

農業専用ダムの安全性評価について

—新区画ダムの耐震性能評価—

旭川開発建設部 農業整備課 ○渡辺 かなみ
佐々木 友也

2012年3月に閣議決定された土地改良長期計画において、東日本大震災の教訓を踏まえ、土地改良施設の耐震強化を推進する方針が打ち出され、全ての国営造成農業用ダムを対象に、設計・施工内容の確認、健全性の確認、レベル2地震動に対する耐震性能照査を行って、総合的な安全性評価を実施することとなった。本報では、直轄かんがい排水事業「美瑛川地区」で造成された新区画ダムの耐震性能照査結果について報告する。

キーワード：危機管理、防災、維持管理

1. はじめに

近年、1995年の兵庫県南部地震、2008年の岩手・宮城内陸地震、さらに2011年3月11日発生の東北地方太平洋沖地震など大規模な地震により、農業用ダムやため池においても、堤体、付帯施設に変状、損傷が生じた事例や堤体が決壊した被害が報告されている。

このような背景のもと、ダムの地震時における安全性の検証が急務となっており、既設ダムの耐震性能照査が実施されることとなった。

本報では、直轄かんがい排水事業「美瑛川地区」で造成された「新区画ダム」について、堤体の耐震性能を照査するにあたり、2019年~2021年度に実施した調査試験及び解析結果の内容を紹介するものである。

(2) 地形、地質概要

現ダム軸の左右岸の地山斜面は、約20°の緩傾斜で、地山は現河床と比べて約50m高くなっている。

右岸取付部上流側約200~300mは浸食のため台地面がくずれており、計画満水位と比べて約8mの高さとなっている。

また、ダムサイトの地質は、火砕流堆積物を起源とする溶結凝灰岩で、表面には不規則に割れ目が見られる。

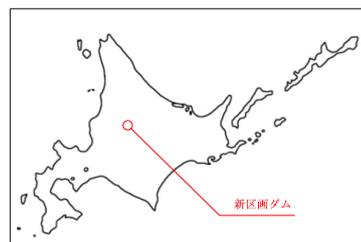


図-1 新区画ダムの位置図

2. 新区画ダムの概要

(1) ダム概要

新区画ダムは、石狩川水系美瑛川ニタチパウマナイ川に建設された、堤高32.3m、堤頂長274.70m、堤体積482千m³のフィルダムである(図-1、写真-1、図-2)。

1962~1969年度にかけて建設され、1970年度から供用を開始している。



写真-1 ダム貯水池状況写真

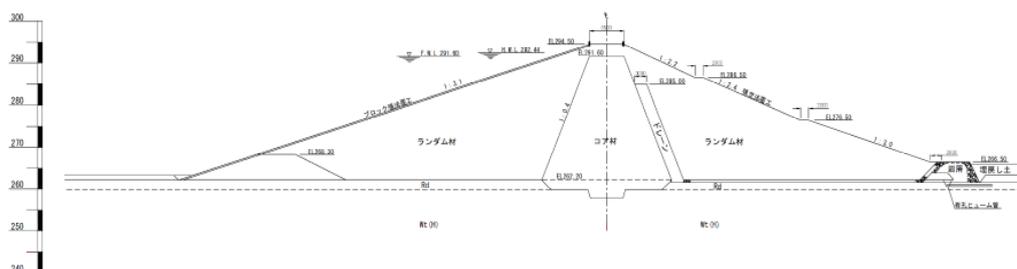


図-2 堤体一般平面図

3. 国営造成農業用ダム安全性評価について

国営造成農業用ダムは半数以上が供用後20年以上を経過しており、経年的な劣化の進行やこれに伴う性能低下、あるいは地震等の外力による施設機能の損失が懸念されている。このため、経年的な劣化の進行や性能低下の状況を把握する機能診断を実施している。一方、震度法により設計された国営造成農業用ダムは既往の大規模地震においても貯水機能の喪失に陥ることなくその安全性が維持されてきたが、ダムサイトで想定されるレベル2地震動をはじめ、ダムサイトの地形や地質、造成時の設計や施工の詳細等の条件はダム毎に異なることから、これらの条件に応じた耐震性能を地震時のダムの挙動を再現しながら定量的に評価することが求められている。

このため、農林水産省では、土地改良長期計画に基づき、国が造成し又は管理している農業用ダムを対象に、①ダム造成時の設計・施工内容の詳細を確認し、②機能診断に基づく現在の健全性を検証した上で、③動的解析によりレベル2地震動に対する耐震性能照査を行う「農業用ダムの安全性評価」を実施しているところである。

安全性評価のうち、本報で報告を行う耐震性能照査については「国営造成農業用ダム耐震性能照査マニュアル」等に基づき、レベル1地震動(供用期間内1~2度発生する確率をもつ地震動強さ)、レベル2地震動(現在から将来にわたって当該地点で考えられる最大級の強さをもつ地震動)について解析を実施し、堤体への影響及び堤体に構造的な損傷が生じた場合でも、ダムへの貯水・放流機能が維持される等の性能を有しているか検討を行っている。

4. レベル1地震動に対する耐震性能照査

(1) 耐震性能目標

フィルダムのレベル1地震動に対する耐震性能は、「供用期間内に1~2度程度発生する確率をもつ地震動強さ」に対して、「ダムにすべり破壊が生じないこと」とされている。

具体的には、ダム当該地点における地震力(地震係数)を水平方向に作用させた安定計算(震度法)において、すべり破壊に対して所用の安全率(Fs)1.2以上を確保することである。

(2) 堤体の安定計算結果

a) 当初設計時の安定計算

本ダムの設計時の安定計算は、「昭和31年 土地改良設計基準」に基づき行われ、地震力を考慮の上、条件として、水位急降下時(残留間隙水圧を考えない)、上下流断面の完成直後、常時満水位等について検討がなされてい

る(表-1)。

表-1 安定計算結果一覧表

条件	安全率	
	上流側	下流側
貯水圧に対して	5.15	
水位急降下時上流側部分の水平せん断力に対して	1.93	
満水時下流側部分の水平せん断力に対して	2.17	
間隙圧を考えない時	1.9	1.75
土柱の1/2間隙圧を考慮した時	1.49	1.39
水位急降下時	1.17	
満水時地震考慮		1.27

b) 現行基準による安定計算

当初設計時の安定計算が旧基準で行われているため、現行基準に基づいた安定計算を行い、安定性を確認した(図-3)。なお、安定計算に用いた物性値は関係資料が残存していないため、平成30年度・令和元年度の調査・試験結果及び浸潤線水位実測値を用いた。

計算ケースは、ケース①常時満水位及びケース②水位急降下時の2ケースで行い、水平震度kh=0.075(現行基準に基づく)とした。

その結果、ケース①で上流側でFs=1.208、下流側でFs=1.488、ケース②で上流側Fs=1.657、下流側でFs=1.778となり所要の安全率(Fs)を満足する事を確認した(表-2)。

以上により、本ダムの堤体は、レベル1地震動に対する耐震性能を有していると判断した。

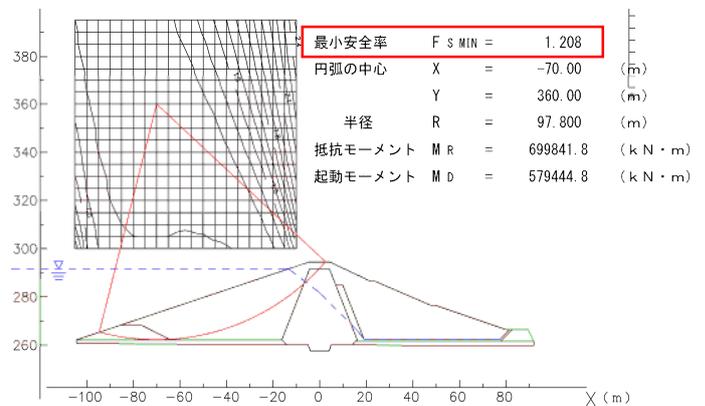


図-3 現行の設計基準に基づく安定計算結果
(常時満水位：上流面)

表-2 安定計算結果一覧表

貯水条件	すべり面	地震係数	すべり面の中心座標[m]			最小安全率 Fs	判定
			X	Y	R		
常時満水位時 FWL. 291.60	上流面	0.15	-70.00	360.00	97.80	1.208	○
	下流面		45.00	335.00	58.40	1.488	○
水位急降下時 FWL. 291.60 ↓ LWL. 271.10	上流面	0.075	-70.00	365.00	102.80	1.657	○
	下流面		45.00	335.00	58.40	1.778	○

5. レベル2地震動に対する耐震性能照査

(1) 耐震性能目標

フィルダムのレベル2地震動に対する耐震性能は、「現在から将来にわたって当該地点で考えられる最大級の強さを持つ地震動強さ」に対して、「地震によりダムに構造的な損傷が生じた場合でも構造的な損傷が修復可能であり、ダムの貯水機能、放流機能が維持されること」とされている。

具体的には、ダム地点における最大級の地震波形を設定して地震応答解析を行い、堤体のすべり破壊が生じても、鉛直変位量が許容値内(1.0m未満)となることである。

レベル2地震動に対する耐震性能照査のフローは図-4のとおりである。

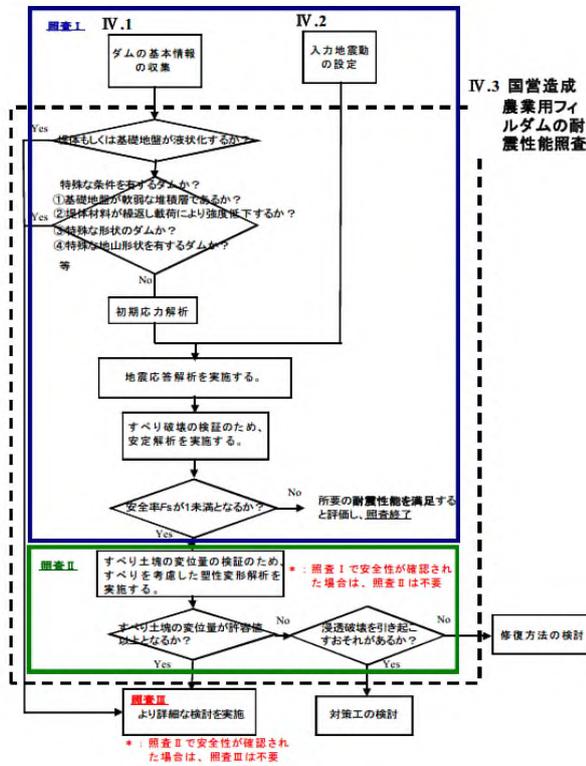


図-4 耐震性能照査のためのフロー

(2) 解析パラメータを設定するための調査・試験

初期応力解析及び地震応答解析を行うにあたり、解析パラメータの設定が必要となるが、本ダムにおいては、堤体材料及び基礎岩盤の性状に関する資料が不足しているため、ボーリング調査を行い解析パラメータの設定に反映した(図-5、表-3)。

なお、初期応力解析は静的解析であり、地震応答解析を行う際に、あらかじめ地震力が作用しない静的状態における自重等の影響のみを考慮して構造物に生じる応力状態を求めるための解析であり、築堤解析(自重解析)や湛水解析等がこれに該当する。一方、地震応答解析は動的解析であり、地震動など時間的に変動する外力の作用

を動的に考慮し、それに対する構造物等の応答(変形や応答力)を求めようとする解析である。

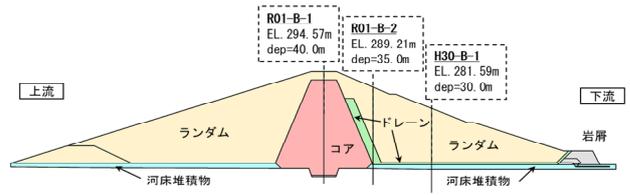


図-5 ボーリング調査位置図

表-3 試験項目・結果一覧

試験項目	試験結果
現場透水試験	コア材・ランダム材は透水性は極めて低く、難透水性を有する。ドレーン材は透水性は中位の下限程度程度の値を有する結果となった。
標準貫入試験	N値 > 50 (河床堆積物) →非常に密な状態
PS検層	コア材は「土質地盤」の目安に包含され、基礎岩についても「堆積軟岩」の目安に包含されている。

(3) 解析モデル及びパラメータの設定

a) 解析モデル

解析対象ダムをモデル化するには、堤体のみでなく基礎岩盤も含めたモデル化が必要となるが、本来半無限に続く地盤の一部を解析モデルとして切り出すことから、解析領域、境界条件には十分留意する必要がある。このことから、境界による影響を緩和するために水平方向は堤敷幅の5倍以上、鉛直方向は堤高の3倍以上としてモデルを作成した。

なお、モデル端部の境界条件は、「静的解析(初期応力解析)」では底面は完全固定、側面は鉛直ローラ、「動的解析(地震応答解析)」では底面弾性基盤との境界に $\rho \cdot V_s$ のダッシュポット、側面はダッシュポット($\rho \cdot V_s$)で自由基盤と連結するモデル(粘性境界)とした(図-6、図-7)。

b) 静的解析パラメータ(初期応力解析)

静的解析パラメータについては、堤体材料は、Duncang-Changモデルとし、堤体材料のパラメータ及び基礎岩盤のパラメータは、設計及び盛立品質管理時の試験結果が十分に残存してなかったため、平成30年度及び令和元年度に実施した試験結果を採用し、試験値がないパラメータについては文献値を採用した(表-4)。

c) 動的解析パラメータ(地震応答解析)

動的解析パラメータについては、堤体材料及び(ドレーン・岩層)のパラメータは、既往の解析事例・文献値のロック材の平均値を採用し、堤体材料(コア材・ランダム材・埋戻し土)のパラメータは、平成30年度及び令和元年度に実施した試験結果を採用した。

また初期せん断弾性係数(G)について、せん断波速度(V_s)は岡本式、ポアソン比は澤田式からそれぞれ求めて

算定した。

基礎地盤のパラメータは、他の物性値からの換算値・文献値等を採用した(表-5)。

凡 例	
着色	ゾーン名
赤	コア
青	ランダム
緑	ドレーン
黄	岩 屑
紫	埋戻し土
水色	河床堆積物
灰	美瑛火砕流堆積物

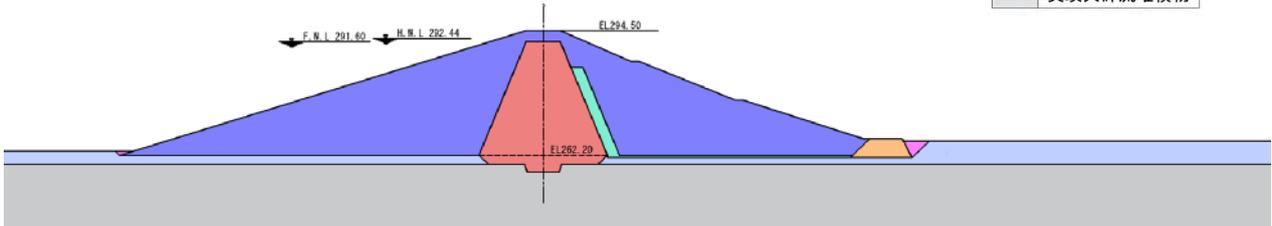


図-6 堤体解析モデル及び材料区分

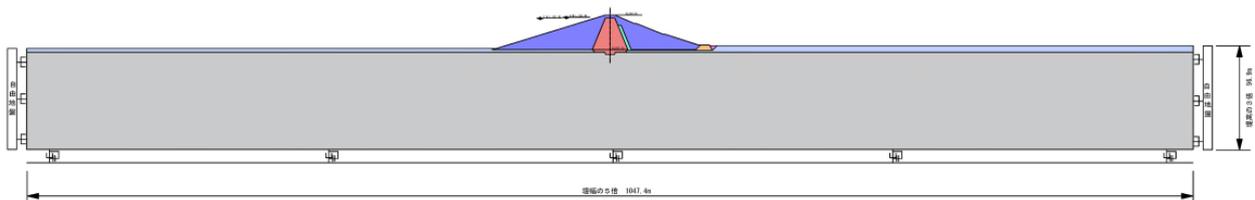


図-7 全体解析モデル

表-4 静的解析パラメータ

堤体材料	物性値	単位体積重量		せん断強度		せん断弾性係数 G (kN/m ²)	ポアソン比 ν _d	減衰定数 h	G/G0-γ、h-γ		
		湿潤 ρ _t (t/m ³)	飽和 γ _{sat} (tf/m ³)	粘着力 C (kN/m ²)	内部摩擦角 φ (°)				双曲線モデル(H-Dモデル)		
									γ _r	h _{max}	
①	コア材	1.836	1.906	9.9	21.1	PS検閲結果230+(830Z/2+300)→Vs →(γ/g)×Vs ² より算出	0.477	双曲線モデル 参照	0.000496	0.238	
②	ランダム材	1.886	1.929	54.6	30.3	既式(コア)→Vs→(γ/g)×Vs ² より算出	薄層式(コア)より算出		0.000467	0.155	
③	ドレーン	2.243	2.304	0.0	39.0	既式(コア)→Vs→(γ/g)×Vs ² より算出	薄層式(コア)より算出		0.00207	0.140	
④	岩屑 ^{※1}	1.970	1.980	0.0	36.1	既式(コア)→Vs→(γ/g)×Vs ² より算出	薄層式(コア)より算出		0.00207	0.140	
⑤	埋戻し土 ^{※2}	1.886	1.929	54.6	30.3	既式(コア)→Vs→(γ/g)×Vs ² より算出	薄層式(コア)より算出		0.000467	0.155	
⑥	河床堆積物	1.876	2.007	15.5	23.3	112,000	0.35		0.10	-	-
⑦	美瑛火砕流堆積物	2.302	2.302	980	38.0	1,507,692	0.30		0.05	-	-

表-5 動的解析パラメータ

番号	材 料	単位体積重量				透水係数		静的解析物性値							
		設計値		設定値		設計値 k cm/s	設定値 k cm/s	変形係数 D kN/m ²	変形係数非線形パラメータ			ポアソン比非線形パラメータ			
		湿潤密度 t/m ³	飽和重量 t/m ³	湿潤密度 t/m ³	飽和重量 t/m ³				K	n	Rf	ν	G	F	D
①	コア材	1.940	-	1.836	1.906	1.0 × 10 ⁻⁶	1.03 × 10 ⁻⁴	-	76	0.809	0.946	-	0.45	0.08	10.00
②	ランダム材	1.940	-	1.886	1.929	1.0 × 10 ⁻⁶	1.59 × 10 ⁻⁴	-	124	1.050	0.816	-	0.45	0.08	10.00
③	ドレーン	-	-	2.243	2.304	-	5.92 × 10 ⁻⁴	-	196	0.793	0.702	-	0.32	0.27	13.82
④	岩屑 ^{※1}	-	-	1.970	1.980	-	8.20 × 10 ⁻⁴	-	1228	0.235	0.799	-	0.32	0.27	13.82
⑤	埋戻し土 ^{※2}	-	-	1.886	1.929	-	1.59 × 10 ⁻⁴	-	124	1.050	0.816	-	0.45	0.08	10.00
⑥	河床堆積物	-	-	1.876	2.007	-	2.55 × 10 ⁻⁷	75,600	-	-	-	0.35	-	-	-
⑦	美瑛火砕流堆積物	-	-	2.302	2.302	-	1.08 × 10 ⁻⁴	980,000	-	-	-	0.30	-	-	-

- : 設計値を採用
- : 盛立施工管理試験の結果を採用
- : 調査・試験値を採用(換算値も含む)
- : 他のゾーンの物性値を採用
- : 文献値を採用
- : 他ダムの物性値を採用
- : 他の物性値からの換算値を採用

(4) 入力地震動の設定

地震応答解析に用いる入力地震動は、「内陸活断層型」と「プレート境界型」の2タイプとする。

入力地震動の設定にあたっては、地震動の波形形状を規定する位相特性と地震動の強さを規定する振幅特性を

考慮する必要があり、ダム周辺の地震断層により生じる地震動、既往の地震動、地域の防災計画において想定される地震動等の情報を十分に収集し、入力地震動(地震波形)を設定した(表-6、図-8、図-9)。

表-6 入力地震動の設定

1)内陸活断層型地震の波形について	2)プレート境界型地震の波形について
a)振幅特性(加速度応答スペクトル) 1)被害地震、2)断層モデル から距離減衰式で算定する。 ・富良野断層帯 西部 ・富良野断層帯 東部 ・沼田-砂川付近の断層帯 2)加速度応答スペクトルが最も大きくなるものから決定。 「富良野断層帯西部」の最短距離式による加速度応答スペクトルが最も大きくなるが、このスペクトルは照査用下限線を下回るため、この照査用下限線を目標スペクトルとして設定する。ただし、J-SHISの富良野断層帯西部を震源とする地震波の加速度応答スペクトルは、一部、照査用下限線を上回るため、両者を包括するように目標スペクトルを再設定する。	a)振幅特性(加速度応答スペクトル) 1)被害地震、2)断層モデル から距離減衰式で算定する。 ・沈み込んだプレート内のやや深い地震 ・日本海溝(三陸・日高沖)モデル ・千島海溝(十勝・根室沖)モデル 2)加速度応答スペクトルが最も大きくなるものから決定。 「沈み込んだプレート内のやや深い地震」の等価震源距離式による加速度応答スペクトルが最も大きくなる。これを目標スペクトルとして設定する。なお、海洋プレート型は下限線への引き延ばしは行わない。
b)位相特性(原種波形) ①新区画ダム地震観測データ(×) 当該ダムでは適切な観測地震波形はない。 ②他ダムの地震観測データ(○) 幕別ダム、瑞穂ダム、厚真ダム、穂別ダムで25gal以上の地震波が観測されているが、弾性波速度が近い値を示し、最大加速が最も大きい瑞穂ダム(2018年胆振東部地震)の観測波形を適用する。 ③近傍での地震観測データ(KiK-net、K-NET)(×) 新区画ダム周辺の地震観測所について、25gal以上の観測地震はない。 ④模擬地震(出典:J-SHIS)(△) 参考:富良野断層帯 西部を震源とした新区画ダム地点における模擬地震波 【設定方針(内陸活断層型)】 a)振幅特性:距離減衰式と照査用下限等々スペクトル及びJ-SHISの加速度応答スペクトルを包括する様に設定 b)位相特性:原種波形として、瑞穂ダムの地震波(2018年胆振東部地震)で設定。	b)位相特性(原種波形) ①新区画ダム地震観測データ(×) 当該ダムでは適切な観測地震波形はない。 ②他ダムの地震観測データ(○) 幕別ダム、漁川ダムで25gal以上の地震波が観測されているが、基礎の地質年代や岩種がよく似ており、弾性波速度が近い値を示す漁川ダム(2003年十勝沖地震)の観測波形を適用する。 ③近傍での地震観測データ(KiK-net、K-NET)(△) KiK-net中富良野で、25gal以上の観測波がある(2003年十勝沖地震)が、他ダム観測データ観測波形があるために採用しない。 【設定方針(プレート境界型)】 a)振幅特性:距離減衰式で算定した「沈み込んだプレート内のやや深い地震」により設定 b)位相特性:原種波形として、漁川ダムの地震波(2003年十勝沖地震)で設定。

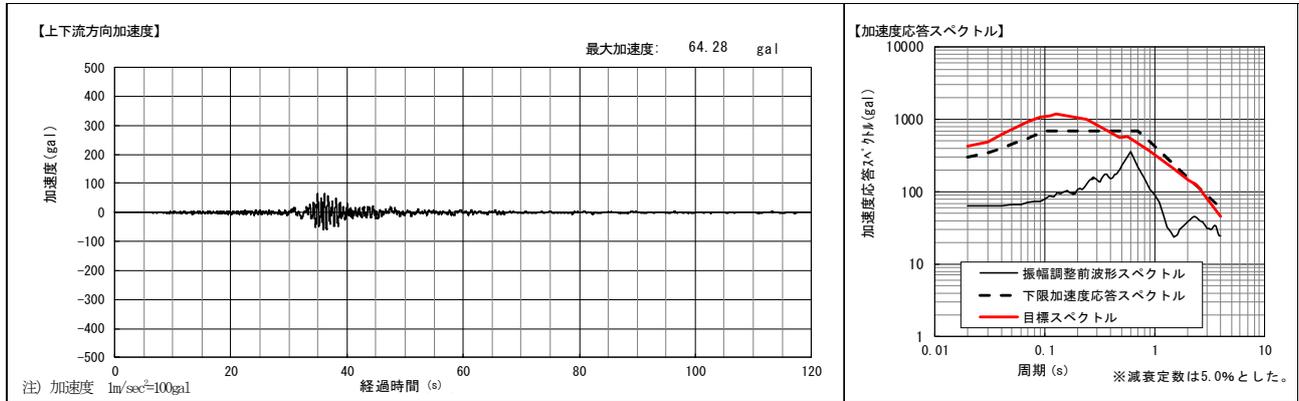


図-8 内陸活断層型入力地震動

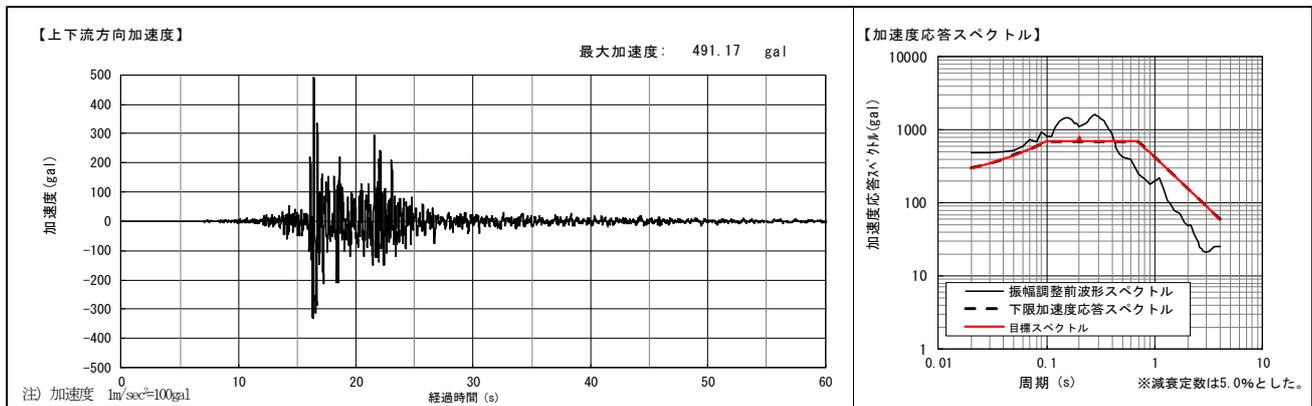


図-9 プレート境界型入力地震動

(5) 初期応力解析結果

初期応力解析では、まず築堤解析として盛立完了後の堤体内応力を再現し、次にランダムゾーン上流面に貯水圧を作用させて試験湛水時の応力状態を再現すると同時に、堤体を対象として飽和-不飽和浸透流解析を行った。浸透流解析により求めた満水時の堤体内水頭分布は、上流から下流に向かって水頭が低くなる傾向を示し、流線は全体的になめらかであった。

また、築堤解析により盛立完了後の沈下量を算出した結果、盛立完了後の沈下量は最大で0.20mとなり、均一ダム一般的な沈下量0.96m~1.62mと比べると本ダムの沈下量は小さい結果が得られた。

築堤解析及び湛水解析結果から得られた盛立完了後及び満水時の応力分布については、特異な応力分布は認められなかった。

(6) レベル2地震応答解析結果

a) 内陸活断層型地震

内陸活断層型地震を入力波とした場合の解析結果は、**図-10**に示すとおりであり、最大加速度は、ダム基礎部で396.8gal及びダム天端中央部で809.1galとなり、応答倍率は約2.04倍であった。

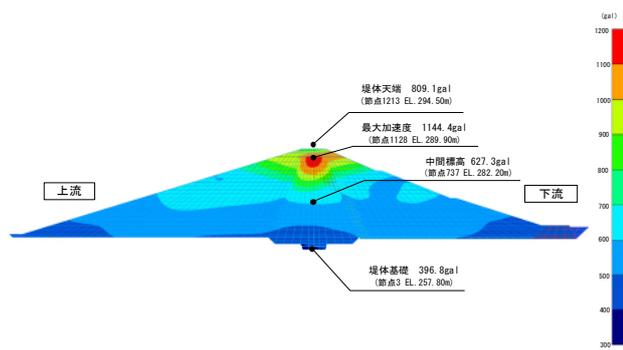


図-10 地震応答解析結果(内陸活断層型地震)

b) プレート境界型地震

プレート境界型地震を入力波とした場合の解析結果は、**図-11**に示すとおりであり、最大加速度は、ダム基礎部で394.5gal及びダム天端中央部で584.1galとなり、応答倍率は約1.48倍であった。

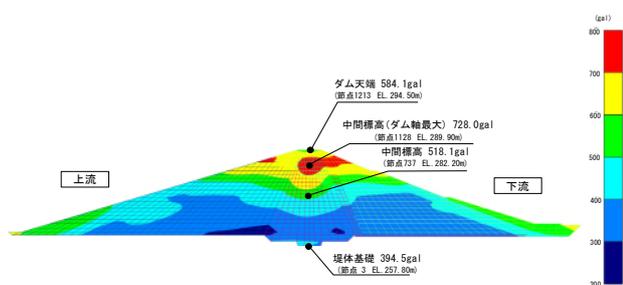


図-11 地震応答解析結果(プレート境界型地震)

(7) すべり変形解析結果

すべり変形解析は、ニューマーク法、渡辺・馬場法により、すべり破壊に対する安定計算を行った。

a) 内陸活断層型地震

すべり安定解析結果は、最小すべり安全率 $F_s=1.0$ 未満となる円弧があるが、沈下量はいずれのケースにおいても許容値(1.0m)未満(最大沈下量は、上流側法面で0.017m、下流側法面で0.014m)であった。

b) プレート境界型地震

すべり安定解析結果は、上流側法面及び下流側法面ともに、最小すべり安全率 $F_s=1.0$ 以上あり、沈下も発生しない。

(8) 耐震性能照査結果

地震応答解析及びすべり変形解析の結果から、レベル2地震発生時には、内陸活断層型地震で最小すべり安全率(1.0)を下回る円弧はあるものの、すべり土塊の鉛直変位量(沈下量)は許容値内(1.0m未満)である。また、プレート境界型地震で最小すべり安全率(1.0)を下回る円弧はなく、すべり土塊の鉛直変位量(沈下量)も許容値内(1.0m未満)である。

また、新区画ダムは水位低下設備によって常時満水位から最低水位まで速やかに水位を低下することが可能であり、浸透破壊を引き起こす可能性はないと評価した。

以上から、耐震性能照査マニュアルにもとづく所要の耐震性能を有していると評価した。

6. おわりに

本報文では、新区画ダムの耐震性能照査の検討結果を報告した。

本照査と併せて、ダムの技術資料等に基づき、①ダムサイトの地質、基礎掘削・堤体・基礎処理・洪水吐等における設計・施工内容、②堤体の変形・浸透、洪水吐(コンクリート)、観測地・観測施設(浸透・変形)、貯水池内・堤体周辺の法面・傾斜、基礎地盤・基礎処理に関する調査結果について確認を行い、新区画ダムが安定した状態にあることを確認し、今後の管理において留意すべき事項を抽出し、適切に施設管理者に行き継ぐこととした。

最後に、本報文をまとめるに当たり御助言頂いた関係各位に対し、深く謝意を表する。

参考文献

- 1) 農林水産省 農村振興局：国営造成農業用ダム耐震性能照査マニュアル