GHD 材補強粘性土急勾配高盛土の水分特性

大阪府立産業技術総合研究所 赤井智幸・松本哲

京都大学 嘉門雅史

大阪土質試験所 諏訪靖二・福田光治・加藤豊 大林組 楠部義夫 奥村組 柳原純夫

GHD 材で補強した粘性土急勾配高盛土の実大規模実験は 1996 年に完成し、その後長期的な安定性を調べるため計測を行ってきた。調査結果ではこの期間の盛土の変形は少なく、降雨に対して安定した状態が続いていることを確認している。しかし、盛土内部に水平敷設された GHD 材に沿って斜面から水が浸透すると、盛土内部の水分特性が変化し、粘土の膨潤・軟弱化等につながる懸念もある。そこで、本研究では、盛土内の水分変化を確認し、安定性を評価するため盛土内に積極的に注水することによって GHD 材の排水特性を調べ、定量的評価を行う基礎データの収集を行った。本論文は、注水後の水位低下曲線から GHD 材の透水性及び排水能を調査した結果を示す。

キーワード：補強盛土，水平排水材，土中水，排水能，目詰まり

Infiltration Characteristics of Water into the Embankment with Steep Slope Reinforced by Geosynthetic Horizontal Drain(GHD)

T.Akai and M.Matsumoto: Technology Research Institute of Osaka Prefecture

M.Kamon: Kyoto University S.Suwa,M.Fukuda and Y.Kato: Geo-Research Institute

Y.Nanbu:Obayashi Co. S.Yanagihara: Okumura Co.

The reinforced embankment by GHD materials with steep slope was completed in 1996. After then, monitoring system has been applied to analyze the stability of this mound for about three years. Measured data show that it keeps so stable to encounter little deformation and no sign damaged by rainfall. However, it is suspicious that rain may infiltrate from the surface of embankment into the inner through the group of GHD installed horizontally. Since this causes the strength of soil to change weak and its volume to swell, long term measurement was performed. In addition , enforced infiltration test was carried out. This paper shows stability condition of the slope using the measured data.

Keywords: Reinforced soil embankment, Horizontal drain, Ground water, Drainage capacity, clogging

GHD 材補強粘性土急勾配高盛土の水分特性

大阪府立産業技術総合研究所 赤井智幸・松本哲
京都大学 嘉門雅史
大阪土質試験所 諏訪靖二・福田光治・加藤豊 大林組 楠部義夫 奥村組 柳原純夫

1.はじめに

排水と補強を兼ね備えた GHD 材 (Geosynthetic Horizontal Drain) で補強した粘性土急勾配高盛土の実大規模実験は 1996 年に完成し、その後安定性を調べるため長期的な計測を行ってきた^{1), 2)}。調査結果ではこの期間の盛土の変形は少なく、安定した状態が続いていることが確認されている。しかし、盛土内部に水平敷設された GHD 材に沿って斜面から水が浸透すると、盛土内部の水分特性が変化し、粘土の膨潤・軟弱化等につながる懸念もある。このため水分特性の計測も長期安定性の評価の上で重要な役割を果たしている。これまでの計測結果では降雨時にサクシオン

が急激に減少するが、降雨が止むとすぐに回復し、水分特性は安定した状態にあると考えられている³⁾。

しかし、これはあくまで推定の域を出ていないため、盛土内の水分変化を確認し、安定性を評価するため盛土内に積極的に注水することによって GHD 材の排水特性を調べ、定量的評価を行う基礎データの収集を行った。本論文は、注水後の水位低下曲線から GHD 材の透水性及び排水能を調査した結果を示す。

図-1 盛土の形状と計器の配置

2.盛土条件

GHD 材補強粘性土急勾配高盛土実験の形状は図-1 に示すように、斜面勾配 1 : 0.6、盛土高さ約 10m である。使用盛土材料は大阪南部丘陵地帯に分布する大阪層群の洪積粘土で、表-1 に示す土質特性を

表-1 盛土材料の土質特性

項目	土粒子の密度 ρ_s (g/cm^3)	含水比 w (%)	間隙比 e	粒度				液性 限界 (%)	塑性 限界 (%)	塑性 指数
				礫 (%)	砂 (%)	シルト (%)	粘土 (%)			
平均値	2.686	44.2	1.19	0	1.6	35.1	63.3	57.3	22.0	35.3
項目	分類	一軸圧縮 強さ (kPa)	三軸圧縮試験				圧密			
			全応力		有効応力		圧密		圧密	
			試験 条件	c (kPa)	ϕ (度)	c (kPa)	ϕ (度)	圧縮 指数 C_c	降伏応力 p_c (kPa)	
平均値	粘土 (CH)	不攪乱 88.2	CU	52.9	3.2	17.6	23.7	0.589	426.3	

有している。表-2 は GHD 材と盛土の設計条件で、無補強の時の斜面安定解析結果は 0.976、補強によって常時安全率は 1.405 になる。なお、本盛土は長期的な安定性を確保するため、地震時安全率で敷設条件が決まった。使用した補強材はプラスチックコアタイプと補強不織布であり、これらの材料特性を表-3、図-2 に示した。なお、実験工区は 2 つの材料に対して 2 工区 A, B が接して設けられている。図-3、図-4 は盛土中に測定した含水比と強度関係を示しており、管理値は $c_u=30\text{kPa}$ とした。盛土高さ 210~310cm の間に低塑性性の土が含有されているが、この部分の含水比は約 30%，それ以外は 40~50%である。

表-2 設計の基本項目と安定計算結果

項目	内容
安定計算の手法	円弧すべり面法
耐震設計	水平震度 $k_h=0.2$ として行う
GHD の基本的配置	敷設率 50%，带状千鳥配置
GHD 敷設置間隔の決定法	常時：増加係数 K_c を考慮した検討法 と全体安定検討法の 2 種類 地震時：全体安定検討法
土のせん断強度	三軸および一軸圧縮試験結果より設定 $\phi=0^\circ$ ， $c=29.4\text{ (kPa)}$
圧密による強度増加	圧密試験結果をふまえて考慮しない
各種安全率	円弧すべり（常時）：1.3 円弧すべり（地震時）：1.0 引抜き（常時）：2.0 引抜き（地震時）：1.2
GHD の設計強度	常時：クリープ試験結果をふまえて設定 地震時：引張り試験における 5%ひずみ時の強度
安定計算結果	（常時） 無補強時：0.976 補強時：1.405 （地震時） 無補強時：0.730 補強時：1.015

表-3 GHD 材の特性

工区	材料名	厚さ (mm)	幅 (cm)	面内透水係数 (cm/s)		圧密時 粘性土の 透水係数 (cm/s)
				拘束 圧 98 kPa	拘束 圧 294 kPa	
A	プラスチック コア	3.6	30	1.6×10^{-1}	1.6×10^{-1}	1.56×10^{-8}
B	補強不 織布	8.7	30	3.2×10^{-1}	1.0×10^{-1}	

図-2 GHD 材の断面模式図

図-3 粘着力の盛土高さ方向の分布(A 工区)

図-4 粘着力 C_u と含水比 w の関係

3.盛土過程及び完了後の水分特性

(1)盛土過程

図-5 の第一象限には使用粘性土の含水比～サクシヨン関係を示している。ただしこの曲線は排水過程の関係である。盛立中の粘性土の含水比は約 45%であるから図では 30kPa 程度のサクシヨンに対応している。図-5 の第 2, 3 象限には盛立中のサクシヨンの計測結果を示している。計器は深さごとに埋設してあるので、計器設置後の土被り圧は異なる。計器設置直後はサクシヨンが増大する傾向を示すが、盛土荷重が増大するとともにサクシヨンが低下し正圧側に

向かう傾向を示す。しかし、盛土が完了するとサクシヨンは増加する方向に転じる。盛土荷重によって発生する間隙水圧を Hilf の式によって推定すると式(1)が予想される。

$$\Delta u = \alpha \Delta \sigma_v, \alpha = 0.1 \sim 0.6 \quad (1)$$

図には $\alpha=0.6$ の直線が付記してあるが、正圧側に転じる時の間隙水圧の傾きはこの直線と類似した増分傾向を示し、計器は良好に作動していることを示している。従ってサクシヨンの低下傾向から考えると粘性土の斜面の安定性では盛土直後が最も不安定であることを示している。

図-5 含水比とサクシヨンの関係

図-6 地下水位とサクシヨンの経時変化

(2)盛土後

図-6 は地下水位とサクシヨンの経時変化である。降雨になると急激にサクシヨンは低下し、降雨が止むと逆にサクシヨンは増加し、降雨に敏感である。しかし、降雨に対する反応は計器によってかなり異なっている。

図-7(a)は降雨時のサクシヨンの変化を深度ごとに整理したものである。ここに深度とは計器の設置断面における地表面からの鉛直深度である。深度 GL-1m 付近でやや大きな変化を示しているが、それ以深では 10～20cm のサクシヨンの変化があり顕著な差異はみられない。図-7(b)には文献から集めたデータ^{4), 5)}も付記してある。表層 1m の間では大きな変化が記録されているが GL-1m 以深では一定に近くなる傾向を示している。従って図-7(a)の変化は地表面からの降雨浸透による傾向と同じと考えられる。

図-8 は A, B 工区の安定時のサクシヨンの深度方向分布を示したものである。この図では地下水面を基準に計器との鉛直高さで示してある。従って例えば図-1 の斜面直下にある No.5 の計器の位置は図-7 と図-8 に示す降雨浸透条件と地下水に対する安定時の条件では異なった高さになっている。

図-8 で地下水面からの高さが高くなればサクシヨンは増加することを示している。従って 2 つの計測結果ではサクシヨンの分布特性を支配している因子は、地表面からの鉛直浸透であり、また地下水面からの高さである。つまり GHID 材を介して斜面からの水が浸透するパターンはみられず、GHID 材は盛土への水の補給路となっていないことを示している。

4.原位置注水実験方法

図-7 降雨によるサクシヨンの変化量の深度方向分布

図-8 安定時期のサクシヨンの深度方向分布

GHD 材補強粘性土急勾配高盛土実験では盛土内及び基礎地盤のサクシオンと地下水位を測定するために図-1 のように、テンシオメーターと間隙水圧計を設置している。サクシオン計は敷設された GHD 材に直接接触させた計器と、2 枚の GHD 材に挟まれた粘性土の中央付近のサクシオンを測定するために設置した 2 種類のタイプがある。また、地下水位計は盛土とともに立ち上げた先端をストレーナー加工した塩ビ管の中に設置してある。注水実験は図-9 に示すように最上段の GHD 材敷設深度まで $\phi 100\text{mm}$ のハンドオーガーで穴を掘り、内径 $\phi 75\text{mm}$ の塩ビ管を挿入して注水したケース 1 と、地下水観測孔の塩ビ管に直接注水したケース 2 の 2 つの方法で行った。また注水に伴うサクシオン、地下水位計の反応を自動計測した。

図-9 注水方法

5.注水実験結果

(1)ケース 1 による注水試験結果

図-10 はボーリング孔内注水試験における孔内水位低下を示している。ハンドオーガーによるボーリング孔を利用した場合で、孔底よりかなり下に地下水位面が存在する場合の透水係数は式(2)で示される。図-11 は試験条件を示している。

ただし式(2)は $T_u > 3h$ がかつ、注水量 Q が一定量の条件を前提にしている。今回の実験は変水位条件で実施しているので、式(3)を用いて Q を仮定した。ボーリングの孔径は 10cm である。ボーリング孔には塩ビ管が挿入してあるが、塩ビ管の直径はボーリング径に比べて小さく、このため注水した水は塩ビ管下端

$$k = \frac{Q}{2\pi h^2} \left[\ln \left\{ \frac{h}{r} + \sqrt{1 + \left(\frac{h}{r} \right)^2} \right\} - 1 \right] \quad (2)$$

$$Q = \frac{\Delta h}{\Delta t} \pi r^2 \quad (3)$$

図-10 ボーリング孔内の水位低下曲線

図-11 ボーリング孔を利用した透水試験

からではなく、ボーリング孔壁から盛土中に浸透するものと仮定する。この結果を図-12に示す。変水位試験を概略的に定水位試験と仮定して求めた結果であるので信頼性は劣るが、透水係数は A 工区、B 工区とも類似した値になり、 $k=(1\sim5)\times10^{-3}\text{cm/s}$ が求められる。ところが、盛土材は粘性土が使用されており、圧密試験結果による透水試験は図-13 に示すように $k=(1\sim10)\times10^{-8}\text{cm/s}$ である。従って、塩ビ管で注水した水は粘性土に浸透する量に比べて、GHD 材を介して消散した割合が多く、透水係数を約 5 オーダー大きくしたことが推定できる。ボーリング孔内から注水された水は壁面から粘性土に浸透していく経路と、GHD 材を介して水平方向に広がっていく経路の 2 つの排水経路が考えられる。このうち粘性土の透水係数は $1\times10^{-8}\text{cm/s}$ オーダーであり、粘性土を介した浸透は考えられない。このため図-14 に示す条件下で注水されたボーリング孔内水は GHD 材を介して両方向に流れると仮定し、浸潤面におけるサクションを無視すると式(4)が求められる。ここに A は注水孔の断面積、a は GHD 材の断面積である。この関係を適用したのが図-15 である。図による

図-12 水面高さと透水係数

図-13 圧密圧力と透水係数

$$h/h_0 - \ln(h/h_0) = 1 + 4ka^2t/(h_0A^2) \quad (4)$$

図-14 水位変化モデル

図-15 理論曲線による水位低下曲線と実験結果

とボーリング孔内水位低下曲線は A 工区で約 1.0cm/s, B 工区で約 0.5cm/s とした透水係数の曲線に類似している。この透水係数は室内で求めたプラスチックコア材の面内透水係数の約 10 分 1, 補強不織布は室内試験と類似した値を示している。従って, 実験結果からボーリング孔内に注水された水は GHD 材の中を広がっていることが予想される。

(2) ケース 2 による水位観測孔内への注水試験結果

この試験による孔内水位とサクション計測結果を示したのが図-16, 17 である。A 工区では 1 回目の注

図-16 注水時のサクション

水によってこの水位観測孔から約 5.5m 離れた観測孔の水位は約 20 分遅れて反応している。

図-17 は注水開始時を基準にした水位高さの経時変化を整理したものである。A 工区, B 工区とも水位低下～時間関係には大きな違いがみられるが, 計測結果は式(4)によって統一的に整理することができる。なお, 式の適用にあたっては, 注水管の直径 7.5cm, GHD 材

図-17 注水孔内水位低下と経過時間

の面内透水係数は A 工区 $k=1\text{cm/s}$, B 工区 $k=1.5\text{cm/s}$ を用いた。この面内透水係数には天端透水試験結果で得られた値を用いて整合性を図った。また, 本実験ではボーリング孔に塩ビ管を挿入した場合と異って, 盛土しながら塩ビ管を立ち上げて設置した。このため注水管と粘土は完全に密着し隙間がないと考えられるので, 注水孔の直径は塩ビ管の内径とした。その他の GHD 材の厚さ, 幅は天端透水試験の検討で用いた値と同じである。図から, 注水管内の水位低下～時間曲線は各々異っているが, 透水試験の整理結果と

整合したパラメータを使用した理論曲線と類似しており、従って両曲線の相違の基本的な原因のひとつとして GHD 材の面内透水性があることを示している。また天端透水試験と観測孔を用いた結果は整合しており、いずれのケースも注水された水は GHD 材を介して盛土内に広がっていくことを予想させる結果である。式(4)を用いて到達距離～時間関係を示したのが式(5)と図-18 である。

図は A 工区为例で注水管の直径 7.5cm，GHD 材の面内透水係数 $k=1.0\text{cm/s}$ として計算した。初期水位が 3m 程度であれば約 20 分程度で、浸潤面は約 5m 移動することを示しており、試験結果に対応している。

図-18 湿潤距離の拡大

6.農業盛土実験における注水実験

1992 年には高さ約 3m の農業盛土において、補強盛土試験を行い、その長期安定性を調べるために同様の注水試験を行っている⁶⁾。この実験の実験条件を図-19 に、用いた GHD 材の断面と材料性状を図-20、表-4 に示す。

$$\frac{2a}{h_0A} x_f - \ln \left(1 - \frac{2a}{h_0A} x_f \right) = \frac{4a^2}{h_0A^2} kt \tag{5}$$

図-19 敷設位置とサクシオン

図-20 GHD 材の断面模式図

表-4 GHD 材の物性値

材料	厚さ (mm)	単位 面積質量 (g/m ²)	面内透水係数(cm/s)		引張強度 (kN/m)	調査 工区
			上載圧 98.0kPa	上載圧 294.0kPa		
ドレーン材 A	10	1981	2.3×10^1	2.2×10^1	49.6	99-A
ドレーン材 B	12	1763	1.1×10^1	4.8×10^0	74.5	99-B

この実験結果のうち、初期の水位低下を中心に示したのが図-21 で、図より約 0.5cm/s の透水係数が得られる。この値は粘性土高盛土の実験結果に類似しており、式(4)は異なった条件でも成立することを示している。

7.あとなぎ

注水実験結果から粘性土高盛土内の GHD 材の排水性は、敷設後 3 年経過しても良好に作用していることが明らかになった。また GHD 材に局部的に約 100mm 程度の水が瞬時に供給されたとしても浸潤面の広がりが高々 1m 以下であり、その後は表面張力で広がっていくことが予想される。この現象は農業盛土実験でも

確認された。従って、降雨程度では斜面から GHD 材を介して盛土内部に浸透していく量は少ないと考えられる。なお、本研究はジオテキスタイル技術研究会と共同して実施したものであり、研究会の皆様には感謝致します。

参考文献)

1) 嘉門雅史他：GHD 補強粘性土急勾配盛土実験(その 1)～(その 4)，第 51 回土木学会年次学術講演会概要集，pp.652-659，1996.

2) 嘉門雅史，赤井智幸，楠部義夫，福田光治：ジオシンセティックス水平排水材を用いた粘性土補強盛土，月刊「基礎工」12 月号，pp.74-77，1996.

3) 嘉門雅史他：GHD 補強粘性土急勾配盛土実験(その 8)，第 33 回地盤工学研究発表会講演概要集，pp.2359-2360，1998

4) 阿部廣史：不飽和斜面の間隙水圧の計測と安定解析，土質工学会関西支部「不飽和土地盤の工学的性質」発表論文集，pp.81-100.

5) 北村良介，井料達生，城本一義：火山灰質地盤における雨水の浸透挙動，第 32 回地盤工学研究発表会，講演概要集，pp.1933-1934，1997.

6) 嘉門雅史他：GHD 材の長期補強効果，第 31 回地盤工学研究発表会講演概要集，pp.2415-2416，1996.

図-21 農業盛土実験における注水実験結果