

カムクレイ系 FEM 解析による柔構造樋門検討事例について

About a flexible structure sluice consideration case by a Cam-clay system FEM analysis

共通事業本部 地質部

高橋 慶行

共通事業本部 地質部

大熊 浩明

柔構造樋門設計における基礎地盤の残留沈下量の推定は、これまで『柔構造樋門設計の手引き¹⁾』(以下「手引き」と称する)』に基づく計算手法によって行われてきた。このうち、泥炭性軟弱地盤のような大きな沈下・変位が予測される地盤に対しては、これらの予測精度の向上や設計法の合理化が課題とされてきた。これを受け、平成 25 年 4 月に『泥炭性軟弱地盤における柔構造樋門設計マニュアル²⁾』(以下「マニュアル」と称する)』が発刊され、残留沈下量の推定方法として、カムクレイ系 FEM 解析による地盤解析が実施されることとなった。本稿では、「マニュアル」の概要を示すとともに、カムクレイ系 FEM 解析の事例について紹介するものである。

1 はじめに

柔構造樋門とは、樋門本体を函軸たわみ性構造(柔構造)とし、その基礎を柔支持基礎とすることで樋門本体が地盤の沈下分布に追従できる構造(図 1.1)であり、これにより函体底板下の空洞化発生を抑制し、周辺堤防への悪影響を最小限に抑えようというものである。

これまでの柔構造樋門設計における基礎地盤の残留沈下量は、「手引き」に基づく計算手法(以降、「従来法」と称する)により、即時沈下量と圧密沈下量の和として推定(図 1.2)され、これにより樋門の構造形式が決定される。

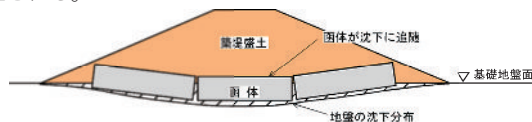


図 1.1 柔支持基礎の概念図

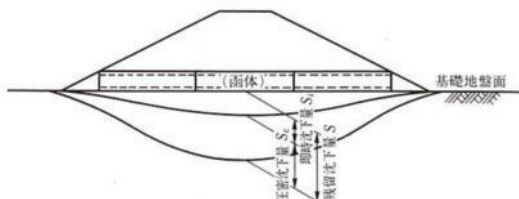


図 1.2 地盤の残留沈下量の分布例¹⁾

「従来法」は、これまで北海道の泥炭性軟弱地盤に対しても数多くの設計・施工が実施されている。その一方で、当該地盤のような超軟弱地盤に対しては、樋門構築に伴う大きな沈下・変位が発生することから、沈下抑制対策(地盤改良)に要する建設コストやライフサイクルコスト(LCC)の問題、対策による樋門直下や周辺地盤の剛性化に伴う靱性の低下、樋門周辺地盤の沈下・変位の予測精度向上が課題とされてきた。このことから、「マニュアル」では、上記課題の対応策としてより

高精度な解が期待されるカムクレイ系 FEM 解析手法を用いた地盤解析が実施されることとなった。本稿では、「マニュアル」の概要を示すとともに、カムクレイ系 FEM 解析の事例について紹介するものである。

2 マニュアルの概要

2.1 適用範囲について

樋門設計における適用フローを図 2.1 に示す。これまで適用されていた「手引き」では、残留沈下量 5cm 内外で直接基礎と柔支持基礎に分類され、直接基礎に対しては、「手引き」による剛構造樋門設計、柔支持基礎に対しては、残留沈下量に応じた地盤対策工(キャンバー盛土など)が検討・適用されていた。

平成 25 年 4 月に発刊された「マニュアル」では、柔支持基礎に対し残留沈下量 50cm 内外で解析に用いるマニュアルが選定される。「手引き」による計算手法により、50cm を下回る残留沈下量が想定される場合は、「手引き」による柔構造樋門設計、50cm を上回る場合は、「マニュアル」に基づくカムクレイ系 FEM 解析を実施し、残留沈下量を検討する^{*}。

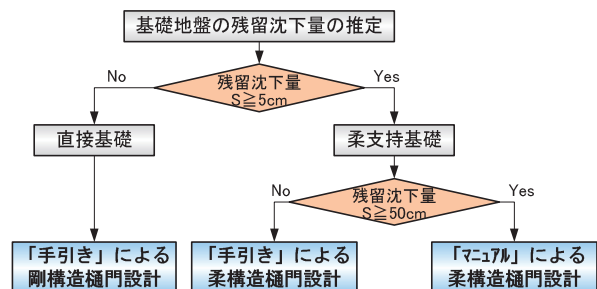


図 2.1 樋門設計の適用フロー

※北海道開発局による適用範囲³⁾(H27.3 現在)

2.2 マニュアルの特徴について

柔構造樋門設計における基礎地盤の残留沈下量を求める上での検討条件について、「手引き」と「マニュアル」の違いを表 2.1 に示し、以下に概要を示す。

表 2.1 残留沈下量検討における両マニュアルの主な違い

| 項目 | 柔構造樋門設計の手引き(従来法) | 泥炭性軟弱地盤における柔構造樋門設計マニュアル |
|-------------------------|------------------------------|--|
| 残留沈下量の許容値 | キャンバーなし 30cm キャンバーあり 50cm | 45cm 75cm |
| 地盤の沈下・変位の推定法 | 即時沈下 圧密沈下 | 弾性理論解(1次元) Terzaghiの圧密式(1次元) |
| 地盤対策工 | 許容値以下 許容値超過 | キャンバー盛土 地盤改良など(置換工法, プロード) |
| 樋門縦断方向の解析(残留沈下量, 側方変位量) | 単独ケースによる算定 | 基本ケース(1ケース)+ 変動幅を持たせた複数ケース(6~8ケース)による算定 |

(1) 残留沈下量の許容値

「マニュアル」では、残留沈下量の許容値が従来法による値(30cm(キャンバーなし))から50%増しの45cm(キャンバーなし)に引き上げられている。これまでの樋門設計における設計思想は、沈下量を小さく抑える傾向であったが、一般堤防区間との沈下差が大きくなることによる性能差(剛性化に伴う靱性の低下など)が課題とされてきた。「マニュアル」ではこれが考慮され、許容値を引き上げることで一般堤防区間との性能差を小さくし、両者の整合性を高めている。

また、樋門周辺地盤の沈下・変位対策工には、キャンバー盛土を優先採用するものとし、その盛土高は、残留沈下量に応じて以下の値を最大としている(表 2.2、図 2.2)。

表 2.2 キャンバー盛土高の最大値

| 残留沈下量 | キャンバー盛土高の最大値 | 内訳 |
|--------|--------------|--------------------------------|
| 75cm未満 | 30cm | 不同沈下補償分: 30cm |
| 75cm以上 | 50cm | 不同沈下補償分: 30cm 剛体沈下補償分: 20cm |

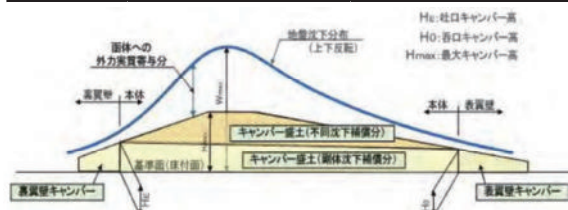


図 2.2 キャンバー盛土の計画図²⁾

(2) 地盤の沈下・変位の推定法

「マニュアル」では、泥炭性軟弱地盤における地盤挙動の予測解析には、カムクレイ系FEM解析を用いることを原則としている。解析の一般的なフローおよび沈下経時変化の概念図を図 2.3 に示す。

(3) 地盤対策工

樋門周辺地盤の地盤対策工は、隣接する一般堤防区間との整合性に配慮し、以下に示すような考え方を基に、できるだけ柔構造で設計することが重要である。

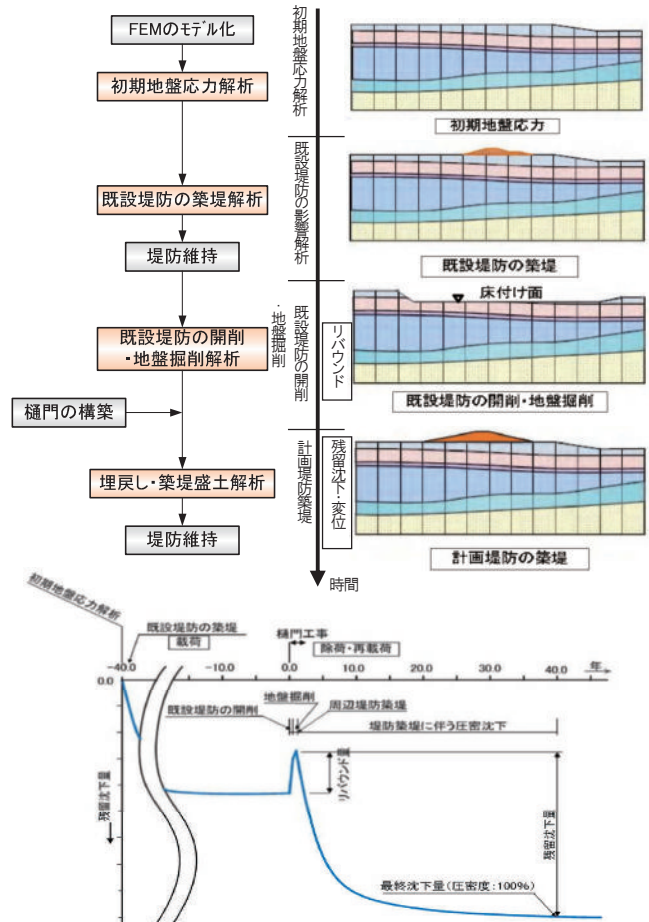


図 2.3 カムクレイ系FEM解析フロー(上) および地盤沈下経時変化の概念図(下)²⁾

【地盤対策工の考え方】

- ①沈下補償対策としてのキャンバー盛土の優先採用
- ②沈下抑制対策としてのプレロード工法の優先採用
- ③本体構造形式・地盤の不同沈下分布に適合する適切なスパン割り・継手の採用

(4) 樋門縦断方向の解析

「マニュアル」では、樋門本体の縦断方向の解析に用いる地盤変位荷重は、残留沈下量が許容値以内となる基本的な1ケースのほか、解析パラメータの変動幅を考慮した6~8ケース程度の地盤の沈下・変位分布を算定し、この組み合わせの中から樋門本体の縦断方向の解析において、計算上最も不利になるケースを抽出して、これに函軸方向の区間毎に設定された地盤反力係数を乗じて設定する。

地盤の沈下・変位分布には、以下に示す多様な変動要因があると推定されるため、これらを考慮することで樋門本体および周辺地盤の安全性の確保を図る。

【地盤の沈下・変位に起因する変動要因】

- ①地盤の物性値の不均質さによる空間的なばらつき
- ②土層分布推定時(少多数のボーリング調査結果による推定)における技術者判断の個人差
- ③FEM解析モデル(土質断面図によるモデル化)と土質力学上の物性値変化(深度方向)の相違
- ④沈下終息期における残留沈下量の推定誤差

なお、パラメータを変動させる土層は、沈下が卓越する1~2層とし、変動させるパラメータは、『泥炭性軟弱地盤における柔構造樋門設計マニュアル計算事例²⁾(以下「計算事例」と称する)』を参考に抽出する。

3 カムクレイ系 FEM 解析の検討事例

3.1 検討フロー

検討手順をフロー図に示す(図3.1)。

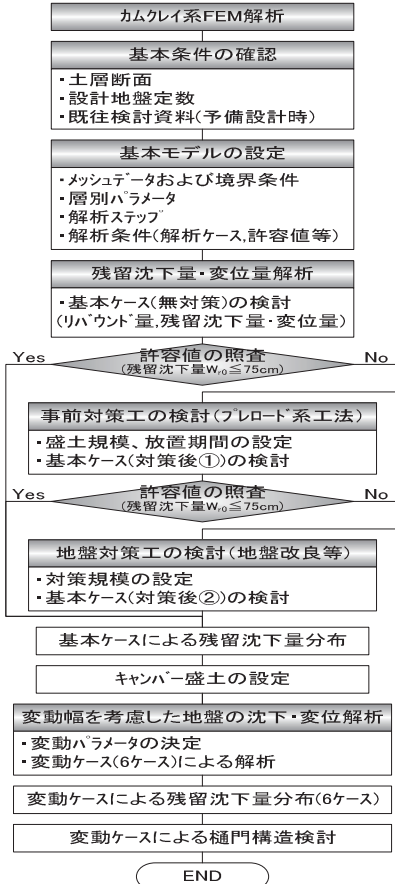


図 3.1 カムクレイ系 FEM 解析検討フロー

3.2 基本モデルの設定

(1) メッシュデータおよび境界条件

断面形状および土層構成のモデル化は、「計算事例」を参考に以下のように設定した(図3.2)。

【解析幅】軟弱層厚の2~3倍程度を満足するものとした。
 【深さ方向】沈下対象層の下端まで(Ac2層まで)を満足するものとした。
 【メッシュ幅】解析結果を厳密に照査する堤体および開削範囲の部分はメッシュ幅を細かくし、離れるに従いメッシュ幅を広げた。

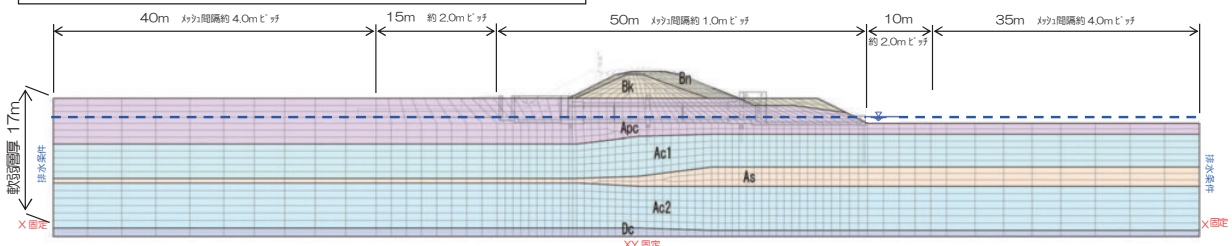


図 3.2 メッシュデータおよび境界条件設定例

(2) 層別パラメータ

層別の物性データ(パラメータ)については、「マニュアル」を参考に設定した(表3.1、図3.3)。

表 3.1 カムクレイ系の構成モデルに必要な土質パラメータ²⁾

| 項目 | 地盤物性値 |
|----------|--|
| 圧密・せん断挙動 | 圧縮指数 λ 、膨張係数 κ 、限界状態応力比 M 初期間隙比 e_0 、ホアゾン比 v |
| 地盤の初期応力 | 有効土被り圧 σ_{v0} 、静止土圧係数 K_0 |
| 時間依存 | 初期透水係数 k_0 、透水係数の変化係数 C_k |

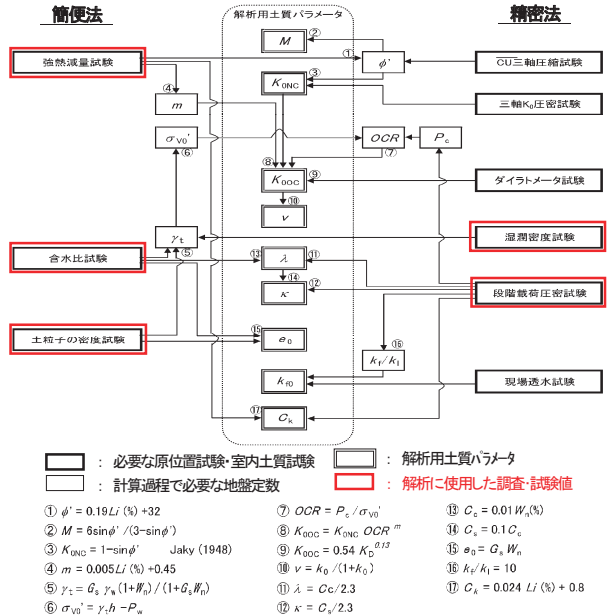


図 3.3 泥炭地盤における土質パラメータの設定法²⁾

(3) 解析工程の設定

解析の工程は、「計算事例」に示される工程表を参考に以下のように設定した(表3.2、図3.4)。

表 3.2 解析工程設定例

| 工程 | 増分時間(日) | 累積日数 | 分割数 |
|---------|---------|--------|-----|
| 初期応力解析 | 1 | 1 | 1 |
| 現況堤防築堤 | 100 | 101 | 50 |
| 現況堤防20年 | 7300 | 7,401 | 30 |
| 現況堤防撤去 | 5 | 7,406 | 30 |
| 基礎地盤床掘 | 10 | 7,416 | 10 |
| 樋門施工 | 50 | 7,466 | 30 |
| 基礎地盤埋戻し | 10 | 7,476 | 50 |
| 計画堤防盛土 | 10 | 7,486 | 50 |
| 樋門維持20年 | 7300 | 14,786 | 30 |

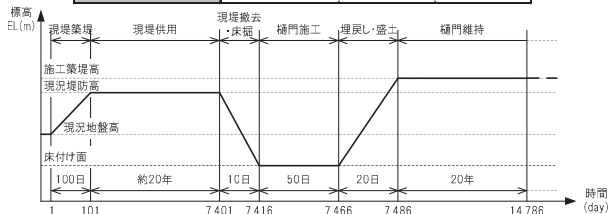


図 3.4 解析工程概念図

3.3 解析結果

前節 3.2 に示した解析モデルによる解析結果を表 3.3 に示し、概要を以下に述べる。

表 3.3 現況地盤解析結果

| 解析種別 | 地盤モデル | ① | 土層横断面による沈下量 (cm) | 再現率 | | | |
|--------|----------|-----------------|---------------------|------|---------------------------|-----------------------|---------------------------|
| | | 既設盛土による沈下量 (cm) | (cm) | | | | |
| 現況地盤解析 | 修正カム・クレイ | | 67.8 | 68 | 99.7% | | |
| | | ② | リバンド量 S_{re} (cm) | ③ | 維持20年沈下量 S_f (cm) | ④ | 残留沈下量 W_{r0} (cm) (②+③) |
| | | | 5.5 | 60.6 | 66.1 | | |
| | | ⑤ | キャンパ量 S_{ca} (cm) | ⑥ | 残留沈下量 W_{rc} (cm) (④-⑤) | 許容残留沈下量 W_{ra} (cm) | 判定 |
| | | | 30 | 36.1 | 45 | OK | |

【解析結果概要(現況地盤解析)】

- ①既設盛土による沈下量(再現検証結果):
解析結果より最大 68cm となり、土層横断面による沈下量 68cm とほぼ同値(再現率約 100%)となった。
- ②リバンド量: 5cm 程度となった。
- ③完成後～維持 20 年沈下量: 最大 61cm となった。
- ④残留沈下量: ②と③の合計より最大 66cm となった。
- ⑤キャンパ盛土高の最大値(30cm)を考慮した場合の⑥残留沈下量($W_{rc}=36\text{cm}$)は、許容値($W_{ra}=45\text{cm}$)以内となるため、対策は不要となった。

3.4 変動幅を考慮した沈下・変位解析結果

同解析モデルに対し、パラメータの変動幅を考慮した沈下・変位解析を行った。変動させるパラメータは、「計算事例」を参考に以下の項目を抽出した。解析結果を表 3.5 に示し、概要を以下に述べる。

【変動幅を考慮する土層】図 3.2 より圧密沈下対象層 (Apc, Ac1, Ac2) とした。
【変動させるパラメータ】表 3.4 に示す。

表 3.4 変動パラメータ一覧

| バラつき考慮項目 | 解析結果への影響 | 対象層 | 検討CASE | |
|-----------------|----------|-------------------|--------|-------------------|
| 透水係数k | 変位時間 | Apc Ac1 Ac2 | 1-1 | k×10 |
| | | | 1-2 | k×0.1 |
| 塑性指数Ip (強熱減量Li) | 地盤強度 | | 2-1 | Ip(Li)-10 |
| | | | 2-2 | Ip(Li)+10 |
| 圧縮指数Cc | 変位量 | | 3-1 | C _{cmin} |
| | | | 3-2 | C _{cmax} |

表 3.5 変動幅を考慮した残留沈下量検討結果

| バラつき考慮項目 | 対象層 | 検討CASE | ① | ② | ③ |
|----------|-----|--------|------------|---------------------|---------------------------|
| | | | リバンド量 (cm) | 維持20年沈下量 S_f (cm) | 残留沈下量 W_{r0} (cm) (①+②) |
| - | - | 基本 | 5.5 | 60.6 | 66.1 |
| 透水係数 k | Apc | 1-1 | 7.9 | 62.3 | 70.2 |
| | | 1-2 | 4.0 | 63.6 | 67.6 |
| 塑性指数 Ip | Ac1 | 2-1 | 5.5 | 67.6 | 73.1 |
| | | 2-2 | 5.1 | 57.4 | 62.5 |
| 圧縮指数 Cc | Ac2 | 3-1 | 4.2 | 48.1 | 52.3 |
| | | 3-2 | 6.0 | 70.1 | 76.1 |
| 平均値 | | | 5.5 | 61.4 | 66.8 |
| 標準偏差 | | | 1.30 | 7.23 | 7.83 |
| 変動係数(%) | | | 23.8% | 11.8% | 11.7% |

【解析結果概要(変動幅を考慮した場合)】

- ①リバンド量: 4~8cm (変動係数 24%) となった。
- ②完成後～維持 20 年沈下量: 48~70cm (変動係数 12%) となった。
- ③残留沈下量(①と②の合計): 52~76cm (変動係数 12%) となった。

4 従来法とカムクレイ系 FEM 解析結果との比較

ここでは、従来法およびカムクレイ系 FEM 解析それぞれで算出した残留沈下量との比較を行った。

比較結果の一覧を表 4.1 に示す。対象樋門は 3 樋門であり、いずれも N 値 1~4 程度の軟弱な泥炭層(Ap)あるいは粘性土層(Ac)が沈下対象層となっている。これによると、A 樋門では、従来法による残留沈下量 46cm に対し、カムクレイ系 FEM 解析の残留沈下量が 66cm と約 4 割増加する結果となった。一方、B、C 樋門では、両者の残留沈下量がほぼ同程度となった。

表 4.1 従来法(手引き)とカムクレイ FEM 解析(マニュアル)比較結果

| 樋門 | 沈下対象層 | N値 | 含水比 W_n (%) | 軟弱層厚(m) | 残留沈下量(cm) | | 比較結果 |
|-----|---------|-----|---------------|---------|-----------|-------|------|
| | | | | | 手引き | マニュアル | |
| A樋門 | 泥炭(Ap) | 2 | 180 | 17 | 46 | 66 | 1.43 |
| | 粘性土(Ac) | 4 | 45 | | | | |
| B樋門 | 泥炭(Ap) | 1 | 200 | 10 | 48 | 47 | 0.98 |
| | 粘性土(Ac) | 3 | 70 | | | | |
| C樋門 | 粘性土(Ac) | 1~2 | 65 | 16 | 84 | 84 | 1.00 |

5 比較結果の考察と今後の展望

一般にカムクレイ系 FEM 解析では、2 次元(水平方向、鉛直方向)の変位量が得られることから、従来法に比べ沈下量が大きく出る傾向にあることが指摘されている。本稿では 3 樋門による比較を行ったが、上記のような傾向がみられたのは 1 樋門のみであった。この理由としては、河道形状(樋門吐口側)のモデル化による影響や拡幅盛土の位置(堤外または堤内)による影響などが現時点で考えられるが、従来法とカムクレイ系 FEM 解析結果の比較検証に際しては、今後更なる検討事例を積み重ねることが必要である。

「マニュアル」でも述べられているように、カムクレイ系 FEM 解析による設計手法が軌道に乗るためには、多くの試行錯誤が必要である。今後は、同様の検討事例を収集するほか、施工時の計測値と FEM 解析による計算値との比較検証を行い、設計へフィードバックさせることでより解析精度を高めていくことが重要である。

【引用文献】

- 1) (財)国土技術研究センター 「柔構造樋門設計の手引き」/H10.11
- 2) 北海道開発局 建設部 河川工事課、(独)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および計算事例」/H25.4
- 3) 北海道開発局 建設部 河川工事課 「泥炭性軟弱地盤における柔構造樋門設計マニュアル 意見・質問等に対する回答」/H25.4.1 版