on embankment soil.

である。式(13)および(14)に $d_w=15$ cm、 $d_e=155$ cmを代入すれば、 $n=10.3$ また $F(n)=1.61$ が得られる。したがって、 $c_v=520$ cm²/dを式(15)に代入し、式(12)を時間 t と圧密度 U の関係で示すと式(16)が得られる。

$$t = -\frac{d_e^2}{c_v} \frac{F(n)}{8} \ln(1-U) = -9.3 \ln(1-U) \quad (16)$$

Fig.10に示す改良仕様に対する $U \sim t$ 関係は、Fig.12に示すとおりであり、約1カ月で圧密はほぼ終了する。

(3) 粘性土の改良効果の予測

粘性土の盛土材の改良後のせん断強度 c_u は、次式から求めた。

$$c_u = c_{u0} + \frac{\Delta c_u}{\Delta p} p_v U \quad (17)$$

$$= 50 + 0.5 p_v U \quad (18)$$

ここで、 c_{u0} は初期の非排水せん断強度である。Fig.9より $c_{u0}=50$ kN/m²および $\Delta c_u/\Delta p=0.5$ を用いた。

サンドイッチ層の吸水膨張作用は付加的な圧密圧力を生ぜしめ、より大きいせん断強度の発現を期待できると考えられるが、設計ではこの効果は無視した。

Fig.13は、式(16)および(18)に基づいて、盛土の完成時にすべり安全率 $F_s=1.2$ を満足する盛土の改良層厚 h を検討した結果である。同図より h は20 m以上の改良が必要なが分かった。

次に、Fig.14は盛土速度とすべり安全率の関係を示したものである。同図より h が約16 mの時に安全率が最小となるが、施工時の安全率を1.1とすれば、盛土施工速度 V は0.25 m/dとなる。

(4) 施工

施工は、Fig.10に示す改良仕様にて行われた。サンドイッチ層は、Fig.15に示すようにまず下層のフィルターファブリックを敷設し、厚さ5 cmの木枠によって生石灰をその上に積上げ、最後に上層のフィルターファブリックを敷設する方法によって形成した。盛土の締固めはJISA 1210-1970の第1.1法に従い、最大乾燥密度 $\rho_{dmax}=13.9$ kN/m³の90%を管理値とした。転圧層厚は0.3mである。

フィルターファブリックの総延長は77,000 mであり、生石灰の総量は450tであった。生石灰の盛土量に対する比率は0.8%と小さいものであった。

(5) 改良効果

サンドイッチ工法による改良効果を評価するために、鉛直土圧の計測および事後のボーリング調査を行った。また、盛土体の長期的な安定性を把握するために、ボーリング孔に地中傾斜計を設置し計測した。以下にそれらの結果を示す。

施工中の土中土圧を測定するために、Fig.16に示す位置($h=5$ m)に土圧計を2基設置した。同図は、盛土

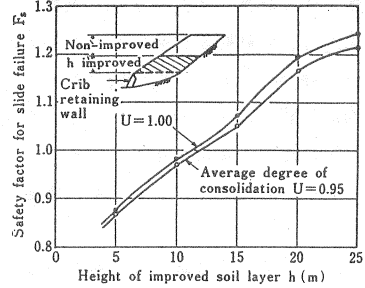


Fig.13 Relationship between height of improved soil layer and safety factor for slide failure.

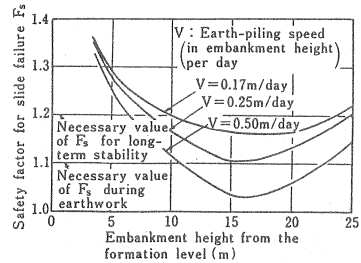


Fig.14 Relationship between earth-piling speed and safety factor for slide failure.

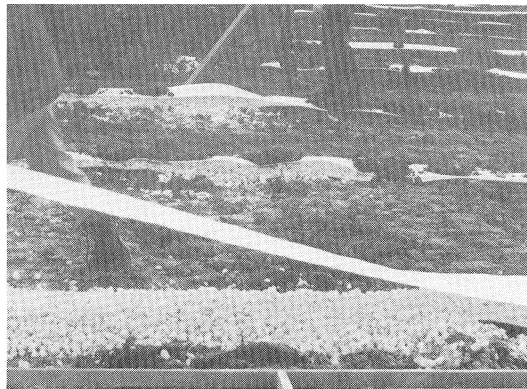


Fig.15 Composition of sandwich layer.

進捗に伴う計算土圧 $p_v = \gamma_t h$ と実測土圧 p_m および両者の比 p_m/p_v の経時変化を示したものである。ここで、 γ_t は 18.1 kN/m^3 である。 p_m は p_v より大きい値を示し、盛土後約20日間は p_m/p_v 値は1.6に達しているが、以後次第に1.0に近づく傾向を示している。この効果は、室内実験でも示されたサンドイッチ層の膨張圧によるものと考えられる。

Fig. 17は盛土完成後10カ月に実施されたボーリング調査結果である。同図に見られるように、標準貫入試験によるN値は9~18の範囲となっている。盛土の含水比は、初期値が30~33%であったものに対し、20~28%と平均約7%の減少傾向がみられる。盛土の単位体積重量は、 18.1 kN/m^3 から $18.6 \sim 19.6 \text{ kN/m}^3$ に増加している。これらの傾向は、明らかにサンドイッチ工法による改良効果を示すものである。

また、非圧密非排水条件の三軸圧縮試験から

$$c_u = 50 + 1.0 \gamma_t z \quad (19)$$

の関係が得られる。この関係は式(18)のものより大きいが、土圧計で計測された土被り圧の1.6倍の圧密圧力が負荷すると考えると、式(18)は

$$c_u = 50 + 0.8 \gamma_t z \quad (20)$$

と書き換えられ、式(19)に近づく。

c_u とN値の関係を整理するとFig. 18のように

$$c_u = 10 N \quad (21)$$

なる関係でほぼ示すことができる。この関係から、盛土全体の c_u 値は $90 \sim 180 \text{ kN/m}^2$ 程度に改良されていることが推定される。

このボーリング孔を利用して、径約5cmのアルミ製のケーシングパイプを挿入設置し、ローラ型挿入傾斜計にて長期的な盛土の動態を観測した。1979年の梅雨期には最大日雨量 17.4 cm の他、7度の集中豪雨に見舞れたが、盛土表層部で 0.5 cm の水平変位を生じたのみであり、盛土の十分な安定性が実証された。

Fig. 19は盛土の完成状況を示すものである。

以上に示すごとく、強風化粘性土の高盛土の施工において、多段式サンドイッチ工法を適用したところ、同工法が十分有効な工法であることが実証された。

5. 本工法による設計図表の例

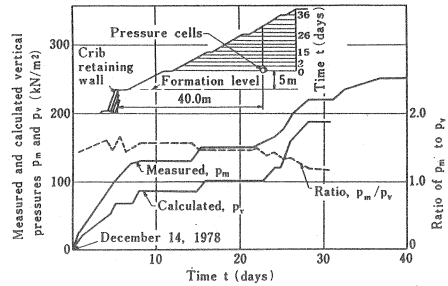


Fig. 16 Comparison of measured vertical pressure with calculated overburden pressure.

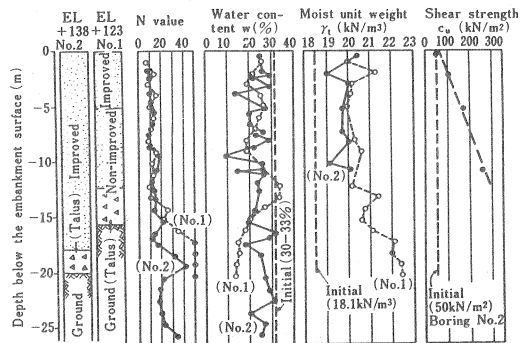


Fig. 17 Results of boring investigations.

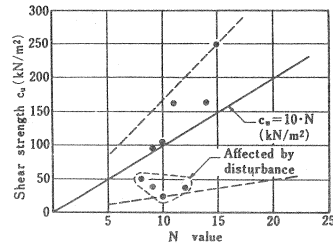


Fig. 18 Relationship between undrained shear strength and standard penetration resistance.



Fig. 19 View of completed embankment.

Table 3 Properties of filter fabric.

Material	Width (cm)	Thickness (cm)	Permeability (cm/s)	Tensile strength (kN/m)
O; Nonwoven synthetic fiber with spiral pipes	10-100	0.3	$1-10 \times 10^{-3}$	2.9-4.3
T; Nonwoven synthetic fiber with plastic grids	30-100	0.3-0.5	1-10	4.5-9.5

ここでは、単純な形状の均質な粘性土盛土を対象にして、多段式サンドイッチ工法を適用した場合の円弧すべりに対する安全率の変化を求める図を示すこととする。この計算にあたっては、 $\phi_u = 0$ 、 $c_u > 0$ および円弧すべり線は盛土の支持地盤を通らないという条件を課している。

Fig. 20は生石灰の膨張圧による改良効果をすべりに対する安全率の比 F_{S1}^*/F_S で示したものである。すなわち、改良による粘着力 c_u^* を次式によって求めたものである。

$$c_u^* = c_{u0} + \left(\frac{c_u}{p}\right) \frac{\sigma_v^*}{\sigma_v} (\rho_t g h) U \quad (22)$$

ここに、 σ_v^*/σ_v はフィルターファブリックのみによる場合の圧密圧力 σ_v (上載荷重)に対するサンドイッチ層敷設の場合の圧密圧力 σ_v^* の比である。ここでは、Fig. 16の実測値を考慮して $\sigma_v^*/\sigma_v = 1.2, 1.4$ および 1.6 の3通りについて計算した。同図より、 σ_v^*/σ_v のすべり安全率への寄与率は大きいことが分かるが、一方、のり勾配の違いは寄与率にほとんど影響を及ぼさない。

次にFig. 21引張強度Tの異なるフィルターファブリックを用いた場合の改良率 $b (= m/h)$ とすべりに対する安全率の比 F_{S2}^*/F_S の関係を示したものである。ここで、 F_{S2}^* は式(6)を用いて算定している。図中に示したフィルターファブリックの引張強度は、Table 3に示す特性を有するものである。なお、積極的に補強効果を期待する場合は、近年英国で開発されたポリマーグリッドの適用¹⁰等が考えられる。Fig. 21はフィルターファブリックの配置および盛土勾配が決まれば F_{S2}^*/F_S が求まるが、この場合は、Fig. 20と異なるとり勾配の影響が大である。

先に示したFig. 20の効果とFig. 21の効果が期待できる場合には、すべりに対する比は $(F_{S1}^*/F_S) \times (F_{S2}^*/F_S)$ で表わされる。

6. 結論および今後の問題

多段式サンドイッチ工法は、現地発生材である粘性土を捨土することなく盛土材として有効に利用するために提案した工法である。1966年以来、室内実験を重ねる一方で、2度にわたる沖積粘土による現場盛土実験を行った。これらの成果が注目されて、1978年から1979年にかけて本工法が強風化粘土による高盛土工事に適用され、成功を収めた。本報は、これらの一連の検討成果をとりまとめたものである。

これまでの成果をとりまとめると次のとおりである。

- (1) 室内実験によって、サンドイッチ層による粘性土の改良は次の諸現象が段階的あるいは並進的に生じることによってもたらされることが明らかとなった。a) 生石灰の水和反応および吸水作用による含水比の低下、b) 生石灰の吸水膨張圧と吸水負圧の相加作用による圧密促進、c) フィルターファブリックの挿

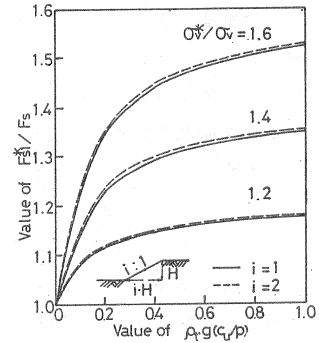


Fig. 20 Increase of safety factor against slide: effect of increase in consolidation pressure caused by quicklime action.

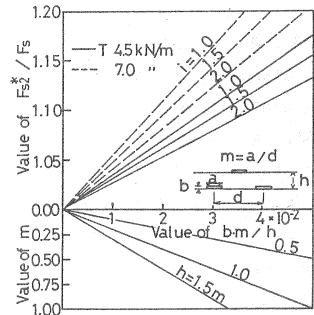


Fig. 21 Increase of safety factor against reinforcement effect of filter fabric.

入によって粘土層の排水距離が短縮されることによる圧密促進。その他、水和熱によって間隙水温度が上昇することによる透水性の向上効果は当然期待できるファクターである。

(2) 強風化粘性土を用いた高さ37 mの高盛土工事に対して本工法が採用された。この粘性土の圧密に伴う強度増加の特性を試験によって求め、これに基づいた改良仕様を決定した。また施工時にすべり安全率が1.10を上まわるとする施工速度を定めた。これらの事前検討を基に本施工に入り、成功裏に工事を終えた。盛土工事完了後10ヶ月を経過して後にボーリング調査を実施し、所期の改良効果を発揮したことを確認した。かくして、非改良のままではすべりを生じてしまう状況であった盛土が、本工法の適用によって築造できたこと、また更に、完成時の梅雨期に記録的な集中豪雨を受けたにもかかわらず安定を保ったことも合わせて、多段式サンドイッチ工法の実用性が実証された。

(3) 以上の諸検討結果に基づいて、サンドイッチ層の膨張圧による圧密効果およびフィルターファブリック層の引張強度を考慮したすべり安全率への寄与についてそれぞれ設計図表を提示した。

以上、多段式サンドイッチ工法の効果を検証するための広範な実験を積み重ねてきたが、実際の工事に適用した例が少ないので未だ解決しなければならない問題点も残されている。それらを列記すると、

- (1) 生石灰の水和・吸水により改良されている粘性土の範囲を定めること、
- (2) 生石灰の膨張圧の及ぶ範囲およびその平均的な圧力を定めること、
- (3) 種々の粘性土に対して適用できる設計図表を用意すること、
- (4) 迅速な施工を可能ならしめる工夫、特にサンドイッチ層の迅速施工法を工夫すること、などである。

今後、実際工事が積み重ねられるのに伴って以上の諸問題が解決され本工法がより適用しやすいものになることが望まれる。

参考文献

- 1 Yamanouchi, T., and Miura, N., "Multiple-Sandwich Method of Soft Clay Banking using Cardboard Wicks and Quicklime," Proceedings, Third Asian Regional Conference, Soil Mechanics and Foundation Engineering, Haifa, Israel, Vol. 1, Sept. 1967, pp. 256 - 260.
- 2 Yamanouchi, T., Horikawa, M. and Miura, N., "In-Situ Experiments on Soft Clay Banking by Means of Multiple-Sandwich Method using Cardboard Wicks and Quicklime," Proceedings, Fourth Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Bangkok, Thailand, Vol. 1, July, 1971, pp. 342 - 345.
- 3 Yamanouchi, T., and Miura, N., "Soft Clay Banking using Sandwich Layers In-Situ Made of Wicked Cardboard and Quicklime," New Horizons in Construction Materials, Edited by Fang, H. Y., Envoy Publishing Company, Inc., Vol. 1, Oct., 1976, pp. 211 - 223.
- 4 山内豊聡, 三浦哲彦, 福田直三, 林重徳 : 多段式サンドイッチ工法による粘性土盛土工の設計へのアプローチ, 材料, Vol. 33, No. 370, pp. 835 ~ 840, 1984.
- 5 松浦章, 福田直三, 見上隆志 : ポリプロピレン系ドレーンボードに関する実験的考察, 土と基礎, Vol. 25, No. 9, pp. 31 ~ 38, 1977.
- 6 福田直三, 三浦哲彦, 周藤宜二, 古賀正宏 : 粘土・生石灰系の圧密特性に関する基礎実験, 山口大学工学部研究報告, Vol. 34, No. 2, pp. 61 ~ 67, 1984.
- 7 Yamanouchi, T., Miura, N., Matsubayashi, N. and Fukuda, N.: Soil Improvement with Quicklime and Filter Fabric, Jour. Geotechnical Engineering Division, Proc. ASCE, Vol. 108, No. GT7, 1982.
- 8 網千寿夫, 河本勇, 稲葉晃己 : ペーパードレーン工法について, 土と基礎, Vol. 13, No. 6, pp. 3 ~ 10, 1965.
- 9 Barron, R. A.: Consolidation of Fine-Grained Soils by Drain Wells, Trans. ASCE, Vol. 113, pp. 718 - 754, 1948.
- 10 福田直三 : ポリマーグリッド工法, 土木技術, Vol. 41, No. 10, pp. 83 ~ 90, 1986.