

# 泥炭性軟弱地盤における 堤防拡幅盛土の課題と対応策について — 柏木川築堤盛土における対応事例 —

札幌開発建設部 千歳川河川事務所 第1工務課 ○長尾 真穂  
三俣 晴由  
青木 康治

千歳川河川事務所管内では、『千歳川河川整備計画』に基づき既設堤防に腹付けする形で拡幅盛土が進められている。しかし、管内は泥炭性軟弱地盤地帯に位置しており、過去の変状事例を踏まえてすべり破壊や側方流動に配慮しながら盛土施工を進める必要がある。本稿は、柏木川左岸築堤の拡幅盛土工事で発生した不安定事象を受け実施した地質調査・解析の検討結果から今後の拡幅盛土における留意点を報告するものである。

キーワード：泥炭性軟弱地盤、動態観測、施工管理、設計施工、地質リスク

## 1. はじめに

千歳川河川事務所管内では、「石狩川水系千歳川河川整備計画」に基づき千歳川遊水地群の整備（令和2年度より供用開始）及び堤防の整備等が行われており、現在は千歳川本川及び支川における堤防整備（4割断面による拡幅盛土）（図-1）等が順次進められている。

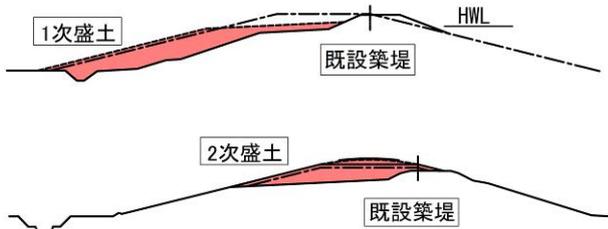


図-1 拡幅盛土概念図(上)1次盛土(下)2次盛土

一方で、千歳川河川事務所管内の地質分布は図-2に示すように泥炭等の軟弱層が厚く堆積する泥炭性軟弱地盤地帯に該当しており、過年度の築堤工事では軟弱層に起因した側方流動やすべり破壊、あるいは沈下に伴うクラックなどの変状が発生している（写真-1・2）。これを踏まえて、盛土施工を安全かつ効率的に行うために工事期間中の動態観測によって盛土の安定性を逐次評価しながら盛土工事を進めているが、「泥炭地盤」上の盛土に対しては、その性状のバラつきなどから不確定要素が多いため、想定外の変状発生に対する対応策が課題となっている。本稿では不安定事象が発生した柏木川左岸築堤盛土工事での対応事例と今後の盛土における留意点について報告する。

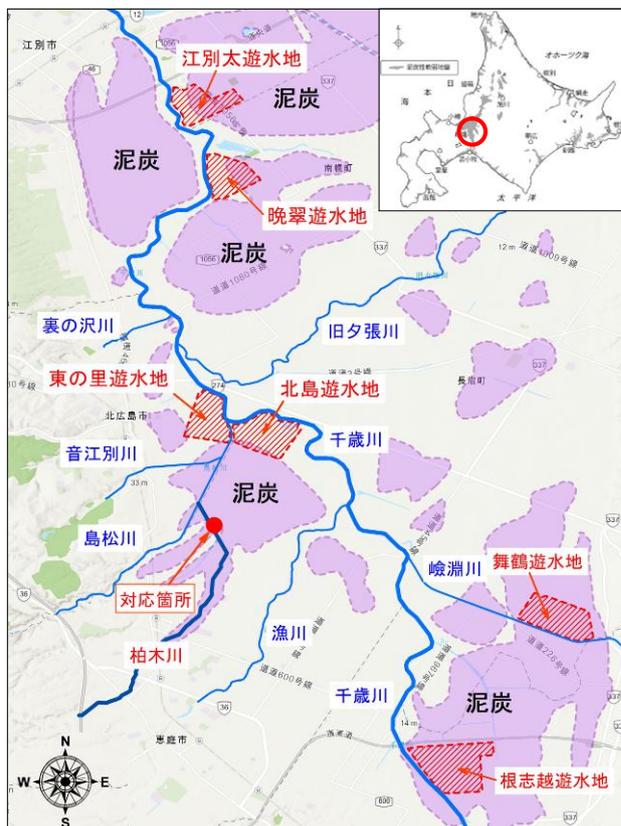


図-2 泥炭性軟弱地盤の分布状況



写真-1 盛土の側方流動

写真-2 堤防天端クラック

## 2. 堤防動態観測工の概要

### (1) 動態観測の実施内容（計測計器配置）

管内の拡幅盛土施工時の動態観測は、「沈下板」と「変位杭」による計測を基本としており、図-3に示すように、沈下板は断面変化点や最大盛土高を主として1測線当たり2～4点設置し、変位杭は盛土法尻に1～2点設置している。設置位置については、堤内排水路などの位置も踏まえて決定する。

#### 【動態観測工の概要】

- ・観測計器：沈下板、変位杭
- ・測線間隔：1測線/100m
- ・1測線当たりの計器設置数：沈下板 2～4点/測線  
変位杭 1～2点/測線
- ・観測頻度：1回/日（施工中～盛土完了）  
1回/2～3日（盛土完了～盛土完了後1ヶ月）

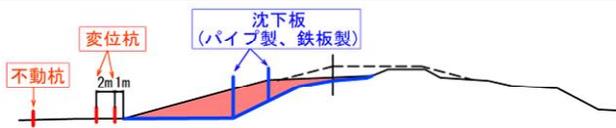


図-3 沈下板と変位杭の配置例

### (2) 盛土安定管理手法

動態観測における盛土安定管理手法は、「泥炭性軟弱地盤対策工マニュアル<sup>1)</sup>」を参考に、以下の3手法によって行っている。

- ①（松尾・川村の方法）沈下量(S)と水平変位量/沈下量 ( $\delta/S$ )の関係による安定管理
- ②（栗原・高橋の方法）日水平変位量  $\Delta\delta/\Delta t$  による安定管理
- ③ 累計水平変位量  $\Sigma\delta$  に着目した安定管理手法

#### ① 松尾・川村の方法 ( $S \sim \delta/S$ 管理図)

盛土センター（管内の築堤盛土工事の場合、盛土最大厚を採用することが多い）の沈下量Sと盛土法尻に設置した変位杭の水平変位量  $\delta$  を用いて  $S \sim \delta/S$  管理図によって管理する手法である（図-4）。この図には、経験的に設定された破壊基準線が示されており（ $P_j$ （施工時盛土荷重）/ $P_f$ （破壊時盛土荷重） $> 1.0$ で破壊）、この基準線に近づくとき要注意（ $P_j/P_f > 0.8$ ）、あるいは危険（ $P_j/P_f > 0.9$ ）と判断している。

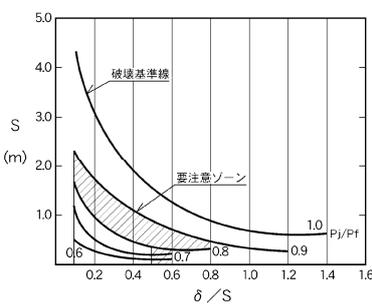


図-4  $S \sim \delta/S$  管理図の要注意ゾーン

#### ② 栗原・高橋の方法 ( $\Delta\delta/\Delta t \sim t$ 管理図)

1日あたりの変位杭の水平変位量に着目した管理手法である（図-5）。経験的に1日あたりの水平変位量の基準が示されており、1.5cm以上で要注意、2.0cm以上で危険と判断して管理を行っている。

軟弱地盤上に盛土を行う場合、沈下量が大きくなるこ

とは安全管理上許容できるが、盛土に伴う水平変位量が大きくなることは側方に変形が発生していることを意味し、盛土の安定管理上不安定に向かっていると評価している。

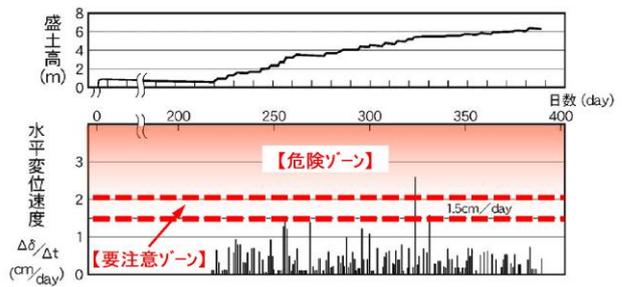


図-5  $\Delta\delta/\Delta t \sim t$  管理図

#### ③ 累計水平変位量 $\Sigma\delta$ による安定管理 ( $\Sigma\delta \sim t$ 管理図)

泥炭性軟弱地盤における拡幅盛土にて変状が発生した事例では水平変位量の累計が20cmを超えた段階で変状が発生していることを受け、累計水平変位量を管理基準の指標としている。累計水平変位量が15cmを超えると要注意、20cmを超えると危険と判断している（図-6）。

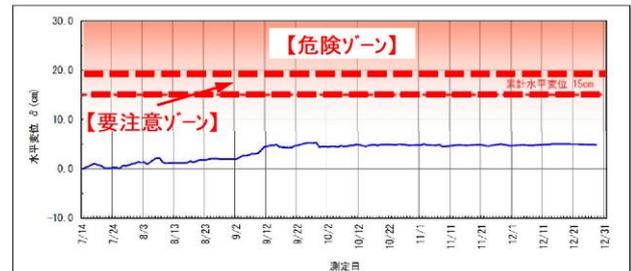


図-6  $\Sigma\delta \sim t$  管理図

## 3. 柏木川左岸築堤盛土における対応事例

ここでは、柏木川左岸築堤の拡幅盛土工事で発生した不安定事象に対する対応について整理する。

### (1) 盛土工事の概要

- ・位置情報：柏木川左岸築堤SP900～SP1, 167.62の築堤盛土（1次盛土）
- ・土質条件：泥炭・粘性土（軟弱層厚4～6m）
- ・盛土厚：（当初）約3m ⇒（施工）整地盛土+1層盛土段階で不安定兆候により盛土中止
- ・盛土速度：3cm/day（1層30cm盛土後10日放置～※工事特記仕様書による）
- ・観測機器：1測線/50mの測線間隔で沈下板と変位杭を設置して観測
- ・施工手順（当初）：堤内排水路の切り回し（盛土による既設水路閉塞のため）⇒ PC柵渠敷設 ⇒ 築堤盛土

#### ・対応の時系列：

- ① 堤内排水路の開削時にて泥炭層を確認
- ② 簡易調査及び軟弱地盤解析により盛土可否を検討 → 盛土高を見直し、完成高さ-1mにて盛土開始
- ③ 整地盛土後の1層目盛土段階で不安定兆候が発生したため、盛土を中断。
- ④ 詳細調査及び軟弱地盤解析を実施し、盛土施工状況を再現。以降の盛土継続可否を照査

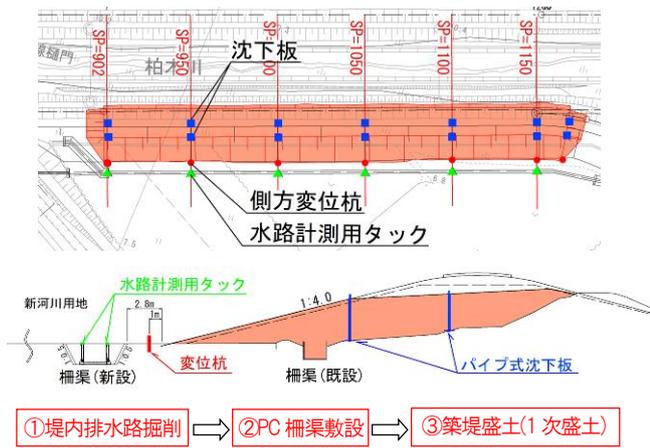


図-7 (上)観測計器配置図及び(下)当初施工手順

(2) 施工時における対応状況

1) 堤内排水路開削時

図-7に示すように、4割断面による拡幅盛土によって既設堤内排水路が閉塞されることから、通水確保のために先行して堤内排水路の切り回しを行う必要があった。掘削状況を写真-3に示す。これによると、地表より泥炭層が認められ、既往の地質縦断面図からも盛土区間に泥炭が堆積していることが推定された(図-8)。これまで千歳川河川事務所管内の盛土工事で発生した変状は「泥炭地盤」に起因した事例が多かったことから、盛土区間における軟弱層の分布状況を把握する目的で、簡易地質調査(機械式コーン貫入試験・ピートサンプリング)を行ったほか、円弧すべり安定計算により盛土の可否を検討した。



写真-3 堤内排水路掘削状況(上)全景、(下)水路掘削断面

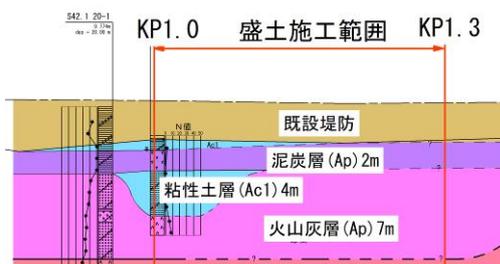


図-8 既往地質縦断面図による泥炭層分布状況

2) 簡易地質調査及び円弧すべり安定計算の実施

簡易地質調査結果による地質縦断面図を図-9に示す。調査は盛土区間の下流(SP950)、中流(SP1050)、上流(SP1150)の3地点で行った。これによると、厚く泥炭の分布が確認され、最大で約4.2m程度の層厚を有していることが確認された。この結果より当該盛土工事における盛土可否を検討する目的で泥炭層が最も厚いSP1050を代表断面としてすべり安定計算を行った(図-10)。

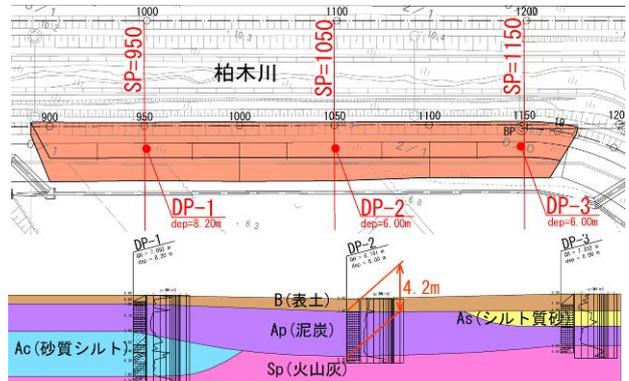


図-9 簡易地質調査による地質縦断面図(柏木川左岸)

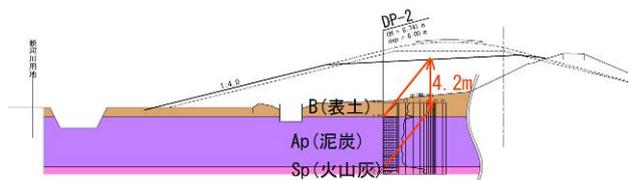


図-10 すべり安定計算代表断面(柏木川左岸 SP1050)

すべり安定計算結果を表-1に示す。当初完成高さ(1次盛土(HWL+0.30m))でのすべり安全率は $F_s=0.995$ と目標安全率( $F_{sa} \geq 1.20$ )を満足しなかったことから、完成高さを低下させた場合のすべり安定計算を行った。この結果、完成高さ-1mで $F_s=1.201$ となり目標安全率を満足した(図-11)ことから、当該断面形状による盛土へ移行することとした。

表-1 すべり安定計算結果(SP1050~簡易地質調査断面)

検討CASE	すべり安定解析		
	目標安全率	安全率	判定
簡易地質調査断面	完成高さ	0.995	NG
	完成高さ-1m	1.201	OK
	完成高さ-2m	1.613	OK

$$F_s = 1.201 \geq F_{sa} = 1.2$$

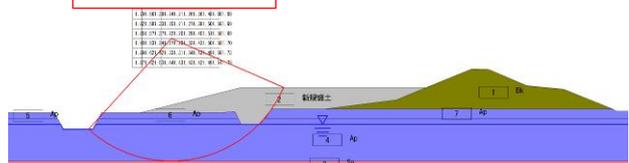


図-11 すべり安定計算結果(完成断面-1m)

3) 盛土施工時における動態観測結果

盛土施工時における動態観測結果を表-2、図-12に示す。盛土工事は7月4日より基盤整地のための盛土を開始したが、直後に日水平変位量 $\Delta \delta / \Delta t$ が基準値である2.0cmを超過したため、水平変位が取束傾向を示すまで監視を

表-2 動態観測結果時系列

月日	経緯	動態観測結果				
		盛土厚Ht (m)	累計水平変位 $\Sigma \delta$ (cm)	日水平変位 $\Delta \delta / \Delta t$ (cm/日)	沈下量 S(cm)	盛土開始後日数(日)
7/4	盛土施工開始	0.00	0.0	0.0	0.0	0
7/5	整地盛土段階で日水平変位が基準値( $\Delta \delta / \Delta t \geq 2.0$ cm/日)超過	0.26	2.4	2.4	0.0	1
7/9	日水平変位が徐々に収束傾向( $\Delta \delta / \Delta t = 2.4 \rightarrow 1.4 \rightarrow 0.4$ cm/日)	0.26	7.1	0.4	2.8	5
7/10	収束傾向が見られたことを受け1層目盛土実施	0.56	7.8	0.8	4.4	6
7/18	2層目盛土を7/19に予定していたが、水平変位に収束傾向が見られないため延期を決定	0.56	8.8	0.3	5.3	14
7/26	水平変位に依然収束傾向が見られないため、盛土を一時中断し、詳細地質調査および軟弱地盤解析の実施を決定	0.56	8.8	0.3	6.7	22

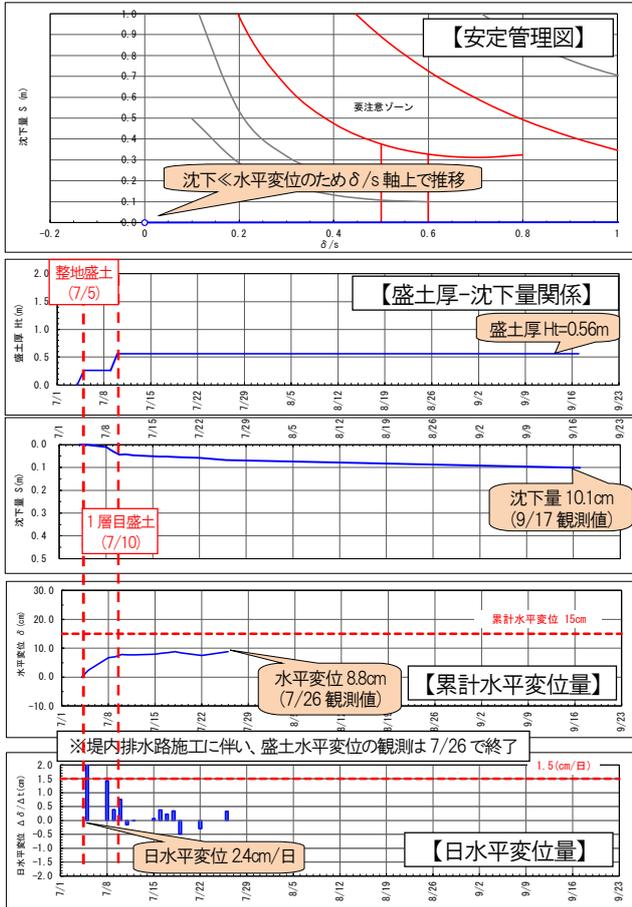


図-12 盛土動態観測結果(柏木川左岸 SP1050)

行った。その後、7月9日の観測値にて日水平変位量が0.4cm/日と収束傾向が見られたことから、7月10日に1層目の盛土を行った。しかし、7月26日まで監視を行ったが、水平変位の収束傾向が見られず、累計水平変位量も基準値( $\Sigma \delta = 15$ cm)の半分程度( $\delta = 8.8$ cm)を示していたため、盛土を一時中断し、詳細地質調査および軟弱地盤解析によって以降の盛土継続可否を照査することとした。

#### 4. 柏木川左岸築堤における詳細地質調査

詳細地質調査結果による地質縦断面図を図-13に示す。調査は代表断面である中流部 (SP1050) にて、横断方向の分布状況を把握する目的で素地部、拡幅中間部、既設堤防天端部に対してボーリング及び機械式コーン貫入試験を行った。また、簡易地質調査結果を補完する目的で素地部縦断方向に対して50m間隔で機械式コーン貫入試験・ピートサンプリングを実施した。その結果、地表より泥炭が厚く堆積している状況が確認され、層厚はSP1000で5.5mと最も厚く、上流へ向かって層厚が徐々に薄くなる傾向が確認された。また、泥炭(Ap:素地部)のN値は0~1、qc値=0.1~0.4MN/m<sup>2</sup>程度と“非常に軟弱”な強度を呈しており、含水比はw<sub>n</sub>=200~900%程度(平均w<sub>nave</sub>=420%程度)、強熱減量はLi=50~70%を有している。この結果より当該盛土工事における盛土可否を検討する目的で軟弱層が厚いSP1050を代表断面として軟弱地盤解析を行った

(図-14)。

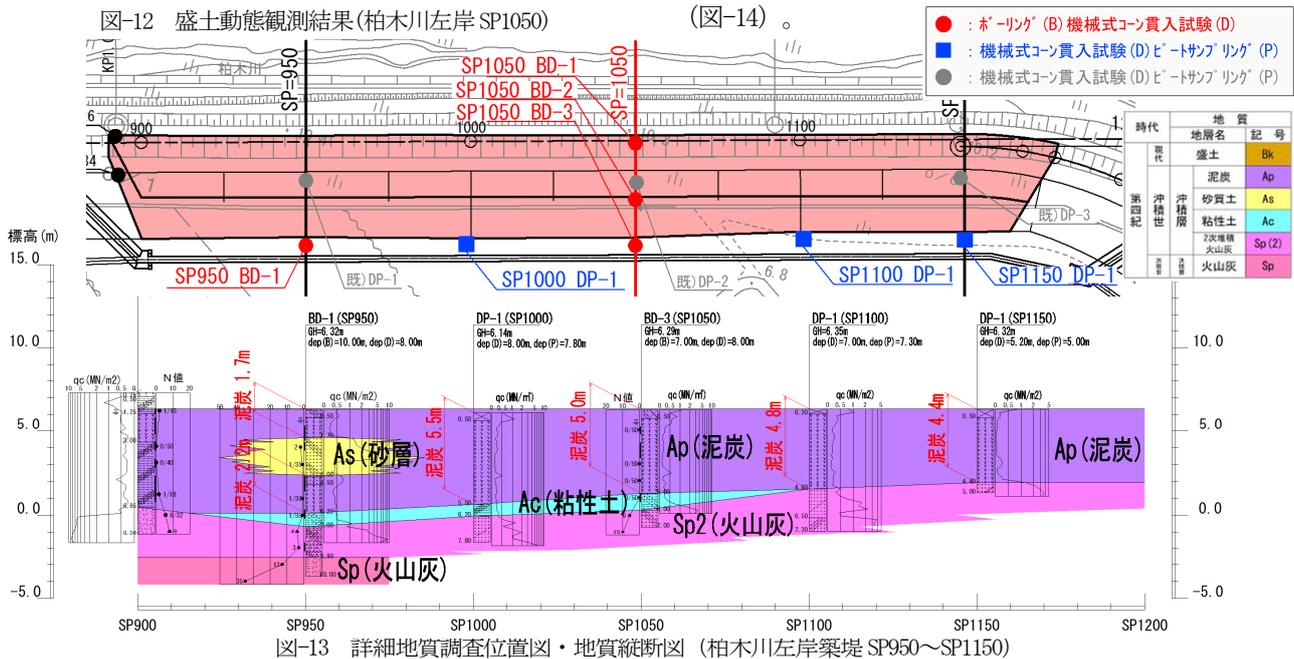


図-13 詳細地質調査位置図・地質縦断面図(柏木川左岸築堤 SP950~SP1150)

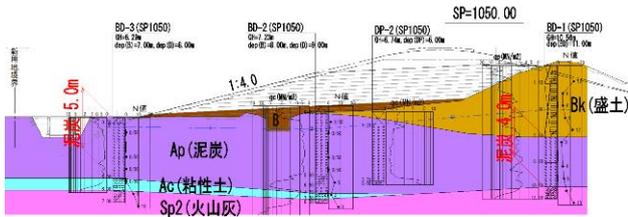


図-14 軟弱地盤解析代表断面(柏木川左岸築堤 SP1050)

### 5. 柏木川左岸築堤盛土における軟弱地盤解析

柏木川左岸築堤SP1050の軟弱地盤解析として、以下の解析を行った。

- ① 工事盛土工程における圧密定数の精査
- ② 当該工事盛土厚（一時中断前）におけるすべり安定性照査
- ③ 盛土再開後における継続可否の照査（すべり安定性照査）
- ④ 次年度以降の盛土照査

#### (1) 工事盛土工程における圧密定数の精査

ここでは、工事盛土過程を圧密沈下計算によって再現し、最終観測時点（9/17、盛土開始後75日）の実測値（ $S=10.1\text{cm}$ ）（図-12）と合致する圧密定数を精査した。解析結果を表-3に示す。盛土開始後75日の計算値が $S=11.1\text{cm}$ 、実測値が $S=10.1\text{cm}$ と概ね再現されたことから、当該圧密定数より得られた盛土の圧密度をもとにすべり安定性照査を行った。

表-3 圧密定数照査結果（実測値・計算値）

照査時点	沈下量		再現率	泥炭 圧密度
	実測値	計算値		
盛土後75日時点	10.1cm	11.1cm	91%	8%

#### (2) 当該工事盛土厚におけるすべり安定性照査

前項で求めた圧密定数による圧密度をもとに、整地盛土+1層盛土段階の盛土厚（ $H_t=0.56\text{m}$ ）におけるすべり安定計算結果を表-4、図-15に示す。すべり安全率は $F_s=1.472$ と目標安全率（ $F_{sa} \geq 1.20$ ）を満足する結果が得られた。この結果から、圧密計算結果による泥炭層の圧密度は8%程度（表-3）と小さいが盛土厚も $H_t=0.56\text{m}$ と少ないことから目標安全率を満足し、すべり破壊は発生していないものと評価することができる。一方、側方流動に対する安全率（ $F_s \geq 1.5$ ）<sup>2)</sup>に対しては若干下回っている。

表-4 すべり安定計算結果（SP1050～R6 工事照査）

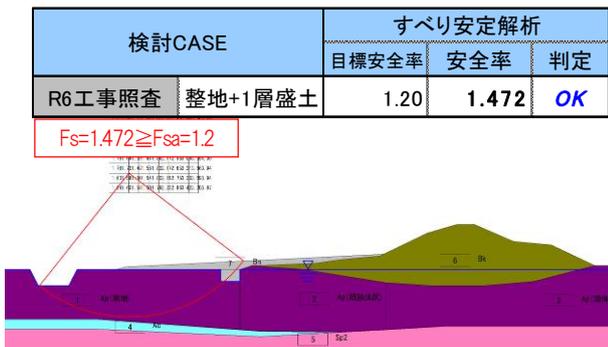


図-15 すべり安定計算結果(盛土厚 $H_t=0.56\text{m}$ )

ることから、実現象として水平変位量が8cm程度（表-2）発生したものと評価できる。

#### (3) 今年度工事における盛土継続可否の照査

現状の盛土状態から、今後の盛土継続可否をすべり安定計算によって照査した。照査結果を表-5、図-16に示す。これによると、目標安全率（ $F_{sa} \geq 1.20$ ）を満足する盛土厚は現状の盛土厚（ $H_t=0.56\text{m}$ ）+2層（ $\Delta H_t=60\text{cm}$  ※1層30cm盛土）までにとどまった。

表-5 盛土継続可否照査結果（SP1050）

検討CASE		すべり安定解析		
		目標安全率	安全率	判定
R6 盛土継続 可否照査	当初完成断面	1.20	0.713	NG
	$H_t=0.56\text{m}+3$ 層		1.028	NG
	$H_t=0.56\text{m}+2$ 層		1.206	OK

$F_s=1.206 \geq F_{sa}=1.2$

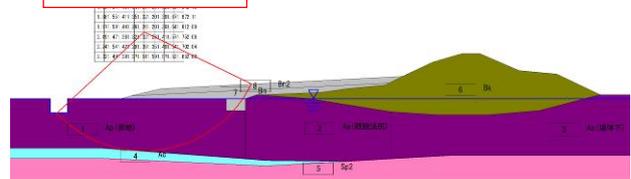


図-16 すべり安定計算結果(盛土厚 $H_t=0.56\text{m}+2$ 層)

この結果を評価すると、実現象では2層相当の盛土厚（ $H_t=0.56\text{m} \times 1$ 層30cm盛土とした場合）での水平変位量が $\delta=8.8\text{cm}$ であり、仮に盛土を継続した場合、実現象でも累計水平変位の基準値 $\Sigma \delta=15\text{cm}$ に到達するものと推定されたことから計算結果は妥当と判断でき、このことから当該年度の盛土継続は困難と判断した。

#### (4) 次年度以降の盛土照査（施工築堤高 $EL=11.36\text{m}$ ）

ここでは、次年度以降に盛土施工を行うにあたり、施工築堤高（計画築堤高+余盛（ $EL=11.36\text{m}$ ））までの盛土によるすべり安定性・沈下量の照査を行った。解析結果を表-6に示す。これより、緩速載荷工法（圧密による強度増加を図りながら段階的に盛土を行う工法）によるすべり安定性は満足するものの、沈下後の高さが計画築堤高（ $EL=11.06\text{m}$ ）を下回る（ $S_f=123.7\text{cm} \geq S_{fa}=30\text{cm}$ ）ため、沈下後の高さが計画高さとなる必要盛土厚を算定し、これに対するすべり安定性照査を行った。

表-6 解析結果一覧（施工築堤高 $EL=11.36\text{m}$ ）

検討CASE		すべり安定解析		
		目標安全率	安全率	判定
施工築堤高 ( $EL=11.36$ )	急速載荷	1.20	0.810	NG
	緩速載荷		1.207	OK

検討CASE		圧密沈下解析				
		許容値	堤内肩沈下量	判定	堤外肩沈下量	判定
施工築堤高 ( $EL=11.36$ )		30cm	123.7cm	NG	27.4cm	OK

#### (5) 次年度以降の盛土照査（必要盛土厚 $EL=12.77$ ）

ここでは、次年度以降に盛土施工を行うにあたり、必要盛土厚（沈下後の高さが計画高さとなる盛土厚 $H_t=6.5\text{m}$ （ $EL=12.77$ ））におけるすべり安定性の照査を行っ

た。解析結果を表-7に示す。これより、緩速載荷工法におけるすべり安定性に対しても目標安全率（ $F_{sa} \geq 1.20$ ）を満足しないため、土工による計画断面（必要盛土厚）の確保が困難と判断し、軟弱地盤対策工の検討を行うこととした。

表-7 解析結果一覧（必要盛土厚EL=12.77）

検討CASE		すべり安定解析		
		目標安全率	安全率	判定
必要盛土厚 (EL=12.77)	急速載荷	1.20	0.640	NG
	緩速載荷		1.043	NG

検討CASE	圧密沈下解析				
	許容値	堤内肩沈下量	判定	堤外肩沈下量	判定
必要盛土厚 (EL=12.77)	-	141.1cm (EL $\geq$ 11.36)	OK	36.8cm (EL $\geq$ 11.36)	OK

## 6. 柏木川左岸築堤盛土における対策工法の検討

当該箇所における対策の目的は、地盤の強度増加によるすべり安定性の確保（ $F_s \geq 1.2$ ）及び供用期間中の残留沈下量の抑制（ $S_f \leq 30\text{cm}$ ）であり、適用可能な対策工として『固結工法』『真空圧密工法』を選定し、対策工規模を検討した。検討結果の概要を以下に示す。

### 【固結工法(法尻改良案)】

- ・設計基準強度 $qu_{ck}=200\text{kN/m}^2$
- ・改良長  $D=7\text{m}$ (軟弱層下端まで)、改良径  $\phi 600\text{mm}$
- ・改良幅  $B=6\text{m}$ (改良率 $a_p=78.5\%$ 、 $1.6\text{m}^2/\text{ツ}$ (接円))

### 【固結工法(全面改良案)】

- ・設計基準強度 $qu_{ck}=400\text{kN/m}^2$
- ・改良長  $D=7\text{m}$ (軟弱層下端まで)、改良径  $\phi 600\text{mm}$
- ・改良幅  $B=27\text{m}$ (改良率 $a_p=30\%$ 、 $2.5 \times 2.6\text{m}^2/\text{ツ}$ )

### 【真空圧密工法】

- ・ドレーンピッチ  $12\text{m}$ の正方形配置
- ・ドレーン長  $D=5\text{m}$ (下部シール層 $1\text{m}$ 確保)
- ・シール盛土高  $EL=7.7\text{m}$ (上部シール層 $1\text{m}$ 以上確保)

上記工法について経済性等による比較検討を行い、『真空圧密工法』を最適工法として選定した(図-17)。



図-17 真空圧密工法概念図

(写真：(右)ドレーン打設及び(左)集水管敷設状況(島松川))

## 7. まとめ

本稿では、柏木川左岸築堤盛土工事で発生した不安定事象に対して、地質調査によって地盤の性状を把握し、軟弱地盤解析によって事象の再現及び計画断面を確保するための対策工の検討を行った。

### (1) 今回事象によって得られた知見

- ・拡幅盛土の事前段階（堤内排水路掘削、簡易地質調査）において泥炭層を確認したことで、過去の変状経緯を踏まえ盛土に対して慎重に施工を進めることを施工業者、設計コンサル、発注者で情報共有できた。

#### →事前段階における基礎地盤状態把握の重要性

- ・盛土施工に際し、動態観測による盛土安定管理を日々行っていたことで、盛土厚と沈下量・水平変位量の関係性を逐次把握し、変状に至る前に盛土を一時中断し、軟弱地盤対策工検討に移行することができた。

#### →動態観測による安定性評価・変状未然防止の重要性

### (2) 千歳川河川事務所管内における堤防整備（4割断面による拡幅盛土）を進める上での留意点

過年度に千歳川河川事務所管内の盛土工事で発生した変状は、「泥炭地盤」に起因している事例が多い（※「粘性土地盤」での変状ケースは少ない）。これらを踏まえて今後盛土工事を計画する際は、以下の点に留意した上で地質リスクに対応することが望ましいと考える。

- ①基礎資料収集：対象箇所の既往土層縦断図を確認し、泥炭地盤の分布状況を確認するほか、近傍箇所の既往工事成果から変状履歴の有無を把握する。
- ②地盤状況把握：①の結果より泥炭層厚が厚い場合や過年度に変状履歴が認められる場合、または既往の土層縦断図がない場合は、工事区間の地盤性状・地盤強度の把握として『現地試掘』または『機械式コーン貫入試験』などの簡易的な地質調査を行う。
- ③盛土可否の判定：②の地質調査結果より地盤が軟弱ですべり安定性が懸念される場合は、必要に応じて軟弱地盤解析等を実施し、盛土可否を判定する。
- ④盛土施工の実施：①②③の結果より、盛土が可能であると判断された場合は、動態観測の計画を行い、盛土の安定性を確認しながら盛土施工を実施する。（※軟弱地盤解析等の結果、盛土が困難であると判断された場合は、すべり安定性を確保できる限界盛土厚にて施工する、または軟弱地盤対策工の検討を行う）。

謝辞：本稿の作成にあたり、ご協力いただいた株式会社開発工営社の皆様、岩田地崎建設株式会社の皆様に心より感謝申し上げます。

### 参考文献

- 1) 国研 土木研究所 寒地土木研究所：泥炭性軟弱地盤対策工マニュアル(H29.3), p. 221-226
- 2) 同上 ,p. 61