

7. 台形 CSG ダムの動的特性と耐震性能に関する 一考察

台形 CSG ダムの動的特性と耐震性能に関する一考察

曹 増 延*¹
 安 田 成 夫*²
 安 藤 駿 平*³

1. はじめに

台形 CSG ダムは、わが国で開発され、環境負荷の軽減、材料の有効活用及び設計・施工の合理化に資する特徴がある¹⁾。台形 CSG ダムは新形式であるため、ダムの振動特性及び耐震性能、特に強震時におけるダムの挙動に基づく研究は強化すべきである。

厚幌ダムは、北海道勇払郡厚真町に2018年に竣工した高さ47.2mの台形 CSG ダムである。図-1にダムの上流面図及び標準断面図を示す。2018年北海道胆振東部地震の際に、これまで台形 CSG ダムサイトで最大級の地震動が観測された。ダムの地震時挙動の観測及び再現解析は一種の非破壊検査と位置付けられ、その解析を通

じて CSG の材料特性及びダム堤体の振動特性、さらにはダムの耐震性能を把握することが可能と考えられる²⁾。本研究は、厚幌ダムの地震記録を分析し、ダムの振動特性について考察した。さらに、ダムの地震時挙動を3次元ダム-基礎岩盤-貯水池連成モデルにより再現解析した上で、得られたダム堤体の応答応力を用いて、台形 CSG ダムの設計と同様の方法 (FEM 解析に基づく) により地震時ダムの内的及び外的安定性を確認した。

2. 地震記録に基づくダムの振動特性の分析

(1) 北海道胆振東部地震

2018年9月6日に北海道胆振東部地震 (Mj 6.7) が発生し、震央から厚幌ダムまでの距離はわずか8.6 kmであっ

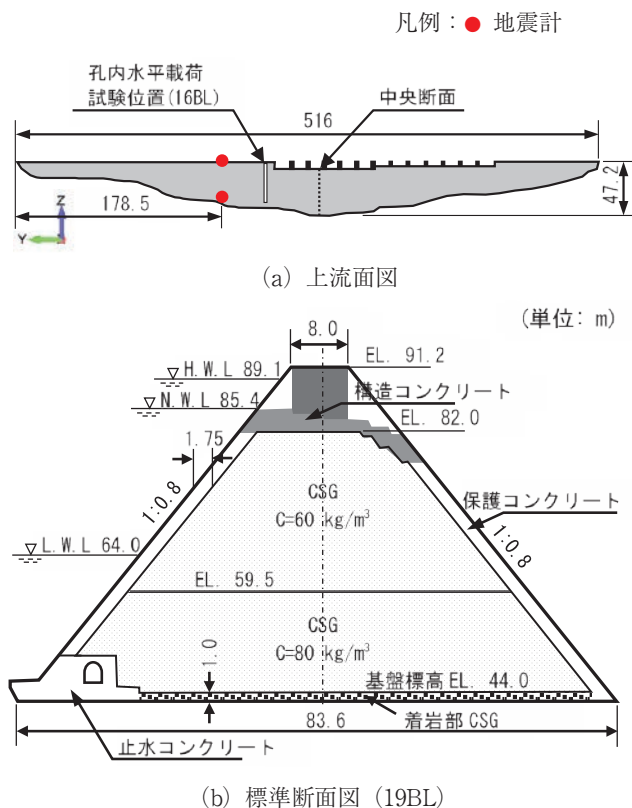


図-1 厚幌ダムの上流面図と標準断面図

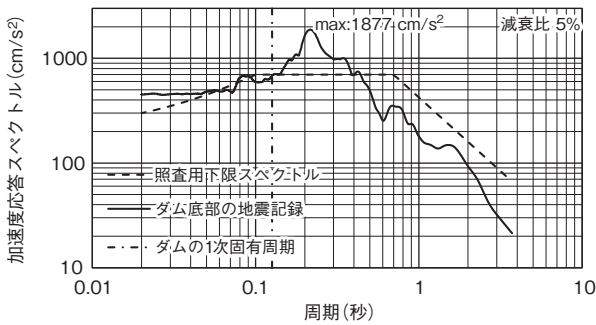
*¹ (株) J-POWER ビジネスサービス 審議役

*² (一財) ダム技術センター 技術第一部長

*³ 北海道建設部 土木局

た。ダム底部監査廊内の地震計（図—1(a) 参照）で上下流方向に最大加速度 450 cm/s^2 の地震動が記録された。図—2にダム底部の地震記録の上下流方向成分の加速度応答スペクトルとダムの耐震性能照査用下限スペクトル³⁾の比較を示す。地震記録の加速度応答スペクトルは、0.42秒以上の長周期成分は小さいが、0.11秒から0.42秒までの間では照査用下限スペクトルよりも大きく、最大 $1,877\text{ cm/s}^2$ にも達している。また、当該ダムの設計におけるL2地震動に対する耐震性照査で予想される、ダムサイトの最大地震動のピーク加速度は 468 cm/s^2 であることから、この地震時の厚幌ダムの挙動、特に地震におけるダム堤体の内的及び外的安定性を明らかにすることは、今後の台形CSGダムの耐震設計に対して非常に有益であると考えられる。

また、北海道胆振東部地震の後に、ダム底部での最大



図—2 北海道胆振東部地震時厚幌ダム底部の地震記録の上下流方向成分の加速度応答スペクトルとダムの耐震性能照査用下限スペクトルとの比較

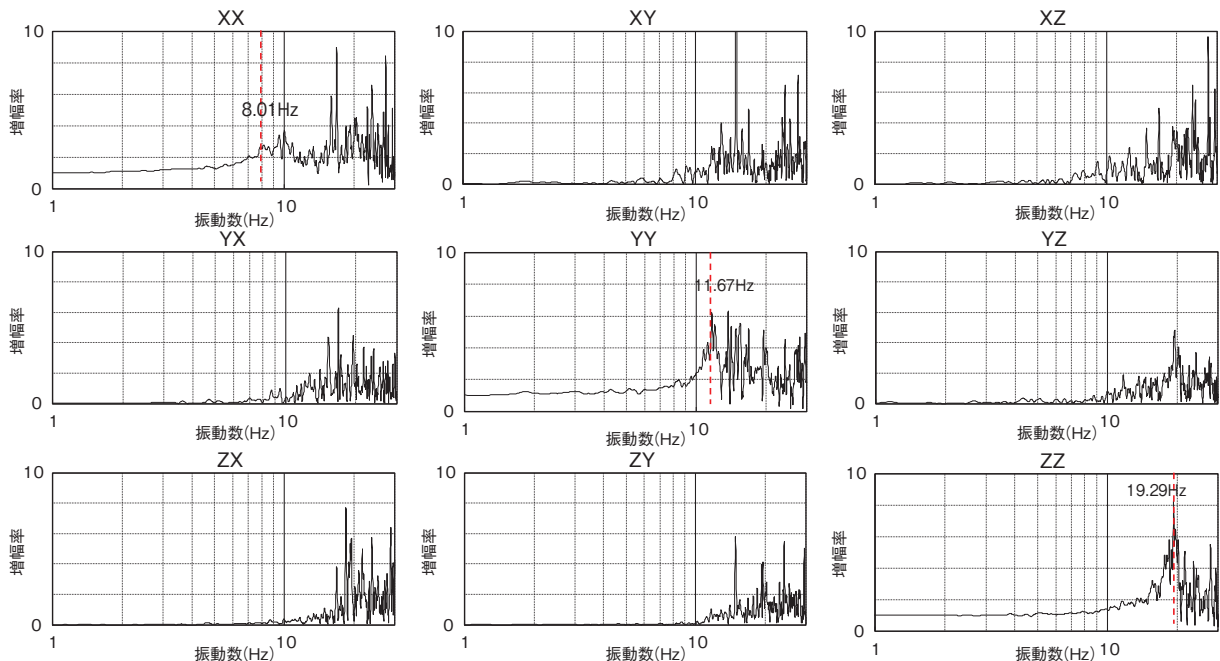
加速度が 2 cm/s^2 以上の地震記録を30回以上収録した。厚幌ダムの振動特性（固有振動数、加速度増幅率及び減衰比）を把握するために、これらの地震記録を以下のように分析した。

(2) ダムの固有振動数の評価

ダム底部及び天端の地震記録を用いて、伝達関数マトリックス法⁴⁾により厚幌ダムの伝達関数を算出し、ダム堤体の固有振動数を調べた。厚幌ダムでは総計11組のデータ（うち、伝達関数の特徴を際立たせるために、加速度の比較的大きな4回の記録を異なる組で重複使用）を構成し、図—3にその算出結果の一例を示す。この図において、伝達関数マトリックスの各成分 $T_{ij}(i, j = X, Y, Z)$ は方向間の相互干渉を考慮する伝達関数である。 $T_{ii}(i = X, Y, Z)$ はダムの底部地震計の*i*方向の振動に対する天端地震計での*i*方向の応答特性を示す伝達関数であり、各成分 $T_{ij}(i, j = X, Y, Z, \text{但し}, i \neq j)$ は方向間の相互干渉を示す寄与伝達関数である。これにより上下流方向には低い振動数側の2つ、ダム軸方向及び鉛直方向にはそれぞれ1つの固有振動数が得られた。その値を表—1にまとめた。図—3及び表—1から以下のことが分かる。

- 1) 上下流方向（図—3の T_{XX} ）の1次及び2次固有振動数の平均値はそれぞれ7.9 Hzと9.9 Hzである。また、図—1に示すとおり、地震計の設置位置がダムの中央断面ではなく、左岸側に大きく偏っている。この位置はダムの2次固有振動モードの最大値の節点に近いことから、この位置での地震観測結果から

凡例：X 上下流方向, Y ダム軸方向, Z 鉛直方向
 図中の破線と数値はダムの1次固有振動数を示す。



図—3 地震記録により得られた厚幌ダムの伝達関数マトリックスの例（表—1の1組）

1次固有振動モードよりも2次固有振動モードが検出されやすくなっていると推測する。図-3に示すように、伝達関数の1次ピークよりも2次ピークの増幅率がやや高くなっていることも厚幌ダムでの地震計の偏った設置状況を反映していると考えられる。この事例は、ダムに地震計を設置する際にダムの固有振動モードを考慮する必要性を改めて示した。

2) ダム軸方向と鉛直方向の1次固有振動数の平均値は、それぞれ12.3 Hzと19.8 Hzである。ダム軸方向

(図-3の T_{yy})に約7 Hzまで増幅率が殆ど1であり、この方向にこの振動数範囲ではダムは殆ど剛体的な挙動をしていることが想像できる。鉛直方向(図-3の T_{zz})には約10 Hzまで同様な傾向がある。

3) 10 Hzまでの振動数範囲では、各寄与関数 T_{ij} ($i, j = X, Y, Z$, 但し, $i \neq j$)は殆ど0であり、これにより10 Hzまでダムの上下流方向、ダム軸方向及び鉛直方向の各振動方向間の相互干渉は非常に小さいと推定できる。

表-1 伝達関数より読取ったダムの固有振動数

地震記録組	地震発生時刻	最大加速度 (cm/s^2)*1	上下流		ダム軸	鉛直
			1次 (Hz)	2次 (Hz)	1次 (Hz)	1次 (Hz)
1	20180906 03:07	450	8.0	9.9	11.7	19.3
	20180906 03:23	28				
	20180906 06:11	21				
2	20180906 03:09	7	8.0	10.0	12.9	20.3
	20180906 03:19	6				
	20180906 06:11	21				
3	20180906 03:11	1	8.0	9.8	12.7	20.0
	20180906 03:13	3				
	20180906 03:17	2				
4	20180906 03:23	28	7.5	10.2	12.0	20.2
	20180906 03:25	5				
	20180906 03:31	1				
5	20180906 03:32	10	8.1	9.8	12.1	19.9
	20180906 03:35	5				
	20180906 06:32	2				
6	20180906 03:56	6	7.6	9.5	12.1	19.3
	20180906 04:10	10				
	20180906 04:39	8				
7	20180906 05:20	2	8.3	10.2	13.1	19.6
	20180906 06:04	16				
	20180906 06:06	4				
8	20180906 07:19	3	7.8	9.9	11.9	19.7
	20180906 07:29	3				
	20180906 07:45	2				
9	20180906 09:16	4	7.9	10.0	12.8	20.7
	20180906 11:07	3				
	20180906 14:39	4				
10	20180906 03:09	7	7.8	10.0	11.7	19.6
	20180906 16:53	9				
	20180906 18:33	1				
11	20180906 03:07	450	7.7	9.8	12.1	19.7
	20180906 06:11	21				
	20190221 21:22	121				
平均			7.9	9.9	12.3	19.8

注：*1 二つの水平動のうちの最大加速度値

(3) ダムの加速度増幅率の評価

ダム天端と底部における上下流方向の地震加速度記録の最大値の比をダムの加速度増幅率として求め、増幅率とダム底部の最大加速度との関係を図-4に示す。また、対数近似により図示の近似曲線が得られた。厚幌ダムの加速度増幅率は凡そ2.0以下であり、平均値としては1.7である。最大加速度30 cm/s²以上の地震記録は2回だけであったので、多数の地震の結果を考察するために図中の加速度の最大値を30 cm/s²までとした。2018年9月6日の北海道胆振東部地震（ダム底部地震計の最大加速度450 cm/s²）及びその翌年2月21日の地震（同121 cm/s²）における加速度の増幅率は、それぞれ1.3と1.4である。加速度が大きくなるにつれて増幅率がやや小さくなる傾向が見られるが（相関係数0.59）、この傾向を今後も地震記録の蓄積に伴い考察する必要がある。また、加速度増幅率は同規模の重力式コンクリートダムと比べ小さく、その理由は材料性質の違いによるもの以外に二つ考えられる。第一は厚幌ダムの固有振動数と地震動の卓越振動数（一例として前出の図-2参照）が離れていること、第二は厚幌ダムでは地震計がダムの中央断面ではなく、図-1(a)に示す位置で、両地震計の標高の差は約30 mしかなかったことにあると推測する。

(4) ダムの減衰比の評価

ダムの天端と底部の地震記録を用いて、ダムの伝達関数マトリックスを算出し、さらにダム天端の振動を強制振動と自由振動に分解した上で、得られた自由振動に減衰率法を適用することにより減衰比を算出した。算出法の詳細については関連文献⁴⁾を参照されたい。地震記録から得られた減衰比とダム底部の最大加速度の関係を図-5にプロットする。ダム底部の加速度最大値が30 cm/s²以下の範囲では減衰比とダム底部の加速度最大値の依存関係は明瞭ではなく（相関係数0.33）、個別なデータを

除けば減衰比が3.0～8.0%の範囲でばらついている。これと比べ北海道胆振東部地震の記録から得た減衰比（8.3%）がやや大きいのは、この地震の際にダム堤体に軽微な非線形性が発生していたと推測される。台形CSGダムの減衰比についてはこれまで公表されたデータはなく、本検討が初めての事例と考えられる。今後、台形CSGダムの減衰比について、地震記録、特に強震記録の蓄積を待って考察が必要である。

以上の検討により厚幌ダムの振動特性（固有振動数、加速度増幅率及び減衰比）を明らかにした。これらの実地震の観測データに基づく検討結果は、今後の台形CSGダムの耐震設計及び耐震性評価に資することが期待される。

3. 北海道胆振東部地震時厚幌ダムの動的挙動の再現解析と安全性確認

国内では、台形CSGダムは2021年8月現在既に4基が竣工しているが、ダムサイトで震度7を記録したのは厚幌ダムが初めてである。よって、北海道胆振東部地震時厚幌ダムの安全性が確認できれば、当該ダムの耐震性を実証できることのみならず、今後同型式ダムの合理的な耐震設計にも大いに参考になると考えられる。

地震時ダムの安全性を確認するため、2.(1)節で述べた北海道胆振東部地震時観測された厚幌ダムの挙動を3次元FEMモデルを用いて再現解析した。解析におけるCSGの物性値は材料試験の結果等²⁾を基に設定した。解析の再現性は、地震記録と解析による加速度、フーリエスペクトル及びその伝達関数の比較により判断した。再現性向上のためCSGの弾性係数と減衰比を微調整した。次に、ダムの地震時挙動が再現された場合、ダム堤体の応答応力を用いて北海道胆振東部地震における厚幌ダムの安全性を確認した。

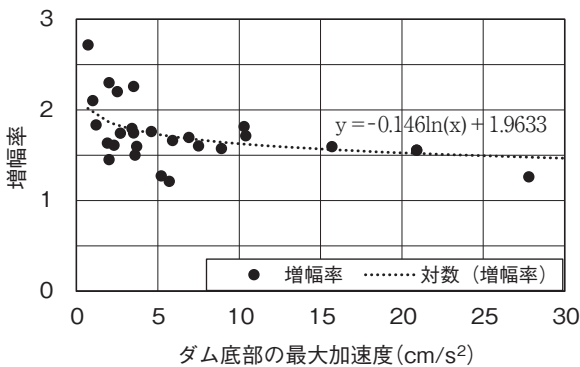


図-4 加速度増幅率とダム底部の最大加速度との関係

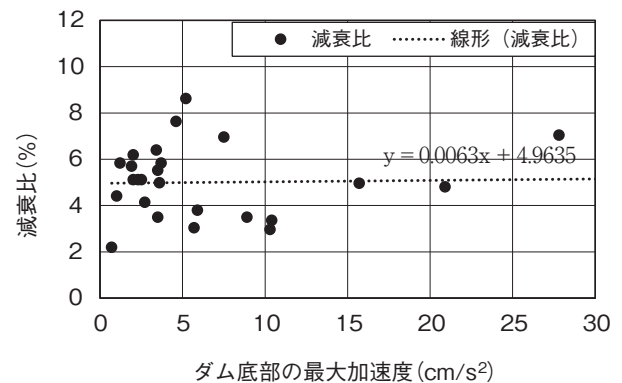


図-5 減衰比とダム底部の最大加速度との関係

(1) 解析用モデル

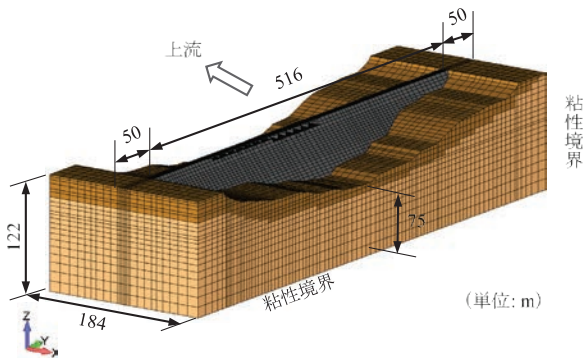
再現解析用 3 次元ダム－基礎岩盤連成系の FEM モデルを図一 6 に示す。地震時の貯水位は EL.70.8 m であったことから、この水位に相応する貯水池を有限差分法によりモデル化した。貯水に関する波動方程式とダム－基礎岩盤に関する運動方程式を別々に解き、ダム上流面での連成条件（動水圧条件と運動速度条件）によりダムと貯水の相互作用の影響を考慮した。ダム及び基礎岩盤の振動による散乱波の逸散及び解析モデルに対する周辺地山の振動の影響を考慮するために、基礎岩盤モデルの底面及び側方境界で粘性境界条件⁵⁾を用いた。貯水池の上流端では波動エネルギーの完全吸収境界条件⁶⁾を適用し、貯水池の底部では部分反射条⁶⁾（貯水池底部の堆積物と水のインピーダンス比1.5）を設定した。貯水池の表面では表面重力波の影響を考慮した。

(2) 物性値

a) 弾性係数

本再現解析では、実ダムの状況をより反映している孔内水平載荷試験結果²⁾を基にダム堤体内部の常時平均主応力 σ_m を用いて式 (1) により CSG の弾性係数を設定した。

$$E = \begin{cases} k \cdot 9260 \sigma_m^{0.372} & C = 60 \text{ kg/m}^3 \\ k \cdot 14170 \sigma_m^{0.372} & C = 80 \text{ kg/m}^3 \end{cases} \quad (1)$$



図一 6 解析モデル

解析の再現性向上のため、式 (1) における係数 k を繰返し調整した結果として、 $k=1.35$ の時に解析結果と地震観測結果が最も一致した。すなわち地震時挙動の再現解析により同定した CSG の弾性係数は、孔内水平載荷試験結果より 35% 大きくなっている。この差は CSG 材の動的弾性係数と静的弾性係数の違いと理解する。また、ダム堤体の保護コンクリートの弾性係数は、コンクリートの一般値を用いた。基礎岩盤の弾性係数は、弾性波速度試験結果により設定して、線形弾性材料として用いた。

b) 減衰比

前節の検討により北海道胆振東部地震時における厚幌ダムの減衰比が 8.3% であると推定した。本再現解析では、この値を解析の初期値として設定し、天端の最大加速度応答値が観測結果と合うように調整した。最終的に CSG の減衰比として 10% と同定した。保護コンクリートの減衰比を一般値の 5% とし、基礎岩盤の減衰比は一般値の 5% とした。

c) 密度とポアソン比

CSG の密度は材料試験の結果を用いて設定し、ポアソン比は材料試験で使用した値 (0.25) を用いた。基礎岩盤の密度、ポアソン比はそれぞれの一般値を用いた。

以上述べた再現解析で同定、または設定した物性値を表一 2 にまとめる。

(3) 入力地震動

北海道胆振東部地震時の厚幌ダム底部監査廊での加速度記録 (図一 7(b)) を用いて、伝達関数を用いた引戻し法により、解析モデルの底面位置における入力地震動を作成した。継続時間 40.96 秒の 3 方向の地震波形を 0.01 秒の刻みで同時に入力し、ダム－基礎岩盤－貯水池連成系の地震応答を直接積分法により解析した。

表一 2 再現解析により同定及び設定した物性値

区分	弾性係数 (N/mm ²)	密度 (g/cm ³)	ポアソン比	減衰比
CSG (60kg/m ³)	1.35 × 9260 $\sigma_m^{0.372}$	2.09 大型供試体試験	0.25	10%
CSG (80kg/m ³)	1.35 × 14170 $\sigma_m^{0.372}$			
保護コンクリート	35,000	2.40	0.20	5%
表層岩盤	11,000 弾性波速度より算出	2.29	0.30	5%
深部岩盤	14,000 弾性波速度より算出			5%

注：設定根拠を記していないのは一般値である。

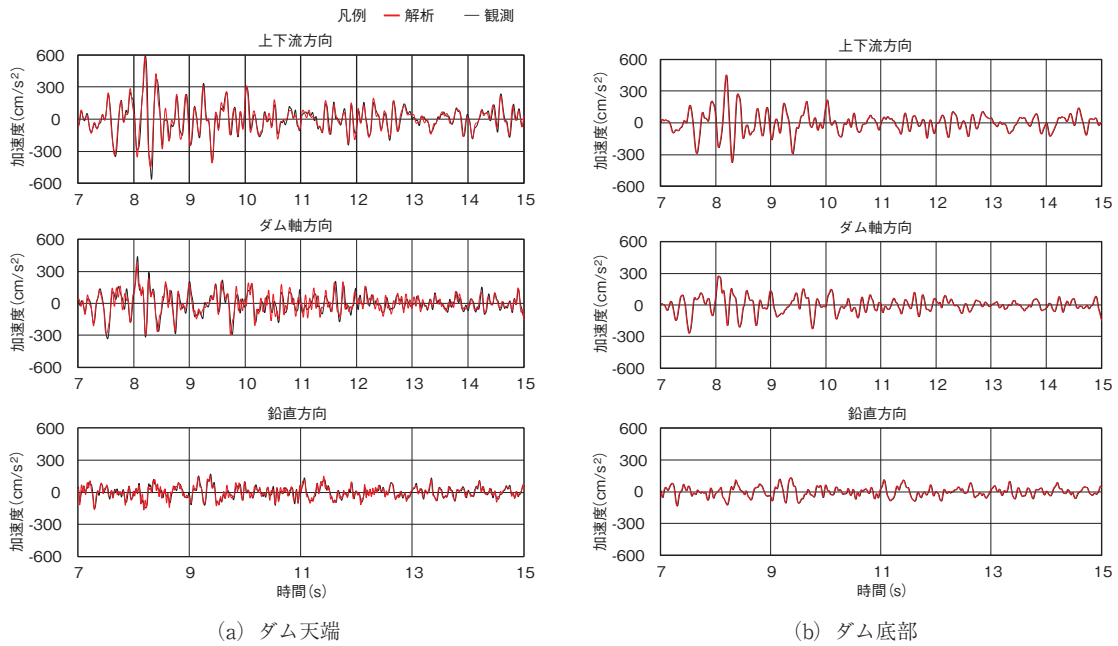
(4) 再現解析結果及び考察

表—3に再現解析により得られたダム天端及び底部地震計位置の加速度の最大値をまとめる。ダム天端のダム軸方向には最大約14%の相対差があるものの、全体として、解析結果と観測結果は非常によく一致している。図—7にダム天端及び底部の加速度応答の主要動(7~15秒)を拡大して比較するが、加速度応答波形についても解析結果と観測結果は非常によく一致している。図—8にダム天端及び底部の地震計位置の加速度のフーリエスペクトル及びその伝達関数を示す。ダム底部の地震記録を用いてモデル底面の入力地震動を作成したことが

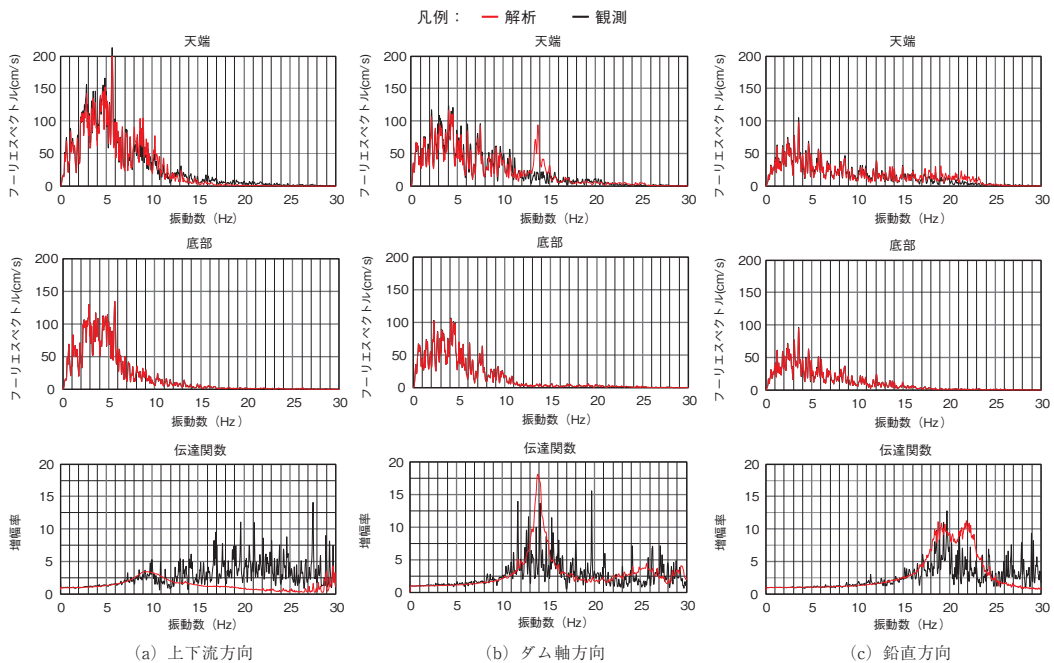
表—3 加速度最大値の比較

地震計	方向	観測 (cm/s ²)	解析 (cm/s ²)	相対誤差* (%)
天端	上下流	591	580	-1.9
	ダム軸	437	375	-14.2
	鉛直	169	165	-2.4
底部	上下流	450	454	+0.9
	ダム軸	277	274	-1.1
	鉛直	133	133	0.0

注：* 相対誤差 = (解析 - 観測) × 100 / 観測



図—7 ダム天端及び底部の加速度応答の主要動



図—8 加速度のフーリエスペクトル及び伝達関数の比較

ら、再現解析でこの位置の地震動が完全に再現された。よって、同図ではダム底部のフーリエスペクトルにおいて黒線と赤線が重なり合った。天端のダム軸方向のフーリエスペクトルにおいて13.7Hz前後では解析結果に1つのピークが立っているが、全体として良く再現されたと考えられる。また、伝達関数は、上下流方向にはダムの固有振動数(9.9Hz)付近で解析結果と観測結果がよく一致しており、解析で設定したCSGの弾性係数が概ね妥当であったと考えられる。他の方向の結果を含め、総じて、天端及び底部の加速度のフーリエスペクトル並びに伝達関数は概ね再現されたと考えられる。

(5) 地震時ダムの安全性確認

台形 CSG ダムは新形式ダムとして、その耐震設計は重力式コンクリートダムやフィルダムのように従来の設計法を使用せず、有限要素法に基づく動的解析により行う。再現解析で得られたダム堤体及びダム底面の応答応力を基に、ダム底面の揚圧力を考慮して、北海道胆振東部地震時の厚幌ダムの安全性を確認した。ダムの安全性の確認は、3次元解析モデルの最大断面(19BL, 常用洪水吐き断面)を抽出して、内的及び外的安定性を評価することにより行った。

a) 内的安定性

室内試験によればCSGの引張強度が圧縮強度の1/7であることから、要素毎の局所安全率は、発生した圧縮応力と、引張応力を7倍して換算した値の大きい方を最大応力として、圧縮強度との比とした(式(2))。

$$F_c(t) = \frac{\sigma_c}{\sigma_b(t)} \quad (2)$$

ここに、 σ_c は一軸圧縮試験によるCSG強度であり、各区分の強度の最低値²⁾(セメント量60 kg/m³区分では1.5 MPa, 80 kg/m³区分では2.3 MPa)を用いた。 σ_b は最大応力、つまり、常時応力を含めた地震時最大圧縮応力値と最大引張応力の7倍の値のうちの大きい方である。

結果として、ダム堤体内部の最小安全率分布を図9の上段に示す。その最小値は1.29であり、下流面底部付近で表れている。このことから、地震時ダムの内的安定性が保たれていたと判断できる。

b) 外的安定性

ダムの外的安定性は、地震時ダム底面で時々刻々に発生する法線応力及びせん断応力を用いて、ダム底面の反力圧縮条件(転倒に対する安定性の確認)及び滑動安定性の2項目で評価した。

底面反力圧縮条件については、ダム底面のせん断力が最大となる瞬間の鉛直応力(揚圧力を考慮)の分布をチェックすることにより確認した。揚圧力は、試験

湛水時に最大断面部で得られた揚圧力係数の平均値を用い、基礎排水孔(監査廊底面中央位置)での揚圧力係数は0.2として、下流水位は0とした。こうして、図9の下段に示すとおりダム底面で引張応力が殆ど発生しなかったことを確認した。上流端で0.07MPaの引張応力が発生していたが、止水コンクリートに当たするため、安定性評価の対象外とした。

一方、ダム底面の滑動安定性は、式(3)により計算した安全率を用いて評価した。

$$F_s(t) = \frac{\sum f(\sigma_m(t) - u_i)l_i}{\sum \tau_i(t)l_i} \quad (3)$$

ここに、 f は岩着面の摩擦抵抗係数であり、基礎岩盤の調査横坑内のせん断試験(2度押し試験)の結果を基に1.0とした。 $\sigma_m(t)$ と $\tau_i(t)$ は、それぞれダム底面をモデル化する接触面要素 i の法線(鉛直)応力とせん断応力である。 l_i は接触面要素 i の上下流方向の長さであり、 u_i は揚圧力である。但し、 $\sigma_m(t) - u_i$ が引張となる時刻ではその要素の抵抗力への寄与を算入しないこととした。式(3)により算出したダム底面の滑動安全率の最小値は、図10に示すとおり2.01であり、地震時ダム底面の滑動安定性に十分な余裕があったことは明らかである。

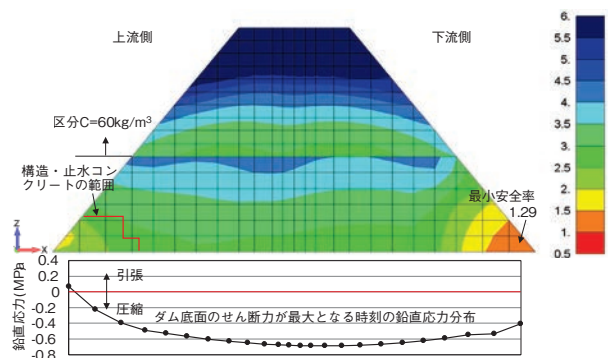


図9 局所安全率分布(上段)と岩着部の鉛直応力分布(下段、揚圧力を考慮)

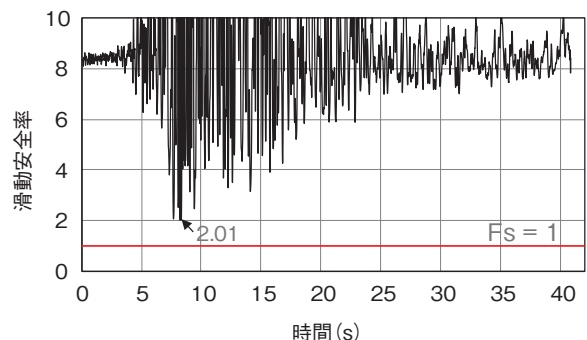


図10 岩着面の滑動安全率時刻歴

以上のことから、北海道胆振東部地震時に厚幌ダムは安定性に十分な余裕を有していたことがわかった。このことは、地震後のダムの臨時点検ならびにその後の観測計器による観測値に異常は認められなかったことと合致している。

4. ま と め

本研究により以下のことを明らかにした。

- 1) 多数の地震記録の分析により、厚幌ダムの基本的な振動特性が明らかになった。ダム堤体の1次固有振動数は7.9Hz、2次固有振動数は9.9Hzである。ダムの上下流方向の加速度増幅率は1.7倍程度であり、ダム底部の加速度振幅の増大に連れて小さくなる傾向が見られているが、今後強震データの蓄積に伴って確認する必要がある。CSGの減衰比は、ダム底部の最大加速度が30 cm/s²未満の場合平均値として5.5%であり、北海道胆振東部地震においては8.3%であった。
- 2) 3次元ダム-基礎岩盤-貯水池連成系の動的解析により観測された北海道胆振東部地震時厚幌ダムの挙動を再現した。再現解析で得られたダム堤体の応答応力を用いて、台形CSGダムの設計と同様の方法により地震時ダムの内的及び外的安定性を確認した。その結果、北海道胆振東部地震において厚幌ダムは十分な耐震安全性を有していたことが分かった。

謝 辞

本研究に関して、北海道胆振総合振興局室蘭建設管理部厚幌ダム建設事務所より貴重な地震観測データを頂いた。ここに記して深謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 藤澤侃彦, 吉田等, 安田成夫, 佐々木隆, 樋口淳美, 笛田俊治: 台形CSGダム, ダム技術, Vol.240, pp.4-24, 2006
- 2) 安田成夫, 曹増延, 安藤駿平: 実地震時挙動に基づく台形CSGダムの材料特性及び耐震性評価, 土木学会論文集 A1, Vol.78, No.2, pp.254-268, 2022
- 3) 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年3月
- 4) 曹増延, 柏柳正之, 吉田昌稔, 浅賀裕之: 地震記録に基づく構造物の減衰比の新しい算出法(DE/TFM), 電力土木, No.413, pp.7-15, 2021
- 5) 三浦房紀, 沖中宏志: 仮想仕事の原理に基づく粘性境界を用いた三次元構造物-地盤系の動的解析手法, 土木学会論文集, 第404号 /I-11, pp.395-404, 1989
- 6) 畑野正: 水の弾性による地震時動水圧の共振に関する吟味, 土木学会論文集第129号, pp.1-5, 1966年5月