3.7　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：榎村康史、金銅将史、小堀俊秀

【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。一方、大規模地震による耐震性能に対する社会的関心の高まりを受け、ダムにおいても想定される最大級の地震動を考慮し、その損傷過程まで考慮する耐震性能照査 [1] の試行が始まっている。台形 CSG ダムの断面設計方法はすでに確立しているが、新型式のダムであるため、耐震性能照査上想定すべき損傷形態やそれを規定する CSG の物性は必ずしも明らかでなく、これらを解明した上で、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が作用した場合の台形 CSG ダムの挙動について、CSG の強度特性から想定される引張破壊に加え、せん断破壊など組合せ応力による損傷の可能性についても地震応答解析による検討を行い、最も想定すべき損傷形態は CSG とコンクリートの境界部などへの応力集中による引張破壊による損傷であることを示した。また、大規模地震時による台形 CSG ダムへの影響を地震応答解析により推定する上で最も重要と考えられる CSG の引張強度や引張軟化特性について、地震時の挙動を考慮した繰返し及び動的（急速）載荷を含む引張強度試験や破壊エネルギー試験により検討し、CSG の引張強度や破壊エネルギーは載荷速度の増加に伴い大きくなるが、引張強度の増加は事前の応力履歴の影響を受けることなどを示した。さらに、これら現時点までの知見を踏まえ、台形 CSG ダムの耐震性能照査における大規模地震時の挙動の推定方法について、素案となる基本的な考え方について検討した。
なお、実験的検討における急速載荷での引張強度試験は、防衛大学校の協力を得て実施した。
キーワード：台形 CSG ダム、耐震性能照査、地震応答解析、引張強度、破壊エネルギー、急速載荷試験

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一定のばらつきを有する材料（CSG）を堤体材料とする 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型式のダム [2] である。一方、大規模地震による耐震性能に対する社会的関心の高まりを受け、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。新型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、本研究では、大規模地震時における台形 CSG ダムの挙動や想定すべき損傷形態について、地震応答解析による検討を行うとともに、同解析において想定すべき堤体材料（CSG）の物性を明らかにするための実験的検討を行っている。

今年度は、以下の検討を行った.

① 台形 CSG ダムの損傷形態に関する解析的検討

昨年度までの検討により、大規模地震時の台形 CSG ダムの挙動を推定する上では、CSG はその圧縮強度に比べ引張強度が小さいという特性上、コンクリートダム同様、引張破壊による損傷を想定すべきことがわかっている. しかし、台形 CSG ダムはその堤体断面形状や内部構造が一般的な重力式コンクリートダムなどと異なる. このため、せん断破壊など組合せ応力による堤体内内の損傷の可能性についても検討しておく必要があると考えられる. そこで、今年度は、地震応答解析により、せん断破壊を含む組合せ応力による損傷の可能性についても検討した。

② CSG の動的引張強度特性などに関する実験的検討

大規模地震時における台形 CSG ダムの損傷の有無や損傷過程を地震応答解析により推定する上では、CSG の引張強度や引張軟化特性を明らかにすることが必要

となる．このため、昨年度までに地震時の載荷速度を想定した急速載荷条件での引張強度試験や破壊エネルギー試験を行い、CSG の引張強度や破壊エネルギーは載荷速度の増加に伴って増加することがわかっている．そこで、今年度は、さらに地震時に想定される繰返し載荷による影響を把握するため、事前の繰り返し載荷と急速載荷を組み合わせた引張強度試験や破壊エネルギー試験を行い、破壊前の応力履歴が CSG の引張強度や破壊エネルギーに及ぼす影響についても検討した。

③　台形 CSG ダムの耐震性能照査方法

上記①及び②の検討に関して現時点までに得られた知見を踏まえ、台形 CSG ダムの耐震性能照査における大規模地震時の挙動推定方法の素案となる基本的な考え方について検討した.

2. 大規模地震時における台形 CSG ダムの損傷形態に関する解析的検討

2.1 概要

台形 CSG ダムの断面形状は「設計地震」（入力地震動がフィルダムの耐震設計指針（案）[3] における地域区分毎の最大加速度（0.13～0.18G）となるよう調整した地震波形)、及び「検証地震」（1995 年の兵庫県南部地震の後、「ダムの耐震性に関する評価検討委員会」[4] において現行ダム設計基準（河川管理施設等構造令）によって設計されたダムの耐震性を評価するために用いられた地震波（最大加速度 250gal)）に対して滑動、転倒に対する安定性を有し、かつ内部応力が弾性領域内に収まる（損傷を生じない）よう設計されている[2]。一方、大規模地震に対するダム耐震性能照査指針（案）[1]（以下、「指針（案）」とする。）では、個々のサイトで現在から将来にわたって考えられる最大級の地震動（レベル 2 地震動）を想定し、ダムに損傷が生じることも考慮してその耐震性能（貯水位機能等）が維持されることを確認する必要がある。なお、指針（案）では、考慮すべきレベル 2 地震動の大きさは、未知の活断層が存在することも考慮し、下限値（最大加速度 300gal）が設けられている。しかし、新型式のダムである台形 CSG ダムについて、その損傷過程を考慮して耐震性能を照査する方法は未確立である。

昨年度までは、台形 CSG ダムの挙動（応答特性及び想定される損傷形態）について、堤体の形状や規模、想定する地震動規模と地震動特性、基礎岩盤、貯水位等の条件が及ぼす影響を含め地震応答解析（動的解析）による検討を行った。この結果から、堤体内部応力については、堤体内部構造を考慮した場合、内部 CSG の止水・構造コンクリートとの境界部に引張応力が集中することや、圧縮強度に対し引張強度が弱いという CSG の材料特性から、重力式コンクリートダムと同様に引張破壊による損傷が考えられることがこれまでに分かっている。しかし、重力式コンクリートダムの場合は、主に上流端付近での鉛直方向の引張応力によるほぼ一軸引張状態での損傷が問題となるが、台形 CSG ダムは堤体断面形状や内部構造が一般的な重力式コンクリートダムとは異なるため、一軸引張状態における引張強度による損傷だけでなく、組合せ応力による損傷の可能性についても検討しておく必要があると考えられる。そこで、今年度は、せん断破壊を含む組合せ応力による損傷の可能性について検討を行った。

2.2　組合せ応力を考慮した損傷可能性に対する検討

2.2.1　概要

大規模地震時の堤体の損傷形態については、過年度までにおいて、通常の重力式コンクリートダムと同様、一軸引張応力（および一軸圧縮応力）による損傷の可能性について検討してきた。本年度は、これに加えてせん断破壊を含む組合せ応力による損傷の可能性を明らかにするため、2 次元有限要素モデルによる地震応答解析（線形動的解析）の結果を用いてそのような損傷の可能性を検討した。

すなわち、コンクリート部を含む堤体内の任意の要素において、大規模地震時を想定した線形動的解析結果から求まる堤体内各部の最大主応力 σ_1 および最小主応力 σ_3 から局所せん断摩擦安全率を求め、堤体内部のせん断損傷の可能性を検討した。また、二軸（σ_1, σ_3）応力平面内での応力履歴を堤体内主要箇所について確認することで、引張・圧縮および両者の組合せによる堤体内各部の損傷の可能性を検討した。

2.2.2 解析データ

(1) 解析モデル

検討に用いたデータは、昨年度[5] 実施した図-2.1 に示す形状の 2 次元有限要素モデル（堤高 50m）による常時応力解析（静的解析）及び地震応答解析（線形動的解析）の結果（応力時刻歴）である。解析に用いた物性値を表-2.1 に示す。解析モデルは図-2.1 に示すように、堤体材料として CSG の他、表面には耐久性の確保を目的とした保護コンクリート、上流端部には監査廊の設置のための構造用コンクリートや浸透路長確保のための止水コンクリート、底面には基礎岩盤との密着性や耐久性に配慮した富配合 CSG をモデル化した。なお、CSG とコンクリートの弾性係数の相違が常時（非地震時）の初期応力状態に及ぼす影響を考慮するため、大規模地震時を想定した動的解析に先立ち、堤体を高さ方向に 10 分割し、築堤過程を考慮した

自重解析の後、静水圧を作用させる常時応力解析を行った。

常時応力の解析では、岩盤の境界条件は側方、底面とも固定境界とし、地震動を作用させた動的解析では、側方及び底面の境界条件については仮想仕事の原理に基づく粘性境界を設定した。

地震応答解析での減衰はレイリー減衰を用い、堤体部についての固有値解析により得られた主要振動モード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の係数を設定した。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づき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 [4] を参考に設定した。

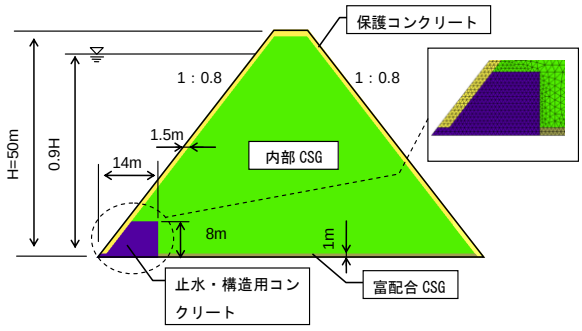


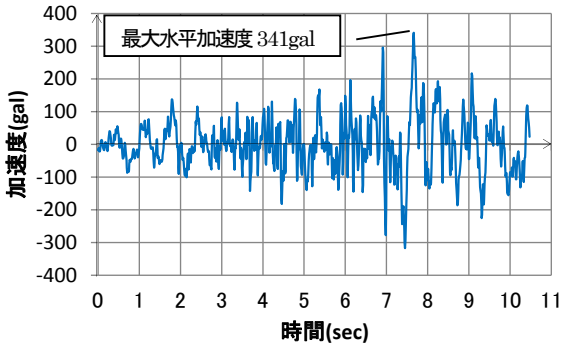
図-2.1　台形 CSG ダム解析モデル
（内部構造を考慮したモデル）

表-2.1　解析用物性値

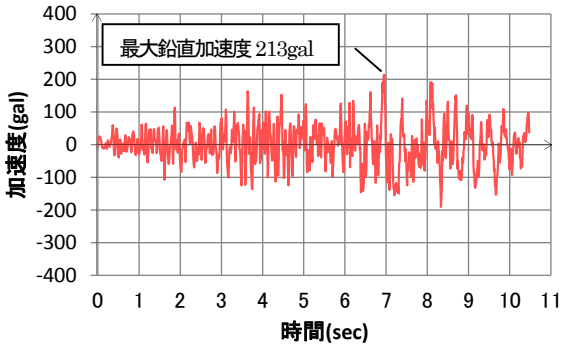
モデル		単位体積重量 (N/m³)	弾性係数 (N/mm²)	ポアソン比
堤体	CSG	22,540	2,000	0.25
	富配合 CSG	〃	4,000	0.25
	止水・構造用コンクリート及び保護コンクリート	〃	25,000	0.2
岩盤		〃	2,000	0.3

(2) 入力地震動

入力する地震動（加速度時刻暦波形）は 1995 年兵庫県南部地震の際、震源近傍の重力式コンクリート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応答スペクトルとなるよう調整した波形（最大水平加速度 341gal）を基本とし、この波形が堤体底面で再現されるよう引き戻した波形を全体モデルの底面に入力した。入力地震動波形を図-2.2 に示す。なお、大規模地震時における損傷の形態を明確に把握するため、入力する地震動を 2 倍、あるいは 3 倍に引伸ばしたケースについても検討を行った。



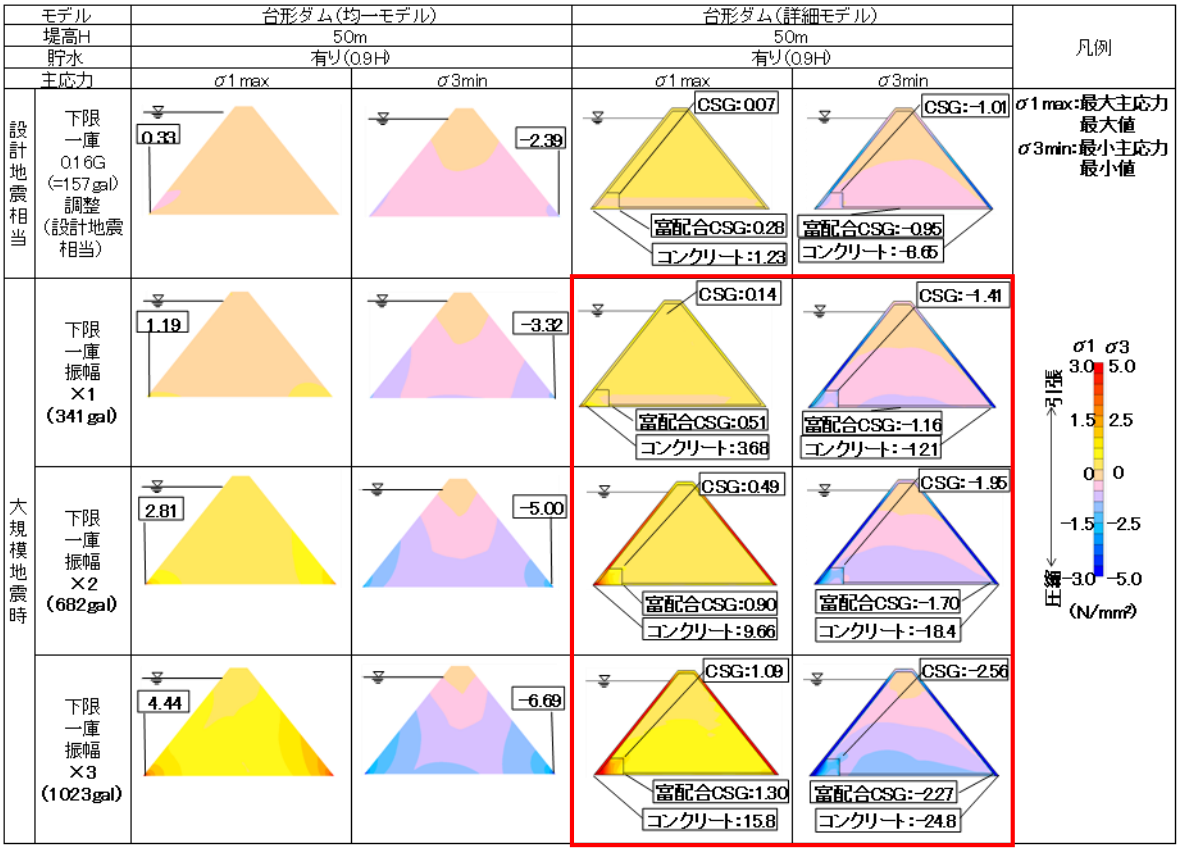
(a) 水平方向



(b) 鉛直方向

図-2.2　入力地震動波形（引伸し前）

参考までに、昨年度 [5] 実施した線形動的解析による堤体内主応力分布を図-2.3 に示す。同図は、動的解析による最大主応力 σ_1 と最小主応力 σ_3 の時刻歴最大・最小値を示している。



□：今年度の検討に用いた解析ケース

図-2.3　大規模地震時の堤体内主応力（時刻歴最大・最小値）の分布[5]

(3)　CSG の各種強度

せん断を含む組合せ応力による堤体内部の損傷の可能性を判定するにあたり、比較対象とする CSG の各種強度は表-2.2 のように設定した。

圧縮応力に対する弾性領域強度[2]は、台形 CSG ダムの断面設計の考え方を参考に、設計地震相当（0.16G）の地震動により堤体内に発生する最大圧縮応力の 1.5 倍（断面設計時における安全率 F=1.5 を考慮）とした。

CSG の圧縮強度（ピーク強度）については、建設された台形 CSG ダムの事例によると、CSG のピーク強度に対する弾性領域強度の比が 0.6～0.8[6]程度であることから、ここではこの値を 0.7 として CSG の弾性領域強度の設定値をもとに設定した。

CSG の引張強度は、弾性領域強度に対する一般的な比[2]を考慮し、引張領域強度の 1/7 とした。

CSG のせん断強度は、既往の室内試験結果[5]を参考にピーク強度の 1/5（τ_0=1.0N/mm²）とした。

CSG の内部摩擦角は、既設のダムの CSG 供試体せん断試験結果を参考[7]に 43°（内部摩擦係数 0.93）とした。

表-2.2　CSG の各種強度の設定値

強度	設定値
弾性領域強度（N/mm²）	3.59
圧縮強度（ピーク強度）（N/mm²）	5.13
引張強度（N/mm²）	0.51
せん断強度（N/mm²）	1.0
内部摩擦角（°）	43

コンクリート（止水・構造コンクリートおよび保護コンクリート）については、圧縮強度を 24N/mm² とし、引張強度はその 1/10、せん断強度は 1/5 とした[8]。内部摩擦角は、コンクリートについては既往の実験的検討結果[9]を参考に 45°とした。

コンクリートの各種強度の設定値を表-2.3 に示す。

表-2.3　コンクリートの各種強度の設定値

強度	設定値
圧縮強度（N/mm²）	24
引張強度（N/mm²）	2.4
せん断強度（N/mm²）	4.8
内部摩擦角（°）	45

一方、堤敷き全体の滑動に対する安定性を判定するにあたって必要となる基礎岩盤（堤敷沿い）のせん断強度および摩擦抵抗係数は表-2.4 のとおり設定した。富配合 CSG

部については、台形 CSG ダムの設計の方法[2]に従い、堤体と基礎岩盤の間の摩擦抵抗係数 f のみを考慮し、台形 CSG ダムの基礎となりうる程度（CL～CM 級）の岩盤を対象とした原位置せん断試験後の二度押し試験結果[10]を参考に、f=1.2 と仮定した。

止水コンクリート部については、基礎岩盤との一体化を考慮し、基礎岩盤（CL～CM 級）のせん断強度及び内部摩擦角で示される摩擦抵抗を、既往文献の岩級区分と岩盤物性の関係[11]を参考に設定した。

なお、台形 CSG ダムの断面設計時には、より安全側の仮定として、この止水コンクリート着岩部のせん断強度を見込まないが、実際の施工においては、止水コンクリート部はコンクリートダムと同等の岩盤面処理を行うほか、打設時には仕上げ掘削した基礎岩盤にモルタルを敷設して基礎岩盤との一体化が図られることから、大規模地震時の挙動を推定するここでの検討では、これを考慮することとした。

表-2.4　堤敷沿いの滑動に対する安定性検討用物性値

	せん断強度 (N/mm²)	摩擦抵抗係数
富配合 CSG 部	0	1.2
止水コンクリート部	0.98	1.0

2.2.3 せん断破壊による損傷に対する検討

(1)　堤体内部

過年度の CSG 供試体を用いた一面せん断試験の結果[5]から、CSG のせん断破壊は、ダムコンクリートの場合と同様、ほぼ Mohr-Coulomb の破壊規準が適用できると考えられる。そこで、表-2.2 に示した CSG のせん断強度の設定値と、線形動的解析結果から堤体内各部の局所せん断摩擦安全率を（1）式により算定し、せん断破壊による損傷の可能性について検討した。

$$fs \equiv \frac{r_{max}}{r} = \frac{\tau_0 \cos\phi + \frac{1}{2}(\sigma_3 + \sigma_1)\sin\phi}{\frac{1}{2}(\sigma_3 - \sigma_1)} \quad \cdot\cdot\cdot\cdot (1)$$

ここに、

fs　:各堤体材料のせん断強度及び内部摩擦角で示される摩擦抵抗を考慮した局所せん断摩擦安全率

r，r_{max}　:図-2.4 参照

τ_0　:各堤体材料のせん断強度（表-2.2、表-2.3）

ϕ　:各堤体材料の内部摩擦角（表-2.2、表-2.3）

σ_1　:最大主応力

σ_3　:最小主応力

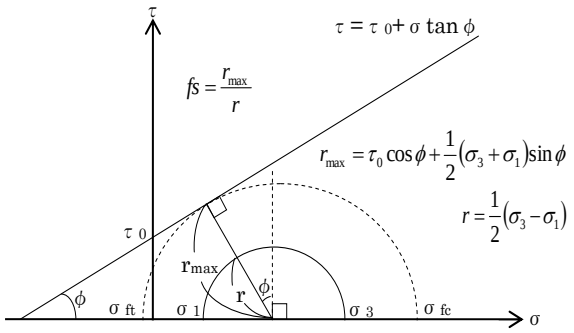


図-2.4　局所せん断摩擦安全率 fs 算出の概念図

解析結果による主応力分布から、最小主応力 σ_3 の時刻歴最小値・最大主応力 σ_1 の時刻歴最大値がそれぞれ各堤体材料の圧縮・引張強度を超える領域を図-2.5(a)、(b)にそれぞれ示す。また、局所せん断摩擦安全率の時刻歴最小値が 1.0 未満となる領域を着色して図-2.5(c)に示す。なお、入力地震動倍率（以下、「倍率」とする。）1 倍ケースではこれらの領域がほとんど生じなかったことから、損傷形態を明確にするため、ここでは倍率 2 倍および 3 倍の結果を示している。

図-2.5 各図を比較すると、まず、圧縮応力が圧縮強度を超える領域（図-2.5(a)）は、倍率 3 倍ケースでも堤体下流端部のごく一部のみであり、想定した地震動の規模では、圧縮応力による損傷が先行して生じる可能性は低いと考えられる。

次に、最大主応力 σ_1 が引張強度を超える領域（図-2.5(b)）は、CSG 部については倍率 2 倍ケースで堤敷の止水・構造用コンクリート境界部（図-2.5 中 A）と下流端付近（図-2.5 中 B）の富配合 CSG、倍率 3 倍ケースではこれに加えて止水・構造用コンクリート隅角部付近の内部 CSG（図-2.5 中 C）である。また、コンクリート部については、倍率 2 倍ケースで堤体上流端付近の止水・構造用コンクリート（図-2.5 中 D）および上下流面の保護コンクリートの一部（図-2.5 中 E、F）であり、倍率 3 倍ケースでは同様の位置で領域がさらに拡大している。

これに対し、局所せん断摩擦安全率が 1.0 を下回る領域（図-2.5 中(c)）は、CSG 部については倍率 2 倍および 3 倍の両ケースで止水・構造用コンクリートとの境界付近の富配合 CSG（図-2.5 中 G）、倍率 3 倍ケースでは止水・構造用コンクリート隅角部付近の内部 CSG（図-2.5 中 H）

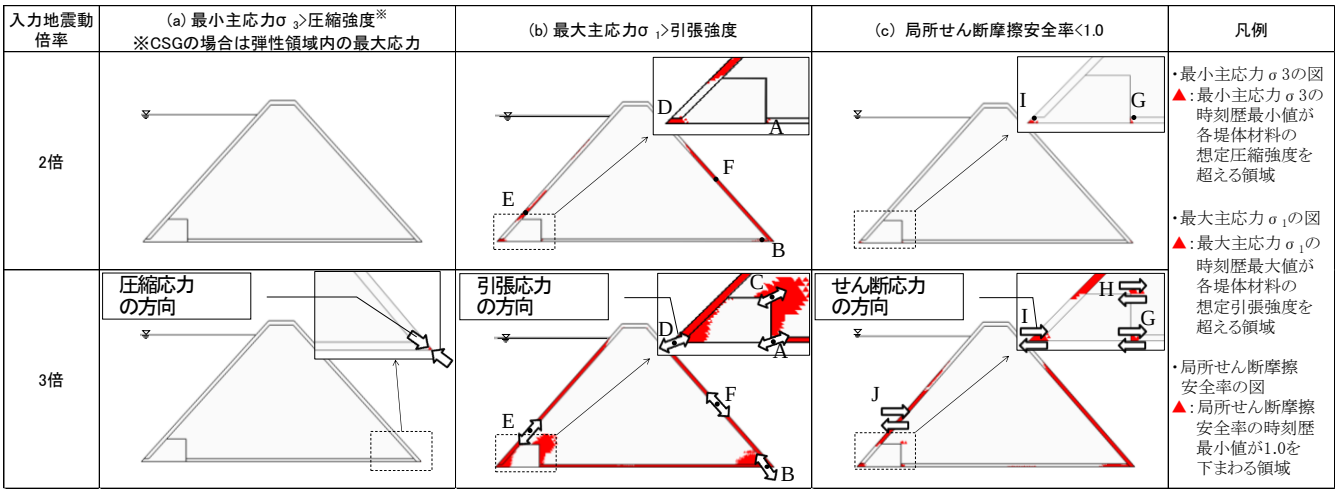


図-2.5　大規模地震時に主応力が堤体材料の引張強度、圧縮強度を超える領域
および局所せん断摩擦安全率が 1.0 を下まわる領域（線形動的解析）

に分布している。コンクリート部については、倍率 2 倍ケースで堤体上流端付近の止水・構造用コンクリート（図-2.5 中 I）、倍率 3 倍ケースではこれに加えて上流面の保護コンクリートの一部（図-2.5 中 J）に分布している。

図-2.5 において最も着色した領域が広いのは、σ_1 が引張強度を超える領域であり、局所せん断摩擦安全率が 1.0 未満となる領域は、この領域に含まれている。

なお、算出された引張・圧縮応力の大きい箇所、および局所安全率が 1.0 を下まわる箇所における、各応力の作用方向を図-2.5（倍率 3 倍ケース）中に示している。これによると、引張応力の方向は、堤体内部 CSG と止水・構造用コンクリート部の境界（図-2.5A、C）では両者が分離する方向に、上下流端部（図-2.5B、D）では堤体が基礎岩盤から浮き上がる方向に、保護コンクリート部（図-2.5 中 E、F）では上下流面に平行な方向に作用することがわかる。これに対し、せん断応力の作用方向は、ほぼ水平方向となっている。

以上のことから、大規模地震時において、台形 CSG ダムの堤体内で最も先行して生じる可能性がある損傷形態は、堤体内部の CSG と止水・構造用コンクリート部の境界や保護コンクリート部などに引張応力が集中することによる損傷であると考えられる。

(2)　堤敷部

台形 CSG ダムの設計では、堤体内部発生応力のほか、堤敷沿いの滑動に対する安定性も重要な要件となっている。このため、大規模地震時における台形 CSG ダムの堤敷き沿いの滑動に対する安定性について、線形動的解析結果より以下の式により堤敷全体の滑動に対する安全率（以下、「滑動安全率」とする。）を算定し、滑動安全率が最小となる時刻の堤敷き沿いの局所安全率分布を算定した。

$$Fs = \frac{\tau_0 \times \ell + f \times V}{H} \quad \cdots\cdots\cdots (2)$$

ここに、

Fs　:滑動に対する安全率

τ_0　:せん断強度（止水コンクリート部）

ℓ　:堤体底面のせん断長（止水コンクリート部）

f　:堤体底面の摩擦抵抗係数

V　:堤体に作用する鉛直力の総和

H　:堤体に作用する水平力の総和

滑動に対する安全率と入力地震動の水平方向の最大加速度との関係を図-2.6 に示す。また、各倍率ケースの滑動安全率の時刻歴を図-2.7～2.9 に、滑動安全率が最小となる時刻の堤敷き沿いの局所せん断摩擦安全率の分布を図-2.10 に示す。

滑動安全率の全時刻最小値は、倍率 1 倍ケース（最大水平加速度 341gal）では 2.69、倍率 2 倍ケース（最大水平加速度 682gal）では 1.52、倍率 3 倍ケース（最大水平加速度 1,023gal）では最小安全率 1.03 であり、その時刻は 7.48 秒であった。

各ケースの堤敷き沿いの局所せん断摩擦安全率分布を見ると、倍率 1 倍・2 倍ケースでは堤体上流端および止水・構造用コンクリートと富配合 CSG の境界部などの局所を除くほぼ全ての範囲において局所せん断摩擦安全率が 1.0 以上となるが、倍率 3 倍ケースでは富配合 CSG 部の半分以上の範囲で局所せん断摩擦安全率が 1.0 を下まわり、下流側の堤敷き全体の 20%の範囲においては鉛直応力が引張側となっている。

本検討で想定した条件では、堤敷き全体の滑動安全率は

入力地震動倍率が大きくなるにつれて低下し、倍率 3 倍ケースでは 1.0 程度まで低下した。

以上のことから、大規模地震に対する耐震性能照査においては、(1) で述べた堤体内部の損傷の可能性に加え、以上のような方法により、堤体全体の滑動に対する安定性についても確認しておく必要があると考えられる。

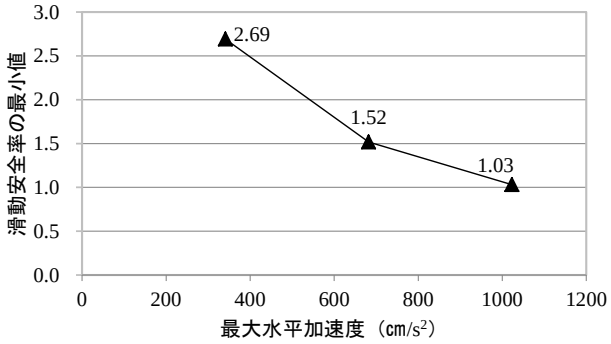


図-2.6　滑動安全率の最小値と入力地震動の最大水平加速度の関係

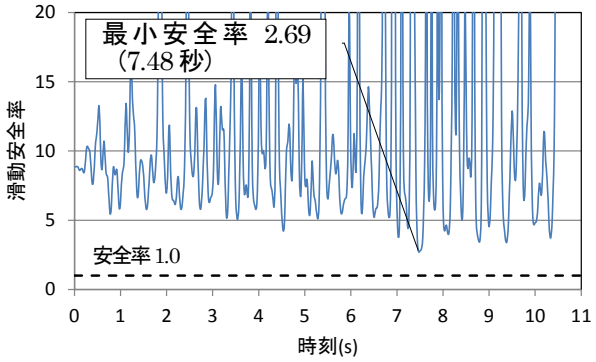


図-2.7　堤敷き沿いの全体滑動安全率の変化（倍率 1 倍ケース（最大水平加速度 341gal））

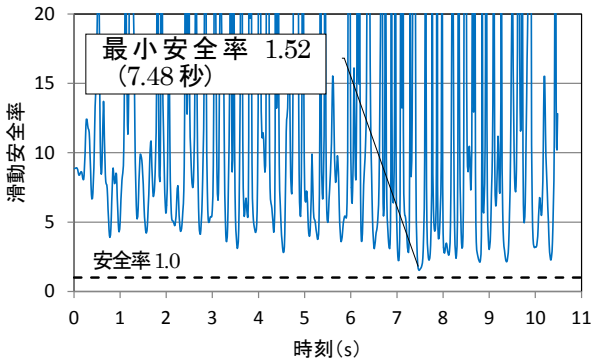


図-2.8　堤敷き沿いの全体滑動安全率の変化（倍率 2 倍ケース（最大水平加速度 682gal））

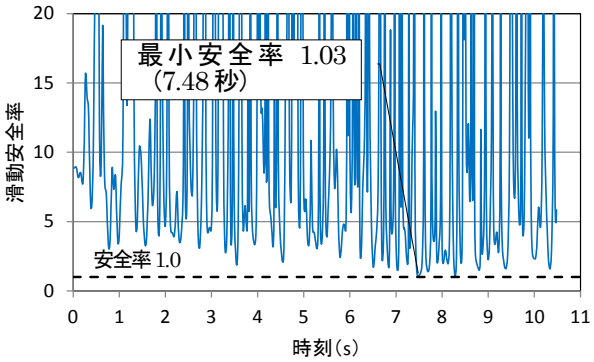


図-2.9　堤敷き沿いの全体滑動安全率の変化（倍率 3 倍ケース（最大水平加速度 1,023gal））

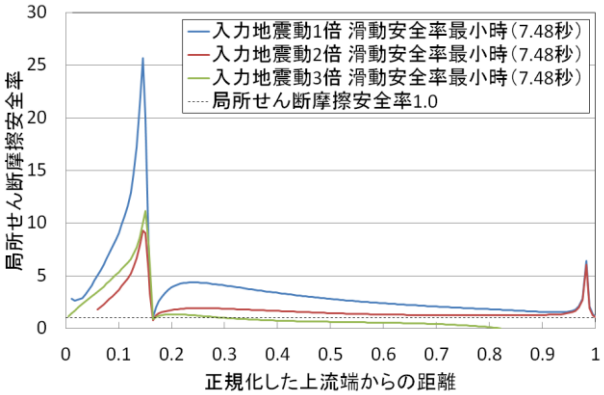


図-2.10　堤敷き沿いの局所せん断摩擦安全率分布

2.2.4　2 軸応力状態での破壊に対する検討

重力式コンクリートダムでは、その堤体形状から、一般に最大引張応力は堤体上流端で鉛直方向の一軸引張状態として発生する。しかし、台形 CSG ダムは堤体断面形状および内部構造が異なることから、引張と圧縮が同時に作用する状態での破壊についても検討する必要がある。しかしながら、多軸応力状態での破壊規準は必ずしも明らかではない。そこで、表-2.2 に示す CSG の引張・圧縮強度を基準として仮定した図-2.11 に示す二軸応力平面での破壊規準線にもとづき、大規模地震を考慮した線形動的解析結果から、堤体内の主な箇所について圧縮-引張領域における損傷の可能性を含め、σ1、σ3 平面での応力履歴を確認した。

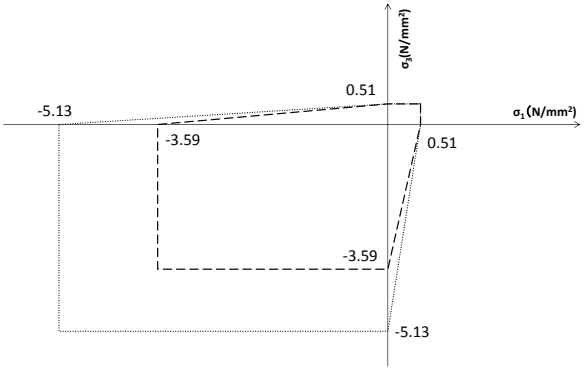


図-2.11　仮定した破壊規準線

図中の黒点線は、過年度[5] に実施した CSG の簡易一面せん断試験結果から、CSG においてもほぼ Mohr-Coulomb の破壊規準が適用できると考えられることから、これと等価な基準線として、CSG の引張強度およびピーク強度の設定値を直線で結んだ線である。

図中の黒破線は、CSG の引張強度および弾性領域強度の設定値を直線で結んだ線である。

対象箇所は、前述の堤体内部の局所安全率の検討において引張応力の集中が比較的顕著であった止水・構造用コンクリート周辺のほか、堤体全体の応力の状態の傾向を把握する目的で、堤体内部 CSG の上流側、中央部、下流側（止水・構造用コンクリートより上で高さ方向 5m 毎）の要素を抽出した。検討対象とした箇所を図-2.12 に示す。なお、同図中には、図-2.5 に示した入力地震動倍率 3 倍のときに、堤体内の局所せん断摩擦安全率が 1.0 未満となる領域もあわせて示している。

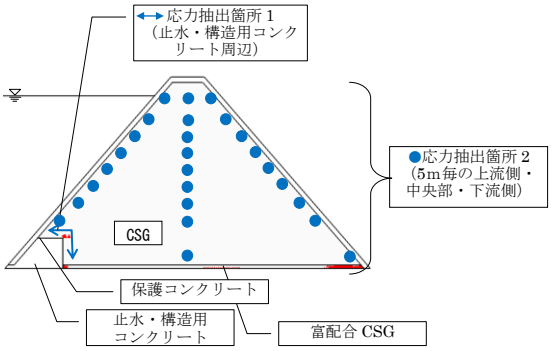
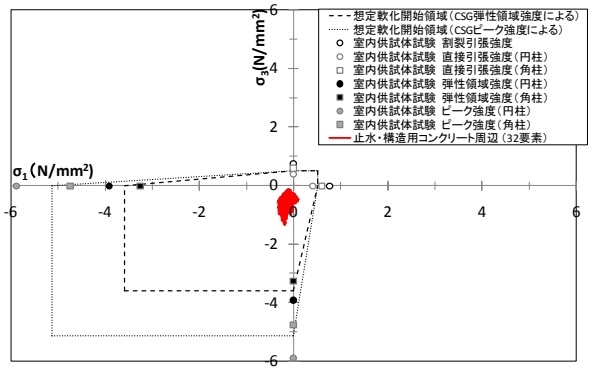


図-2.12　内部 CSG の応力抽出箇所
（赤領域は堤体内部 CSG の局所せん断摩擦安全率が 1.0 を下まわる領域（倍率 3 倍ケース））

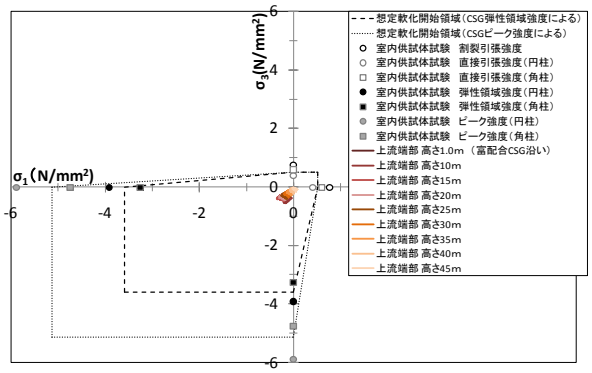
図-2.12 に示した抽出箇所における σ1、σ3 平面での応力履歴を入力地震動倍率別に図-2.13～図-2.15 に示す。図中に示した各要素に対応する曲線は、それぞれの要素における応力の時刻歴変化（0～10.48 秒）を示している。なお、参考として、過年度に実施した CSG 供試体の試験値も図中に示す。

図-2.13～図-2.15 によると、倍率 1 倍および 2 倍ケース（最大水平加速度 341gal、682gal）では、止水・構造用コンクリート周辺では、引張・圧縮応力の組合せとなる領域において、仮定した破壊規準を上回るような応力は発生していない。倍率 3 倍ケース（最大水平加速度 1,023gal）では、止水・構造用コンクリート周辺において算出された応力が、一時的に破壊規準を上回るが、この際の引張応力の変化は横軸に水平方向となっていることから、概ね一軸引張状態と見なせると考えられる。なお、この他の堤体内部の抽出箇所については、算出される堤体内応力は、十分破壊規準内に収まっている。

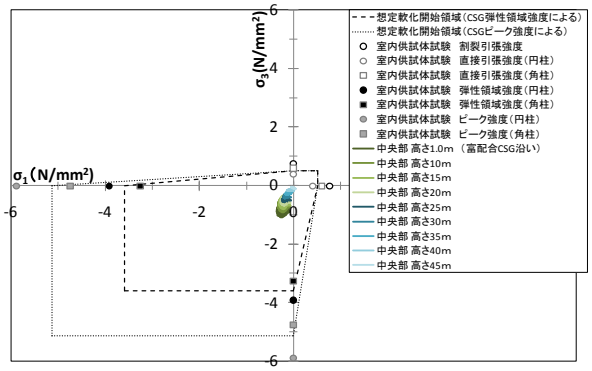
以上のことから、本検討の条件においては、大規模地震の際に台形 CSG ダム堤体内において発生する圧縮・引張の組合せ応力による損傷は、止水・構造用コンクリート周辺において、極めて大きな地震動が作用した際に生じる可能性はあるが、ほぼ一軸引張状態に近い応力状態での損傷と考えられる。このため、基本的には、コンクリートダムの耐震性能照査で適用される引張損傷を考慮した非線形解析法が適用できるものと考えられる。



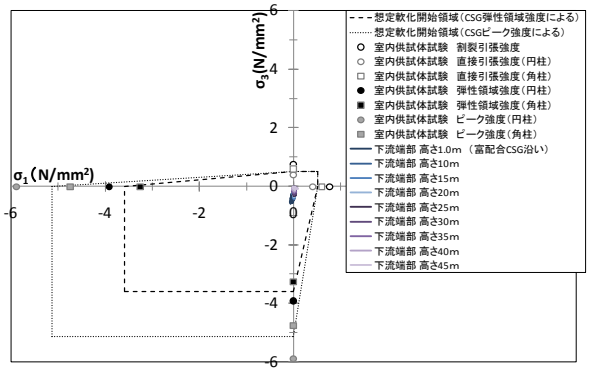
（1）止水・構造用コンクリート周辺



（2）内部 CSG 上流側

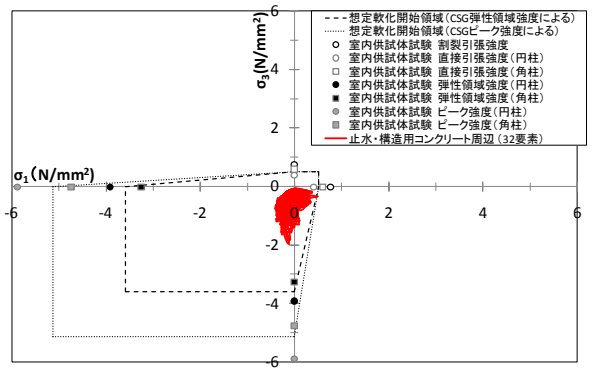


（3）内部 CSG 中央部

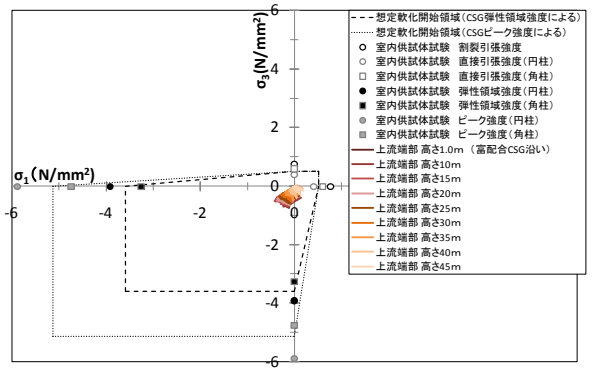


（4）内部 CSG 下流側

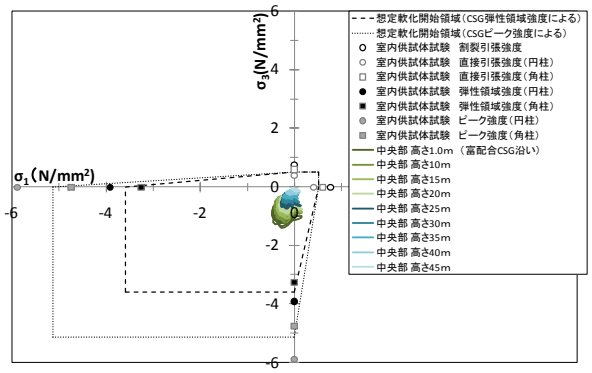
図-2.13　抽出した要素の応力時刻歴
（倍率 1 倍ケース（最大水平加速度 341gal））



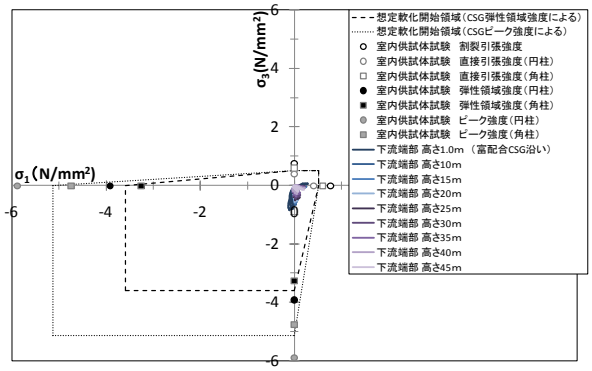
（1）止水・構造用コンクリート周辺



（2）内部 CSG 上流側

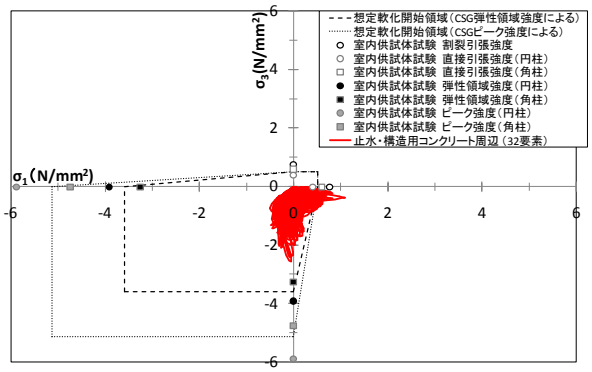


（3）内部 CSG 中央部

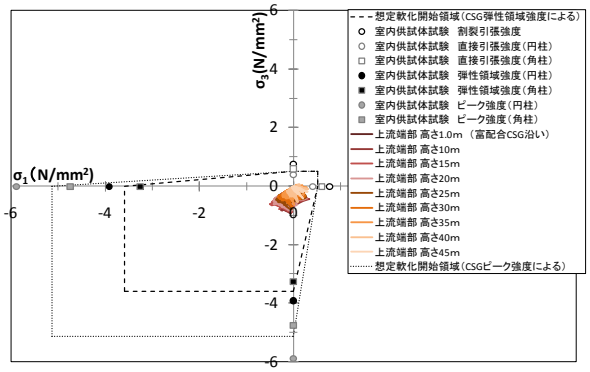


（4）内部 CSG 下流側

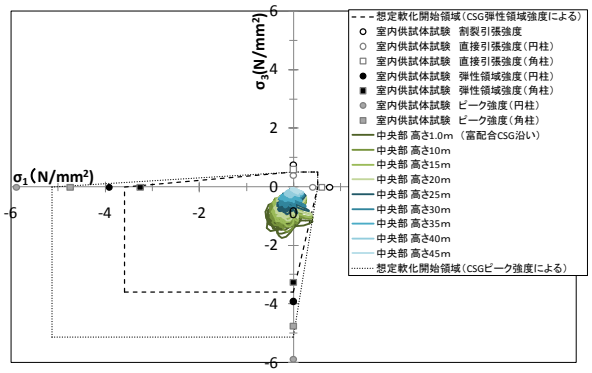
図-2.14　抽出した要素の応力時刻歴
（倍率 2 倍ケース（最大水平加速度 682gal））



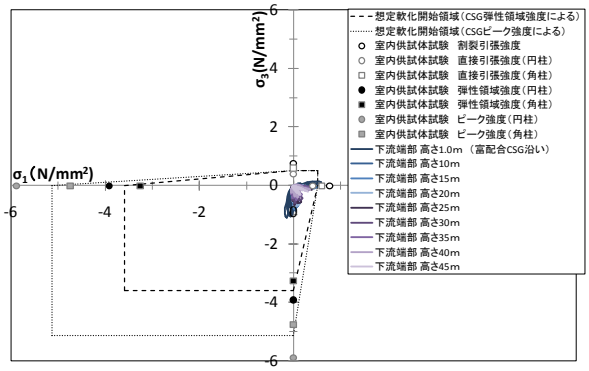
（1）止水・構造用コンクリート周辺



（2）内部 CSG 上流側



（3）内部 CSG 中央部



（4）内部 CSG 下流側

図-2.15　抽出した要素の応力時刻歴
（倍率 3 倍ケース（最大水平加速度 1,023gal））

2.3 まとめ

本検討で得られた成果を以下に箇条書きする。

- 大規模地震時において、台形 CSG ダムの堤体に圧縮やせん断による損傷が先行して生じる可能性は低く、最も考慮すべき損傷形態は、堤体内部の CSG と止水・構造用コンクリート部の境界や保護コンクリート部などに引張応力が集中することによる損傷であると考えられる。
- 止水・構造用コンクリート部と CSG 部の境界に引張強度を超える引張応力が算出されていることから、仮に両者が分離した場合、想定する地震動の規模によっては、滑動に対する安全率は 1.0 を下まわる可能性がある。大規模地震に対する耐震性能照査においては、堤体内部の損傷範囲を推定するとともに、その影響も考慮して堤体全体の滑動に対する安定性を確認する必要がある。
- 大規模地震の際に台形 CSG ダム堤体内において発生する圧縮・引張による組み合わせ応力は、想定される軟化開始領域に対して小さく、これによる損傷が生じる可能性は小さいものと考えられる。

3. CSG の動的引張強度・軟化特性に関する実験的検討

3.1　概要

CSG の引張強度や破壊エネルギーを含む引張軟化特性については、昨年度までの実験的検討 [5), 12)] により、地震時に想定されるような急速載荷条件下では、静的載荷時に比べ、引張強度・破壊エネルギーとも増加することがわかっている。しかし、過年度の試験は単調載荷による試験であり、地震時のような繰返し載荷を受けたときの影響については未確認であった。このため、本年度は繰返し載荷が、CSG の引張強度及び引張軟化特性の載荷速度依存性に及ぼす影響について、CSG 供試体を用いた引張強度試験（直接引張試験及び割裂試験）及び破壊エネルギー試験（切欠きはりを用いた 3 点曲げ試験）により検討した。

なお、実際の地震時と同等の正負（引張・圧縮）交番載荷での繰返し載荷は容易でないことから、繰返し載荷は、引張領域での事前載荷・除荷の繰返しによることとした。試験までの流れを図-3.1 に示す。

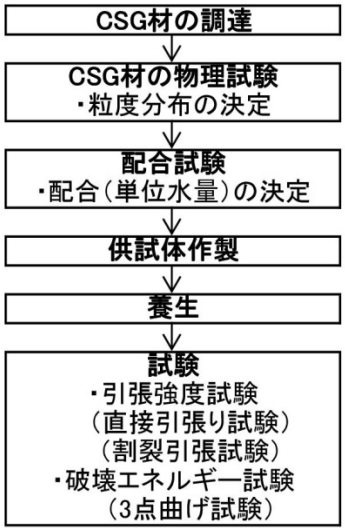


図-3.1　試験までの流れ

3.2　供試体作製

3.2.1　材料

供試体の作製に用いた CSG 材は、実際の台形 CSG ダムに使用された母材（80 ㎜以上は除去済み）から作成した。母材の採取地の地質は砂岩粘板岩互層が主体であり、母材採取は、岩の硬さと風化の程度を指標として、Ⅰ材（岩級区分 CM～CLh 級相当）とⅡ材（同 CLl 級相当）に区分して行われた [5)]。Ⅰ材は堤体内に発生する応力が相対的に大きく所要強度が大きい部位（中・下部標高）、Ⅱ材は堤体内に発生する応力が相対的に小さく所要強度が小さい部位（上部標高）にそれぞれ使用されている。今年度の試験では、このうちⅡ材を使用した。

供試体の作製にあたっては、実際のダムで使用された CSG に近い粒度分布の CSG 材とするため、まず、CSG 材の分級およびふるい分け試験（JIS A 1102）を行い、あわせて密度・吸水率試験（JIS A 1110、JIS A 1109）、および粒径 5mm 以下の CSG 材の微粒分量試験（JIS A 1103）を実施した。分級後の状態を写真-3.1、また、上記の各物理試験の結果を表-3.1～表-3.3 に示す。

写真-3.1　試験用 CSG 材の分級

表-3.1　分級結果

粒径	80～40	40～20	20～10	10～5	5mm 未満	計
数量(kg)	191	254	399	404	1157	2405
百分率	8	11	17	17	48	100

表-3.2　密度および吸水率試験結果

粒径	表乾密度 (g/cm³)	絶乾密度 (g/cm³)	吸水率 (%)
80～40mm	2.48	2.38	3.87
40～20mm	2.48	2.38	4.03
20～10mm	2.48	2.37	4.41
10～5mm	2.48	2.37	4.61
5mm 以下	2.54	2.44	4.05

表-3.3　微粒分量試験結果

微粒分量	備考	
	実際のダム	過年度試験 [5)]
30.8%	20～34%	28.5%

供試体に用いる CSG 材の粒度分布を図-3.2 に示す。粒度分布は実際のダムでの粒度範囲に収めることを目標としたが、必要な供試体数量を確保するために若干細粒側の分布となった。このことを踏まえ、最適な単位水量

を次に述べる配合試験によって決定することとした。

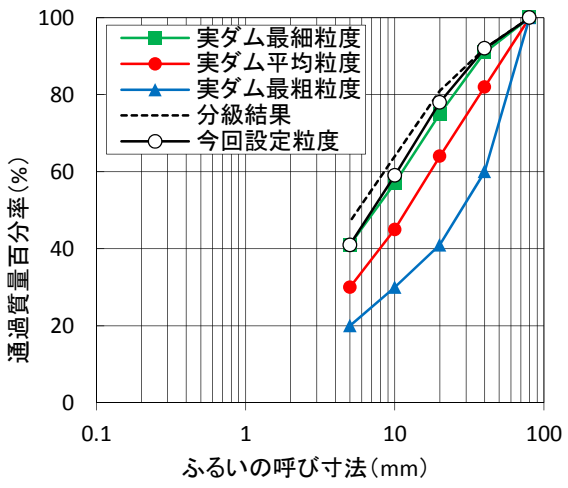


図-3.2　粒度分布

3.2.2　配合試験

(1) 概要

今年度の試験に用いた CSG 材は、表-3.3 に示すようにやや微粒分が多く、また図-3.1 に示す通り粒度がやや細粒側の分布となった。このため、単位セメント量を実際のダムと同一の 80kg/m³ とした上で、CSG として最適な単位水量を決定するために配合試験を行った。配合試験での単位水量は、表-3.4 に示す通り 130、140、150kg/m³ の 3 ケースとした。これは、過年度の試験において、今回の試験と同じ母材（Ⅱ材）から図-3.2 に示す平均粒度相当とした CSG 材を作成し、単位水量を実ダムでの配合と同一の 110kg/m³ として作製した供試体の外観がポーラスなものとなり、理論密度（粒径 40mm 以上の CSG 材をウェットスクリーニングにより除去した CSG の単位容積質量で、空隙をゼロと仮定した密度）に対する実測密度の比である密度比も平均 88%程度と小さくなったことを考慮したものである。配合試験用の配合を表-3.4 に示す。

表-3.4　配合試験用の配合

配合	単位量(kg/m³)						
	W	C	CSG 材				
			80-40	40-20	20-10	10-5	5mm-
A	130	80	169	296	402	381	867
B	140	80	167	293	397	376	857
C	150	80	165	289	392	372	847

(2) CSG の製造（混合）方法

配合試験用 CSG 材は、粒径 5mm 以上は表乾状態に、粒径 5mm 以下は表面水率 2～3%程度に調整した。セメントは普通ポルトランドセメントを、水は上水道水を使用した。

CSG の混合は、容量 150 リットルの傾胴形ミキサを使用し、5mm 以上 CSG 材＋5mm 以下 CSG 材半分＋セメント＋5mm 以下 CSG 材半分を投入後 1 分間混合し、水を投入後 2 分間混合した。

(3) 試験方法

ミキサから排出した CSG は 40mm 網ふるいでウェットスクリーニングを行い、40mm 以上 CSG 材を除去した後、練り板上で 1 往復の切り返しを行い、試料を均一にした。その上で、表-3.5 に示す各項目の評価を行うため、以下の各項目について試験を行った。

a) 密度比

φ150mm×300mm の軽量型枠に試料を 3 層に分けて詰め、各層突き棒で 15 回突いた後、振動タンパを用いて 30 秒締め固めた。試料質量および型枠上端から試料表面までの深さを測定し、試料の密度および密度比を求めた。

b) VC 値

JSCE F 507-2007「RCD 用コンクリートのコンシステンシー試験方法」による標準 VC 試験により VC 値を求めた。

c) 供試体外観

φ150mm×300mm の鋼製型枠に試料を 3 層に分けて詰め、各層突き棒で 15 回突いた後、振動タンパを用いて 30 秒締め固めた。作製された供試体を脱型し、表-3.6 に示す供試体の外観評価基準[13]に則り、その外観（肌面）を観察し、フレッシュな CSG の性状観察の着目点により施工性も考慮して CSG の良否を判定した。

d) 圧縮強度

材齢 7 日で各配合の圧縮強度試験を実施した。供試体は密度比を測定した供試体と同一である。密度比測定後、供試体上面にキャッピングを行い、水分の散逸を防ぐため供試体上面にラップを被せビニールテープで二重に巻いて所定の材齢まで 20℃恒温室で封緘養生とした。試験本数は各配合 3 本（計 9 本）とした。

表-3.5　配合試験の評価項目

評価項目	評価方法	水準	備考
VC 値	ストップウォッチで２名が計測した平均	20～60 秒	標準容器 φ240×200mm
密度比	空隙 0%としたときの密度に対する実測した密度の比	95%以上	円柱供試体
外観観察	供試体の外観評価基準[13] による評価	評価点 4 以上	円柱供試体
CSG の強度	ピーク強度で評価	－	円柱供試体

表-3.6　供試体の外観評価基準[13]

区分	供試体の外観	評価点
良（A）	表面が緻密である	5
ほぼ良（B）	表面がややポーラスな部分、砂分が表れている部分がある	4
やや不良（C）	表面がポーラスな部分、モルタル分がはげ落ちている部分がある	3
不良（D）	モルタルが粗骨材のまわりにゆきわたらず、豆板状の部分がある	2
極めて不良（E）	粗骨材がばらばらでＣＳＧとしての外観を呈していない部分がある	1

(4) 試験結果

配合試験の結果、密度比（図-3.3）およびＶＣ値（図-3.4）が所要の範囲にあり、かつ供試体の外観評価基準に照らした供試体外観やフレッシュ性状が良好と判断された配合は、単位水量 140kg/m³ であった。また、材齢７日での圧縮強度は、単位水量 130kg/m³、140kg/m³、150kg/m³ の順に 1.87N/mm²、1.90N/mm²、1.70N/mm² であった。これらの結果から、引張強度試験及び破壊エネルギー試験用供試体作製における単位水量は 140kg/m³ とした。

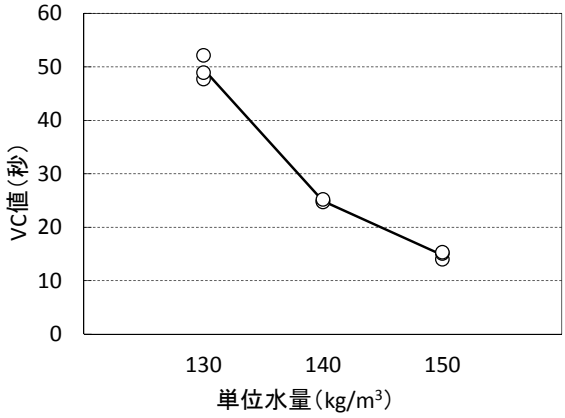


図-3.4　標準 VC 試験結果

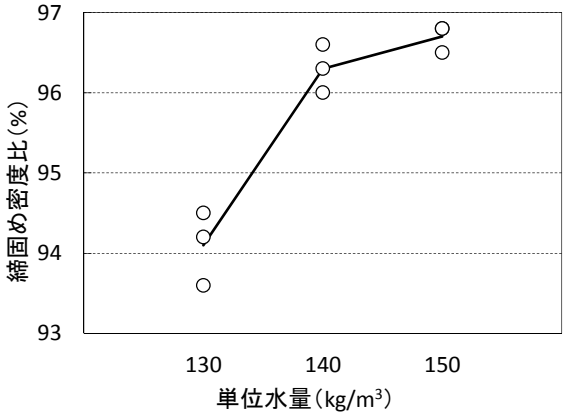


図-3.3　密度比結果

写真-3.2　配合試験供試体（W130）外観

写真-3.3　配合試験供試体（W140）外観

写真-3.4　配合試験供試体（W150）外観

3.2.3　供試体作製

(1) 配合

前述の配合試験の結果から、引張強度試験及び破壊エネルギー試験用供試体の配合は表-3.7 のとおりとした。

表-3.7　供試体の配合

単位量(kg/m³)						
W	C	CSG 材				
		80-40	40-20	20-10	10-5	5mm-
140	80	167	293	397	376	857

(2) 供試体作製方法

供試体作製用は、3.2.2 に述べた配合試験と同じく傾胴型ミキサでの混合の後、ウェットスクリーニングにより、40 mm以上の CSG 材を除去することで製造した。

供試体は、引張強度試験用の円柱供試体（φ150mm×300mm）と破壊エネルギー試験用の切欠きはり供試体（150mm×H150mm×L550mm）を作製した。各供試体の作製方法を以下に示す。

a) 円柱供試体

φ150mm×300mm の軽量型枠（ブリキ製）に試料を 3 層に分けて詰め、各層突き棒で 15 回突き固めた後、振動タンパを用いて 30 秒締固めた。

各層間の締固め後は、突き棒で平滑面をかき乱して次層との馴染みを良くした。

試料質量および型枠上端から試料表面までの深さを測定し、試料の密度および密度比を求めた。

写真-3.5　円柱供試体作製

b) 切欠きはり供試体

型枠は B150mm×H150mm×L550mm の鋼製型枠とし、長手方向中央に深さ 45mm、厚さ 5mm の切欠きを入れるために型枠中央部に鋼板を設置した。切欠き用鋼板の設置に際し、脱型時にスムーズに取り外せるように鋼板の周囲に厚さ 0.2mm のプラスチックシートを貼り、グリスを薄く塗布した。(写真-3.6)

供試体は 2 層に分けて詰め、各層突き棒で 80 回突いた後、大小 2 種類の加圧板を付けた振動タンパにより 1 層 120 秒間締固めた。(写真-3.7)

各層間の締固め後は、突き棒で平滑面をかき乱して次層との馴染みを良くした。

写真-3.6　切欠きはり供試体型枠

写真-3.7　切欠きはり供試体作製

以上により作成した各供試体の密度測定結果を表-3.8 に示す。表中の密度比は、前述の配合試験と同様に、空隙をゼロとした理論密度と実測密度との比である。円柱供試体の中で、混合・排出後作成までの時間がやや長かった（1 時間程度）バッチに一部密度比がやや小さい供試体が見られた。これらの供試体は引張試験には使用せず、予備試験や圧縮試験に用いることとした。

作製した供試体は、水分散逸を防止するためその上面にラップを被せ、ビニールテープで二重に巻いた状態で 20℃の恒温室にて封緘養生した。

表-3.8　供試体作製結果

供試体形状	寸法(mm)	用途	供試体数	密度 (g/cm3)	密度比 (%)
円柱	φ150×300	引張強度試験用※	53	最少：2.149 平均：2.188 最大：2.239	最少：93.5 平均：95.2 最大：97.4
	φ150×300	圧縮強度試験用	5	最少：2.058 平均：2.126 最大：2.204	最少：89.6 平均：92.5 最大：95.9
切欠きはり	B150×H150×L550	破壊エネルギー試験用	12	最少：2.149 平均：2.188 最大：2.239	最少：93.5 平均：95.2 最大：97.4

※引張強度試験用供試体は試験前に上下端部各 30mm を切除した

(3) 供試体準備

a) 直接引張試験用供試体

円柱供試体のうち、直接引張試験用供試体は、載荷用の治具を接着するため、試験 1 ヵ月前程度に脱型し、上下端部 30mm をコンクリートカッターで切除した。

治具の接着及びひずみゲージの貼付位置を図-3.5 に示す。ひずみゲージ（ゲージ長 60mm）は計 4 枚を供試体側面の上下部（表裏 2 枚ずつ）に接着した上で、当該ひずみゲージをまたぐ位置に縁が来る寸法のキャップ型鋼製治具をエポキシ系接着剤で供試体端部に固定した。その後、供試体側面中央部にもひずみゲージ（ゲージ長 120mm）計 4 枚（前後左右）を貼付した。

ここで、供試体側面中央部のほか、上下部にもひずみゲージを接着したのは、治具の縁にあたる位置での応力集中によって当該位置での破断が生じる可能性を考慮し、破断面付近でのひずみも計測できるようにしたものである。なお、このような応力集中は、治具と供試体の接着面（接着剤の塗布面）を端面のみに限定すれば生じにくいと考えられる。そこで、予備試験として、側面側には接着剤が回らないようグリス塗布による縁切りし、端面のみを接着した条件での比較試験も行ったが、この方法では載荷時に供試体と治具の分離が生じた。このため、治具と供試体の接触面全体に接着剤を塗布することとしたものである。

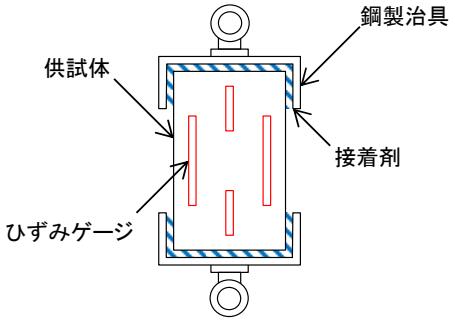


図-3.5　直接引張試験用供試体

b) 割裂引張試験用供試体

割裂試験用の円柱供試体については、治具接着の必要はないが、直接引張試験用供試体と同形状とするため、同様に試験 1 ヵ月前程度に脱型し、両端 30mm を切除した。また、切断した両面の中央へ平行になるよう（載荷時は載荷方向に直交するよう）ひずみゲージ（ゲージ長 60mm）計 2 枚（前後）を図-3.6 に示す位置に貼付した。

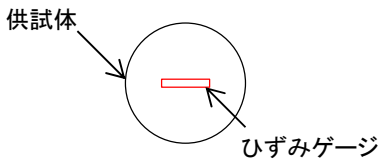


図-3.6　割裂試験用供試体

c) 圧縮試験用供試体

圧縮試験用供試体は、試験 7 日前程度に脱型し、供試体側面中央部にひずみゲージ（ゲージ長 120mm）を計 2 枚（前後）を図-3.7 に示す位置に貼付した。

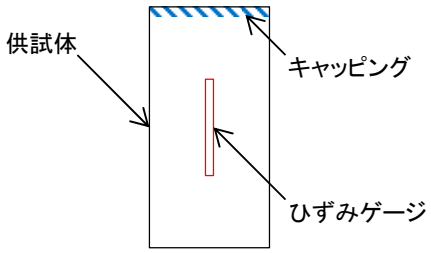


図-3.7　圧縮試験用供試体

d) 破壊エネルギー試験用供試体

破壊エネルギー試験用供試体は、試験 7 日前程度に脱型した。

なお、a）～d）全ての供試体は、以上の準備を行った後、試験材齢（91～108 日）まで室内に封かんした。

3.3　圧縮強度試験

CSG 供試体の基本物性として圧縮強度（ピーク強度及び弾性領域強度 [2]）を確認するため、円柱供試体を用いた圧縮強度試験（材齢 91 日）を行った。載荷方法は通常の静的載荷での単調載荷試験である。圧縮強度試験の結果を表-3.9 に示す。

表-3.9　圧縮強度試験結果

供試体数	最大荷重 (kN)	ピーク強度 (N/mm²)	弾性領域強度 (N/mm²)
n=5	61.97	3.51	1.46
	67.43	3.83	1.59
	56.47	3.19	2.33
	54.67	3.09	2.21
	51.82	2.94	2.40
平均	58.47	3.31	2.00

3.4　引張強度試験による繰返し載荷の影響の検討

3.4.1　試験方法

昨年度までの検討 [5]で明らかになっている CSG の引張強度の載荷速度依存性に対して繰返し載荷が及ぼす影響について調べることを目的とした、割裂引張試験及び直接引張試験を実施した。くり返し載荷の影響は、両試験とも単調載荷により破壊させる通常のケースと、図-3.8 に示すように、引張領域での事前繰返し載荷後に単調載荷して破壊させるケースの比較により評価することとした。

引張試験での載荷速度は、破壊のための単調載荷時については静的（0.05N/mm²/s）と急速の両条件とした。急速載荷での載荷速度は、大規模地震時に台形 CSG ダム堤体内で生じる可能性がある応力増加速度（20～30N/mm²/s[5] 程度）を考慮し、試験機の変位速度を設定することで載荷速度を変化させた。その結果得られた急速載荷での載荷速度は 36～344N/mm²/s であった。

また、事前の繰返し載荷を行ったケースでの事前繰返し載荷時の載荷速度および除荷速度は、静的載荷（0.06N/mm²）に設定した。事前くり返し載荷で上限、下限荷重値は、先行して実施した静的単調載荷ケースにおける破壊時の最大荷重（同一条件での各供試体の平均値）$\overline{P_{max}}$に対し 0.1 倍、載荷時の上限値を同 0.7 倍または 0.5 倍（上限値 0.5 倍のケースは割裂試験のみ実施）の範囲とし、載荷・除荷の繰返し回数は 10 回とした。

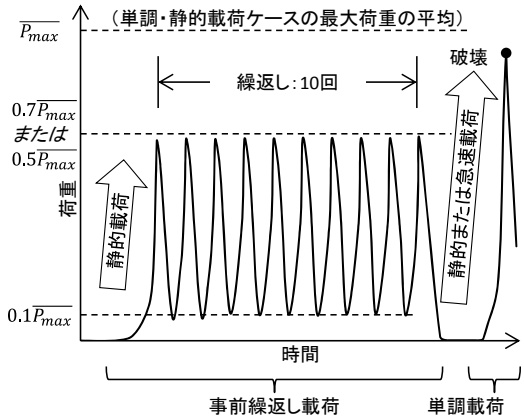


図-3.8　事前繰返し載荷の方法

破壊のための単調載荷、事前繰返し載荷とも、静的載荷での試験は、万能試験機を使用した。機械への設定値は、載荷速度と、繰返し載荷では繰返し荷重上限と下限と繰返し回数である。

破壊のための急速載荷での試験には、サーボ制御式急速載荷試験装置を使用した。本装置の載荷機構は、油圧をアキュムレータ部分に蓄積させ、その圧力を急激に解放させることにより所定の載荷速度を得るものである。

載荷速度の制御は、油圧制御バルブを機械的に一定速度で作動させることにより試験機の変位速度を設定できるようになっている。

なお、事前繰返し載荷を行い、その後同じ試験機を使用した静的載荷で破壊させるケースでは、事前繰返し載荷終了後に一旦荷重をゼロにしてから引続き静的単調載荷を行い、破壊を生じさせた。事前繰返し裁荷の後急速載荷破壊を生じさせるケースでは、使用する試験機とその所在が異なるため、事前繰返し載荷終了後に供試体を試験機から取り外した上で供試体に衝撃が加わらないよう保護した状態で運搬し、翌日以降に急速載荷試験を行った。

(1) 割裂引張試験

割裂引張試験の方法は、基本的に JIS A 1113 によった。試験機の載荷面が供試体寸法に比較して小さいため、鋼製載荷板を使用した。載荷板は、載荷中に傾かず且つ反力を生じさせないように、支柱に通したスプリングで支持される構造とした。試験状況を写真-3.8（静的載荷時）、写真-3.9（急速載荷時）に示す。

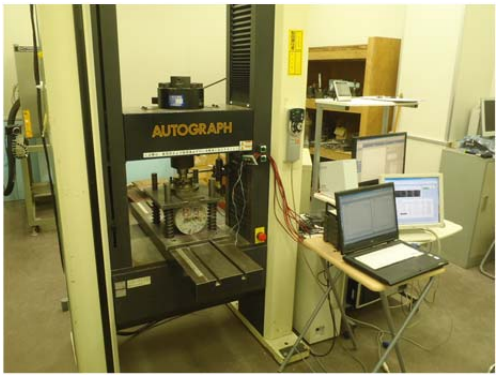


写真-3.8　割裂引張試験（静的載荷）

写真-3.9　割裂引張試験（急速載荷）

(2) 直接引張試験

直接引張試験は、偏心の影響を軽減するためユニバーサルジョイントを介して供試体の両端に接着した鋼製治具に軸方向引張荷重を加える方法で実施した。試験状況を写真-3.10（静的載荷時）、写真-3.11（急速載荷時）に示す。

写真-3.10　直接引張試験（静的載荷）

写真-3.11　直接引張試験（急速載荷）

3.4.2　試験結果と考察

引張強度試験結果を割裂試験について表-3.10 に、直接引張試験について表-3.11 に示す。次に、引張強度試験で得られた引張強度と載荷速度の関係を割裂試験について図-3.9、直接引張試験について図-3.10 にそれぞれ示す。両図中、引張強度は静的載荷による単調載荷で破壊させたケースでの強度の平均値を基準とした増加率で示している。また、応力増加速度は、最大応力時とその 1/3 の応力となる時の割線として算出した。割裂、直接引張強度とも、昨年度の結果と同様、載荷速度が速くなると強度が増加する速度依存性が認められる。

事前の繰返し載荷による応力履歴の影響については、静的載荷により破壊させたケースではほとんど認められないが、急速載荷条件により破壊させたケースでは、全体として、単調載荷のみで破壊させたものに比べ、事前繰返し載荷を行ったものの方が強度増加が小さくなるケースが多かった。ただし、強度増加が小さくなる傾向は、事前繰返し荷重の上限を $0.7\overline{P_{max}}$ としたケース（直接引張試験、割裂試験）では比較的明瞭であるが、割裂試験のみ実施した同 $0.5\overline{P_{max}}$ のケースでは明確でない。

この理由について考察するため、事前繰返し載荷時の応力―ひずみ履歴の例を図-3.11 に示す。同図より、$0.7\overline{P_{max}}$ のケースでは、残留ひずみが繰返しの過程で明らかに大きくなっているが、$0.5\overline{P_{max}}$ のケースでは同様の傾向が見られるもののかなり小さい。このことから、事前の載荷・除荷の過程で弾性領域を超えるひずみによって供試体内に微小なひび割れが生じることで、破壊時の載荷速度の増加に対する引張強度の増加が小さくなるものと考えられる。

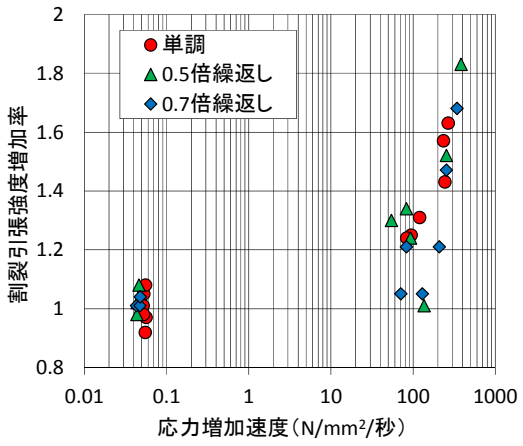


図-3. 9　割裂引張強度と載荷速度の関係

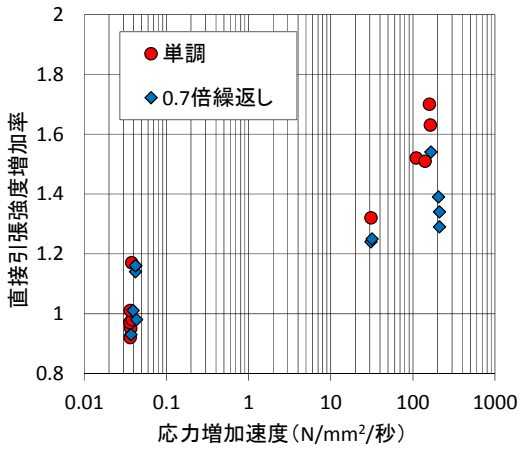


図-3. 10　直接引張強度と載荷速度の関係

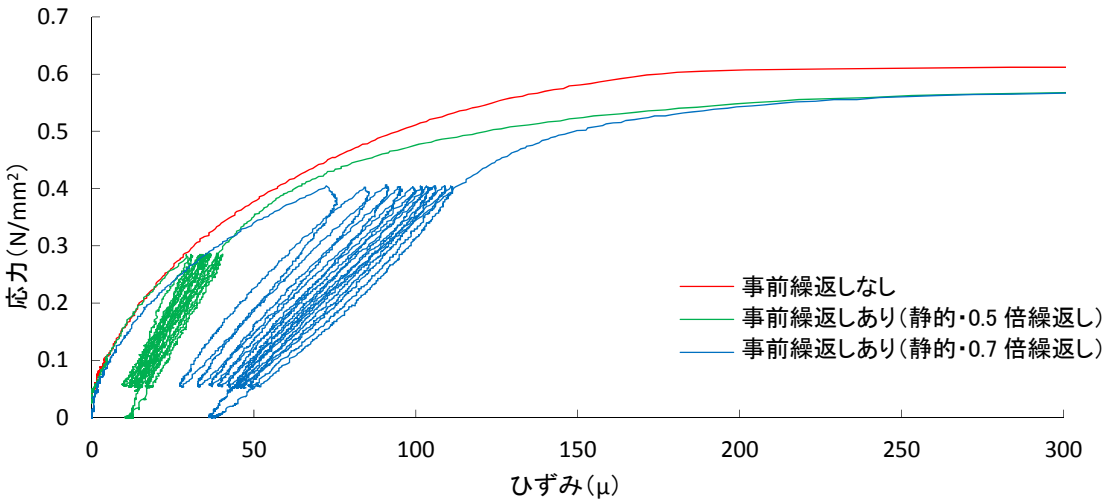


図-3. 11　応力－ひずみ曲線の例（事前繰返し載荷による影響）

表-3.10　割裂引張試験条件と結果

供試体数	事前繰返し載荷条件	載荷速度	最大荷重 kN	ピーク強度 N/mm²
N=6	単調	静的	31.00	0.55
			33.85	0.60
			32.30	0.57
			29.50	0.52
			34.60	0.61
			31.45	0.56
N=6	単調	急速	40.01	0.71
			39.92	0.71
			50.56	0.89
			46.08	0.81
			52.48	0.93
			41.92	0.74
N=3	0.5 倍 10 回	静的	32.70	0.58
			31.55	0.56
			34.65	0.61
N=6	0.5 倍 10 回	急速	39.76	0.7
			42.88	0.76
			41.60	0.74
			58.88	1.04
			48.96	0.87
			32.32	0.57
N=3	0.7 倍 10 回	静的	32.45	0.57
			32.40	0.57
			33.45	0.59
N=6	0.7 倍 10 回	急速	38.72	0.68
			33.60	0.59
			38.72	0.68
			47.36	0.84
			54.08	0.96
			33.60	0.59

表-3.11　直接引張試験条件と結果

供試体数	事前繰返し載荷条件	載荷速度	最大荷重 kN	ピーク強度 N/mm²
N=6	単調	静的	5.94	0.34
			5.80	0.33
			6.07	0.34
			7.37	0.42
			6.16	0.35
			6.31	0.36
N=5	単調	急速	10.21	0.58
			10.66	0.60
			8.26	0.47
			9.50	0.54
			9.57	0.54
N=6	0.7 倍 10 回	静的	5.81	0.33
			6.18	0.35
			7.18	0.41
			6.32	0.36
			7.26	0.41
			7.27	0.41
N=6	0.7 倍 10 回	急速	8.74	0.49
			8.10	0.46
			7.81	0.44
			7.84	0.44
			9.63	0.55
			8.42	0.48

3.5　繰返し載荷が CSG の引張軟化特性に及ぼす影響

3.5.1　試験方法

破壊エネルギー試験は、静的載荷での引張試験に使用した万能試験機を使用し、JCI-S-001-2003（切欠きはりを用いたコンクリートの破壊エネルギー試験方法）によって行った。なお、同規準では載荷速度を CMOD 速度で規定しているが、クロスヘッド変位を制御することで所定の CMOD 速度となるようにした。同試験の実施状況を写真-3.12 に示す。

載荷方法は、引張強度試験と同様、単調載荷のみにより破壊させるケースと、事前繰返し載荷（載荷・除荷）を行った上で単調載荷により破壊させるケースの両ケースを実施した。

破壊させるための単調載荷時の載荷速度は、静的載荷ケースでは CMOD 速度 0.1mm/分（クロスヘッド変位速度 0.08mm/分）とし、急速載荷ケースはその 10 倍（CMOD 速度 1mm/分）～1000 倍（100mm/分）とした。

事前繰返し載荷での載荷速度は静的載荷（CMOD 速度 0.1mm/分）とし、載荷・除荷での荷重範囲は、単調・静的載荷ケース 2 体の最大荷重の平均値（2.7kN）に対し、上限値を 0.7 倍（1.89kN）、下限値を同 0.1 倍（0.27kN）とした。繰返し回数は 10 回とした。

破壊エネルギー試験の条件と結果を表-3.12 に示す。

写真-3.12　破壊エネルギー試験

表-3.12　破壊エネルギー試験条件と結果

供試体番号	事前繰返し載荷条件	載荷速度（CMOD 速度）mm/分	最大荷重 kN	破壊エネルギー Gf（N/mm）
1	―	0.1	2.65	0.118
2	―	0.1	2.775	0.091
3	―	1	2.62	0.099
4	―	10	3.24	0.155
5	―	100	2.545	0.098
6	―	100	3.255	0.188
7	0.7 倍 10 回	0.1	2.6	0.106
8	0.7 倍 10 回	0.1	2.6	0.108
9	0.7 倍 10 回	10	3.185	0.115
10	0.7 倍 10 回	10	2.98	0.117
11	0.7 倍 10 回	100	3.83	0.248
12	0.7 倍 10 回	100	2.51	0.133

3.5.2　試験結果と考察

(1) 破壊エネルギーへの影響

破壊エネルギー試験から得られた荷重－CMOD 曲線を図-3.12、また、これらを載荷速度別に図-3-13 に示す。さらに、荷重―CMOD 曲線下の面積として算出した破壊エネルギーと CMOD 速度の関係を図-3.14 に示す。

図-3.14 より、CMOD 速度が増加すると破壊エネルギーが増加する傾向が認められる。しかし、繰返し載荷の影響については、試験数が限られることやばらつきが大きいことから明確ではない。なお、最もばらつきが大きい CMOD 速度 100mm/分ケースのうち、破壊エネルギーが最大となった供試体（No.11）については、試験後の破断面観察で破断面に骨材が介在していたことを確認した。また、破壊エネルギーが最小の供試体（No.5）では、図-3.13 からわかるとおり、載荷途中で一時荷重低下を生じ、再び荷重が増大して破断に至っている。これらの点を踏まえ、両供試体のデータを除外すると、単調載荷での破壊ケースに比べ事前繰返し載荷を行った場合には、載荷速度の増加による破壊エネルギーの増加は小さくなる。ただし、現時点では試験数が限られることから、繰返し載荷による影響については、さらに検証が必要と考えられる。

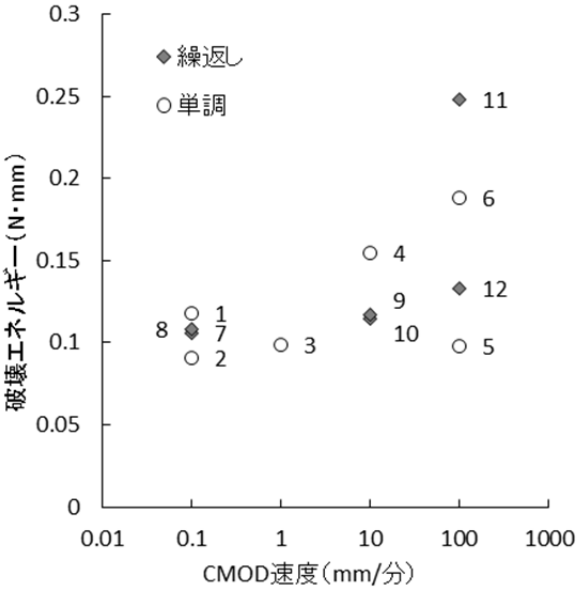


図-3.14　破壊エネルギーと載荷速度の関係
（番号は表-3.12 の供試体番号）

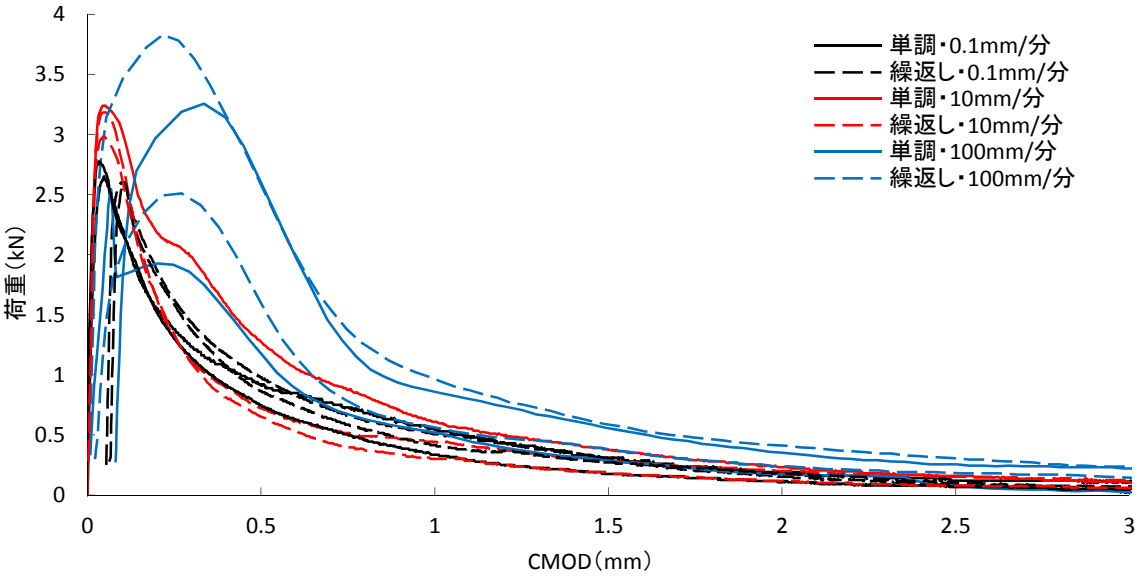


図-3.12　荷重－CMOD 曲線

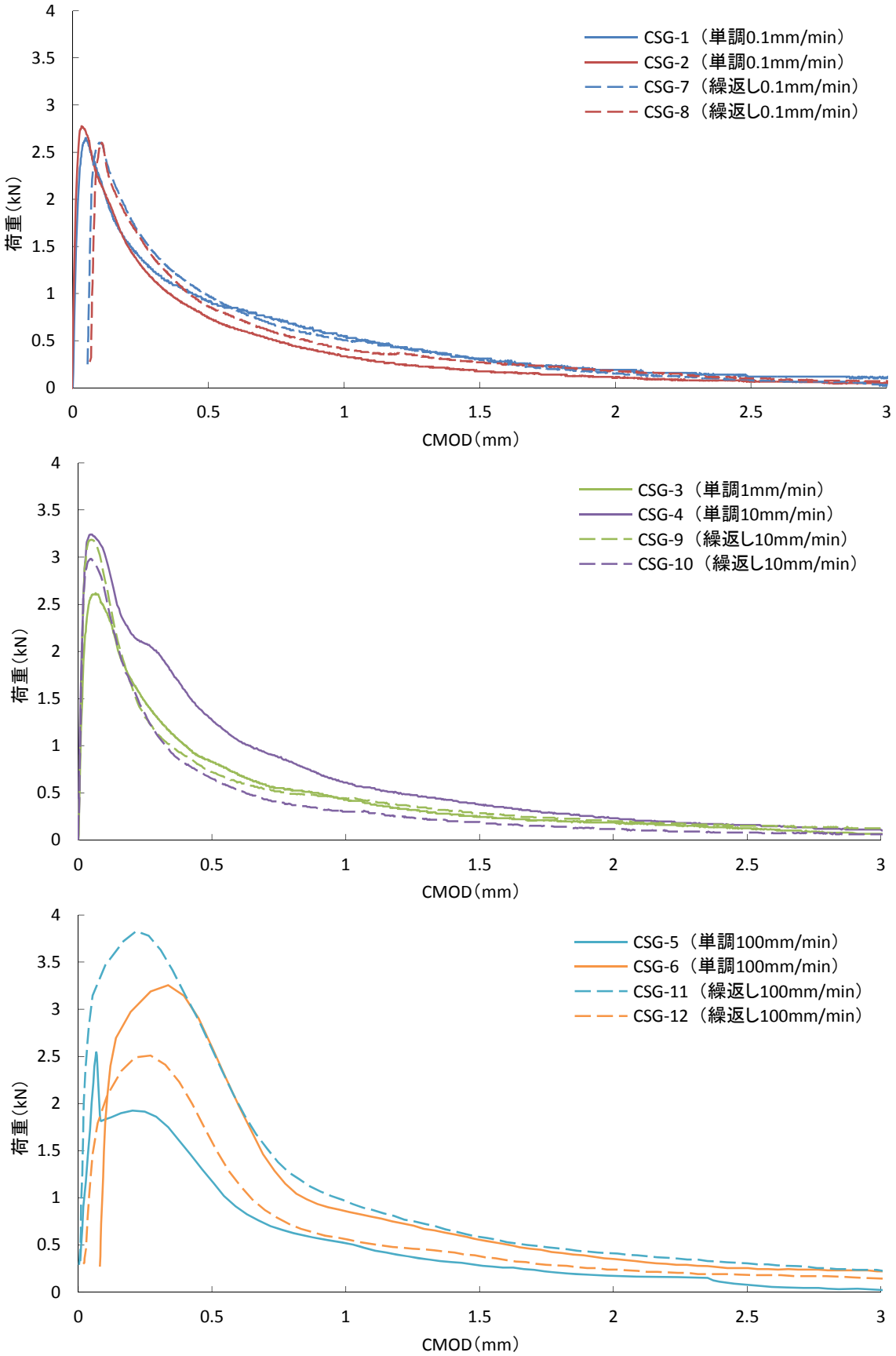


図-3.13　荷重-CMOD 曲線

上：CMOD 速度 0.1mm/分（1 倍）、中：1mm/分（10 倍）および 10mm/分（100 倍）、下：100mm/分（1000 倍）

3.6　まとめ

CSG 供試体による引張強度試験（割裂試験、直接引張試験）及び破壊エネルギー試験を行い、載荷速度による影響を確認するとともに、事前繰返し載荷による影響について調べた。その結果、以下のことがわかった。

・CSG の引張強度は、載荷速度が増加すると大きくなる。ただし、破壊前の応力履歴の影響を受け、事前に繰返し載荷を受ける場合には、ある程度大きな載荷を受けると強度増加が小さくなる。

・CSG の引張破壊時の破壊エネルギーは、引張強度と同様に、載荷速度が増加すると大きくなる。破壊前の応力履歴の影響については、引張強度と同様、その影響を受ける可能性が考えられるが、現時点ではデータ数が十分でないため、引き続き検証が必要である。

4. 大規模地震に対する台形 CSG ダムの耐震性能照査方法に関する検討

本研究では、台形 CSG ダムの大規模地震時の挙動を推定するため、2 章で述べたようなダム堤体の応答特性についての解析的検討を行うと同時に、3 章で述べたような CSG の材料物性としての強度特性や破壊特性に関する実験的検討を行ってきている。これらの検討では、引き続き明らかにすべき点も残されているが、大規模地震時における台形 CSG ダムの挙動を推定する上で重要ないくつかの点が明らかになってきている。このため、台形 CSG ダムの耐震性能照査を適切に行うために必要な解析モデル、また同型式ダムで大規模地震時に想定される損傷形態や挙動の推定方法などに関して、現時点までに得られた知見に基づき、その基本的な考え方として考慮すべき点を述べる。

4.1　解析モデル

台形 CSG ダムの設計では、震度法による安定計算が基本となるコンクリートダムと異なり、有限要素モデルを用いた数値解析（静的および動的解析）により常時及び地震時に堤体各部に発生する応力が推定される。そして、推定される堤体各部の発生応力の最大値に一定の余裕（安全率）を見込んで当該部に使用される CSG の必要強度が設定され、この必要強度が材料のばらつきを考慮しても得られるよう粒度や単位水量の範囲が設定される。しかし、現在の台形 CSG ダムの設計では一般的に CSG の物性を堤体全体の物性として代表させた数値解析モデルが用いられている。この場合、堤体表面に配置される保護コンクリートや上流端付近に配置される止水・構造コンクリートなど堤体内部構造までの詳細なモデル化は行われない。このようなモデルは、堤体全体として CSG が大部分を占めること、コンクリートに比べ内部に使用される CSG の方の強度が低いことを考慮すれば、当該 CSG 自体の損傷が生じない条件下で行われる設計計算法としては一定の合理性を有するものと考えられる。しかし、2.1 で述べたとおり、堤体の内部構造まで考慮したモデルを用いた動的解析の結果、台形 CSG ダムでは、堤体内部の CSG とコンクリート部の境界部に特に応力集中が生じやすいことが明らかになった。これは、比較的物性の相違が大きい材料が堤体内部で接する構造となっている台形 CSG ダム特有の構造的特徴に起因するものと考えられるが、損傷過程まで考慮する必要のある大規模地震に対する耐震性能照査では、このような応力集中による影響について適切に推定することが特に重要になると考えられる。したがって、大規模地震を考慮した台形 CSG ダムの耐震性能照査では、一般的な設計計算時の解析モデルでは考慮されない堤体内部構造（特に、物性が大きく異なる CSG 部とコンクリート部の区分）についても適切に考慮した解析モデルを用いる必要があると考えられる。

4.2　想定する損傷形態と挙動の推定方法

大規模地震に対する台形 CSG ダムの耐震性能照査にでは、まず 4.1 に述べたような解析モデルを用いて応力ーひずみ関係を線形と仮定した線形動的解析を行い、堤体内発生応力の分布を把握することが有効と考えられる。

次に、線形動的解析の結果から、堤体内に何らかの損傷が予想される場合には、その損傷過程を考慮できる解析法により、損傷範囲を推定することが必要となる。大規模地震時に想定される台形 CSG ダムの主要な損傷形態は、2 章で述べたとおり CSG の引張破壊による損傷であり、圧縮破壊やせん断破壊が先行して生じる可能性は低いと考えられる。現状において、引張、圧縮およびせん断を含む組み合わせ応力による全ての破壊形態を同時に再現できる解析手法が未確立であることも考慮すると、上記のことから、台形 CSG ダム堤体内部の損傷過程を推定するための解析手法としては、コンクリートダムの耐震性能照査への適用が一般的となっている分布型クラックモデルなど、引張破壊による損傷過程を再現できる非線形動的解析法[14]を 4.1 で述べた堤体内部構造を考慮した解析モデルに対して適用するのが現状では最も合理的な方法と考えられる。

なお、台形 CSG ダムの設計では、堤体内部応力によ

り堤体内に損傷が生じないことに加え、堤体を剛体と見なした場合に堤体全体の転倒や堤敷沿いの滑動のおそれがないこともあわせて要件とされる[2]。このうち転倒に対する安定性はほぼ自明のものと考えられるが、堤敷沿いの滑動に対する安定性については、大規模地震時に想定される地震動に対しても安定性照査が必要と考えられる。すなわち、有限要素モデルを用いた動的解析で得られた堤敷面沿い各部の鉛直応力とせん断応力を求め、両者から計算される局所せん断摩擦安全率の分布も踏まえ、堤敷面全体としての滑動安全性を評価する必要があると考えられる。なお、コンクリートダムと異なり、堤敷面全体の基礎岩盤との一体化を設計上考慮しない台形 CSG ダムの滑動安全性は、設計上は着岩面付近のせん断強度を期待しない滑動係数（水平力に対する摩擦抵抗力の比）により評価される[2]が、大規模地震に対する耐震性能照査では、4.1 で述べたように堤体内の内部構造までモデル化し、その損傷範囲を推定する必要があると考えられる。このため、着岩面の一体化が期待できる止水・構造コンクリート部などについては、摩擦抵抗だけでなくせん断強度も適切に考慮することが合理的と考えられる。

4.3　今後の検討

大規模地震に対する台形 CSG ダムの耐震性能照査に必要となる地震時の挙動や損傷範囲の推定結果は、考慮する損傷形態や材料物性によって左右される。この点について、これまでに行われた知見を適切に反映する方法を今後体系的にとりまとめる必要がある。

また、耐震性能照査における数値解析結果の判断基準についても検討が必要である。当該判断は、他形式のダム同様、予想される損傷範囲などからダムの貯水機能が維持[1]されるかどうかなどの観点から行われるべきものと考えられるが、台形 CSG ダムの構造的特徴や予想される損傷形態・損傷範囲を踏まえ、具体的にどのような要件であれば所要の耐震性能を満足すると判断できるか、今後明確にしていく必要がある。

参考文献

1）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、2005.3.

2）財団法人ダム技術センター：台形 CSG ダム設計・施工・品質管理技術資料、2012.6.

3）財団法人国土開発技術研究センター：フィルダムの耐震設計指針（案）、1991.6.

4）ダムの耐震性に関する評価検討委員会：ダムの耐震性に関する評価検討委員会報告書、財団法人国土開発技術研究センター、1995.11.

5）佐々木隆、金銅将史、切無沢徹：台形 CSG ダムの耐震性能照査に関する研究、平成 24 年度　重点プロジェクト研究報告書、2013.5.

6）財団法人ダム技術センター：「台形 CSG ダム等の設計・施工事例」、ダム技術 No.216、2004.9.

7）財団法人ダム技術センター：台形 CSG ダム設計・施工・品質管理技術資料、p2-47、2012.6.

8）土木学会：2013 年制定コンクリート標準示方書[ダムコンクリート編]、p34～35、2013.10.

9）永山功、渡辺和夫、小林政登：「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）」、土木研究所資料、第 2829 号、1990.3.

10）財団法人ダム技術センター：台形 CSG ダム設計・施工・品質管理技術資料、p1-10～1-12、2012.6.

11）斉藤孝三、片平博：「ダム基礎岩盤の原位置試験に関する諸検討と考察」、土木研究所資料、p7、1983.1.

12）小林雅幸、金銅将史、切無沢徹、佐々木隆「CSG の引張強度特性に関する検討（その 2）、土木学会第 68 回年次学術講演会、2013.9.

13）安田成夫、服部敦、佐藤耕治、古本浩一、「CSG に関する試験的検討」国総研資料、第 330 号、p55、2006.6

14）永山功、山口嘉一、佐々木隆、佐藤弘行、冨田尚樹、金縄健一、猪股純、安田成夫、佐野貴之、吉岡英貴、川崎秀明、平山大輔、稲垣謙司：大規模地震に対するダムの耐震性能照査に関する資料、土研資料 3965 号、2005.3.

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 Team, HydraulicEngineering Research Group

Author : SASAKI Takashi,
KONDO Masafumi
KOBORI Toshihide

Abstract: The trapezoidal CSG (Cemented Sand and Gravel) dam is a new type of dam, that is made of materials obtained in and around dam site and constructed by using simple facilities. Because of its advantages in economic efficiency and environment-friendliness, this type of dam is innovated in some dam construction projects recently. 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. However, the material properties of CSG and the damaging process of this new type of dam under extremely strong earthquake, which are required to evaluate seismic performance of the trapezoidal CSG dam, have not been clarified, though a fundamental design method of this type dam has already been established.

In this year, Experimental studies to investigate the effect of roading rete and cyclic roading on the tensile strengths and fracture energy of CSG were conducted. Numerical studies to investigate large scale earthquake-induced damages to this type of dam due to tensile stress and combined stress were also carried out.

Key words : Trapezoidal CSG dam, Seismic performance evaluation, Seismic response analysis, Tensile strength, Fracture energy, Loading rate