

アーチダムの地震時応答と堆砂率の関係に着目した3次元動的解析

松本 陽介¹・鈴木 翔²・有賀 義明³

¹正会員 東電設計株式会社 水土木部 (〒135-0062 東京都江東区東雲 1 丁目 7 番 12 号)
E-mail: y.matsumoto@tepsco.co.jp

²正会員 センチュリテクノ株式会社 地盤解析部 (〒103-0001 東京都中央区日本橋小伝馬町 2 番 8 号)
E-mail: suzuki@century-techno.co.jp

³フェロー会員 弘前大学大学院 理工学研究科 (〒036-8561 青森県弘前市文京町 3)
E-mail: y-a-arig@hirosaki-u.ac.jp

河川周辺域での地表改変や地盤災害に伴い、ダム貯水池では堆砂が発生する。堆砂が進行すると洪水調節能力や発電能力が低下するため、堆砂対策に関しては様々な検討が行われている。一方、ダムの耐震性に対する堆砂の影響については、これまでに定量的に評価した研究例が少ない。そこで、本研究では、堆砂の影響を考慮したダムの耐震性能照査手法の確立を目的に、アーチダムを評価対象として3次元動的解析を行い、アーチダムの地震時応答に対する堆砂の影響について基礎的な検討を行った。その結果、堤体に発生する地震時応力は堆砂の増加に伴って低下する傾向を示す結果が得られた。

Key Words: sediment, arch dam, 3-D dynamic analysis, seismic safety evaluation

1. はじめに

河川の周辺域で地表の改変や地盤災害が発生すると、降雨に伴い地表の土砂が河川に流れ込み、ダム貯水池では堆砂が進行する。国内ダムの堆砂状況は、国土交通省が取りまとめており¹⁾、このデータを基に、設計上堆砂による泥圧が考慮される重力式ダムとアーチダムに関して、堤高と堆砂率の関係を図-1のように整理した。平成27年度末時点において堆砂率が高いダムは、堤高が相対的に低いダムが多いものの、近年は集中豪雨や地震が多発しており、豪雨や地震を誘因とする山腹の崩壊等に起因してダム貯水池に流入する堆砂量も増加することが懸念されることから、今後は堤高100mを超える規模のダムにおいても、堆砂が進行する可能性が考えられる。

堆砂が進行すると洪水調整能力や発電能力が低下することから、ダムの機能保持に関しては、排砂や浚渫等の堆砂対策が講じられている²⁾。一方、ダムの耐震性に関しては、堆砂の影響を定量的に評価した事例が少ない。

大規模地震に対するダムの耐震性能を照査するための標準的な考え方をまとめた「大規模地震に対するダム耐震性能照査指針(案)・同解説」³⁾ならびに関連する照査事例⁴⁾においても、地震時における堆砂の影響や、その評価方法に関する記載が無い。また、既に堆砂が進行

したダムに対して、地震時における堆砂の影響を計測・評価することは容易ではない。

大規模地震に対するダムの安全性評価においては、ダムの地震時応答を精度よく予測することが重要であり、堆砂による影響についてもダムの地震時応答の予測に考慮する必要があると考えられる。そこで、ダムの地震時応答に及ぼす堆砂の影響の定量的評価、ならびに堆砂の影響を考慮したダムの耐震性能照査手法の確立を目指し、アーチダムの地震時応答に対する堆砂の影響について3次元動的解析による基礎的な検討を行った。

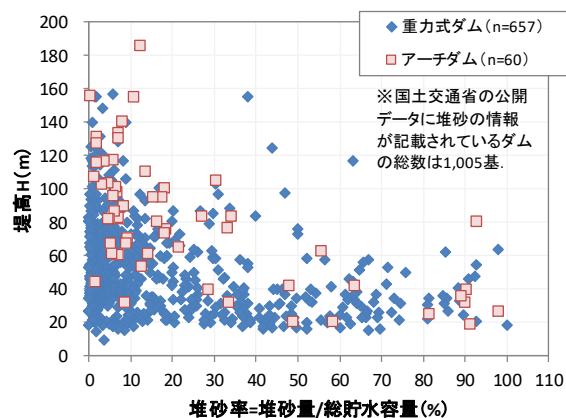


図-1 ダムの堤高と堆砂率の関係 (平成27年度末時点)

2. 3次元動的解析の方法

堤高 100m のアーチダムを対象として、ダム・基礎岩盤・貯水・堆砂の連成を考慮した有限要素法による 3 次元動的解析を行い、堆砂率を変化させた解析結果の比較より、アーチダムの地震時応答や耐震性に及ぼす堆砂の影響を検討した。

解析には汎用有限要素法解析コード「ISCEF」⁵⁾を使用した。

(1) 解析モデル

解析は堤高 100m、堤頂長 300m の架空のアーチダムを対象とした。図-1 より、平成 27 年度末時点では堤高 100m 程度のアーチダムの堆砂率は低いものの、堤高が高いアーチダムにおいても将来的に堆砂が進行する可能性を考慮し、本検討では堤高 100m のダムを解析の対象とした。また、図-2 より、堤頂長 L と堤高 H の比が 3 前後となるアーチダムが多いことから、堤頂長は堤高の 3 倍の 300m とした。

解析モデルを図-3 に示す。ダム、基礎岩盤、堆砂をソリッド要素でモデル化した。堆砂のモデルは、堆砂率が 0%、25%、50%、75% の場合を想定し、図-4 に示す 4 パターンを作成した。この堆砂率は中山らが行った高さ 1m の重力式ダムの模型実験⁹⁾を参考にした。堆砂とダム・基礎岩盤の接触面にはジョイント要素を設け、堆砂の接触条件を設定できるようにした。

貯水池は圧縮性流体要素でモデル化した。貯水位は EL_90m とした。なお、中山らの模型実験⁹⁾において、堆砂位以深は動水圧がほとんど発生しないことが報告されているため、流体要素は堆砂位よりも上方にのみ設定し、堆砂位以深には動水圧が生じない条件を仮定した。

動的解析時の境界条件は、基礎岩盤底面に粘性境界を、側面も粘性境界と自由地盤を設定した。

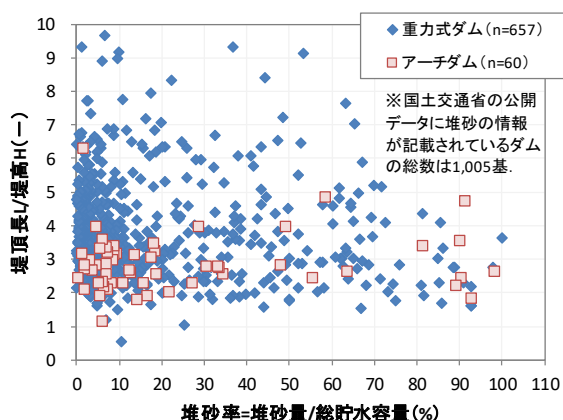


図-2 堤頂長 L/堤高 H と堆砂率の関係
(平成 27 年度末時点)

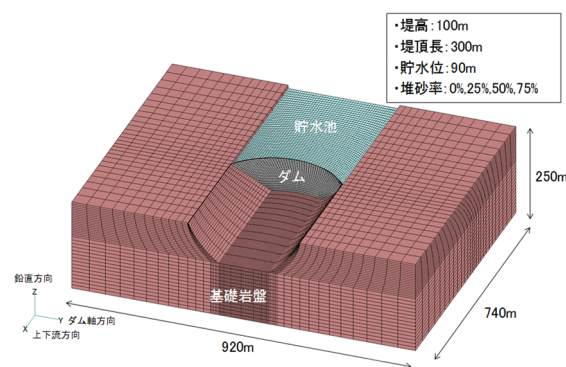
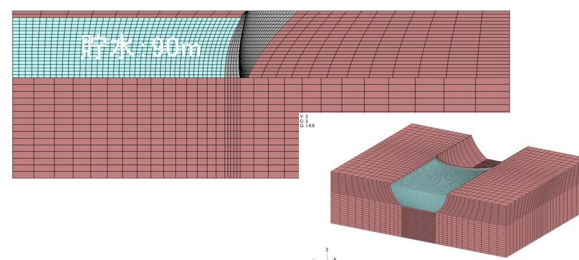
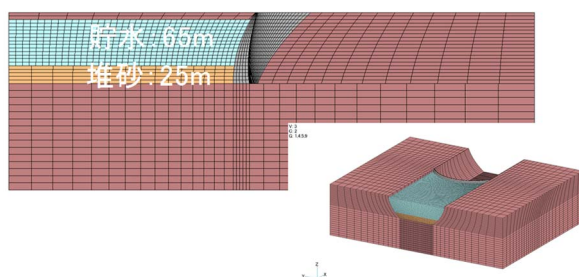


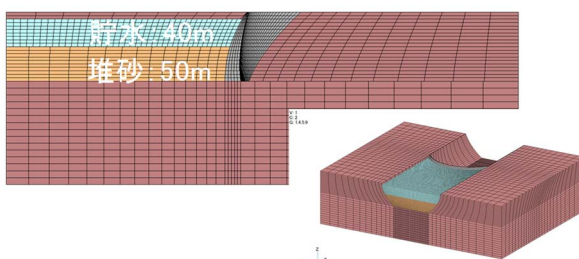
図-3 アーチダムの解析モデル



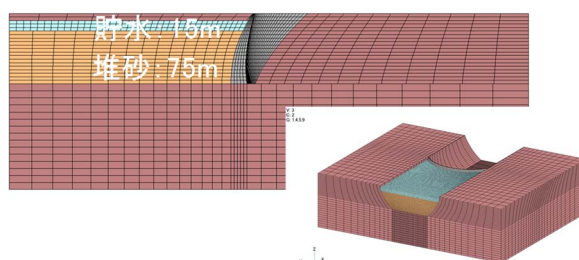
(a) 堆砂率 0%



(b) 堆砂率 25%



(c) 堆砂率 50%



(d) 堆砂率 75%

図-4 堆砂のモデル化
(左：モデル中央の断面、右：鳥瞰図)

(2) 解析用物性値

本検討で使用したダム・基礎岩盤・堆砂の動的物性値を表-1に示す。いずれも線形弾性材料を仮定した。

a) ダムの動的物性値

コンクリートの動的物性値は、2011年東北地方太平洋沖地震を対象に同定された強震時の大倉ダムの動的物性値を使用した⁷⁾。大倉ダムは堤高82mと42mの2つアーチダムをスラストブロックを介して連結したダブルアーチ式コンクリートダムである。2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震の本震において、スラストブロック内の監査廊に設置された地震計で最大88galが観測され、天端に設置された地震計では最大626galが観測された。有賀ら⁷⁾は、東北地方太平洋沖地震の本震や余震、微動時の観測記録に対して、3次元モデルによる固有値解析や動的解析を行い、強震時にはアーチダムの剛性低下が現れることを指摘している。本検討ではこの事例を参考に、剛性低下の影響が反映された動弾性係数を設定することとした。密度、動ポアソン比、減衰定数についても大倉ダムの事例で用いられた値を使用することとした。これらの値は一般的な数値が用いられている。

b) 基礎岩盤の動的物性値

基礎岩盤の動的物性値も、大倉ダムの事例⁷⁾で設定された数値とした。大倉ダムの基礎岩盤の動的物性値は、ダム地点が後期中新世～鮮新世の安山岩、玄武岩類により構成された堅硬な岩盤であることや、既往のアーチダムの解析事例⁸⁾⁹⁾¹⁰⁾を踏まえて設定されている。

c) 堆砂の動的物性値

堆砂の密度や動弾性係数等の物性値は、堆積と排砂の繰り返しにより変化することが想定される。また、耐震性能照査の観点で、堆砂の物性値に関する調査が行われることは極めて稀である。そこで、本検討では堆砂が非常にゆるい状態で堆積している場合を仮定し、自然堆積地盤等の代表的な値を参考にして物性値を設定することとした。また、堆砂の非線形特性に関する調査データも無いことから、線形弾性材料を仮定した。

堆砂の密度は、密実でない砂礫や砂による自然地盤の密度(1.7~1.9g/cm³)¹¹⁾よりも更に小さい値として1.6

g/cm³を仮定した。弾性係数はN値1相当の非常にゆるい砂質地盤として、道路橋示方書¹²⁾記載の式(式(1))ならびに、せん断波速度と弾性係数の関係式(式(2)、式(3))より設定した。

$$Vs = 80N^{1/3} \quad (1)$$

$$G = \rho \cdot Vs^2 / 1000 \quad (2)$$

$$E = 2(1 + \nu)G \quad (3)$$

ここで、NはN値、Vsはせん断波速度(m/s)、 ρ は密度(g/cm³)、Gはせん断弾性係数(N/mm²)、 ν はポアソン比、Eは弾性係数(N/mm²)である。

ゆるく堆積した土砂の強震時の減衰定数は0.05よりも大きくなることが想定されるが、堆砂の非線形性に関するデータが得られていないことから、本検討では堆砂の減衰定数を0.05と仮定した。

d) ジョイント要素の物性値

本検討では、ダムと堆砂は一体挙動を示すものと仮定し、堆砂の接触面に設けたジョイント要素の物性値は、堤体材料の1000倍の軸剛性とせん断剛性を設定した。

e) 貯水池の物性値

流体要素(圧縮性流体)の物性値は、密度1.0g/cm³、伝播速度1,500m/sとした。岩盤や堆砂の境界面におけるインピーダンス比 β は、式(4)と式(5)より、岩盤との境界が3.95、堆砂との境界が0.21とした。

$$\beta = \frac{\rho \cdot Vp}{\rho_w \cdot Cw} \quad (4)$$

$$Vp = Vs \sqrt{\frac{2(1-\nu)}{1-2\nu}} \quad (5)$$

ここで、 β はインピーダンス比、 ρ_w は水の密度(g/cm³)、Cwは水の伝播速度(m/s)、Vsはせん断波速度(m/s)、 ρ は基礎岩盤や堆砂の密度(g/cm³)、Vpは基礎岩盤や堆砂のP波速度(m/s)である。

(3) 模擬地震動

模擬地震動は、2002年制定コンクリート標準示方書[耐震性能照査編]¹³⁾より、図-5に示す内陸型のレベル2地震動(最大加速度750gal)とした。基礎岩盤のみのモデルで引き戻し解析を行い、基礎岩盤下流端の地表面(堤敷と同一標高)で模擬地震動になるよう設定した波形を解析モデルに入力した。加振は上下流方向に1方向加振とした。

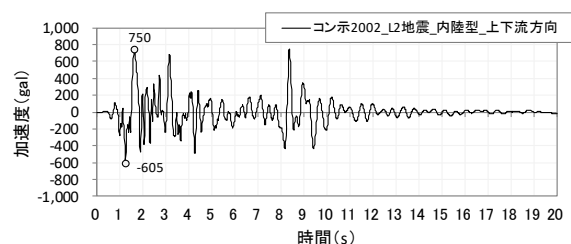


図-5 模擬地震動

表-1 解析用動的物性値

項目	ダム	基礎岩盤	堆砂
密度(g/cm ³)	2.40	2.60	1.60
動弾性係数(N/mm ²)	14,400	11,250	28
せん断波速度(m/s)	1,580	1,315	80
動ポアソン比	0.20	0.25	0.40
減衰定数	0.05	0.05	0.05

備考：減衰定数はレイリー型減衰により設定した。

3. 3次元動的解析の結果

堆砂率 0%, 25%, 50%, 75%の動的解析結果を示す。なお、本検討は地震時応答のみに着目しているため、常時の静的解析結果は、地震時の動的解析結果に重ね合わせていない。

(1) 応答加速度と振動特性

ダム最大の応答加速度分布を図-6に、図-7に示す代表位置の応答加速度と堆砂率0%に対する比を表-2に示す。応答加速度はダム中央付近が特に大きく、ダム天端に近づくほど増幅する。堆砂率が高いほど加速度の増幅が小さくなる傾向があり、例えば堆砂率0%に対するダム天端の応答加速度（下流向き）の比は、堆砂率25%が0.75、堆砂率50%が0.60、堆砂率75%が0.39となる。

ダム天端の応答加速度時刻歴を図-8に示す。本検討で用いた模擬地震動（図-5参照）は、時刻2秒付近と時刻9秒付近の加速度が特に大きく、ダム天端の応答加速度にも同様の特徴がみられる。ただし、堆砂率が低い場合は時刻9秒付近の応答加速度が相対的に大きく、堆砂率の増加に応じて9秒付近の応答が相対的に小さくなる。最も堆砂率が高い75%では、時刻2秒付近の応答

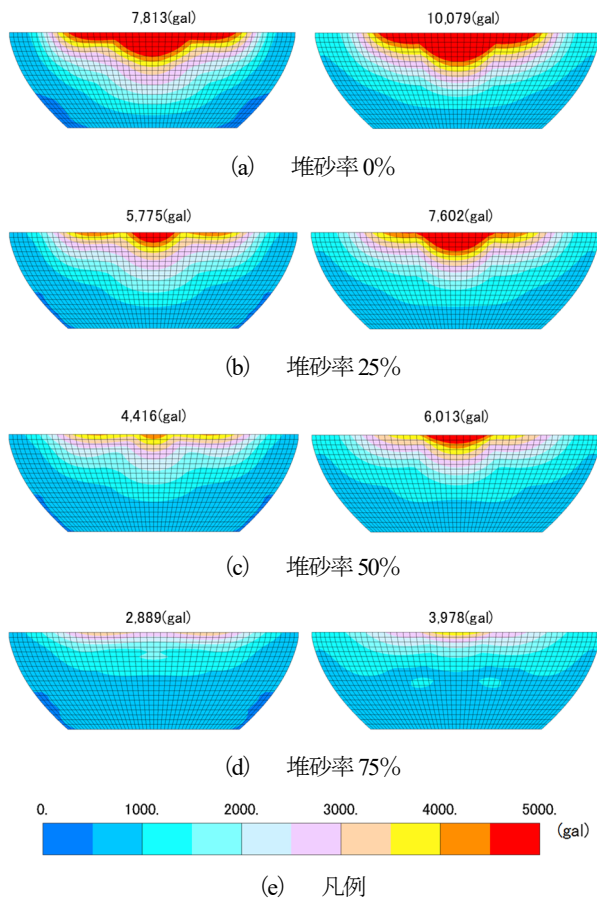


図-6 ダムの最大応答加速度分布（上流側視点）
（左：上流向き、右：下流向き）

加速度が相対的に大きくなる。これは、図-9に示す想定地震動に対するダム天端の応答加速度のフーリエスペクトル比（0.5Hzで平滑化处理）より、堆砂率が高くなるほど1.6Hz付近の低次の振動モードが抑制される傾向があり、時刻9秒付近の応答加速度には、低次の振動成

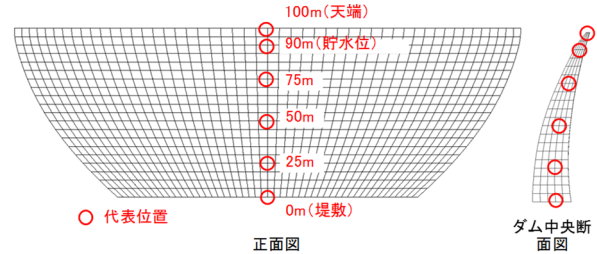


図-7 代表位置

表-2 代表位置の応答加速度と堆砂率0%に対する比

(a) ダム中央の応答加速度（上流向き）

高さ (m)	堆砂率			
	0%	25%	50%	75%
100	7,813	5,775	4,416	2,889
90	6,407	4,588	3,574	1,942
75	4,594	3,236	2,568	1,548
50	2,773	2,020	1,563	855
25	1,523	1,085	866	639
0	570	550	548	550

(b) 堆砂率0%に対する比（上流向き）

高さ (m)	堆砂率			
	0%	25%	50%	75%
100	1.00	0.74	0.57	0.37
90	1.00	0.72	0.56	0.30
75	1.00	0.70	0.56	0.34
50	1.00	0.73	0.56	0.31
25	1.00	0.71	0.57	0.42
0	1.00	0.97	0.96	0.97

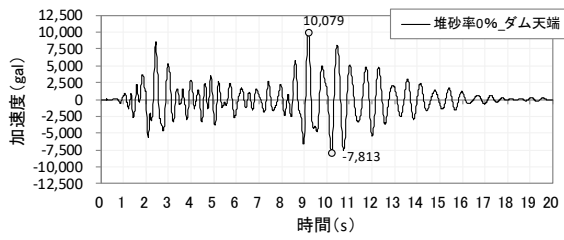
(c) ダム中央の応答加速度（下流向き）

高さ (m)	堆砂率			
	0%	25%	50%	75%
100	10,079	7,602	6,013	3,978
90	7,966	5,617	4,347	2,595
75	5,224	3,906	3,115	1,563
50	2,716	1,999	1,583	975
25	1,106	1,043	905	851
0	732	777	807	803

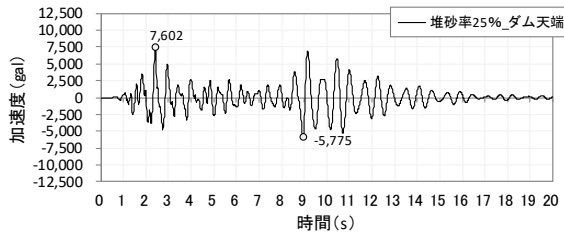
(d) 堆砂率0%に対する比（下流向き）

高さ (m)	堆砂率			
	0%	25%	50%	75%
100	1.00	0.75	0.60	0.39
90	1.00	0.71	0.55	0.33
75	1.00	0.75	0.60	0.30
50	1.00	0.74	0.58	0.36
25	1.00	0.94	0.82	0.77
0	1.00	1.06	1.10	1.10

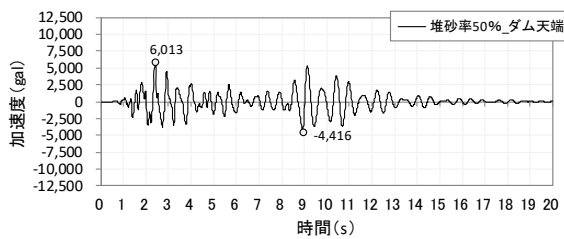
備考：応答加速度の単位 (gal)



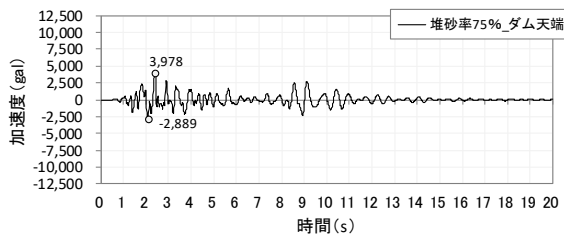
(a) 堆砂率 0%



(b) 堆砂率 25%



(c) 堆砂率 50%

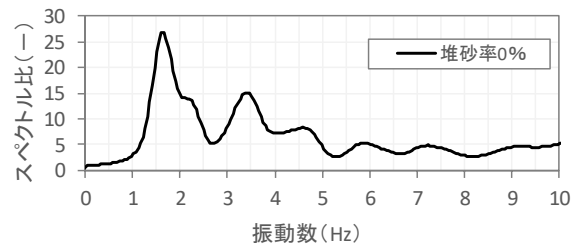


(d) 堆砂率 75%

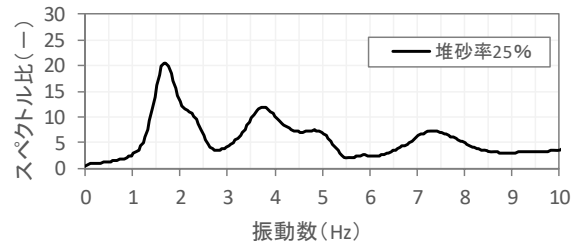
図-8 ダム天端の応答加速度時刻歴

が多く含まれているためと考えられる。

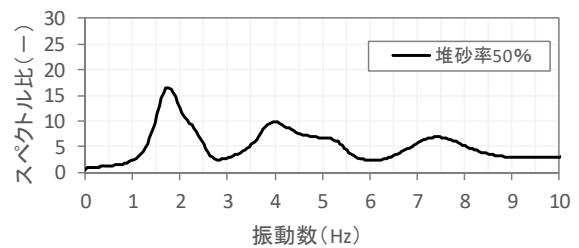
この1.6Hz付近の振動数は、解析モデルの1次固有振動数に相当する。参考として、固有値解析より求めた堆砂率0%の1次固有振動モードを図-10に示す。1次固有振動モードは、ダム天端が著しく応答するモードである。なお、本解析モデルは、強震時において堤体の剛性低下が生じることに配慮した物性値を設定しているため、微動計測や弱地震計測に基づく堤高100m程度の実在するダムの1次固有振動数(2.5~4.5Hz程度)¹⁴⁾¹⁵⁾¹⁶⁾と比較して、この解析モデルの1次固有振動数は低い振動数となる。



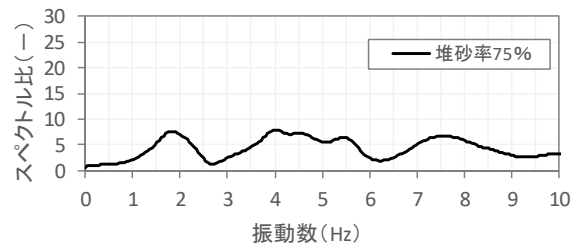
(a) 堆砂率 0%



(b) 堆砂率 25%



(c) 堆砂率 50%



(d) 堆砂率 75%

図-9 フーリエスペクトル比(天端の応答/想定地震動)

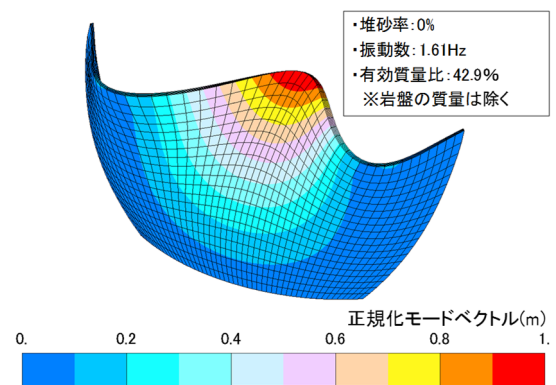


図-10 ダムの1次固有振動モード(上流側視点)

(2) 応答変位

ダムの変形図を図-11に示す。図に示す変形図は、ダム天端が上流側と下流側に最も大きく変位した時刻の変形図である。また、代表位置(図-7参照)の応答変位と堆砂率0%に対する比を表-3に示す。

応答変位は、堆砂率が高いほど小さくなる傾向がある。例えば堆砂率0%に対するダム天端の応答変位(上流向き)の比は、堆砂率25%が0.75、堆砂率50%が0.59、堆砂率75%が0.31となり、堆砂によりダムの変形が抑制される可能性があることが示唆される解析結果となった。

ダム天端の応答変位時刻歴を図-12に示す。加速度時刻歴(図-8参照)と同様に、堆砂率が低い場合は9秒付近の変位が相対的に大きく、堆砂率の増加に応じて9秒付近の応答が相対的に小さくなる傾向がある。

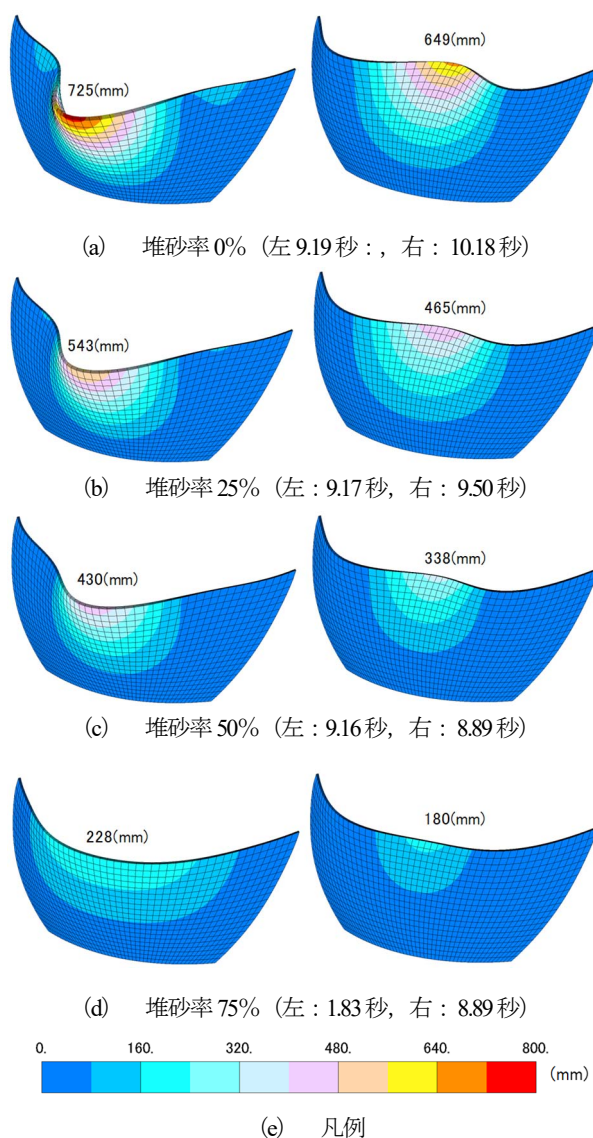


図-11 ダムの変形図 (倍率 100 倍)

(左: 上流側最大変形時, 右: 下流側最大変形時)

表-3 代表位置の応答変位と堆砂率0%に対する比

(a) ダム中央の応答変位 (上流向き)

高さ (m)	堆砂率			
	0%	25%	50%	75%
100	725	543	430	228
90	603	457	363	198
75	438	337	269	154
50	221	174	139	88
25	75	60	48	33

(b) 堆砂率0%に対する比 (上流向き)

高さ (m)	堆砂率			
	0%	25%	50%	75%
100	1.00	0.75	0.59	0.31
90	1.00	0.76	0.60	0.33
75	1.00	0.77	0.61	0.35
50	1.00	0.79	0.63	0.40
25	1.00	0.80	0.64	0.44

(c) ダム中央の応答変位 (下流向き)

高さ (m)	堆砂率			
	0%	25%	50%	75%
100	649	465	338	180
90	548	399	285	153
75	408	305	211	115
50	213	166	108	61
25	74	59	37	21

(d) 堆砂率0%に対する比 (下流向き)

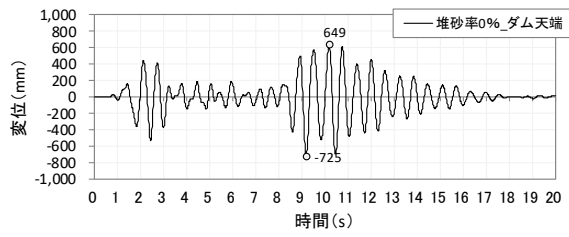
高さ (m)	堆砂率			
	0%	25%	50%	75%
100	1.00	0.72	0.52	0.28
90	1.00	0.73	0.52	0.28
75	1.00	0.75	0.52	0.28
50	1.00	0.78	0.51	0.29
25	1.00	0.81	0.50	0.29

備考: 高さ0mに対する相対変位, 単位 (mm)

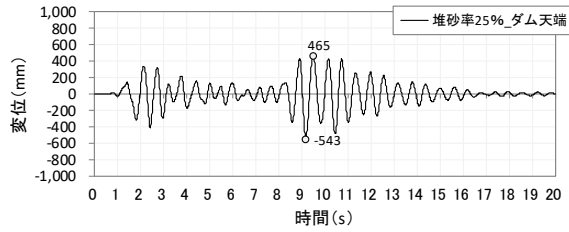
(3) 作用圧力

ダムに作用する動水圧と動土圧の抽出位置を図-13に示す。流体要素とダムの連成面に作用する圧力を動水圧として抽出した。また、ダムに隣接する堆砂のソリッド要素の水平応力 σ_x (上下流方向向き)を動土圧として抽出した。

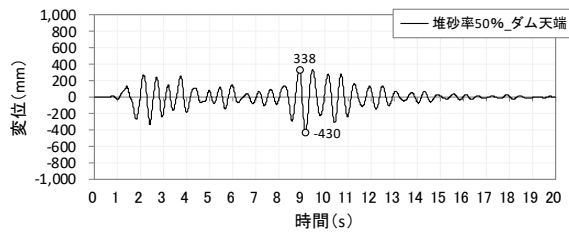
ダムに作用する動水圧と動土圧の分布を図-14と図-15に示す。堆砂率の増加に伴い、動水圧は減少し、動土圧は増加する。動水圧の減少に対して、動土圧が増加する割合は小さく、図-15に示す動水圧と動土圧の全圧力(圧力分布に囲まれた面積)は、堆砂率の増加に伴い小さくなる。この結果は、ダムに作用する動的圧力が、堆砂率の増加に伴い小さくなる可能性があることが示唆されている。



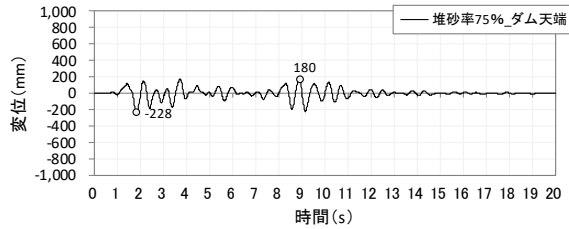
(a) 堆砂率 0%



(b) 堆砂率 25%



(c) 堆砂率 50%



(d) 堆砂率 75%

図-12 ダム天端の応答変位時刻歴

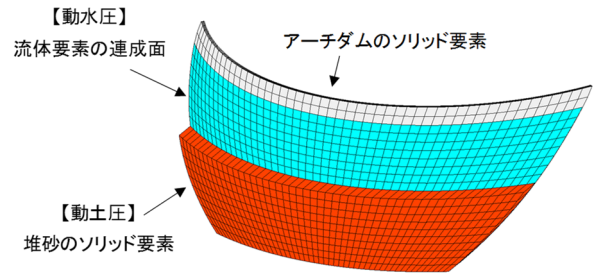
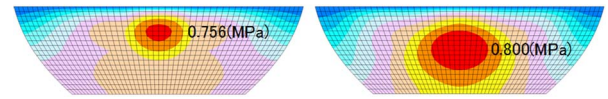
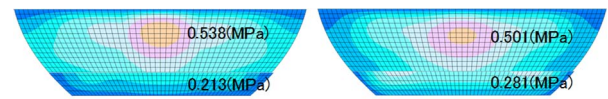


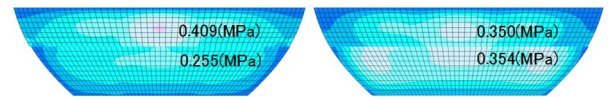
図-13 作用圧力の抽出位置 (例：堆砂率 50%)



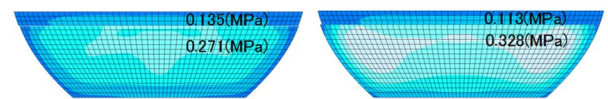
(a) 堆砂率 0%



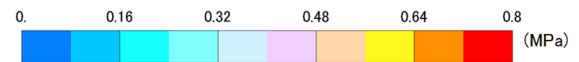
(b) 堆砂率 25%



(c) 堆砂率 50%



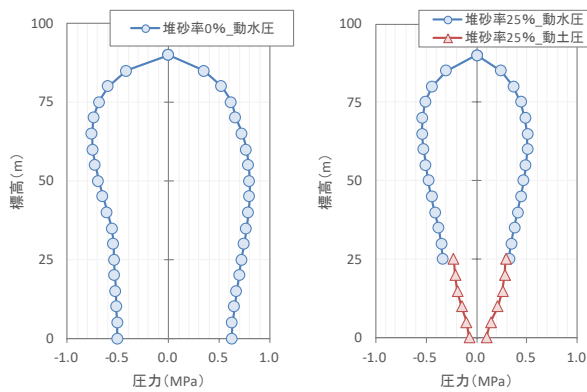
(d) 堆砂率 75%



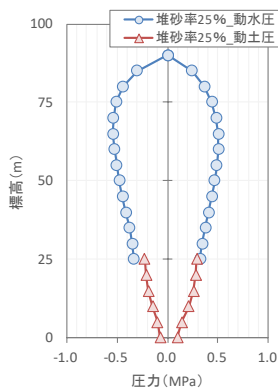
(e) 凡例

図-14 最大作用圧力分布

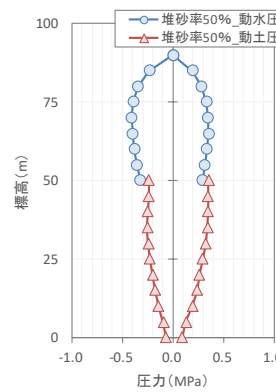
(左：上流向きの圧力，右：下流向きの圧力)



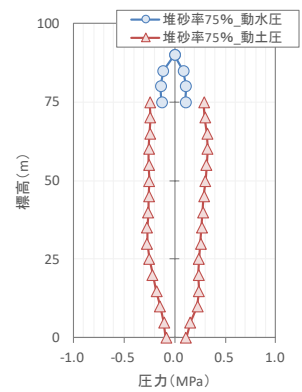
(a) 堆砂率 0%



(b) 堆砂率 25%



(c) 堆砂率 50%



(d) 堆砂率 75%

図-15 ダム中央位置における動水圧と動土圧の分布 (+：上流向き，－：下流向き)

(4) 発生応力

ダムの上流面で発生応力が特に大きい箇所は、天端の中央付近、堤敷の中央付近、アバットメントの3箇所である。ダムの下流面では、これらの箇所に加え、天端中央とアバットメント間の発生応力も大きくなる。

これら発生応力が比較的大きい箇所（図-17 参照）の最大主応力と、堆砂率 0%に対する応力比を表-4 に示す。発生応力は、堆砂率が高いほど小さくなる傾向がある。例えば堆砂率 0%に対するダム天端付近の発生応力（上流面）の比は、堆砂率 25%が 0.75、堆砂率 50%が 0.59、堆砂率 75%が 0.39 となる。

(5) 堆砂がダムの耐震性に及ぼす影響に関する考察

a) ダムの発生応力と耐震性に関する考察

アーチダムは、材料および応答特性の観点から、引張破壊に対する条件が最も厳しくなるため、堤体の引張破壊に対する安全性について確認することが重要とされている³⁾。

本検討では、堆砂率を変化させた 3 次元動的解析より、堆砂の増加に伴いダムの地震時最大主応力（地震時引張応力）が減少する傾向を示す結果が得られた。これより、本検討の条件に近いアーチダムであれば、堆砂の進行はダムの耐震性上有利に働く可能性が示唆された。

一方、中山ら⁹⁾による剛体を仮定した高さ 1m の重力式ダムの模型実験では、堆砂率 0%、25%、50% の場合はダムに作用する動水圧と動土圧による作用モーメントが同程度であり、堆砂率 75% の場合には他の堆砂率よりも 2 倍程度作用モーメントが大きくなる結果が得られている。ダム形式やダムの剛性によっては、本解析結果と異なる傾向を示す可能性も考えられる。

また、有賀¹⁷⁾による堆砂の剛性を変化させた空虚時のアーチダムの 3 次元動的解析では、ダムの地震時引張応力は堆砂の剛性によって変化する結果が得られている。堆砂の影響を考慮してダムの耐震性を評価するためには、堆砂の動的物性値の把握が重要であると考えられる。

b) 堆砂率の増加に伴いダムの発生応力が低下した点に対する考察

本検討において、堆砂率の増加に伴いダムの発生応力が低下した要因として、ダムの応答加速度の低下に伴う慣性力の低下、ならびに作用圧力の低下が考えられる。

応答加速度の低下については、ダムの発生応力の低下と相関が非常に良い。例えば堆砂率 0%に対するダム天端の応答加速度（下流向き）の比は、堆砂率 25%が 0.75、堆砂率 50%が 0.60、堆砂率 75%が 0.39 であり、ダム天端（上流面）の発生応力の比は、堆砂率 25%が 0.75、堆砂率 50%が 0.59、堆砂率 75%が 0.39 となること

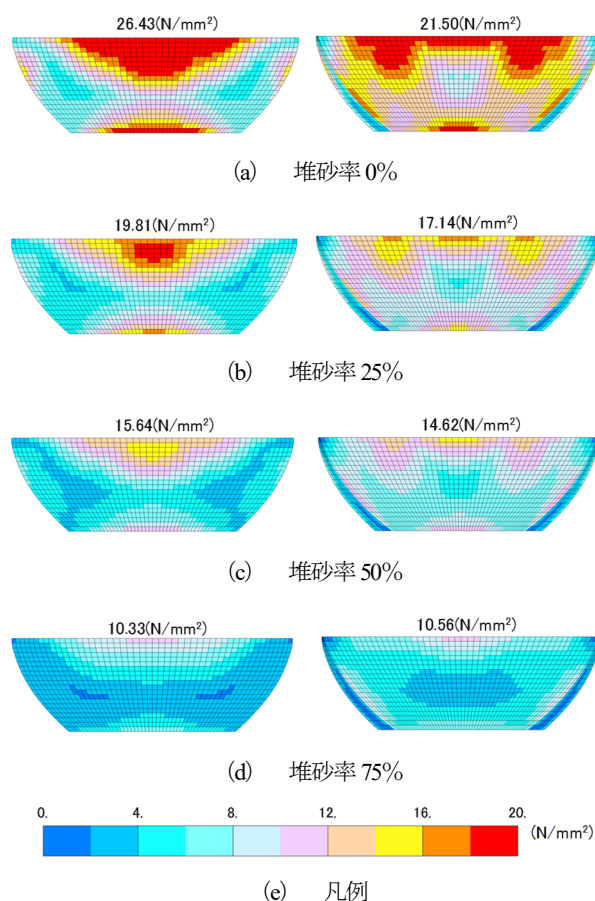


図-16 ダムの最大主応力（地震時増分応力）

（左：上流側視点、右：下流側視点、全時刻の最大値）

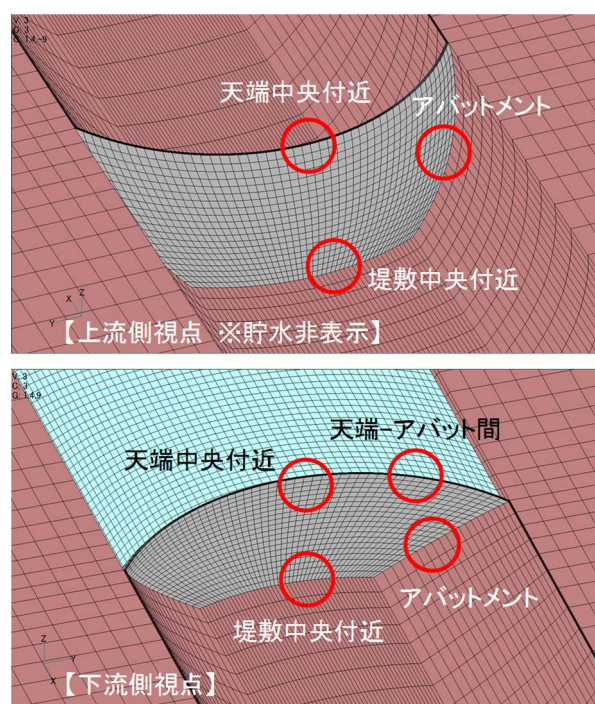


図-17 発生応力抽出位置

表4 代表位置の発生応力と堆砂率0%に対する比

(a) 上流面の発生応力

位置	堆砂率			
	0%	25%	50%	75%
天端中央付近	26.43	19.81	15.64	10.33
堤敷中央付近	23.45	16.37	11.30	6.82
アバットメント	14.06	9.41	7.19	3.97

(b) 堆砂率0%に対する比（上流面）

位置	堆砂率			
	0%	25%	50%	75%
天端中央付近	1.00	0.75	0.59	0.39
堤敷中央付近	1.00	0.70	0.48	0.29
アバットメント	1.00	0.67	0.51	0.28

(c) 下流面の発生応力

位置	堆砂率			
	0%	25%	50%	75%
天端中央付近	21.50	17.14	14.62	10.56
天端アバット間	22.00	16.36	12.93	8.59
堤敷中央付近	19.54	14.24	11.42	7.91
アバットメント	17.42	13.03	11.08	9.67

(d) 堆砂率0%に対する比（下流面）

位置	堆砂率			
	0%	25%	50%	75%
天端中央付近	1.00	0.80	0.68	0.49
天端アバット間	1.00	0.74	0.59	0.39
堤敷中央付近	1.00	0.73	0.58	0.40
アバットメント	1.00	0.75	0.64	0.56

備考：地震時増分最大主応力（N/mm²）

から、堆砂率の増加による応答加速度と発生応力の低減はほぼ同じ割合であることが分かる。

堆砂を考慮することでダムの応答加速度が低下する傾向は、空虚時のアーチダムを対象とした解析¹⁸⁾でも確認されている。

ダムに作用する圧力（動水圧・動土圧）についても、堆砂率の増加に伴い作用圧力が減少する傾向が図-15より確認できるが、堆砂率50%と堆砂率75%の圧力分布は同程度であり、表-4に示す発生応力の低減率との対応は、応答加速度の場合と比較して良好とは言えない。

以上より、本検討において、堆砂率の増加に伴い堤体の発生応力が低下した主要因は、ダムの応答加速度の低下と考えられる。

4. まとめ

堤高100mのアーチダムを対象とした3次元動的解析より、ダムの地震時応答と堆砂率の関係について検討した。本検討では、満水時を対象に、堆砂率を0%、25%、50%、75%の4パターン変化させた比較解析を行い、応答加速度、振動特性、応答変位、作用圧力、地震時発生応力の比較より、次の結果を得た。

- ダムの堆砂率が増加すると、応答加速度、応答変位、作用圧力、地震時発生応力はいずれも減少する傾向を示す。
- 堆砂率の増加に伴い地震時発生応力が減少することから、堆砂の増加はアーチダムの耐震性上有利に働く可能性が示唆された。
- 堆砂率の増加に伴う地震時発生応力の減少は、特に応答加速度の減少（ダムに作用する慣性力の減少）と相関が良い。

堆砂の影響を考慮したアーチダムの耐震性能照査法の確立に向け、今後は次のような検討が必要であると考えられる。

- 大規模地震時に想定されるダム堤体材料や堆砂の非線形応答、ならびに堤体の継ぎ目による非線形応答を考慮した検討。
- 堆砂とダム・基礎岩盤の接触条件に着目した検討。
- 堆砂が進行したアーチダムの振動計測とその再現解析。
- ダムの形状や寸法、基礎岩盤の条件が異なる場合の影響検討。重力式ダムとの比較検討。

参考文献

- 1) 国土交通省「全国のダム堆砂状況について（平成27年度末現在）」（最終閲覧日：2018年8月18日）
<https://yamba-net.org/wp/wp-content/uploads/2017/08/13881196a02593599175b008532fb6b0.pdf>
- 2) 国土交通省 水管理・国土保全局 河川環境課：ダム貯水池土砂管理の手引き（案），2018。
- 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。
- 4) 国土交通省 国土技術政策総合研究所：大規模地震に対するダムの耐震性能照査に関する資料，国総研資料 第244号，2005。
- 5) センチュリテクノ（株）：ISCEF（Integrated Software for Civil Engineering Fluid-structure interaction system）

- 6) 中山 義紀, 千葉健太郎: 堆砂がダムに作用する地震時荷重に及ぼす影響に関する実験的研究, 土木学会第 64 回年次学術講演会, 2009.
- 7) 有賀 義明, 上島 照幸, 仲村 成貴, 塩尻 弘雄: 三次元的解析による 2011 年東北地方太平洋沖地震におけるダブルアーチダムの耐震性評価, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), 70 巻, 4 号, 2014.
- 8) 有賀 義明, 上島 照幸, 仲村 成貴, 塩尻 弘雄: 三次元的解析による 2011 年東北地方太平洋沖地震におけるダブルアーチダムの耐震性評価, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), 70 巻, 4 号, 2014.
- 9) 仲村成貴, 塩尻弘雄, 上島照幸, 有賀義明, 大湊周作: 常時微動観測と三次元有限要素解析に基づく実在アーチダムの振動特性把握, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol. 69, No. 4 (地震工学論文集第 32 巻), I_742-I_749, 2013
- 10) 有賀義明, 上島照幸, 塩尻弘雅, 仲村成貴, 上島照幸, 金澤健司: 三次元的解析によるダブルアーチダムの地震時応答の検討, 日本地震工学会・大会—2012 梗概集, pp. 100-101, 2012
- 11) 地盤工学会: 地盤材料試験の方法と解説-二分冊の 1-, pp68, 2010.
- 12) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編, pp33, 2012.
- 13) 土木学会: コンクリート標準示方書: 2002 年制定耐震性能照査編, pp47, 2002.
- 14) 上田 稔, 豊田 幸宏, 塩尻 弘雄, 佐藤 正俊: アーチダムの観測記録から求めた固有振動数とブロックジョイントの影響, 土木学会論文集, No.654/I-52, 207-221, 2000.
- 15) 大熊信之, 松田泰治, 金澤健司, 池田浩一: 2 基の大規模アーチダムでの常時微動計測に基づく動的特性の周期的変動評価, 土木学会論文集 A1, Vol.68, No.4, I_883-I890, 2012.
- 16) 佐藤信光, 曾田英揮, 太田垣晃一郎: 実測地震記録による既設ダム堤体の動的特性および物性値の推定と適用, 平成 24 年度水資源機構技術研究発表会, 2012.
- 17) 有賀 義明: アーチダムに発生する地震時応力に対する堆砂の剛性の影響, 平成 30 年度土木学会全国大会 第 73 回年次学術講演会, 2018.
- 18) 有賀 義明, 斗内陸人, 松橋勇輝: アーチダムの地震時応力に及ぼす堆砂の影響, 平成 29 年度土木学会全国大会 第 72 回年次学術講演会, 2017.

(2018. ? ? 受付)

3-D DYNAMIC ANALYSIS FOCUSING ON THE RELATIONSHIP BETWEEN THE EARTHQUAKE RESPONSE OF ARCH DAM AND SEDIMENT RATIO

Yosuke MATSUMOTO, Sho SUZUKI and Yoshiaki ARIGA

Sedimentation at dam occurs due to surface modifications and ground disasters around river. With the progress of sedimentation, flood control capacity and power generation capacity will decline. So, various researches have been made on these concerns so far. However, there are few quantitative studies in regard to the influence of sediment on seismic performance of dam. Therefore, in this study, we made 3-D dynamic analysis in order to quantitatively evaluate the influence of sediment on the seismic response of arch dam, for the purpose of establishing the seismic performance evaluation method considering the influence of sediment. As a result, it was found that the seismic stresses in the dam body tended to decrease as the sediment increased.