

◆ 特集：最近の地震対策技術 ◆

河川構造物の耐震性能照査手法の開発

杉田秀樹* 田村敬一** 高橋章浩*** 谷本俊輔****

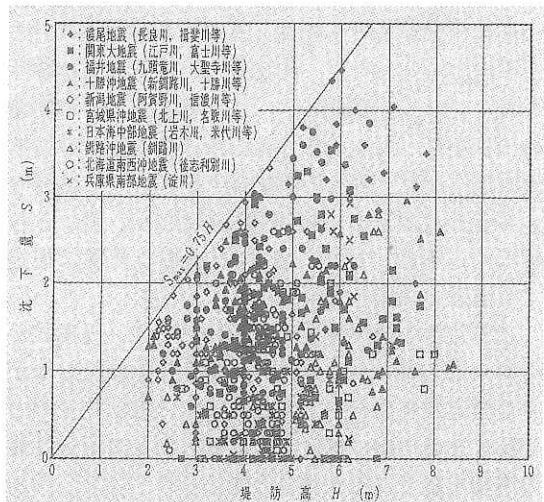
1. はじめに

河川構造物は、一般堤防（土堤）や高規格堤防等の盛土構造物と、主たる構造部材がコンクリートや鋼材であるコンクリート等の構造物に大別される。さらに後者は、護岸、水制、床止めといった堤防や河床に付属する工作物と、水門、樋門、堰、揚排水機場といった構造物群に分類される。これら多種多様な河川構造物の耐震設計は「建設省河川砂防技術基準（案）同解説、平成9年」に準拠しているが、設計地震動としてはレベル1地震動（中規模地震動）に相当するものであるとともに、最近の耐震設計の主流である耐震性能照査の考え方が十分に導入されていなかった。このため、平成16年に「河川構造物の耐震検討会（座長：佐々木康広島大学名誉教授）、（財）国土センター」が設置され、国土交通省河川局が国土技術政策総合研究所と（独）土木研究所の連携のもと、平成19年3月に「河川構造物の耐震性能照査指針（案）同解説」¹⁾を策定した。

本稿では、河川構造物の既往の地震被害の特徴や、「建設省河川砂防技術基準（案）」の改訂経緯等の背景を示しつつ、「河川構造物の耐震性能照査指針（案）同解説」の骨子について報告する。

2. 河川構造物の地震被害の特徴

1891年濃尾地震以降の主要地震による盛土（堤防）構造物の地震被害事例について、堤防高と堤防天端の沈下量との関係を整理すると図-1の通りである。一般の河川堤防は、既往地震の度に沈下、縦横段亀裂、すべり破壊といった被害を生じてきた。特に著しい被害では、ほとんどの場合に噴砂が認められるため基礎地盤の液状化が被害の主要因と考えられ、堤防の耐震性は基礎地盤の良否に支配されていると言える。軟弱粘性土地盤での被害事例は稀に見られる程度である。堤防天端の沈下量の大きさは基礎地盤条件や地震動の大き

図-1 既往地震被害事例における堤防高と沈下量の関係²⁾

さにより変動するが、同図ではそれらの区別なく整理している。これによれば、堤防天端の沈下量は、最大で堤防高の約75%となることが知られている。

一方、1964年新潟地震以降の主要地震による、コンクリート等構造物の主要な被害事例を示すと表-1の通りである³⁾。非常に古い地震被害の記録が十分に残されていないため図-1と単純に比較はできないが、コンクリート等構造物の被害件数は盛土構造物と比較して少ない。これは、コンクリート等構造物では比較的早くから中規模地震動相当の地震荷重が考慮されていたためと考えられる。被害事例の中では樋門函体の損傷が数多く報告されているが、これは樋門の門柱部分の設計とは異なり、函体部分は地震荷重が考慮されていないためである。埋設されている堤防自体が大きな変形を生じると、函体間に設置された継手だけでは周辺土の変形に追従できず、継手の離間、函体の亀裂、また剛構造樋門（函体が杭基礎で支持された構造）の場合には函体底面に空隙が生じる。

水門や堰の被害事例は稀ではあるが、2004年新潟県中越地震による妙見堰（写真-1参照）のように破りコンクリートが剥落するような損傷を生

表-1 既往地震による河川構造物の主要被害事例

地 震	構造物	被 害
1964年新潟地震	松浜特殊堤	移動に伴う目地ずれ
	下山樋門	函体の破断・開き
1978年宮城県沖地震	阿武隈川大堰	ゲート戸当たり変形
	船越樋門	門柱損傷
	旧北上大堰	ゲート戸当たり変形
1981年日本海中部地震	豊巻樋門	函体の亀裂
	桧山川排水樋門	函体の亀裂
	流川排水樋門	函体継手の開き
	津花川排水樋門	函体継手の開き
	中島水門	川裏側擁壁の転倒
1993年釧路沖地震	昆布森樋門	函体継手の開き
	別海樋門	函体継手の開き、損傷
1993年北海道南西沖地震	愛知1号樋門	函体の破断・開き
1995年兵庫県南部地震	左門殿川特殊堤	擁壁の前傾、基礎杭損傷
	新在家水門	門柱損傷
	加古川大堰	ゲート戸当たり変形
	西瀬川暗渠河川	目地部破損、側壁クラック
	塩屋谷川トンネル河川	覆工クラック
2003年十勝沖地震	十勝太東8号樋門	門柱傾斜
2004年新潟県中越地震	妙見堰	門柱損傷
	茶郷川樋門	函体継手の開き
	川口地先揚水機場	可とう継手の偏心・損傷



写真-1 妙見堰の門柱被害 (2004年新潟県中越地震)

じた例もある。隣接する妙見堰管理所における加速度時刻歴の最大値は1500galを超えており、加速度応答スペクトルも短周期側では1995年兵庫県南部地震時に神戸海洋気象台で観測された地震動を上回った。実際に生じた地震動が設計荷重を大きく上回る場合には、コンクリート等構造物であっても機能上問題となるような損傷が生じる可能性も考えられる。

3. 河川構造物の耐震設計の経緯

「建設省河川砂防技術基準(案)同解説」は、河川構造物の技術の体系化を図り、もって技術水準の維持向上を図ることを目的として昭和33年に作成された。この後、昭和30年代に始まる高度経

表-2 堤防天端沈下量と地震時安全率 F_{sd} の関係

地震時安全率 F_{sd}		沈下量 (上限値)
$F_{sd} (kh)$	$F_{sd} (\Delta u)$	
$1.0 < F_{sd}$		0
$0.8 < F_{sd} \leq 1.0$		(堤高) $\times 0.25$
$F_{sd} \leq 0.8$	$0.6 \leq F_{sd} \leq 0.8$	(堤高) $\times 0.50$
-	$F_{sd} \leq 0.6$	(堤高) $\times 0.75$

済成長と社会環境の変化に対応すべく、本編は昭和47年に調査、計画、設計、施工、維持管理の5編に細分化された。さらに、昭和60年の改訂では、コンクリート等構造物の設計に中規模地震動相当の地震荷重が初めて導入されるに至った。

1995年兵庫県南部地震では、淀川下流部の堤防が最大3m程度も沈下し、背後に低平地を擁する地域の堤防においては耐震性を強化することの必要性が強く認識された。建設省(当時)は、地震発生直後に「河川堤防地震対策技術検討委員会(委員長:山村和也日本大学教授)」を設置し、ゼロメートル地帯に位置する河川堤防の耐震性強化の方針が提言された。平成9年の改訂では、上記提言に基づき河川堤防の耐震設計が盛り込まれ、全国の堤防で耐震診断と耐震対策が進められている。

堤防の耐震設計は、地震後の変形量を適切に予測する実用的な手法が確立されていなかったため、当面は震度法を用いた円弧すべり法による安定計算により地震時安全率を算出し、表-2に示す堤防天端の沈下量と地震時安全率の関係から堤防の変形量を推定する方法が選択された。同基準では、設計震度は0.10~0.18の間で与えており、中規模地震動が考慮されている。背景には、万一被害を生じて早期復旧が可能なこと、より頻度の高い洪水防御が優先であること、等の考えがあった。

4. 河川構造物の耐震性能照査指針(案)

近年、中央防災会議により、宮城県沖地震、東海地震、東南海地震、南海地震、首都圏直下地震等の大規模地震の発生確率や被害想定に関する検討が鋭意進められている。また、1995年兵庫県南部地震をはじめ、2003年の宮城県北部の地震、2003年十勝沖地震、2004年新潟県中越地震等の深刻な地震被害が続発している。これらの状況を踏まえ、国土交通省や関連学会からは土木施設等の耐震設計の高度化を推進すべく、「土木構造物の耐震設計ガイドライン(案)」⁴⁾や「土木・建築にかかる設計の基本」⁵⁾等の提言が公表されて

いる。これらの提言では、レベル1地震動に加えてレベル2地震動に対する構造物の要求性能を明確に設定し、適切な方法に基づき性能照査を行なう重要性が示されている。道路橋、鉄道、港湾、上水道、下水道、建築構造物は、いずれも平成8年～12年にかけてレベル2地震動を考慮した基準改訂を実施済みであるほか、治水・利水構造物であるダムに関しては「大規模地震に対するダム耐震性能照査指針（案）・同解説、平成17年3月」⁶⁾が作成されている。

一方、河川構造物では前述した通り中規模地震動のみ想定されていることから、大規模地震動への対応が課題であった。以下、「河川構造物の耐震性能照査指針（案）同解説、平成19年3月（以下、指針（案）という）」の骨子を示す。

4.1 適用範囲

指針（案）は、堤防、自立式構造の特殊堤、水門・樋門および堰、揚排水機場の耐震性能の照査に適用する。指針（案）の構成と適用範囲は表-3の通りである。なお、地震により治水・利水機能に影響が及ぶ恐れがある構造物のうち、上記以外の伏せ越しおよび地下河川については、道路、下水道等類似構造物の技術指針類を準用する。

4.2 耐震性能照査の基本的考え方

河川構造物の耐震性能の照査においては、河川構造物の耐震性能および地震動を適切に設定するとともに、適切な照査方法を用いる。耐震性能の照査方法は、構造物の地震時挙動を動力学的に解析する動的照査法と、地震の影響を静力学的に解析する静的照査法がある。動的照査法は、地震時の現象を精緻にモデル化し、詳細な入力データおよび高度な技術的判断を必要とする。一方、静的照査法は現象を簡略化して比較的簡易に実施することが可能である。耐震性能の照査に際しては、構造物の地震時挙動特性や必要とされる解析精度等を考慮して、適切な照査方法を選定する必要がある。

表-3 指針（案）の構成と適用範囲

編	適用範囲
共通編	耐震性能照査の基本方針、荷重等の共通事項
堤防編	盛土による堤防の耐震性能の照査※
自立式構造の特殊堤編	自立式特殊堤の耐震性能の照査
水門・樋門および堰編	水門・樋門および堰の耐震性能の照査
揚排水機場編	揚排水機場の耐震性能の照査

※高規格堤防は別途検討中であり、本指針（案）の対象に含まない。

あるが、本指針（案）では実務上の簡便性を考慮して、主として静的照査法について規定している。

耐震性能の照査において考慮する外水位は、原則として平常時の最高水位とする。これは、地震と洪水が同時に発生する可能性は低いことを考慮して、従来の耐震点検・耐震対策等で考慮されてきた外水位を踏襲したものである。（河口部付近では朔望平均満潮位およ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される場合は、津波高についても考慮する。

4.3 地震の影響

地震の影響としては、構造物の重量に起因する慣性力、地震時地盤変位、地震時土圧、地震時動水圧および液状化の影響を考慮する。河川構造物は、盛土による堤防のような土構造物、水門や堰のように地表面から突出した構造物、揚排水機場の機場本体のように地盤内に設置される構造物など様々である。また、部材によっては周辺土や水に接しているものもある。構造物または部材に応じて受ける地震の影響が異なることを踏まえ、考慮すべき地震の影響を適切に選定する必要がある。

4.4 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1地震動は、震度法による従来の耐震設計で考慮されていた地震動のレベルを踏襲かつ整合するように定めることとした。

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地震動としては、プレート境界型の大規模な地震を想定したレベル2-1地震動、および、内陸直下型地震を想定したレベル2-2地震動の2種類を考慮する。ここで、レベル2地震動は「土木構造物の耐震設計ガイドライン（案）、土木学会地震工学委員会耐震基準小委員会、平成13年9月」や「土木・建築にかかる設計の基本、国土交通省、平成14年10月」等を参考に定めた。レベル2-1地震動は大きな振幅が長時間繰返して作用する地震動であるのに対し、レベル2-2地震動は継続時間は短い極めて大きな強度を有する地震動である。構造物の地震時挙動は、地震動の振幅特性、周期特性、継続時間、繰返し特性等の影響を受けるため、地震動特性が異なる2種類のレベル2地震動を考慮することとした。

4.5 必要とされる耐震性能

各種構造物に必要とされる耐震性能は、構造物

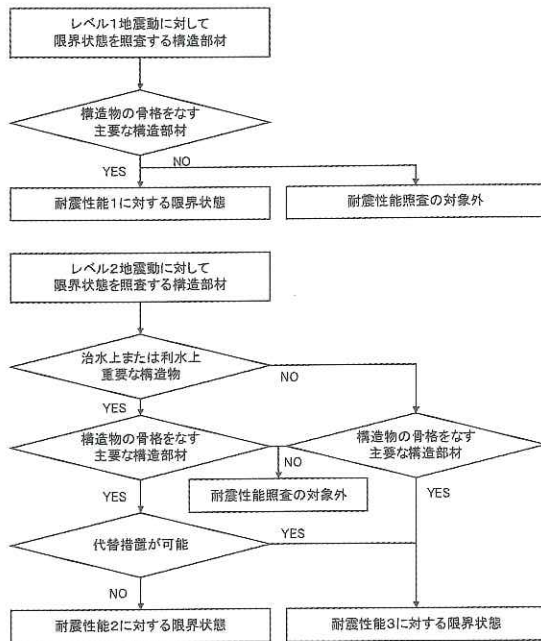


図-2 限界状態を照査する構造部材の考え方

の治水上および利水上の重要性に基づいて表-4のように定めた。ここに、耐震性能の定義は、耐震性能1：河川構造物としての健全性を損なわない性能、耐震性能2：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ない得る性能、である。構造物の耐震性能の照査は、地震動によって生じる構造部材の状態が、各部材の限界状態を超えないことを照査することにより行なう。限界状態の照査が必要な構造部材は、当該構造部材が構造物の骨格をなす主要な構造部位か否か、代替措置が可能か否かに着目して、例えば図-2に示すフローに基づいて定めることができる。例えば構造物毎に、表-4に示した耐震性能を確保するために限界状態の照査が必要な構造部材を整理すると表-5の通りである。代替措置が可能であるといった条件によっては、耐震性能2を確保するために必要な構造部材の限界状態を、耐震性能3に対する限界状態とすることができる。

5. 耐震性能照査の一例～堤防（土堤）

5.1 基本方針

堤防は河川の流水が河川外に流出することを防止するために設置されるものである。特に堤内地が低いゼロメートル地帯等においては、被災した

表-4 河川構造物に必要とされる耐震性能

構造物	構造物形式	治水・利水上の区分	L1照査	L2照査
堤防 (土堤)	土堤	※	対象外	耐震性能2
		それ以外の地域	対象外	対象外
自立式 特殊堤	コンクリート 擁壁	※	耐震性能1	耐震性能2
		それ以外の地域	耐震性能1	耐震性能3
	自立式矢板	※	対象外	耐震性能2
		それ以外の地域	対象外	耐震性能3
堰	引き上げ式 ゲート	治水上 or 利水上重要	耐震性能1	耐震性能2
		それ以外	耐震性能1	耐震性能3
	鋼製転倒ゲート (鋼製起伏堰)	治水上 or 利水上重要	耐震性能1	耐震性能2
		それ以外	耐震性能1	耐震性能3
水門 樋門		治水上 or 利水上重要	耐震性能1	耐震性能2
		それ以外	耐震性能1	耐震性能3
揚排 水機場		治水上 or 利水上重要	耐震性能1	耐震性能2
		それ以外	耐震性能1	耐震性能3

※堤内地盤高が耐震性能の照査において考慮する外水位よりも低い地域

表-5 耐震性能を確保するために限界状態を照査する構造部材の例

構造物	構造物形式	部 位	L1照査	L2照査
堤防 (土堤)	土堤	本体	対象外	耐震性能2
自立式 特殊堤	コンクリート 擁壁	躯体、基礎	耐震性能1	耐震性能2
	自立式矢板	矢板	対象外	耐震性能2
堰	引き上げ式 ゲート	堰柱床板、門柱、堰柱 基礎、ゲート操作台	耐震性能1	耐震性能2
		ゲート、ゲート操作室、管理橋	耐震性能1	耐震性能2※
		中間床板、水叩き、しゃ水工 護床工、護岸、魚道、付属設備	対象外	対象外
		鋼製 転倒ゲート (鋼製起伏堰)	堰柱、堰柱床板、基礎、ゲート	耐震性能1
	中間床板、水叩き、しゃ水工 護床工、護岸、魚道、付属設備	対象外	対象外	
	面渠、堰柱床板、門柱、堰柱 基礎、ゲート操作台	耐震性能1	耐震性能2	
水門 樋門		ゲート、ゲート操作室、管理橋	耐震性能1	耐震性能2※
		胸壁、翼壁、中間床板、水叩き しゃ水工、護岸、付属設備等	対象外	対象外
		機場本体、基礎	耐震性能1	耐震性能2
揚排 水機場		ポンプ設備、機場上屋	耐震性能1	耐震性能2※
		付属設備等	対象外	対象外

※代替可能であれば耐震性能3

堤防を河川水が越流した場合に浸水被害を引き起こす可能性がある。一方で、土構造物である土堤に対して沈下や亀裂等の損傷を全く許容しないことは現実的でない。こうした堤防の特性を踏まえ、地震で損傷が生じた場合でも、耐震性能の照査で考慮する外水位に対して、流水の河川外への越流が防止できることを堤防の耐震性能とする。

5.2 地震の影響と堤防の限界状態

堤防の耐震性能の照査では、地震の影響として地盤の液状化の影響を考慮することを原則とする。

堤防(土堤)の地震時挙動は、地域、地形、地盤条件等の種々の要因の影響を受けるが、なかでも基礎地盤の影響を強く受ける。また、堤防の既往地震被害のうち大規模な変状が生じた被害は、前述した通り堤防基礎地盤の液状化に起因するものである。これらを踏まえて、堤防の耐震性能照査では、地震の影響として液状化の影響を考慮する。

堤防の限界状態は、堤防高が耐震性能の照査において考慮する外水位を下回らない限界の状態とする。堤防の限界状態は、地震後においても、河川の流水が河川外に越流することを防止するという耐震性能照査上の堤防としての機能を確保するように定めたものである。

5.3 耐震性能の照査

耐震性能の照査は、耐震性能の照査に用いる地震動および堤防の限界状態に応じて、適切な方法に基づいて行なう。ただし、5.4に示す静的照査法によれば、これを満足するとみなしてよい。耐震性能の照査方法には、構造物の地震時挙動を動力的に解析する動的照査法と、地震の影響を静力的に解析する静的照査法がある。耐震性能の照査に際してはいずれの方法も適用できるが、堤防は比較的単純な構造物であり、静的照査法により耐震性能の照査を行なうことが可能である。

5.4 耐震性能の静的照査法

堤防の耐震性能の照査を静的照査法により行なう場合は、まず水平震度を算定し、その結果を用いて砂質土層の液状化の判定を行なう。次に、液状化の程度に応じて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。

上記5.2に示したように、堤防の限界状態を堤防高に基づいて設定しているため、耐震性能の照査では堤防の変形を算定する。従来の堤防の耐震設計や耐震診断では、円弧すべり法による地震時安全率と堤防の沈下量との経験的な関係から堤防の沈下量を評価していたが、近年、土構造物の地震による変形を直接算定する種々の方法が提案され、実務にも供せられるようになってきたことを考慮したものである。地震による堤防の変形を簡便かつ精度良く静的に算定する方法としては、液状化による土層の剛性低下に応じて堤防が変形するものと仮定し、その変形を有限要素法により算定する方法、液状化した土層を粘性流体と仮定し、地盤の流体的な変形を算定する方法等がある。

5.5 河川堤防の地震時変形解析例

レベル2地震動による河川堤防の沈下量を算出した一例として、有限要素法を用いた自重変形解析結果を以下に示す。解析対象とした堤防の断面図および諸元を示すと、それぞれ図-3および表-6の通りである。図-3には、堤外地側、天端付近の法面上部および堤内地側で調査された3本のボーリング柱状図も併せて示している。

工学的基盤面に到達していない天端付近のボーリングを除き、堤内地と堤外地のボーリングから地盤種別の判定を行なった結果、いずれもⅢ種地盤と判定された。この結果に基づき、レベル2-1地震動およびレベル2-2地震動の水平震度の標準値を、各々0.40および0.60と設定した。さらに、液状化の判定を実施した結果、レベル2-1およびレベル2-2地震動のいずれに対しても、沖積砂質土層A_{sl}の全層が液状化すると判定された。

本解析では、液状化層の剛性低下を、液状化に対する抵抗率 F_L および繰返し三軸強度比 R_L と低下剛性との関係式⁷⁾を基に設定した。ここで R_L は、液状化層であるA_{sl}層全体の平均的な値を用いた。なお、本解析法では、液状化層に発生した過剰間隙水圧が地震後に消散することにより生じる体積圧縮は考慮されないため、液状化層の体積圧縮に伴う沈下量を別途考慮する必要がある。

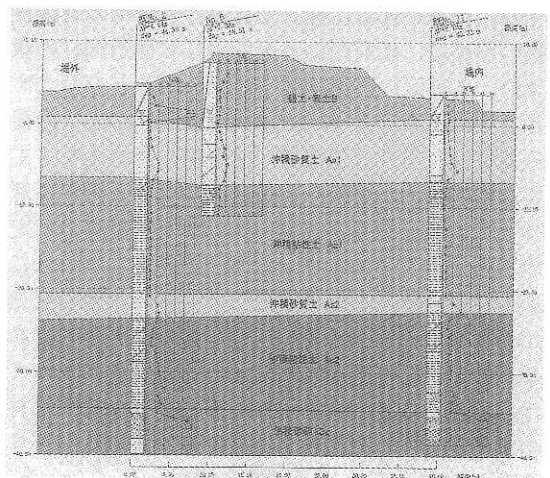


図-3 解析対象断面

表-6 解析対象断面の諸元

堤内側堤防高	堤外側堤防高	天端幅	堤敷幅
6.9m	5.2m	9.0m	55.4m
法勾配(堤内)	法勾配(堤外)	天端標高	朔望平均満潮位
1:1.6	1:2.0	AP+8.7m	AP+2.1m

本解析ではレベル2-1地震動とレベル2-2地震動の両方を対象としたが、レベル2-1地震動を対象とした場合、自重変形解析による堤防天端の沈下量は163.0cm、液状化層の体積圧縮に伴う沈下量は38.3cm、合計沈下量は201.3cmと算定された。一方、レベル2-2地震動を対象とした場合、自重変形解析による堤防天端の沈下量は171.4cm、液状化層の体積圧縮に伴う沈下量は38.3cm、合計沈下量は209.7cmであった。なお、自重変形解析による堤防天端の沈下量は、天端の堤内側法肩、天端中央、堤外側法肩の3箇所の沈下量の平均として算出している。沈下量の大きかったレベル2-2地震動に対する堤防の残留変形の状況を示すと、図-4の通りである。

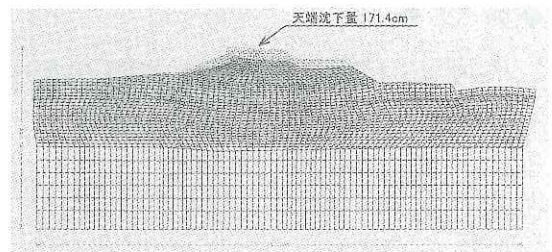
6. まとめ

河川構造物の耐震性能照査について最新の知見を示した。今後、新設構造物は本指針(案)に従って設計され、既存構造物については治水上または利水上重要なものから順次点検が進められる予定である。

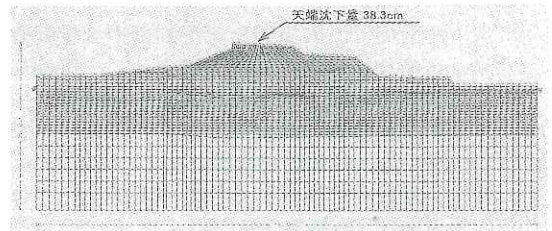
なお、最後になりましたが、耐震性能照査法の検討に際して種々の有益なるご指導を頂いた「河川構造物の耐震検討会」の各委員、および、本稿をまとめるにあたってご示唆を頂いた国土交通省河川局治水課の関係各位に厚く御礼申し上げます。

参考文献

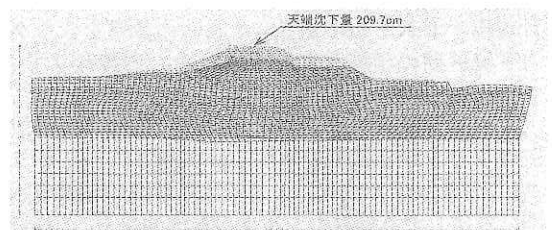
- 1) 国土交通省河川局ホームページ：http://www.mlit.go.jp/river/wf_environment/structure.html
- 2) 河川構造物地震対策技術検討委員会：河川構造物地震対策技術検討委員会報告書、1996
- 3) 土木研究所：地震災害調査報告、土木研究所報告、No.125、No.159、No.165、No.193、No.194、No.196、No.203及び、国土技術政策総合研究所、(独)土木研究所、(独)建築研究所、(独)港湾空港技術研究所：



(a) 自重変形解析による堤防の変形



(b) 液状化層の体積圧縮による堤防の変形



(c) 変形解析と液状化層の体積圧縮による変形

図-4 自重変形解析による堤防変形

2003年十勝沖地震被害に係る現地調査報告書

- 4) 土木学会地震工学委員会耐震基準小委員会：土木構造物の耐震設計ガイドライン(案)－耐震基準作成のための手引き－、2001.9
- 5) 国土交通省：土木・建築にかかる設計の基本、2002.10
- 6) 国土交通省河川局：大規模地震に対するダム耐震性能照査指針(案)・同解説、2005.3
- 7) 安田進ほか：液状化後のせん断剛性比と液状化強度比の関係、第39回地盤工学研究発表会、2004.

杉田秀樹*



独立行政法人土木研究所つくば中央研究所耐震研究グループ振動チーム上席研究員、工博
Dr. Hideki SUGITA

田村敬一**



国土交通省国土技術政策総合研究所危機管理技術研究センター地震災害研究官、工博
Dr. Keiichi TAMURA

高橋章浩***



独立行政法人土木研究所つくば中央研究所耐震研究グループ振動チーム主任研究員、工博
Dr. Akihiro TAKAHASHI

谷本俊輔****



独立行政法人土木研究所つくば中央研究所耐震研究グループ振動チーム研究員
Shunsuke TANIMOTO