

重力式ダムの静的および地震時挙動特性に関する数値解析的検討

Numerical analysis on static and dynamic response characteristics of a gravity dam

室蘭工業大学大学院
室蘭工業大学大学院
室蘭工業大学大学院
北海道電力株式会社

○ 学生員 桑原 知也 (Tomoya Kuwahara)
フェロー 岸 徳光 (Norimitsu Kishi)
正 員 小室 雅人 (Masato Komuro)
正 員 尾林 孝平 (Kouhei Obayashi)

1. はじめに

我が国には、これまで数多くのダムが建設されてきた。建設中のものも含めると現在約3,000基が存在しており¹⁾、その中でも重力式ダムが大半を占めている。ダムは、洪水調節や電力供給、飲料水の確保等の観点から、重要な社会基盤施設の一つである。また、規模が大きいことより、地震や洪水などにより決壊した場合には、その下流域に多大な被害を与える可能性がある。1995年に発生した阪神・淡路大震災を教訓とし、山岳部に建設されるダムに対しても限界状態時の耐震性にかかる性能を照査することが重要視されている。

本研究では、コンクリート重力式ダムの耐震性に関する詳細な検討を実施するための基礎資料を得ることを目的に、満水時の静的な応力状態及び地震時挙動特性に関する数値解析を実施した。なお、数値解析には構造解析用汎用プログラムABAQUS²⁾を使用した。

2. 数値解析用ダムモデルの概要

数値解析用のダムモデルは、既設のダムを参考に、堤高70m、堤頂長140m、堤体積約130,000m³の重力式コンクリートダムとした。なお、洪水吐きはゲートが存在しない自然越流方式とした。

3. 数値解析概要

3.1 数値解析条件

本解析では、重力式ダムの三次元的な挙動をより詳細

に評価するために、堤体および周辺地盤を含めた三次元有限要素モデルを作成した。図-1には、本解析に用いた有限要素モデルを示している。解析対象範囲は、ダム堤体を中心に周辺地盤を含め上下流方向に283m、ダム軸方向に420m、高さ方向に210mとし、より詳細な解析を行うために、ダム堤体のほか、水叩部も考慮している。

本解析では、常時満水位を65m、堆砂高さを56m、土圧係数を0.4に設定し、周辺地盤側面には無限要素を導入した。表-1には各解析における境界条件を一覧にして示している。静的解析では自重等による変位の影響を考慮するため、周辺地盤の各側面においては水平方向変位を拘束し、鉛直方向変位を可動とした。また、底面は鉛直方向変位を拘束としている。一方、動的解析では、せん断振動モードを考慮するため、各側面においては鉛直方向変位を拘束し、水平方向変位を可動に設定してい

表-1 境界条件一覧

	側面	底面
静的解析	鉛直ローラー	鉛直固定
動的解析	鉛直固定	鉛直固定

表-2 使用物性値一覧

使用材料	弾性係数 (GPa) E_s (静) / E_d (動)	ポアソン比 ν_s (静) / ν_d (動)	密度 ρ (t/m ³)
基礎地盤	6.0 / 9.0	0.20 / 0.25	2.55
コンクリート	20.5 / 30.75	0.17 / 0.20	2.35
水	-	-	1.00
堆砂土	-	-	1.05

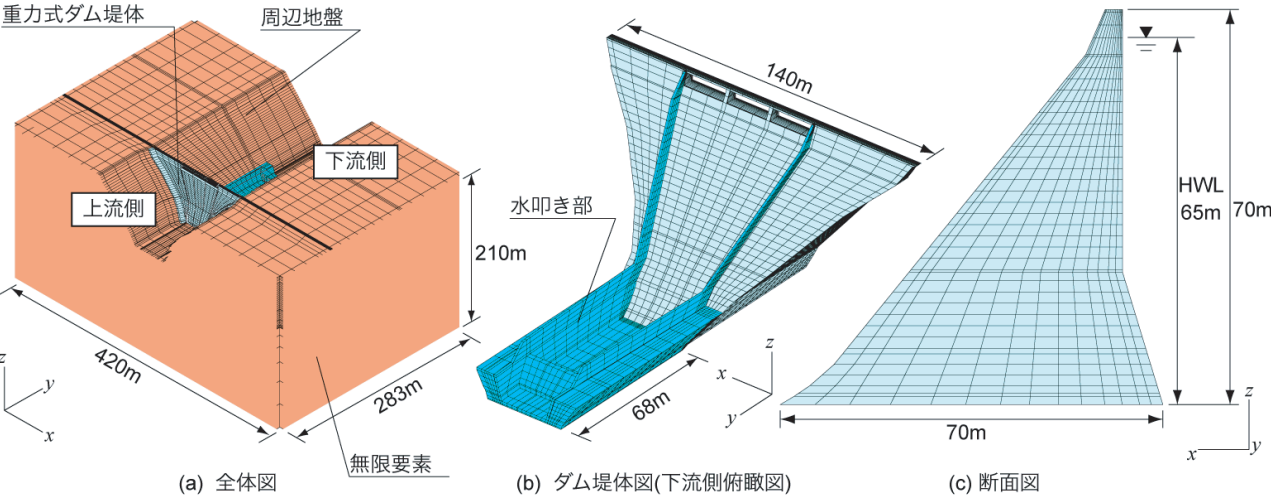


図-1 要素分割状況

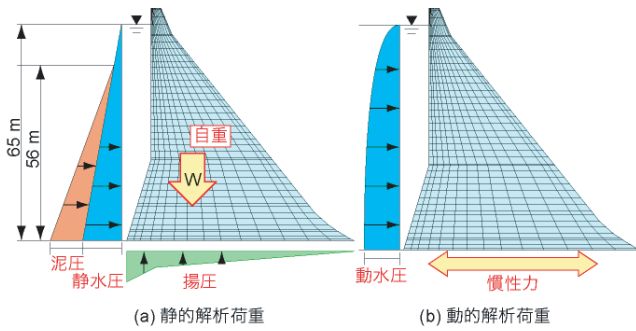
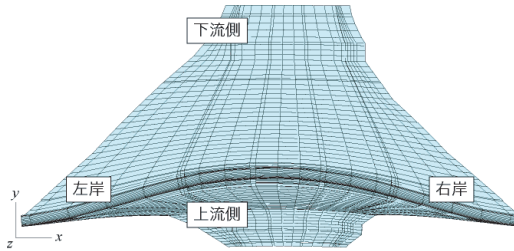


図-2 解析荷重概要図

図-3 固有振動モード図(俯瞰図: $f=3.90$ Hz)

る。総要素数および総節点数は、それぞれ約 59,000、約 66,000 である。材料物性値は、既設のダムを参考に表-2 のように設定し、満水時における静的応力解析では静的物性値を、地震応答解析では動的物性値を用いて数値解析を実施することとした。

図-2 には、各解析で考慮した荷重条件の模式図を示している。本解析では、静的解析には静水圧、泥圧、揚圧力、自重を考慮した。動的応答解析では、ダム堤体及び地山の慣性力その他、ダム堤体に作用する貯水池の動水圧を考慮している。

なお、減衰は質量比例型減衰を採用し、図-3 に示す最低時固有振動数に対して 5% の質量比例型減衰を設定した。

3.2 Westergaard 式による動水圧の導入

ダム堤体の動特性を適切に評価するためには、ダム堤体に作用する動水圧の考慮が不可欠である。本研究では、式(1)に示す Westergaard³⁾ によって提案された動水圧算定式を用いて仮想質量を評価し、ダム堤体上流側の各節点に付加した。

$$\rho_{uw} = \frac{7}{8} \rho_w \sqrt{H \cdot h} \quad (1)$$

ここに、 ρ_{uw} : 任意深さ h における単位面積当たりの付加質量 (kg/m^2)、 ρ_w : 水の単位体積質量 (kg/m^3)、 H : 水深 (m)、 h : 水面から地震時動水圧が作用する点までの水深 (m) である。

3.3 入力地震波形

入力地震波形に関しては、図-4 に示す 100 gal に振幅調整された人工地震波が、堤体底部にて観測されるものと仮定し、この地震波に対応した波形が岩盤基部に入力した場合について検討を行うこととした。従って、解析では、図-4 に示す地震波形がダム堤体基部で観測されるように、岩盤基部まで引き戻しを行っている。地震波の引き戻しは、周辺岩盤を一次元単純せん断層と仮定し行っている。図-4 には、引き戻し解析後の加速度波形を原波形と併せて示している。

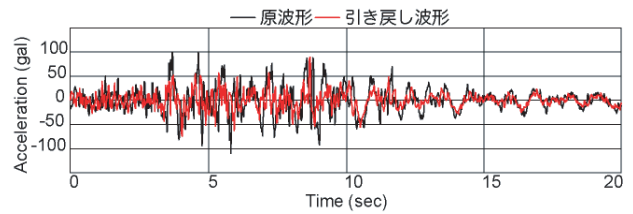


図-4 入力波形

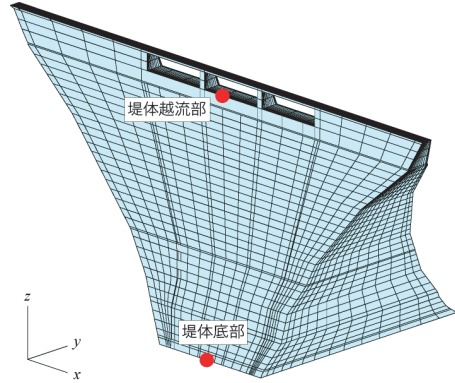


図-5 変位出力点位置

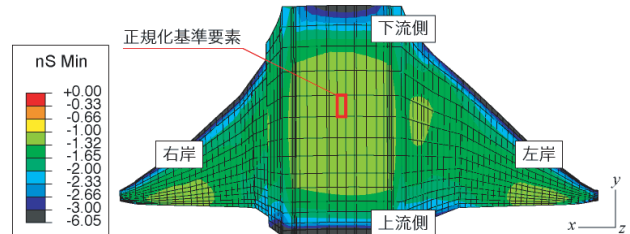


図-6 正規化基準要素位置図(底面)

本解析では、上下流方向に限定して地震波形を入力し、直接積分法による時刻歴応答解析を行った。積分間隔を 1/100 秒と設定し、地震波形入力時間を 20 秒間とした。

図-5 には、動的解析で使用した変位出力点位置を示している。本解析では、ダム堤体上流側の越流部と底部の二点の変位を出力した。

4. 数値解析結果

4.1 静的解析結果

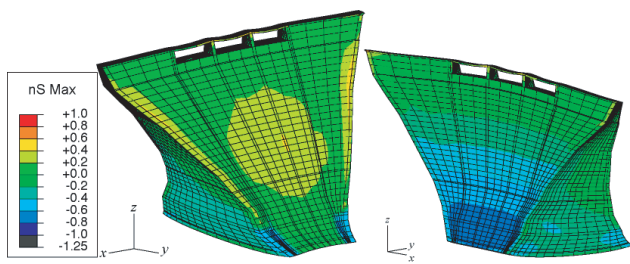
図-6 には、堤体底面における最小主応力分布図を示している。各解析により得られた応力分布は、ダム堤体に発生する応力分布を把握することを目的に、図中の堤体底部要素に発生している最小主応力を -1 に正規化して示すこととする。

図-7 には、満水時におけるダム堤体の正規化された主応力分布図を変形倍率を 1,000 倍にして示している。主応力分布図に着目すると、堤体下流側中央部を中心として引張応力が、上流側底部を中心として圧縮応力が発生していることが分かる。下流側中央部に発生している引張応力のレベルは 0.4 程度であり、堤体全体には基準要素の 0.2 程度のレベルの応力が発生していることが分かる。一方、上流側底部の応力レベルは 6 程度となっている。

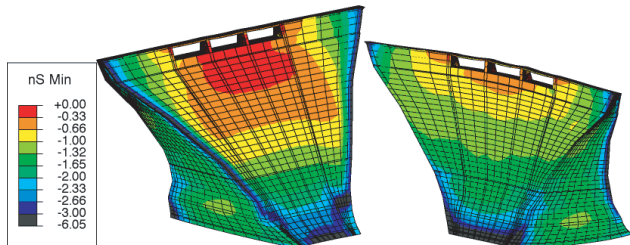
4.2 動的解析結果

ここでは、自重による応力を無視した動的応答値のみ考察を行うこととする。

図-8 には、最大振幅を 100 gal に正規化した場合における堤体底部に対する天端部(図-5 参照)の相対変位に

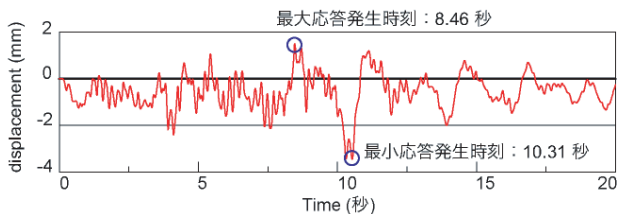


下流側 上流側
(a) 正規化された最大主応力分布図



下流側 上流側
(b) 正規化された最小主応力分布図

図－7 満水時応力分布図 (変形倍率：1,000 倍)



図－8 天端の底部に対する相対変位時刻歴波形

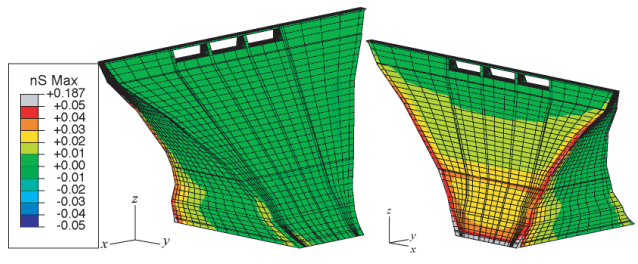
関する時刻歴応答波形を示している。なお、最大応答変位発生時刻は8.46秒、最小応答変位発生時刻は10.31秒であった。図－9、図－10には、最大応答変位発生時(8.46秒)及び最小応答変位発生時(10.31秒)におけるダム堤体の正規化された主応力分布図を変形倍率を1,000倍にして示している。

最大応答変位発生時には、堤体上流側底部では0.2程度の引張応力が発生し、堤体全体では0.01程度の引張応力が発生していることが分かる。一方、最小応答変位発生時には、堤体下流側下部で0.1程度の引張応力が、上流側底部には0.12程度の圧縮応力が発生していることが分かる。

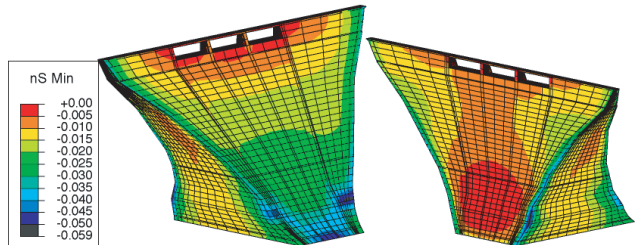
4.3 合応力

ここでは、より詳細な地震時挙動特性の把握のため、静的解析結果と動的解析結果との重ね合わせを行い、静的荷重を考慮した地震時における応答性状について検討を行うこととする。

図－11、図－12には、100 galに正規化した地震波形を入力した場合における最大応答変位発生時及び最小応答変位発生時における各応力の分布図を示している。最大応答変位発生時の応力分布に着目すると、静的解析結果と比較して堤体下流側の引張応力が発生する領域は縮小しており、上流側底部に発生している圧縮応力も4.49程度に低下していることが分かる。最小応答変位発生時においても、同様に下流側に発生している引張応力の領域はわずかに縮小していることが分かる。

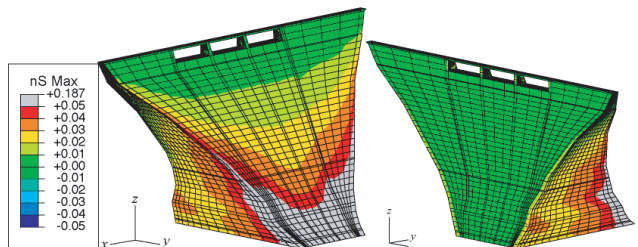


下流側 上流側
(a) 正規化された最大主応力分布図

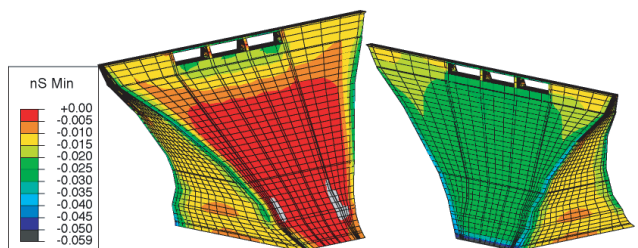


下流側 上流側
(b) 正規化された最小主応力分布図

図－9 最大応答時応力分布図 (変形倍率：1,000 倍)



下流側 上流側
(a) 正規化された最大主応力分布図



下流側 上流側
(b) 正規化された最小主応力分布図

図－10 最小応答時応力分布図 (変形倍率：1,000 倍)

図－13、図－14には、最大振幅を700 galに正規化した場合の地震波入力における最大応答変位発生時及び最小応答変位発生時における主応力分布図を示している。最大応答変位発生時に着目すると、100 galを入力した場合(図－11、図－12参照)と比較して、堤体下流側に発生している引張応力の領域がさらに縮小していることが確認できる。また、上流側底部に発生している圧縮応力は、100 galを入力した場合と比較して、約0.93倍程度となっている。一方、最小応答変位発生時に着目すると、下流側堤体表面に発生している引張応力の領域は縮小しているものの、中央部の応力は100 galの地震波形を入力した場合の約1.3倍程度となっていることが分かる。また、上流側底部に発生している圧縮応力は、100 galの地震波形を入力した場合の約1.15倍程度となっていること

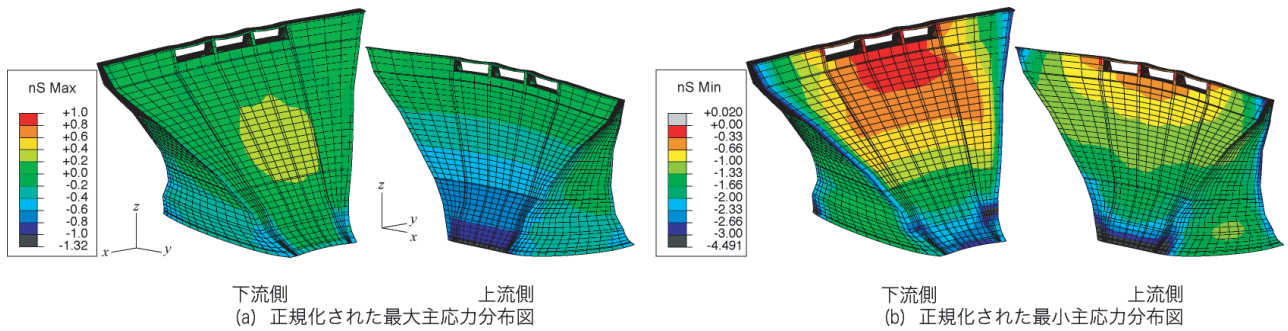


図-11 最大応答時合応力分布図 (100 gal 入力時)

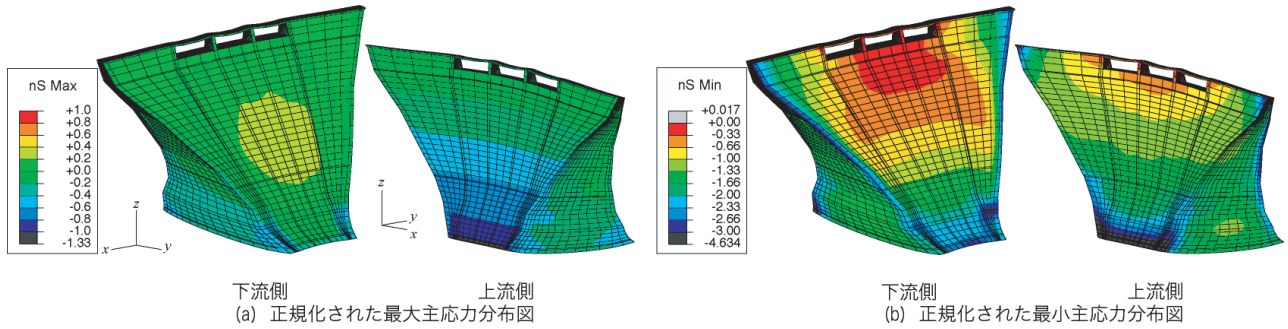


図-12 最小応答時合応力分布図 (100 gal 入力時)

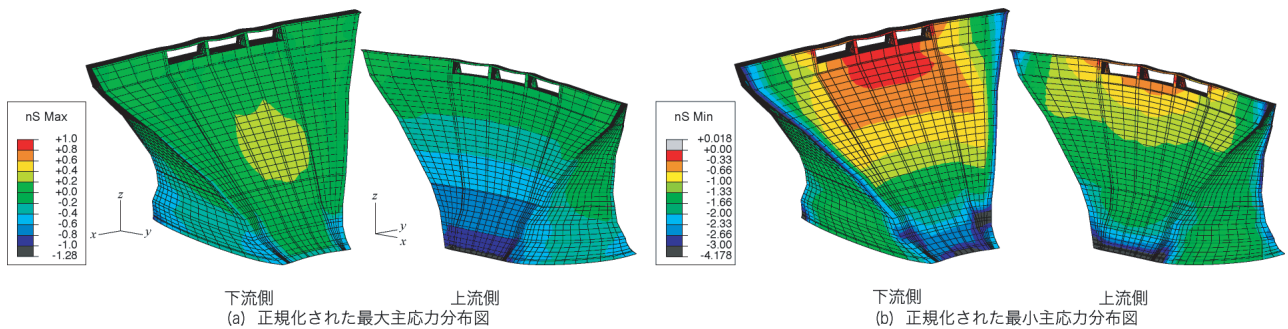


図-13 最大応答時合応力分布図 (700 gal 入力時)

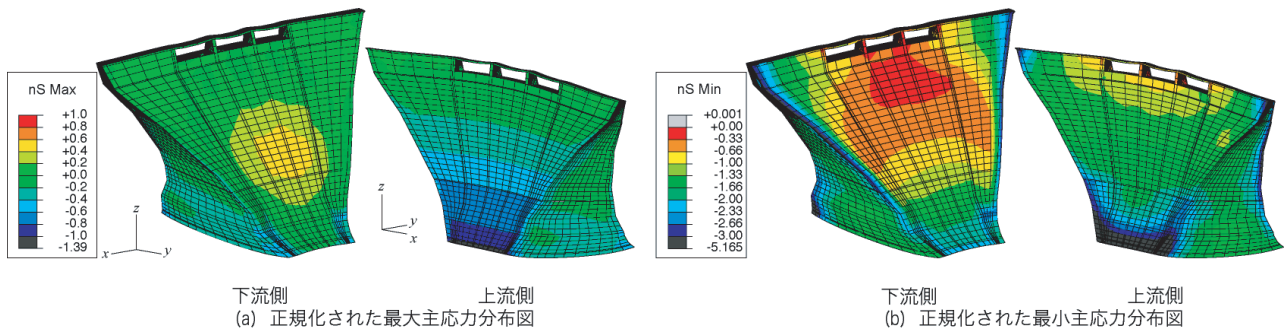


図-14 最小応答時合応力分布図 (700 gal 入力時)

が分かる。

5. まとめ

本研究では、コンクリート重力式ダムの耐震性を検討するための基礎資料を得ることを目的に、満水時における静的解析及び人工地震波入力による動的解析を実施し、その合応力に関する分布特性に関する検討を実施した。

その結果、最大振幅を 100 gal に調整した人工地震波を入力した場合は、静的解析結果よりも引張応力が発生する領域が縮小し、堤体全体に発生する応力は小さくなる。一方、発生する応力の変化を検討するため、極端に過大

なケースとして、最大振幅を 700 gal に増幅した地震波形を入力した場合でも、下流側堤体表面中央部の引張応力が 100 gal を入力した場合の約 1.3 倍程度の増加となることが明らかとなった。

参考文献

- 1) 財団法人日本ダム協会, ダム便覧 2009, <http://damnet.or.jp/Dambran/binran/TopIndex.html>
- 2) ABAQUS/Standard User's Manual, Ver. 6.8, Hibbitt Kalsen & Sorensen Inc., 2009.
- 3) Westergaard, H. M. (1933) : Water Pressures on Dams during Earthquakes, Trans. ASCE, Vol. 98, pp. 418-432