

津波遡上区間に設置される樋門の液状化対策事例

REPORT

技術本部 水工部
櫻井 啓多



櫻井 啓多

概要

樋門耐震性能照査では、液状化判定により液状化が推定される土層を対象として、築堤変形解析（FEM解析）を実施することで液状化による沈下量を算出、沈下後の築堤高と外水位を比較し堤内地に河川水が氾濫しないか照査を行う。津波対策を実施する河川において、津波遡上区間に設置される樋門では、津波遡上水位を照査対象水位とすることで、沈下後の築堤高が外水位を下回ってしまう場合があり、沈下抑制対策が必要となる。

本稿では、津波遡上区間に設置される液状化対策を検討した樋門設計を事例として、液状化層厚が著しく厚いケースにおける築堤変形解析の事象に対して、対策方法や改良範囲の設定方法等について留意点を交えて紹介する。

キーワード：●樋門 ●耐震設計 ●FEM解析 ●津波遡上対策 ●液状化対策 ●地盤改良

1. はじめに

本事例の対象樋門は、北海道内の某市町村を流れる一級河川B川に設置されている。樋門設置箇所における特徴を以下に略記する。

- ①河口から4.7km地点に位置し津波遡上区間に該当するため、耐震性能照査においては津波遡上水位（>平常時の最高水位）が照査対象となる。
- ②液状化層厚が約20m存在し、液状化によって著しい地盤沈下が生じる。

本事例は、上記条件①②が重なったことで、液状化による沈下後の築堤高が照査外水位を下回り、液状化による沈下抑制を目的とした地盤改良の検討が必要となった樋門設計である（図-1）。

本稿では、液状化層厚が著しく厚いケースにおいて築堤変形解析の解析中に生じる課題とその対応策及び液状化対策方法や改良範囲の設定方法等について紹介する。

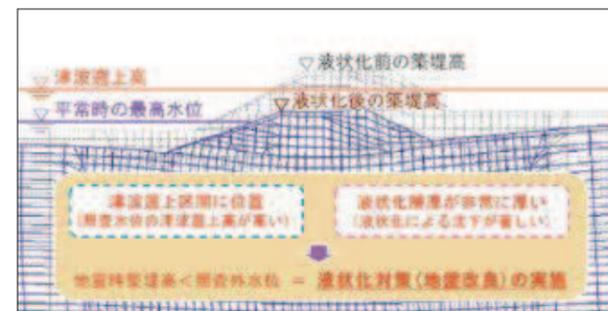


図-1 本事例の経緯および特徴

2. 無対策地盤における築堤変形解析の補正

変形解析は静的照査法（有限要素法を用いた自重変形解析）により行った。静的照査法は、地震による堤防沈下のメカニズムを液状化した土層の剛性低下によるものと仮定して、沈下量を求める解析手法である。

静的照査法では、液状化により低下した剛性は、ある一定のひずみを超えると急激に回復、それに伴って沈下が収束すると考えられている（図-2）。

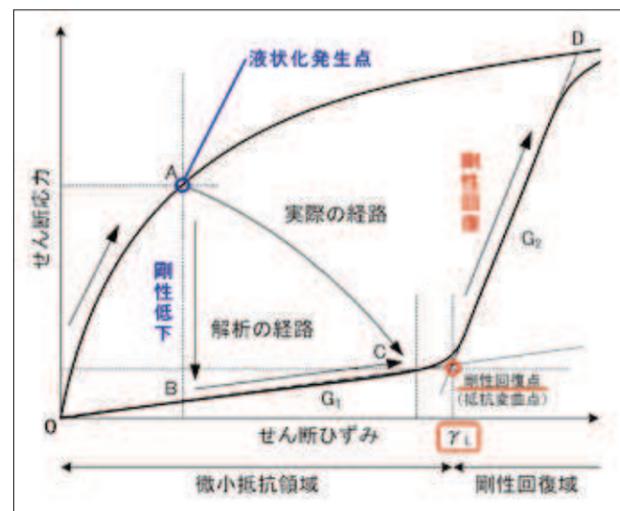


図-2 せん断応力とせん断ひずみの関係

出典：「河川堤防の液状化対策の手引き¹⁾」より抜粋、一部加筆

当該箇所の液状化判定結果を踏まえ、無対策地盤における築堤変形解析を行った結果、沈下後の変形図は図-4：CASE-1となった。液状化層厚が著しく厚いケースにおいては、地盤が波打っているような非現実的な解析結果となる場合があり、液状化による沈下量は液状化層厚に大きく支配されると判断した。

同図のような変形解析結果は、静的解析ソフトウェアで採用されている構成式の「割り切り」による不当な剛性低下が要因であり、解析結果の精度を高めるため検討条件に補正を行う必要がある。そこで本事例では、「現実ではどの程度の沈下まで起こり得るのか」という点に着眼し補正方法を検討した。

河川堤防の耐震点検マニュアル²⁾では、「既往の地震において堤防高の75%以上の沈下が生じた事例はなく、最

津波遡上区間に設置される樋門の液状化対策事例

低でも堤防高の25%は残存していたことが経験的に知られている」と記載されている（図-3）。

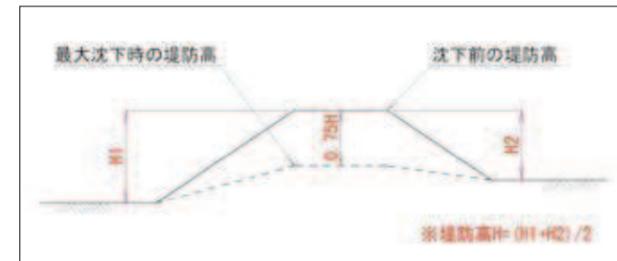


図-3 最大沈下量(堤防高の75%)の模式図

沈下量が堤防高の75%で留まるのは、堤体が液状化層にめり込むことで浮力が作用し、堤体の荷重と浮力が釣り合うためであり、図-4：CASE-1のような解析結果となるのは、この浮力の影響が静的照査法では考慮されていないことが原因である。

以上を踏まえ変形後の沈下量が基の堤防高の75%となるよう補正を行った。

堤防高の75%を超える沈下が生じる場合の補正方法については、関連する基準（河川堤防の液状化対策の手引き¹⁾）では明確な手法が示されておらず、疑似的に仮想バネをモデル化する方法があると記載されている。

ここでいう「仮想バネをモデル化」とは、浮力分のバネ値（剛性）を地盤のせん断剛性に加えることで強制的にせん断強度を上昇させることを指すため、地盤のせん断剛性を上昇させる方向性で検討を行った。

本事例では、静的照査法における「剛性回復点のせん断ひずみ： γ_L (%)」（図-2）に着目し補正を行うこととした。 γ_L は液状化により低下したせん断剛性が回復する境目

となるせん断ひずみであり、回復後のせん断剛性 G_2 (kN/m²) は γ_L に支配される（式-1）。

$$G_2 = 2000 / \gamma_L \dots \text{式-1}^{3)}$$

この γ_L の値は解析ソフト上では自動算出されていたが、現実の地盤では自動算出された値よりもひずみが小さい段階で剛性が回復しているのではないかと仮定、沈下量が堤防高の75%となる γ_L の値をトライアル解析することで、75%沈下時におけるせん断剛性を設定し沈下抑制を図った。

補正後の変形図は図-4：CASE-2となり、補正前と比べ変形が大きく抑制され、現実的な解析結果となった。

この解析結果を基に沈下後の築堤高と外水位の比較を実施、地震時築堤高が照査外水位を下回ったため、沈下抑制対策（地盤改良）が必要となった（図-5）。

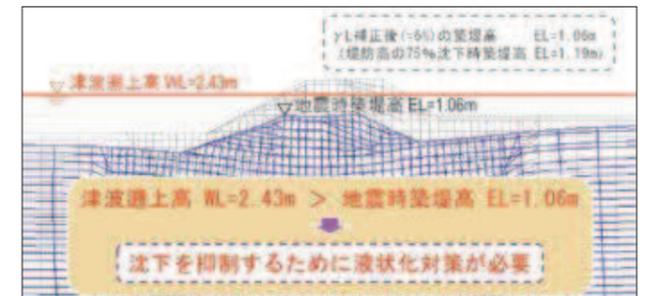


図-5 地震時築堤高と照査外水位の比較図

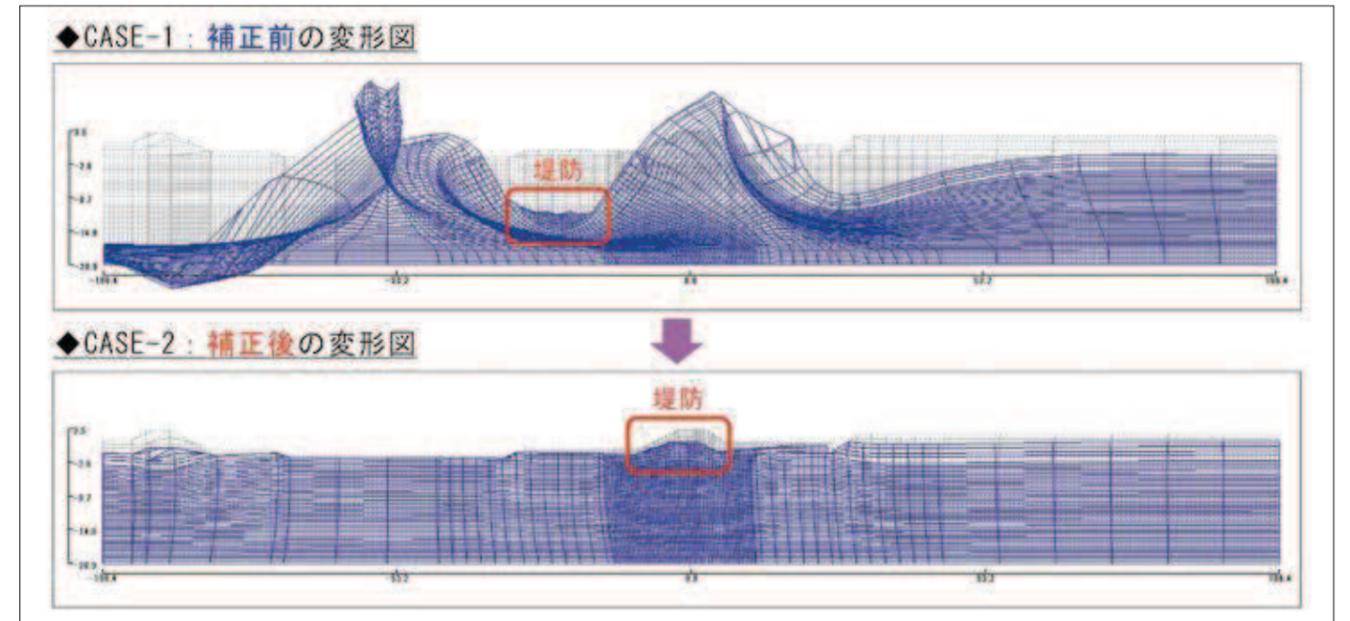


図-4 補正前後における変形図の比較

3. 地盤改良範囲の設定

改良工法については、地盤条件への適用性および樋門の残留沈下対策も兼ねる改良である点を考慮し、比較の実績の多い固結工法を採用した。

固結工法における改良範囲は、基準¹⁾では以下の範囲を推奨している。設定例は図-6となる。

- ①改良深度：液状化層全層を対象とし、支持層への一定以上の根入れ（1.0mまたは液状化層厚の0.1倍のうち小さい方以上）を加えた深度までを基本とする。
- ②改良範囲：堤防法尻直下を改良範囲に含めることを原則とし、改良幅は改良深度の0.6倍程度以上とする。

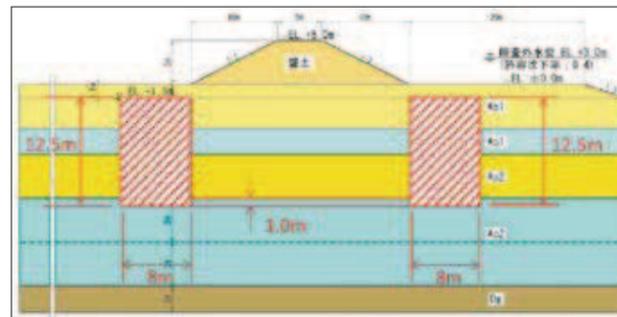


図-6 固結工法における改良範囲例

出典：『河川堤防の液状化対策の手引き¹⁾』より抜粋

基準¹⁾で推奨している範囲では、本事例のような液状化層厚20mの場合においては、改良深度が深くなるに比例して改良幅も広がっていくため、川表川裏法尻にそれぞれ最大12mもの改良幅が必要となる。

これにより、河川敷地が狭い場合等、用地の問題から施工困難となるケースが多くなると懸念される。

更に本事例においては、堤防背後に高压送電線が近接していることで、施工時の安全隔離が確保できないため、上記範囲における地盤改良が施工困難となった。

検討結果より、本事例では堤体直下地盤の改良を行うこととした（図-7）。

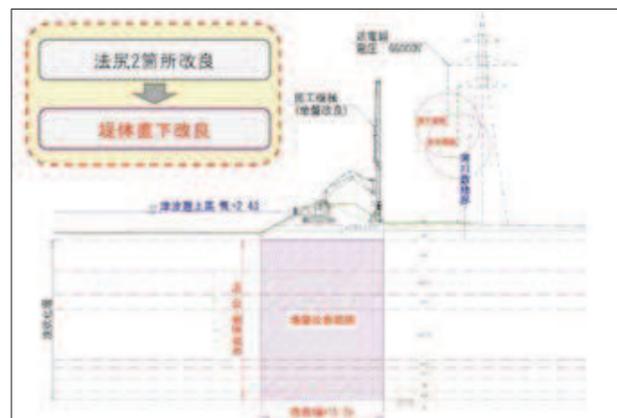


図-7 本事例における地盤改良範囲(堤体直下地盤)

堤体直下の改良は、堤体基礎地盤の透水性が低下、堤体内浸透水が排水されにくくなり、堤体内水位が高い状態が続くことで堤体が弱体化しやすいという点に注意が必要である。

そこで、別途対策として堤体内浸透水の排水対策を併用することで堤防の弱体化防止を図ることとした。

4. 堤体内浸透水の排水対策

(1) 改良体を格子状に配置

液状化対策を目的として固結工法による改良を行う場合、改良体の配置方法はブロック状配置と格子状配置の2方法が候補となる（図-8）。

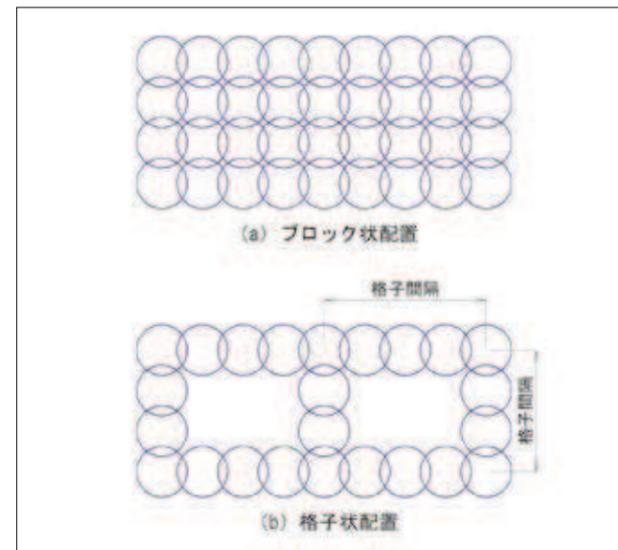


図-8 改良体の配置方法(円柱改良)

本事例では、堤体直下地盤の排水性向上のために格子状配置を採用、格子状とすることで改良体の施工数が削減でき、経済性の面でも有利となる。

配置における留意点としては、改良体に液状化した地盤の流動を防止する隔壁としての機能が求められるため、改良体を互いにラップさせて配置させる必要がある。また、格子間隔は、格子内未改良部の液状化を抑制し抵抗が期待できるよう液状化層厚の0.5~0.8倍程度を上限とし、面積改良率は50%程度を最低とする点に留意する。

(2) ドレーン工の設置

堤体内浸透水を排水し堤体内水位の低下を促進させるために、川裏法尻部に透水性の高い素材を用いたドレーン工を設置、法尻には堤脚水路を設け、ドレーン工からの排水ならびに雨水等を適切に流下させる（図-9）。

本事例では樋門に接続する堤内水路がこの役割を兼ねている。



図-9 ドレーン工・堤脚水路

5. 今後の課題及び解決策(案)

本事例では樋門部における液状化対策の検討事例を紹介したが、樋門部のみ沈下を抑制したとしても、上下流の堤防部が沈下すれば本末転倒である。

したがって、液状化対策は堤防一連での対策が必須であり、堤防一連で前述の範囲での地盤改良を行うことが想定されるため、施工にかかる費用は莫大なものになる。

施工費削減のため、基準に則った液状化層全層の改良ではなく、「沈下後の築堤高>津波遡上水位」となるような最小の改良深度のトライアル検討が必要となるケースも懸念される。

しかしながら、本事例のような液状化層厚が厚いケースでは、築堤変形解析に用いる解析ソフトによって得られる沈下量に差が生じてしまうという問題点がある。

これは堤防高の75%を超える沈下が生じる場合に行う補正方法（疑似的に仮想バネをモデル化する方法）について具体的な方法が基準に明記されていないため、ソフト毎に補正方法が異なってしまうことが要因と考えられる。

本事例の検討にあたり、築堤変形解析に用いられる主要ソフト3種（静的照査法に基づく解析ソフト）を使用し、同モデルにおける解析結果を比較したところ、沈下量にはソフト間で最大56cmの差が生じた（図-10、図-11及び図-12）。

以上のことから、最小改良深度を検討する場合、解析ソフト毎に必要な改良深度の結果が異なってしまうケースが想定されるため、事例が少なく技術的指針が確立されていない現状においては、莫大な施工費が掛かるとしても基準に則った液状化層全層の改良を提案する事が必要と考えているが、格子状配置等の工夫で極力コストを抑える必要がある。

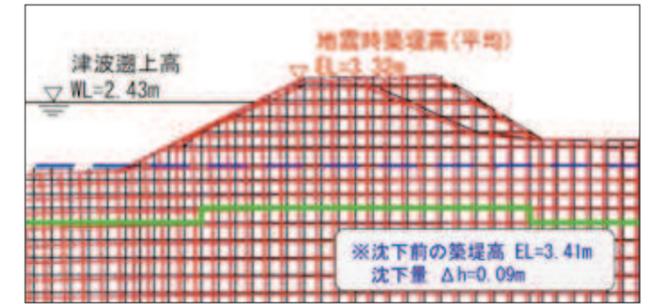


図-10 築堤変形図(A社)

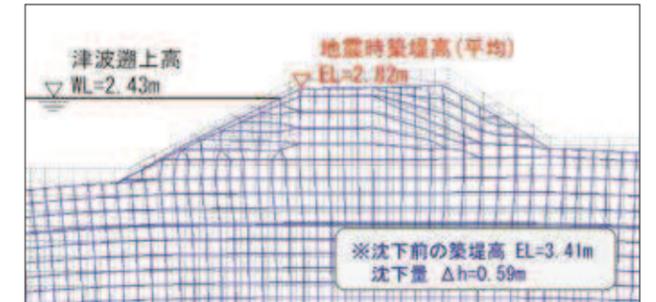


図-11 築堤変形図(B社)

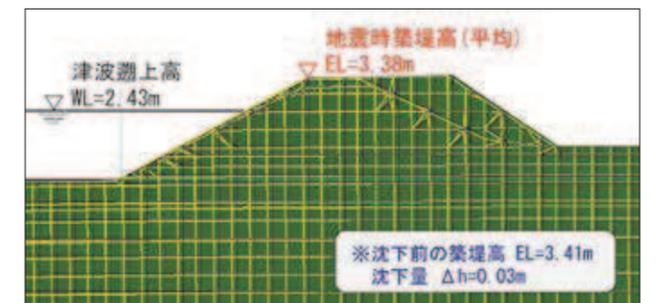


図-12 築堤変形図(C社)

6. おわりに

北海道の中小河川においては、津波遡上対策を考慮した改修に着手している河川の事例は少なく、技術的指針についても確立されていない現状にある。

本事例は液状化対策を目的とした地盤改良を行った先駆けとなるものであり、今後、同様の事例を積み重ね、検討手法や検討結果に統一性・信頼性を高め明確な技術的指針を定めていくことが急務である。

〈参考文献〉

- 1) 土木研究所編：『河川堤防の液状化対策の手引き』、土木研究所出版、2016年。
- 2) 国土交通省水管理・国土保全局治水課編：『河川堤防の耐震点検マニュアル』、国土交通省水管理・国土保全局治水課出版、2016年。
- 3) 安田進,吉田望,安達健司,規矩大義,五瀬伸吾,増田民夫：『液状化に伴う流動の簡易評価法』、土木学会論文集, No.638/III-49,p.71～89,1999.