

3.1 実地震時挙動に基づく台形 CSG ダムの材料特性の同定及び耐震性評価

研究年度：令和2年度～令和3年度

研究分野：台形 CSG ダムの設計に関する研究

調査研究名：台形 CSG ダムの地震時挙動に関する研究

研究者：安田成夫，安藤駿平

【要約】

台形 CSG ダムは、建設コスト縮減や環境負荷の低減を可能とするダムとして日本より提案・開発された。その多くの利点がダム本体、付属構造物について、既に十数基の建設により実証されている。一方、新しいダム型式として、その耐震安全性を更に検証することが必要である。本研究は、2018年9月6日に発生した北海道胆振東部地震（M_j6.7）の際に厚幌ダムで観測された地震時挙動を3次元解析により再現し、当該ダムの内的及び外的安定性を確認した上で、常時満水位状態でレベル2地震に対する優れた耐震性を有することを明らかにした。また、再現解析により CSG の材料特性を同定し、新たな知見が得られた。

【キーワード】

台形 CSG ダム，北海道胆振東部地震，3次元解析，材料特性，耐震性能評価

【背景・目的】

台形CSG（Cemented Sand and Gravel）ダム^{1),2)}は、ダムサイト近傍の砂礫などの入手しやすい石材に、セメント、水を添加し、簡易な練り混ぜにより製造される台形の横断面を有するダムである。建設時コンクリートのような養生待ちの必要がなく連続した施工が可能であり、建設工期をコンクリートダムやフィルダムと比べ大幅に短縮することが出来る。一方、新型ダムとして耐震安全性の実証はまだ十分とは言えない。また、ダム建設の際に材料の入手しやすさに伴い出来上がったCSG材料の特性にバラツキが大きく、全体としたダムの地震時挙動を把握することは容易ではない。そのため、これまでCSG材料特性についていくつかの研究がなされた。金銅ら³⁾は静的及び急速載荷での引張強度試験と破壊エネルギー試験を実施し、載荷速度によるCSGの引張強度及び破壊エネルギーへの影響を明らかにした。山口ら⁴⁾はCSG材料の繰返し載荷試験やクリープ試験を行い、CSGの長期強度特性を明らかにした上で、ダムの構造安定性への影響を検討した。しかし、これまで実際の台形CSGダムの地震時挙動に基づく研究は見られない。2018年9月6日に北海道胆振東部地震（M_j6.7）が発生し、震央から僅か8.6 km離れた高さ47.2 mの厚幌ダム（CSG）の底部で、最大450 cm/s²の加速度が観測された。この記録は日本国内でこれまで台形CSGダムサイトで記録

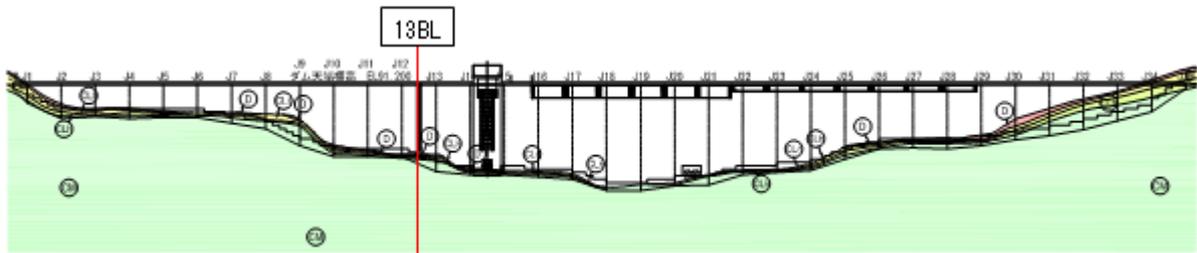
された最大の加速度値であり、当該ダムに対しては供用期間における最大地震動（レベル2地震）に相当である。本研究は、当該地震時に観測された厚幌ダムの地震記録を分析し、地震時ダムの挙動を3次元ダム－基礎岩盤－貯水連成モデルにより再現解析した。再現解析によりCSGの弾性係数及び減衰比の拘束圧依存性を同定し、観測された地震動を精度よく再現することができた。再現された時に堤体内部及びダム底面で発生する応力結果を持って内的及び外的安定性を確認した。さらに、常時満水位状態で、類似な地震動に対する台形CSGダムの優れた耐震安全性を明らかにした。なお、地震記録の分析結果を基に堤頂長の長いダムにおける地震観測について提言している。

【令和2年度の研究成果】

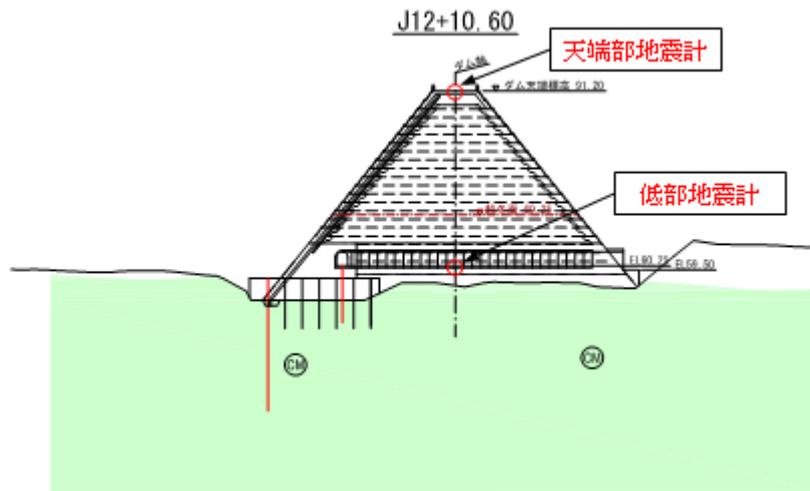
1. ダム諸元及び観測された地震動

（1）ダム諸元

厚幌ダムは、北海道勇払郡厚真町厚真川水系厚真川における高さ47.2 mの台形CSGダムであり、洪水調節と利水及び河川環境の保全を目的として2010年に竣工されたものである。図-1にダムの上流面図および標準断面図を示し、表-1にダムの諸元を示す。ダムサイトの地質は軽舞層の「硬質頁岩層」に相当するものであり、頁岩を主体として砂岩・凝灰岩・凝灰質泥岩等を挟在している。



(a) 上流面図



(b) 標準断面図

図-1 厚幌ダム及び地震計位置

表-1 厚幌ダムの諸元

ダム所在地	北海道勇払郡厚真町
ダム形式	台形 CSG ダム
堤高	47.2 m (最低地盤標高 EL44.0 m)
堤頂長	516 m
堤頂幅	8.0 m
天端標高	EL.91.2 m
法面勾配	上流側 : 1:0.8 下流側 : 1:0.8
体積	480,000 m ³
流域面積	105.3 km ²
総貯水量	47,400,000 m ³

表-2 北海道胆振東部地震時厚幌ダムの最大加速度記録

観測点	方向	観測値 (cm/s ²)
天端	上下流	+591.4
		-562.5
	ダム軸	+437.1
		-329.9
	鉛直	+168.9
		-149.7
監査廊	上下流	+371.7
		-450.4
	ダム軸	+277.2
		-265.4
	鉛直	+133.0
		-130.4
上下流方向の一次固有周波数 (Hz)		9.95

(2) 観測された地震動

2018年9月6日に北海道胆振東部地震(M_j6.7)が発生し、震央から厚幌ダムまでの距離はわずか8.6 kmであった。ダム底部の地震計(図-1参照)で上下流方向に最大加速度450 cm/s²の地震動が記録された。表-2に地震記録の最大値一覧を示す。この地震動は当該ダムの供用期間において考えられる最大地震動(468 cm/s²)に相当し、日本国内の台形CSGダムサイトでの最大地震記録であった。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(減衰5%)とダムの耐震性能照査用下限スペクトル⁵⁾の比較を示す。加速度応答スペクトルでは0.42秒以上の長周期成分は小さいが、ダムの1次周期である0.11秒から0.42秒の間では照査用スペクトルよりも大きく、最大1877 cm/s²にも達するスペクトル値を示している。このことから、厚幌ダムに対して北海道胆振東部地震はレベル2地震に相当すると言える。よって、この地震の際の厚幌ダムの挙動、特に地震時ダムで発生した応力、ダム底面のすべり及び転倒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なことであると考えられる。

また、北海道胆振東部地震の後に多数の余震が発生し、基礎岩盤で2 cm/s²以上の記録が30回以上も収録された。これらの地震記録を分析することにより台形CSGダムの振動特性を把握することも可能であると考えられる。

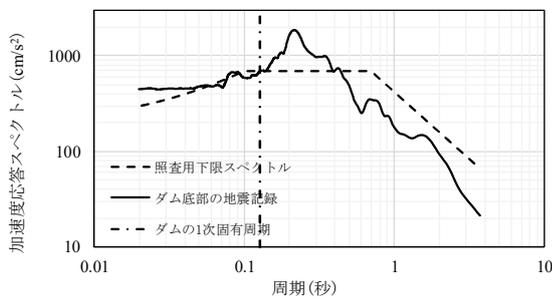


図-2 胆振東部地震時厚幌ダム底部における地震記録の上下流方向成分の加速度応答スペクトルと下限スペクトルとの比較

2. 地震記録を基にダムの振動特性の分析

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⁶⁾により厚幌ダムの伝達関数を算出し、ダム堤体の1次固有振動数を調べた。伝達関数マトリックス法においては3回の地震記録を1組として、総計10組のデータを構成した。図-3にその算出結果の一例を示す。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} ($i, j = X, Y, Z$, 但し、 $i \neq j$)は方向間の相互干渉を考慮する寄与伝達関数である。例えば、 T_{XY} は底部地震計での*Y*方向の振動に対する天端地震計での*X*方向の応答特性を示す。図-3により各方向の伝達関数 T_{XX} , T_{YY} , T_{ZZ} のピークに対応する振動数を読み取り、ダムの各方向の固有振動数として表-3にまとめる。図-3及び表-3から以下のことが分かる。

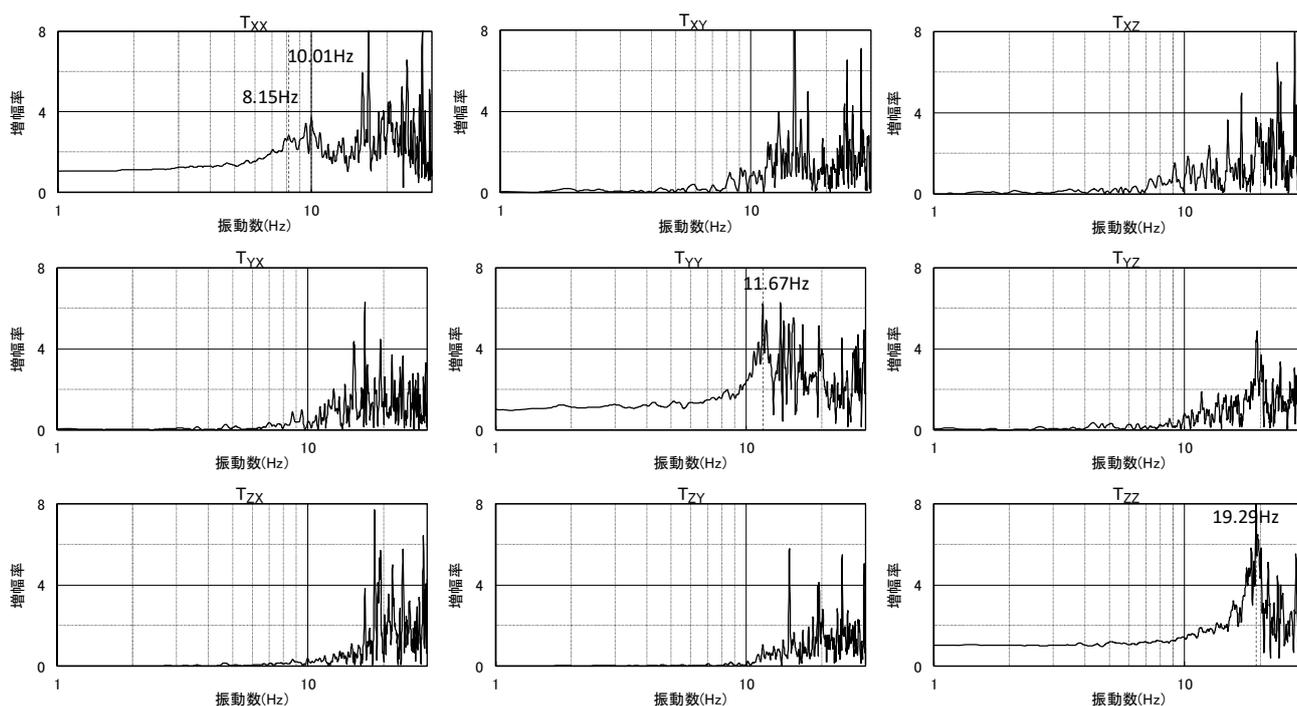
- 1) 上下流方向(T_{XX})の1次及び2次固有振動数の平均値はそれぞれ7.91Hzと9.99Hzである。また、図-3に示すように、伝達関数の1次ピークよりも2次ピークの増幅率が高い。これは地震計の設置位置がダムの中央断面ではなく、左岸側に大きく偏っており、ダムの2

次振動モードの最大値の節点に近いからと推測する。従って、今後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ことをお勧めする。

- 2) ダム軸方向 (T_{YY}) に約 7Hz まで増幅率が殆ど 1 であり、この振動数範囲ではダムが殆ど剛体的な挙動をしていたことが想像できる。また鉛直方向 (T_{ZZ}) に約 10Hz まで同様な傾向がある。こ

れは台形 CSG ダムの特徴であると考ええる。

- 3) 10Hz までの低振動数範囲では、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 10Hz まで各振動方向間の相互干渉は非常に小さいと推定できる。これも台形 CSG ダムの特有な現象と言える。



注: X, 上下流方向; Y, ダム軸方向; Z, 鉛直方向

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-3 伝達関数より得られたダムの固有振動数

地震記録 組番号	上下流方向		ダム軸方向	鉛直方向
	1次(Hz)	2次(Hz)	1次(Hz)	1次(Hz)
1	8.15	10.01	11.67	19.29
2	8.01	9.99	12.94	20.34
3	7.98	9.81	12.67	19.97
4	7.50	10.22	11.99	20.22
5	8.08	9.81	12.13	19.95
6	7.59	9.55	12.11	19.31
7	8.28	10.62	13.06	19.58
8	7.84	9.94	11.89	19.68
9	7.89	10.03	12.77	20.75
10	7.81	9.96	11.74	19.63
平均値	7.91	9.99	12.30	19.87

3. 地震時挙動の再現解析

CSG の材料特性を同定し、台形 CSG ダムの耐震性能を確認するために、2.(2)節で述べた北海道胆振東部地震時に観測された厚幌ダムの挙動を 3 次元 FEM 解析により再現した。解析の再現性は、地震記録と解析による加速度値、波形、フーリエスペクトル及び伝達関数の比較により判断した。

(1) 解析用モデル

再現解析用 3 次元ダム - 基礎岩盤連成モデルを図-4 に示す。地震時貯水池の水位は WL.70.8 m であり、この水位に相応する貯水モデルを有限差分法により解析の際に自動的に生成した。即ち、再現解析ではダム - 基礎岩盤 - 貯水の連成解析を行った。ダム及び基礎岩盤の振動によるエネルギーの逸散及び周辺地山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⁶⁾を用いた。

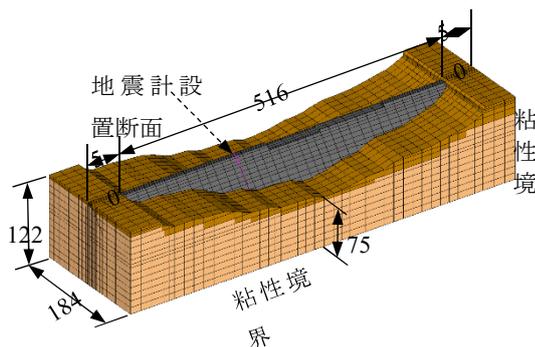


図-4 再現解析用モデル

(2) 物性値

CSG はダムサイト近傍の手近にあり、従来のダムコンクリートでは使用できない低品質な材料を必要最小限の処理を施して、セメントと水を添加して簡易的に練り混ぜることにより作製したものであるから、その最大の特徴は材料特性のばらつきが大きいことである。たとえ室内試験や現場試験を行っても全体としてダムの材料特性を把握することは困難である。一方、CSG はセメントによる硬化体であるが、セメント使用量が少なく、施工も簡略化しているため、その力学特性はコンクリートと土質材料の両方の特徴があると考えられる。

ここで、土質材料のような材料特性が拘束圧に依存することを考慮して、CSG の弾性係数と

減衰比が常時の平均主応力に依存することを仮定する。即ち、

$$E = k\sigma_m^\alpha \quad (1)$$

$$h = \frac{A}{\sigma_m^\beta} \quad (2)$$

ここに、 E と h はそれぞれ CSG の弾性係数と減衰比である。 σ_m は常時の平均主応力である。定数 k 、 A 、 α 及び β は同定パラメータであり、地震時のダムの挙動を精度よく再現するために繰り返し調整した。CSG の密度やポアソン比は材料試験の結果、または一般値を用いて設定した。また、このように設定した CSG が地震時に線形材料であると仮定する。

基礎岩盤及び保護コンクリートは線形材料として、基礎岩盤の弾性係数は現場弾性波速度試験の結果により設定するが、密度、ポアソン比及び減衰比はそれぞれの一般値を用いた。

地震観測結果と解析による加速度最大値、波形、加速度のフーリエスペクトル及び伝達関数を比較することにより再現性を評価し、最終的に表-4 に示す物性が同定された。

表-4 同定された物性

区分	弾性係数 (N/mm ²)	密度 (t/m ³)	ポアソン比	減衰比
深部岩盤	16,000 CM 級、弾性波速度より算出	2.30	0.30	3%
表層岩盤	12,000 CM 級、弾性波速度より算出			4%
CSG	$E = 6600\sigma_{m0}^{0.4}$	2.09 大型供試体試験	0.25	$h = \frac{0.07}{\sigma_{m0}^{0.56}}$
保護コンクリート	35,000	2.40	0.20	3%

注：設定根拠が書かれていないのは一般値である。

ダム堤体の盛立解析により常時応力を計算し、各要素の主応力の平均値を用いて、表-4 に示す

CSG の弾性係数及び減衰比の拘束圧依存式により CSG の弾性係数及び減衰比を設定した。図-5 及び図-6 にダム最大の断面（越流断面）におけるこれらの分布図を示す。

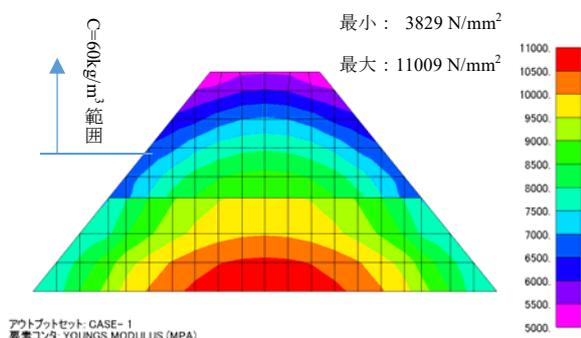


図-5 設定したCSGの弾性係数（最大断面）

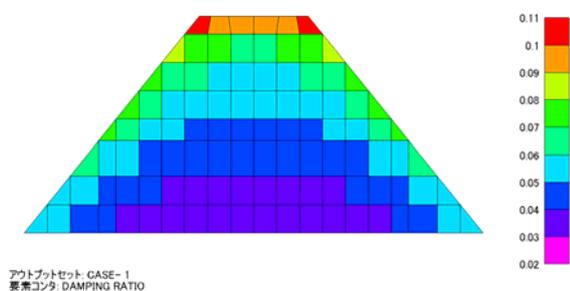


図-6 設定した CSG の減衰比（最大断面）

(3) 入力地震動

北海道胆振東部地震時厚幌ダムの底部監査廊の地震計で加速度記録を用いて、伝達関数による引き戻し法により図-4 に示す底面粘性境界下方の開放基盤面の入力地震動（2E 波）を作成した。全長 40.96 秒の 3 方向の地震動を 0.01 秒の刻みで同時に入力し、ダム及び基礎岩盤の地震応答を直接積分法により解析した。

(4) 再現解析結果及び考察

表-5 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最大値をまとめる。図-7 にその加速度時刻歴を比較し、図-8 に天端の加速度応答の主要動期間（7 秒～17 秒）を拡大する。表-5 に示す通り、解析により得られたダム天端及び底部の地震計位置の各方向の最大加速度応答が観測結果と極めて一致している。また、図-7 及び図-8 からも加速度波形も解析と地震記録がよく合致していることが分かる。図-9 にダム天端及び底部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。この

図より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総じてよく再現されていることが分かる。しかし、上下流方向の 10Hz 付近及びダム軸方向の 14Hz 付近では解析による天端のフーリエスペクトルが大きくなっている。この現象は、基礎岩盤のモデル化を変更することにより顕著に変化することが確認できているが、基礎岩盤をより詳細にモデル化することが課題となっている。

また、図-10 にダムの地震時挙動が再現された時の地震計設置断面とダムの中央断面における加速度の伝達関数を示す。中央断面における伝達関数の一次ピークに対応する振動数は 7.98 Hz であり、地震記録による伝達関数（図-2 の T_{xx} ）の 1 次ピーク振動数の平均値 7.91Hz（表-3）に対応していると考えられる。図-11 に示すダムの固有値解析の結果から、7.98Hz はダムの 1 次固有振動数であることが分かる。このモードでは、地震計設置断面のモード変位が小さいから、この断面での地震記録の分析結果からダムの 1 次固有振動数を判読するのは困難である。一方、図-10 により中央断面の加速度の増幅率が地震計設置断面よりも小さくなっている。これは中央断面が越流断面であり、天端の高さ位置は地震計設置断面の天端より低く、天端の幅はより大きく、相対的に低い振動数の増幅は小さいからと考えられる。このことから、ダムに地震計を設置する際に、ダムの振動モードを考慮した上で設計することをお勧めする。

4. 台形 CSG ダムの耐震性評価

前節で再現されたダムの地震時挙動のダム及び基礎岩盤の応力結果を用いて、当該ダムの北海道胆振東部地震時の内的及び外的安定性を確認した。

表-5 加速度最大値の比較

地震計位置	方向	観測 (cm/s ²)	解析 (cm/s ²)	相対誤差(%)*
天端	上下流	591.4	628.7	+6.3
	ダム軸	437.1	430.1	-1.6
	鉛直	168.9	171.5	+1.5
底部	上下流	450.4	451.0	+0.1
	ダム軸	277.2	277.8	+0.2
	鉛直	133.0	133.0	0.0

注：* 相対誤差 = (解析 - 観測) × 100 / 観測

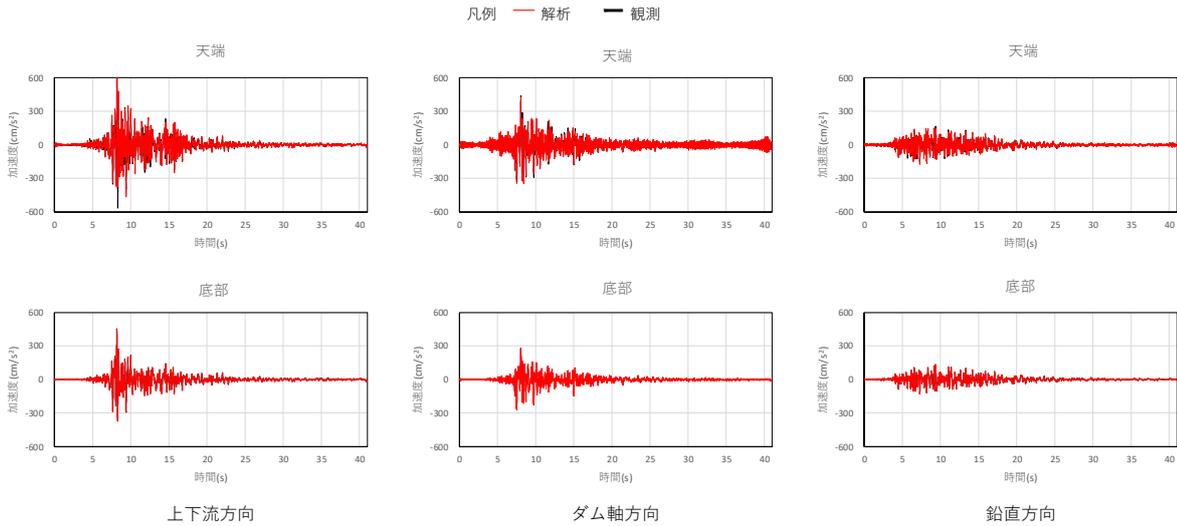


図-7 加速度時刻歴の比較

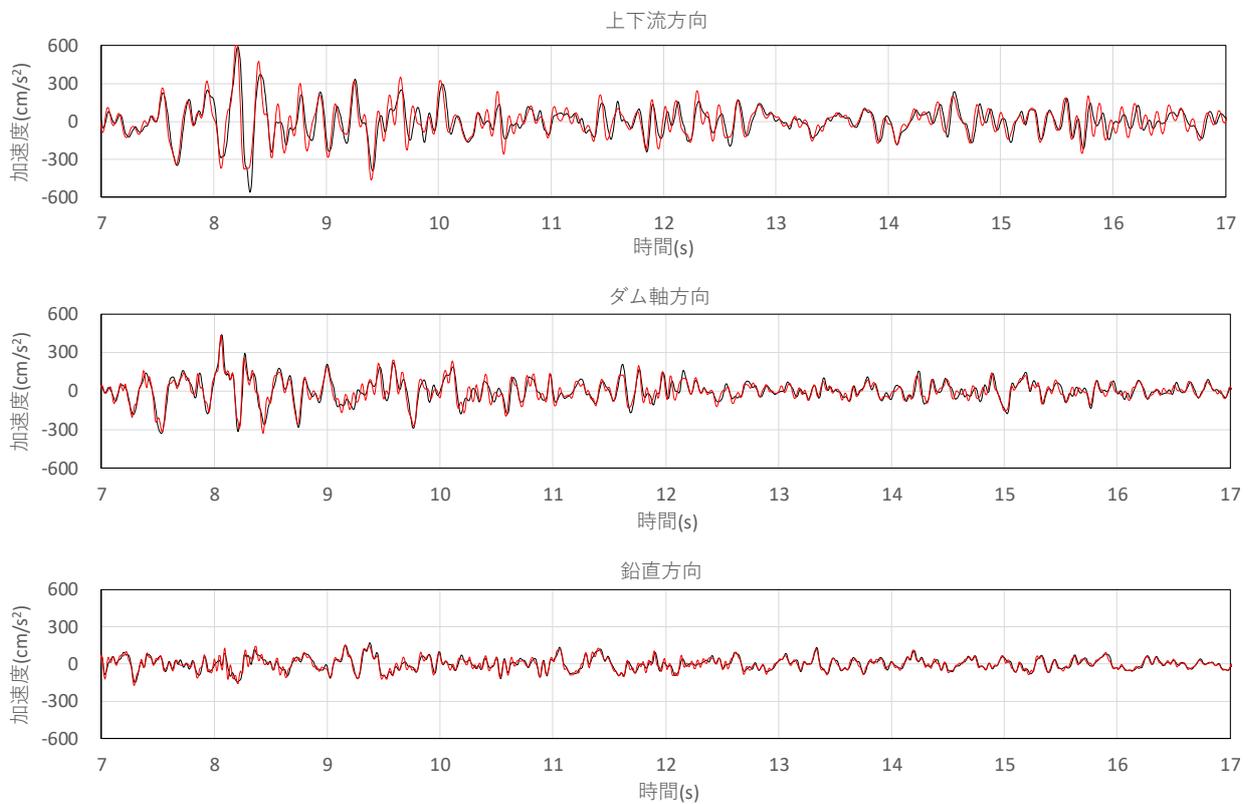


図-8 天端の加速度応答の主要動の拡大図

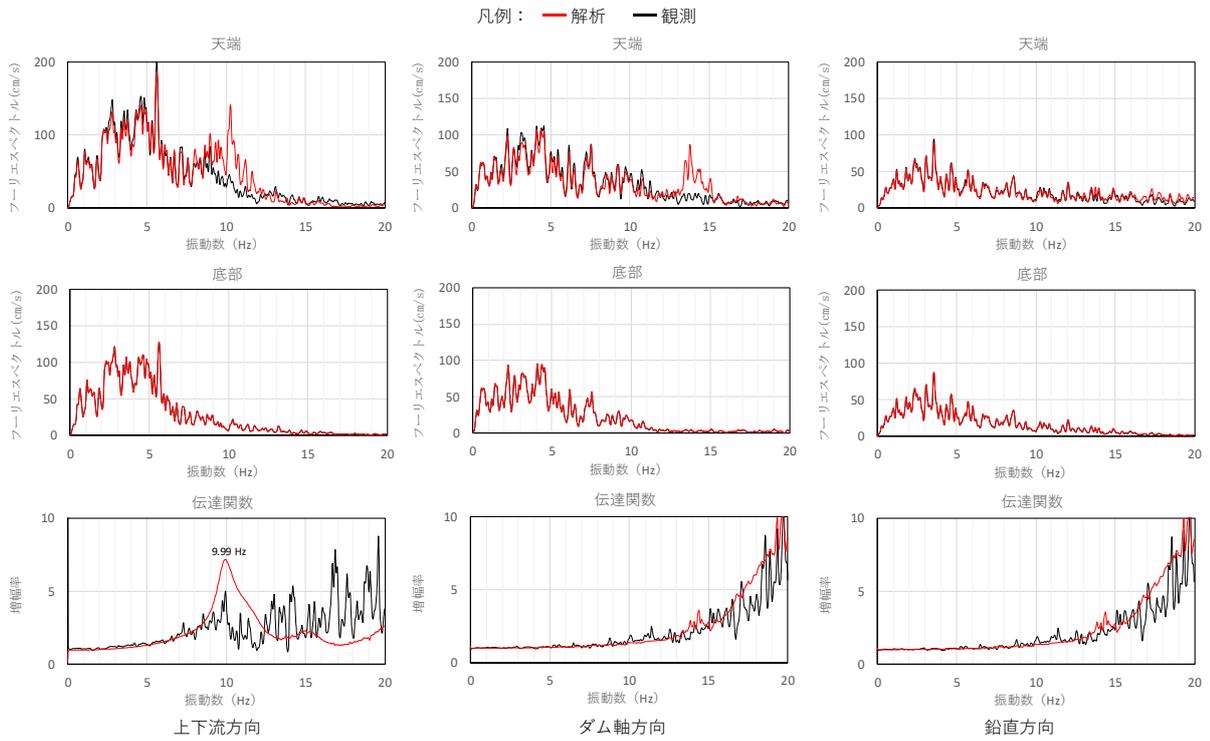


図-9 天端と底部の加速度応答のフーリエスペクトル及び伝達関数の比較

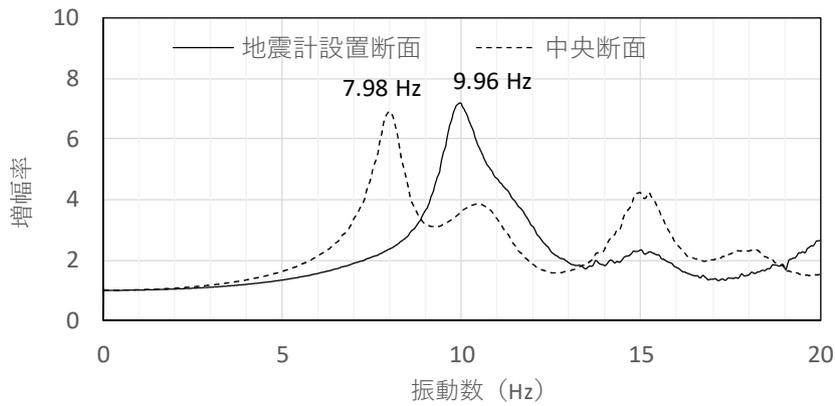
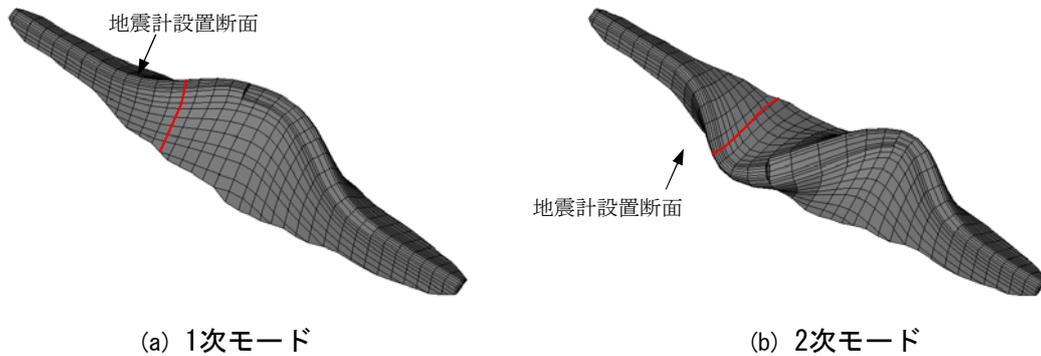


図-10 地震計設置断面と中央断面の伝達関数の比較



(a) 1次モード (b) 2次モード

図-11 固有値解析によるダム固有振動モード

(1) 内的安定性

再現解析で得られたダム堤体の最大主応力（引張側）、最小主応力（圧縮側）結果を用いて、要素毎の局所安全率を計算し、ダムの内的安定性を評価した。CSGの圧縮強度は一軸圧縮試験の結果を用い、引張強度は圧縮強度の1/7とした。要素毎の局所安全率 F_s は、式(3)により計算された。

$$F_s = \frac{\sigma_c}{\sigma_b} \quad \#(3)$$

ここに、 σ_c はCSGの単軸圧縮強度であり、 σ_b は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（ここで最大応力と呼ぶ）。一例として、図-12にはダムの中央断面の最大応力のコンター図、図-13には式(3)により計算された安全率分布を示す。ダム全体の最小安全率は1.13であり、単位セメント量 60 kg/m^3 のCSGの下流端で発生している。このことから胆振東部地震の際に厚幌ダムは内的に安定的であったことが分かる。

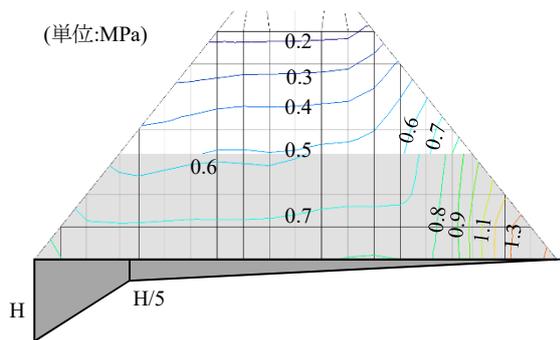


図-12 最大応力値の分布及び揚圧力分布

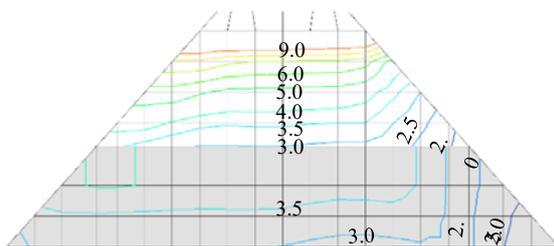


図-13 局所安全率の最小値の分布

(2) 外的安定性

外的安定性は、地震時ダム底面で発生する応力結果を用いて、ダム底面におけるすべり安定性と転倒安定性の二項目でチェックする。すべり安定性は、式(4)により計算される安全率により評価する。

$$F_s(t) = \frac{\sum f(\sigma_{ni}(t) - u_i)l_i}{\sum \tau_i(t)l_i}$$

ここに、 f は摩擦抵抗係数であり、1.0とする。 $\sigma_{ni}(t)$ と $\tau_i(t)$ はそれぞれ接触面要素 i の法線応力とせん断応力である。 u_i は揚圧力であり、 l_i は接触面要素 i の上下流方向の長さである。ただし、 $\sigma_{ni}(t) - u_i$ が引張となる時はその要素の抵抗力への寄与を算入しないこととする。また、揚圧力の分布は前出の図-13に示し、監査廊底面中央位置での揚圧力係数は0.2、下流水位は0とする。

全ての時刻において、 $F_s \geq 1.0$ であることを確認する（北海道胆振東部地震時厚幌ダムサイトの地震動が当該サイトで想定したレベル2地震に相当するため、滑動安定性の評価基準は $F_s \geq 1.0$ である）。図-14にダム底面のすべり安全率時刻歴を示す。その最小値は1.56であり、胆振東部地震で厚幌ダムのすべり安定性が維持されていたと考えられる。

一方、ダム底面の転倒安定性は、ダム底面のせん断力が最大となる瞬間において、ダム底面のCSG部の鉛直応力（揚圧力を含め）が全て圧縮側になっているかを確認することにより評価する。図-15にダム底面のせん断力が最大瞬間の鉛直応力の分布を示す。この図より、せん断力が最大となる瞬間にダム底面の鉛直応力（揚圧力を含め）が全て圧縮状態であり、ダムが転倒安全性も十分保たれていると考えられる。

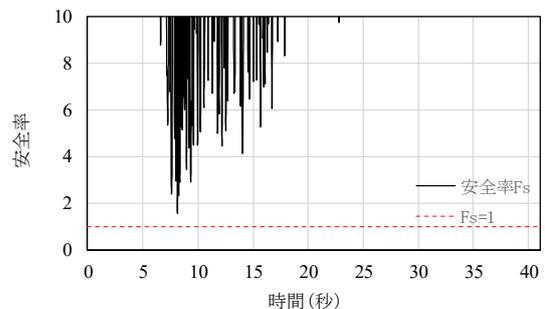


図-14 ダムの中央断面におけるすべり安全率

(北海道胆振東部地震時)

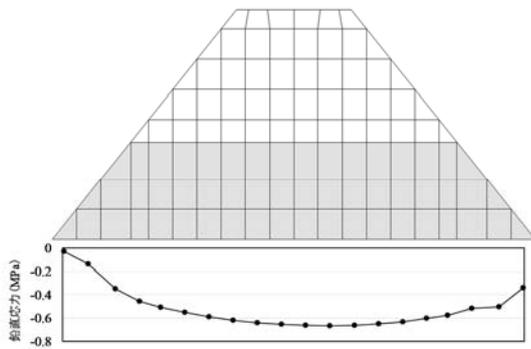


図-15 ダムの中央断面の鉛直応力分布
(揚圧力を考慮した)

【結果とりまとめ】

本研究により以下の成果が得られた。

- ① 強い地震を受けた台形CSGダムの地震時挙動を3次元動的解析により再現し、レベル2地震においても台形CSGダムが内的にも外的にも安定であり、優れた耐震性を有することが確認できた。
- ② CSGの材料試験及びダムの地震時挙動の再現解析による同定でCSGの弾性係数の拘束圧依存性を明らかにした。また、CSGの減衰比の拘束圧依存性についても提案した。
- ③ 地震記録の分析及び地震時挙動の再現解析の結果に基づき、ダムの地震観測についてダムの固有振動モードを考慮した上で地震計の設置位置を設計することを提言した。

【今後の課題】

台形 CSG ダムの堤体を構成する CSG の物理特性について検討を進める計画である。

【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より貴重な地震観測データ並びにダムに関する情報を頂いた。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) 魚本健人: 台形 CSG ダムの可能性と課題, ダム工学, 21(4), pp.232-241, 2011
- 3) 金銅将史, 佐々木隆, 別府万寿博: CSG の引張強度・軟化特性とその载荷速度依存性, 土木学会論文集 E2, Vol.70, No.2, pp.232-251, 2014
- 4) 山口嘉一, 岩下友也, 切無沢徹: 台形 CSG ダムの材料特性と設計方法に関する研究, 国総研資料 14.1, 14.3, Vol.13 No.1, pp.205-315, 2018.
- 5) 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
- 6) 曹増延, 柏柳正之, 吉田昌稔, 浅賀裕之: 振動の方向間相互干渉を考慮する伝達関数の高精度算出法とダム工学での利用, 電力土木, No.390, pp. 1-9, 2017
- 7) 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.
- 8) N. Yasuda, Z. Cao and Y. Kobayashi.: Prediction of Seismic Motion at Engineering Bedrock Based on Earthquake Records and Numerical Analysis, Dam Engineering, 2018.