

豊平川下流部における河道掘削について —真空圧密工法による掘削土砂の減量化の検討—

石狩川開発建設部 札幌河川事務所 ○渡 辺 雅 裕
高 橋 慶 久
平 塚 修 二

札幌市を流れる豊平川の下流部では、流下能力の向上を目的として、河道掘削工事を実施する計画である。実施にあたっては、大量に発生する掘削土の処理方法が課題であり、この掘削土砂には利活用が困難な泥炭や砒素を含む土砂が混在することから、処分費用を軽減する方策が求められている。

このような背景のもと、下流部の地質の特性等から当該地区においては、真空圧密工法による掘削土の減量化が有効な手法と考え、現在、試験工事を実施しているところである。

本論文では、現段階における当手法の有効性について定量的に評価するとともに、試験施工について報告する。

キーワード：真空圧密工法、掘削土の減量化、環境影響低減

1. 豊平川の概要

豊平川は、札幌市と千歳市の境にある小漁山の西山麓を源として途中、白井川、真駒内川、月寒川、厚別川か



図-1 豊平川位置図

ら水を集め、石狩川に合流する幹川流路延長 72.5km、流域面積 902km²の石狩川の1次支川である。真駒内川から下流は扇状地を形成し道都札幌の市街地を河床勾配 1/150~1/300 の急勾配で貫流した後、雁来付近から下流は 1/1000 以下の緩勾配となっている。豊平川の下流部は新水路区間であり、昭和7年から開削工事が行われ昭和16年に通水した。河川改修により、周辺流域は、広大な湿原から生産性の高い肥沃な農地や市街地等の居住空間に変貌し、現在の様相を呈している。

2. 豊平川下流部の現状

豊平川下流部の現状について、治水、地質、環境の面から以下に示す。

(1) 治水面

豊平川では繰り返し洪水が発生している。近年では昭和50年8月、昭和56年8月上旬、8月下旬が代表的な洪水

であるが、昭和56年8月下旬洪水が最も規模が大きく、河川整備計画の目標流量になっている。

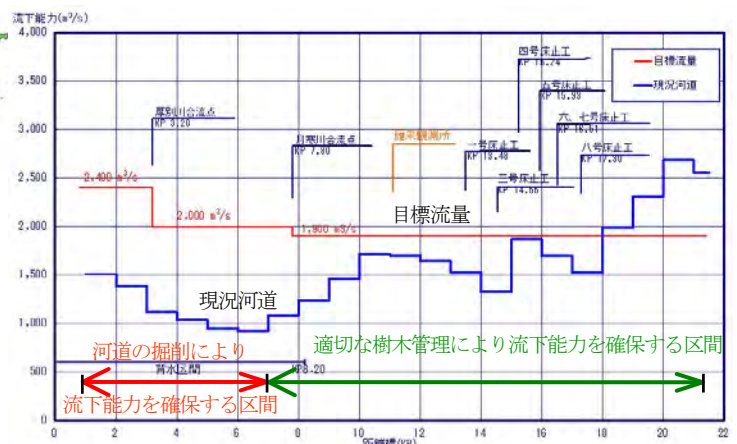


図-2 現況河道流下能力 (河川整備計画策定時)

現況河道では図-2に示すとおり、kp18.0より上流で目標流量を満足しているものの、その他の区間では満足していない状況である。河川整備計画では、kp7.0より下流は河道の掘削により流下能力を確保する区間、kp7.0より上流は適切な樹木管理により流下能力を確保する区間としている。

(2) 地質状況

豊平川下流部は前述のとおり新水路区間で、かつては広大な湿原で周辺は厚い泥炭層に覆われている。豊平川の土質の状況は以下のとおりである。また、下流部の土層縦断面図について図-3に示す。

① 高水敷表層

- ・高水敷表層には、kp5.0付近より下流に泥炭Ap1層が分布しており、下流に行くほど泥炭層が厚くなっている。
- ・kp2.0付近より上流で泥炭の上層に細粒分含有率が80%前後と非常に高い粘性土Ac1層が分布しており、上流に行くほど粘性土層が厚くなっている。
- ・kp5.0付近より上流で、部分的に表層に砂質土As1-1層が見られる。

②泥炭直下

- ・泥炭直下には粘性土と砂質土の中間土であるAsc層が分布している。kp3.0～4.0前後に厚く分布している。
- ・kp3.0付近より下流およびkp4.0～5.0より上流で砂質土As1-2層が分布している。

③下部層

- ・Asc層およびAs1-2層の下位に軟弱なAc2層が厚く堆積している。kp2.0付近より下流で粘性土Ac2層厚は薄くなっている。
- ・Ac2層の下位に砂質土As2層が分布しており、上流に行くほど上端深度は深くなる傾向にある。

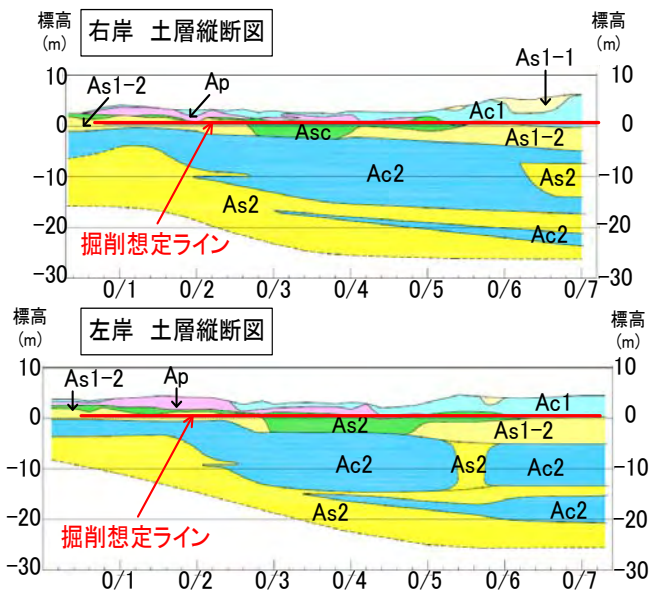


図-3 豊平川土層縦断面

当該掘削予定箇所を表層土壌10箇所において、重金属等9項目の分析を行ったが、右岸kp5.0付近のAsc層にて基準値を超過する砒素が確認された。過去の土地利用、北海道における砒素分布図から当該箇所の砒素は自然由来のものとして想定される。

表-1 砒素及びその化合物試験結果 (kp5.0R)

	単位	基準値	試験結果	判定
溶出量調査	mg/l	0.01以下	0.027	NG
含有量調査	mg/kg	150以下	25	OK

※その他の箇所はすべて基準値以下

(3)環境面

豊平川下流の自然環境について特筆すべき事項を以下に示す。

- ・高水敷が採草地として利用。河岸には河畔林が繁茂しているが、ほとんどがヤナギ類。

- ・厚別川から下流においては、オジロワシの飛来が確認されている。草地には草原性のヒバリ、ホオアカ、ノビタキ、オオジュリン、コヨシキリなどが見られる。
- ・石狩川合流点の右岸には、樹林に囲まれた湖沼があり、ヤチウグイ、エゾトミヨ、エゾホトケなどの魚類やアオジ、カワラヒワ、シジュウカラなどの鳥類が確認されるなど、生物の種類が豊富で多様な生態系を有している。なお、豊平川下流（合流点～雁来大橋）で確認されている主な生物について表-2に示す。

表-2 豊平川下流に生息する主な生物

種別	主な生物種
鳥類	オシドリ、ミコアイサ、ミサゴ、オジロワシ、オオワシ、オオタカ、ハイタカ、チュウヒ、ハヤブサ、クイナ、オオジシギ、ヒバリ、ホオアカ、ノビタキ、オオジュリン、コヨシキリ
魚類 8科22種	カワヤツメ、ヤチウグイ、エゾウグイ、エゾホトケドジョウ、イシカリワカサギ、イトヨ日本海型、エゾトミヨ
昆虫類	アオヤンマ、シオカラトンボ、セスジイトトンボ、アキアカネ、ハンノキハムシ、セスジアカガネオサムシ、ゲンゴロウ、コオイムシ、ゴマシジミ
両、爬、哺乳類	アマガエル、エゾアカガエル、オオアシトガリネズミ、エゾヤチネズミ
植物 草本類	ノダイオウ、ホザキシモツケ、ヒンジモ、ミクリ、タヌキモ、ナガボノシロワレモコウ、クサヨシ、カモガヤ、オオヨモギ
植物 高木類	エゾノキヌヤナギ、タチヤナギ、カワヤナギ、ヤマグラ、ツルウメモドキ

3. 下流部の整備計画について

豊平川下流部では、治水安全度の向上を図るため、流下断面を拡幅する計画である。断面設定にあたっては、①河道維持の観点から低水路部は拡幅せず高水敷を掘削。②掘削高については、現況の良好な湿原環境をリファレンスサイトとして、かつての湿原環境を復元するものとして設定。なお、掘削断面について図-4に示す。

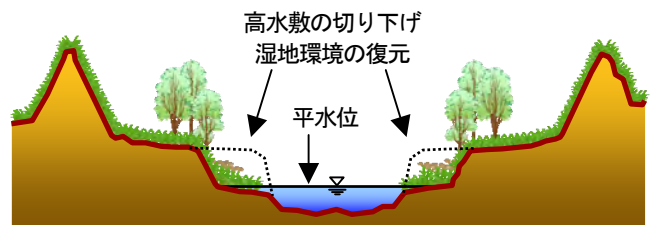


図-4 豊平川掘削断面

4. 掘削を実施する上での問題点

治水安全度の向上を図るため、上記の断面にて河道掘削する場合以下の問題点が生じる。

- ・全体掘削土量が約167万 m^3 となり、周辺の東雁来土地区画整理事業や堤防がほぼ完了している状況等から大

量の掘削残土が発生する。

- 掘削残土には、利活用が困難な泥炭や砒素を含む土砂が混在することから、処分費用等が生じる。

なお、発生する土砂については、一般的な利用用途について各土質区分における適用性を表-3に示す。

表-3 各土質区分における適用性

土質区分	対象層	評価
泥土C	Ap1	改良にコスト、時間が必要。
第3b種	Ac1、Asc 含水比 W<40%	ほぼ全ての用途に対してそのまま使用可能。
第4a種	As1-1、As1-2 粘性土中の砂質土部分	適切な土質改良が必要。
第4b種	Ac1、Asc 含水比 40%<W<80%	適切な土質改良が必要。 用途によっては改良にコスト、時間が必要。

5. 掘削土減量化の方策

過去に行われた軟弱地盤地帯における堤防盛土や護岸改修等により、数m規模の沈下が石狩川下流地区において発生し対策を行う箇所もある。掘削土の減量化については、これらの原因となり当該地においても厚く分布する泥炭層及び軟弱な粘性土層に着目し検討を行った。

(1) 対策工法について

地盤沈下の原因は土の圧密・排水によるものである。従来の軟弱地盤地帯における工事で課題となっていた沈下を利用し河道拡幅を図ることが当該箇所では最も効果的と考えた。圧密を促進させる工法としては、近年の実績と改良効果から「バーチカルドレーン工法」、「真空圧密工法」の2工法考えられるが、それぞれの特徴を以下に示す。

①バーチカルドレーン工法

最も一般的な工法であるが、沈下対象箇所に盛土の必要があるため、高水敷の施工には適さない。

②真空圧密工法

一般的な載荷盛土工法と比較し、少ない荷重で大きな沈下効果が得られる。シート式とキャップ付ドレーンの2タイプがあるが、シートの敷設・撤去等を考慮すると、当該地区においては「真空圧密ドレーン工法（キャップ付きドレーン）」による沈下促進が最も効果的な工法と

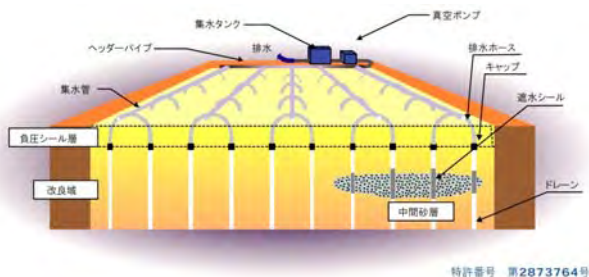


図-5 真空圧密ドレーン工法

判断した。なお、真空圧密ドレーン工法のイメージを図-5に示す。

(2) 沈下量の算出方法

想定される沈下量については、改良層の最終沈下量 ΔS_d 、シール層の最終沈下量 ΔS_s を式(1a)より求め、最終沈下量に圧密度を乗じて目標圧密度における沈下量 ΔS_i を式(1b)より求める。

$$\Delta S_d = \sum_i \Delta S_{di} = \sum_i \frac{c_c}{1 + e_{oi}} \cdot H_{di} \cdot \log \frac{P_{oi} + \Delta P_{vi}}{P_{ci}} \quad (1a)$$

ここに、 ΔS_d : 改良層の最終沈下量(m)

c_c : 圧縮指数

e_{oi} : 分割層の初期間隙比

H_{di} : 改良層の分割層圧(m)

P_{oi} : 分割層の初期土被り圧(kN/m²)

ΔP_{vi} : 分割層の作用負圧(kN/m²)

P_{ci} : 分割層の圧密降伏応力(kN/m²)

$$\Delta S_i = \sum_i \Delta S_{di} \cdot U_{ti}/100 + \sum_j \Delta S_{sj} \cdot U_{tj}/100 \quad (1b)$$

ここに、 ΔS_i : 改良終了時の沈下量(m)

ΔS_{di} : 分割された改良層の最終沈下量(m)

ΔS_{sj} : 分割されたシール層の最終沈下量(m)

U_{ti} 、 U_{tj} : 分割層の圧密度(%)

解析に用いる定数等については以下に示す。

- 土質定数は試験結果に基づき設定。(表-4参照)
- 作用負圧は既往検討資料から $\Delta P_v = 60 \text{ kN/m}^2$ とした。
- 当該箇所は豊平川の雪捨て場になっており、雪を上載荷重として活用することが可能である。雪荷重を盛土高3mのケースと5mのケースを設定した。
- 沈下時間沈下時間30日、60日、90日、120日時点の平均圧密度及び想定される沈下量を算出した。

表-4 解析に用いる土質定数

対象層の土質	単位体積重量 ρ_t kN/m ³	初期間隙比 e_o	圧縮係数 c_c	圧密係数 C_v cm ² /day
As1-1	17.5	-	-	-
Ac1	16.5	1.263	0.67	100
Ap1	11.0	9.618	5.23	180
Asc	17.0	1.193	0.49	-
As1-2	17.5	-	-	80
Ac2	16.0	1.666	0.70	-
As2	19.5	-	-	-

(3) 解析結果

沈下量の解析結果について取りまとめ以下に示す。また、 k_p 毎の平均圧密度推移と沈下時間90日経過時点の沈下量推移を図-6に示す。

- 左右岸とも掘削対象区間の中央部に大きな沈下量が発生する。
- 相対的に左岸側の沈下量が大きい傾向にある。

- ・左右岸ともに下流側の沈下量は小さい。
- ・左右岸ともに上流側の高水敷の標高が高く、沈下量が大きく算出されていないので減量効果は低い。
- ・左岸は、沈下時間90日で概ね全区間平均圧密度90%を満足する。
- ・右岸kp2.8より下流は、沈下時間90日の時点でも平均圧密度90%を満足しない。

(4) 真空圧密工法の実施範囲

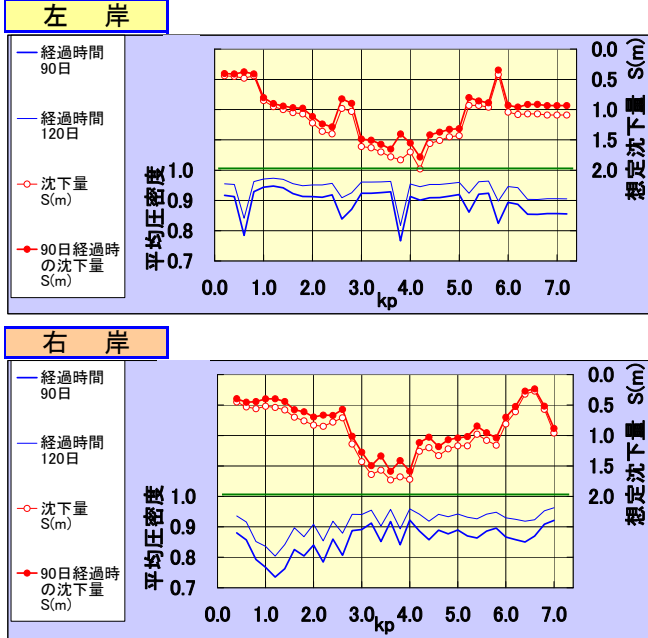


図-6 平均圧密度と沈下時間90日経過沈下量の推移

実施箇所の掘削深、想定沈下量を考慮すると、全区間を真空圧密工法により減量化することは、コスト面等から適切ではない。通常掘削した場合と減量化した場合を比較し課題を抽出した上で対応策を検討した。検討結果を図-7に示す。

真空圧密工法により減量化することが適した実施範囲については、河道拡幅区間kp0~kp7.0の内、左岸側ではkp2.4~kp5.4、右岸側ではkp1.4~kp5.4とした。

6. 真空圧密工法実施の効果

真空圧密工法実施により考えられる効果を以下に示す。

(1) コスト面等

真空圧密工法により掘削土については、約32%減量することが可能であり、その結果、通常の掘削工法に比べ約5%のコスト削減が可能となる。検討結果について表-5に示す。なお、検討条件は以下のとおり。

- ・同工法により、通常掘削で発生する土砂約V=1,640千m³の内、約V=540千m³を減量化。
- ・掘削土の運搬距離をL=50kmとして設定。
- ・含水比が低いAc1、Asc (40%<W<80%) については、土質改良が不要とし、第4b種が第3b種になると仮定。
- ・基準値を超える砒素が確認されているkp5.0(R)については、沈下により掘削断面以下にすることとし、搬出しない計画。

表-5 概算工事費の比較

		4.08m	3.10m	2.98m	2.80m	2.76m	5.60m	6.20m	
掘削工事に対する評価項目	掘削土量の評価	掘削深さ 3.70m	2.72m	2.58m	2.39m	2.34m	5.16m	5.71m	
	通常掘削	掘削土量 "多い"	掘削土量 "普通"				掘削土量 "とても多い"		
	土砂減容化の検討	対策の効果	0.5m程度沈下	0.5m以上、1.0m以下の沈下	1.5m以上沈下	1.0m以上沈下		0.5m程度沈下	
		減容化の程度	対応不可	1/3程度	掘削土砂の半減	1/3程度		対応不可	
	土砂物性	掘削標高H=2.0m以下 粘性土(Ac1,Asc) ... 第4b種				掘削標高H=2.0m以上 ... 第3b種			
	その他の問題	土砂改良(含水低下等)が必要				砒素基準以上確認		土砂改良(含水低下等)必要	
	掘削工事における問題点	泥炭、砂質土あり 大量の掘削土砂発生	減容化の効果中位	減容化の効果大 通常掘削深さは1.0m以下	減容化の効果中位		減容化の効果は期待できない 大量の掘削土砂が発生する		
	現時点での対応策(対策案他)	砂層の置換工事			砒素含有土砂 →掘削ライン以下に		通常掘削		
	右岸								
	左岸								
掘削工事に対する評価項目	掘削土量の評価	高水敷き標高 4.97m	4.10m	2.80m	3.06m	3.00m	4.05m	4.50m	
	掘削深さ	4.59m	3.72m	2.40m	2.65m	2.58m	3.61m	4.01m	
	通常掘削	掘削土量 "とても多い"	掘削土量 "多い"	掘削土量 "普通"			掘削土量 "多い"		
	土砂減容化の検討	対策の効果	0.5m程度沈下	1.0m以上沈下	1.5m以上沈下			1.0m程度沈下	
		減容化の程度	対応不可	1/4程度	掘削土砂の半減以上			1/4程度	
	土砂物性	第4b種						第3b種	第4b種
	その他の問題	土砂改良						問題なし	土砂改良
	掘削工事における問題点	減容化の効果は期待できない 大量の掘削土砂が発生する	減容化の効果中位	減容化の効果大 通常掘削深さは1.0m以下	減容化の効果中位		減容化の効果は期待できない 大量の掘削土砂が発生する		
	現時点での対応策(対策案他)	通常掘削	砂層の置換工事 通常の掘削工事 (+真空圧密による減容化)	真空圧密工法による土砂の減容化 掘削工事の併用			通常の掘削工事 (+真空圧密による減容化)		

図-7 現場条件と対策

工種	通常掘削		真空圧密+掘削	
	数量 (千m ³)	工事費 (割合)	数量 (千m ³)	工事費 (割合)
掘削	1,670	11	1,130	7
運搬	1,670	23	1,130	15
搬出処理	1,670	35	1,130	24
真空圧密	—	—	540	42
土砂処分費	50	5	—	—
土質改良	1,480	26	400	7
概算工事費 (比較)	—	100 (100%)	—	95 (95%)

※概算工事費を100とした場合のコスト縮減率

(2) 排出ガス削減効果

長期間に及ぶ掘削工事が周辺に与える影響として、土砂の掘削・運搬時に発生する建設機械の排出ガスが考えられる。排出ガスの算出項目として窒素酸化物(Nox)と浮遊粒子状物質(SMP)を対象とし、『道路影響評価の技術手法』に準拠し算出した。試算結果を表-6に示した。

排出ガスの総量は、建設機器の稼働日数に比例し増加するので、掘削に伴う必要期間に比例関係となる。

よって、真空圧密工法実施による掘削土砂量の減容化を実施した場合、排出ガスの削減効果は約30%程度と想定される。

表-6 排出ガス試算結果

作業項目	対策前		対策後	
	Nox	SMP	Nox	SMP
ダンプトラック走行 (土砂運搬)	18.2	0.95	13.0	0.68
建設機械稼働 (掘削機)	28.5	1.21	19.0	0.81
合計 (比率%)	46.7 (100%)	2.16 (100%)	32.0 (69%)	1.49 (69%)

※表中の単位 (t)

7. 試験施工について

真空圧密工法については、道路や築堤盛土工事には施工実績があるが、河道拡幅工事に適用した事例はない。このため、豊平川において現地試験を行い真空圧密工法の効果を検証することとした。なお、現地試験では以下の内容を確認する。

- ・単独工法実施時、雪荷重載荷時の沈下促進状況の確認。
- ・沈下影響範囲の確認。(平面的な沈下状況の把握。)
- ・掘削対象土砂の含水比低下状況の確認。

(1) 試験施工実施箇所

試験箇所は、泥炭層・粘性土層が厚く分布する範囲で、高水敷の利用状況を踏まえた結果、豊平川左岸kp4.2を選定した。

実施箇所について図-8に示す。

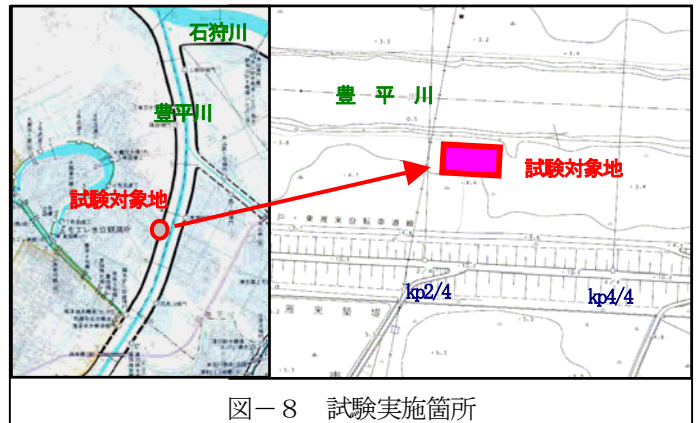


図-8 試験実施箇所

(2) 試験施工の内容

試験ヤードについては、ポンプ1台当たりで最大限対策可能な範囲として設定し50m×50mとした。ドレーンピッチを1.0mとし、圧密沈下対象層を砂層下位に分布する粘性土(層厚B=13.4m)とした。配置図及びドレーン材仕様について図-9に示す。

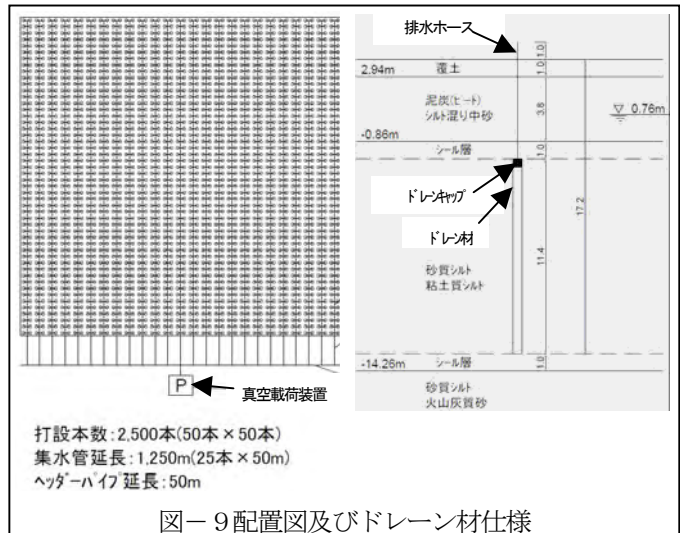


図-9 配置図及びドレーン材仕様

(3) 観測計画及び実施工程

観測計画については図-10、試験施工の実施工程については表-7に示す。

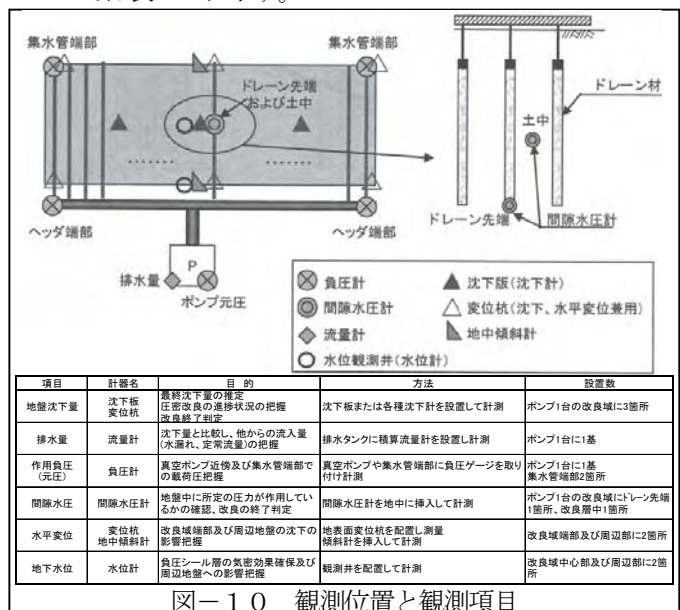


図-10 観測位置と観測項目

表-7 試験施工の実施工程

H21年	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月	4月
準備工								
事前調査	○							
施設設置								
真空圧密								
上載荷重 (雪荷重)								
計測								
事後調査							○	
施設撤去								

表-7に示す工程表にて真空圧密荷重は4ヶ月、上載荷重(雪荷重)は3ヶ月としている。これは、真空圧密装置の試運転と予備荷重を含めた期間である。

(4) 想定される沈下状況

試験施工区域にて発生する想定沈下量の経時変化を図-11に示した。

図-11に示す沈下量は、真空圧密工法+雪荷重(5.0m)作用させると仮定している。上記荷重を作用させた場合の最終沈下量は $S_c=198.0\text{cm}$ が求められており、圧密度90%時点の沈下量は $S=178.2\text{cm}$ となる。

試験施工における目標圧密度90%に達する期間は、試験開始後80日程度となる。泥炭層は沈下速度が速いため50日程度、粘性土層は沈下速度が遅い為100日程度を要する。表-7に示すように実際の試験荷重では、予備荷重を実施するので、沈下の促進は想定より速い可能性がある。試験施工では、現場での実現象を把握し、今後の掘削計画に用いる基礎資料取得を目的としている。

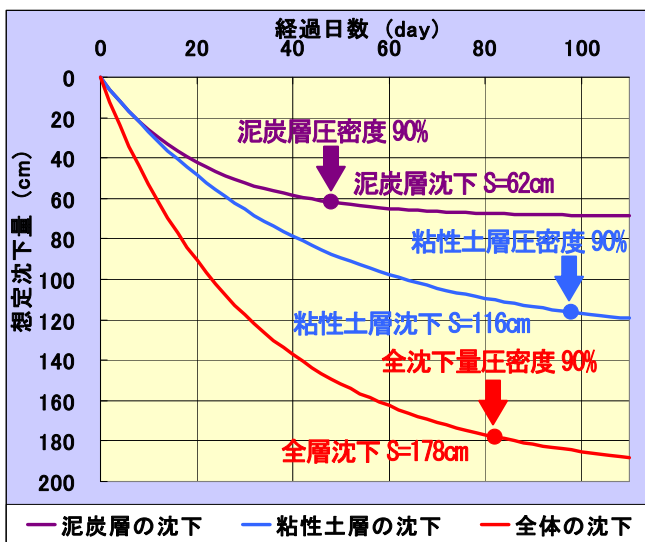


図-11 想定される沈下曲線

8. 考察

以上、現場状況、検討結果から以下について考察した。

- ・現段階においては、真空圧密工法により掘削土量32%

の削減と5%の事業費削減が可能となる。

- ・他事業と連携し、残土処分地を近場に設定することで、さらなる事業費の軽減が可能。
- ・真空圧密工法では、理論上最大で約2.0mさせることが可能であり、局所的な掘削土砂量を比較すると70%の掘削土砂量の削減が可能。
- ・含水比が低いAc1、Asc (40% $<W<80\%$) については、真空圧密工法の脱水効果により、第4b種が第3b種になると仮定したが、試験施工や施工時に適切に評価していく必要がある。
- ・掘削断面を変更(掘削深を浅く)することで、真空圧密工法の効果を増大させることが可能。
- ・掘削土の減量化を図ったとしてもなお1,130千 m^3 の掘削土が発生する。
- ・公共事業に活用が困難な泥炭については肥料として、近接農家、一般家庭への無料配布についても検討していく必要がある。
- ・この場合、土が肥料成分を保持するための保肥力を示す塩基置換容量(CEC)を測定しておく必要がある。
- ・建設機械から発生する排出ガスの削減量については、二次的な効果としてとらえている。事業実施上、定量的に評価するための手法を考える必要がある。

9. あとがき

現在、わが国における昨今の経済状況、少子高齢化等の社会情勢や今後増大すると思われる維持管理コストを鑑みた場合、河川改修等の公共事業費は益々抑制されていくことが予想される。しかしながら、2005年8月に発生したハリケーン・カトリーナでは、工事実施の主体となる工兵隊が事前の堤防整備が効率的と主張してにもかかわらず財源不足のため投資が抑制され、その結果、莫大な被害が生じたという事例もある。道都札幌を背後地に抱える豊平川の河川改修については、これらを教訓に着実に進めていく必要があるが、事業の実施においてはコスト削減策については、今後さらに検討を進めていくことが重要である。

河川行政に携わるものとして今回の検討をいかし、今後さらなるコスト削減策について取り組んでいく所存である。

参考文献

- 1) 真空圧密ドレーン工法—キャップ付ドレーンを用いた圧密工法—技術資料 (平成20年5月、真空圧密ドレーン工法研究会)
- 2) 建設発生土利用技術マニュアル (独) 土木研究所