

河川構造物設計のための軟弱地盤の 地盤条件把握の向上に向けて —柔構造樋門詳細設計を事例として—

札幌開発建設部 千歳川河川事務所 計画課 ○濱田 悠貴
古賀 文雄
丸山 和訓

千歳川流域の多くの地域は、泥炭や粘土等の軟弱地盤層が広がり、正確な地盤条件を踏まえた河川構造物の設計・施工を実施しなければ、施工後に沈下やクラック等の変状が発生する可能性がある。本報では、千歳川河川整備計画に基づく堤防整備で全面改築予定の近接2樋門の設計にあたり、土質定数設定の方法を整理し、両樋門下の地質調査結果の整合化により、地盤条件をより正確に捉え、設計に反映させた事例を報告するものである。

キーワード：施工・設計、軟弱地盤、土質定数

1. 千歳川流域の概要と河川整備計画

千歳川は、支笏湖を源とする幹川流路延長108km、流域面積1,244km²の石狩川の1次支川である。低平地である千歳川中下流域は、出水時には石狩川本川の高い水位の影響を長時間受け、内水・外水氾濫が頻繁に繰り返されてきた。そのため、平成17年度に策定された「石狩川水系千歳川河川整備計画」（平成26年度変更）において、千歳川及びその支川に対して、長時間の高水位に耐えうる堤防の整備（築堤延長約172km）、河道の掘削、及び遊水地群の整備（計6遊水地：洪水調節容量概ね5,000万m³）を実施することとした。そのうち、堤防の整備においては、石狩川本川と同様の堤防天端幅を確保し、堤防法勾配は4割としたため（図-1）、盛土造成に伴い、多数の樋門や排水機場等を改築することとなった¹⁾。

千歳川の中下流域は、石狩低地帯と呼ばれる地域に属し、第四期更新世中期には海域であった。陸地化した後は、河川の氾濫が繰り返されたことにより厚い粘土層が一带に広がり、また、植物が十分分解されずに堆積することで形成された泥炭層が偏在している。そのため、一带は道路や堤防等の土木構造物を設計・施工する上で非

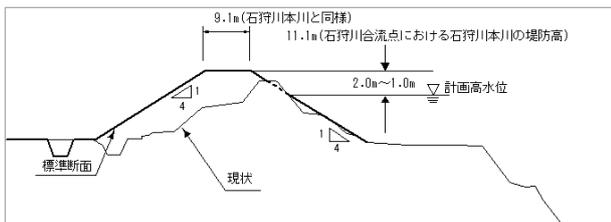


図-1 千歳川の堤防標準断面図 (KP00~425) ¹⁾

常に地盤条件の悪い地域となっている。加えて、地下深くには支笏火山が噴火した際の堆積物層、地表近くには近年の樽前山の噴火による透水性の高い火山灰層も存在するため、地質条件はさらに複雑となっている（図-2）。

このような地質で河川構造物の適切な設計と安全な施工を実施するには、直下の地盤特性を精度高く捉える必要がある。特に、泥炭層や粘土層の厚さと分布を把握し、土質定数を精度高く設定することは極めて重要となる。

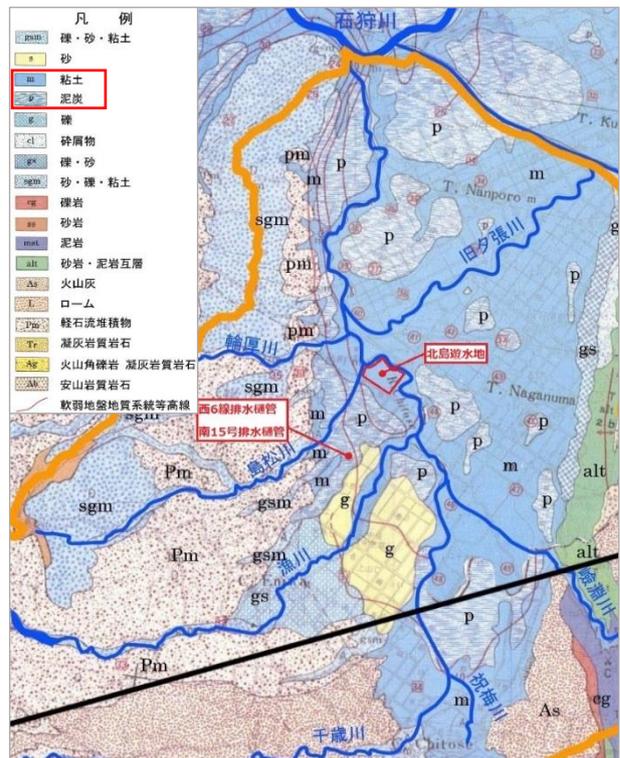


図-2 千歳川流域の地質図 ²⁾

2. 千歳川遊水地群における地盤変状の事例

千歳川遊水地群の1つである北島遊水地において、平成26年4月に排水門の施工に伴って設置されていた河川堤防の鋼矢板二重締切工直下の地盤が水平方向に滑り、鋼矢板二重締切工が傾くという変状が発生した（図-3）。

当工事にあたり、排水門施工位置の3箇所でもボーリング試験及び機械式コーン貫入試験（オランダ式二重管コーン貫入試験）を実施し、地下に厚く形成している粘土層の粘着力は、一軸圧縮試験結果を用いて 16.2kN/m^2 と設定した。その結果、鋼矢板二重締切工のすべり安定計算は最小安全率が1.547となり、1.20以上を満たしていた。

しかし、変状後の地質調査において、粘土層の粘着力が、施工前の値よりも小さい（ 11.0kN/m^2 ）箇所の存在がわかり、すべり安定計算を再度実施すると、最小安全率が0.92となった。変状前の調査実施量は、地盤条件を設定する上で十分であったと考えられたが、実際は一部分の低地耐力層が存在したために、十分な安全性を満たさず、施工結果が想定と大きく異なることとなった。

地盤は金属のような人工材料とは異なり、地点での特性のばらつきが大きいので、地盤条件の完全な把握は不可能に近いが、予測を誤ると、施工中の事故、工期の延長、事業費の増加、構造物の短期間での機能性の喪失等、多大な不利益を生ずる。そのため、地質調査・土質試験の確実な実施に加え、様々な工夫により、地盤条件の設定をより実際に近づけていくことが重要である。

3. 樋門詳細設計に向けた地盤条件の再検討

地盤条件を精度高く捉えるための取り組みとして、千歳川の支川である柏木川の、西6線排水樋管及び南15号排水樋管の樋門詳細設計における事例を紹介する。当該2樋門は、柏木川のKPI.7付近のそれぞれ左右岸に設置されている剛構造樋門であり（図-4）、両樋門間の距離は



図-3 北島遊水地における鋼矢板二重締切工の変状



図-4 西6線排水樋管と南15号排水樋管の位置関係

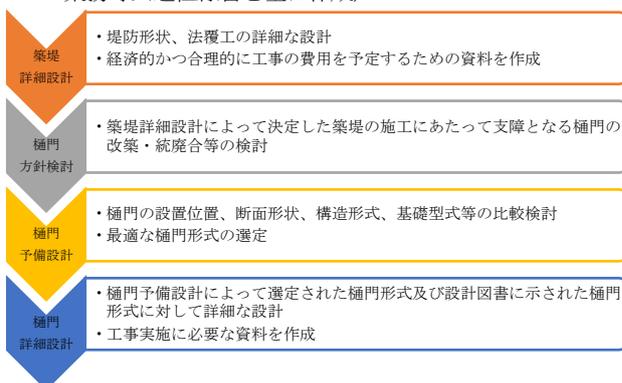
70m程度と非常に近い。千歳川河川整備計画に基づき、柏木川は堤防拡幅することとなり、樋門改築方針検討の結果、両樋門は柔構造樋門に改築することとなった。

樋門詳細設計（以下、詳細設計）では、樋門予備設計（以下、予備設計）で定まった基本的構造（基本諸元、形状、型式等）を基に構造計算を実施するものであるが、基礎地盤の沈下量及び沈下対策の検討についても、土質調査の追加実施を含めて、より詳細な検討を実施した（表-1参照）。当該地は、土層の堆積状況、年代、土地利用等から土質定数のばらつきが大きいので、地盤条件の検討においては、以下で論述する方法や工夫を適用することにより、より正確な地盤条件の設定を試みた。

4. 改築予定位置での地質調査結果の利用

両樋門の予備設計は全く独立に実施しており、地盤条件の設定方法として、南15号排水樋管は、予備設計段階

表-1 樋門の設計のフロー図（平成28年度版北海道開発局設計業務等共通仕様書を基に作成）



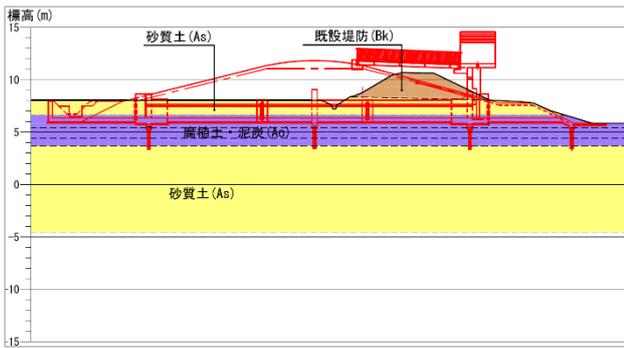


図-5 西6線排水樋管直下の地質縦断面図（予備設計段階）

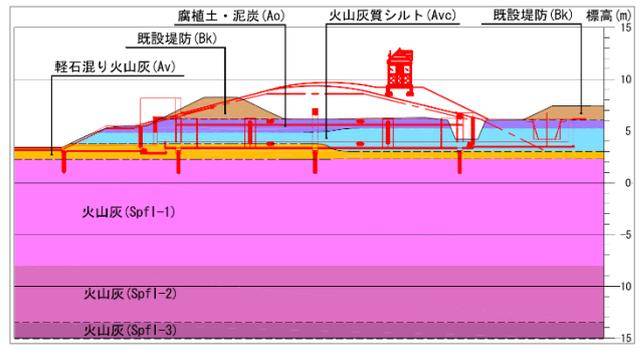


図-6 南15号排水樋管直下の地質縦断面図（予備設計段階）

で樋門改築予定位置においてボーリング試験を1本実施し、その試験結果を利用した。一方の西6線排水樋管は、樋門方針検討において、樋門周辺で実施した過去の複数の地質調査結果を基に土質定数を設定しており、予備設計でも同じ土質定数を使用した。予備設計では新設樋門の位置がまだ確定しないため、地質調査をむやみに多数実施するのではなく、周辺の参考のできる地質調査データを活用して、当該地の地盤条件の概要を把握することは、この段階においては妥当であると考え。

予備設計が完了すると、新設樋門の設置位置が概ね定まる。よって、当該位置でボーリング試験及び機械式コーン貫入試験を1樋門あたりそれぞれ3本ずつ（南15号排水樋管のボーリング試験に関しては、予備設計時の1本から新たに2本追加）実施することにより、ボーリング試験からより精度の高いN値、機械式コーン貫入試験から新たにコーン貫入指数（qc値）を確認することが可能となる。

5. 周辺地層の整合性の検討

予備設計段階の地盤条件の設定は、それぞれの樋門直下または近傍のボーリング試験結果を個別に利用していたため、地層の整合性が取れておらず、樋門周辺の地層の広がりや変化を把握するには不十分であった。図-5、図-6はそれぞれの樋門の予備設計段階での地質縦断面図で

あるが、土層分類は各地質調査を実施した際の判断によるため、同一のものと考えられる土層が異なる土層として分類した。また、地質調査を行った地点から離れた位置での地層の変化を捉えておらず、地質調査地点から離れた位置でも、各層がほぼ同じ厚さで水平方向に広がっていると推測した。

詳細設計段階においては、周辺の広域的な地質分布特性を確認し、地層の状態をより正確に捉えるために、2樋門直下の地質調査結果を照合することとした。その結果が図-7であり、地層の状態を俯瞰的に捉えることが容易になった。これにより、図-5においては砂質土（As）層と判断していた層を、図-6やその後実施した地質調査の結果等を踏まえ、火山灰（Av）層に統一した判断を取ることとした。また、軟弱地盤層である腐植土（Ao）層及び火山灰質シルト（Avc）層が広範に広がっているのではなく、局所的に分布していたことも確認できた。

前章及び本章を踏まえた、詳細設計段階での新設樋門直下の地層及びN値、qc値は表-2のようになった（土層分類は詳細設計時に判断したもので統一している）。代表qc値を新たに設定するとともに、新たなボーリング試験結果の活用と、地層の整合性の検討によって、代表N値を修正した。また、両樋門直下に存在する同じ地層であっても、各樋門における代表N値、代表qc値が異なっている場合があり、地盤条件をより正確に捉えるためには、対象位置直下で地質調査を行うことが必要であることを再確認することができる。

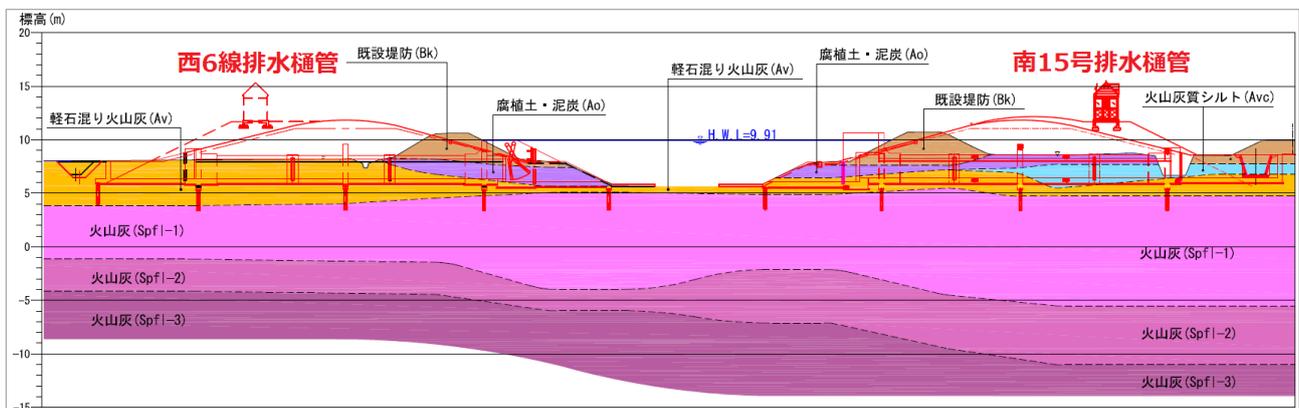


図-7 2樋門の箇所を一带とした地質縦断面図（詳細設計段階）

表-2 詳細設計段階での土層分類及びN値、qc値

| 西線排水樋管 | | | | |
|----------|--------|------|------------|------------------------------|
| 土層名 | 記号 | 代表N値 | | 代表qc値 [kNm ²] |
| | | 予備設計 | 詳細設計 | |
| 既設堤防盛土 | Bk | 2.5 | 30 | — |
| 腐植土 | Ao | 1.7 | 00 | 240 |
| 火山灰 | Av | 11.0 | 27 | — |
| 支笏軽石堆積物1 | Spfl-1 | | 142 | — |
| 支笏軽石堆積物2 | Spfl-2 | — | 380 | — |
| 支笏軽石堆積物3 | Spfl-3 | — | 500 | — |
| 南15号排水樋管 | | | | |
| 土層名 | 記号 | 代表N値 | | 代表qc値 [kNm ²] |
| | | 予備設計 | 詳細設計 | |
| 既設堤防盛土 | Bk | 3.0 | 30 | — |
| 腐植土 | Ao | 1.0 | 10 | 1380 |
| 火山灰質シルト | Avc | 1.0 | 10 | 520 |
| 火山灰 | Av | 3.0 | 40 | — |
| 支笏軽石堆積物1 | Spfl-1 | 12.0 | 150 | — |
| 支笏軽石堆積物2 | Spfl-2 | 34.0 | 360 | — |
| 支笏軽石堆積物3 | Spfl-3 | 50.0 | 500 | — |

本事例では、近接する2樋門で詳細設計を実施する必要があったために、2樋門の詳細設計を統合して実施することで、周辺地層の整合性を検討することができた。千歳川流域の他の支川においても、今後検討が必要な同様の樋門群は存在するため、これらの樋門の詳細設計を、樋門毎にすべてを独立して検討するのではなく、地盤条件の整合性を図った上で検討することは、基礎地盤をより正確に把握するために非常に有効であると考えられる。

6. 土質定数の設定方法の整理

検討に必要な土質定数の設定手法は、同じ土質定数を求める場合であっても、試験結果を利用する、示方書・マニュアル等に沿って推定値を算出する、一般値を利用する等、複数存在する。異なる手法によって算出結果が大きく異なる場合があり、状況に応じて適切な手法を選択しないと、実際の地盤条件を十分に反映できない可能性がある。そこで、本詳細設計では、土質定数の設定方法に優先順位を予め設定することで、地層間での整合性と、精度の高い土質定数の設定を図った。

(1) 優先順位設定の基本的な考え方

土質定数を算出する手法を分類すると、A. 原位置試験結果から算出、B. 室内試験結果から算出、C. 推定値を利用の3種類が挙げられる。Cは、地質調査で確認されるN値やqc値等を、相関関係を調べることにより設定された経験式にあてはめる方法であり、算出が比較的容易であるが、あくまでも代表値であり、ばらつきが非常に大きいため、土質試験結果(AまたはB)が優先され

る。また、Bは、輸送過程において地質調査現場で採取したサンプリング資料の攪乱を完全に防ぐことは困難であるため、原位置試験結果を優先する。よって、採用する手法の基本的な優先順位は、A、B、Cの順とする。

(2) 粘着力(c)

粘性土の粘着力は、下記の式(1)から式(3)のそれぞれの式を用いた3通りの算出方法が存在する。

$$c = q_u / 2 \quad (1)$$

$$c = q_c / 20 \quad (2)^3$$

$$c = 6.25N \quad (3)^4$$

$$c : \text{粘着力} [kNm^2] \quad q_u : \text{一軸圧縮強さ} [kNm^2]$$

$$q_c : \text{コーン貫入抵抗} [kNm^2] \quad N : N \text{値}$$

式(1)は、ボーリング試験により採取した不攪乱サンプルを、室内試験である一軸圧縮試験を実施することにより求められ、モール・クーロンの破壊基準に従った計算式であるため、信頼性は高い。式(2)は、機械式コーン貫入試験によって求められるqc値を利用した推定値の算出方法である。式(3)は標準貫入試験によって得られるN値を利用した推定値の算出方法であるが、軟弱地盤においてはN値が0~2程度になることが考えられ、丸め誤差が非常に大きくなることが考えられる。よって、式(1)、式(2)、式(3)の順に利用する優先順位を設定する。

(3) 内部摩擦角(φ)

砂質土の内部摩擦角の求め方は、① 不攪乱サンプルで三軸圧縮試験結果を実施した結果を利用する(室内試験)、② 標準貫入試験によって得られたN値から推定値を求める(式(4a)~式(4c)を利用)⁵⁾、の2通りが挙げられる。室内試験から求められる場合は推定値より優先するため、優先順位は①、②の順とする。

$$\phi = 4.8 \ln N_1 + 21 \quad (4a)$$

$$N_1 = (170N) / (\sigma'_v + 70) \quad (4b)$$

$$\sigma'_v = \gamma_{t1} h_w + \gamma'_{t2} (x - h_w) \quad (4c)$$

φ : 内部摩擦角[°]

σ'_v : 有効上載圧[kNm²]で、標準貫入試験を実施した時点の値

N₁ : 有効上載圧100kNm²相当に換算したN値。ただし、原位置のσ'_vがσ'_v<50kNm²である場合にはσ'_v=50kNm²として算出する。

N : 標準貫入試験から得られるN値

γ_{t1} : 地下水位面より浅い位置での土の単位体積重量[kNm³]

γ'_{t2} : 地下水位面より深い位置での土の単位体積重量[kNm³]

x : 地表面からの深さ[m] h_w : 地下水位の深さ[m]

(4) 変形係数(E_s)

粘性土及び砂質土の変形係数の求め方は、① (主に砂質・シルト層において) ボーリング孔内で測定する孔内水平載荷試験(LLT)から求める、② 一軸圧縮試験により変形係数(E₅₀)を求める、③ 標準貫入試験によって得られるN値から推定値を算出する(式(5)を利用)⁶⁾、の3通りが上げられる。優先順位は①(原位置試験)、

②（室内試験）、③（推定値）の順とすることとした。ただし、それぞれの手法から求められる数値の比較、上下層との値の比較により、優先する試験結果が異常値でないかを確認した上で値を最終決定する。

$$E_s = 700N \quad (5)$$

E_s : 変形係数[kNm²] N : 標準貫入試験から得られるN値

(5) 単位体積重量 (γ)

粘性土及び砂質土の単位体積重量は、① 現場密度試験結果（原位置試験）、② 土の湿潤密度試験結果（室内試験）、③ 一般値⁷⁾の順に採用することを基本とした。

(6) 土質定数の設定結果

以上の方法によって行われた土質定数の設定の中から、設計・施工計画において重要であり、かつばらつきの大きいAo層での具体例を2つ示す（表-3）。

西6線排水樋管直下のAo層の粘着力の設定においては、本章(2)で示した方法のうち、予備設計では式(3)を用いていたが、詳細設計では式(1)の結果を採用した。これにより、粘着力は予備設計段階の値から2割程度増加した値となった。また、代表N値が0であったため（表-2参照）、式(3)で求めた結果は0となり、軟弱地盤において、式(3)で粘着力を算出することは適さない場合があることがわかる。

南15号排水樋管直下のAo層の変形係数は、本章(4)で示した方法のうち、泥炭層であるために①のLLTを実施しておらず、予備設計・詳細設計ともに②の結果を採用したが、設定値は予備設計段階の値から6割以上増加しており、詳細設計での構造設計に大きな影響を与えることが考えられる。また、算出方法の異なる設定値と③の結果と比較すると、1割程度の違いがあった。

本章での土質定数の算出方法は、いずれも基準書やマニュアル等の標準的な方法であるが、実際の土質定数とは結果が多く異なる場合がある。採用する算出方法が、試験結果から直接計算される値であるか、推定式を用いて計算される推定値であるかを把握した上で使用することは、要求される精度を満たした土質定数を設定するために重要である。また、設定精度を高めるために、原位置試験や室内試験を適宜実施することも不可欠である。

表-3 算出された土質定数と算出に採用した手法

| 西6線排水樋管 | | | | | | |
|----------|------------------------------------|------|------|------|------|-------------|
| 土層 | 粘着力 (c) [kNm ²] | | | | | |
| | 予備設計 | | 詳細設計 | | | |
| | 方法 | 設定値 | 式(1) | 式(2) | 式(3) | 設定値 |
| Ao | 式(3) | 11.0 | 13.2 | 12.0 | 0.0 | 13.0 |
| 南15号排水樋管 | | | | | | |
| 土層 | 変形係数 (E_s) [kNm ²] | | | | | |
| | 予備設計 | | 詳細設計 | | | |
| | 方法 | 設定値 | ① | ② | ③ | 設定値 |
| Ao | ② | 500 | — | 820 | 700 | 820 |

7. 地盤条件の見直しによる検討への影響

第4章から第6章で記述した地盤条件の見直しの影響により、詳細設計において、設計や施工計画が予備設計から大きく変更となった項目を2つ記述する。

(1) 沈下に対する地盤対策工の検討

西6線排水樋管においては、予備設計段階では残留沈下量（即時沈下量と圧密沈下量の合計値）が最大68.7cmと推定された（図-8）。その結果、残留沈下量はキャンバー盛土を実施した場合の許容値（75cm）⁸⁾よりも小さいものの、圧密沈下量が大きいために、地盤対策工としてプレロード工法を実施することを検討した。

しかし、詳細設計段階では、残留沈下量の最大値が6.9cmとなり（図-9）、予備設計段階から大幅に下回った。これは、沈下量の大きいAo層が、予備設計段階では新設樋門予定位置全体に広がっていると推測されていたが（図-5参照）、詳細設計段階では堤外側の一部のみ偏在していることが判明し（図-7参照）、地盤に最も荷重のかかる樋門函体中央部を、沈下の少ないAv層が支えることがわかったためである。これにより、沈下対策の地盤対策工は不要と判断を変更した。

本事例では、地盤沈下量が予備設計段階より小さくなったために、過剰な地盤対策工が不要となったが、反対に大きくなった場合、予備設計段階での設定値のまま設計・施工を実施すると、施工時の安全性や、施工後の構造物の機能性を十分に確保できなかった可能性がある。

なお、南15号排水樋管の残留沈下量は、予備設計段階で6cmだったのに対し、詳細設計段階では7cmとなり、予備設計段階と詳細設計段階との大差はなかった。

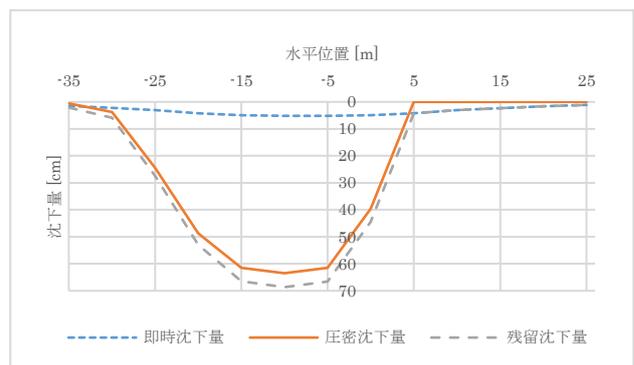


図-8 西6線排水樋管の地盤沈下量検討結果（予備設計段階）

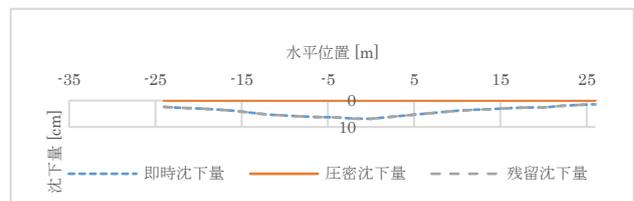


図-9 西6線排水樋管の地盤沈下量検討結果（詳細設計段階）

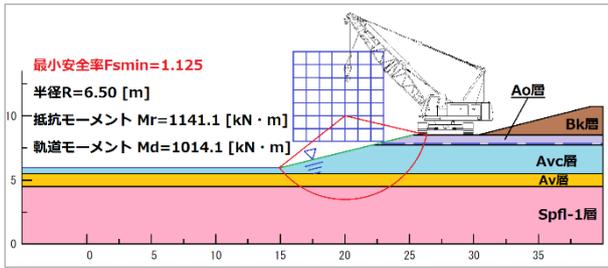


図-11 南15号排水樋管の掘削法面安定解析（予備設計段階）

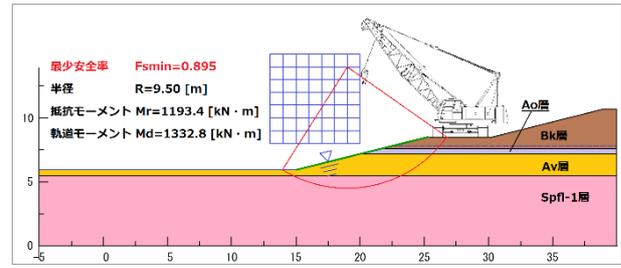


図-10 南15号排水樋管の掘削法面安定解析（詳細設計段階）

(2) 掘削時の土工の法面勾配の検討

既設樋門の撤去及び新設樋門の設置のためには、設置箇所での堤防の開削が必要であり、掘削法面の勾配は、堤防上に設置する重機も含めた荷重において安定するように設計しなければならない。

南15号排水樋管の法面勾配に関して、予備設計段階のボーリング試験の結果を使用すると、1:4.0の法面勾配において、最小安全率が1.125となった（図-10）。予備設計段階の精度においては、実際の最小安全率が1.2を上回るか下回るかは断定できず、掘削時の安全性を確保できているかを判断することは難しい。これに対し、詳細設計段階において、見直した土層分布と土質定数に基づいて安定計算を実施した結果、法面勾配1:4.0において最小安全率が0.895となり（図-11）、安全性の確保のために土留工を設置する必要があると判断した。

2つの解析を比較すると、図-10ではAvc層が厚く分布しているのに対し、図-11では存在しない。これは、予備設計段階のボーリング試験は、新設樋門函体の中心部（既設堤防より堤内側）で実施したため、20m程度の距離ではあるが、既設堤防天端直下の土層分布を把握できなかったためである。これにより、Avc層の粘着力による抵抗モーメントが小さくなり、最小安全率が予備設計段階より大きく下回ったと考えられる。また、土層を詳細設計段階に修正し、土質定数を予備設計段階のままに地盤安定計算を実施すると、最小安全率は0.837となり、土質定数の設定も解析結果に影響を与えている。

近隣箇所での試験結果や土質定数は、予備設計段階での参考値として用いることは有用であるが、詳細設計段階では、構造物の地盤条件を精度高く把握することに努めなければならない（なお、西6線樋門樋管での地盤安定計算では、法面勾配1:2.0において最小安全率が1.316となり、地下水位が南15号排水樋管より1.5m程度低いことが、結果が大きく異なった要因と考えられる）。

8. おわりに

千歳川中下流域のような、泥炭層・粘土層による軟弱地盤や火山灰層による複雑な地質の地域では、土木構造物を設計・施工する際に、地盤条件を可能な限り精度高

く設定することが非常に重要となる。複雑で均質でない地質条件の完全な把握は難しいものの、十分な精度を確保しなければ、構造物の施工や機能性に悪影響を与える。本事例においては、構造物直下での地質調査、周辺地盤の整合性、土質定数の設定方法の3つの手法を用いることで、構造物直下の土層の状態や、土質定数をより正確に設定し、その結果、詳細設計での設計や施工計画をより現状に即したものにすることができた。このような手法は、千歳川流域や他の軟弱地盤地域での土木構造物の設計においても適用可能な要素が多くあると考える。

現在、千歳川流域では、千歳川河川整備計画に基づく整備事業を実施中であり、今後も多くの河川構造物の設計・施工計画を実施していく予定である。いずれの設計・施工計画においても、地盤条件の設定は重要事項であるため、今後も本報で述べた手法を適切に実施して、精度の高い地盤条件の設定をしていかなければならない。

また、当事務所では現在、千歳川流域の過去の地質調査結果をデータベース化するとともに、樋門函軸方向以外の地質の状態も把握しやすくするため、各河川の両岸築堤毎に地質縦断図を作成しているところである。このように、本詳細設計で適用した手法以外にも、地域性や周辺環境等に応じて活用できる手法があれば、積極的に取り入れていくことを検討していくべきであると考えられる。

参考文献

- 1) 国土交通省北海道開発局：石狩川水系千歳川河川整備計画〔変更〕（平成27年）。
- 2) 国土庁土地局：土地分類図（昭和50年）。
- 3) 独立行政法人土木研究所寒地土木研究所：泥炭性軟弱地盤対策マニュアル。
- 4) 公益社団法人地盤工学会：地盤調査の方法と解説。
- 5) 公益社団法人日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅰ共通編Ⅳ下部構造編。
- 6) 一般財団法人国土開発技術研究センター：柔構造樋門設計の手引き。
- 7) 公益社団法人地盤工学会北海道支部：実務家のための火山灰質土。
- 8) 北海道開発局建設部河川工事課、独立行政法人土木研究所寒地土木研究所：泥炭性軟弱地盤における柔構造樋門設計マニュアル。