

# マルチプルアーチダムの耐震性能の 評価法に関する検討

有賀義明<sup>1</sup>・三浦千穂<sup>2</sup>・佐藤優乃<sup>3</sup>

<sup>1</sup>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@hirosaki-u.ac.jp

<sup>2</sup>学生会員 弘前大学 大学院理工学研究科 博士前期課程 (〒036-8561 青森県弘前市文京町 3)  
E-mail:h14ms405@stu.hirosaki-u.ac.jp

<sup>3</sup>非会員 弘前大学 理工学部 地球環境学科 (〒036-8561 青森県弘前市文京町 3)  
E-mail:h12s4025@stu.hirosaki-u.ac.jp

マルチプルアーチダムは、2つ以上のアーチダムが連結された複合構造型のアーチダムである。このようなダムの場合、個々のダムが独立した構造体であると考えて個別的な耐震評価を行えばよいのか、または、複数のダムで一つの構造体であると考えて全体的な評価を行うべきなのかという問題が考えられる。そこで、単独ダムモデルと複合ダムモデルの2種類の解析モデルを設定し、三次元動的解析により、多重型アーチダムの耐震評価の仕方について検討した。その結果、ダム堤体の地震時引張応力は、単独ダムモデルでは複合ダムモデルよりも小さくなった。そのため、マルチプルアーチダムの耐震評価では、個別的な評価は危険サイドの評価になり、精度・信頼性の高い耐震評価を行うためには複数のダムの動的相互影響を考慮した全体系の評価が必要であるとの考察結果を得た。

**Key Words :** *multiple arch dam, seismic safety evaluation, 3D dynamic analysis, dynamic tensile stress, dynamic shear modulus*

## 1. はじめに

マルチプルアーチダム（多重アーチダム）は、2つ以上のアーチダムによって構成される、複合構造型のアーチダムである。その建設数は少なく、国の内外に数例の建設事例があるが、高経年化しているものが多い。数十年前に建設されたダムに関しては、その当時の数値解析技術や耐震設計技術の水準から、現在のような動的解析による耐震性能評価は行われていない。したがって、地震多発地域に位置する場合には耐震性能の再評価が必要になるものと考えられる。その場合、マルチプルアーチダムを構成する複数のダムを個別の構造体として考えて個別的な評価を行えばよいのか、あるいは、複数のダムで構成されるマルチプルアーチダムを全体で一つの構造体と考えて全体系の評価を行うべきなのかという問題が出てくるものと考えられる。

マルチプルアーチダムの内、デュアルアーチダム（二重アーチダム）の建設事例としては、海外では Hongrin ダム<sup>1)</sup>（オングラダム、堤高：123m、総堤頂長：600m、竣工 1969 年、スイス国）、国内では大倉ダム（堤高：右岸ダム 42m、左岸ダム 82m、総堤頂長 323m、竣工 1961 年、宮城県）がある。いずれも概ね半世紀前に建設されたダムであり、当時

の数値解析技術および耐震設計技術では、動的解析は行われておらず、連結された複数のダムの地震時の動的相互作用は考慮せずに、静的な計算法に基づいた個別的な耐震設計が行われたと考えられる。このような背景を踏まえ、ここでは、複合構造を有するダムの耐震性能評価の精度向上を目的として、三次元動的解析による比較解析を行い、マルチプルアーチダムの耐震評価のための解析法について考察した。



図-1 マルチプルアーチダムの事例<sup>1)</sup>  
(スイス、オングラダム)

## 2. 三次元動的解析

### 2.1 概要

既設の建設事例を踏まえながら<sup>2)</sup>、単独ダムモデルと複合ダムモデルの2種類の解析モデルを設定して、地震時の引張応力に着目して、複合構造型のアーチダムの耐震性能の評価法について検討した。検討に際しては、ダム堤体の動的せん断剛性の影響についても比較検討を行った。

### 2.2 解析モデル

マルチプルアーチダムの解析モデルとして、Hongrin ダムと大倉ダムを踏まえ、1基のアーチダムで構成される単独モデル(図-2)と2基のアーチダムで構成される複合モデル(図-3)の2種類の解析モデルを設定して比較解析を行った。ダムの形状・寸法については、堤高 50m、天端幅 145m とし、単独モデルも複合モデルも同様とした。ダム、基礎岩盤ともにソリッド要素を用いてモデル化し、基礎岩盤の側方境界は粘性境界、下方境界は剛基盤とした。貯水については空虚時を仮定した。解析には、解析プログラム ISCEF を使用した。

### 2.3 解析用動的物性値

解析に用いた、ダム堤体の動的物性値を表-1 に、基礎岩盤の動的物性値を表-2 に示す。ダム堤体の動的せん断剛性は、既往の研究成果<sup>3), 4)</sup>を参考にして設定した。表-3 は、2011 年東北地方太平洋沖地震の本震時(3月11日)、余震時(4月7日)、余震後の微動時の地震動挙動から同定したダムの動的せん断剛性である<sup>5)</sup>。これを参考に、ダム堤体の動的せん断剛性を3通り( $G/Go=1$ ,  $G/Go=0.79$ ,  $G/Go=0.65$ )設定し、動的せん断剛性の変化がダム堤体の地震時応力にどのような影響を及ぼすか比較検討を行った。地震時応力に関しては、ダムコンクリートは引張りに弱いことから、ここでは引張応力に着目して整理した。密度、ポアソン比、減衰定数は、既往の解析事例を参考にして設定した<sup>6), 7)</sup>。

表-1 ダム堤体の動的物性値

剛性低下率	動的せん断剛性 N/mm <sup>2</sup>	密度 t/m <sup>3</sup>	ポアソン比	減衰定数
G/Go=1.00	9250	2.4	0.20	0.05
G/Go=0.79	7310	2.4	0.20	0.05
G/Go=0.65	6000	2.4	0.20	0.05

表-2 基礎岩盤の動的物性値

項目	動的せん断剛性 N/mm <sup>2</sup>	密度 t/m <sup>3</sup>	ポアソン比	減衰定数
基礎岩盤	4500	2.6	0.25	0.05

表-3 東北地方太平洋地震時の地震時挙動から同定したダム堤体の動的せん断剛性

状態 (年月日)	同定した動的せん断剛性	備考 加速度レベル
本震時 (2011.3/11)	G=6000 N/mm <sup>2</sup> (Vs≒1580 m/s)	Amax = 626 Gal
余震時 (2011.4/7)	G=7310 N/mm <sup>2</sup> (Vs≒1730 m/s)	Amax = 430 Gal
余震後の微動時	G=9250 N/mm <sup>2</sup> (Vs≒1960 m/s)	数 Gal

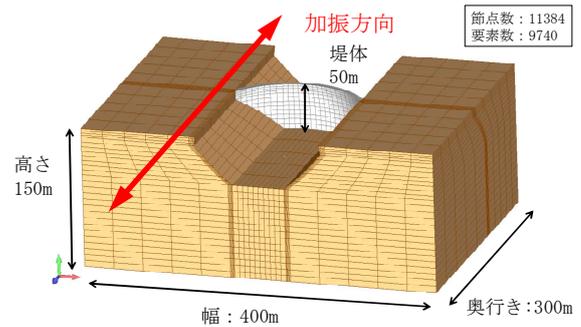


図-2 単独ダムの三次元解析モデル

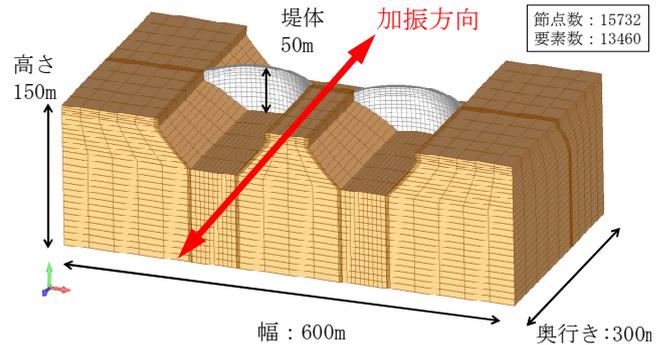


図-3 複合ダムの三次元解析モデル

### 2.4 入力地震動

解析には、図-4 に示した加速度時刻歴の 0 秒～10.5 秒の区間を使用した。加振方向は、上下流方向とした。

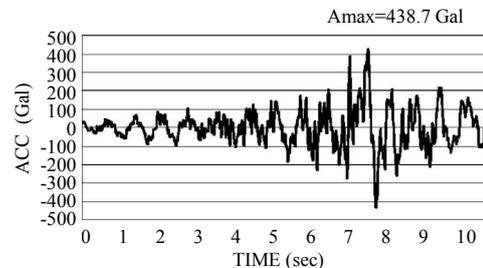


図-4 入力地震動

## 2.5 解析結果

表-4 に単独モデルの代表位置の地震時引張応力の最大値を示す。同様に、表-5 に複合モデルの地震時引張応力の最大値を示す。単独モデルおよび複合モデルの代表位置は、それぞれ図-5 と図-6 に示したとおりである。単独モデルでダム堤体の動的せん断剛性を  $9250 \text{ N/mm}^2$ 、 $7310 \text{ N/mm}^2$ 、 $6000 \text{ N/mm}^2$  に設定した時の地震時引張応力の分布をそれぞれ図-7、図-8、図-9 に示す。同様に、複合モデルでダム堤体の動的せん断剛性を  $9250 \text{ N/mm}^2$ 、 $7310 \text{ N/mm}^2$ 、 $6000 \text{ N/mm}^2$  に設定した時の地震時引張応力の分布をそれぞれ図-10、図-11、図-12 に示す。表-4 より、単独モデルでは、地震時引張応力の最大値はダム天端中央で  $5.85 \text{ N/mm}^2$  となった。一方、表-5 より、複合モデルではダム天端中央で  $9.58 \text{ N/mm}^2$  となった。表-4 と表-5 の比較から、地震時引張応力は、総じて、単独モデルよりも複合モデルの方が大きくなる事が分かる。換言すれば、地震時引張応力の評価は、単独モデルは複合モデルよりも危険サイドの評価になると言うことができる。

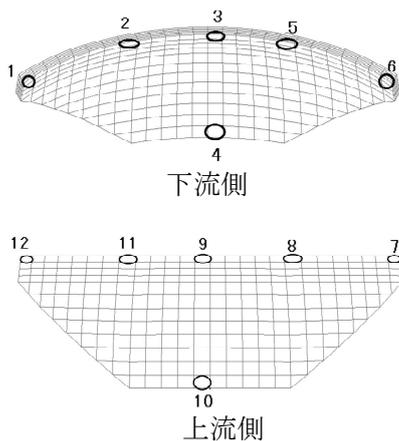


図-5 単独モデルの代表位置

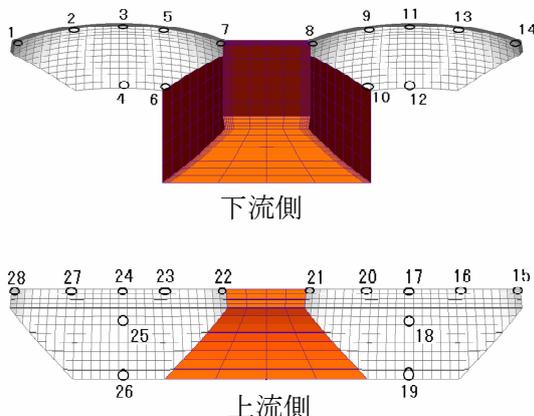


図-6 複合モデルの代表位置

この結果から、複合構造であるマルチプルアーチダムの耐震性能を精度良く評価するためには、複数のダムの地震時の相互影響を考慮した全体系の解析評価が必要であると考えられる。

地震時引張応力に及ぼす動的せん断剛性の影響については、単独モデルでは、表-4より、下流面の天端右岸寄り（位置2）と天端左岸寄り（位置5）、上

表-4 単独モデルでの地震時引張応力の最大値

代表位置		ダム堤体の動的せん断剛性 (N/mm <sup>2</sup> )			
		9250	7310	6000	
下流面	右岸アバットメント	1	1.55	1.57	1.37
	天端右岸寄り	2	2.47	3.78	4.32
下流面	天端中央	3	3.16	3.36	2.89
	基礎中央	4	1.49	2.57	2.62
	天端左岸寄り	5	2.47	3.78	4.32
	左岸アバットメント	6	1.54	1.56	1.36
上流面	右岸アバットメント	7	1.60	1.97	1.80
	天端右岸寄り	8	3.08	3.17	3.82
	天端中央	9	3.34	4.95	5.85
	基礎中央	10	5.28	4.89	4.47
	天端左岸寄り	11	3.08	3.18	3.82
	左岸アバットメント	12	1.60	1.97	1.80

(位置番号については図-5 参照)

表-5 複合モデルでの地震時の最大引張応力

代表位置		ダム堤体の動的せん断剛性 (N/mm <sup>2</sup> )				
		9250	7310	6000		
下流面	右岸ダム	右岸アバットメント	1	3.03	3.02	2.02
		天端右岸寄り	2	5.25	6.29	7.28
		天端中央	3	3.64	3.78	3.04
		基礎中央	4	2.63	3.50	3.86
		天端左岸寄り	5	2.88	4.77	6.35
		左岸基礎	6	2.28	2.67	2.68
		左岸アバットメント	7	2.57	2.96	2.27
	左岸ダム	右岸アバットメント	8	2.57	2.96	2.27
		天端右岸寄り	9	2.88	4.77	6.35
		右岸基礎	10	2.28	2.67	2.68
		天端中央	11	3.64	3.78	3.04
		基礎中央	12	2.63	3.50	3.86
		天端左岸寄り	13	5.25	6.29	7.28
		左岸アバットメント	14	3.03	3.02	2.02
上流面	右岸ダム	右岸アバットメント	15	2.95	2.93	3.30
		天端右岸寄り	16	3.26	3.68	3.61
		天端中央	17	5.07	7.96	9.58
		ダム中央部	18	3.77	4.54	5.71
		基礎中央	19	4.51	4.74	4.61
		天端左岸寄り	20	5.32	6.76	6.54
		左岸アバットメント	21	1.69	2.64	3.28
	左岸ダム	右岸アバットメント	22	1.69	2.64	3.28
		天端右岸寄り	23	5.32	6.76	6.54
		天端中央	24	5.07	7.96	9.58
		ダム中央部	25	3.77	4.54	5.71
		基礎中央	26	4.51	4.74	4.61
		天端左岸寄り	27	3.26	3.68	3.61
		左岸アバットメント	28	2.95	2.93	3.30

(位置番号については図-6 参照)

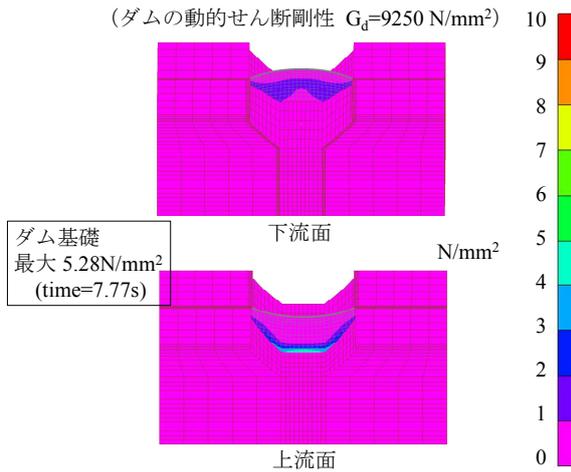


図-7 単独モデルでの地震時引張応力分布  
( $G_d=9250 \text{ N/mm}^2$ )

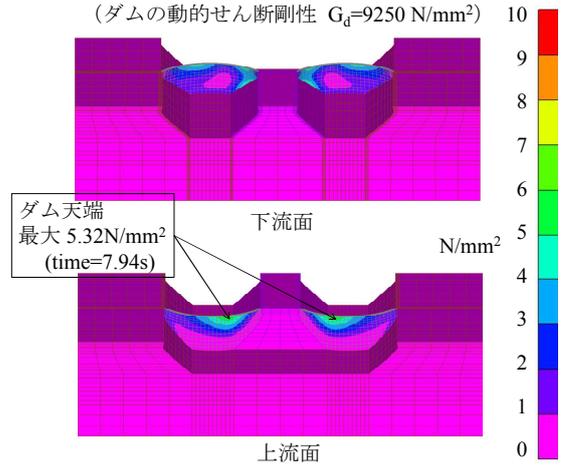


図-10 複合モデルでの地震時引張応力分布  
( $G_d=9250 \text{ N/mm}^2$ )

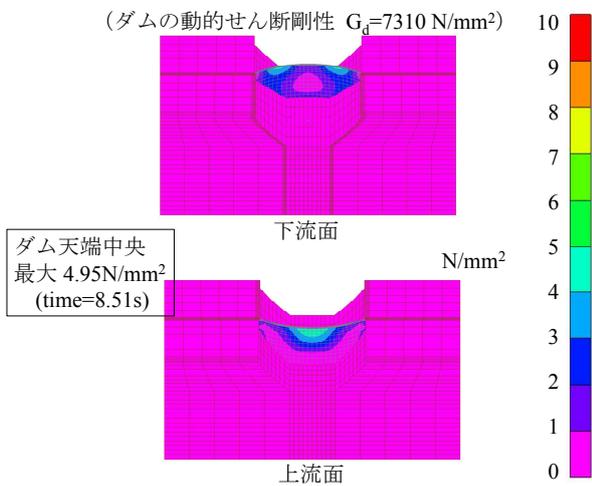


図-8 単独モデルでの地震時引張応力分布  
( $G_d=7310 \text{ N/mm}^2$ )

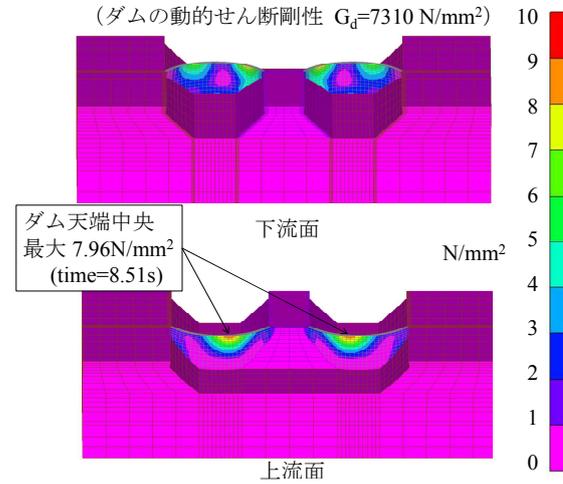


図-11 複合モデルでの地震時引張応力分布  
( $G_d=7310 \text{ N/mm}^2$ )

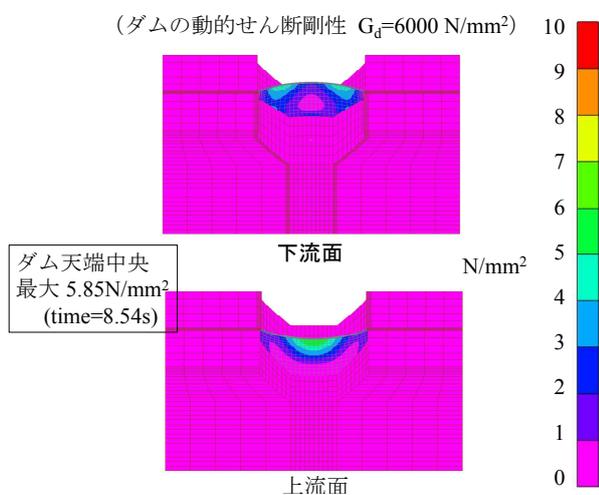


図-9 単独モデルでの地震時引張応力分布  
( $G_d=6000 \text{ N/mm}^2$ )

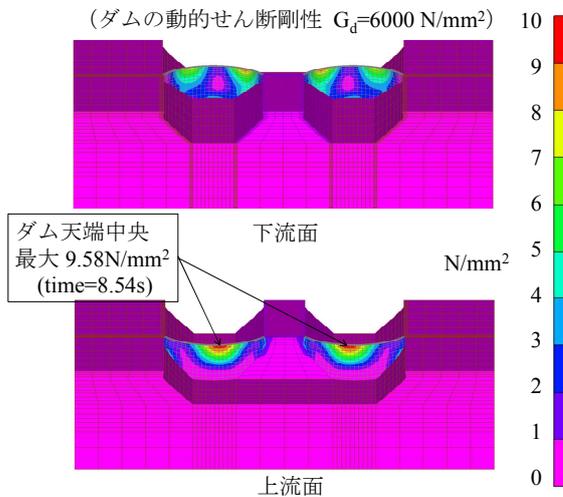


図-13 複合モデルでの地震時引張応力分布  
( $G_d=6000 \text{ N/mm}^2$ )

流面ではダム天端中央（位置9）で動的せん断剛性の値が小さくなると地震時引張応力が大きくなっていることが分かる。しかし、左右岸のアバットメント（位置1, 位置6, 位置7, 位置12）や基礎岩盤（位置4, 位置10）では、動的せん断剛性の値が小さくなると地震時引張応力も小さくなり、動的せん断剛性の影響の出方（増減）とその程度は部位によって異なる結果が得られた。図-7, 図-8, 図-9からは、単独モデルにおける地震時引張応力の分布状況、すなわちダム堤体の上流面では天端中央部、下流面では天端中央から堤頂長の約1/4程度、左右岸に寄った位置で地震時引張応力が大きいことが分かる。

複合モデルに関しても、表-5より、下流面の天端右岸寄り（位置2, 位置9）と天端左岸寄り（位置5, 位置13）および上流面のダム天端中央（位置17, 位置24）では動的せん断剛性の値が低下すると地震時引張応力が增大することが理解できる。また、左右岸のアバットメント（位置1, 位置7, 位置8, 位置14）や基礎中央（位置4, 位置12, 位置19, 位置26）では、動的せん断剛性の値が低下しても地震時引張応力はあまり変動せず減少傾向があることが分かる。また、図-10, 図-11, 図-12より、上流面と下流面での地震時引張応力の分布状況、動的せん断剛性の低下に伴う地震時引張応力の増大状況を理解することができる。

### 3. まとめと考察

(1) ダム堤体の地震時引張応力に対するダム堤体の動的せん断剛性の影響は、単独モデルでは小さく、複合モデルでは大きい傾向がある。これは、動的せん断剛性が低下した場合には、単独モデルではダムが1基であるためその影響が限定的であるのに対して、複合モデルではダムが2基あるため両者間の相互影響が生じるためと考察される。動的せん断剛性が低下した場合、地震時引張応力の変動（増減）はダム堤体の部位（位置）によって異なり、地震時に変形しやすい部位では地震時引張応力が増加し、変形しにくい部位では変化が少ない傾向があると考えられる。

(2) ダム堤体の動的せん断剛性を  $6000 \text{ N/mm}^2$  とした時の地震時引張応力の最大値に関する単独モデルと複合モデルの比較結果を表-6 に示す。同様に、地震時引張応力の分布状況の比較を図-14 に示す。表-6 に示したように、単独モデルでは、複合モデルよりも地震時引張応力の評価結果が小さい値になった。この結果から、マルチプルアーチダムの耐震性能の評価法に関しては、複数のダムを独立の構造体と考えて評価する個別的な評価法では危険サイドの評価になる可能性があり、この傾向は、ダム堤体の動的せん断剛性が低下するほど大きくなるものと考察される。したがって、マルチプルアーチダムの耐震性能を精度良く評価するためには、複数のダムの動的相互影響を考慮した、全体系の解析評価が必

要であると考察される。

なお、地震時のコンクリートダムの損傷を評価する際には、地震時応力が重要な指標になることから、ここでは、地震時引張応力に着目して解析結果のまとめを行ったが、ダムの動的せん断剛性の値を  $6000 \text{ N/mm}^2$  とした場合の最大加速度、最大変位の結果は表-7 に示したとおりである。最大加速度、最大変位、最大引張応力の値は、いずれも複合モデルの方が単独モデルの場合よりも大きくなった。

表-6 ダム堤体の動的せん断剛性を  $6000 \text{ N/mm}^2$  とした時の地震時引張応力に関する単独モデルと複合モデルの比較

代表位置	単独モデル		複合モデル		
	位置番号	地震時引張応力 $\text{N/mm}^2$	位置番号	地震時引張応力 $\text{N/mm}^2$	
下流面	右岸アバットメント	1	1.37	1	2.02
	天端右岸寄り	2	<u>4.32</u>	2	<u>7.26</u>
	天端中央	3	2.89	3	3.04
	基礎中央	4	2.62	4	3.86
	天端左岸寄り	5	<u>4.32</u>	5	<u>6.35</u>
	左岸アバットメント	6	1.36	7	2.27
上流面	右岸アバットメント	7	1.80	15	3.30
	天端右岸寄り	8	3.82	16	3.61
	天端中央	9	<u>5.85</u>	17	<u>9.58</u>
	基礎中央	10	4.47	19	4.61
	天端左岸寄り	11	3.82	20	6.54
	左岸アバットメント	12	1.80	21	3.28

(位置番号については、単独モデルは図-5 参照、複合モデルは図-6 参照)

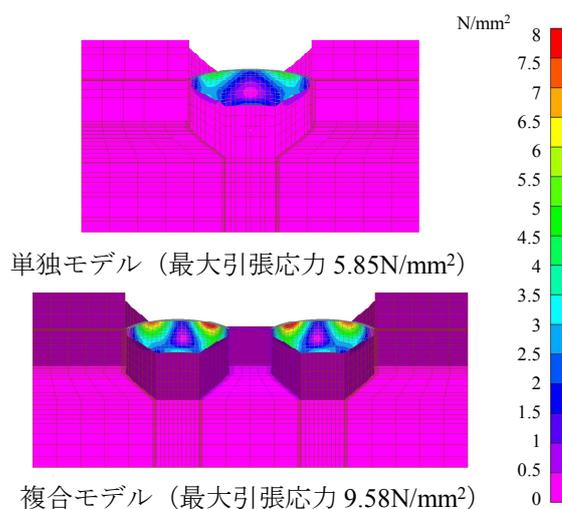


図-14 ダム堤体の動的せん断剛性を  $6000 \text{ N/mm}^2$  とした時の地震時引張応力分布に関する単独モデルと複合モデルの比較

表-7 ダム堤体の動的せん断剛性を6000 N/mm<sup>2</sup>とした時の最大加速度，最大変位，最大応力に関する単独モデルと複合モデルの比較

解析モデル	最大加速度 (Gal)	最大変位 (cm)	最大引張応力 (N/mm <sup>2</sup> )
単独モデル	2888	9.8	5.85
複合モデル	4646	11.5	9.58

#### 4. あとがき

今後の課題としては，複合モデルにおける2基のダムの離間距離の影響，入力地震動の周期特性の影響，貯水の影響，堤体のジョイントの影響，基礎岩盤の動的変形特性の影響等について検討したいと考えている。

マルチプルアーチダムの建設事例は，国の内外合わせて計4例程度であるが，複雑な形状と構造を有するダムとしては，コンバインダム（複合型ダム）と呼ばれるダムがある。コンバインダムは，コンクリート重力式ダムとロックフィルダムの複合，アースダムコンクリート重力式ダムの複合等の建設事例がある。強震動による地震被害は，形状や構造の変化部，構造物と構造物の連結部などで発生しやすいと考えられるので，複合構造型のダムに関しては，精度の高い耐震評価を行うことが必要ではないかと考えられる。

#### 謝辞

三次元動的解析の実施および結果のとりまとめ等においては，株式会社ユアテックの中田健斗君（当時，弘前大学学生）に多大なるご協力をいただきま

した。また，汎用解析プログラム ISCEF の使用に際しては，センチュリテクノ株式会社の中川弘明様，小沢良明様，安江卓様から多大なるご配慮とご協力をいただきました。末尾ながら，記して深謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) [www.hydrelect.info/articles.php?lng=fr&pg=1191](http://www.hydrelect.info/articles.php?lng=fr&pg=1191)
- 2) 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
- 3) 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
- 4) 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
- 5) 有賀義明，上島照幸，仲村成貴，塩尻弘雅：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，土木学会論文集 A1（構造・地震工学），Vol.70，No.4（地震工学論文集第33巻），I\_121-I\_129，2014
- 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

## STUDY ON SEISMIC SAFETY EVALUATION METHOD FOR MULTIPLE ARCH DAM

Yoshiaki ARIGA, Chiho MIURA and Yuno SATO

Multiple arch dam is complex structure which is composed of more than two arch dams. As for seismic safety evaluation for multiple arch dam, how to consider mutual effects among plural arch dams is one of the difficult problem. In this study, we made two kinds of three dimensional analytical models, one is single dam model and the other is dual dam model. As a result, the dynamic tensile stress evaluated by the single dam model became smaller than that evaluated by the dual dam model. Consequently, it is considered that the mutual dynamic effects among plural arch dams should be taken into account in order to execute accurate and reliable evaluation.