

三次元動的解析による 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

有賀義明¹・上島照幸²・仲村成貴³・塩尻弘雄⁴

¹フェロー会員 弘前大学教授 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@cc.hirosaki-u.ac.jp

²正会員 宮城大学教授 食産業学部環境システム学科 (〒982-0215 宮城県仙台市太白区旗立 2-2-1)

E-mail: ueshima@myu.ac.jp

³正会員 日本大学准教授 理工学部まちづくり工学科 (〒101-8308 東京都千代田区神田駿河台 1-8)

E-mail: nakamura.masataka@nihon-u.ac.jp

⁴正会員 日本大学特任教授 理工学部まちづくり工学科 (〒101-8308 東京都千代田区神田駿河台 1-8)

E-mail: shiojiri@civil.cst.nihon-u.ac.jp

宮城県仙台市に位置する大倉ダムは、1961年に建設された、我が国唯一のダブルアーチ式コンクリートダムである。このダムは、2つのアーチダムがスラストブロックによって連結された複合構造型のダムであり、2011年東北地方太平洋沖地震の本震および余震の際にダム堤体で地震動が観測されている。本研究では、ダムの耐震性能照査の精度・信頼性の向上を目的として、地震観測結果を踏まえた固有値解析によりダム堤体の動的変形特性を定量的に評価するとともに、三次元動的解析によりダムの耐震性について検討した。三次元解析により検討した結果、東北地方太平洋沖地震の際のダム堤体の動的せん断剛性は6000N/mm²であり、本震時の引張応力は最大でも2.9N/mm²程度である等の結果が得られた。

Key Words : 3D dynamic analysis, the 2011 Off the Coast of Tohoku Earthquake, double arch dam, earthquake observation, seismic safety evaluation

1. はじめに

宮城県仙台市青葉区を流れる大倉川に建設された大倉ダム(仙台環境開発大倉ダム)は、我が国唯一のダブルアーチ式コンクリートダム(以下、ダブルアーチダム)である。ダブルアーチダムは、図-1に示したように、2つのアーチダムがスラストブロックを介して連結された、複合構造型のダム形式である。本ダムは、1961年に竣工したダムであり、その当時の耐震設計法としては、2つのアーチダムを個別に独立に取り扱い、震度法に基づく静的解析法によって耐震設計が行われていたものと考えられる。ダブルアーチダムのように特殊な形状・構造を持つ構造物に関しては、解析上、二次元的な取り扱いが困難であり、信頼性のある耐震性能照査を行うためには、精度の高い三次元動的解析による評価が必要であると考えられ、2つのアーチダムとスラストブロックの間の地震時の相互影響の考慮が重要なファクターになるのではないかと想定される。

大倉ダムでは、これまでに地震観測が実施されており、2011年東北地方太平洋沖地震の際には、3月11日の本震時、4月7日の余震時をはじめ、貴重な

地震観測データが記録されている。また、これまでの研究では、これらの地震観測データを活用して、ダムの固有振動数の推定¹⁾、振動特性の把握²⁾、地震時挙動の検討³⁾などが行われている。

このような背景を踏まえ、ここでは、まず、地震観測データに基づいて推定されたダムの固有振動数を目標値として固有値解析を行い、ダムの動的せん断剛性を同定した。つぎに、同定した動的物性値を用いて三次元動的解析を行い、東北地方太平洋域地震の際の変位挙動と応力状態を評価し、ダブルアーチダムの耐震性と耐震性評価法について考察した。

2. 地震観測結果を踏まえた固有値解析による動的変形特性の同定

(1) 概要

地震観測データに基づいて推定された固有振動数を目標値として固有値解析を行い、その固有振動数が模擬されるように動的変形特性(動的せん断剛性)の値を同定した。ダム堤体の固有振動数を正確に評価するために、基礎岩盤を除いたダム堤体のみ

の三次元解析モデルを作成して固有値解析を行った。

(2) 評価対象ダム

評価対象とした大倉ダムの全景を図-1 に、概要を表-1 に示す。右岸側のアーチダム（以下、右岸ダム）の堤高は 42m、左岸側のアーチダム（以下、左岸ダム）の堤高は 82m、全体の堤頂長は 323m、全体の堤体積は 22.6 万 m^3 であり、洪水調節、上水道、灌漑用水、工業用水、発電を目的とした多目的ダムである。右岸ダムでは基礎岩盤がほぼ平坦地形であり、右岸ダムの堤高は 42m であるが、左岸ダムでは溪谷が深いので左岸ダムの堤高は約倍の 82m になっている。左岸ダム、右岸ダムともに上流面は鉛直のアーチ面になっている。

左岸ダムの天端には、放流設備があり、4 門の鋼製ローラーゲート（高さ 7.55m、幅 8.86m）が設置されている。常時満水位は EL.+270.60m、最低水位は EL.+240.65m であり、東北地方太平洋沖地震が発生した、2011 年 3 月 11 日の水位は EL.+253.11m であった。

(3) 目標値とした左岸ダムの固有振動数

大倉ダムでは、2011 年東北地方太平洋沖地震の際に、本震前、本震(3月11日)、本震後、余震(4月7日)、余震後等において、左岸ダムの天端で地震動が記録された。地震計の設置位置は、図-2 に示したとおりである。スラストブロックにおける地震観測はダム建設後から行われており、ダム天端における地震観測は 2010 年から行われている。これまでの研究により、記録された地震動のスペクトル等から左岸ダムの固有振動数が推定されている^{1),2)}。これらの研究成果を踏まえ、ここでは、固有値解析で再現するための左岸ダムの固有振動数の目標値として表-2 に示した値を設定した。

(4) 固有値解析に用いた三次元解析モデル

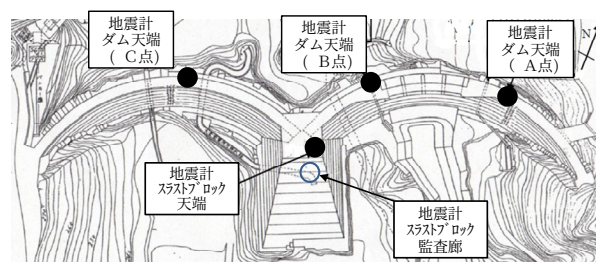
動的せん断剛性を同定するための固有値解析に用いた三次元解析モデルを図-4 と図-5 に示す。図-4 は、左岸ダム、右岸ダム、スラストブロックをそれぞれ個別にモデル化した、単独モデルである。図-5 は、左岸ダムと右岸ダムとスラストブロックを連成させた、連成モデルである。このように、個別的な単独モデルと全体的な連成モデルを設定した理由は、固有値解析により動的変形特性を同定する際にどのような解析モデルが妥当かを確認するためである。すなわち、図-5 に示した連成モデルでは、左岸ダム・スラストブロック・右岸ダムとしての固有振動数が出てくるものと想定し、図-4 に示した単独モデルでは、個々の固有振動数をより正確に評価できるものと想定して、これらの解析モデルを設定した。解析モデルの境界条件は、いずれの解析モデルでも底面境界を固定境界とした。また、固有値解析での密度と動ポアソン比は、一般的な数値として表-3 に示した物性値を設定した。



図-1 大倉ダムの全景

表-1 大倉ダムの概要

項目	概要
形式	ダブルアーチ式コンクリートダム
竣工年	1961 年
堤高	左岸アーチダム: 82m 右岸アーチダム: 42m
堤頂長	323m
堤体積	226,000 m^3
総貯水容量	28,000,000 m^3
管理	建設: 国土交通省、管理: 宮城県



測点A点とB点では、2011年東北地方太平洋沖地震の本震および2011年4月7日の余震、本震・余震前後の地震観測データが得られている。

図-2 地震観測位置

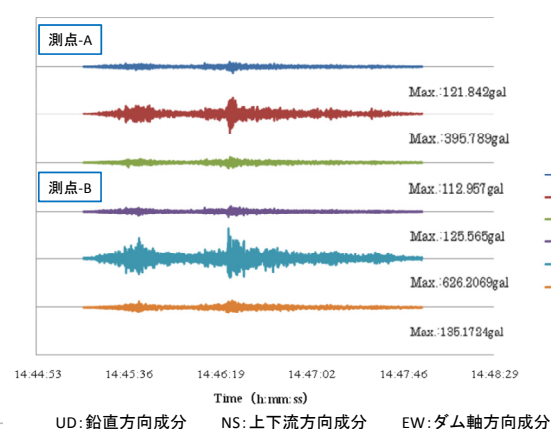


図-3 2011 年東北地方太平洋沖地震の際に観測された地震動¹⁾

表-2 固有値解析の目標値とした
左岸ダム固有振動数

時 期	左岸ダムの固有振動数 (目標値)
本震前の微動時	7.0 (Hz)
3月11日の本震時, Amax = 626gal	5.8 (Hz)
本震後の微動時	7.0 (Hz)
4月7日の余震時, Amax = 430gal	6.4 (Hz)
余震後の微動時	7.2 (Hz)

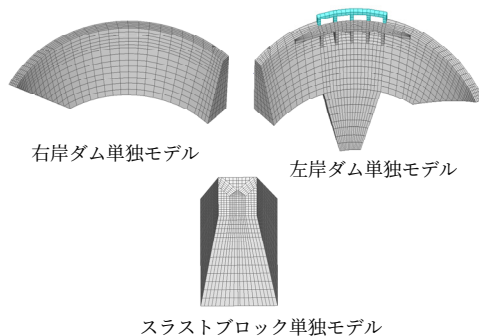


図-4 固有値解析に用いた個々の単独モデル

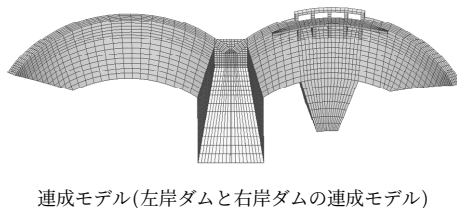


図-5 固有値解析に用いた左右岸ダムの連成モデル

表-3 固有値解析に用いた動的物性値

項 目	ダムコンクリート
動的せん断剛性：Gd	固有値解析により同定
密 度： ρ	2.40 (t/m ³)
動ポアソン比： ν_d	0.20

(5) 解析結果

本震前、本震、本震後、余震、余震後のそれぞれの状態における固有振動数が再現されるように固有値解析により動的せん断剛性を評価した結果を表-4に示す。本震時(3/11)の固有振動数 5.8Hz に対応するダムの動的せん断剛性は 6000N/mm²、余震時(4/7)の 6.4Hz に対しては 7310N/mm²、余震後の微動時の 7.2Hz に対しては 9250N/mm² となった。動的せん断剛性を 6000N/mm² とした時の単独モデルと連成モデルの固有値解析結果の比較を表-5 に示す。図-6 には左岸ダム単独モデルと連成モデルの 1 次モード

の比較結果を、図-7 には 2 次モードの比較結果を示す。動的せん断剛性を 6000N/mm² とした場合、1 次の固有振動数は、左岸ダムは 5.80Hz、右岸ダムは 5.94Hz、スラストブロックは 13.73Hz となった。図-8 は、左岸ダムの天端に位置する放流施設に着目した際の振動モードである。図-8 より放流施設の固有振動数は 12.1Hz 程度であると推察される。

表-4 地震観測結果から推定された固有振動数が再現されるように同定した動的せん断剛性

設定時期	左岸ダムの固有振動数 (目標値)	固有値解析で同定した動的せん断剛性
本震前の微動時	7.0 Hz	Gd=8740 N/mm ² (Vs 1910 m/s)
本震時 (3/11) Amax = 626gal	5.8 Hz	Gd=6000 N/mm ² (Vs 1580 m/s)
本震後の微動時	7.0 Hz	Gd=8740 N/mm ² (Vs 1910 m/s)
余震時 (4/7) Amax = 430gal	6.4 Hz	Gd=7310 N/mm ² (Vs 1730 m/s)
余震後の微動時	7.2 Hz	Gd=9250 N/mm ² (Vs 1960 m/s)

表-5 動的せん断剛性(Gd)を 6000N/mm² とした時の固有値解析結果 (Hz)

次数	左岸ダム 単独 モデル	右岸ダム 単独 モデル	スラスト ブロック 単独モデル	連成 モデル
1	5.80	5.96	13.72	5.79
2	5.94	6.38	21.63	5.94
3	7.64	8.41	22.35	6.03
4	9.88	11.07	22.50	6.49
5	12.08	13.85	26.05	7.81
6	12.69	14.63	29.50	8.53
7	14.01	14.97	33.53	9.83
8	14.40	16.17	36.29	10.35
9	15.15	17.90	37.76	10.91
10	16.37	18.42	38.27	11.70

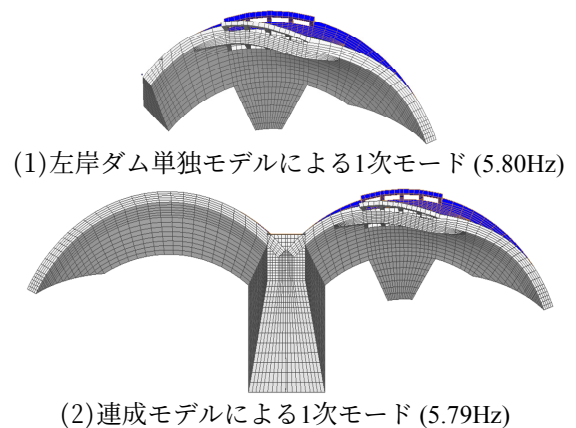


図-6 Gd=6000N/mm² とした時の 1 次モード

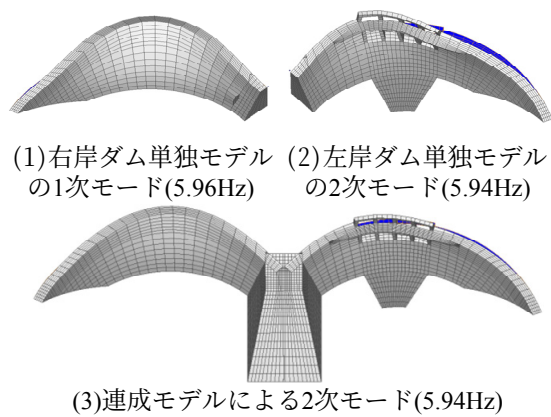


図-7 Gd=6000N/mm²とした時の2次モード

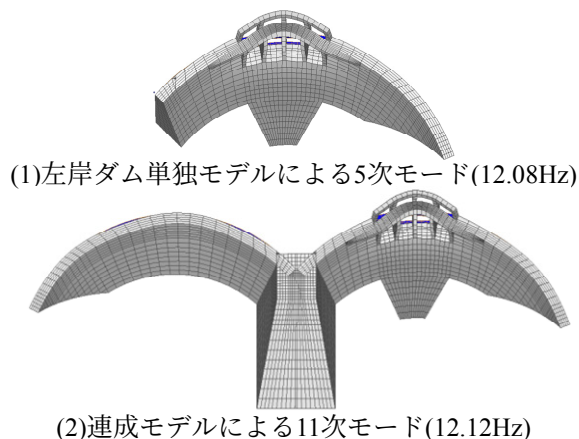


図-8 Gd=6000N/mm²とした時の高次モード
(放流施設の振動モードに対応)

表-6 動的せん断剛性を 9250N/mm²とした
時の固有値解析結果 (Hz)

次数	左岸ダム 単独 モデル	右岸ダム 単独 モデル	スラスト ブロック 単独モデル	連成 モデル
1	7.21	7.40	17.04	7.19
2	7.37	7.93	26.85	7.38
3	9.49	10.44	27.75	7.49
4	12.26	13.75	27.94	8.06
5	14.99	17.20	32.35	9.69
6	15.76	18.17	36.64	10.59
7	17.40	18.59	41.63	12.21
8	17.88	20.08	45.05	12.85
9	18.81	22.22	46.88	13.55
10	20.33	22.87	47.52	14.52

(6) 考察

解析を行う前に、連成モデルを用いた場合は2つのアーチダムとスラストブロックの連成効果による低振動数のモードが出てくるものと予想したが、今回の検討では、単独モデルと連成モデルとで1次モードは同様な解析結果となった。

本震時のダムの動的せん断剛性は 6000N/mm² と評

価され、微動時の動的せん断剛性は 9250N/mm² となった。ダムコンクリートには、地震時のせん断ひずみの増大に伴い動的せん断剛性は低下し減衰定数が増加する、動的非線形性があるが、微動時に比して強震時の動的せん断剛性が小さくなったのは堤体材料の非線形性（ひずみ依存性）として解釈することが可能である。

実地震動データに基づいてダムの固有振動数を評価する場合、ダム基礎とダム天端で地震観測を行うことが望ましい。これらの位置の観測地震動がある場合には、ダム基礎に対するダム天端の周波数応答関数を算出することによって、ダムの固有周波数を的確に評価することが可能になる。前出表-2 に示した固有振動数の値は、ダム天端で観測された地震動のスペクトルから推定されたものであるため、より正確な固有振動数の推定方法については今後の課題である。

3. 三次元動的解析による東北地方太平洋沖地震の際の耐震性の評価

(1) 概要

形状が複雑な複合構造型のアーチダムダムは、二次元的な取り扱いが困難であることから、信頼性のある耐震性能照査を行うためには、三次元動的解析による検討が必要になる。そして、動的解析の実施に際しては、入力地震動の設定が必要になる。大倉ダムでは、東北地方太平洋沖地震の際に、スラストブロックの底部にある監査廊内で最大加速度 88.35gal の地震動が観測された。そこで、この観測地震動を活用して三次元動的解析を行い、東北地方太平洋沖地震の際の大倉ダムの地震時応答について検討するとともに、ダブルアーチダムの耐震性能評価法について考察した。

(2) 三次元動的解析モデル

解析に用いた三次元動的解析モデルを図-9 に示す。基礎岩盤は、幅 450m、奥行 250m、高さ 142m の領域をモデル化した。ダム、基礎岩盤ともにソリッド要素を用いてモデル化した。放流施設の鋼製ゲートについては、ダム堤体の地震時挙動に及ぼす影響が小さいと考えて今回の解析ではモデル化を省略した。貯水については、3 月は渇水期にあたり、ダム天端の標高 EL.+272.00m、常時満水位 EL.+270.60m に対して地震発生時の貯水位は EL.+253.11m であったことから、ここではモデル化を省略した条件設定で解析した。なお、基礎地盤の側方境界は粘性境界、下方境界は剛基盤とした。

(3) 解析用物性値

解析に用いた動的物性値を表-7 に示す。ダムとスラストブロックの動的せん断剛性の値は、東北地

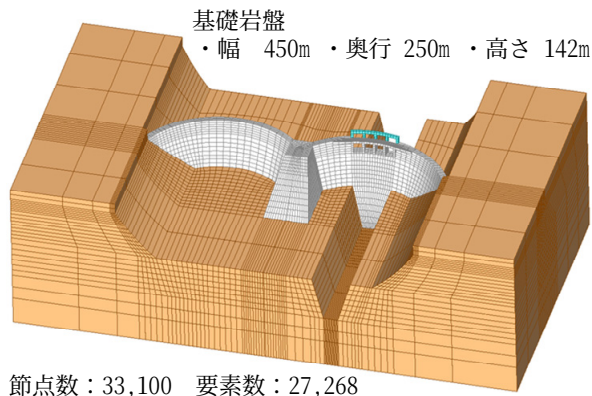


図-9 三次元動的解析モデル

表-7 解析に用いた動的物性値

項目	動的せん断剛性 (N/mm^2)	密度 (t/m^3)	ポアソン比	減衰定数
右岸ダム	6000	2.40	0.20	0.05
スラストブロック				
左岸ダム	4500	2.60	0.25	0.05
基礎地盤				

東北地方太平洋沖地震 本震(3/11) スラストブロック監視廊
Amax : 88.35gal

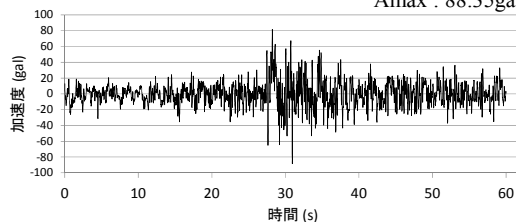


図-10 解析に用いた入力地震動

方太平洋沖地震の際に左岸ダムの天端で観測された地震動から評価されたダムの固有周波数が再現されるように同定した。密度，ポアソン比，減衰定数は，これまでの解析事例を踏まえ一般的な数値を設定した。解析は線形解析により行った。

(4) 入力地震動

3月11日の本震の際にスラストブロック内の監視廊で観測された地震動を入力地震動として使用した。最大加速度は88.35galである。解析には，図-10に示した時刻歴の20.00秒から59.99秒までの40秒間を使用した。

(5) 解析結果

a) 加速度応答

解析モデル全体の上下流方向の最大加速度分布を図-11に，ダム堤体上流面の分布を図-12示す。また，図-13に示した代表出力位置の最大加速度の値を表-8に示す。加速度応答に関しては，左岸ダムの谷部最下部(位置11)で125.11gal，左岸ダムの天

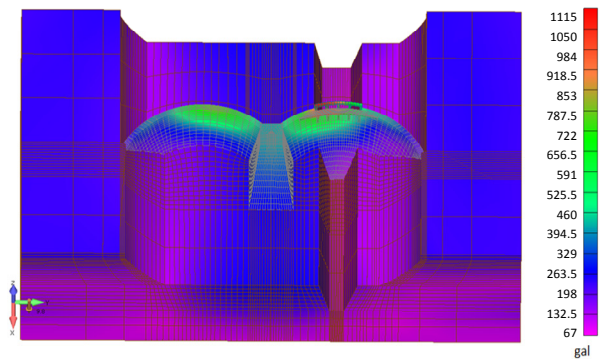


図-11 最大加速度分布 (全体モデル)

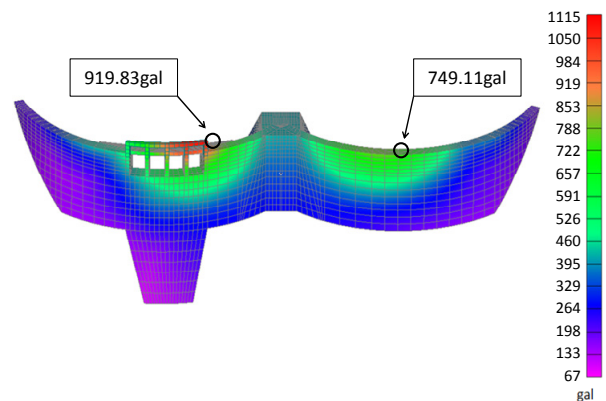


図-12 ダム堤体上流面の最大加速度分布

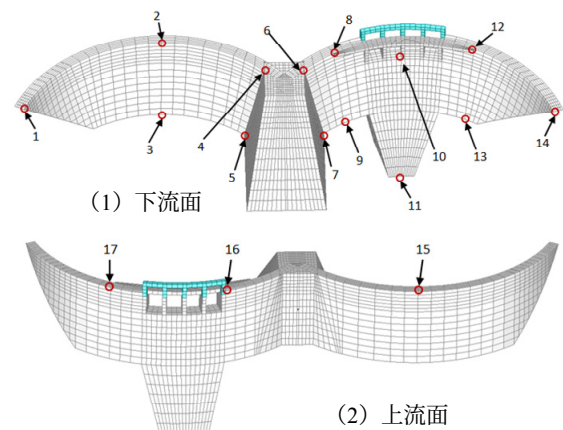


図-13 最大加速度の代表出力位置

端(位置8)で673.20gal，右岸ダムの天端(位置2)で751.88gal，スラストブロックの天端では位置4で423.63gal，位置6で437.83galとなった。また，左岸ダム天端の位置17(地震観測点-A)と位置16(地震観測点-B)の最大加速度は，図-12に示したように，それぞれ749.11gal，919.83galとなった。位置16(ダム天端の放流施設の近傍)では，放流施設の振動の影響として加速度応答が大きくなったものと考えられる。

一般的に，アーチダムの加速度応答はダム堤体中央部で増大する傾向にあるが，図-11ではダム堤体中央部からスラストブロックに向けて加速度応答が増大する傾向を示している。このことは，ダブルア

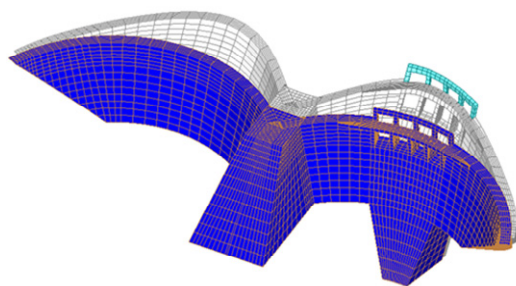
表-8 代表位置における最大加速度

出力位置			最大加速度 (gal)
1	右岸ダム	右岸アバットメント	194.99
2		天端中央	751.88
3		底部中央	202.45
4	スラストブロック	右岸天端接続部	423.63
5		右岸底部接続部	264.05
6		左岸天端接続部	437.83
7	左岸ダム	左岸底部接続部	270.05
8		天端 (スラストブロック側)	673.20
9		底部 (スラストブロック側)	262.18
10		洪水吐下部	585.57
11		谷部最下部	125.11
12		天端 (アバットメント側)	437.56
13		底部 (アバットメント側)	156.52
14		左岸アバットメント	204.78
15	右岸ダム天端中央 (測点-C)		749.11
16	左岸ダム天端 (測点-B)		919.83
17	左岸ダム天端 (測点-A)		432.29

アーチダムの耐震性能を適確に評価するためには、左岸ダムと右岸ダムを別々に分離して個別的に評価するのではなく、左岸ダムスラストブロックー右岸ダムの連成効果を考慮した評価が必要であることを示唆するものと考えられる。

b) ダム堤体の変位応答

ダム天端の変位が最大になった時刻の変位図を図-14 示す。図-14 より、左右のアーチダムと共にスラストブロックも変位していることが分かる。最大変位の値は、左岸ダム天端では 1.56cm、右岸ダム天端では 1.42cm、スラストブロック天端では 0.88cm となった。



ダム天端の最大変位：1.56cm（発生時刻8.37秒）

図-14 ダム天端の最大変位

c) 左岸ダムと右岸ダムの相対変位

左岸ダムと右岸ダムとが互いにどのような変位挙動をしているのかを見るために、図-15 に示した 2 点間の上下流方向の相対変位を算出した。その結果、左岸ダム天端と右岸ダム天端の最大相対変位量は 2.98cm となり、図-16 から、2 つのダムは、同じ方向に挙動することもあるれば逆方向に挙動することもあることが分かる。

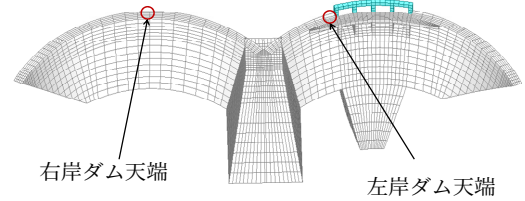
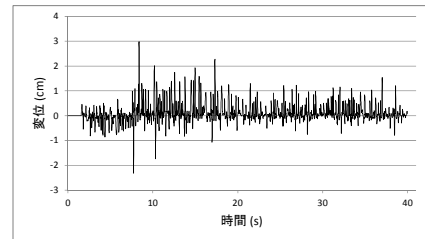


図-15 相対変位の出力位置



最大 2.986cm、発生時刻 8.37秒

図-16 左岸ダム天端と右岸ダム天端の上下流方向の相対変位時刻歴

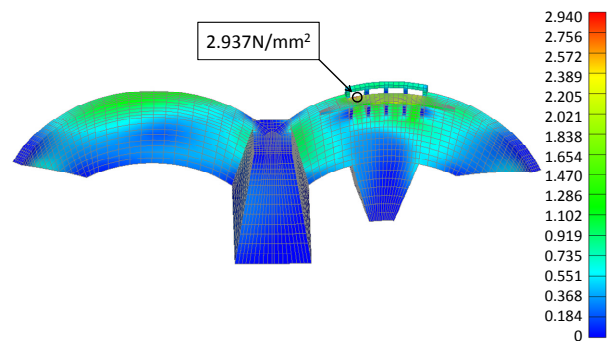


図-17 地震時の最大引張応力の分布

d) 地震時引張応力

図-17 に地震時の最大引張応力の分布を示す。また、図-18 に示した代表出力位置の最大応力の値は表-9 に示したとおりである。ダム堤体における引張応力は、堤体中央部で大きく、これは一般的な傾向であるが、図-17 より、引張応力の分布が左右岸のアバットメント部では小さいのに比して、スラストブロックとダムの接続部で大きい傾向があることが分かる。堤体中央部だけでなく、スラストブロックと堤体の接続部でも地震時の引張応力が大きくなることは、ダブルアーチダムの耐震性能を評価する際に留意すべきことであると考えられる。なお、地震時引張応力の最大値は、左岸ダム天端の放流施設の周辺部に現われており、その値は 2.937N/mm^2 であったが、ダム堤体における地震時引張応力の最大値は、右岸ダム天端中央(位置 2)で 1.220N/mm^2 であった。一般的にダムコンクリートの動的引張強度は $3\sim 5\text{N/mm}^2$ 程度と考えられ、コンクリートにクラックが発生するレベルではないと考えられる。

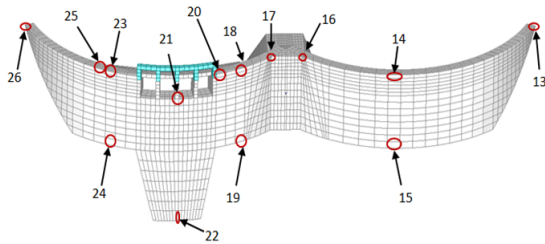


図-18 地震時応力の代表出力位置

表-9 代表出力位置の最大応力

最大応力の出力位置		最大 応力 (N/mm^2)	発生 時刻 (s)
13	右岸ダムアバットメント	-1.008	7.82
14	右岸ダム天端中央部	1.220	8.37
15	右岸ダム底部中央部	-0.198	7.73
16	右岸 - スラストブロック接続部	-0.068	7.97
17	左岸 - スラストブロック接続部	0.393	7.98
18	左岸ダム天端	0.543	8.37
19	左岸ダム底部スラストブロック側	0.032	7.74
20	ダム天端 (測点-B)	0.781	8.37
21	洪水吐下部	0.317	8.37
22	左岸谷部最下点	-0.443	8.37
23	左岸ダム天端	0.498	10.17
24	左岸ダム底部アバットメント側	-0.018	7.74
25	左岸ダム天端 (測点-A)	0.527	10.17
26	左岸ダムアバットメント	-1.150	7.82

(備考) +引張, -圧縮

(6) 考察

a) ダムの地震時健全性について

ダムコンクリートは引張応力に対して弱いため、コンクリートダムの耐震性能を評価する際には地震時の引張応力の値が重要な判断指標になる。一般的にダムコンクリートの動的引張強度 $3 \sim 5 \text{ N/mm}^2$ 程度と考えられるのに対して、今回の解析で得られた、ダム堤体における地震時引張応力の最大値は 1.3 N/mm^2 程度であった。今回の解析では、2011 年東北地方太平洋沖地震の際にスラストブロックの底部監査廊で記録された地震動をそのまま解析モデルの下方基盤から入力した。ダムの実地震時挙動を厳密に再現することを目的として解析を行う場合は、スラストブロック底部監査廊と下方入力基盤の間の三次元的な周波数応答関数を求め、その周波数応答関数を用いてスラストブロック底部監査廊で観測された地震動を下方入力基盤まで引き戻し、それを下方入力基盤から入力することが必要になる⁷⁾。しかし、ここでは、地震時の健全性の評価を目的とすることから、安全サイドの評価と位置付けて、スラストブロック底部の監査廊で観測された地震動をそのまま下方入力基盤から入力した。したがって、今回の解析で評価された地震時引張応力の大きさは、本来の値よりも大きい数値として算出されていると考えられる。この点を踏まえると、東北地方太平洋

沖地震の際のダムの耐震性は安定的に保持されていたものと考えられる。

b) ダブルアーチダムの耐震性評価法について

三次元動的解析によりダブルアーチダムの耐震性について検討した結果、つぎのような知見を得た。

- ・左岸ダムと右岸ダムは、スラストブロックを介していつも同じ位相で変位挙動しているわけではなく、時々刻々変化する地震作用によって逆位相で変位挙動することがある。

- ・ダム堤体に発生する地震時の引張応力は、左右岸のアバットメント部では比較的小さいのに対して、スラストブロックとダムの接続部分では大きくなる傾向がある。

- ・大倉ダムが設計された当時は、左岸ダムと右岸ダムをそれぞれ個別の構造物としてとらえ、震度法による耐震設計が行われたものと推察されるが、上記のような現象を念頭に置くと、ダブルアーチダムのように、形状が複雑な複合構造型のダムの耐震性を適確に評価するためには、2つのアーチダムとスラストブロックの地震時の相互影響を考慮した評価が必要であると考察される。

- ・コンクリートダムの地震時の損傷・破壊は、地震作用によって発生する応力によって支配されるので、どの部分にどの程度の地震時応力が発生するのかを適切に評価することが求められる。複雑な地震時応答を示す構造物、社会的に重要性が高い構造物の耐震性を適切に評価するためには、実現象に忠実な解析評価が可能である三次元動的解析の活用が必要である。

4. まとめ

2011 年東北地方太平洋沖地震の際の地震観測結果を踏まえ、三次元解析モデルを用いた固有値解析によりダブルアーチダムの動的せん断剛性を同定した。その結果、本震時のダムの動的せん断剛性は 6000 N/mm^2 と評価された。また、微動時の動的せん断剛性は 9250 N/mm^2 と評価された。強震時の動的せん断剛性の低下に関しては、ダムコンクリートの非線形性（ひずみ依存性）として解釈することができる。

スラストブロックの底部監査廊で記録された地震動を入力地震動として用いて、三次元動的解析によりダブルアーチダムの本震時の耐震性について検討した。加速度応答については、右岸ダムに比べて左岸ダムの応答が大きくなった。これは、左岸ダム（堤高 84m）の高さが右岸ダム（堤高 42m）よりも高いことによって地震動が増幅したためであると考えられる。変位応答については、左岸ダム天端と右岸ダム天端の上下流方向の最大相対変位は約 3cm であった。相対変位の時刻歴から、左岸ダムと右岸ダムはいつも同じ方向に挙動しているわけではなく、互いに反対方向に挙動することを確認することができた。地震時応力については、地震時の引張応力は、左岸

ダム为天端で最大 2.937N/mm^2 であった。ただし、この位置は放流施設の近くであり、天端に設けられている橋梁スラブの影響が及んでいるものと考えられる。ダム堤体(本体)における最大引張応力は、右岸ダムの天端中央部において 1.220N/mm^2 であった。コンクリートの動的引張強度は $3\sim 5\text{N/mm}^2$ 程度と考えられ、今回の解析で得られた地震時応力の値は、ダムコンクリートにクラックが発生するレベルではなく、本震時のダムの耐震性は安定的に維持されていたものと考えられる。

本検討の結果、ダブルアーチダムの耐震性を適確に評価するためには、2つのアーチダムとスラストブロック間の地震時の相互影響を考慮した解析評価が必要であると考えられる。形状が異なる複数の構造体が連結された、複合構造型の構造物の耐震性評価においては、個々の構造体の地震時応答のみならず、構造体の間の相互影響を定量的に評価することが重要である。

今後の課題としては、入力地震動の特性と作用方向、堤体と基礎地盤の非線形性の影響、貯水の影響、堤体のコントラクションジョイントの影響等に関する検討があると考えている。

謝辞: 三次元動的解析の実施においては、平成 24 年度弘前大学理工学部地球環境学科卒業生の早坂友宏氏(現: 株式会社コアテック)と川上和貴氏(現: 株式会社エスピック)に多大なご協力をいただきました。そして、本研究の実施に際しては、(社)東北地域づくり協会・技術開発支援制度よりご支援をいただき、また、宮城県仙台地方ダム総合事務所からはフィールドのご提供をいただきました。記して深謝の意を表します。

参考文献

- 1) 上島照幸, 金澤健司, 村上弘太, 仲村成貴, 塩尻弘雄, 有賀義明: 常時微動・地震動の長期継続観測による高経年化したアーチダムの振動特性同定と 2011 年東北地方太平洋沖地震時のダムの振動挙動, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.68, No.4 (地震工学論文集第 31-b 巻), I_186- I_194, 2012
- 2) 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
- 3) 有賀義明, 上島照幸, 塩尻弘雅, 仲村成貴, 上島照幸, 金澤健司: 三次元動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
- 4) 早坂友宏, 有賀義明, 川上和貴, 上島照幸, 仲村成貴, 塩尻弘雅: 東北地方太平洋沖地震の地震観測結果を踏まえたアーチダムの動的変形特性の評価, 土木学会第 68 回年次学術講演会梗概集, I_020, pp.39-40, 2013
- 5) 有賀義明, 早坂友宏, 川上和貴, 上島照幸, 仲村成貴, 塩尻弘雅: 三次元動的解析による東北地方太平洋沖地震時のアーチダムの耐震性の検討, 土木学会第 68 回年次学術講演会梗概集, I_019, pp.37-38, 2013
- 6) 有賀義明, 曹増延, 渡邊啓行: 強震時のジョイントの非連続的挙動を考慮したアーチダムの三次元動的解析に関する研究, 土木学会論文集 No.759/ I -67, 53-67, 2004.4
- 7) 渡邊啓行, 有賀義明, 曹増延: 三次元動的解析による非線形性を考慮したコンクリート重力式ダムの耐震性評価について, 土木学会論文集 No.696/ I -58, 99-110, 2002.1

(2013.9.19受付)

SEISMIC SAFETY EVALUATION FOR DOUBLE ARCU DAM DURING 2011 OFF THE PACIFIC COAST OF TOHOKU EARTHQUAKE BY THREE DIMENSIONAL DYNAMIC ANALYSIS

Yoshiaki ARIGA, Teruyuki UESHIMA,
Masataka NAKAMURA and Hiroo SHIOJIRI

The Ohkura Dam is the only concrete double arch dam in Japan, which is composed of right arch dam, left arch dam and thrust block. In regard to such structures with complex shapes, seismic safety evaluation based on three dementional dynamic analysis is to be necessary. The seismological observations have been made at the dam, and the earthquake motions have been obuserved before, during and after the 2011 Off the Coast of Tohoku Earthquake. In this study, we made three dmentonal dynamic analysis. We firstly evaluated the dynamic propery values of the dam by reproducing the predominant frequency of the dam. And then, we evaluated the seismic safety of the dam during the 2011 Off the coast of Tohoku Earthquake. As a result, the maximum tensile dynamic stress was estimated to be about 2.9N/mm^2 , and it is considerd that seismic safety of the dam has been maintained during the earthquake.