

## 3.8 台形 CSG ダムの耐震性能照査に関する研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 23～平 27

担当チーム：水工構造物チーム

研究担当者：山口嘉一、金銅将史、切無沢徹

### 【要旨】

ダム事業において、経済性や環境配慮の着目点から、現場で得られる材料を有効利用し、簡易な設備を用いて製造される CSG (Cemented Sand and Gravel) を堤体材料とする台形 CSG ダムの本格的導入が開始されている。本ダム型式は河川管理施設等構造令に規定されない新形式のダムであるが、設計方法はこれまでの体系的研究により概ね確立している。一方、大規模地震に対する耐震性能に対する社会的関心が高まっており、ダムにおいても大規模地震に対する耐震性能照査の試行が始まっている。新形式のダムである台形 CSG ダムについても大規模地震時に想定される損傷形態やそれを規定する CSG の物性を明らかにするとともに、これらを踏まえた合理的な耐震性能照査法を確立する必要がある。

このため今年度は大規模地震による地震動を考慮した台形形状ダムの応力特性について地震応答解析により検討した。また、CSG の引張強度や引張軟化特性の載荷速度による影響について実験的検討を行った。

キーワード：CSG、直接引張試験、破壊エネルギー試験、載荷速度、耐震性能照査

### 1. はじめに

台形 CSG ダムは、堤体内に大きな応力が発生しにくく、特に地震時に発生する引張応力を大幅に低減できる台形ダムの設計手法と、現地で得られる材料を基本的に分級・粒度調整することなく、簡易な施工設備でセメント・水を混合して得られた材料 (CSG) を建設材料として利用する CSG 工法を組み合わせることにより、設計・施工の合理化を同時に達成しようとする新形式のダムである。

一方、大規模地震に対する耐震性能に対する社会的関心が高まっており、ダムにおいても大規模地震に対する耐震性能照査の試行が始まっている。新形式のダムである台形 CSG ダムについても大規模地震時に想定される損傷形態やそれを規定する CSG の物性を明らかにするとともにこれらを踏まえた合理的な耐震性能照査法を確立する必要がある。

本研究では、まず台形 CSG ダムにおける耐震性能評価手法の確立にむけ、台形ダムの地震時応答特性について解析的な検討を行う。これは、台形 CSG ダムは、その自重により貯水の水压を支持する構造である点では代表的なダム型式のひとつである重力式コンクリートダムと同様であるが、断面形状や物性値が異なることから大規模地震時の損傷形態を明らかにする必要である。また、損傷形態を規定すると考えられる CSG の物性評価のため、地震時を想定した動的載荷による影響を含めた実験的な

検討を行う。さらに、CSG はコンクリートに比べて強度が小さく、かつ材料のばらつきが大きいという特徴を有する。このような特徴も考慮して、最終的に合理的な台形 CSG ダムの耐震性能照査法の確立を目指す。

今年度は、従来の重力式コンクリートダムを想定した直角三角形ダムモデルと台形ダムモデルを用いた地震応答解析を行い、大規模地震時の応力状態を求めた。また、損傷形態を規定する CSG の物性評価のため、CSG 供試体を用いて引張強度試験、破壊エネルギー試験、簡易一面せん断試験を実施し、CSG の強度及び破壊特性について検討した。

## 2. ダム形状と地震応答特性

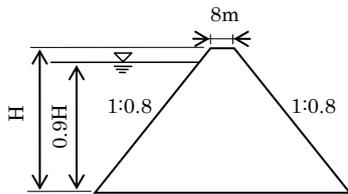
### 2.1 概要

台形 CSG ダムは地震時においても堤体内部に発生する応力を抑えることができる。このため、通常のコンクリートダムより強度が小さく物性のばらつきが大きい CSG を堤体材料とするダムの断面形状として採用されており台形 CSG ダムは設計上で考慮している地震動に対して十分な安定性を有している。ここでは設計上想定されるよりも大きな大規模地震による地震動を考慮した場合の台形 CSG ダムの応答特性について線形動的解析により検討する。

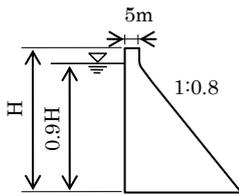
## 2.2 形状・物性の違いによる固有振動数の検討

### 2.2.1 解析条件

台形 CSG ダムは、その断面形状が直角三角形を基本とする一般的な重力式コンクリートダムと異なる、また、CSG は弾性係数がダムコンクリートの 1/10 程度である。このような断面形状や堤体材料の物性の違いが地震時のダムに及ぼす影響を把握するための応答特性を検討した。ここでは、図-1 に示す台形ダムおよび直角三角形ダムの堤高Hが 50m 及び 100m の条件で、表-1 に示す物性値を与えて固有値解析を実施した。



台形ダムモデル



直角三角形ダムモデル

図-1 モデル形状

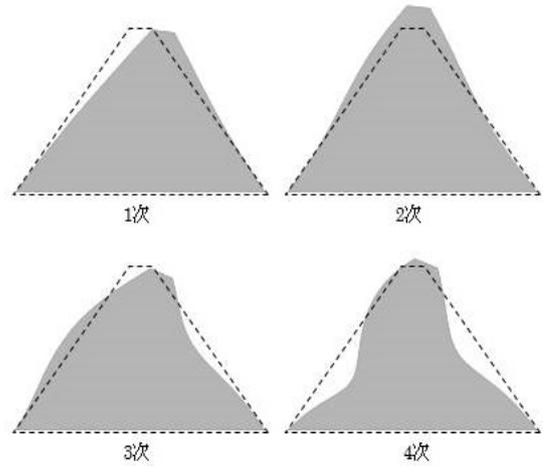
表-1 物性値

形状	弾性係数 (N/mm <sup>2</sup> )	密度 (kg/m <sup>3</sup> )	ポアソン比
台形 直角三角形	1,000	2,300	0.2
	2,000		
	4,000		
	10,000		
	20,000		
	30,000		

### 2.2.2 解析結果

台形ダムモデルと直角三角形ダムモデルの固有値解析から得られた 1 次から 4 次の固有振動モードを図-2 に示す。また、図-3 に各形状、弾性係数条件による堤体の 1 次モードの固有周期を示す。同図より同じ堤高・弾性係数の条件では、台形ダムは直角三角形ダムに比べ堤体の 1 次固有周期が 2/3 程度に短くなるが、CSG の弾性係数がダムコンクリートの 1/10 程度であることを考慮

した場合、同じ堤高では、重力式コンクリートダムの台形 CSG ダムの固有周期は 2 倍程度となる。



(1) 台形モデル

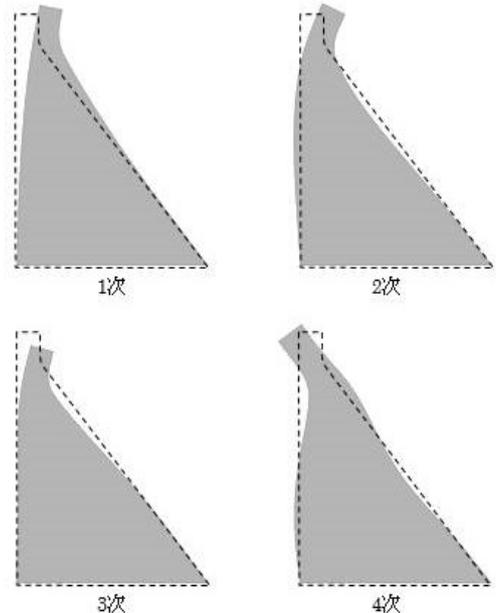


図-2 振動モード図

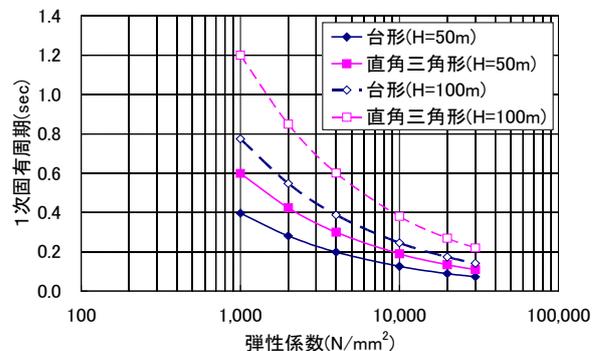
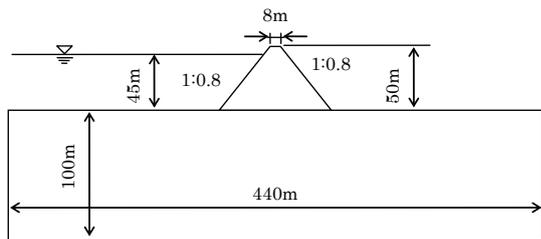


図-3 形状・弾性係数による 1 次固有周期の違い

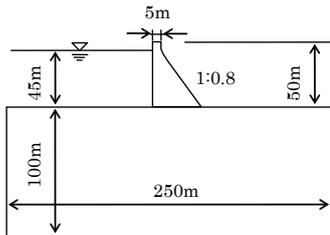
2.3 形状・物性の違いによる発生応力

2.3.1 解析条件

堤体の断面形状の違いが大規模地震時の堤体内の応力状態に及ぼす影響について検討するため、図-4 に示す形状の2次元有限要素モデルによる静的解析および地震応答解析（線形動的解析）を行った。解析に用いた物性値を表-2 に示す。基礎岩盤の弾性係数は堤体物性値と同じとした。岩盤の側方及び底面の境界条件は仮想仕事の原理に基づく粘性境界を設定した。減衰定数はレイリー減衰とし、堤体及び基礎岩盤についてそれぞれ固有値解析により得られた振動モードに対する有効質量比（表-3）から支配的な振動モード（堤体：1次と3次、岩盤：1次と6次）の固有周期で減衰定数が10%となるように質量マトリクス及び剛性マトリクスに対する係数を設定した。なお、減衰定数の値については実際のダムにおける地震観測結果などに基き根拠をもって設定することが望ましいが、現時点では台形 CSG ダムでの観測記録が無いことから、堤体の減衰定数は重力式コンクリートダムでの地震時応答に関する既往研究を参考に設定した。



(1) 台形ダムモデル



(2) 直角三角形ダムモデル

図-4 解析モデル形状

表-2 解析条件（物性値）

モデル	弾性係数 (N/mm <sup>2</sup> )	密度 (kg/m <sup>3</sup> )	ポアソン 比	減衰
堤体	2,000 20,000	2,300	0.2	10% (1次、3次)
岩盤	堤体と 同じ	2,300	0.3	10% (1次、6次)

表-3 振動モードに対する有効質量比

(1) 台形ダム

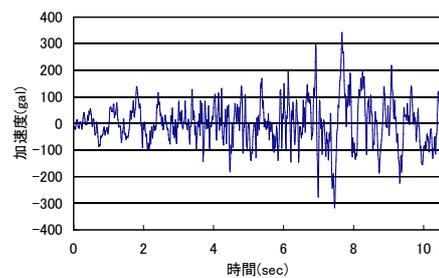
モデル 有効質量比	堤体		堤体+基礎岩盤	
	X	Y	X	Y
1次	66%	0%	78%	0%
2次	0%	67%	0%	4%
3次	18%	0%	1%	0%
4次	0%	9%	0%	21%
5次	9%	0%	3%	0%
6次	0%	0%	0%	54%

(2) 直角三角形ダム

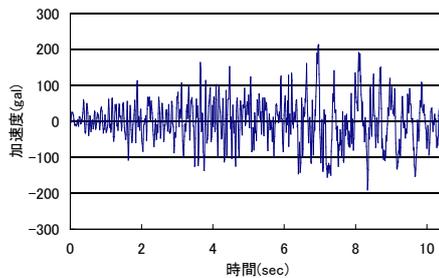
モデル 有効質量比	堤体		堤体+基礎岩盤	
	X	Y	X	Y
1次	37%	2%	78%	0%
2次	27%	0%	3%	1%
3次	5%	59%	0%	25%
4次	11%	5%	0%	26%
5次	7%	1%	6%	1%
6次	0%	13%	0%	34%

X：上下流方向、Y：鉛直方向

解析では、1995年兵庫県南部地震の際、震源近傍のダムの基礎部で観測された加速度波形を大規模地震に対するダムの耐震性能照査で考慮される照査用下限加速度スペクトルになるように調整した波形（図-4）が堤体底面（台形ダムでは堤敷中央、直角三角形ダムでは堤踵部）に入力されるように引き戻した加速度波形をモデル底面より入力した。

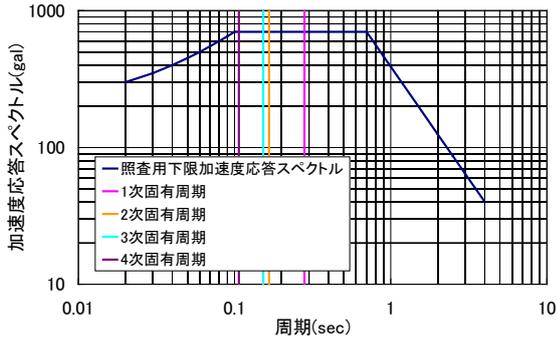


(1) 上下流方向

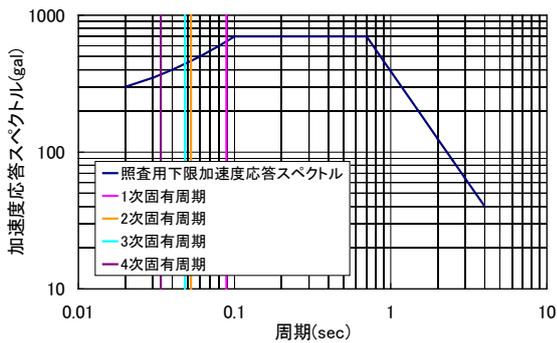


(2) 鉛直方向

図-4 入力地震動

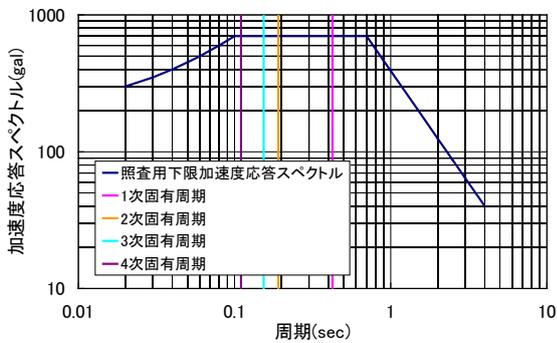


(1) 弾性係数 2,000 N/mm<sup>2</sup>

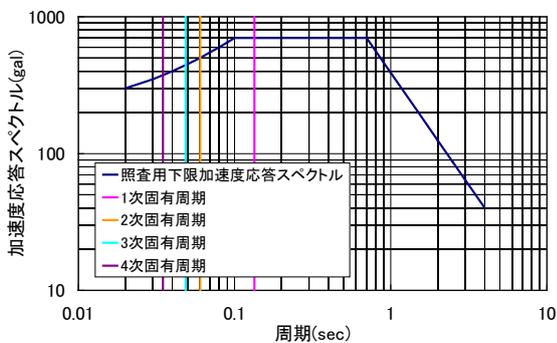


(2) 20,000 N/mm<sup>2</sup>

図-5 照査用下限加速度応答スペクトルと台形ダム固有周期 (1次~4次)



(1) 弾性係数 2,000 N/mm<sup>2</sup>



(2) 20,000 N/mm<sup>2</sup>

図-6 照査用下限加速度応答スペクトルと直角三角形ダム固有周期 (1次~4次)

各条件での1次~4次の堤体固有周期を照査用下限加速度応答スペクトルとあわせて図-5、6に示す。弾性係数を2,000N/mm<sup>2</sup>とした場合、どちらの形状でも加速度応答スペクトルが最大(一定)となる周期帯に1次~4次の固有周期が含まれる。しかし、弾性係数を20,000N/mm<sup>2</sup>とした場合、台形形状では1次固有周期が0.7secより短く、より短周期成分に対する応答は小さくなると思われる。また、直角三角形ダムでは1次固有周期は加速度応答スペクトルが最大(一定)となる周期帯の範囲内であるが、2次以上の振動モードに対する加速度応答スペクトルは小さくなり、より短周期成分に対する応答は小さくなると思われる。

### 2.3.2 解析結果

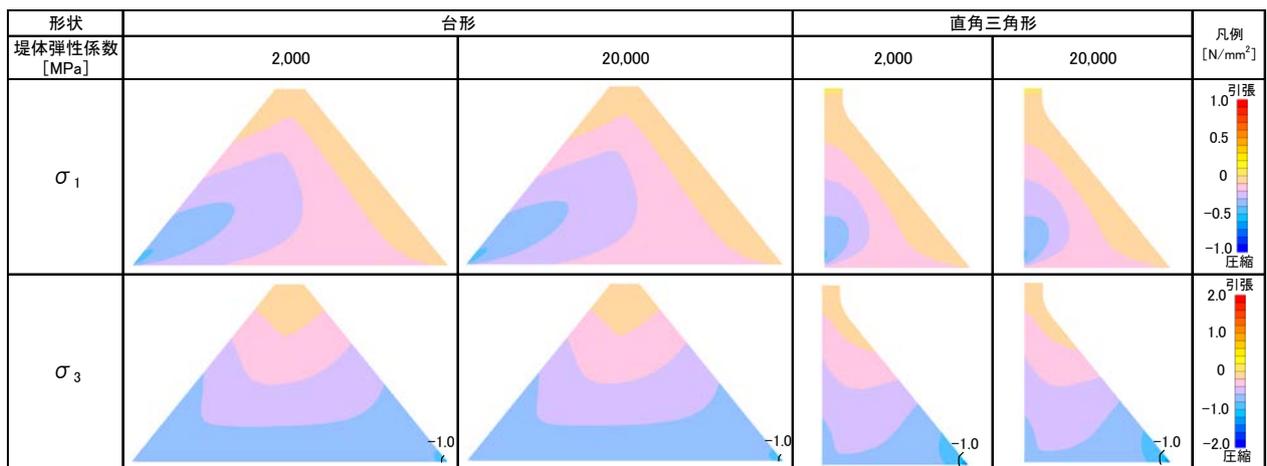
表-4に解析結果から得られたダム堤体内に発生する最大主応力 $\sigma_1$ および最小主応力 $\sigma_3$ の最大値について、初期応力(非地震時応力)、動的応力(地震応答による発生応力)、及び地震時発生応力(初期応力と動的応力を合成して得られる値)を示す。各ダムモデル端部要素において解析上の応力集中の可能性があるため、図-8に示す周辺要素との平均値も同表に付記している。図-7に各モデルの主応力の分布を示す。

初期応力は、堤体と岩盤の弾性係数比が同じとしたため、弾性係数が異なっても発生応力は同じとなっている。最大主応力はどちらのモデルでも堤頂部で最大となっているが、0.01N/mm<sup>2</sup>未満の応力である。圧縮はともに下流端で最大となっており、その値はやや直角三角形ダムが大きい。

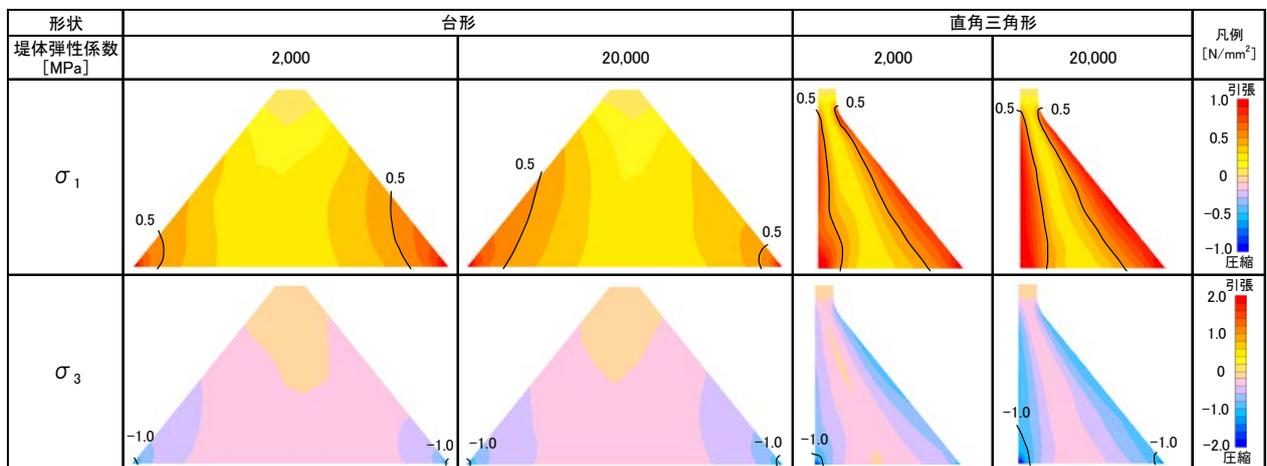
表-4 最大主応力・最小主応力

モデルダム形状		台形		直角三角形	
弾性係数 (N/mm <sup>2</sup> )		2,000	20,000	2,000	20,000
① 初期 応力	$\sigma_1$ (N/mm <sup>2</sup> )	0.00	0.00	0.00	0.00
	$\sigma_3$ (N/mm <sup>2</sup> )	-1.62 [-1.24]	-1.62 [-1.24]	-1.54	-1.54
② 動的 応力	$\sigma_1$ (N/mm <sup>2</sup> )	1.95 [1.44]	1.73 [1.29]	2.41	2.55
	$\sigma_3$ (N/mm <sup>2</sup> )	-1.86 [-1.36]	-1.99 [-1.49]	-2.47	-3.01
地震時 発生応力 ①+②	$\sigma_1$ (N/mm <sup>2</sup> )	1.19 [0.70]	1.28 [0.78]	1.92	2.55
	$\sigma_3$ (N/mm <sup>2</sup> )	-3.32 [-2.49]	-3.60 [-2.71]	-3.07	-3.62

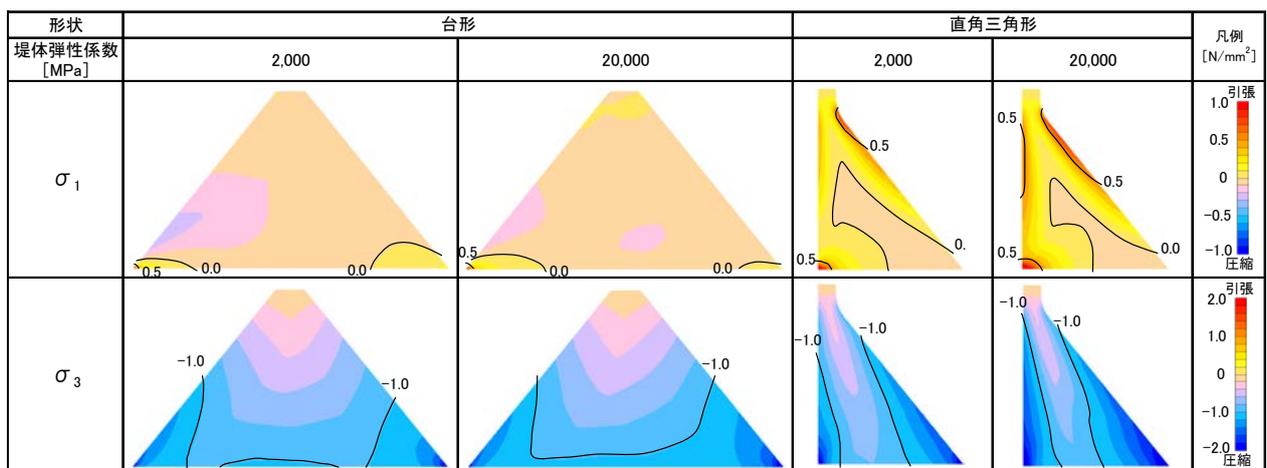
[ ] は周辺要素との平均値



(1) 初期応力



(2) 動的応力



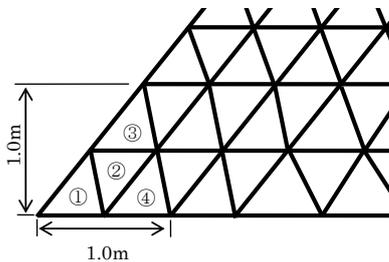
(3) 地震時応力 (初期応力+動的応力)

図-7 各モデルによる主応力分布

(岩盤の弾性係数は堤体と同じ値)

動的応力は、直角三角形ダムでは堤踵部に上下流方向に進展する方向に大きな引張が発生する。台形ダムでも上流端に引張が発生するが、堤体を上下流方向に進展はしにくく、ダムの止水性能を脅かす破壊形態とはなりにくいと考えられる。

初期応力と動的応力を合成した地震時応力については、直角三角形ダムでは一般的なダムコンクリートの強度を想定した場合、堤踵部で局所的な引張破壊が生じる可能性がある。圧縮応力は特に問題となるようなレベルではない。台形ダムにおいて CSG の強度を想定した場合、その値が小さければ端部において局所的な引張破壊が生じる可能性がある。



①が最大又は最小主応力の時、①～④を平均

図-8 端部での応力値算出方法  
(周辺要素との平均値による場合)

次にせん断応力について、堤敷における滑動に対する安定性に着目して比較評価した。最大のせん断応力が発生する要素は各モデルですべて下流端であるが、発生する時刻は各モデルにより異なる(図-9 参照)。各モデルで最大せん断応力が発生する時刻における堤敷の鉛直応力、せん断応力、局所安全率の分布をそれぞれ図-10～12に示す。

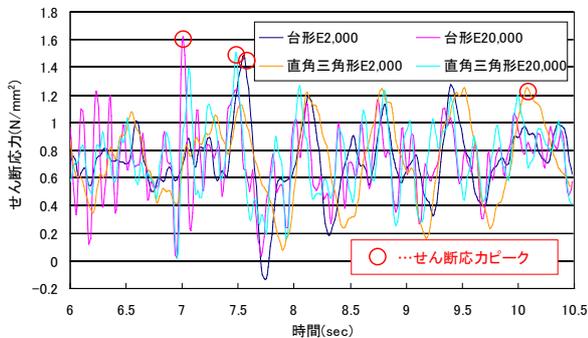


図-9 下流端要素せん断応力時刻歴

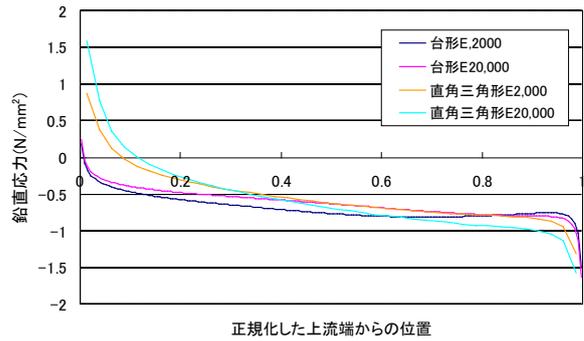


図-10 堤敷沿いの鉛直応力分布  
(下流端における最大せん断応力発生時)

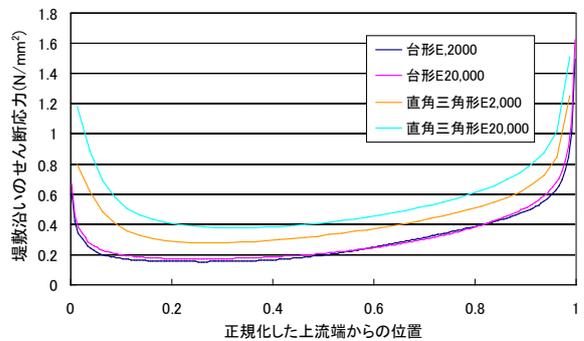


図-11 堤敷沿いのせん断応力分布  
(下流端における最大せん断応力発生時)

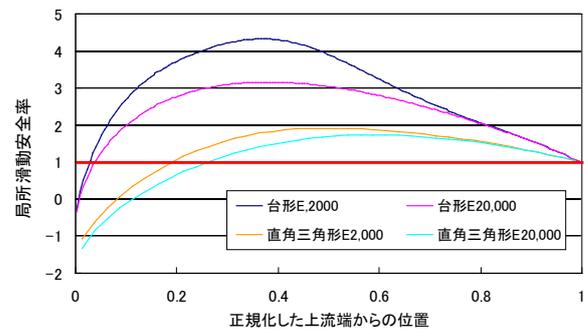


図-12 堤敷局所安全率 (c=0, f=1 と仮定)

重力式コンクリートダムは堤体と岩盤を一体化することにより滑動に対して抵抗するように設計・施工されるが、台形 CSG ダムは基本的に堤体と岩盤の摩擦により抵抗する構造である。図-12 は台形 CSG ダムと同等の条件を想定して粘着力  $c=0$ 、摩擦係数  $f=1$  としてヘニーの式により局所滑動安全率を算定したものである。堤体材料の物性(弾性係数)が同じであれば、台形ダムでは上

流端から堤敷長さの 2~3%程度の位置まで局所安全率が 1 を下回り、直角三角形ダムでは堤敷長さの 20~30%が局所安全率 1 を下回る。また、堤体形状が同じであれば弾性係数が大きいほど局所安全率は小さくなる傾向がある。

局所安全率が 1 を下回る要素について摩擦抵抗をもたないと仮定した場合の全体滑動安全率を表-5 に示す。直角三角形ダムでは弾性係数が大きい条件でほぼ 1 程度となるが、重力式コンクリートダムでは堤体と岩盤を一体とする施工が行うことにより実際の安全率は大きくなる。台形ダムでは弾性係数が大きい条件でも全体滑動安全率が 2 以上確保できている。

表-5 滑動に対する全体安全率

モデル	台形		直角三角形	
	弾性係数 (N/mm <sup>2</sup> )	2,000	20,000	2,000
全体滑動安全率	2.39	2.04	1.22	1.06

### 3.4 台形 CSG ダムの堤体内構造を考慮した地震応答解析

台形 CSG ダムの設計時には、堤体内に一部コンクリートや富配合 CSG で施工される箇所である。そこで、台形 CSG ダムの堤体内の構造を考慮したモデル（以下、CSG+コンクリートモデルという）により地震応答解析を行った。

#### 3.4.1 解析条件

解析モデルは堤高 50m の台形ダムモデルをもとに、実際の台形 CSG ダムの堤体内構造を考慮して、保護コンクリートや富配合 CSG、及び構造コンクリートを配置した。堤体モデルを図-13 に、物性値を表-6 に示す。岩盤モデル及び入力地震波は前節と同じ条件とした。

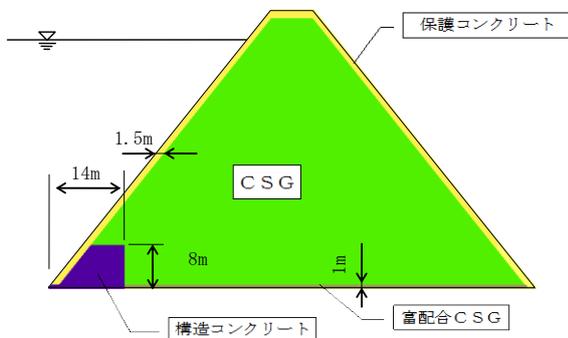


図-13 解析モデル形状  
(堤体内構造を考慮した台形 CSG ダムモデル)

表-6 解析用物性値  
(堤体内構造を考慮した台形 CSG ダムモデル)

モデル	弾性係数 (N/mm <sup>2</sup> )	密度 (kg/m <sup>3</sup> )	ポアソン比	減衰
CSG	2,000	2,300	0.25	10% (1次、3次)
富配合 CSG	4,000	2,300	0.25	
構造コンクリート 保護コンクリート	25,000	2,300	0.2	
岩盤	2,000	2,300	0.3	10% (1次、6次)

なお、初期応力状態の解析において、堤体自重による応力を一括解析した場合、内部構造である CSG が外部構造の保護コンクリートに極端に拘束される応力状態となる（図-14 参照）。これは低標高部から高標高部へ築堤していく実際の施工過程にそぐわない応力状態である。そのため、本解析では、堤体自重による応力については高さ方向に 10 分割して堤体自重をステップ解析し、その後貯水による荷重を与えて初期応力を得た。

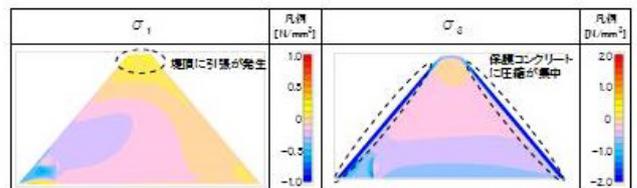


図-14 一括解析による初期応力状態

#### 3.4.2 解析結果

堤体内構造を考慮した台形 CSG ダムモデルの堤体固有値を表-7 に示す。比較するため前節で示した弾性係数 2000N/mm<sup>2</sup> の台形モデル（均一モデル）の解析結果をあわせて示す。堤体内構造を反映することで、CSG の物性で均一としたモデルより固有周期が短くなる。

表-7 モデルによる固有周期・有効質量比の違い

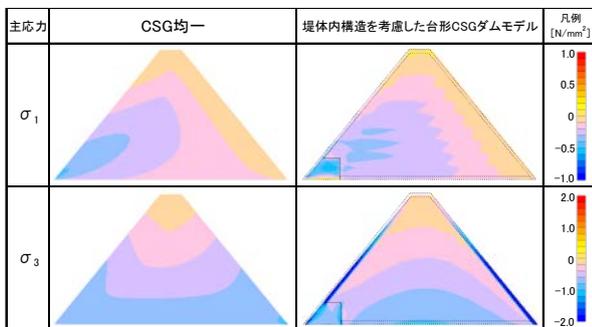
モード	均一モデル			堤体内構造を考慮した台形 CSG ダムモデル		
	固有周期 (sec)	有効質量比		固有周期 (sec)	有効質量比	
		X	Y		X	Y
1次	0.280	66%	0%	0.218	74%	2%
2次	0.166	0%	67%	0.144	0%	64%
3次	0.153	18%	0%	0.124	5%	1%

表-8 に堤体内構造考慮の有無による初期応力、地震時応力（最大主応力 $\sigma_1$ の最大値、最小主応力 $\sigma_3$ の最小値）比較して示す。また、図-15 にその堤体内分布を示す。

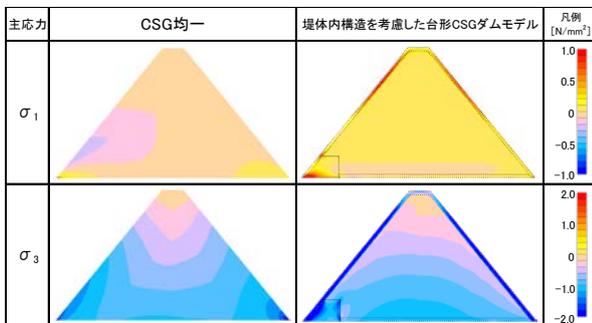
堤体内構造を考慮することでコンクリート部分に応力が集中しやすくなることがわかる。地震時には保護コンクリート部に  $12\text{N/mm}^2$  程度の圧縮応力が発生するが、一般的な保護コンクリートの強度に対しては小さい。構造コンクリート部では  $4\text{N/mm}^2$  程度の引張応力が発生しているが、局所的なものである。CSG 部にはほとんど引張は生じず、富配合 CSG 部では  $0.5\text{N/mm}^2$  程度である。

表-8 最大最小主応力

モデル		CSG 均一	堤体内構造を考慮した台形 CSG ダムモデル		
			CSG	富配合 CSG	コンクリート
初期	$\sigma_1$ ( $\text{N/mm}^2$ )	0.00	0.02	0.01	0.40
	$\sigma_3$ ( $\text{N/mm}^2$ )	-1.62	-0.81	-0.83	-5.74
地震時 (初期 + 動的)	$\sigma_1$ ( $\text{N/mm}^2$ )	1.19	0.14	0.51	3.94
	$\sigma_3$ ( $\text{N/mm}^2$ )	-3.32	-1.41	-1.16	-12.17



(1) 初期応力



(2) 地震時応力 (初期応力+動的応力)

図-15 CSG 均一モデルと CSG+コンクリートモデルの主応力分布

### 3. CSG の強度・破壊特性に関する試験

#### 3.1 目的

大規模地震に対する台形 CSG ダムの耐震性照査では、ダムの損傷形態まで考慮する必要があることから、堤体材料である CSG の強度・破壊特性を把握する必要がある。なお、台形 CSG ダムの設計は、一軸圧縮試験において弾性領域とみなせる範囲内の最大応力に相当する強度を用いて行われており、引張強度は上述の強度の  $1/4 \sim 1/7$  程度として考慮されている<sup>2)</sup>。ただし、引張強度については割裂引張試験によるものであり、直接引張試験によって、より実際の地震時における載荷状態に近い状態での強度を評価することができると考えられる。また、引張破壊による CSG の引張軟化特性については既往の知見が少なく、大規模地震で想定される亀裂進展に対する影響も明確となっていない。さらに、設計で用いられる強度は通常の静的な載荷条件での試験値に基づき設定されているが、地震時の動的載荷条件の強度についても十分な知見が無い。

このため、CSG の強度・破壊特性について試験方法や載荷条件の相違等による条件の影響を確認するため、実際のダム建設に使用された CSG 材により供試体を作製した上で CSG の各種強度試験及び破壊エネルギー試験を実施した。

#### 3.2 供試体

試験では実際にダム堤体に使用された A ダムの CSG 材を用いた。物性値を表-9 に示す。絶乾密度及び吸水率は JIS A 5005 「コンクリート用砕石及び砕砂」の規定値（絶乾密度  $2.5\text{g/cm}^3$  以上、吸水率  $3.0\%$  以下）に収まっていないが、若干外れる程度である。供試体は単位セメント量を変化させて 2 配合作製した。配合条件を表-10 に示す。CSG 材はふるい分けを行い、A ダムの施工時における粒度分布の中間値程度となるように調整した(図-16)。CSG は練混ぜ後に  $40\text{mm}$  以上の骨材をウェットスクリーニングにより取り除いた材料により供試体を作製した。供試体は試験の工程上の都合により数日に分けて作製した。

表-9 A ダム CSG 材の物性値

粒径	表乾密度 ( $\text{g/cm}^3$ )	絶乾密度 ( $\text{g/cm}^3$ )	吸水率(%)
80mm-40mm	2.54	2.48	2.19
40mm-20mm	2.53	2.46	2.73
20mm-10mm	2.53	2.46	2.91
10mm-5mm	2.52	2.44	3.38
5mm-	2.56	2.48	3.16

表-10 供試体配合

配合	単位セメント量 (kg/m <sup>3</sup> )	単位水量 (kg/m <sup>3</sup> )	CSG 材 (kg/m <sup>3</sup> )
CSG1	80	85	2, 258
CSG2	120		2, 226

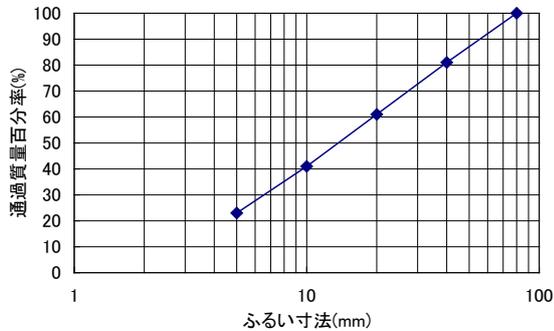


図-16 CSG 材質量百分率 (A ダムの平均的な粒度分布)

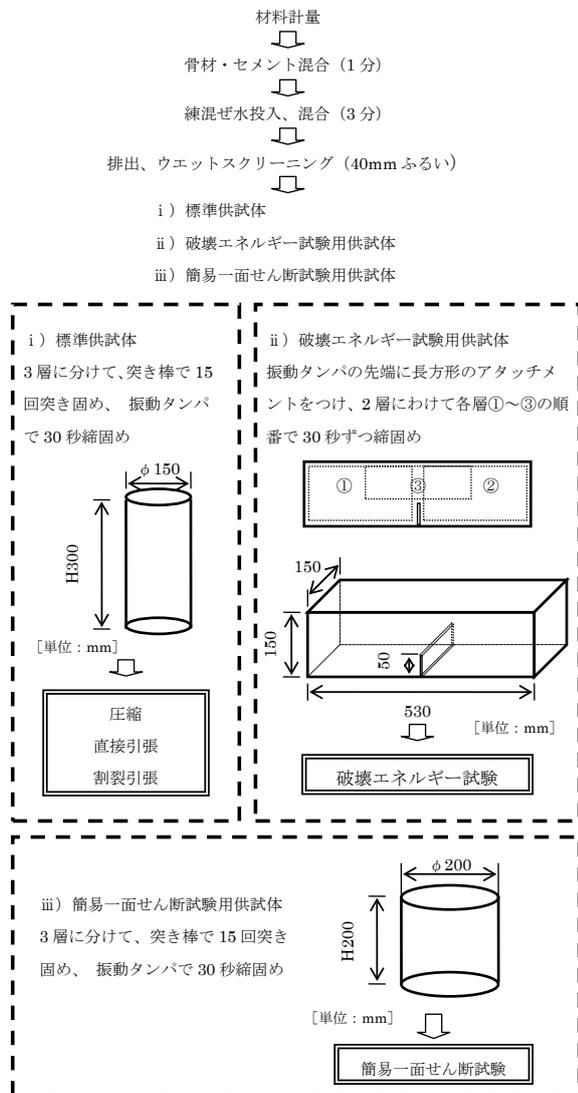


図-17 CSG 供試体作製フロー

図-17に各試験用供試体の作製フローを示す。配合の内、単位水量はAダムのひし形<sup>3)</sup>における中央値としたが、表-11に示した作製した供試体の密度は、品質管理試験での大型供試体密度と比較して小さい値であった。これは、本試験で使用した材料をふるい分ける前の粒度分布が、Aダムでの施工管理値と比較して細粒側にあったことに関係している可能性がある。

供試体は基本的に材齢91日で試験することとしたが、各試験実施日における材齢は1週間程度ずれがある。また、試験実施1週間程度前に脱型を行い、その後は恒温室で保管した。

表-11 供試体密度 (平均)

配合	供試体	平均密度 (N/mm <sup>2</sup> )
CSG1	圧縮・引張 φ150×H300mm	2.07
	破壊エネルギー試験 H150×B150×L530mm	2.07
	簡易一面せん断試験 φ150×H200mm	2.13
CSG2	圧縮・引張 φ150×H300mm	2.05
	破壊エネルギー試験 H150×B150×L530mm	2.06
	簡易一面せん断試験 φ200×H200mm	2.10

### 3.3 圧縮強度試験

本試験で作製した供試体の基本となる強度を把握し、他強度特性との関係を得るため、材齢91日で一軸圧縮強度試験を行った。試験方法はJIS A 1108「コンクリートの圧縮試験」による。載荷版に設置した変位計により応力-ひずみ関係を得た。試験結果を表-12に示す。なお、台形CSGダムの設計はCSGを弾性体とみなせる範囲で行われるため、弾性領域である「CSGの強度」<sup>4)</sup>が用

表-12 圧縮試験

配合	ピーク強度 (N/mm <sup>2</sup> )		CSGの強度 (N/mm <sup>2</sup> )		弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	
	試験値	平均	試験値	平均	試験値	平均
CSG1	3.88	3.55	2.6	2.2	1.75	1.67
	3.19					
	4.02					
	3.64					
	3.02					
CSG2	5.04	4.69	3.3	3.1	2.07	2.05
	3.98					
	4.07					
	5.89					
	4.48					

いられるが、後述する試験では弾性領域の評価ではなくピーク荷重時の応力から強度を評価することから、圧縮試験においてもピーク荷重時の応力を「圧縮強度」として、他試験による強度特性と比較した。

3.4 引張強度試験

3.4.1 試験方法

引張強度試験は、軸方向に直接引張荷重を負荷する直接引張試験の他、比較のため通常の JIS A 1113「コンクリートの割裂引張試験」に準じた方法で実施した。試験実施の手順を図-18 に示す。直接引張試験では、供試体作製時の締め目が端部で十分でない場合、端部のゆるみが弱面となって破断する可能性を考慮し、両端面より3cm を切除した。その上で、試験器治具と供試体をエポキシ系接着材により固定した。

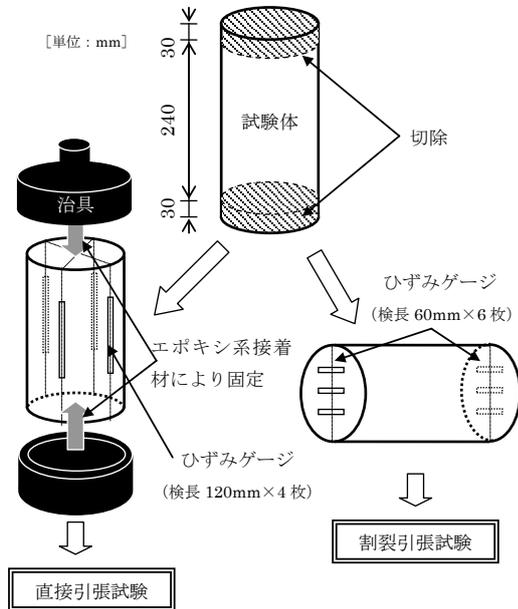


図-18 引張試験準備フロー

3.4.2 試験条件

直接引張試験は静的荷重と急速荷重の条件で実施した。静的荷重では、JIS A 1113 に規定される静的な荷重速度の1/10 程度の荷重速度とした。また、急速荷重においては大規模地震時の引張破壊特性把握のため、使用した万能試験機で可能な範囲で急速な荷重速度とした。割裂引張試験については、JIS A 1113 による。表-13 に試験条件、表-14 に試験機器の仕様を示す。

3.4.3 試験結果

試験結果より得られた直接引張試験による引張強度及び弾性係数を表-15 に、割裂引張試験による引張強度を表-16 に示す。また、直接引張試験の状況を写真-1 に示す。

表-13 試験条件

試験	荷重速度(N/mm <sup>2</sup> /s)	数量
直接引張	静的荷重	約 0.002
	急速荷重	約 0.1~0.7*
割裂引張	約 0.02	5

\*急速荷重では、使用試験機器で可能な範囲で急速に荷重し、計測値よりピーク荷重直前の速度を得た。

表-14 試験機器等の仕様

項目	直接引張試験	割裂引張試験
荷重	万能試験機 MR-50-ACT 最小秤量 25kN 最大秤量 500kN	圧縮試験機 ACA-100A-F1 最小秤量 50kN 最大秤量 1000kN
荷重計測	ロードセル KC-10A 最小単位 0.05kN 最大単位 100kN	圧縮試験機付属圧力セル 最小単位 50kN 最大単位 1000kN
ひずみ計測	ポリエステルゲージ PL60-11-1L 最小単位 約 1×10 <sup>-6</sup> 容量 2×10/mm <sup>2</sup>	
記録	データロガー TDS-630 高速モード (サンプリング速度 0.1 秒)	

表-15 直接引張試験結果

配合	荷重速度	ピーク強度 (N/mm <sup>2</sup> )		割線弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )		荷重速度 (N/mm <sup>2</sup> /s)
		各値	平均	各値	平均	
CSG1	緩速	0.194	0.180	20.59	13.79	0.001
		0.144		6.68		0.002
		0.228		18.64		0.003
		0.150		8.81		0.002
		0.185		14.22		0.003
	急速	0.185	0.179	17.81	12.94	0.116
		0.228		7.82		0.318
		0.194		18.28		0.144
		0.115		6.62		0.607
		0.124		12.18		0.520
CSG2	緩速	0.257	0.291	12.19	10.81	0.375
		0.214		12.66		0.202
		0.188		8.13		0.116
		0.185		19.50		0.029
		0.104		14.22		0.635
	急速	0.289	0.230	18.02	13.20	0.002
		0.346		9.56		0.002
		0.269		10.21		0.002
		0.309		8.13		0.002
		0.243		8.13		0.004
CSG2	急速	0.263	0.230	11.59	13.20	0.289
		0.286		19.15		0.578
		0.217		13.45		0.202
		0.188		7.07		0.289
		0.303		8.24		0.664
		0.272		9.35		0.491
		0.214		18.28		0.173
		0.214		9.82		0.144
0.110	22.85	0.433				
0.234	12.19	0.202				

表-16 割裂引張試験

配合	ピーク強度 (N/mm <sup>2</sup> )	
	試験値	平均
CSG1	0.595	0.546
	0.577	
	0.549	
	0.502	
	0.508	
CSG2	0.608	0.633
	0.560	
	0.808	
	0.712	
	0.479	



写真-1 直接引張試験 (破断後)

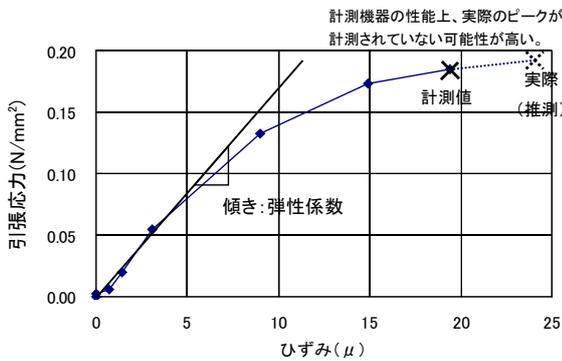


図-19 直接引張試験による応力-ひずみと割線弾性係数 (CSG1の急速荷重による試験結果例)

表-17 圧縮強度・割裂引張強度・直接引張強度の関係

配合	割裂引張強度 / 圧縮強度	直接引張強度 (静的荷重) / 圧縮強度	直接引張強度 (急速荷重) / 圧縮強度	割裂引張強度 / 直接引張強度 (静的荷重)
CSG1	1/6.5	1/20	1/20	1/12.3
CSG2	1/7.3	1/16	1/20	1/13.5

直接引張試験では、ピーク時の荷重から引張強度を得た。また、引張強度の約 1/3 の応力時における割線弾性係数を得た (図-19 参照)。なお、急速荷重では記録機器の性能上、ピーク付近の応力が得られていない可能性がある。静的荷重ではピーク荷重～ピーク荷重 5 秒前で荷重速度を得た。急速荷重ではピーク時の応力とピーク 0.1 秒前の応力から、荷重速度を得た。

### 3.4.4 考察

#### a. 直接引張試験による強度と割裂引張試験による強度の違い

試験結果から、圧縮強度に対する割裂引張試験による引張強度、直接引張試験による引張強度 (それぞれ静荷重条件的及び急速荷重条件) の比を表-17 に示す。圧縮強度に対して、割裂引張強度は 1/7 程度、直接引張は 1/16 ～ 1/20 程度であった。直接引張試験による引張強度は割裂引張試験から得られる引張強度に対して 1/2～1/3 程度となった。

この原因として、割裂引張試験では荷重方法から破断面が規定されるのに対し、直接引張試験では供試体中の弱部で選択的に破壊が生じることがあげられる。なお、直接引張試験ではほとんどの供試体は打継面で破断しており、今回の試験では、供試体作成時の層面が相対的な弱部になった可能性が高い。割裂引張試験では層面が破断面と直交する方向であり、打継面が弱部となっても試験結果への影響は極めて小さいことが考えられる。

また、直接引張試験では直交するように 4 本のひずみゲージにより軸方向のひずみを計測したが、図-20 に示すように、それぞれのひずみゲージの計測値が大きく異なっていた。これは供試体は軸方向に均一な引張荷重を与えるのが困難であることを示している。直接引張試験で弱部からの破壊が生じやすい原因のひとつとなっている可能性がある。

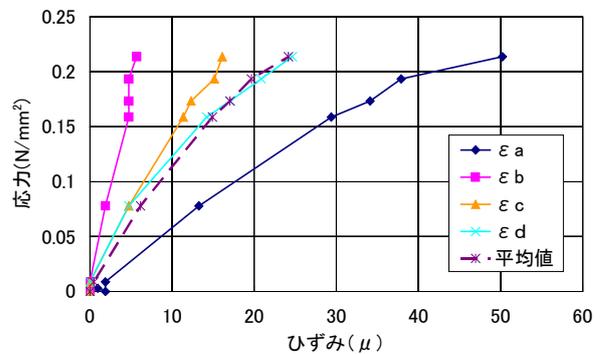


図-20 ひずみ計測値と平均値 (CSG1、急速)

この点についてさらに詳しく検討するため、各ひずみ計測値から引張荷重の偏りを推定した。図-21 に示す仮定条件のもとで、最小最大ひずみの差を算定し、平均ひずみと比較した。表-18 に各試験における偏りを示す。ただし、図-22 中に示す式より得られる値が計測値の最大最小ひずみ差より小さい場合は、計測最大値と計測最小値の差とした。

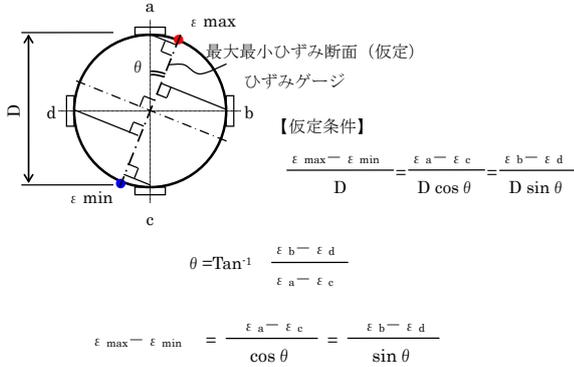


図-21 ひずみ計測値と偏心(最大最小ひずみ差)の推定

表-18 ピーク荷重時の最大最小ひずみ差と平均ひずみ

配合	荷重速度	最大最小ひずみ差 ①(\$\times 10^{-6}\$)	平均ひずみ ②(\$\times 10^{-6}\$)	①/②
CSG1	静的	107	27	3.9
		42	23	1.8
		107	53	2.2
		20*	9	2.2
	急速	234	61	3.8
		45	19	2.3
		56	41	1.4
		11	12	0.9
		46	22	2.1
		16	12	1.2
		48	27	1.8
		45*	24	1.9
		211	76	2.8
		23	20	1.1
7	6	1.2		
CSG2	静的	15*	30	0.5
		205	100	2.1
		75*	52	1.4
		65*	71	0.9
	急速	188	90	2.1
		93*	43	2.2
		13	20	0.7
		41*	22	1.9
		179	63	2.8
		28	43	0.7
		101*	48	2.1
		28	16	1.8
		50	36	1.4
		6*	6	1.0
44	33	1.3		

\*計測値の最大最小差による値

ほとんどの供試体で、ピーク荷重時の平均ひずみと同程度以上の最大最小ひずみの差がある。荷重速度や強度との関係性は不明確であるが、偏りが大きいほうが最大荷重時の平均ひずみがやや大きい傾向がある。これは、供試体が引張荷重を受けた際に、初期からある程度の曲げが生じて供試体に働く荷重が偏り、局所的な破壊が生じた後ではさらに曲げが大きくなって、供試体に発生する軸方向引張以外の荷重がロードセルで計測されているためである可能性がある。すなわち、引張破壊時の軸引張ひずみを過大評価している可能性がある。

軸引張ひずみが偏る理由としては、供試体の間隙や、供試体内の CSG 材の特に粗粒分の偏りの影響が考えられる。供試体作製時における層面の条件を検討するとともに、このような偏りによる試験結果への影響を軽減することを検討する必要がある。

b. 荷重速度の影響

図-22 に直接引張試験による荷重速度と引張強度の関係を示す。また、図-23 に同試験によるひずみ速度と引張強度の関係を示す。今回の試験結果では、直接引張強度のばらつきが大きく、荷重速度による強度への影響は明確とならなかった。

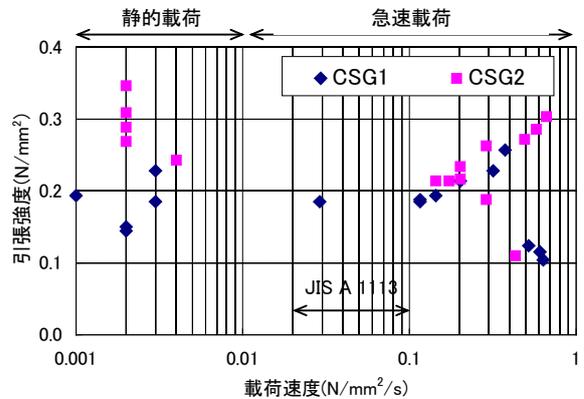


図-22 荷重速度と引張強度の関係 (直接引張試験)

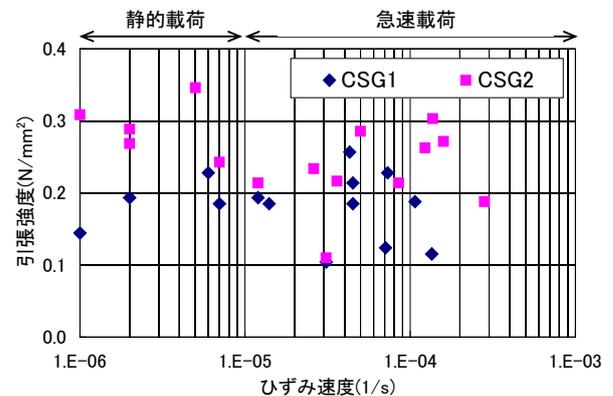


図-23 ひずみ速度と引張強度の関係 (直接引張試験)

なお、コンクリートにおける既往の研究<sup>5)</sup>では、コンクリートの引張強度はひずみ速度が $10^{-5}/\text{sec}$ 程度であれば、静的載荷条件とほとんど変わらない結果が得られるとされている。

台形 CSG ダムにおける最大ひずみ速度（応力速度）を動的解析結果を参考にして以下の式から推定することを考える<sup>6)</sup>。

$$v' = \frac{4\sigma_d}{T} \quad (N/mm^2/s) \quad \dots \dots \dots (1)$$

ここで

$v'$ : 応力平均増加速度( $N/mm^2/s$ )

$\sigma_d$ : 引張応力( $N/mm^2$ )

$T$ : 1次固有周期(sec)

堤高50mの台形ダムで弾性係数を $2,000N/mm^2$ とした場合、固有値解析により得られる1次固有振動数は約3.6Hzである。前節で示した図-4の堤高50mの台形モデルの弾性係数 $2,000N/mm^2$ とした条件下限一庫波による地震応答解析をした場合、最大引張応力は下流端で $1.95N/mm^2$ となる(表-4参照)。この値を(1)式の $\sigma_d$ として応力平均増加速度 $v'$ を得ると、約 $28N/mm^2/s$ となる。一軸引張としてこの時のひずみ速度を得ると、 $8,500\sim 19,500$  ( $\times 10^{-6}/s$ )となる。今回実施した急速載荷による試験の載荷速度は最大でも $0.7N/mm^2/s$ 程度であり、実際の台形 CSG ダムの地震による応力変化(増加)を再現するためには、本試験で用いた試験機よりも40倍程度の変位速度で直接引張が可能な試験機が必要である。

### 3.5 破壊エネルギー

#### 3.5.1 試験方法

破壊エネルギー試験は、日本コンクリート工学協会 JCI 規準試験である「切欠きはりをを用いたコンクリートの破壊エネルギー試験方法」(以下、JCI 規準という)に準拠した。作製した供試体は、表面の空隙が多く、クリップ変位計が取り付けられなかったため、エポキシ系接着材により切り欠き部を補強し、試験を実施した(写真-2、3参照)。

#### 3.5.2 試験条件

試験は JCI 規準の CMOD (Crack Mouth Opening Displacement ; ひび割れ肩口開口変位) 速度で実施するほか、大規模地震時の急速な破壊を想定し、載荷速度を速くした条件でも実施した。試験条件を表-19に示す。なお、脱型時に切り欠き部付近の試験体表面にひび割れが確認されたものがあったため、ここでは脱型時にひび



写真-2 切り欠き部エポキシ補強状況

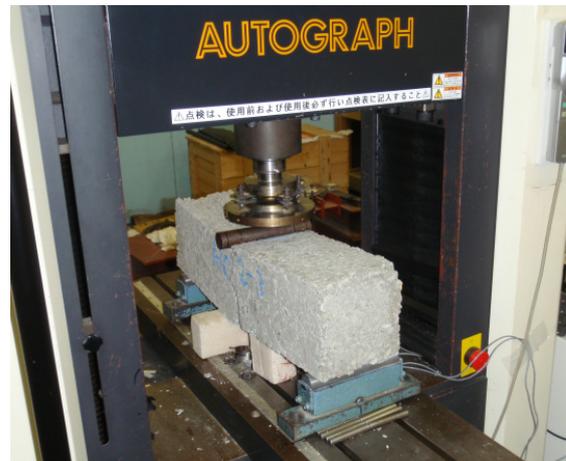


写真-3 破壊エネルギー試験状況

表-19 破壊エネルギー試験条件

配合	目標 CMOD 速度
CSG1	JCI 規準×1
CSG2	JCI 規準×100
	JCI 規準×1,000 (CSG2のみ実施)

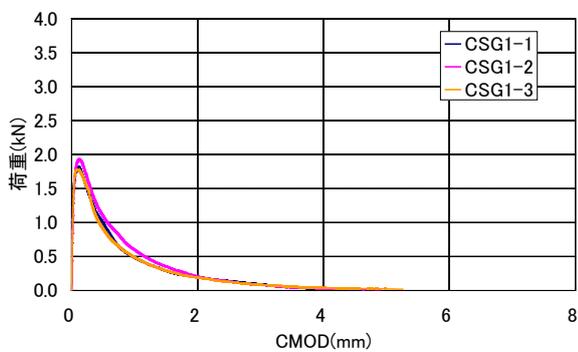
割れが確認されず、健全な試験体であると判断したものについてのみ整理したものである。

#### 3.5.3 試験結果及び考察

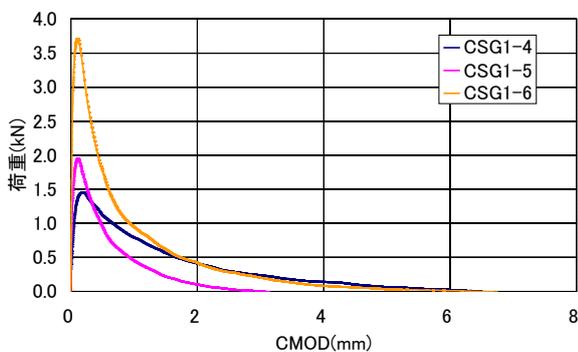
各条件の試験結果を表-20に、CMOD と荷重の関係を図-24、25に示す。また、各配合・CMOD 速度条件の試験結果を、同一試験条件の全供試体について平均化した曲線を図-26に示す。CSG1より単位セメント量が多いCSG2の方が最大荷重、破壊エネルギーともに大きい。また、破壊エネルギーについて、CSG1の平均値では載荷速度が速い方が大きな破壊エネルギーとなる結果となったが、図-25に示すとおり、CMOD 速度が速いケースではばらつきが大きく、傾向が明確に得られていない。JCI 規準通

表-20 破壊エネルギー試験結果

配合	CMOD 速度	最大 荷重 (kN)	最大 荷重時 CMOD (mm)	破断時 CMOD (mm)	破壊エネルギー Gf (N/mm)	
					試験値	平均
CSG1	JIS 規準 ×1	1.82	0.106	4.712	0.133	0.133
		1.93	0.109	4.895	0.137	
		1.77	0.088	5.252	0.129	
CSG1	JIS 規準 ×100	1.46	0.182	6.560	0.190	0.177
		1.96	0.104	3.144	0.102	
		3.72	0.102	6.754	0.239	
CSG2	JIS 規準 ×1	2.81	0.097	5.038	0.172	0.201
		2.69	0.105	6.425	0.258	
		3.06	0.103	4.809	0.172	
	JIS 規準 ×100	2.56	0.120	4.898	0.176	0.205
		2.77	0.102	4.950	0.230	
		2.61	0.125	4.234	0.160	
	JIS 規準 ×1000	3.51	0.089	6.981	0.254	0.207
		3.14	0.269	5.002	0.195	
		2.82	0.284	4.254	0.169	
		2.22	0.294	5.676	0.194	
		3.28	0.252	5.718	0.268	

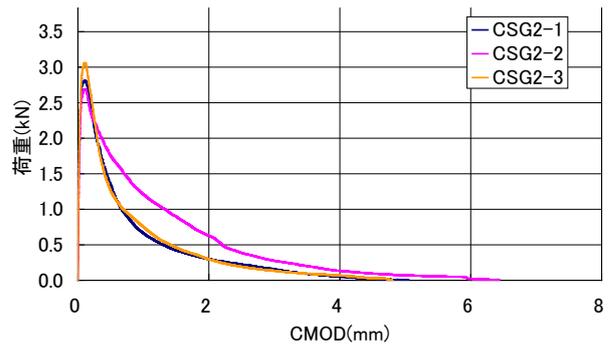


(1) JCI 規準×1

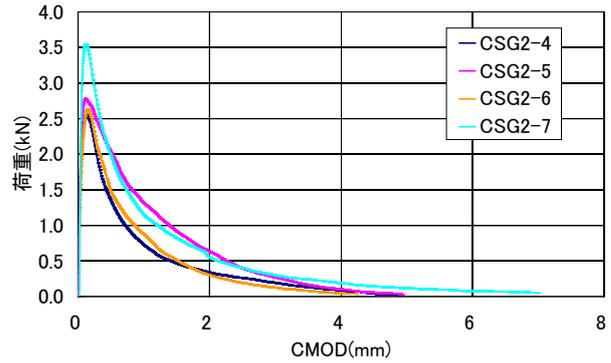


(2) JCI 規準×100

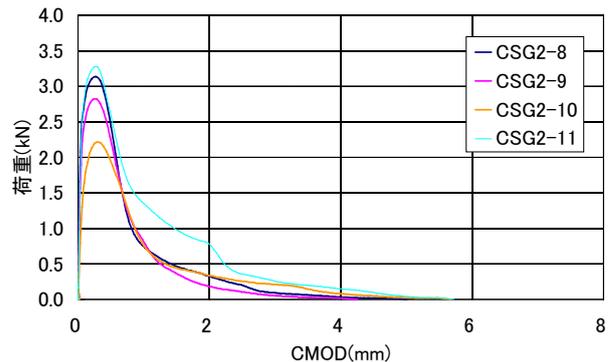
図-24 CSG1 の CMOD-荷重曲線



(1) JCI 規準×1



(2) JCI 規準×100



(3) JCI 規準×1000

図-25 CSG2 の CMOD-荷重曲線

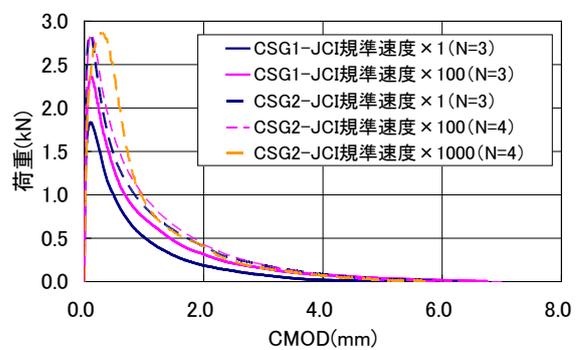
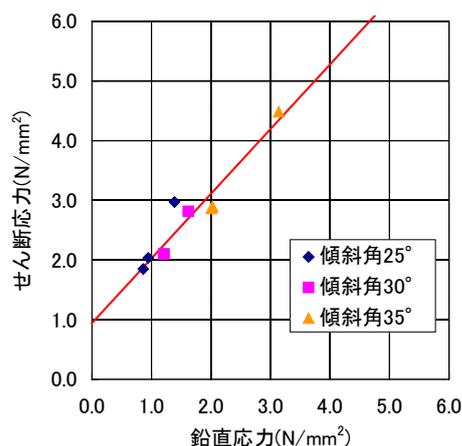
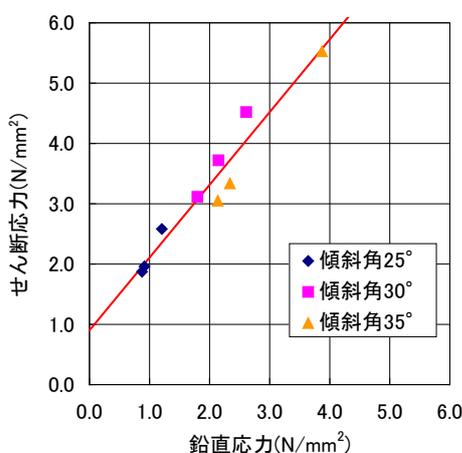


図-26 各配合・CMOD 速度条件の平均 CMOD-荷重曲線





(1) CSG1



(2) CSG2

図-28 簡易一面せん断試験結果

#### 4. まとめ

今年度は大規模地震時による台形 CSG ダムの損傷形態を明らかにする上で必要となる、大規模地震時の台形ダムの損傷形態を推定するため、断面形状や堤体材料の物性の違いによる地震応答特性への影響を検討した。また、CSG の強度・破壊特性を明らかにするための試験を実施した。CSG の引張強度特性、引張軟化特性を明らかにするための試験を行った。

##### (1) 台形 CSG ダムの動的応答特性

- 堤体材料の物性が同じ場合、台形ダムは直角三角形ダムより固有周期が短くなるが、CSG ではコンクリートの弾性係数の 1/10 程度であることから、台形 CSG ダムでは同じ堤高の重力式コンクリートダムより固有周期が長くなる。
- 台形 CSG ダムでは、大規模地震を想定した場合、上下流端で引張応力に対する条件が最も厳しくなる。なお、CSG の強度特性を考慮すると圧縮強度に対す

る安全性も検討する必要がある。

- 堤体内構造を考慮した解析では、コンクリート部に応力が集中することで、均一モデルに比べて CSG に発生する応力が緩和され、引張破壊は生じにくい結果となる。
- 今後は引張破壊等による損傷過程を考慮した非線形解析により、台形 CSG ダムの破壊形態を更に詳しく検討する必要がある。

##### (2) CSG の強度・破壊特性

- CSG の引張強度を直接引張試験により評価した場合、割裂引張試験による強度より小さくなる。また、載荷速度による引張強度への影響については、ばらつきが大きく明確な傾向が確認出来なかった。ただし、直接引張では載荷方法や供試体作製方法、供試体内の材料の偏りなどの要因が CSG の引張強度に影響をお呼びしたと考えられる。
- CSG の破壊エネルギーは、一般的なコンクリートやダムコンクリートで用いられる関係式により推定値に比べて試験値が 3 倍程度となった。また、CMOD 速度を変化させた試験も実施したが、JCI 標準の 1,000 倍程度までの CMOD 速度条件試験では CMOD 速度が大きくなるとやや破壊エネルギーが増加する傾向が得られた。ただし、試験結果のばらつきも大きく更なる確認が必要である。
- 簡易一面せん断試験により得られた CSG のせん断摩擦特性として、内部摩擦係数は 1.0~1.2 程度でありダムコンクリートと同程度であった。粘着力は 1N/mm<sup>2</sup> 程度で、圧縮強度の 1/4~1/5 程度であり、単位セメント量が異なる供試体でもほとんど変化が無い。

#### 参考文献

- 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),2005.3
- 台形 CSG ダム等の設計・施工事例,ダム技術 No.216, pp59-161, 2004.9
- 台形 CSG ダム施工・品質管理技術資料,(財)ダム技術センター,p14, 2007.9
- 台形 CSG ダム施工・品質管理技術資料,(財)ダム技術センター,p12, 2007.9
- 藤掛一典,高ひずみ速度化におけるコンクリートの引張・圧縮特性に関する研究,p37, 1997
- 大規模地震に対するダムの耐震性能照査に関する資料,土木研究所資料第 3965 号,p56, 2005.3

- 7) (社) 土木学会, 2007 年制定コンクリート標準示方書【設計編】, pp42-43, 2008.3
- 8) 堀井秀之, 内田善久, 柏柳正之, 木全宏之, 岡田武二, コンクリートダムの耐力評価のための引張軟化特性の検討, 電力土木 No. 286, pp. 113-119, 2003
- 9) 土木研究所資料第 2829 号「コンクリートのせん断強度についての実験的考察 (その 1)」, 1990.3

## A STUDY ON SEISMIC PERFORMANCE EVALUATION OF TRAPEZOIDAL CSG DAM

**Budget** : Grants for operating expenses  
General account

**Research Period** : FY2011-2015

**Research Team** : Dam and Appurtenant Structures  
Research Team, Hydraulic  
Engineering Research Group

**Author** : YAMAGUCHI Yoshikazu  
KONDO Masafumi  
KIRINASHIZAWA Toru

**Abstract**: The trapezoidal CSG (Cemented Sand and Gravel) dam that is made of the materials obtained in and around dam site and constructed by using simple facilities, is innovated in dam projects because of its advantages of economic efficiency and environment-friendliness. A fundamental design method of this type dam has been almost established although the type of dam is not defined in *the Cabinet Order concerning Structural Standard for River Administration Facilities*.

On the other hand, the trial implementation of seismic performances evaluation of dams against large shale earthquake has already started because of rising public concern with safety of various civil engineering structures. For trapezoidal CSG dam, which is a new type of dam, a rational method to evaluate its seismic performances during large earthquake motion, taking into account its material properties and potential damaging process should be established.

In this year, a numerical study on characteristics of stress distribution in trapezoidal CSG dam during a large earthquake motion was carried by using seismic response analysis. An experimental study on the tensile strength and the effect of tension softening properties of CSG were also conducted

**Key words** : CSG (Cemented Sand and Gravel), Direct tension test, Fracture energy test, Load velocity, Seismic performance evaluation.