

安全裕度を考慮した軟弱地盤上の盛土施工

Embankment Construction on Soft Ground in Consideration of Safety Margin

角田晋相*1

概 要

軟弱地盤上に盛土を構築する場合、補強材の採用や圧密による原地盤の強度増加を見込むことで盛土の安定性が確保できるように設計される。一方、施工においては、設計強度を満足する材料を選定するため、実際の安全率には幾らかの余裕が存在する。また、地盤内の土質にはばらつきがあるため、設計時には安全側の土質定数を用いることが多い。そこで、設計時の安全率に対する施工時の安全率の差分を安全裕度と捉え、安全裕度の程度とその効果について検討した。本論文では、軟弱地盤対策として採用された敷網工の材料強度と原地盤の圧密による地盤特性に含まれる安全裕度を考慮して施工時における盛土の安定性を評価した事例について報告する。

key words : 盛土、安定性、緩速載荷工法、安全率、安全裕度

1. はじめに

軟弱地盤上の盛土施工では、圧密による原地盤の強度増加を期待する緩速載荷工法が採用される例が多い。しかし、この工法は日当たりの盛土高さ（盛土量）が制限されるため、現場では盛土の進捗にともなう施工面積の減少により土量配分の調整が課題となる。

一般的に緩速載荷工法では、日々の動態観測により盛土の安定管理を行いながら立上げ速度を調整する。しかし、動態観測からの評価では、その時点における安定性と傾向は把握できるが、盛土完成までの安定性は判断できない。

そこで、盛土施工の途中段階で調査ボーリングを実施し、原地盤の強度増加の確認と、その結果を安定計算に反映させることで盛土工程全体を通じた安定性を評価し、盛土速度の設定と土量配分を計画した^{1) 2)}。

ここでは、軟弱地盤対策として採用された敷網工の材料強度と原地盤の圧密による実際の地盤特性（強度増加率）を考慮して、盛土速度の調整を行った事例について報告する。

2. 工事の概要と課題

2.1 盛土概要

盛土の概要および基礎地盤の土質柱状図を図-1、図-2に示す。本事例は、N値7以下の層が約20m分布する軟弱地盤上に高さ20.8mの盛土を構築する工事である。

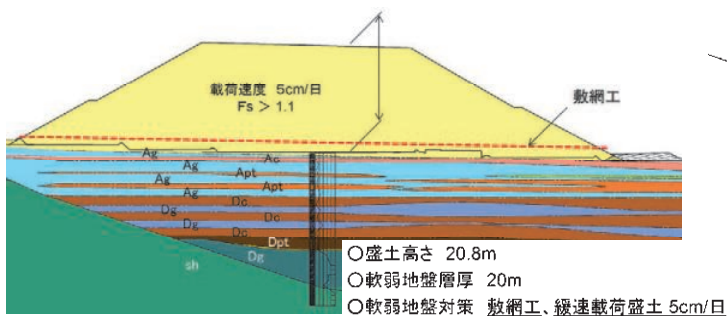


図-1 盛土の概要

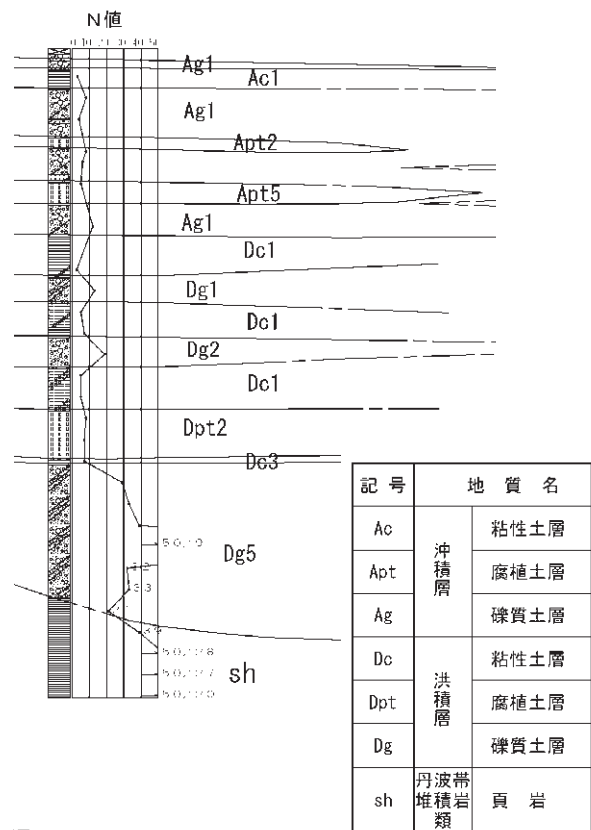


図-2 基礎地盤の土質柱状図

*1 Shinsuke TSUNODA

技術本部技術研究所 主席研究員

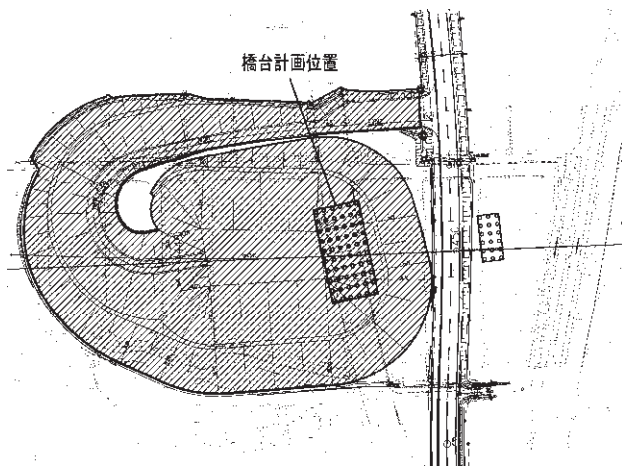


図-3 盛土の平面図

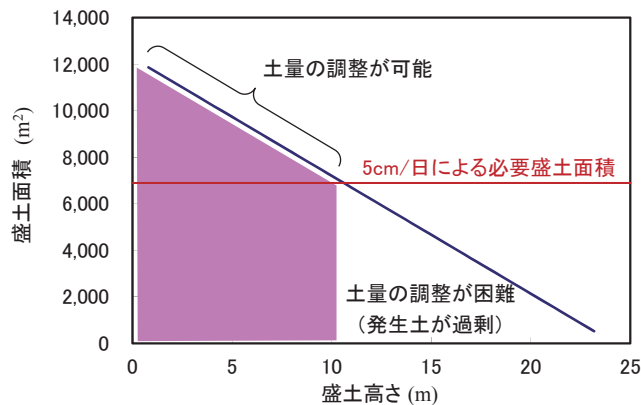


図-4 盛土高さと盛土面積の関係

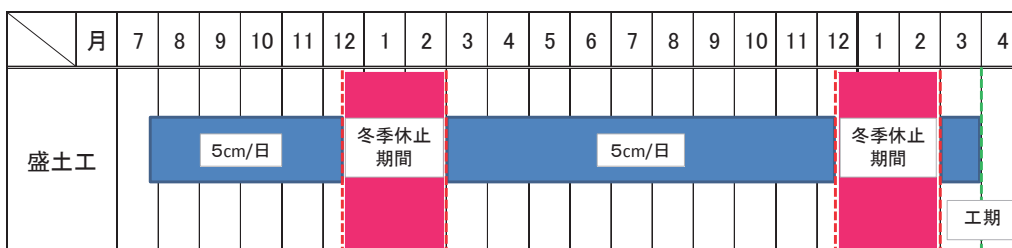


図-5 盛土の計画工程

盛土の安定性を確保するため、対策工として敷網工による盛土補強と圧密による地盤の強度増加を考慮する緩速載荷工法（載荷速度 5cm/日）が採用された。

盛土の施工は、1層の仕上がり厚さを 30cm とし、施工範囲を分割することで、1層毎に 6 日以上 of 放置期間を設けて平均盛土速度が 5cm/日以下になるように計画した。

盛土の安定性は、盛土面内の地表面沈下板と法尻部の地表面変位杭および地中変位計の動態観測から $S \sim \delta / S$ 法を用い、管理基準値は破壊時の盛土荷重 P_f に対する施工時の盛土荷重 P_j の比を $P_j / P_f < 0.9$ として安定管理を行った。

2.2 施工上の課題

盛土材は、トンネル掘削土を流用する計画であり、日々トンネル掘削からの発生土を盛土として恒常的に処理していく必要があった。トンネルからは日々 300~400m³ の土量が搬出されるため、設定された載荷速度で処理するには、7,000m² 程度の施工面積が必要となる。

盛土の平面図を図-3 に示す。本盛土は、橋台の構築部に対する載荷盛土であり、施工面積が小さい。盛土高さと施工面積の関係を図-4 に示す。図に示すように、盛土高 10m 以降は発生土の処理に必要な施工面積が不足する。

また、トンネル掘削土の保管場所も容量が限られているため、ある程度盛土が進捗すると盛土量に対して発生土が過剰となり土量調整が困難となる。

そのため、工程全体を通した盛土速度の調整が必要となった。

盛土の計画工程を図-5 に示す。現地は冬季において土工事休止期間が設定されており、工期も厳しいため工程短縮が求められた。

3. 安全裕度

3.1 施工における安全率の裕度

構造物の施工では、設計において必要とされる強度を満足する材料を選定するため、実際の安全率には幾らかの余裕が存在する。

また、地盤内の土質にはばらつきがあり、設計では安全側の土質定数を用いることが多い。

ここでは、設計時の安全率に対する施工時の安全率の差を安全裕度と定義し、施工において含まれる裕度の程度について検討した。

3.2 材料強度に含まれる裕度

(1) 使用材料

設計では、事前の土質調査結果から載荷速度 5cm/日による地盤の強度増加と敷網工による盛土補強工で、盛土立ち上がり時のすべりに対する安定性（安全率 $F_s=1.10$ ）を確保していた。

敷網工に使用するジオテキスタイルの材料諸元を表-1 に、現場での敷設状況を写真-1 に示す。施工では、敷網材として必要な強度を発揮できるジオグリッド-Bを採用した。

表-1 ジオテキスタイルの材料諸元

品番	製品強度 (kN/m)	設計における必要な強度 (kN/m)	採用
ジオグリッド-A	403	430	—
ジオグリッド-B	470		○

(2) 材料強度の裕度

安全率と敷網強度の関係を図-6 に示す。安全率は、原地盤の地盤特性を同一とし、敷網強度をパラメータにした安定計算により算出した。

設計において必要とされる敷網工の引張強度は 430kN/m であるが、施工においてはその強度を満足する材料として製品強度 470kN/m の部材を採用するため、実際の盛土の安全率には裕度が生じる。

安定計算の結果、材料がもつ裕度により安全率は $F_s=1.100$ から $F_s=1.108$ に向上する。

3.3 地盤強度に含まれる裕度

(1) 対象土層

盛土の安定性については、粘性土層の圧密にともなう強度増加を考慮した土のせん断強さを用いた安定計算により、盛土のすべり破壊に対する安全率を算出する。

そこで、原地盤の実際の圧密状態を把握するため、盛土施工の途中段階で調査ボーリングおよび土質試験を実施した。

盛土立ち上げ中の地盤の層別沈下量を図-7 に示す。層別では、沖積粘性土層 (Ac1, Apt2, Apt5 層) に比べ洪積粘性土層 (Dc1) 以深の沈下量は小さいため、調査対象層は圧密による強度増加を期待できる沖積粘性土層とした。

(2) 地盤の調査時期

現場では、実際の盛土荷重による地盤挙動の傾向を把握するため、盛土高が 6m までは 5cm/日以下の载荷速度で盛土の立ち上げを実施した。

盛土高 6m における盛土の安定管理図 ($S \sim \delta/S$ 法) を図-8 に示す。この時点の盛土による地盤挙動は、管理基準値から離れた位置で推移しており、変位杭の変位速度も微小であることから、盛土は十分安定していると判断でき、载荷速度を速めることができると考えられた。

対象層の圧密特性および盛土高 6m における各土層の鉛直応力 P_t (有効土被り圧 P_0 +増加応力 ΔP) を図-9 に示す。この時点で対象層は正規圧密領域にあると考えられたため、調査ボーリングによる土質試験を行うこととした。

(3) 土質試験

調査ボーリングでは、対象層の不攪乱試料を採取し、一軸圧縮試験を実施することで、各層のせん断強さを求めた。



写真-1 ジオテキスタイルの敷設状況

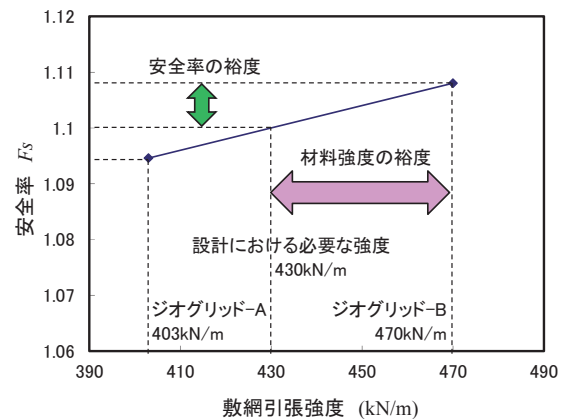


図-6 安全率と敷網強度の関係

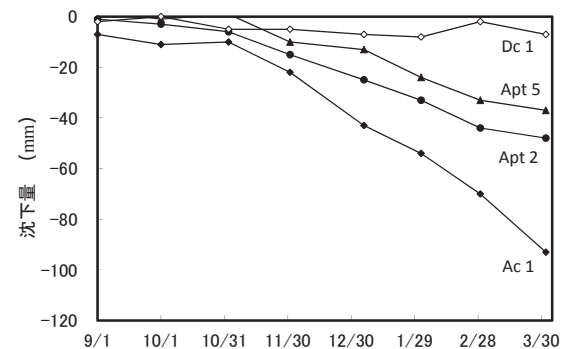


図-7 原地盤の層別沈下量

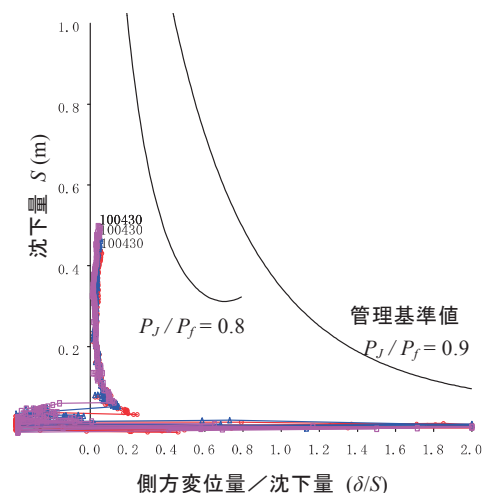


図-8 盛土高 6m 時の安定管理図

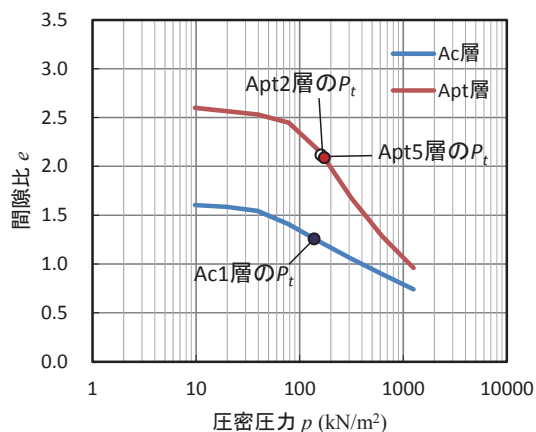
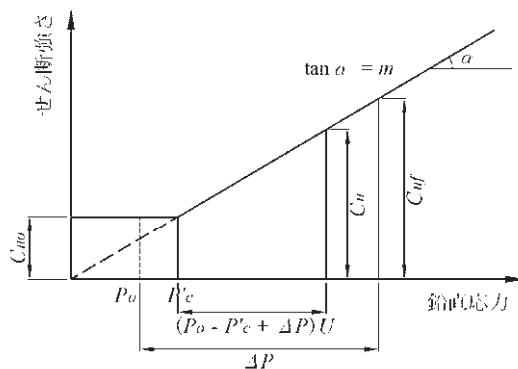


図-9 対象層の圧密特性

表-2 一軸圧縮試験の結果

土質	一軸圧縮強度 q_u (kN/m ²)				せん断強さ $C_u (=q_u/2)$
	供試体1	供試体2	供試体3	平均	
Ac1	90.7	82.5	89.1	87.4	43.7
Apt2	144	137	-	141	70.5
Apt5	151	118	-	135	67.5



C_{u0} : 盛土前のせん断強さ
 C_u : 強度増加後のせん断強さ
 m : 強度増加率
 P_0 : 盛土前の鉛直応力
 P'_c : 先行圧密応力
 ΔP : 盛土荷重による増加応力
 U : 圧密度
 $C_u : C_u = q_u / 2$
 (q_u : 一軸圧縮強度)

図-10 圧密による強度増加を考慮したせん断強さ

表-3 強度増加率の推定値

土質	有効土被り圧 P_0 (kN/m ²)	増加応力 ΔP (kN/m ²)	圧密度 U (%)	鉛直応力 $P_t (=P_0 + \Delta P \cdot U)$ (kN/m ²)	せん断強さ $C_u (=q_u/2)$ (kN/m ²)	強度増加率 m		
						調査結果からの推定値	当初計画の設計値	裕度
Ac1	12.4	129.6	100	142.0	43.7	0.31	0.25	0.06
Apt2	33.6	129.5	100	163.1	70.5	0.43	0.30	0.13
Apt5	49.8	129.4	98	176.6	67.5	0.38	0.30	0.08

一軸圧縮試験の結果を表-2に示す。試験は、各層2～3体の供試体に対して行い、現時点でのせん断強さはそれぞれの平均値で評価した。

(4) 土質定数の余裕

一軸圧縮試験で得られた結果から、図-10に示す圧密による強度増加を考慮したせん断強さの考え方により実際の強度増加率 m を推定した。

試験結果から推定した強度増加率を表-3に示す。また、経験的な値を用いる方法としてよく設計に用いられる強度増加率の目安³⁾を表-4に示す。

一般的に用いられる強度増加率の値には幅があり、本事例の設計では下限値が用いられていたため、試験より得られた実際の強度増加率には幾らかの余裕がある。

表-4 強度増加率の目安³⁾

土質	強度増加率 m
粘性土	0.30～0.45
シルト	0.25～0.40
有機質土及び黒泥	0.20～0.35
PEAT	0.35～0.50

4. 余裕を考慮した盛土施工

4.1 荷重速度の検討

現場で実際に使用するジオテキスタイルの製品強度と、施工中の調査により得られた地盤特性を基に、盛土立ち上がり時の安定性について検討を行った。

圧密計算モデルを図-11に示す。圧密計算には、 $e-\log P$ 曲線による方法 (Δe 法) を用いた。

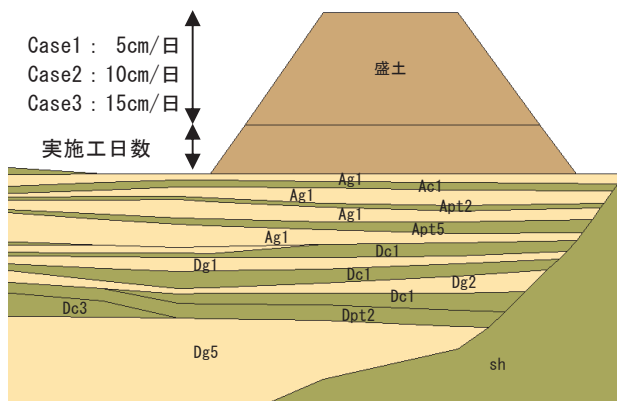


図-11 圧密計算モデルと計算ケース

表-5 各ケースの圧密計算結果

検討ケース	載荷速度	最終沈下量 (cm)	盛土立ち上がり時	
			沈下量 (cm)	圧密度 U
Case 1	5 cm/日	144.1	131.6	91%
Case 2	10 cm/日	144.1	122.8	85%
Case 3	15 cm/日	144.1	117.5	81%

表-7 各ケースの安定計算結果

検討ケース	安全率 F_s	判定 ($F_s > 1.1$)
Case 1	1.124	OK
Case 2	1.106	OK
Case 3	1.094	NG

表-6 せん断強さの算出結果

土質	強度増加率 m	有効土被り圧 P_0 (kN/m ²)	増加応力 ΔP (kN/m ²)	圧密度 U (%)			P_t ($=P_0 + \Delta P \cdot U$) (kN/m ²)			せん断強さ算定値 C_u ($=m \cdot P_t$) (kN/m ²)		
				case1	case2	case3	case1	case2	case3	case1	case2	case3
Ac1	0.31	12.4	427.6	91	85	81	401.5	375.9	358.8	124.5	116.5	111.2
Apt2	0.43	33.6	423.9	91	85	81	419.3	393.8	376.9	180.3	169.4	162.1
Apt5	0.38	49.8	418.9	91	85	81	431.0	405.8	389.1	163.8	154.2	147.9

検討は、載荷速度を 5, 10, 15cm/日とした場合の 3 ケースについて実施した。

各ケースの盛土立ち上がり時の圧密度は、盛土高 6m までは実際に要した施工日数で圧密計算を行い、それ以降は各ケースの載荷速度による所要日数で計算した。

各ケースの盛土立ち上がり時における圧密計算結果を表-5 に示す。

ここで得られた圧密度と前章 3.3 で推定した強度増加率により、盛土立ち上がり時における各土層の強度増加後のせん断強さを算出した。せん断強さの算出結果を表-6 に示す。

使用するジオテキスタイルの製品強度と表-6 のせん断強さを用いて実施した安定計算の結果を表-7 に示す。安定性の判断基準は、円弧すべりに対する安全率 $F_s > 1.1$ とした。

安定計算の結果、以降の盛土の載荷速度を 10cm/日としても盛土立ち上がり時の安定性が確保できることが分かった。

安全率と載荷速度の関係を図-12 に示す。載荷速度 5cm/日では、当初の設計時における安全率 $F_s=1.100$ から $F_s=1.124$ に増加し、0.024 の裕度が確保できていた。また、安全率が $F_s=1.100$ 以上確保できる載荷速度は 12.5cm/日であり、当初設計からは 7.5cm/日の余裕がある結果となった。

4.2 速度変更による施工

ジオテキスタイルの引張強度がもつ裕度と実地盤がもつ地盤特性の裕度を考慮した載荷速度の検討結果から、以降の盛土は 10cm/日による立ち上げ速度で施工を実施し、発生土の処理工程を計画した。その結果、盛土の載荷速度を速めることで、発生土の処理を円滑に行うことができた。

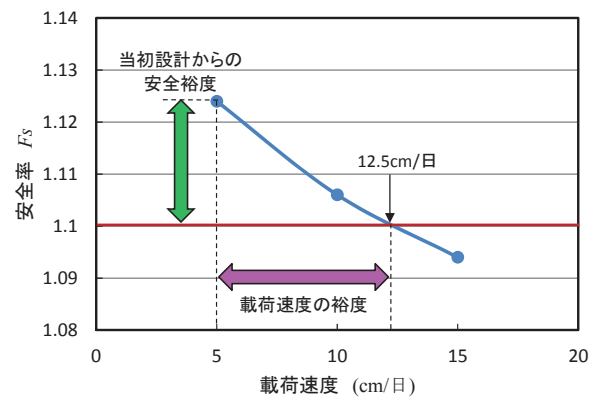


図-12 安全率と載荷速度の関係

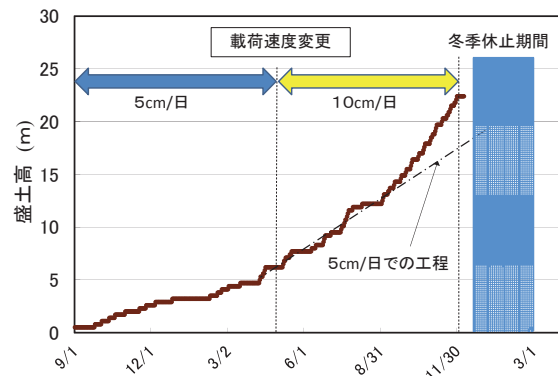


図-13 盛土の実施工程



写真-2 盛土の完成全景

盛土の実施工程表を図-13に示す。途中からの盛土の
 載荷速度の変更により、盛土工程を約4ヶ月短縮でき、冬
 季の休止期間前に盛土を完成(写真-2)することができ
 た。

4.3 盛土の安定と沈下量

盛土完成までの動態観測による安定管理図を図-14に
 示す。載荷速度の変更後は、管理基準値に近づく傾向にあ
 ったが、最終的には管理基準値以内で施工を完了するこ
 とができた。

また、盛土完成後も1ヶ月間の経過観測を行い、地表面
 沈下量の実測値から図-15に示す双曲線法による沈下予
 測方法を用いて最終沈下量を推定した。

地表面沈下量の実測値と最終沈下量の推定値を表-8
 に示す。盛土完成時の実測値および最終沈下量の推定値
 は、共に圧密計算による計算値に近い値が得られた。

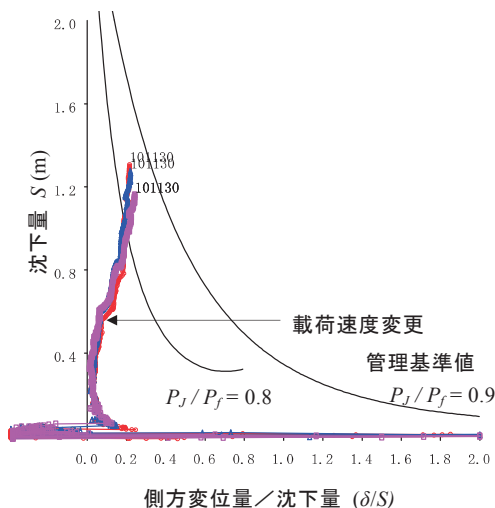
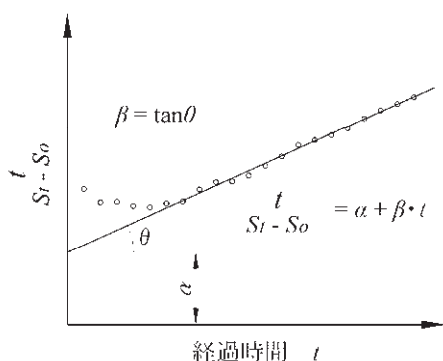


図-14 盛土完成時の安定管理図



t : 盛土完成時からの経過時間
 α, β : 沈下曲線のパラメータ
 S_0 : 盛土完成時の沈下量
 S_t : 時間 t における沈下量 $S_t = S_0 + \frac{t}{\alpha + \beta \cdot t}$
 S_f : 最終沈下量 $S_f = S_0 + \frac{1}{\beta}$

図-15 双曲線法による沈下予測方法

表-8 地表面沈下量の実測値と推定値

盛土完成時沈下量		最終沈下量	
計算値 (cm)	実測値 (cm)	計算値 (cm)	推定値 (cm)
131.6	130.8	144.1	146.0

5. まとめ

施工時における安全性に対する余裕として、以下の裕
 度を考慮することにより、設計に対して安全率が増加す
 ることが検証できた。

- ① 使用部材の強度に関する余裕(設計強度と製品強度との間の余裕)。
- ② 設計定数に関する余裕(設計時の採用値と試験等による実際の値との差)。

本盛土事例では、動態観測による安定管理だけでなく、
 上記の余裕を考慮して実際の現場状況に見合った解析を
 実施することで、適切な盛土の載荷速度を設定するこ
 とができ、土量配分の最適化と工程短縮に繋げることが
 できた。

【謝辞】

本研究の成果は、IGS 日本支部ジオテキスタイル技術委
 員会第6ステージ(2013-2015)の成果⁴⁾に基づいている。
 支援いただきました、防衛大学校篠田准教授をはじめ支
 部の皆様には感謝の意を表します。

【参考文献】

- 1) 角田晋相ほか：施工時の調査ボーリング結果を用いた盛土速度の調整、第47回地盤工学研究発表会, pp. 1009-1010, 2012.7
- 2) 角田晋相ほか：軟弱地盤上の盛土施工における安定管理、銭高組技報 No36, pp. 39-44, 2011.11
- 3) (社)日本道路協会：道路土工-軟弱地盤対策工指針, 平成24年8月
- 4) IGS 日本支部ジオテキスタイル技術委員会：第6ステージ委員会報告書 安全裕度の定量評価に関する検討, 平成28年3月
- 5) 角田晋相, 篠田昌弘：安全裕度を考慮した軟弱地盤上の盛土施工, ジオシンセティックス論文集第31巻, pp. 61-66, 2016.12
- 6) 角田晋相, 篠田昌弘：施工時に含まれる安全率の余裕に関する検討, 第52回地盤工学研究発表会, pp. 1083-1084, 2017.7