

100m 級台形CSGダムの堤体設計

DAM DESIGN OF 100M CLASS TRAPEZOIDAL CSG DAM

中倉 香代子**・出田 一史*・中村 浩之**

Kayoko NAKAKURA, Kazufumi IDETA and Hiroyuki NAKAMURA

Currently, The Tohoku Regional Development Bureau proceeds with Naruse Dam Construction Project today. The trapezoidal CSG dam is a new type of dam developed in Japan. The construction record of the trapezoidal CSG dam so far is 50m class with a dam height. Naruse Dam is an unprecedented 100m class large-scale dam. This paper introduces the design method of the trapezoidal CSG dam, and reports on the stability of the dam body and the rational zoning of the CSG of the Naruse Dam.

Keywords : *trapezoidal CSG dam, CSG, FEM, stress analysis, dam body stability*

1. はじめに

近年、ダム建設においては条件に見合う堤体材料を採取できる原石山を確保することが困難になっており、歩留りの低下、掘削法面の長大化等によるコストの上昇や環境負荷の増大が大きな課題となってきた。このため、コスト縮減と環境負荷軽減に資するための“材料の合理化”に関する技術開発が望まれていた。台形 CSG ダムは、この経済性、環境の両面で対処すべき最も大きい技術課題であると考えられる“材料の合理化”を図ることを第一に、同時に“設計の合理化”、“施工の合理化”にも資することを目的に開発された新型式のダムである。

台形 CSG ダムは河川管理施設等構造令¹⁾第 73 条第 4 号(以下、「構造令」という)に規定されない特殊構造のダムであるため、大臣特認制度が適用される。

これまで 4 基の台形 CSG ダムが完成しているが、いずれも堤高 50m 級である(表-1)。現在建設中の成瀬ダムは、これまでの実績を大きく超える 100m 級の台形 CSG ダムであり、様々な設計上の課題解決が必要であった。

本稿では、成瀬ダムの堤体安定性の検討、合理的な CSG のゾーニング設定方法について検討した結果を報告する。

2. CSG と台形 CSG ダムの特徴²⁾

(1) CSG の特徴

1) CSG の製造

“CSG”とは Cemented Sand and Gravel の略である。建設現場周辺で手近に得られる材料を、破碎・分級による粒度調整や洗浄を基本的に行うことなく、必要に応じてオーバーサイズ(80mm 以上)の除去や破碎を行う程度で、セメント、水を添加し、簡易な施設を用いて混合したものである。

ダムで用いるコンクリートは、骨材の原料となる「原石」を採取して、これを破碎・洗浄・分級によりほぼ一定の粒度分布とした「骨材」を製造し、骨材に定量の水とセメントを加えて混合して製造する。これに対し CSG は、図-1 に示すようにコンクリートの原石および骨材に相当するものを、それぞれ「母材」および「CSG 材」と称し、CSG 材にセメント・水を加えて混合したものを「CSG」と称している。

表-1 台形 CSG ダムの実績

ダム名	所在地	堤高	完成年
当別ダム	北海道	52.0 m	2012 年
金武ダム	沖縄県	39.0 m	2013 年
サンルダム	北海道	46.0 m	2018 年
厚幌ダム	北海道	47.2 m	2018 年
成瀬ダム	秋田県	114.5 m	建設中
三笠ぼんべつダム	北海道	53.0 m	計画中
本明川ダム	長崎県	60.0 m	計画中
鳴瀬川ダム	宮城県	107.5 m	計画中
鳥海ダム	秋田県	81.0 m	計画中

* コンサルティング事業統括本部 河川水資源事業部 ダム発電部

** コンサルティング事業統括本部 河川水資源事業部

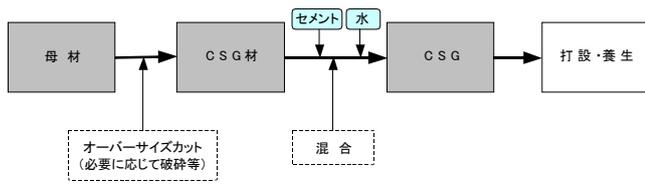


図-1 CSG の製造工程²⁾

2) CSG の強度(「ひし形理論」)

CSG に用いる CSG 材は、基本的に分級、粒度調整、洗浄等を行わないことから当然その粒度と表面水量は変動する。粒度、表面水量が変動すれば、その材料を用いる CSG の単位水量も一定にできず変動する。したがって CSG の強度は、CSG 材の粒度、単位水量が変動することを前提に設定することとなる。

この課題を解決した手法が、図-2 に示す「ひし形理論」であり、この手法により CSG の強度が定義可能となっている。具体にはバラツキを有する粒度、単位水量の中で CSG 強度の最低値を CSG 強度とするものである。

また、CSG の応力-ひずみの関係の例を図-3 に示す。この図から、CSG が弾塑性体の特徴を示す材料であることがわかる。この図の直線関係にある範囲(弾性領域)の最大値を CSG の強度としており、設計は「弾性体」として挙動する領域の応力範囲で行う。このことから、台形 CSG ダムでは二次元弾性 FEM 解析を用いた応力解析により安定性検討を実施する。重力式コンクリートダムでは、堤体を変形しない「剛体」と仮定した安定計算手法を用いる点においても大きく異なっている。

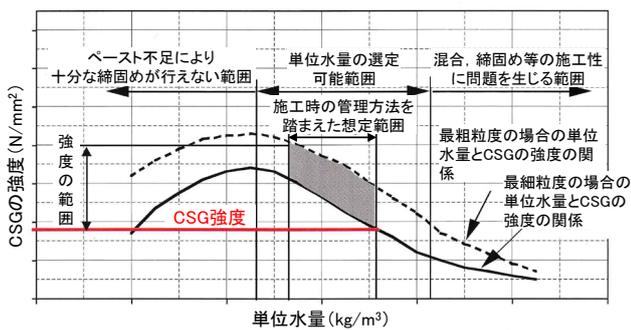


図-2 CSG 粒度の幅と単位水量管理範囲から求まる CSG 強度の範囲「ひし形理論」²⁾

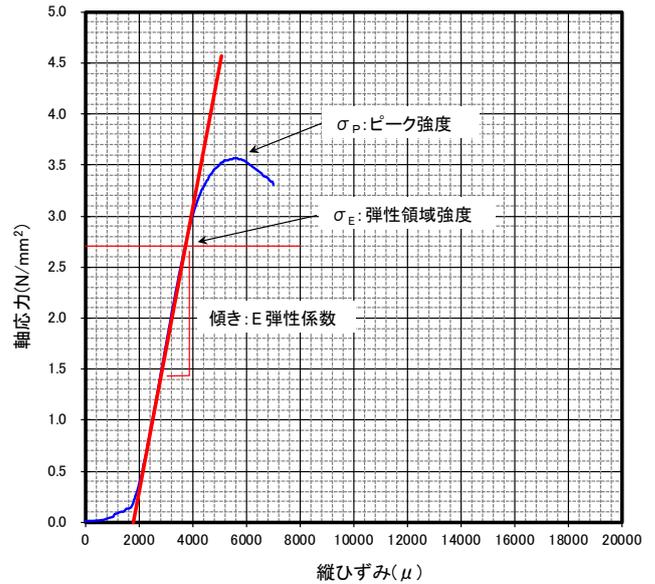


図-3 CSG の応力-ひずみ曲線(例)

(2) 台形 CSG ダムの特徴

台形 CSG ダムは、堤体形状が台形であり堤体材料として CSG を用いる、重力式コンクリートダムやフィルダムと異なった新形式のダムである。

その設計、施工、品質管理に関する技術は我が国で開発された独自技術であり、開発には当社社員が大きく関わっている。

台形 CSG ダムの特徴は以下のとおりである。

1) 材料の合理化

台形 CSG ダムでは、堤体の必要強度が小さく、材料強度への要求性能が低いため、低品質な材料の利用が可能となり、材料選定の幅が広がる。

一方、重力式コンクリートダムでは、転倒・滑動に対する安定性(外的安定性)を満足する最小断面を決定し、発生応力に対する安定性(内的安定性)を満足するようにコンクリート配合を設定するという設計手順であり、「材料の合理化」という点において大きく異なる。

2) 設計の合理化

台形形状にすることにより、地震時の安定性が向上し、堤体材料の必要強度を小さくできる。また、摩擦抵抗のみで滑動に対抗するため、堤体基礎岩盤に要求される岩盤強度も低くなり、ダムサイト選定の自由度が広がる。

3) 施工の合理化

台形 CSG ダムでは、材料製造設備が極めて簡単となり、また連続混合装置の採用により高速施工が可能となる。

4) 台形 CSG ダムの標準断面

また、台形 CSG ダムは次のような構造上の特徴を有している。図-4 に台形 CSG ダムの標準断面を示す。

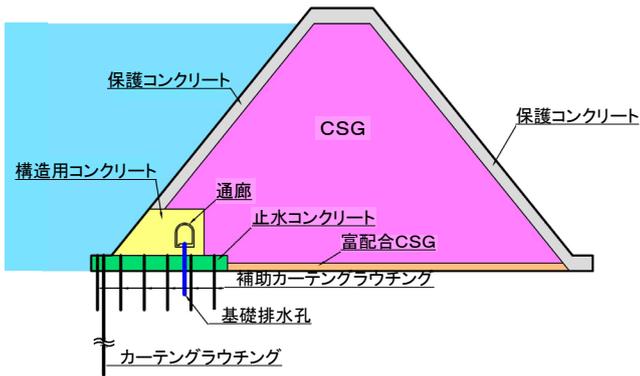


図-4 台形 CSG ダムの標準断面図²⁾

- 堤体材料として CSG を用い、表面には CSG の耐久性の確保を目的とした保護コンクリートを配置する。
- 上流面下部に通廊、構造用コンクリートおよび浸透路長の確保のための止水コンクリートを設ける。
- 堤体底面の CSG には、基礎岩盤との密着性および耐久性に配慮して富配合 CSG (着岩部 CSG) を用いる。
- 基礎岩盤との着岩面は、全域を堤体の滑動抵抗を確保する区域とし、上流側には水密性を確保する区域を設ける。水密性の確保区域はモルタルを敷設して堤体と基礎岩盤を一体化する。

3. 成瀬ダムの概要と台形 CSG ダム(型式)の採用

(1) 成瀬ダムの概要³⁾

成瀬ダムは雄物川水系成瀬川に建設される多目的ダムである(図-5、図-6)。ダムは、高さ 114.5m、堤体積 4,850 千 m³、総貯水容量 78,500 千 m³、有効貯水容量 75,000 千 m³ で洪水調節、流水の正常な機能の維持、かんがい用水の補給、水道用水の供給および発電を目的とする台形 CSG ダムである。

成瀬ダムおよび貯水池の諸元を表-2、表-3、貯水池容量配分図を図-7 に示す。



図-5 成瀬ダム完成イメージ図⁴⁾



図-6 成瀬ダム位置図⁴⁾

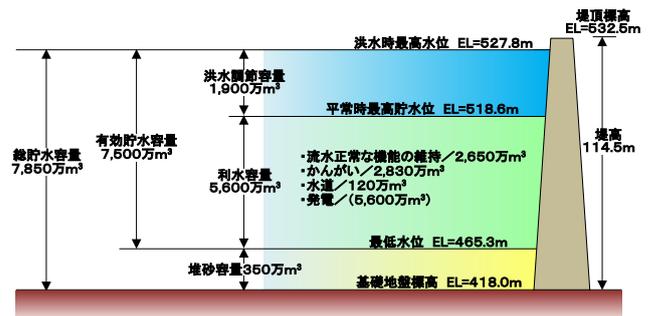


図-7 成瀬ダム貯水池容量配分図⁴⁾

表-2 成瀬ダム諸元

ダム諸元		
型	式	台形 CSG ダム
堤	高	114.5m
堤	頂 長	755.0m
堤	体 積	4,850 千 m ³
堤	頂 標 高	EL.532.5m
非	越 流 部 標 高	EL.532.5m
堤	体 法 勾 配	上流 1:0.8 下流 1:0.8
堤	頂 幅	8.0m
設	計 洪 水 位	EL.531.5m
サ	ーチャージ水位	EL.527.8m
常	時 満 水 位	EL.518.6m
最	低 水 位	EL.465.3m
洪	水 調 節 方 式	オリフィスによる自然調節方式
計	画 高 水 流 量	460m ³ /s

表-3 成瀬ダム貯水池諸元

貯水池諸元	
流域面積	68.1km ²
湛水面積	2.26km ²
総貯水容量	78,500 千 m ³
有効貯水容量	75,000 千 m ³

(2) 台形 CSG ダム(型式)の採用

当初、成瀬ダムはロックフィルダム型式で計画されていたが、構造面、環境面、経済性、工期等で台形 CSG ダムの方が有利となることから、本型式を採用することとした。

成瀬ダムの三面図を図-8~図-10 に示す。

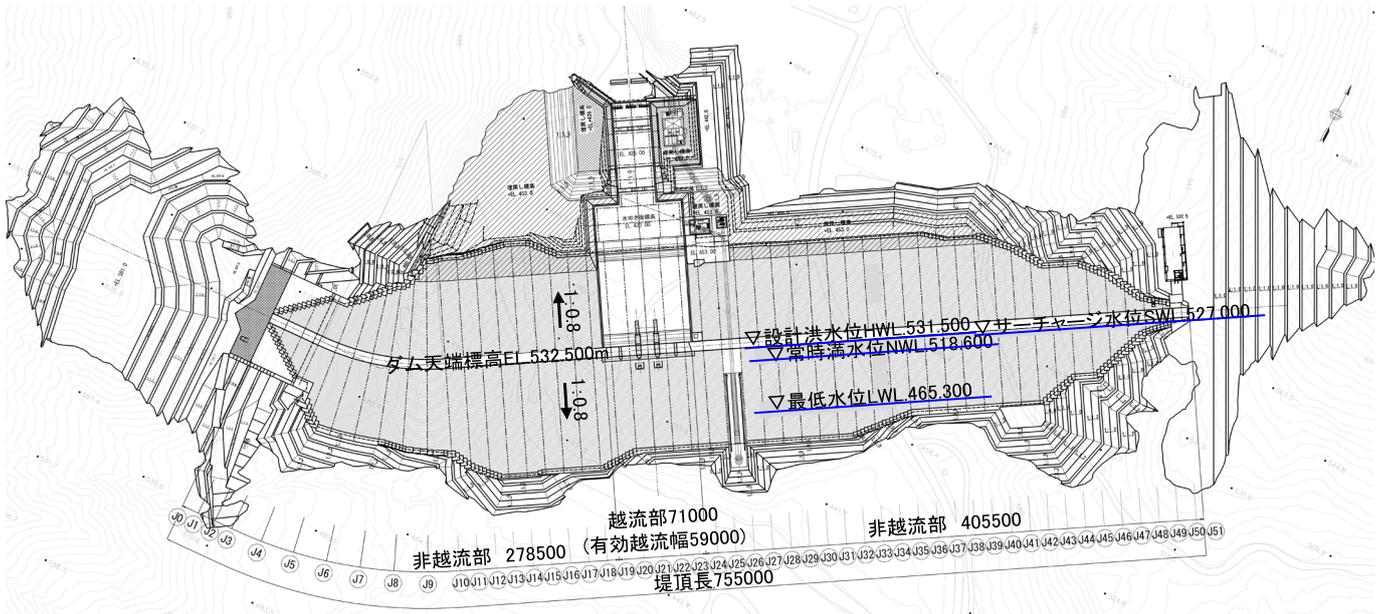


図-8 成瀬ダム平面図

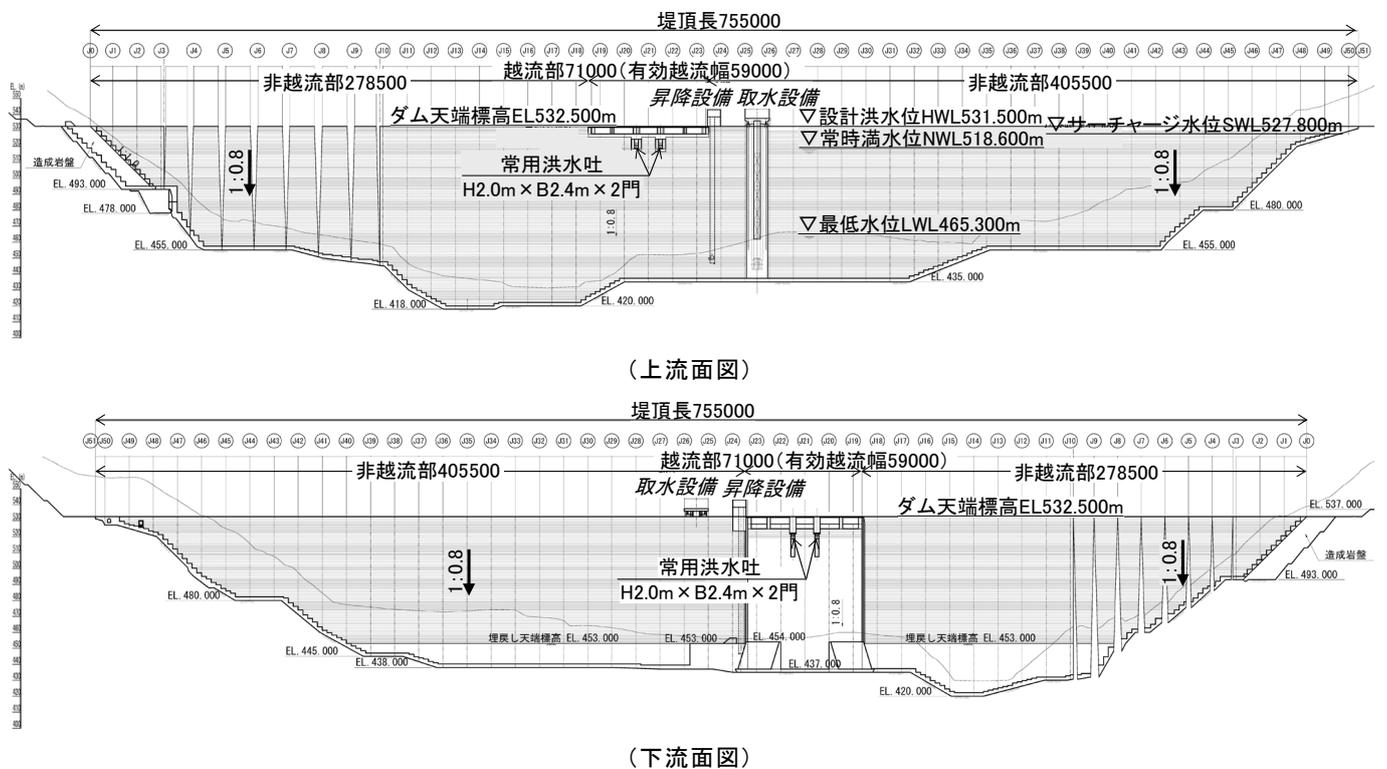


図-9 成瀬ダム上下流面図

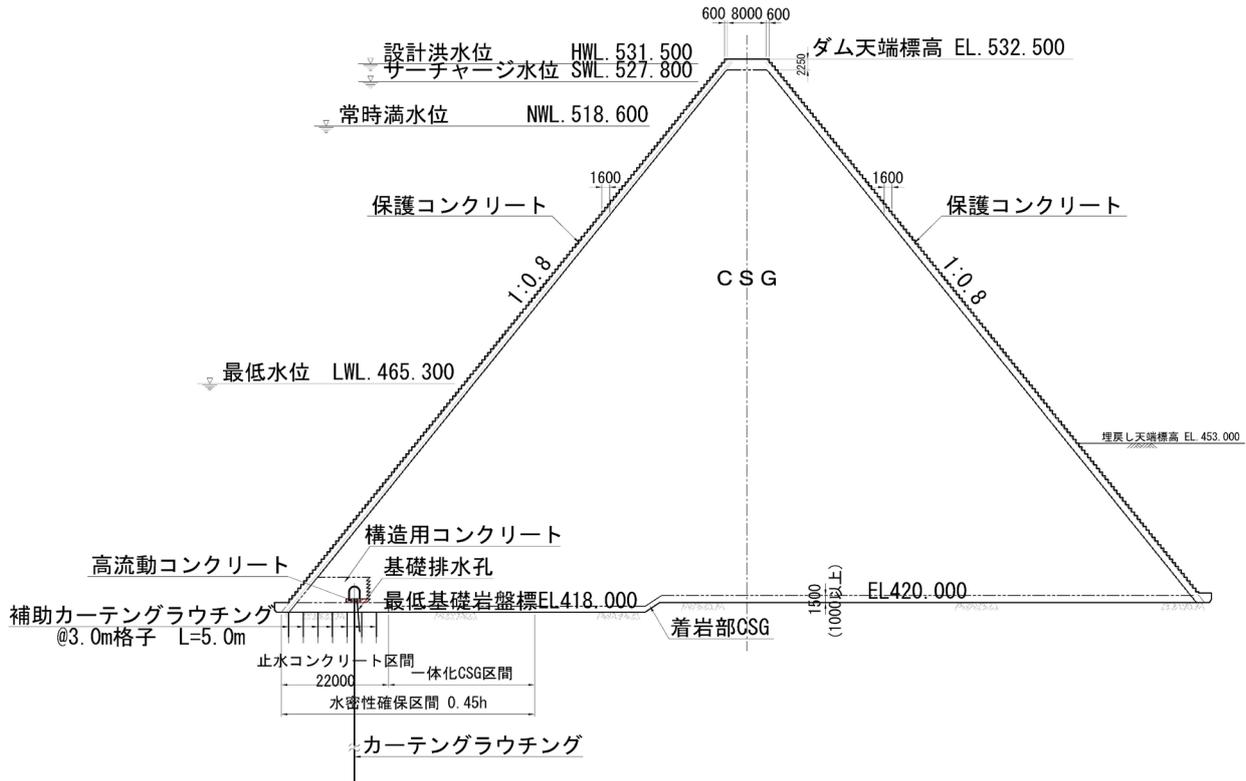


図-10 成瀬ダム標準断面図

4. 成瀬ダムの堤体設計

成瀬ダムの堤体設計は「台形 CSG ダム 設計・施工・品質管理技術資料²⁾」に準拠して検討した。以下に、台形 CSG ダムの安定性検討手法を説明する。

(1) 台形 CSG ダムの安定性検討手法²⁾

台形 CSG ダムは「構造令」に規定されない特殊構造のダムであるため、大臣特認制度が適用される。この制度で認定されるためには、他のダム型式と同等の外的安定性と内的安定性が確保されるように設計する必要がある。

外的安定性とは構造物として転倒、滑動に対して十分な安全性を有することであり、内的安定性とは構造物内に発生する応力に対して構造物を構成する材料が必要な強度を有することである。この外的安定性、内的安定性を満足するように台形 CSG ダムは設計されるが、設計の手順は次のとおりである。

①外的安定性(転倒に対する安定性、滑動に対する安定性)を満足する堤体形状(堤体上下流面勾配)を設定する。

②使用する CSG 材と単位セメント量と CSG の強度の関係を求める。

③外的安定性を満足した上で、堤体形状と発生応力、使用する CSG 材と CSG の強度の関係から、内的安定性を満足する最も経済的な堤体形状を選定する。

堤体安定性検討は、二次元 FEM 解析を用いて行う。常時(非地震時)の解析は、自重と静水圧・水重を考慮した静的解

析により実施する。地震時の解析は、地震波を作用させた動的解析により「設計地震時」、「検証地震時」について行う。

1) 設計地震と検証地震

設計地震は、フィルダムの耐震設計指針(案)「修正震度法⁶⁾」における設計地盤震度を参考に地震波の最大加速度を設定する(以下、同指針(案)より抜粋)。

本指針(案)の修正震度法において、地盤震度は次の値とする。

強震帯地域	0.18
中震帯地域	0.16
弱震帯地域	0.13

上記の地盤震度は、新耐震設計法(案)(1977年建設省)の提案によるものであるが、既往のダムサイトにおける観測資料に照らしても適切であるので採用した。なお、強震帯、中震帯、弱震帯の地域区分は、建設省告示 昭和 56 年 10 月 16 日 第 1715 号による。

地盤震度の地域区分は「構造令」で定められている(図-11)。成瀬ダムのダムサイトは中震帯地域(秋田県全域)に属しており、修正震度法における地盤震度は 0.16 であることから、「設計地震時」の動的解析に用いる地震波の最大加速度は 157gal とする。

なお、設計に有限要素法と動的解析を用いることとした大きな理由は、従来の方法に比較して直接的・合理的に外的・内



図-11 強震帯、中震帯および弱震帯地域の区分図¹⁾

的安定性の把握が行えるためであるが、その他、以下の理由による。

- ①有限要素法を用いることにより基礎岩盤の状態(変形性)を考慮した合理的な解析が可能となる。
- ②動的解析法を用いることにより堤体形状の影響が直接的かつ詳細に把握できるようになり、①とあわせて堤体内の応力、底面反力、滑動力等が求められる。
- ③平成 7 年 1 月の兵庫県南部地震後に設置されたダムの耐震性に関する評価検討委員会⁵⁾(以下「委員会」と呼ぶ)で耐震性の検証に用いられたものと同様の手法で解析を行うことができ、フィルダム・コンクリートダムと台形 CSG ダムの安全性の比較・判定が可能となる。

同委員会では、現行設計法を用いて数種の堤高のコンクリートダム、フィルダムの形状を設定し、設定したダムに作用する地震荷重として最大加速度 250gal を与えた動的解析により安全性評価が行われた。その結果、現行設計法で設定された形状のダムは安全上支障がなく、現行設計法は妥当であると判断された。この際に用いられた加速度時刻歴波形は、兵庫県南部地震時に一庫ダム・箕面川ダム・権現ダムで得られた地震記録である。そこで、台形 CSG ダムの設計においても、同委員会で用いられたものと同じ 3 ダムで得られた加速度波形を 250gal に調整したものを「検証地震」として用いて動的解析を行い、安全性が満足されることを確認することにより、コンクリートダム、フィルダムと同等の機能を保有していることを判断し得ることとなる。

2) 入力地震動

動的解析に用いる入力地震動の加速度時刻歴波形を図-12～図-14 に示す。

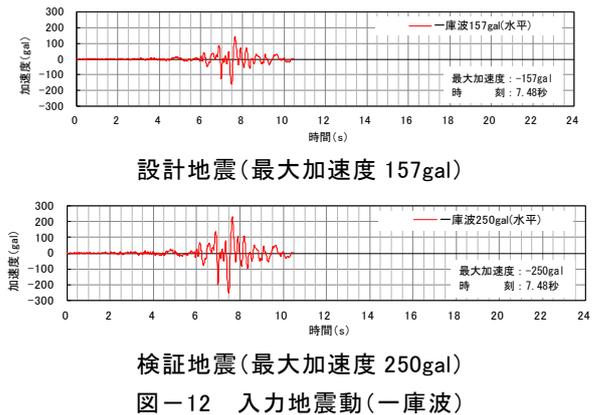


図-12 入力地震動(一庫波)

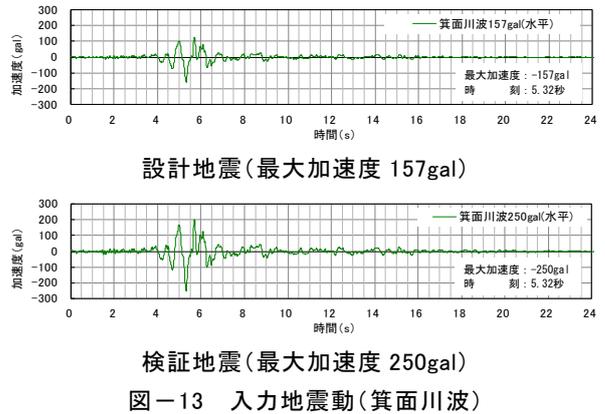


図-13 入力地震動(箕面川波)

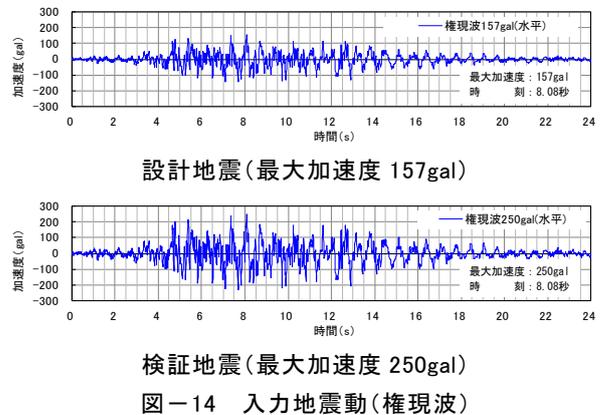


図-14 入力地震動(権現波)

3) 荷重条件

台形 CSG ダムの設計荷重を表-4 に示す。考慮する荷重は一般にダムの設計で用いられるものと同じである。揚圧力は外的安定性の検討時に作用させる。また、解析に用いる地震波は、検討水位に関わらず同じ波形を用いる。

設計地震時および検証地震時の堤体発生応力は、静的荷重(自重、静水圧、水重)を考慮した静的解析結果と、動的荷重(地震時慣性力、動水圧)を考慮した動的解析結果を足し合わせるにより算出する(図-15)。

表-4 設計荷重

状態	荷重	検討水位
常時 (非地震時)	自重、静水圧、水重、揚圧力	設計洪水水位 サーチャージ水位 常時満水位 最低水位
設計地震時 (157gal)	自重、静水圧、水重、地震時慣性力、地震時動水圧、揚圧力	サーチャージ水位 常時満水位 最低水位
検証地震時 (250gal)	自重、静水圧、水重、地震時慣性力、地震時動水圧、揚圧力	サーチャージ水位 常時満水位 最低水位

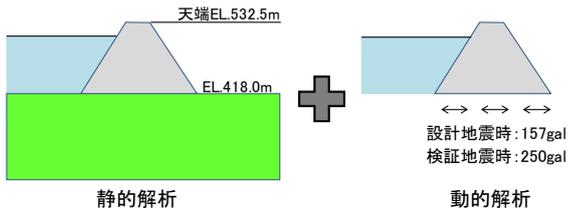


図-15 静的解析と動的解析

表-5 検討ケースと所要安全率

水位条件	常時 (非地震時)	地震時	
		設計 地震時 (157gal)	検証 地震時 (250gal)
設計洪水水位	2.0	—	—
サーチャージ水位	2.0	1.5	1.2
常時満水位	2.0	1.5	1.2
最低水位	2.0	1.5	1.2

4) 検討ケースと安全率

前述の荷重条件より、検討ケースは各水位条件について常時、設計地震時、検証地震時の3ケースとなる(設計洪水水位は常時のみ)。各検討ケースに対する所要の安全率は表-5に示すとおり設定されている。

5) 安定性検討手法

安定性検討は外的安定性(転倒・滑動)、内的安定性について行う。

① 転倒に対する安定性

転倒に対する安定性は、解析で得られた堤体底面各部の鉛直応力から揚圧力相当の応力を差し引いた後の堤体底面の鉛直応力が基本的に圧縮側となることを安定条件とする。

② 滑動に対する安定性

滑動に対する安定性は、(1)式により必要な抵抗力を有すること(滑動安全率 F_s が常時 2.0、設計地震時 1.5、検証地震時 1.2 以上であること)を安定条件とする(表-5)。鉛直力の算出は、転倒に対する安定性と同様に解析で得られた堤体底面各部の鉛直応力から揚圧力相当の応力を差し引いた鉛直応力を用いる。

$$F_s = f \times V / H \quad (1)$$

ここに、 F_s : 滑動安全率(表-5に示す値)

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

③ 内的安定性

外的安定性で定まった形状に対して、内的安定性の検討は、(2)式により、堤体に発生する圧縮応力および引張応力から定まる必要 CSG 強度 S_{max} が、CSG 試験により検討される CSG 強度以下となることを確認する。

$$S_{max} = \max [(F \times \sigma_c), (F \times \sigma_t')] \quad (2)$$

$$\sigma_c' = |\sigma_t| \times k \quad (3)$$

ここに、 S_{max} : 必要 CSG 強度

σ_c' : 換算圧縮応力 (k : 換算係数)

σ_t : 引張応力

F : 安全率(表-5に示す値)

換算係数 k は、CSG の割裂引張試験によって得られる引張強度と圧縮強度の比で求められる。成瀬ダムの CSG 試験結果から、換算係数は 7 とした。

(2) 成瀬ダムの安定性検討

成瀬ダムで設定した安定計算条件と安定計算結果を以下に示す。

1) 検討断面と FEM 解析モデル

検討断面は荷重条件が最も厳しくなる河床部最大断面とした。河床部最大断面の位置を図-16に、横断面図を図-17に示す。基礎岩盤は河床部最大断面の岩盤状況(図-16)より A1 級岩盤を含む B1 級岩盤主体であることから、図-18に示す B1 級岩盤一様モデルとした。



図-16 検討断面位置(ダム軸縦断面岩級区分図)

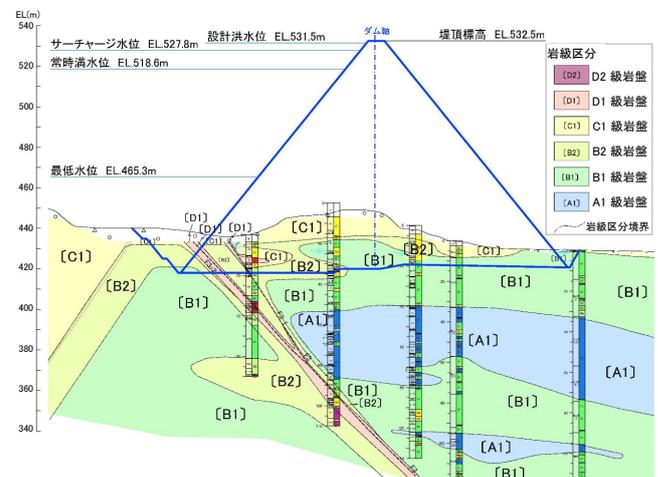


図-17 河床部最大断面(横断面岩級区分図)

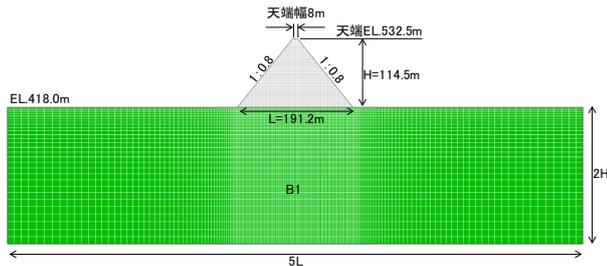


図-18 河床部最大断面 FEM 解析モデル

表-6 解析に用いる主な物性条件一覧

項目	設定値	
ダム天端標高	EL.532.5m	
最大断面の基礎標高	EL.418.0m	
最大断面の堤高	114.5m	
設計震度	設計地震	最大加速度 157gal (0.16G)
	検証地震	最大加速度 250gal
単位体積重量	CSG	内的安定性検討: 22.1kN/m ³ 外的安定性検討: 20.1kN/m ³
	貯水	9.8kN/m ³
弾性係数	CSG	3,500N/mm ²
	基礎岩盤	B1 級岩盤: 3,500N/mm ²

2) 物性条件

CSG の弾性係数、単位体積重量は大型供試体試験結果 (材齢 91 日) より設定した。なお、本検討では、100m 級台形 CSG ダムの安定性を十分に確保するため、バラツキを有する CSG の物性を考慮して安全側に設定した。また、基礎岩盤の弾性係数は孔内水平載荷試験結果より設定した。解析条件一覧を表-6 に示す。

3) 安定性検討結果

一庫ダム、箕面川ダム、権現ダムで観測された 3 波形の加速度時刻歴波形を用いて検討を行った。堤体安定性の評価は、以下のとおりである。

①外的安定性

外的安定性の検討結果の例を表-7 に示す。上下流面勾配を試行して検討した結果 1:0.8 とすることにより、転倒に対しては、堤体底面の鉛直応力は、全てのケースで基本的に圧縮側である。上流端で最大 0.62N/mm² の引張応力が生じているが、その範囲は止水コンクリート部であり、この範囲は敷モルタルを施工して堤体と基礎岩盤の一体化を図る部分であるため問題ない(図-19:サーチャージ水位時の例)。

滑動に対しては、滑動係数 F_s はいずれのケースも必要滑動係数を満足する(図-20:サーチャージ水位時、検証地震時の例)。

②内的安定性

内的安定性の検討結果を表-8 に示す。外的安定性で定めた基本形状(上下流面勾配 1:0.8)での必要 CSG 強度は 4.5N/mm² 以下である(図-21)。CSG 試験の結果、単位セメント量を 140kg/m³ とすれば CSG 強度 4.5N/mm² を確保でき、内的安定条件を満足する。

表-7 安定性検討結果(外的安定性)

検討条件	所要安全率	外的安定性 (転倒)		外的安定性 (滑動)		
		堤体底面の最小鉛直応力 [N/mm ²]	鉛直力 ΣV [MN]	水平力 ΣH [MN]	滑動安全率 F_s	
設計洪水水位	常時	2.0	0.25	172.56	64.67	2.67
	常時	2.0	0.20	174.04	60.84	2.86
サーチャージ水位	設計地震時	1.5	0.46	182.49	115.89	1.57
	検証地震時	1.2	0.62	188.17	148.51	1.27
常時満水位	常時	2.0	0.08	173.68	51.38	3.38
	設計地震時	1.5	0.33	180.18	102.72	1.75
検証地震時	検証地震時	1.2	0.48	184.59	133.12	1.39
	常時	2.0	-0.44	185.48	11.23	16.51
最低水位	設計地震時	1.5	-0.22	186.54	54.32	3.43
	検証地震時	1.2	-0.09	187.16	79.84	2.34

※1) -:圧縮応力、+:引張応力
※2) 黄色のハッチングは最も厳しいケース

表-8 安定性検討結果(内的安定性)

検討条件	所要安全率	内的安定性			
		引張応力 [N/mm ²]	圧縮応力 [N/mm ²]	必要 CSG 強度 [N/mm ²]	
設計洪水水位	常時	2.0	-	-2.17	4.3
	常時	2.0	-	-2.10	4.2
サーチャージ水位	設計地震時	1.5	-	-2.61	3.9
	検証地震時	1.2	-	-2.92	3.5
常時満水位	常時	2.0	-	-1.94	3.9
	設計地震時	1.5	-	-2.42	3.6
検証地震時	検証地震時	1.2	-	-2.70	3.2
	常時	2.0	-	-1.58	3.0
最低水位	設計地震時	1.5	-	-1.89	2.8
	検証地震時	1.2	-	-2.14	2.6

※1) -:圧縮応力、+:引張応力
※2) 黄色のハッチングは最も厳しいケース
※3) 引張応力値の“-”は、引張応力が発生していないことを表す

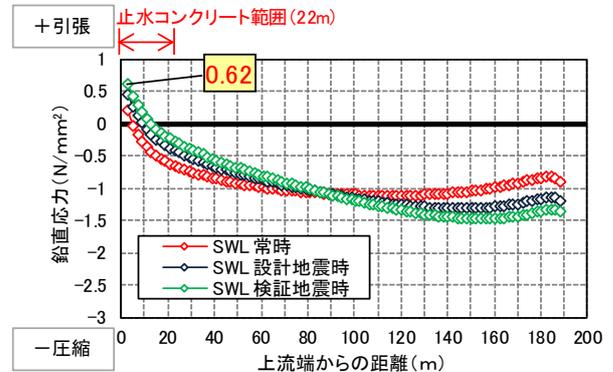


図-19 堤体底面の鉛直応力分布 (サーチャージ水位時)

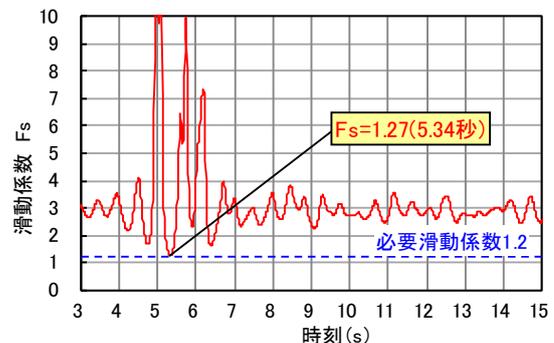


図-20 滑動係数時刻歴 (サーチャージ水位時、検証地震時)

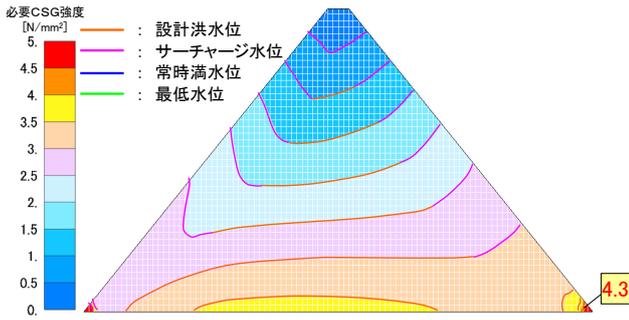


図-21 河床部最大断面の必要CSG強度 (全ケース重ね合せ)

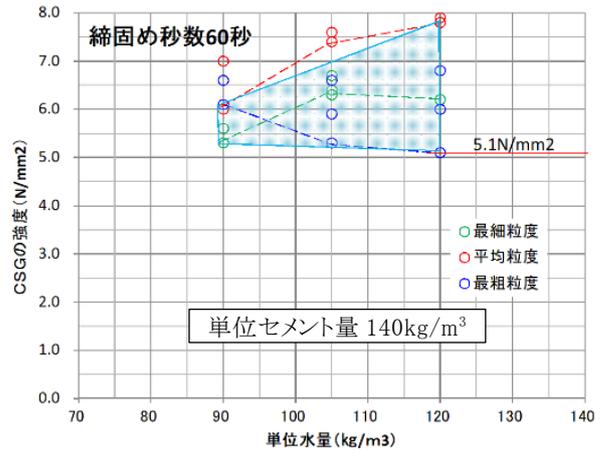


図-22 (2) 成瀬ダムの「ひし形」の例(設計時)
(ダムサイト段丘堆積物: 赤滝原石材=40:60)
【単位セメント量 140kg/m³】

(3) CSG のゾーニング設定方法

CSG のゾーニング(単位セメント量の配置)は、CSG 試験を実施して単位セメント量毎に「ひし形理論」で定める CSG 強度に対し、堤体安定検討から必要となる CSG 強度を満足するよう検討する。

成瀬ダムでは、原石山の破碎材と段丘堆積物を 50:50 または 60:40 でブレンドして CSG とすることとし、単位セメント量を 80kg/m³~140kg/m³ とした大型供試体試験を行い「ひし形」を設定した。図-22 に成瀬ダムのひし形設定の例を示す。

図-23 には段丘堆積物の採取箇所毎かつセメント量毎に CSG 試験を実施した結果を示す。これより、最低値を設計に用いる CSG 強度として設定した(同図黒線)。

これまでの台形 CSG ダムは 50m 級であったことから、CSG の単位セメント量は 80kg/m³ を基本とし、堤体上部では 60kg/m³ に縮減する程度の簡易な CSG ゾーニングであった。

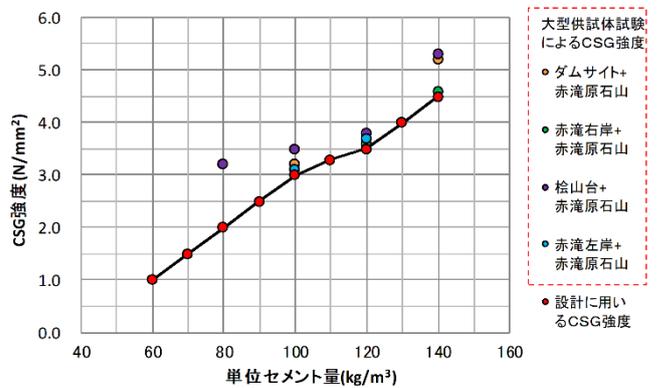


図-23 各単位セメント量における CSG 強度(設計時)

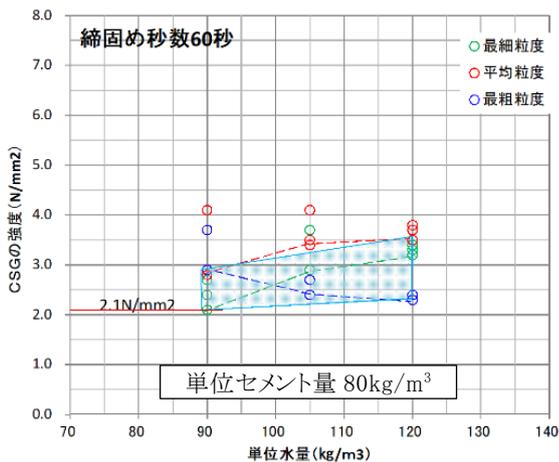


図-22 (1) 成瀬ダムの「ひし形」の例(設計時)
(ダムサイト段丘堆積物: 赤滝原石材=40:60)
【単位セメント量 80kg/m³】

成瀬ダムの堤高は 114.5m とこれまでの台形 CSG ダムに比べ大規模であり、コスト縮減の観点から、堤高 10m 毎に CSG の必要強度を解析算定し、単位セメント量 10kg/m³ 毎のゾーニングを行うことを本邦初に行った。検討は図-24 に示すように、次のステップで行った。

ステップ 1: 河床部から高標高部までの堤高 10m 毎の断面について、常時および地震時(3 波)における必要強度を算出する。

ステップ 2: 常時および地震時(3 波)それぞれで 10 断面の必要強度を重ね合わせる。

ステップ 3: 地震時 3 波の必要強度を重ね合わせる。

ステップ 4: 常時と地震時 3 波の必要強度を重ね合わせる。

図-25 に各堤高の常時、地震時(3 波形)の CSG の必要強度を重ね合わせた図(ステップ 4)を示す。

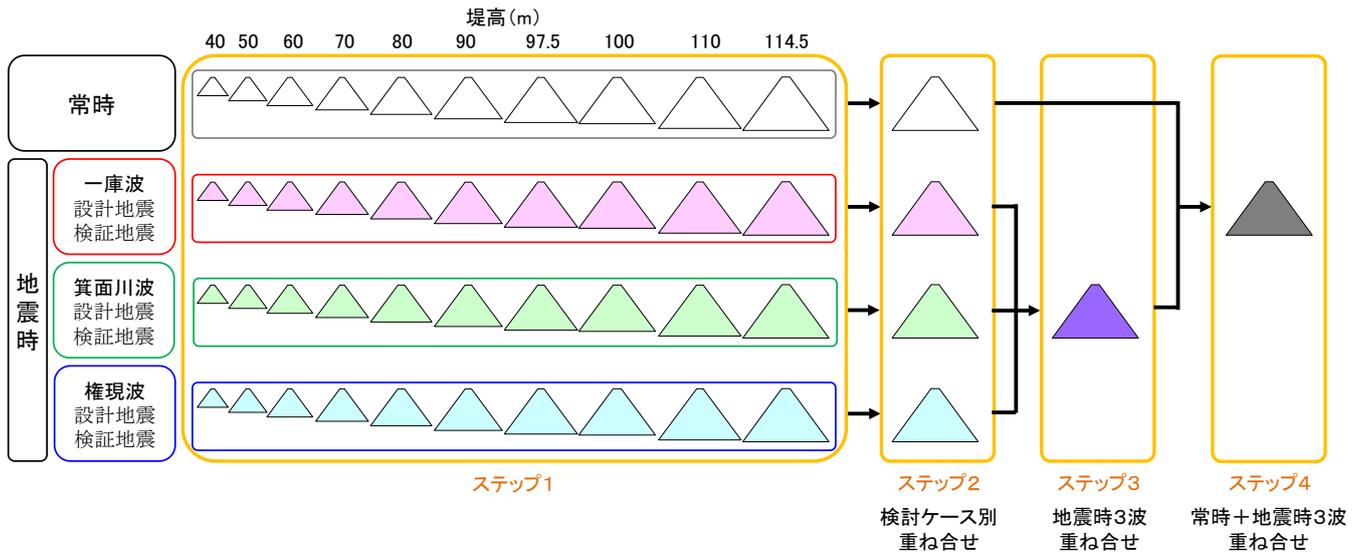


図-24 CSG の必要強度の検討ステップ

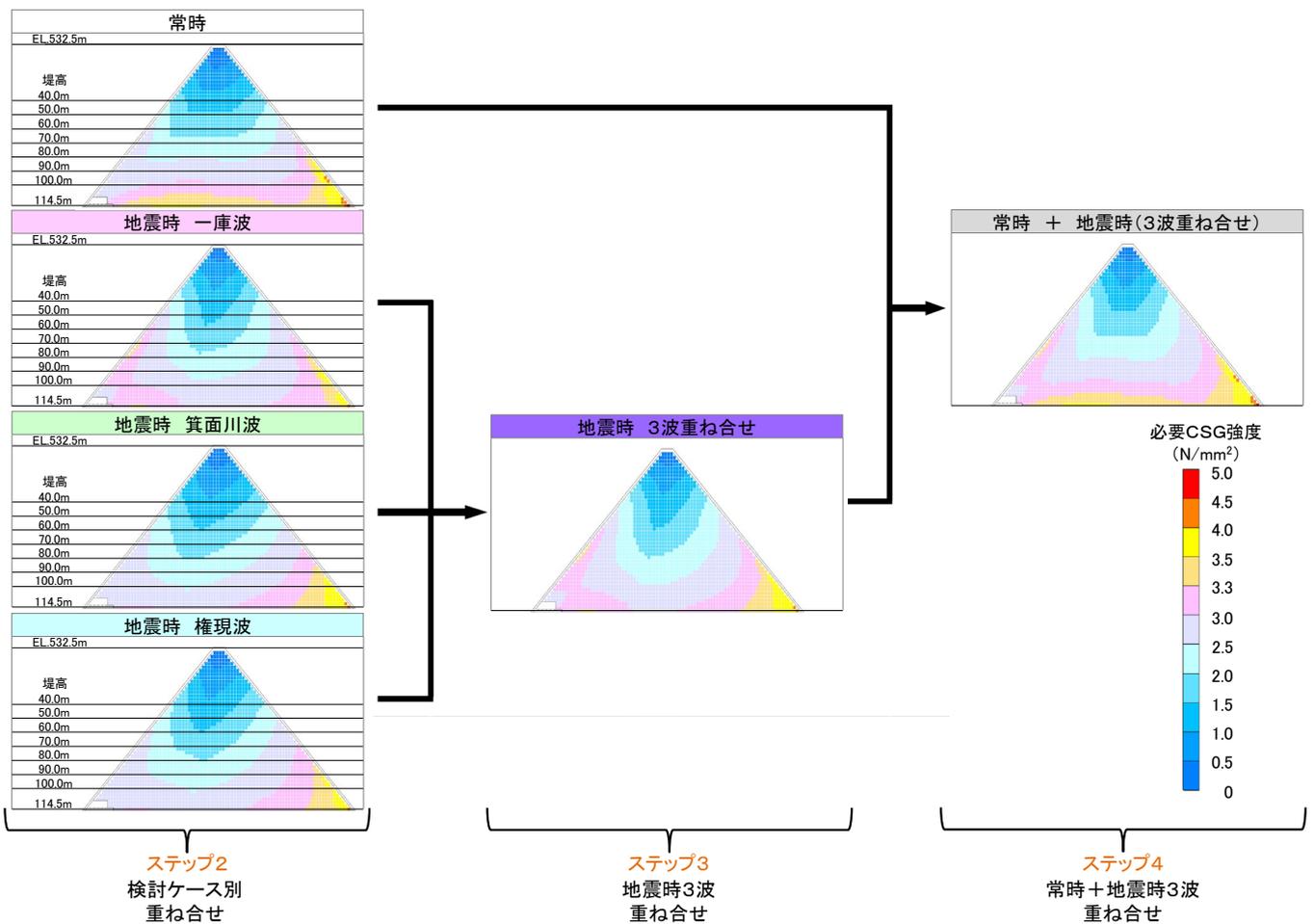


図-25 CSGの必要強度の重ね合せ

ステップ 4 で重ね合せた各堤高の CSG 必要強度を踏まえて作成したダム全体の CSG の必要強度マップを図-26 に示す。ここで、必要強度は、CSG の単位セメント量毎の CSG 強度に対応して区分している(同図凡例参照)。

CSG ゾーニングの設定に際しては、施工が煩雑にならないように、水平レヤ打設を行う CSG の同一リフト内(標高)ではセメント量を 2 配合までとし、上下流面際の施工幅は最低 20m を確保した。検討図(図-26)から定めた CSG ゾーニング区分図を図-27 に示す。

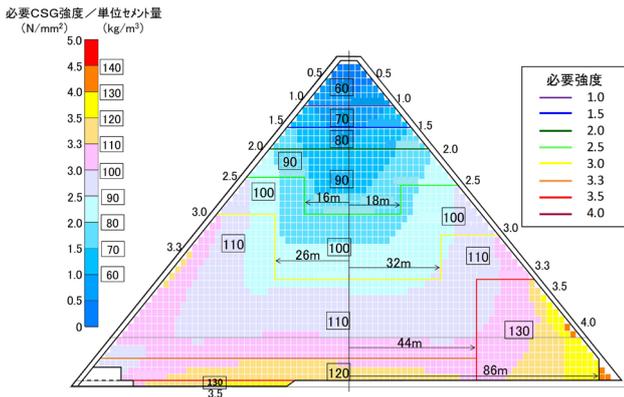


図-26 必要強度マップと CSG ゾーニング検討図

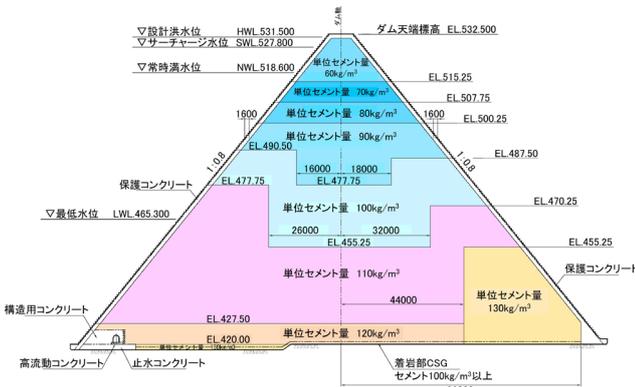


図-27 CSG 配合のゾーニング図(設計時)

5. まとめ

成瀬ダムは、既往の台形 CSG のダム規模を大きく超える 100m 級のダムで、多くの課題がある中から本稿では堤体の安定性、CSG の合理的なゾーニングについて報告した。検討結果をまとめると以下のとおりである。

①既往の実績を大きく超える大規模台形 CSG ダムの堤体安定性

台形 CSG ダムは河川管理施設等構造令に規定されない特殊構造のダムであるため、大臣特認制度が適用され、他のダム型式と同等の安全性が確保されるように設計する必要がある。本稿は技術資料²⁾に示される台形 CSG ダムの設計手法を紹介しながら述べたが、この手法は弾性体であるコンクリートダムの梁理論による震度法の設計とは異なり、有限要素法を用いることにより、基礎岩盤条件および動的地震荷重を設計に取り組みることができるものである。このため、250gal という大規模地震時の荷重も精度よく作用させることが可能な説明性の高い設計手法である。

しかし、成瀬ダムの堤高は既往実績ダムの 2 倍以上であり、堤体積に比例して地震時慣性力も大きくなることから、大規模地震時にも所要の安全性が確保することができるかが最大の課題であった。

本稿で、成瀬ダムの堤体規模、基礎岩盤条件、堤体 CSG 材料強度を適切に評価し解析した結果、既往の実績を大きく

超える堤高 100m 級台形 CSG ダムの外的安定性および内的安定性が確保可能な堤体基本形状を設定できた。

②合理的な CSG ゾーニングの設定

堤体規模が大きい成瀬ダムでは CSG 量が約 450 万 m³ と多く、CSG の単位セメント量が工事費に大きく影響する。既往の 50m 級の台形 CSG ダムでは CSG の単位セメント量は 2 種類程度の簡易なゾーニングを行っていたが、成瀬ダムでは堤高 10m 毎に必要な CSG 強度を算定し、ダム全体の CSG ゾーニング(単位セメント量の配置)を合理的に行い、コスト削減を図ることが可能となった。

6. おわりに

～成瀬ダム工事の現状と CSG 技術の今後の展開～

令和 3 年 11 月現在、成瀬ダムは基礎掘削工事をほぼ終了し、堤体打設を行っているところであり、基礎岩盤条件が異なった箇所では解析検討を行って堤体安定性を確認している。

また、台形 CSG ダムで開発された堤体材料選定、設計・施工法は、基礎岩盤の要求性能が小さく、通常廃棄されるような材料も堤体発生応力に応じて有効利用でき、面状工法により高速施工が可能なものである。また、CSG は盛土工よりも法面勾配を急傾斜にすることができ、強度もあることから、河道を閉塞させない貯水池内の地すべり対策工、越流抵抗性が必要な海岸防潮堤にも応用されており、今後、他の土木構造物への発展も期待されているところである。



写真-1 成瀬ダムの施工状況(2021.11.03 上流より望む)

参考文献

- 1) 公益社団法人日本河川協会:改定 解説・河川管理施設等構造令
- 2) 一般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
- 3) 国土交通省東北地方整備局成瀬ダム工事事務所:成瀬ダムパンフレット
- 4) 国土交通省東北地方整備局成瀬ダム工事事務所:ホームページ
- 5) 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、1995.11
- 6) 建設省河川局:フィルダムの耐震設計指針(案)、平成 3 年 6 月