

堤防・樋門の新耐震設計法について



北村 明
(技術士:建設部門)



住出 徹

REPORT

技術部 水工課

概要

従来、河川構造物ではレベル1地震動に相当する震度を用いて耐震設計が行われてきたが、度重なる深刻な地震災害への対策が重要視され、平成19年3月に河川構造物のレベル2地震動に対する照査指針として「河川構造物の耐震性能照査指針(案)」¹⁾が策定された。

本稿は、耐震性能照査のポイントを示すとともに、レベル2地震動に対する静的FEM及び縦方向解析による函体の耐震設計、津波対策としての樋門自動化の実際例を示すものである。

キーワード レベル2地震動、液状化、保有水平耐力法、自動開閉樋門

1. はじめに

河川構造物の耐震設計は、「建設省河川砂防技術基準(案)」に基づき、レベル1地震動に相当する震度を用いてきたが、「平成7年兵庫県南部地震」を契機として、耐震点検や対策が全国的に進められ、中央防災会議(内閣府)から、東海、東南海・南海地震等のひっ迫性や被害想定が公表された。

さらに各地で深刻な地震災害が頻発(宮城県北部地震、十勝沖地震、新潟県中越地震、福岡県西方沖地震など)し、耐震設計の高度化(レベル2地震動対応)が土木技術界の必須課題となった。

このような背景から生まれた「河川構造物の耐震性能照査指針」は国の事業から運用が始まっているが、平成25年度からは北海道でも運用が開始される。

また、北海道の地域性から樋門操作人の労力が増大しており、津波遡上や、突発的な出水時の操作遅れが危惧されている。この課題に対して北海道では「自動開閉樋門」の標準化を図っており、レベル2耐震設計と同時に樋門自動化の検討を推進している。

例えば、樋門は一時的なゲートの開閉不能が許される(耐震性能1~3)場合があるが、堤防は如何なる場合においても外水の氾濫は許されない(耐震性能1~2)。

表-1 従来の耐震設計と、新しい耐震設計の違い

	従来の耐震設計	新耐震設計
地震動	レベル1地震動相当	レベル1地震動 レベル2地震動
耐震性能	損傷を許容しない	レベル1地震動 損傷を許容しない レベル2地震動 保持すべき機能に 応じて一定の損傷 を許容
照査方法	静的照査法	主に静的照査法

2. 河川構造物のレベル2耐震設計のポイント

(1) 設計地震動と耐震性能

表-1に示すように、レベル2地震動を対象とした耐震性能照査では、構造物に一定の損傷を許容するため、損傷を許容しない従来のレベル1地震動の照査に比べ、より高度な技術や判断が求められる。

(2) 耐震性能の定義

耐震性能とは、地震の影響を受けた後の河川構造物の状態を定義したものである。表-2に示すが、「耐震性能1」とは地震後において構造物に全く損傷や変位を生じない性能のことであり、一方「耐震性能3」とは一時的に機能不全に陥ったとしても、損傷を修復可能なレベルに留める性能を表している。

表-2 代表的な構造物ごとの耐震性能の定義

	レベル1地震動	レベル2地震動	
	耐震性能1	耐震性能2	耐震性能3
自立構造の特殊堤	地震によって自立特殊堤としての健全性を損なわない性能	地震後においても、[耐震性能照査指針]に規定する、照査外水位に対して自立式構造の特殊堤としての機能を保持する性能	地震による損傷が限定的なものにとどまり、自立式構造の特殊堤としての機能の回復が速やかに行い得る性能
水門・樋門及び堰	地震によって水門・樋門又は堰としての健全性を損なわない性能	地震後においても、水門・樋門又は堰としての機能を保持する性能	地震による損傷が限定的なものにとどまり、水門・樋門又は堰としての機能の回復が速やかに行い得る性能
揚排水機場	地震によって揚排水機場としての健全性を損なわない性能	地震後においても、揚排水機場としての機能を保持する性能	地震による損傷が限定的なものにとどまり、揚排水機場としての機能の回復が速やかに行い得る性能
堤防(土堤)	地震によって堤防(土堤)としての健全性を損なわない性能	地震により堤防(土堤)に変形、沈下が生じた場合においても、[耐震性能照査指針]に規定する、照査外水位に対して堤防(土堤)としての機能を保持する性能	対象外

(3) 樋門の耐震性能照査の流れ

図-1に北海道の樋門において適用される耐震性能照査のフロー図を示す(当社作成)。

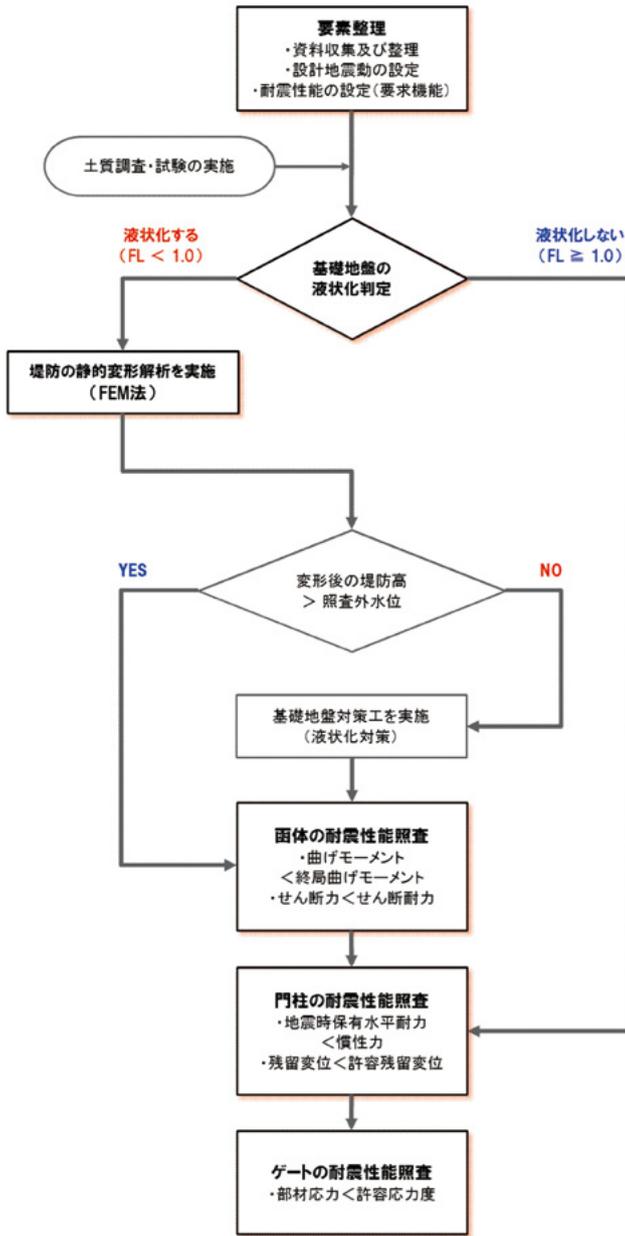


図-1 樋門の耐震性能照査フロー図(北海道運用案)

3. 樋門のレベル2耐震設計の実例

(1) 要素整理

耐震設計条件は以下のように整理する。

表-3 設計条件

断面寸法	B3.00m × H3.60m × L28.0m~2連
計画流量	Q=48.00m ³ /s
構造形式	現場打ちコンクリート(柔構造)
ゲート形式	引き上げ式ローラーゲート(電動)
液状化対象層	As1層(1層)

(2) 基礎地盤の液状化判定

As1層においてレベル2地震動(L2-1:プレート境界型, L2-2:内陸直下型)による液状化抵抗率FLを求めたところ、FL<1.0となり液状化する結果となった。

液状化に対する抵抗率FLの算出

ここに、

$$F_L = R/L$$

F_L : 液状化に対する抵抗率
 R : 動的せん断強度比
 L : 地震時せん断応力比
 c_w : 地震動特性による補正係数
 R_L : 繰返し三軸強度比
 r_d : 地震時せん断応力比の深さ方向の低減係数
 k_{hg} : レベル2地震動の地盤面における水平震度 k_{h2g} または k_{h2g}
 σ_v : 全上載圧 (kN/m²)
 σ'_v : 有効上載圧 (kN/m²)

$$R = c_w \cdot R_L$$

$$L = r_d \cdot k_{hg} \cdot \sigma_v / \sigma'_v$$

$$r_d = 1.0 - 0.015x$$

$$\sigma_v = \gamma_1 h_w + \gamma_{12}(x - h_w)$$

$$\sigma'_v = \gamma_{11} h_w + \gamma'_{12}(x - h_w)$$

土質	記号	層厚 (m)	タイプ I			タイプ II		
			R	FL	判定	R	FL	判定
粘性土層1	Am	1.90	-	-	-	-	-	-
泥炭層	Ap	3.20	-	-	-	-	-	-
砂質層1	As1	6.00	0.171~0.358	0.239~0.514	○	0.212~0.662	0.197~0.634	○
粘性土層2	Ac1	4.90	-	-	-	-	-	-
粘性土層3	Ac2	4.80	-	-	-	-	-	-
砂質層2	As2	9.20	-	-	-	-	-	-
砂質層3	As3	3.00	-	-	-	-	-	-

液状化抵抗率FL<1.0の場合、液状化の可能性あり。

図-2 液状化判定の例

(3) 堤防の静的FEM解析

堤防の液状化による変形量を静的変形解析法(静的FEM法)を用いて解析した。解析結果はL2-1、L2-2地震動ともに変形後の堤防高が津波高を上回ったため、「耐震性能2」を満たした。

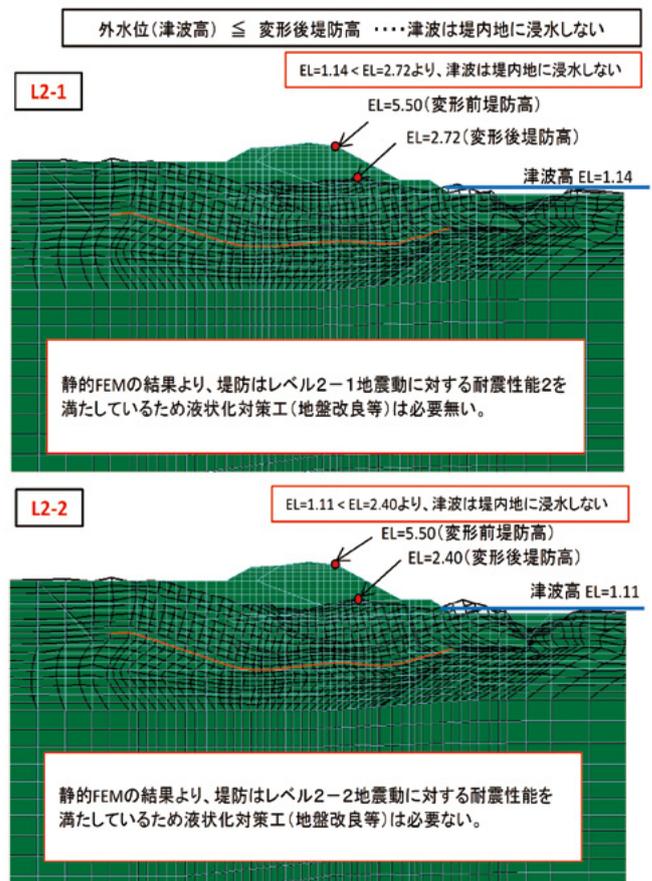


図-3 堤防の静的変形解析(FEM法)

(4) 函体の耐震性能照査

函渠については耐震性能3とし、函渠縦断方向の変形を静的に算定し函体に生じる曲げモーメント及びせん断力が、それぞれ、終局曲げモーメント及びせん断耐力以下であることを照査した(図-4)。

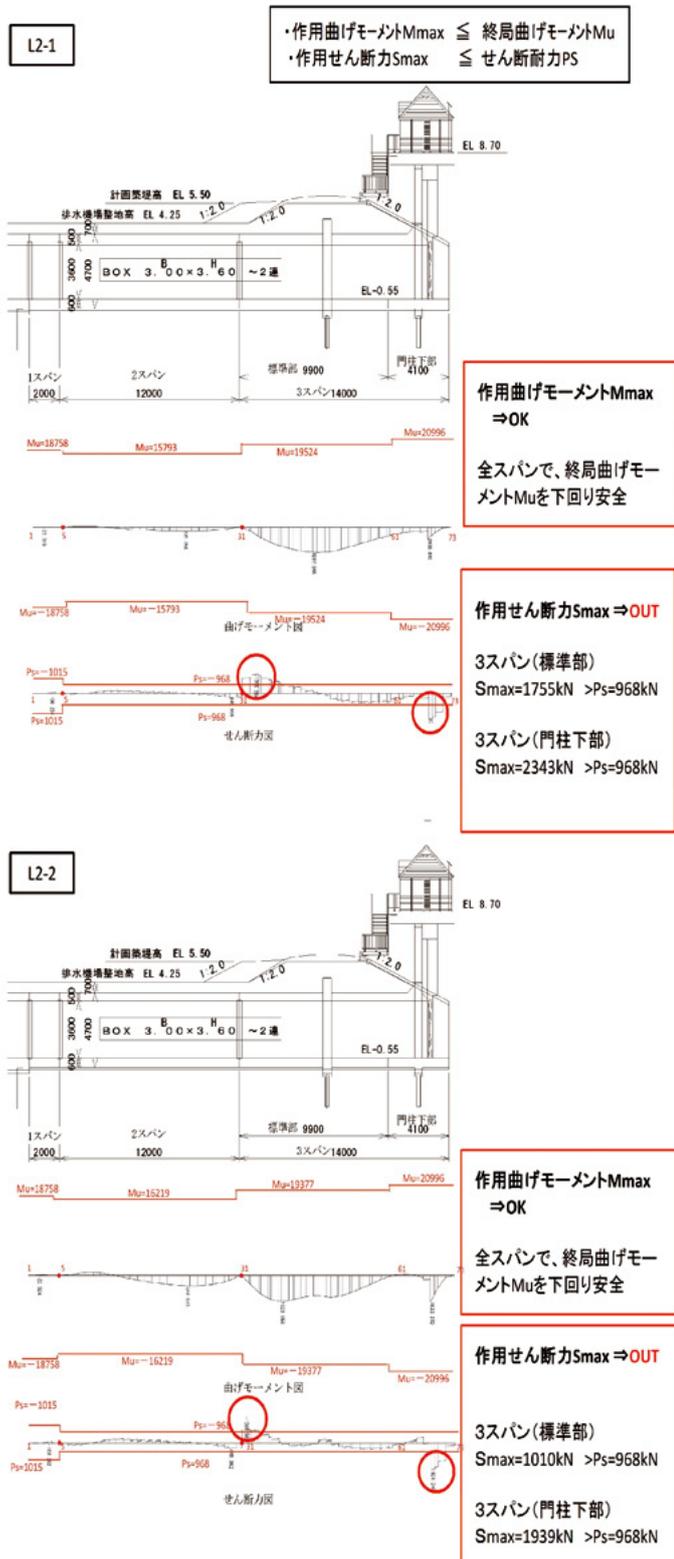


図-4 函体の解析モデル及び解析結果

解析結果はL2-1、L2-2地震動ともに曲げモーメントは許容値内であったが、作用せん断力がせん断耐力を上回り「耐震性能3」を満たさない結果となった。

(5) 函体の耐震補強

函渠のせん断耐力を増強し耐震性能3を満足させるために、函体のせん断補強設計を行った。函体のせん断補強は、

方法①: 函体側壁の外側を増厚する

方法②: 函体側壁の内側を増厚する

の二つに大別できるが、今回は堤防を極力開削しないことが条件となったため、方法②を選択した。

方法②を採用するに当たり、流下断面の阻害が問題となった。これを解決するために図-5に示す「ポリマーセメントモルタル増厚+補強鉄筋工法」を用いた。これにより薄層(3cm未満)の増厚で必要せん断力を補強することが可能となった。

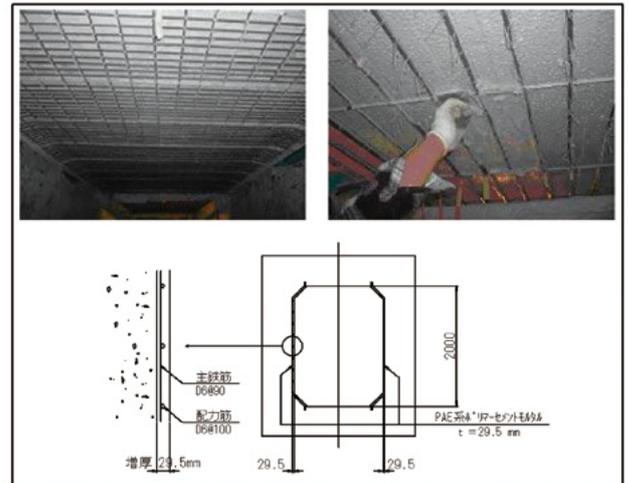


図-5 ポリマーセメントモルタル増厚+補強鉄筋工法

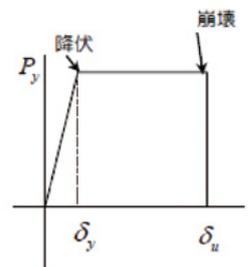
(6) 門柱の耐震性能照査

門柱の耐震性能照査は、図-6に示す横方向と縦方向の解析モデルを作成し、地震時保有水平耐力法で行った。

地震時保有水平耐力法とは、「構造物に適当なねばり(塑性域)を与え、エネルギー吸収性能を高めることにより損傷を限定された範囲にとどめ、構造系全体の崩壊を防止する。」考え方である。

※ 塑性率の定義

右図のδは変位を示すが、降伏点から崩壊点までが長い程、ねばりがある(塑性率が大きい)部材となる。



実際の計算としては、構造物の固有周期に基づく等価慣性力が地震時保有水平耐力を上回らないことを照査する。

水位の変動(内外水位差)に応じて自動的にゲートが開閉するため、地震後の津波遡上や、突発的な出水にも即時に対応できる。また、操作員の労力が軽減され、操作遅れ等の危険性が減少する。

このようなメリットから、まもなく北海道の樋門設計においても自動開閉樋門の検討が必須となる。

図-7に自動開閉樋門の設計例を示す。



図-6 門柱の解析モデル及び解析結果

解析結果はL2-1、L2-2地震動ともに慣性力が保有水平耐力を上回り「耐震性能3」を満たさない結果となった(図-6)。

門柱の耐震補強のためには、じん性(ねばさ)や、せん断耐力の増強が必要であり、コンクリートの巻き立てや、せん断補強鉄筋(アンカー)の挿入等を先ず検討すべきである。

しかしながら、今回は「門柱レス化」を選択した事例を紹介する。門柱レス化は、門柱を撤去することによる耐震性の向上に加えて、ゲートのフラップ化による「樋門の自動化」を実現させるものである。

(7) 自動開閉樋門の設計

自動開閉樋門(ゲート)とは、ゲートの開閉操作を無動力で自動的に行うようにした樋門である。

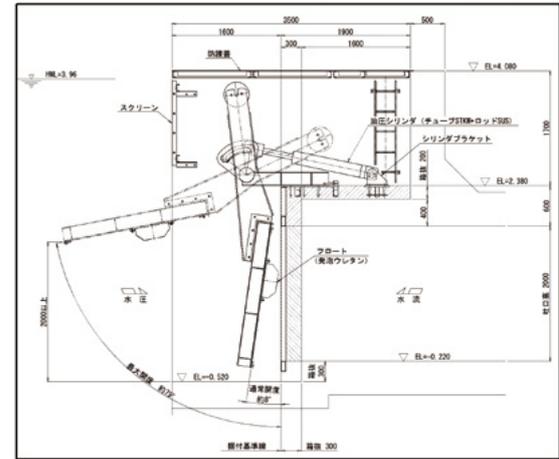


図-7 自動開閉樋門の一般図及び設計仕様

4. おわりに

耐震設計と樋門自動化を2本柱とした、堤防・樋門の新しい設計方法は、平成25年8月より北海道の新設計要領として運用が開始される。本稿では、新要領の運用に先駆けて、当社で実施してきた「新しい設計方法」のポイントや実例を紹介した。

当社は新設計要領の改訂作業にも関与しており、樋門・堤防のレベル2対応に関してはいち早く専門ワーキングを立ち上げ、設計システムの開発を進めている。

これらの先行展開については別添のフライヤーにまとめて配布しており、社内外に向けた積極的な情報発信に努めているところである。

参考文献

- 1) 河川構造物の耐震性能照査指針 I, II, III, IV
国土交通省 河川局 治水課 平成24年