

## 6. CSG の弾性係数及び拘束圧依存性に関する研究

## CSG の弾性係数及び拘束圧依存性に関する研究

安 田 成 夫\*<sup>1</sup>  
 曹 增 延\*<sup>2</sup>  
 安 藤 駿 平\*<sup>3</sup>

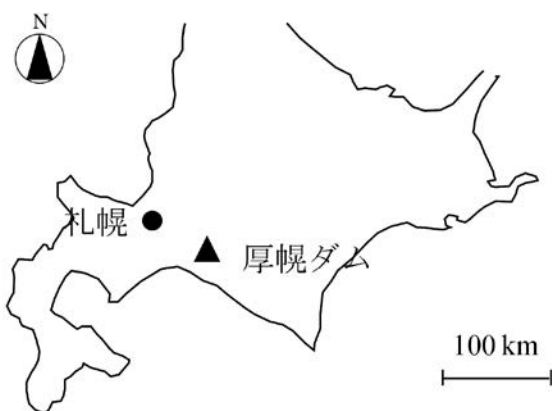
### 1. はじめに

台形 CSG (Cemented Sand and Gravel) ダム<sup>1,2)</sup> は、堤体材料がダムサイト近傍の砂礫などの入手しやすい岩石質材料に、セメント、水を添加し、簡易な施設で混合することにより製造され、台形状の横断面を有するダムである。この型式のダムは、わが国で開発され、環境負荷の軽減、材料の有効活用及び設計・施工の合理化に資する特徴がある。台形 CSG ダムは新型式であるため、CSG の圧縮強度などの基本的物性以外の材料特性に関する検討事例が多くはないものの、幾つかの研究がなされている。金銅ら<sup>3)</sup> は静的及び急速載荷での引張強度試験と破壊エネルギー試験を実施し、載荷速度による CSG の引張強度及び破壊エネルギーへの影響を明らかにした。山口ら<sup>4)</sup> は CSG の繰返し載荷試験やクリープ試験を行い、CSG の長期強度特性を明らかにした上で、ダムの構造安定性への影響を検討した。榎村ら<sup>5)</sup> は、実験的検討を行った上で、CSG の引張軟化モデルを提案した。一方、これまでの研究は室内実験によるものが殆どであり、実際のダムでの材料試験及び実地震、特に強震時における台形 CSG ダムの挙動に基づく研究はない。

2018年9月6日に北海道胆振東部地震 (Mj 6.7) が発生し、震央から僅か8.6 km離れた高さ47.2 m の厚幌ダム (台形 CSG ダム) の底部監査廊内で、最大450 cm/s<sup>2</sup>の加速度が観測された。表-1 に厚幌ダムの諸元、図-1 にダムの位置及び写真を示す。当該ダムの設計において、レベル2地震動として、最大加速度468 cm/s<sup>2</sup>の地震動が想定されており、今回の地震で観測した加速度記録はこ

表-1 厚幌ダムの諸元

ダム所在地	北海道勇払郡厚真町
ダム管理者	北海道胆振総合振興局黒欄建設管理部
ダム型式	台形 CSG ダム
堤高	47.2 m (最低地盤標高 EL44.0 m)
堤頂長	516 m
堤頂幅	8.0 m
天端標高	EL.91.2 m
法面勾配	上流側：1：0.8 下流側：1：0.8
堤体積	480,000 m <sup>3</sup>
流域面積	105.3 km <sup>2</sup>
総貯水量	47,400,000 m <sup>3</sup>



(a) 厚幌ダムの位置



(b) ダムの写真

図-1 厚幌ダムの位置及び写真

\*<sup>1</sup> (一財) ダム技術センター 技術第一部長

\*<sup>2</sup> (株) J-POWER ビジネスサービス 審議役

\*<sup>3</sup> 北海道建設部 土木局

れに相当する。また、この最大加速度値は台形 CSG ダムサイトでこれまで得られた最大級である。ダムの地震時挙動の観測及び再現解析は一種の非破壊検査と位置付けられ、その解析を通じて CSG の材料特性及びダム堤体の振動特性、さらにはダムの耐震性能を把握することが可能と考えられる。本研究は、CSG の弾性係数及びその拘束圧依存性を把握するために、予備試験として河床砂礫を CSG の母材として作製した供試体を用いて三軸圧縮試験を実施した。また、厚幌ダム現場において孔内水平載荷試験を行い、CSG の弾性係数の拘束圧依存関係式を導いた。さらに、北海道胆振東部地震時の厚幌ダムの挙動を 3次元ダム-基礎岩盤-貯水池連成モデルにより再現解析し、前述した材料試験による CSG の弾性係数及びその拘束圧依存関係式の妥当性を検証した。

**2. CSG の弾性係数及びその拘束圧依存性に関する材料試験**

台形 CSG ダムは、有限要素法を用いて弾性領域内の挙動であるとして設計される。従って、CSG の弾性係数は、設計にとって重要であるばかりでなく、ダムの振動特性の把握及び耐震性評価においても欠かせない物性である。CSG の弾性係数は供試体の一軸圧縮試験の応力-ひずみ曲線から求められている。しかしながら、ダム堤体を構成する CSG は、堤体内部では拘束圧を受け、平面ひずみ条件と極めて近い状態にあり、一軸圧縮試験と異なる条件下にあることが理解される。本研究では、室内の材料試験、ダム現場の孔内水平載荷試験、更にダム堤体の地震時挙動の再現解析により CSG の弾性係数を検討した。

CSG の主原材料である粗粒（岩石質）材料の力学特性を考慮すると、CSG の弾性係数は、粒状体とコンクリートの中間の性質を有し、拘束圧に依存していることが容易に推測できる。ダム堤体全体に一樣な配合の材料を用いても、拘束圧に応じて、CSG の弾性係数が深度によって変わると考えられる。CSG の弾性係数及びその拘束圧依存性を明らかにするため、本研究では、予備試験として室内の三軸圧縮試験を実施して弾性係数の拘束圧依存性を確認した。その後、原位置の孔内水平載荷試験により実ダムにおける CSG の弾性係数を測定するとともに、その拘束圧依存関係式を導いた。

**(1) 室内における予備試験**

原位置の孔内水平載荷試験に先立って、CSG の弾性係数の拘束圧依存性の有無を調査するために、室内試験を実施した。

**a) 供試体の作製**

河床砂礫を原材料として円柱供試体（φ100 mm×h200 mm）を作製した。表-2 に河床砂礫の密度・吸水率を示

す。図-2 に供試体作製に使用した原材料の粒度分布を示し、同図に実ダムの CSG の粒度分布も参考として示す。実ダムでは最大粒径80 mm の材料が用いられているが、三軸圧縮試験設備の限界により供試体では最大粒径40 mmとした。供試体の粒度分布は実ダムの粒度分布と相似であるが、全体的に細粒材側にシフトしている。供試体作製用 CSG は、ミキサ（容量150 リットル）を用いて表-2 に示す原材料及び表-3 に示す配合で混合することにより製造した。原材料とセメントが均一になるよう1分間空練りした後、水を投入してさらに2分間混合した。その後、CSG をミキサから排出させ、供試体の寸法を考慮してスクリーニングにより粒径40 mm以上の骨材がないことを確認して、円柱形モールドに投入した。供試体に必要な CSG を3層分け、各層を突き棒で15回突き固めた後、振動タンパにより30秒間締め固めた。その後、供試体を20℃の恒温室内で封緘養生し、材齢91日の試験直前にモールドを脱型した。

表-2 供試体用原材料の物理特性

粒度範囲	平均表乾密度 (g/cm <sup>3</sup> )	平均吸水率 (%)
80 ~ 40 mm	2.62	2.43
40 ~ 20 mm	2.55	3.69
20 ~ 10 mm	2.54	4.45
10 ~ 5 mm	2.50	5.47
5 ~ 0 mm	2.43	8.19

注：試験に使用した水の温度は19.20℃、密度は0.998 g/cm<sup>3</sup>

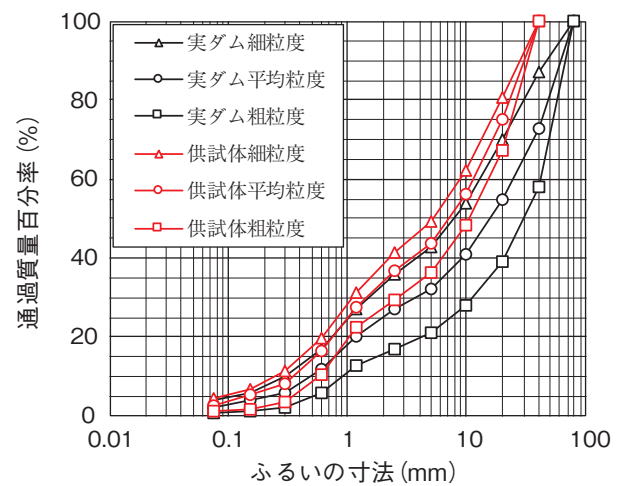


図-2 CSG の粒度分布

表-3 供試体用 CSG の配合

セメント種別	単位セメント量 (kg/m <sup>3</sup> )	単位水量 (kg/m <sup>3</sup> )	空気量 (%)
普通ポルトランド	80	105	0

注：単位体積の CSG 重量は2,378 kg/m<sup>3</sup>である。

b) 試験方法

作製した円柱供試体を用いて異なる拘束圧条件下で三軸圧縮試験を行った。試験結果のバラツキを考慮して、作製した供試体を3組に分けて、同一供試体を用いて拘束圧を昇圧して試験を行った。ただし、本試験の目的により、供試体への軸力载荷は破壊に至らない弾性領域の軸ひずみまでとした。各組の供試体に対して、拘束圧を0.1, 0.2, 0.4及び0.6 N/mm<sup>2</sup>の4パターンに設定し、軸方向の荷重を毎秒0.5%の速度でCSGの弾性範囲(限度として最大軸応力1.0 N/mm<sup>2</sup>まで)で荷重を与えた。供試体の軸応力と軸変位から換算した軸ひずみとの関係曲線の一例を図-3に示す。図中の応力-ひずみ関係曲線の接線(図-3に破線で示す)の勾配によりCSGの弾性係数を算出した。

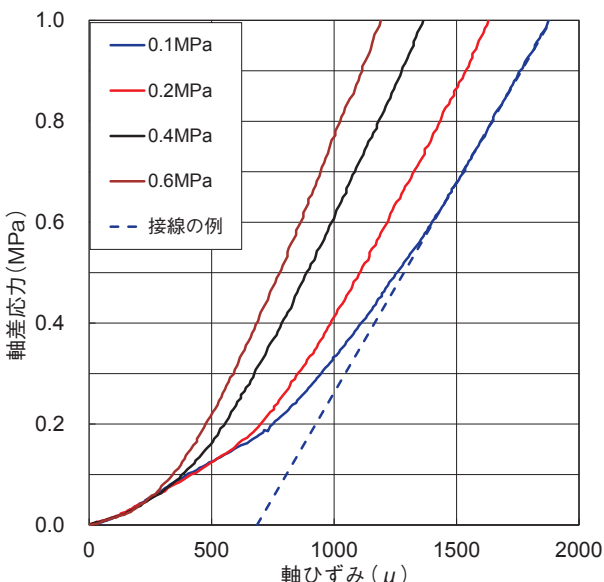


図-3 三軸圧縮試験より得られたCSGの応力-ひずみ関係曲線(1組目)

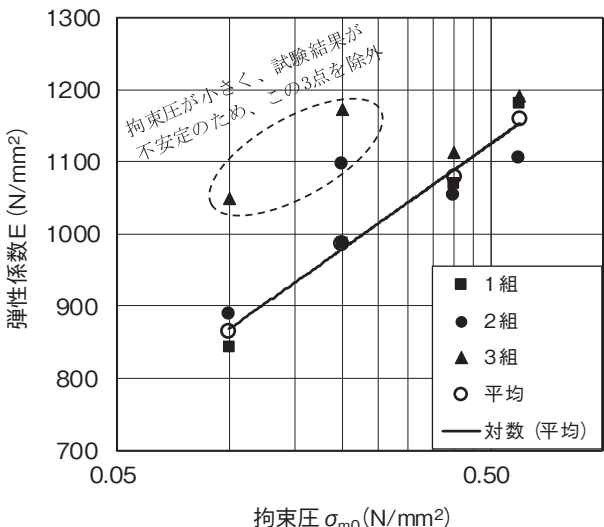


図-4 拘束圧とCSGの弾性係数の関係

c) 試験結果

三軸試験により得られたCSGの弾性係数と拘束圧との関係を図-4に示す。低拘束圧(0.1, 0.2 N/mm<sup>2</sup>)における試験結果のバラツキが大きい。原因として供試体作製時の端面の不均質によるベッディングエラー、あるいは比較的大きな粒径のCSG混入割合が多いことが考えられる。ここでは特異な結果(図-4の左上の3点)を除いて回帰分析することにより図-4に示す関係が得られた(相関係数0.991)。この結果よりCSGの弾性係数は拘束圧に依存していると考えられる。また、この拘束圧依存関係を式(1)により表すことができる。

$$E = 1286 \sigma_{m0}^{0.18} \quad (1)$$

ここに、 $E$ と $\sigma_{m0}$ はそれぞれCSGの弾性係数と拘束圧であり、単位はN/mm<sup>2</sup>である。

(2) 堤体コアと材齢91日供試体の比較

室内試験の供試体と実ダムコアとの相違を解明するため、厚幌ダムから採取したボーリングコア(φ200mm)を用いて、堤体設計に際し室内で作製した供試体と合わせて一軸圧縮試験結果を比較した。打設2年目の厚幌ダムから単位セメント量60 kg/m<sup>3</sup>の範囲でコア(18本)を採取し、弾性係数を計測した<sup>6)</sup>。比較のため、CSGの室内試験の供試体の単位セメント量も同じものと比較した。粒度分布は細粒度、平均粒度及び粗粒度の3種類とし、単位水量は85 kg/m<sup>3</sup>である。

図-5は弾性係数について、ボーリングコアと室内供試体の試験結果を示す。データにバラツキがあるものの、それぞれの平均値は、ボーリングコアの弾性係数が室内平均粒度供試体の約1.9倍と高くなっている。

一方、ボーリングコアを含む室内試験によるCSGの弾性係数の結果を用いた厚幌ダムの二次元地震応答解析では、伝達関数の再現性は良好ではなかった。その原因は室内試験によるCSGの弾性係数が実ダムのそれより大幅に小さいことが考えられた。このため、次節に述べ

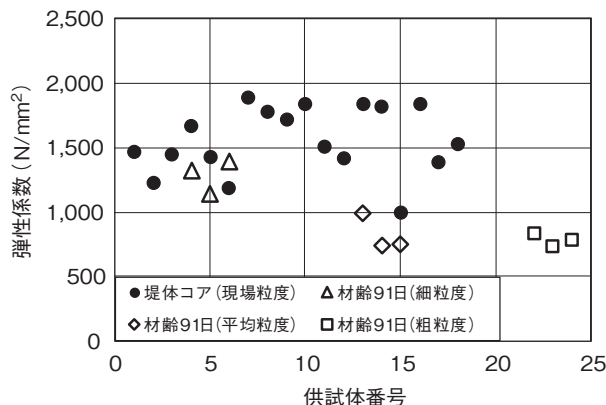


図-5 堤体コアと実験室91日供試体による弾性係数

る原位置の孔内水平載荷試験を実施し、実ダムの弾性係数を直接計測することとした。

(3) 孔内水平載荷試験

a) 試験方法

原位置の孔内水平載荷試験<sup>7)</sup>は、堤体天端から直径66 mmのボーリングを鉛直方向に行い、CSGに達した段階でその都度孔壁の状態を確認し実施した。計測位置は、天端から深度方向に5ヶ所に設定した。孔内水平載荷試験機は図-6示すとおり、長さ52 cmのゴムチューブを水圧で膨張させることによって、孔壁を押し拡げ、キャリパーアームで側方変形を計測する。従って、載荷部52 cmの挙動をその中央部の値によって代表させることになる。一般に試験は昇圧-降圧を数回繰返すことにより孔壁の安定を図るが、今回の試験では3回の昇圧-降圧で安定した値が計測された。一例として、図-7に圧力と

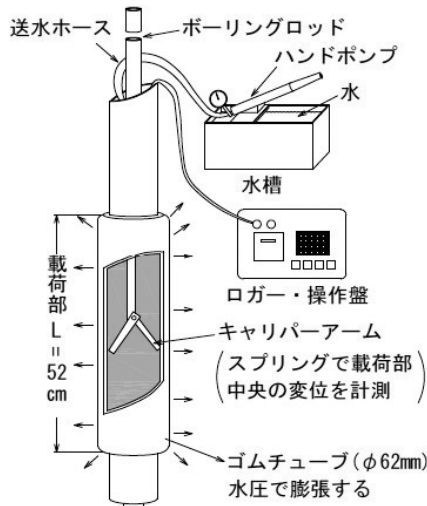


図-6 孔内水平載荷試験機

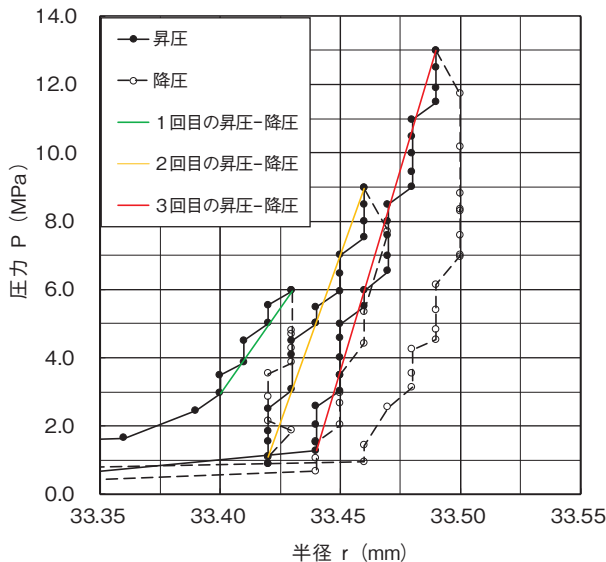


図-7 孔内水平載荷試験における圧力-孔半径の関係例

孔壁の半径の変化関係を示す。3回目の昇圧-降圧における圧力と孔壁の半径の変化関係を基に、式(2)によりCSGの弾性係数Eを算出した。

$$E = (1 + \nu) r_m \frac{\Delta p}{\Delta r} \quad (2)$$

ここに、

$\nu$ : ポアソン比、本研究ではCSGのポアソン比の一般値0.25とした。

$\Delta p$ : 圧力-半径変化曲線の直線部分における圧力増分 (単位: N/mm<sup>2</sup>)

$\Delta r$ :  $\Delta p$ に対応する半径の増分 (単位: mm)

$r_m$ :  $\Delta p/\Delta r$ 算定区間の中間半径 (単位: mm)

b) 試験結果

各深さ位置の測定結果を基に算出したCSGの弾性係数を表-4に示し、深さと弾性係数の関係を図-8(a)に示す。また、後述する三次元ダムの地震時挙動の再現解析のために、ダム-基礎岩盤-貯水池の解析モデルを作成しており、このモデルを用いて常時の応力解析を行った。解析により得られた孔内水平載荷試験実施位置の平均主応力を拘束圧として、この拘束圧と計測された弾性係数との関係を図-8(b)に示す。単位セメント量80 kg/m<sup>3</sup>のCSGの弾性係数は、60 kg/m<sup>3</sup>のそれと同じ拘束圧依存傾向を有すると仮定し、即ち、拘束圧 $\sigma_m$ の指数は同じで、係数が異なるとすると、回帰分析により式(3)に示す弾性係数の拘束圧依存式が得られた。なお、回帰分析における弾性係数と拘束圧との相関係数が0.994であり、良好な依存関係がある。

$$E = \begin{cases} 9260 \sigma_m^{0.372} & C = 60 \text{ kg/m}^3 \\ 14170 \sigma_m^{0.372} & C = 80 \text{ kg/m}^3 \end{cases} \quad (3)$$

ここに、 $\sigma_m$ は拘束圧であり、ダムの常時応力解析による有限要素の平均主応力である。

孔内水平載荷試験の結果に基づく式(3)と室内の三軸圧縮試験に基づく式(1)とを比較すると、両試験の結果に大きな相違がある。主な原因は、実ダム(平面ひずみ条件に近い)と三軸圧縮試験(平面応力条件に近い)における拘束圧条件の違い、室内の供試体と実ダムにおける原材料自体及びその粒度分布の違い、CSGの材齢

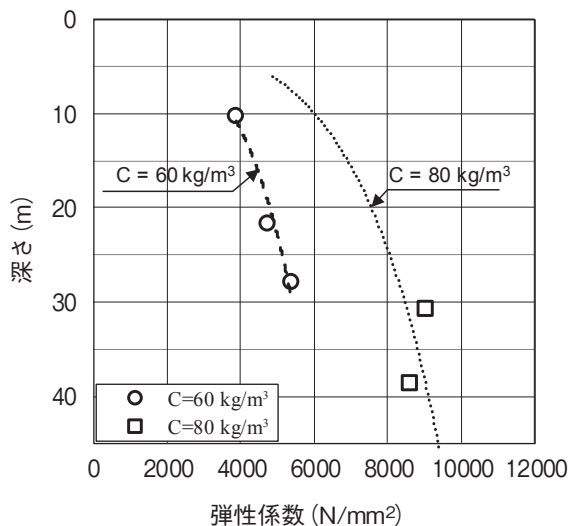
表-4 孔内水平載荷試験によるCSGの弾性係数

深さ (m)	拘束圧 (N/mm <sup>2</sup> )	弾性係数 (N/mm <sup>2</sup> )	区分
10.2	0.094	3,870	C=60 kg/m <sup>3</sup>
21.7	0.174	4,740	
27.9	0.226	5,400	
30.7	0.251	9,060	C=80 kg/m <sup>3</sup>
38.7	0.334	8,600	

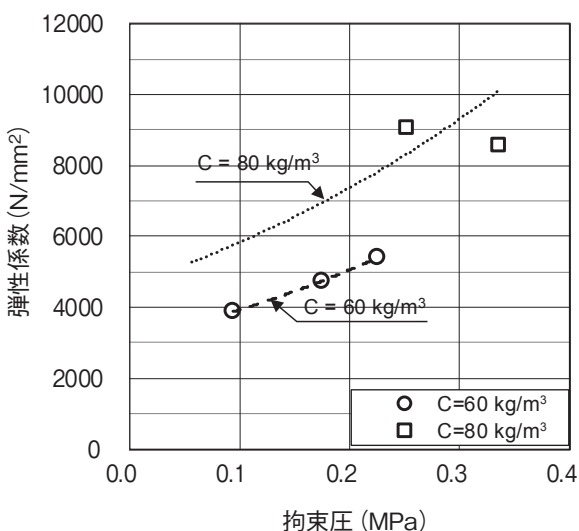
の違い等が考えられる。よって、室内試験による弾性係数を実ダムの設計及び地震応答解析に適用する際には、これらの違いによる影響を考慮する必要がある。

(4) 材料試験のまとめ

室内の三軸圧縮試験及び原位置の孔内水平載荷試験により CSG の弾性係数の拘束圧依存性が明らかとなった。試験結果の回帰分析により CSG の弾性係数の拘束圧依存関係式が得られた。さらに、孔内水平載荷試験結果は、室内試験による結果とは明らかに異なり、拘束圧条件、原材料の粒度分布、母材材料の違い、材齢等による影響が大きいと考えられる。これらの事柄を台形 CSG ダムの設計や振動特性の把握などに考慮する必要がある。一方、ダムの地震時挙動はダム構造及び CSG の材料特性



(a) 弾性係数の深さ分布



(b) 弾性係数と拘束圧の関係

図-8 孔内水平載荷試験結果

に依るため、地震時挙動の再現解析は一種の非破壊試験と位置付けられる。次章以降に、ダムの実地震時挙動を再現することによりここで提案した CSG の弾性係数の拘束圧依存式の妥当性を検証する。

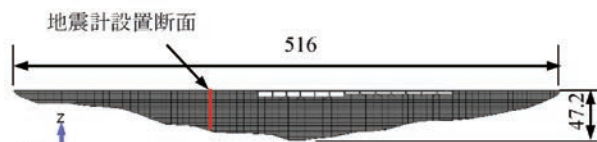
3. 地震時ダムの動的挙動の再現解析による CSG の弾性係数及びその拘束圧依存性の検証

(1) 解析概要

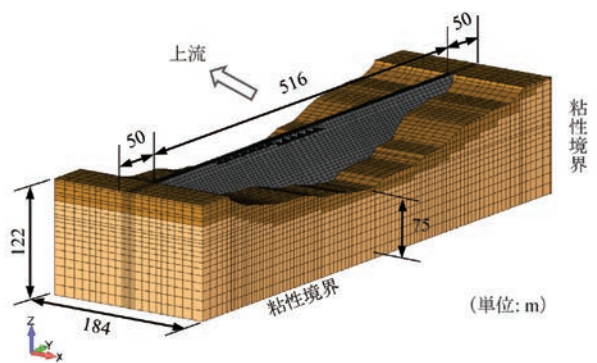
孔内水平載荷試験により得られた CSG の弾性係数及びその拘束圧依存性を検証するために、図-9 に示す 3 次元モデルを用いて、北海道胆振東部地震の際に観測されたダムの挙動を再現解析した。解析では、孔内水平載荷試験結果 (式 (3)) を基にダム堤体内部の常時平均主応力を用いて CSG の弾性係数を設定した。解析の再現性向上のため、式 (3) に係数  $k$  を掛けて調整項目とした。CSG の減衰比は、地震記録の分析により 8.3% と算定され<sup>8)</sup>、解析の再現性を向上するために微調整をした。地震時の貯水位は EL.70.8 m であったことから、この水位に相応する貯水池を有限差分法によりモデル化した。入力地震動は、地震時ダム底部監査廊での加速度記録を解析モデル底面まで引戻すことにより作成した。

(2) 同定された CSG の弾性係数

図-10 にダム天端の加速度応答の主要動 (7~15秒) を拡大して比較する。この図より解析結果と観測結果は非常によく一致していることが確認できる。弾性係数の調整結果としてパラメータ  $k$  は 1.35 であった。すなわち地震時挙動の再現解析により同定した CSG の弾性係数

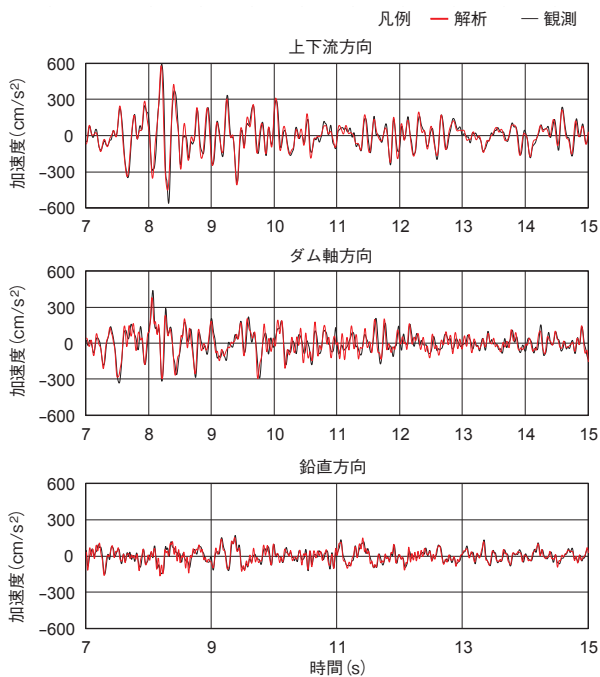


(a) ダム堤体モデルの上流面



(b) モデル全体の鳥観図

図-9 解析モデル



図一10 ダム天端の加速度応答の主要動

は、孔内水平載荷試験結果より35%大きくなっている。この差はCSG材の動的弾性係数と静的弾性係数の違いと理解する。よって、実施した孔内水平載荷試験の結果及び式(3)は、基本的に実ダムのものを反映していると判断される。また、再現解析により同定したCSGの減衰比は10%であった。

#### 4. まとめ

本研究により以下のことを明らかにした。

- 1) 従来、台形CSGダムの設計において、CSGの弾性係数は室内試験の結果を基に、定数として取り扱われている。本研究では室内材料試験及び原位置孔内水平載荷試験によりCSGの弾性係数及びその拘束圧依存性を明らかにし、ダムの地震時挙動の再現解析により検証した。CSGの弾性係数の拘束圧依存式について、室内試験と原位置孔内水平載荷試験によりそれぞれの結果が得られており、明確な違いが表れている。それは、試験における拘束圧条件、母材材料の違い、材齢及び骨材の粒径などによる影響

が大きいと推測し、原位置孔内水平載荷試験の方がより現実に近い結果と考えられる。

- 2) 3次元ダム-基礎岩盤-貯水池連成系の動的解析により観測された北海道胆振東部地震時厚幌ダムの挙動を再現した。解析により同定したCSGの弾性係数及びその拘束圧の依存関係は原位置孔内水平載荷試験の結果と整合している。再現解析により同定したCSGの減衰比は10%であり、地震記録に基づくダム全体としての分析結果よりやや大きくなっているが、妥当な値であると考えられる。

#### 謝 辞

本研究に関して、北海道胆振総合振興局室蘭建設管理部厚幌ダム建設事務所より貴重な地震観測データ並びにダムに関する情報を頂いた。ここに記して深謝の意を表します。

#### 参 考 文 献

- 1) 藤澤侃彦, 吉田等, 安田成夫, 佐々木隆, 樋口淳美, 笛田俊治: 台型CSGダム, ダム技術, Vol.240, pp.4-24, 2006
- 2) 魚本健人: 台形CSGダムの可能性と課題, ダム工学, 21(4), pp.232-241, 2011
- 3) 金銅将史, 佐々木隆, 別府万寿博: CSGの引張強度・軟化特性とその載荷速度依存性, 土木学会論文集E2, Vol.70, No.2, pp.232-251, 2014
- 4) 山口嘉一, 岩下友也, 切無沢徹: 台形CSGダムの材料特性と設計方法に関する研究, 国総研資料14.1, 14.3, Vol.13, No.1, pp.205-315, 2018
- 5) 榎村康史, 金銅将史, 小堀俊秀, 矢田一也: CSGの動的引張強度・破壊特性等に関する実験的検討, 土木研究所資料, 第4320号, 2016
- 6) 中瀬弓人, 杉本淳一, 紺野昌昭, 川村徹: 北海道胆振東部地震に対する厚幌ダム堤体安定性-地震時の挙動分析一, ダム技術, Vol.415, pp.41-52, 2021
- 7) (社)地盤工学会: 地盤調査の方法と解説, 第6編第9章孔内水平載荷試験, pp.319-328, 2004
- 8) 安田成夫, 曹増延, 安藤駿平: 実地震時挙動に基づく台形CSGダムの材料特性及び耐震性評価, 土木学会論文集A1, Vol.78, No.2, pp.254-268, 2022