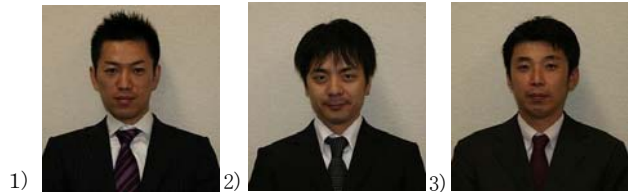


レベル2地震動を考慮した樋門の耐震設計について

Earthquake proof design considered revel-2 earthquake motion for sluiceway

水工事業部 水工第2部 ○佐藤 正規¹⁾
新造 太郎²⁾
共通事業本部 地質部 大熊 浩明³⁾



概要(Abstract)

これまでの河川構造物の耐震設計は、一般にレベル1地震動を対象とした震度法によるものであった。平成19年に『河川構造物の耐震性能照査指針(案)・同解説』(以下、『照査指針(案)』)が発刊され、レベル1地震動に加えレベル2地震動に対する耐震性能の照査方法が規定された。

本稿は、この『照査指針(案)』を基に河川構造物の耐震性能照査の概要を示すとともに、レベル2地震動を考慮した樋門の耐震設計例について紹介するものである。

1. はじめに

河川構造物は、堤防等の土構造物と、樋門・水門等のコンクリート構造物に大別される。一般に河川構造物は、沖積地盤上に設置する機会が多いため、液状化等の影響を受けやすい側面がある。しかし、堤防は、地震被害を受けても緊急復旧されるまでの間に越水を生じるような洪水が発生する確率が低いことなどから、設計において大規模地震動(レベル2地震動)が考慮されていなかった。

河川構造物の耐震設計は、平成7年の兵庫県南部地震を契機として、耐震点検、対策等が鋭意進められてきたが、平成16年には新潟県中越地震による信濃川での災害を受け、河川構造物における耐震性能の向上が重要視された。

これを背景として、今後発生が予想される東海地震や東南海・南海地震等の大規模地震発生を踏まえ、河川構造物ではレベル2地震動の対応を含めた耐震性能の向上をより一層進める必要がある。

2. 河川構造物の耐震設計の概要

2.1. 基本方針

河川構造物の耐震性能照査では、要求される耐震性能及び外力を適切に設定する必要がある。

耐震性能照査において考慮する外水位は、平常時の最高水位とする。最高水位は、緊急復旧に要する期間(14日間)に発生する確率が1/10の水位とし、堤防高がこれを下回らないことを照査する。ただし、河口部付近においては、潮位及び波浪の影響を考

慮する。また、地震の発生に伴い津波の遡上が予想場合には、津波高についても考慮する。

2.2. 耐震性能の照査に用いる地震動

レベル1地震動は、河川構造物の供用期間中に発生する確率が高い地震動とする。

レベル2地震動は、対象地点において現在から将来にわたって考えられる最大級の強さを持つ地震動とする。レベル2地震動には、プレート境界型地震(レベル2-1)と、内陸直下型地震(レベル2-2)を考慮する。

2.3. 液状化の影響

砂質土層に生じる液状化は、河川構造物の地震挙動に大きな影響を及ぼすため、耐震性能照査では液状化の判定が重要である。また、液状化した場合は支持力及び強度が低下するため、土質定数はその影響を考慮して適切に低減させる。

2.4. 堤防の耐震性能照査

(1) 堤防の耐震性能

堤防の耐震性能は、レベル2地震動において、照査で考慮する外水位に対して、越流を防止する機能を保持する性能である。(表-1 参照)

(2) 照査方法

耐震性能の照査方法は、設定した設計水平震度を用いて砂質土層の液状化判定を行い、液状化による堤防の変形を静的に算定し、地震後の堤防高が耐震設計上考慮する外水位を下回らないことを照査する。

2. 5. 水門・樋門の耐震性能照査

(1)水門・樋門の耐震性能

水門・樋門は、取水、排水などの機能に加えて、洪水が河川外に流出することを防止するという堤防と同等の機能を有する河川構造物である。

しかし、損傷の程度によっては速やかな修復が困難であるため、レベル 1 地震動に対しては、すべての水門・樋門に対しては耐震性能 1 を確保する。

レベル 2 地震動に対しては、堤内地盤高が耐震性能において考慮する外水位よりも低い場合、または治水・利水上重要な場合については、耐震性能 2 とし、それ以外の場合には耐震性能 3 を確保する。

表-1 各種構造物の要求される耐震性能

構造物	区分	L1 照査	L2 照査
堤防 (土堤)	※1	対象外	耐震性能 2
	上記以外	対象外	対象外
堰	※2	耐震性能 1	耐震性能 2
	上記以外	耐震性能 1	耐震性能 3
水門・樋門	※1・※2	耐震性能 1	耐震性能 2
	上記以外	耐震性能 1	耐震性能 3
揚・排水機場	※1・※2	耐震性能 1	耐震性能 2
	上記以外	耐震性能 1	耐震性能 3

<凡 例>

※1: 堤内地盤高が耐震性能照査において考慮する外水位よりも低い地域

※2: 治水・利水上重要な施設

耐震性能 1 : 河川構造物として健全性を損なわない性能

耐震性能 2 : 耐震性能の照査において外水位に対して河川構造物としての機能を保持する性能

耐震性能 3 : 損傷が限定的なものにとどまり、河川構造物としての機能の回復が速やかに行いえる性能

(2)照査方法

耐震性能の照査方法は、耐震性能の照査に用いる地震動によって生じる各部材の状態が、限界状態を超えないことを照査する。それぞれの要求性能に対する限界状態を以下に示す。

表-2 水門・樋門の各性能レベルにおける限界状態

性能レベル	要求性能(限界状態)
耐震性能 1	各部材の力学特性が弾性域を超えない範囲で適切に定める。(発生する応力度を許容応力度以下とする。)
耐震性能 2	塑性化を考慮する部材のみ塑性変形が生じ、塑性変形がゲートの開閉を妨げない。函体の水密性を保持する。
耐震性能 3	塑性変形を考慮する部材のみ塑性化が生じ、塑性変形が当該部材の修復を容易に行える範囲内に収める。

3. L2 地震動を考慮した樋門設計例の紹介

樋門の耐震設計は、以下(図-1)のフローに基づいて実施する。

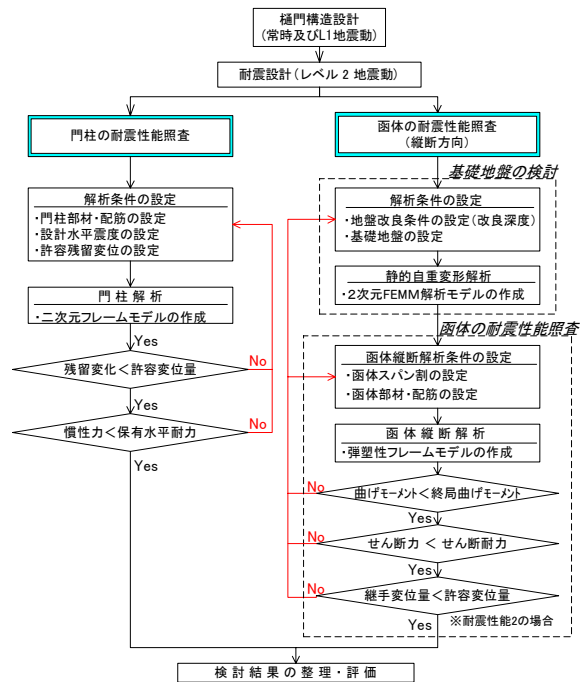


図-1 樋門の耐震設計フロー図

<設計条件>

樋門の設計条件を以下のように設定した。

表-3 設計条件

樋門断面	□-2.0m(幅)×2.0m(高)~2連
樋門長	L=20.0m
門柱高	H=3.0m
函体形式	場所打ちコンクリート
液状化対象層	As1層、As2層、As3層

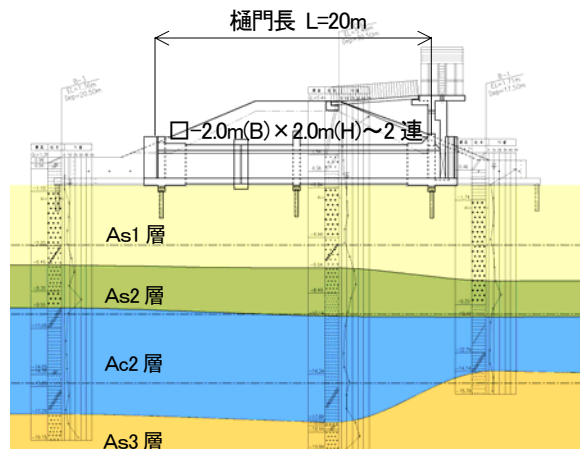


図-2 樋門側面図

3. 1. 基礎地盤の検討

レベル 2 地震動に対する照査は、液状化に伴う土層の物性の変化を考慮し、堤防の変形を静的に算定できる方法(有限要素法を用いた静的自重変形解析)を用いる。設計に用いた基礎地盤の土質定数を表-4に示す。

表-4 土質定数一覧表

地質記号	単位体積重量 γ_t (kN/m^3)	粘着力 c (kN/m^2)	内部摩擦角 ϕ (度)	変形係数 E_0 (kN/m^2)	せん断弾性係数 G (kN/m^2)	細粒分含有率 F_c (%)
As1	17.5	—	32	25,200	9,452	13.6
As2	18.0	—	34	53,200	19,955	18.2
Ac2	15.5	74.8	—	22,400	8,402	—
As3	19.0	—	—	47,600	17,854	28.5
改良体	17.5	100	—	40,000	15,004	—

(1)レベル1地震動に対する液状化対策

レベル 1 地震動による基礎地盤の液状化対策として、液状化するAs1 層、As2 層を固結工法による地盤改良を行うものとした。

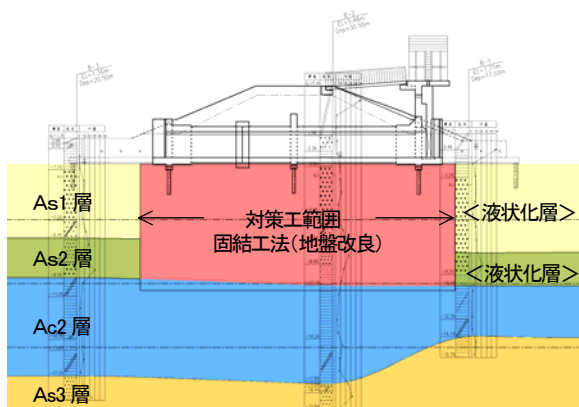


図-3 対策工概略側面図

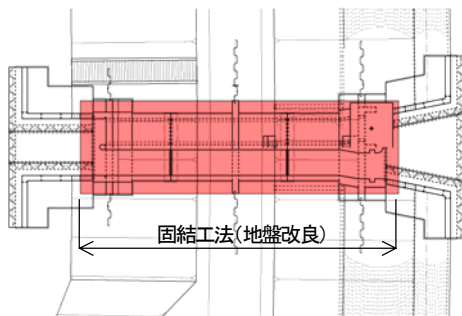


図-4 対策工概略平面図

(2)レベル2地震動に対する静的自重変形解析結果
解析結果は、レベル1に対する対策工として、As1 層とAs2 層を改良したため、最大沈下量が 32cm となった(図-6 参照)。また、比較として、対策工を実施しない場合の最大沈下量は 187cm となる。(図-7 参照)

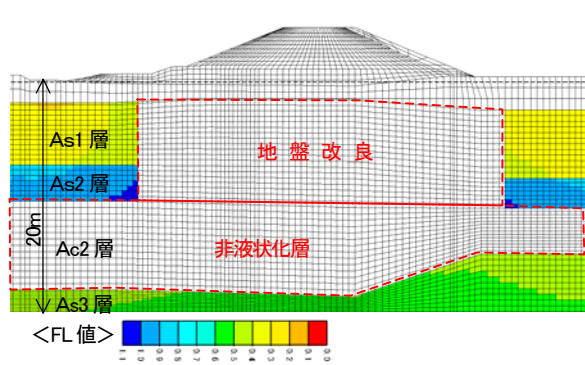


図-5 L1 対策後のFL値分布図(レベル 2)

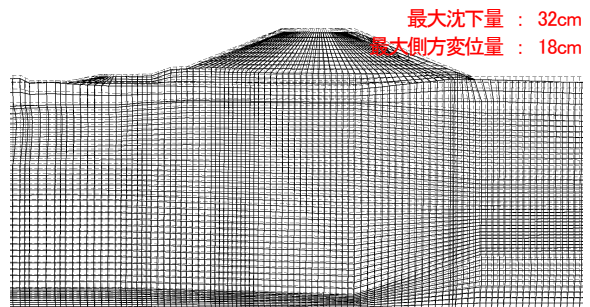


図-6 地盤改良後の変形図(レベル 2)

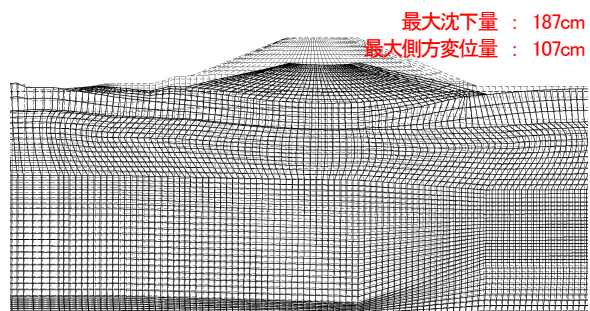


図-7 無対策の変形図(レベル 2)

3. 2. 函体の耐震性能照査(函体縦断方向)

函体縦断方向については、鉛直方向バネ、水平方向せん断バネを有する弾性床上の梁として解析を行う。

大きな地盤変形解析に対する非線形(バイリニア型)を考慮する必要があるため、鉛直バネ及び水平方向せん断バネの上限値を設定する。

本稿では、樋門の要求性能を耐震性能2とした。

(1)解析モデルの設定

解析モデルは、常時及び地震時(レベル 1)の検討結果により図-8 となる。残留沈下量は地盤改良により5.0cm以下となるため、基礎形式を剛支持形式、継手構造をカラー継手とした。

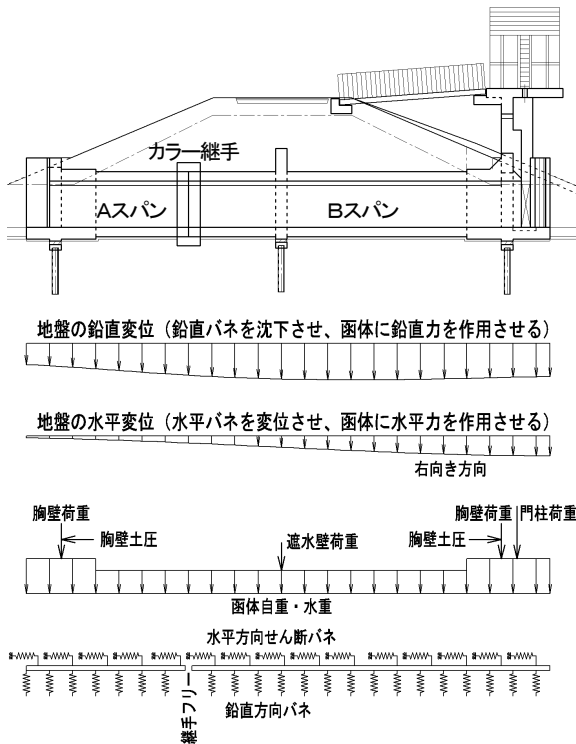


図-8 モデル図(初期条件)

(2)解析結果

断面耐力の照査結果は、表-5 に示すようにBスパンにおいてせん断耐力を上回る結果となった。これは、地盤改良によって地盤バネ値が大きくなり、地盤の最大沈下量が32cmと比較的小さい値であるが、函体にかかる作用力が増大したためと判断される。

また、継手変位についても許容値を超える結果となった。

表-5 断面耐力照査結果(初期条件)

断面耐力照査		レベル2-1		レベル2-2	
		Aスパン	Bスパン	Aスパン	Bスパン
設定軸力(N)	kN	-618.69	-1384.23	-748.45	-1681.62
発生モーメント(Mmax)	kN・m	236.21	4864.57	252.44	4806.07
終局モーメント(Mu)	kN・m	6768.94	6071.88	6711.00	6012.69
M/Mu	—	0.03	0.80	0.04	0.80
判定	—	OK	OK	OK	OK
発生せん断力(S)	kN	76.26	1201.39	78.79	1206.04
せん断耐力(Ps)	kN	802.60	802.60	802.60	802.60
S/Ps	—	0.10	1.50	0.10	1.50
判定	—	OK	NG	OK	NG

(3)解析モデルの検討

上記の結果(表-6、表-7)より、函体縦断方向においてせん断力がせん断耐力を上回ることに対して、次ぎのような解析モデルを用いて検討を行った。

Case-1 : 部材厚変更案(図-9)

Case-2 : 3スパン案(図-10)

(4)照査結果

Case-1 の場合、せん断耐力を向上させるために必要な部材厚は、側壁で90cmとなり、施工時の温度ひび割れの誘発等の観点から、樋門の部材厚としては適切ではない。(最小部材厚:40cm)

Case-2 の場合は、発生する断面力が、終局モーメント及びせん断耐力以下となったが、継手は変形能力に対応するため、可とう継手(100mm仕様)が必要となった。

検討結果より、Case-2 では継手数が増え、経済性においてやや不利であるが、地盤の追従性に優れる等から、このようなケースでは、Case-2 の3スパン構造の採用が妥当であると考えられる。

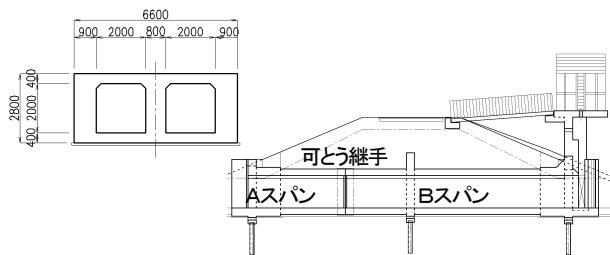


図-9 Case-1(部材厚変更案)

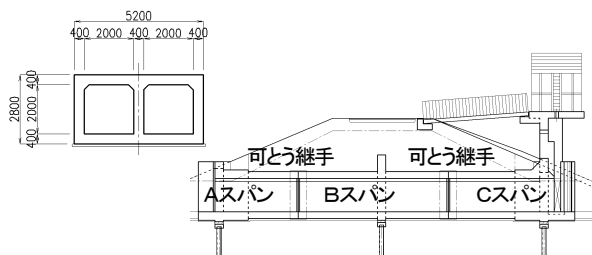


図-10 Case-2(3スパン案)

3. 3. 門柱の耐震性能照査

門柱の耐震性能照査は、図-11 に示す解析モデルを用いて地震時保有水平耐力法で行う。

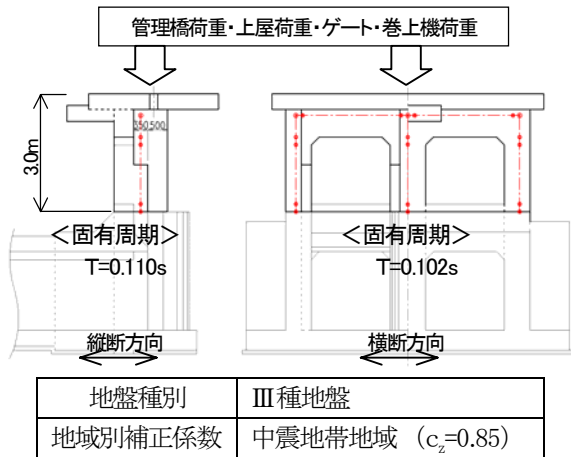
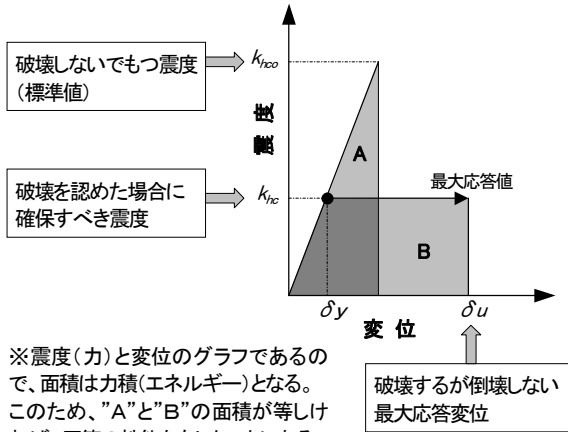


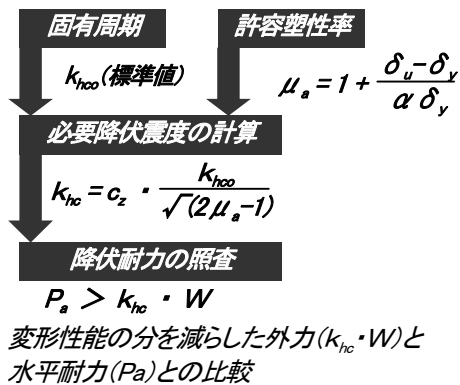
図-11 門柱解析モデル図

(1)地震時保有水平耐力法

地震時保有水平耐力法は、静的解析の代表的な手法の一つであり、塑性域において地震力を繰返し受けた場合に構造物が発揮し得る水平耐力、変形性能、エネルギー吸収を考慮して耐震性能の照査を行う方法である。



※震度(力)と変位のグラフであるので、面積は力積(エネルギー)となる。このため、“A”と“B”の面積が等しければ、同等の性能を有したことになる。



(2)照査結果

照査結果より、慣性力が地震時保有水平耐力に対して十分に余裕があり、また、応答塑性率も 1.0 以下となる。このことから、門柱高が 3.0m 程度の L2 地震動を考慮した設計は、部材厚、配筋量において従来設計と変更が生じないと考えられる。

表-6 門柱照査結果(横断方向)

	記号(単位)	L2-1	L2-2
許容塑性率	μ_a (-)	7.10	19.37
水平震度	k_{hc} (-)	0.34	0.34
慣性力	$k_{hc} \cdot W$ (kN)	197.42	197.42
地震時保有水平耐力	P_a (kN)	816.09	815.97
応答塑性率	μ_r (-)	0.59	0.55
判定	—	OK	OK

表-7 門柱照査結果(縦断方向)

	記号(単位)	L2-1	L2-2
許容塑性率	μ_a (-)	10.87	42.91
水平震度	k_{hc} (-)	0.34	0.34
慣性力	$k_{hc} \cdot W$ (kN)	43.80	43.80
地震時保有水平耐力	P_a (kN)	251.32	251.26
応答塑性率	μ_r (-)	0.59	0.55
判定	—	OK	OK

4. 今後の課題

従来設計における地震時(レベル 1)の液状化対策は、周辺堤防の堤体安定性を優先するため、液状化の抑制を目標として実施されている。

『照査指針(案)』の策定に伴い、レベル 2 地震動による液状化を考慮した地盤解析手法(静的自重変形解析)が確立されたことを踏まえ、以下について検討する必要がある。

- ①レベル 1 地震動における液状化を考慮した地盤変形量を同様の解析手法を用いて算出する。
- ②上記の結果を用いて函体照査を実施し、液状化対策の必要性を判断する必要がある。
- ③レベル 1 地震動の液状化による沈下量の許容値を適切に設定する。

(以上)

<参考文献>

- 1) 河川構造物の耐震性能照査指針(案): 国土交通省 河川局 治水課
- 2) 柔構造樋門設計の手引き: (財) 国土開発技術センター
- 3) 道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編 (社) 日本道路協会