

14.1 台形 CSG ダムの材料特性と設計方法に関する研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 18～平 22

担当チーム：ダム構造物チーム

研究担当者：山口嘉一、岩下友也、切無沢徹

【要旨】

環境への負荷軽減、コスト縮減、材料の有効利用の観点から、ダム建設における CSG（Cemented Sand and Gravel）の本格的な導入が望まれている。CSG はコンクリートに比較し、低強度で品質のばらつきが大きいという特徴を有するため、室内試験や現場試験により、材料特性に関する検討が進められるとともに、締切堤などのダム関連工事において施工事例が増加してきており、本ダムの施工も始まっているところである。しかし、施工事例に対するフィードバック研究が不足しているため、CSG の合理的な配合設計・品質管理方法について体系的な検討がなされていないのが現状である。また、CSG の繰り返し載荷時の強度・変形特性、クリープ特性などは十分に解明されていないため、これらについての検討を進め台形 CSG ダムの長期信頼性を保証する方法を開発する必要がある。さらに、CSG の最大の特徴である、材料強度のばらつきを考慮したダムの設計方法を開発する必要がある。

平成 21 年度は、長期信頼性を考慮した CSG の強度指標を提案することを目的とし、長期的な CSG の変形特性を把握するためのクリープ試験を継続的に実施するとともに、CSG の物性のばらつきを考慮したモンテカルロシミュレーション解析を行い、台形 CSG ダムの強度特性のばらつきが堤体の安全性に与える影響について検討を行った。

キーワード：ダム、CSG、長期載荷試験、クリープ、ばらつき、モンテカルロ法

1. はじめに

台形 CSG（Cemented Sand and Gravel）ダムは堤体内に局部的に大きな応力が発生することなく、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、従来のダムコンクリートでは使用することができなかった低品質な材料を分級することなく利用する CSG 工法を組み合わせることにより「設計の合理化」、「材料の合理化」、「施工の合理化」の 3 つの合理化を同時に達成する新形式のダムである。

CSG は現地発生材に必要最小限の処理を施すことで作製したセメント硬化体であるため、従来のダムコンクリートに比較して品質のばらつきが大きく、かつ CSG 母材の違いによりそのばらつき特性が大きく異なるという特徴を有している。このため、室内試験や現場試験により、材料特性に関する検討が進められるとともに、ダムの関連工事においては、仮締切堤や副ダムなどの施工事例が増加してきている。また、本ダムの施工も始まっているところである。しかし、CSG の合理的な配合設計・品質管理方法について体系的な検討がなされていないのが現状である。また、CSG の繰り返し載荷時の強度・変形特性、クリープ特性などは十分に解明されていないため、これらについての検討を進め台形 CSG ダムの長期信頼

性を保証する方法を開発する必要がある。

平成 21 年度は、長期信頼性を考慮した CSG の強度指標を提案することを目的とし、CSG の長期載荷時の変形特性を把握するためのクリープ試験を継続的に行うとともに、CSG の強度特性のばらつきを考慮したモンテカルロシミュレーション解析を行い、台形 CSG ダムの強度・弾性係数のばらつきが発生応力や局所安全率に与える影響について検討した。

2. CSG の長期変形特性

2.1 使用材料及び配合条件

供試体製作に使用した CSG 及び RCD の使用材料と材料物性を表-1 に示す。ここで材料とした母材は、コンクリート骨材となりうる堅固な工場製品を用いた。

表-1 CSG 及び RCD の使用材料及び物性値

セメント	普通ポルトランドセメント	
母材 (骨材)	80-40mm (表乾密度 2.60g/cm ³ 吸水率 0.80%)	
	40-20mm (表乾密度 2.59g/cm ³ 吸水率 1.30%)	
	20-10mm (表乾密度 2.59g/cm ³ 吸水率 1.42%)	
	10-05mm (表乾密度 2.59g/cm ³ 吸水率 1.42%)	
	細砂 5mm 以下 (表乾密度 2.58 g/m ³ 吸水率 1.42%)	
	(CSG)	(RCD)
	藤の森粘土 (塑性指数 19.2)	フライアッシュ
	土粒子密度 2.71g/cm ³)	(密度 2.31g/cm ³)

CSG の母材粒度分布を図-1 に示す。CSG 母材粒度分布の粒径 5mm 以上の粒度分布は、CSG で築堤された構造物における CSG 材の粒径加積曲線を参考にした。粒径 0.075mm 以下の微粒分については 6% とした。

RCD の粗骨材の配合比率を表-2 に示す。RCD の使用材料（セメント、粗骨材、細骨材）は CSG と同様のものを用いた。

CSG と RCD の供試体の配合をそれぞれ表-3 と表-4 に示す。配合は CSG については、単位セメント量の違いによる影響を把握することを目的とし、RCD については CSG との対照ケースとして設定した。

2.2 クリープ試験方法

長期載荷時の変形特性を把握するために、クリープ試験を行った。

クリープ試験は、PC 鋼棒式¹⁾を採用し(図-2)、温度 20 ± 3℃、湿度 60 ± 5% の恒温恒湿室で行った。測定は、供試体中央両面に、標点間距離が 100mm となるようにコンタクトチップを貼り、コンタクトゲージを用いて測定した。載荷にあたっては、供試体に載荷荷重が正しく作用しているか確かめるため、予備載荷として 1/2 の載荷応力を加え、一旦除荷した後、本載荷を行った。予備載荷は、載荷応力の 1/2 を加えたとき、2 測点の 2 回計測したひずみの最大値と最小値のひずみの差が最小値の 10% 未満であれば、荷重が正しく作用しているものとみなした。試験は 1 ケースあたり 2 供試体実施した。

また、各ケースにおいて、クリープ載荷しない乾燥収縮の計測を実施し、クリープによるひずみから乾燥収縮によるひずみを差し引いた値をクリープひずみとした。なお、試験の実施にあたっては、設定ケースにより、試験方法が異なるものがある。これについては、試験条件の試験ケースの項にて後述する。

表-2 RCD の粗骨材の配合比率(質量比率)

骨材粒径	比率 (%)
80-40mm	35
40-20mm	35
20-5mm	30

表-3 CSG 供試体の配合

項目	CSG 1	CSG2
最大粒径	40mm (最大粒径 80mm の試料をジェットスクリングしたもの)	
微粒分含有量 (%)	6	6
単位セメント量 (kg/m ³)	80	120
単位水量 (kg/m ³) ※	120	120
養生方法	封緘養生	

※単位水量は、締固め試験の結果、微粒分含有量により締固めができる最適な単位水量として設定した。

表-4 RCD 供試体の配合

項目	RCD	
粗骨材最大寸法 (mm)	40mm (最大粒径 80mm の試料をジェットスクリングしたもの)	
水セメント比 (%)	121	
細骨材率 s/a (%)	31	
単位量 (kg/m ³)	水 W	97
	セメント C	80
	混和材	20
	細骨材 S	694
	粗骨材 G	1532
養生方法	封緘養生	

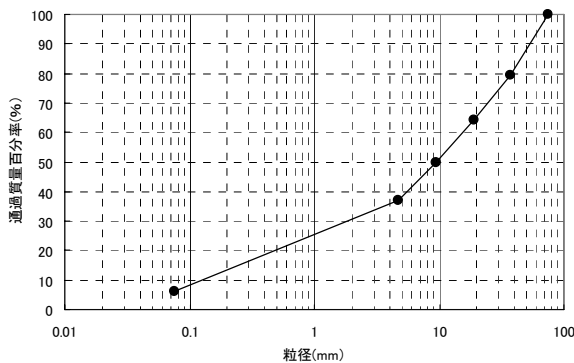


図-1 CSG の母材粒度分布

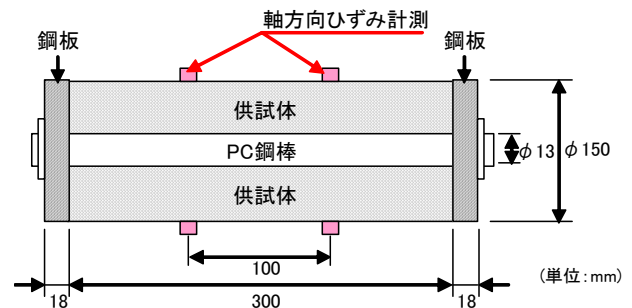


図-2 PC 鋼棒式クリープ試験の模式図

2.3 試験条件

2.3.1 試験ケース

表-5 に試験ケースを示す。クリープには、周囲から水が移動してコンクリートに出入りすることのない状況下でのコンクリートのクリープ（基本クリープ）と、乾燥によって引き起こされる追加的なクリープ（乾燥クリープ）がある（図-3）。ダムにおいては、大きなクリープ荷重を受ける箇所がダム堤体内部であること、また CSG ダムにおいては CSG の周囲を外部コンクリートで被覆することから、乾燥クリープの影響を排したクリープ試験を行った。CSG1、CSG2、RCD は全て、荷荷時材齢 91 日とし、乾燥クリープの影響を排するために、シール（アルミ箔粘着テープ $t=0.5\text{mm}$ ）による被覆をし、封緘状態で荷荷を行った（写真-1）。

CSG1 における荷荷応力については、堤高 50m 級、100m 級のダムを想定し、自重と静水圧により発生する最大圧縮応力（最小主応力の最小値）を後述の FEM 解析により求めた（堤高 50m 級： 0.79N/mm^2 、堤高 100m 級： 1.55N/mm^2 ）。

CSG2 は、堤高 100m 級で発生する応力（ 1.55N/mm^2 ）下においての、CSG の単位セメント量による違いをみるために設定したケースであり、RCD は、CSG との配合による比較を行うために、CSG1 と同様の試験を RCD 供試体で実施したものである。

なお、CSG1 と RCD の堤高 50m 級のダムで発生する応力条件（ 0.79N/mm^2 ）について、封緘状態と気中状態におけるクリープ試験を行うことにより、乾燥クリープ有無によるクリープひずみの比較を行った。

表-5 クリープ試験ケース一覧

配合	単位セメント量 (kg/m ³)	微粒分含有量 (%)	供試体形状 (mm)	荷荷開始時材齢	計測期間	弾性領域強度 σ_e (N/mm ²)	荷荷応力 (N/mm ²)		荷荷状態
CSG1	80	6	$\phi 150 \times 300$	91日	1年	6.8	0.79	堤高50mダム作用応力相当 ($\sigma_e \times 12\%$ 相当)	気中
							1.55	堤高100mダム作用応力相当 ($\sigma_e \times 22\%$ 相当)	封緘
CSG2	120	6				10.8	1.55	堤高100mダム作用応力相当 ($\sigma_e \times 14\%$ 相当)	封緘
RCD	80	-				7.6	0.79	堤高50mダム作用応力相当 ($\sigma_e \times 10\%$ 相当)	気中
							1.55	堤高100mダム作用応力相当 ($\sigma_e \times 20\%$ 相当)	封緘



写真-1 シールによる被覆供試体（封緘状態）

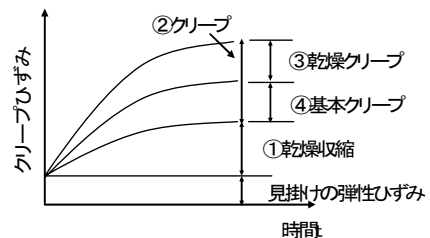


図-3 クリープ

2.3.2 載荷応力の検討

クリープ載荷応力は、FEM 解析を実施して設定した。図-4 に解析モデルの模式図を、表-6 に解析モデルの主要諸元、表-7 に入力物性値を示す。解析における荷重条件を表-8 に示す。解析では、堤高 50m 及び 100m のダムについて、それぞれ「自重+静水圧 (水位: 0.9×堤高)」を作用させた。解析結果を図-5、6 に示す。図-5 は堤高 50m モデルにおける最小主応力コンター図を、図-6 は堤高 100m モデルにおける最小主応力コンター図を示している。クリープ試験では、「自重+静水圧」を考慮したときの最大圧縮応力を載荷応力として、堤高 50m 相当のダムにおける載荷応力は 0.79 N/mm² を、堤高 100m 相当のダムについては 1.55 N/mm² を載荷応力とした。

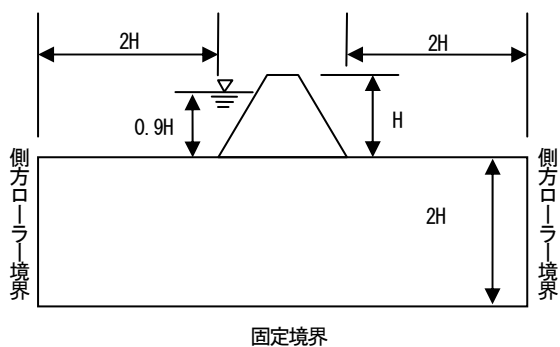


図-4 解析モデルの模式図

表-6 モデル主要諸元

項目	諸元
堤高 H (m)	50, 100
天端幅 (m)	8.0
法勾配	1:0.8

表-7 入力物性値

材料物性			堤体	貯水	岩盤
単位容積質量	ρ	(kg/m ³)	2,200	1,000	—
弾性係数	E	(N/mm ²)	2,000	—	5,000
ポアソン比	ν	—	0.25	—	0.25

表-8 荷重条件

荷重	条件
自重	○
静水圧	0.9H (H: 堤高)

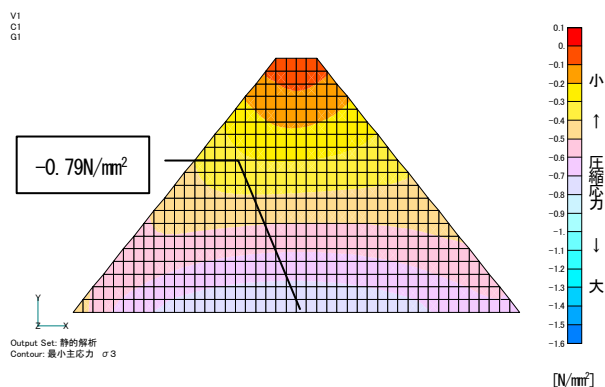


図-5 最小主応力コンター図
(堤高 50m モデル: 自重+静水圧)

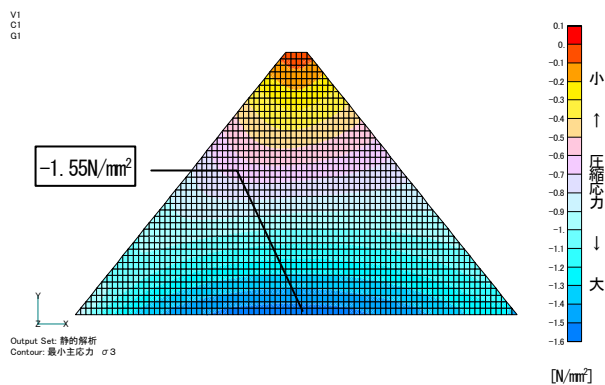


図-6 最小主応力コンター図
(堤高 100m モデル: 自重+静水圧)

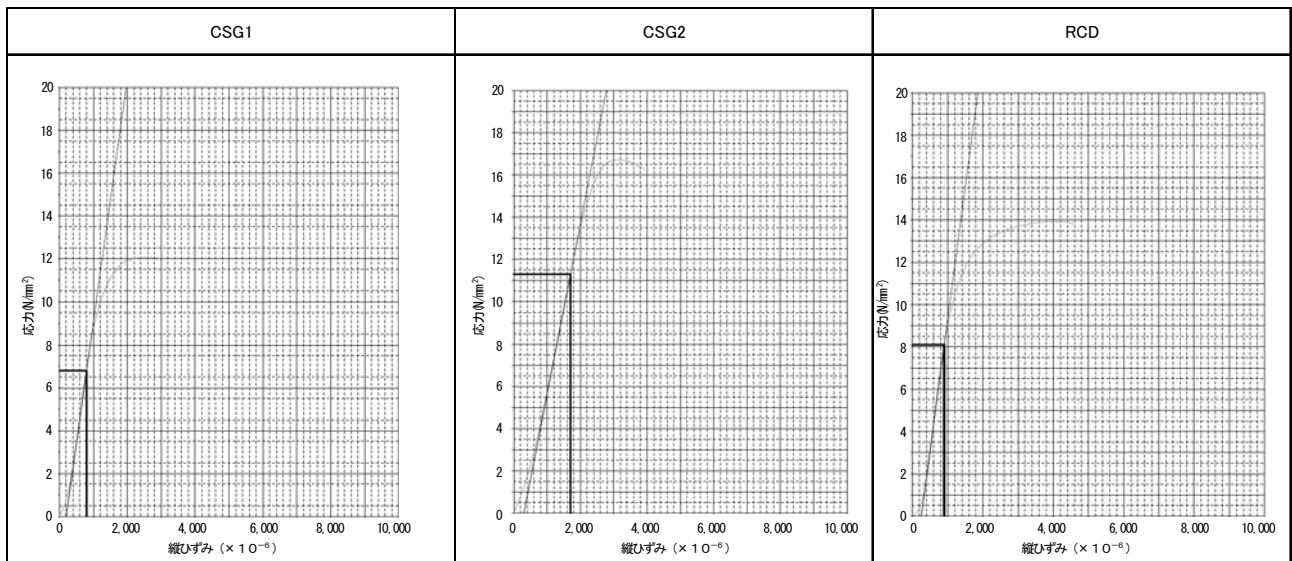


図-7 応力～ひずみ曲線の例

2.4 試験結果

2.4.1 一軸圧縮試験結果

図-7に CSG1、CSG2、RCD の代表的な応力～ひずみ曲線を示し、表-9に一軸圧縮試験結果（強度及び静弾性係数）を示す。

表-9 一軸圧縮試験結果(3 供試体平均)

項目	材齢 (日)	CSG1	CSG2	RCD
弾性領域強度 σ_e (N/mm ²)	91	6.8	10.8	7.6
ピーク強度 σ_p (N/mm ²)		11.6	16.5	13.7
σ_p / σ_e		1.7	1.5	1.8
静弾性係数 (N/mm ²)		8,300	12,000	12,300

2.4.2 クリープ試験結果と考察(CSG1 と RCD)

CSG1 と RCD について、クリープひずみを図-8(1)に、単位クリープを図-8(2)に示す。CSG1、CSG2、RCD は1年間のクリープ荷重試験の結果である。

CSG1の封緘状態における単位クリープについて、荷重応力0.79 N/mm²（堤高50m級のダム相当）の場合と、荷重応力1.55 N/mm²（堤高100m級のダム相当）の場合では、概ね同じ値となっている。また、CSG1の気中

状態における単位クリープは、封緘状態の単位クリープに比べてクリープ荷重荷重後28日時点では3.2倍程度大きな値となっているが、荷重1年では1.6倍程度となった。単位クリープは、荷重応力の大きさによる影響は荷重期間の経過に伴いやや大きくなる傾向はあるが、ほぼ同程度であり、荷重初期での乾燥クリープによるクリープの影響が非常に大きいことがわかる。

封緘状態における CSG1 と RCD のクリープ荷重荷重後28日時点における単位クリープについて、RCDの単位クリープが $20 \times 10^{-6} \text{N/mm}^2$ 程度であるのに対して、CSG1の単位クリープは、 $160 \times 10^{-6} \text{N/mm}^2$ 程度であり RCD よりも8倍程度大きい値となっている。荷重後1年経過時点では、RCDの単位クリープが $110 \times 10^{-6} \text{N/mm}^2$ 程度であるのに対して、CSG1の単位クリープは、 $440 \times 10^{-6} \text{N/mm}^2$ 程度であり大きい値となった。CSGの単位クリープは荷重の初期段階半年間程度で大きくなるが、その後の荷重日数の経過で漸増傾向になり一定に近づく傾向にある。RCDは荷重後9ヶ月程度まで単位クリープが漸増しているが、その後、増加量は減っている。今後も継続して傾向を長期的に計測することで、最終的な CSG と RCD のクリープひずみの比較を行う予定である。

また、気中状態と封緘状態の差については、CSG1が RCD よりも大きくなっている。これは乾燥クリープによる影響が、CSG1の方が RCD よりも顕著であることを示している。これについて、RCDに混入される水（単位水量：97kg/m³）はセメント反応に使用される分を配

合設計しているのに対し、CSG に混入される水（単位水量：120～140kg/m³）は、セメントとの反応に消費される分だけでなく微粒土質分への含水比増加分もあり、クリープ荷重期間中に供試体表面から乾燥が進み、土質中の水分が抜けるために、クリープひずみが大きくなるのではないかと考えられる。

2.4.3 クリープ試験結果と考察(CSG1 と CSG2)

図-9 に、CSG1 と CSG2 についてクリープ荷重応力 1.55N/mm²（堤高 100m 級のダムにおいて「自重+静水圧」が作用したときの最大圧縮応力値）の場合のクリープひずみを示す。CSG1 と CSG2 は、母材の粒度分布は同じであるが、単位セメント量が異なり、それぞれ 80kg/m³、120kg/m³である。クリープ荷重荷重後 28 日時点におけるクリープひずみが、CSG1 は 200×10^{-6} 程度であるのに対し、CSG2 は 100×10^{-6} 程度と半分になっている。クリープ荷重荷重後 1 年経過時点でもクリープひずみは、CSG1 は 640×10^{-6} 程度であるのに対し、CSG3 は 320×10^{-6} 程度と半分である。

以上より、単位セメント量が多い CSG の方が、クリープひずみが小さいが、セメント量を変化させても、初期のクリープひずみの比と長期（1 年）のクリープひず

みの比はほとんど変わらない。

2.5 まとめ

- ・ 封緘状態におけるクリープ荷重荷重後の初期段階である 28 日での単位クリープは、単位セメント量が 80kg/m³で同じ CSG が RCD に比べて 8 倍程度大きい。1 年での単位クリープは CSG が RCD の 4 倍程度となる。また、CSG は RCD に比べて乾燥クリープの影響が大きい。
- ・ CSG の単位クリープは荷重の初期段階半年間程度で大きくなるが、その後の荷重日数の経過で漸増傾向になり一定に近づく傾向にある。RCD は荷重後 9 ヶ月程度まで単位クリープが漸増しているが、その後、増加量は減っており、CSG とは増加量、傾向ともに異なる。今後、クリープ試験計測を継続し、長期荷重による CSG のクリープ特性を把握していく。
- ・ 単位セメント量を 80kg/m³から 120kg/m³に増やすことによって、CSG のクリープひずみはどの計測時でも 1/2 程度に小さくなる。今後も試験計測を継続して行う予定である。

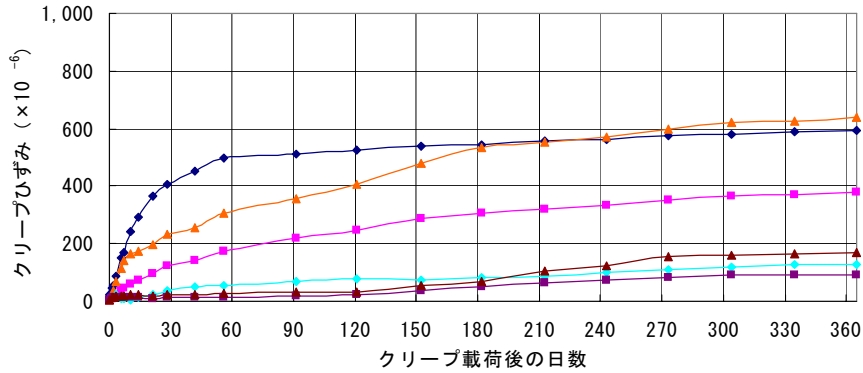


図-8(1) クリープひずみ (乾燥クリープの影響及びクリープ荷重の違い)

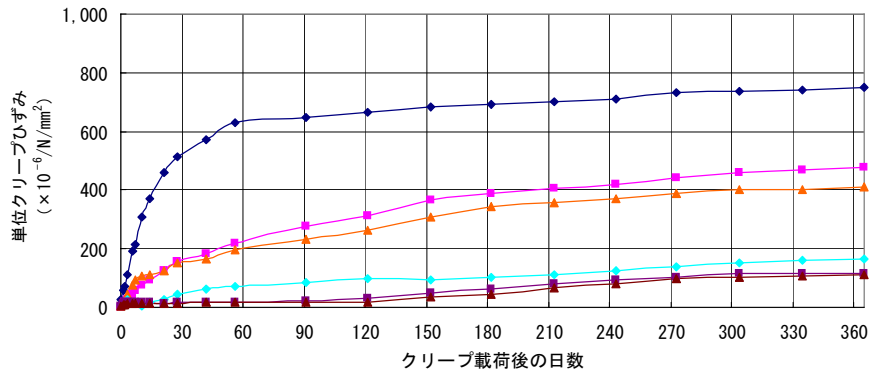


図-8(2) 単位クリープ (乾燥クリープの影響及びクリープ荷重の違い)

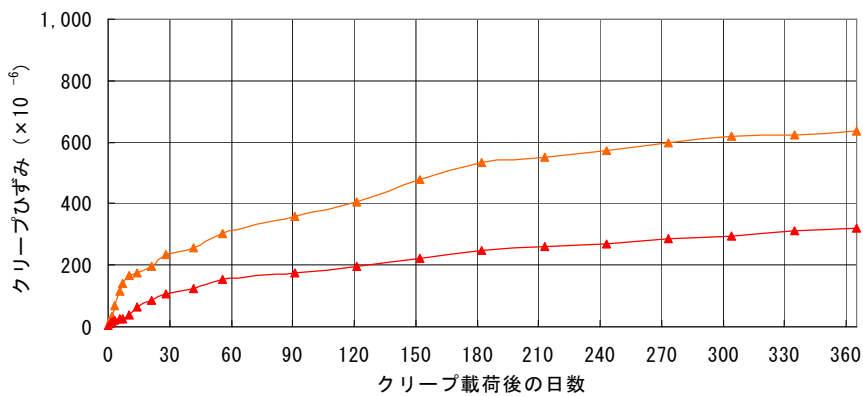


図-9 クリープひずみ (単位セメント量の違い)

3. CSG の材料特性のばらつきが安全性に及ぼす影響に関する解析的検討

CSG は現地発生材に必要最小限の処理を施した CSG 母材にセメントと水を混合させて作製したセメント硬化体であるため、従来のダムコンクリートと比較して品質のばらつきが大きく、かつ CSG 母材の違いによりそのばらつき特性が大きく異なるという特徴を有している。通常、CSG の施工においては、図-10 に示すような、CSG 材粒度分布のばらつき幅によって定まる強度の範囲と、単位水量の管理範囲とによって形成される「ひし形」によって行われることから、CSG の強度管理は面的管理である。

本研究では、ひし形における強度の確率密度分布、及び設定したひし形の強度範囲を外れて、設定下限強度（CSG 強度）を下回る強度の CSG の発生確率や最小強度をパラメータとした解析を行い、CSG の強度特性のばらつきが堤体に発生する応力及び安全率に与える影響について解析を行った。

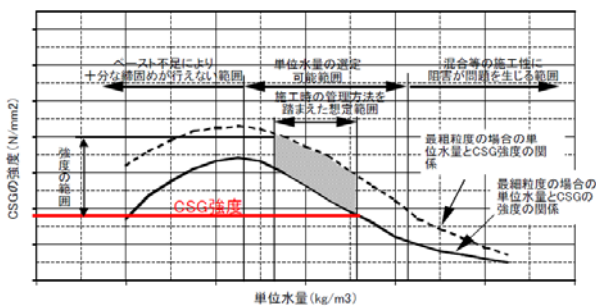


図-10 CSG 粒度の幅と単位水量管理範囲から求まる CSG の強度の範囲のイメージ

3.1 解析方法

3.1.1 解析手順

解析手順は図-11 に示すとおりである。

3.1.2 解析モデル

解析対象とした台形 CSG ダムは、堤高 50m、上下流面勾配 1:0.8 とした。解析モデルを図-12 に、主要諸元を表-10 に示す。解析モデルは、本解析では、実ダムの条件を加味して静的解析を行うことから、基礎岩盤を含めてモデル化した。

堤体のメッシュサイズは、基本的に 1.5m×1.5m（堤体要素数計 1110 メッシュ）として、局所的な発生応力も把握できるようにした。

3.1.3 解析手法

解析は、モンテカルロ法を用いた。堤体の各要素に対して、設定した材料強度の確率密度分布から強度および弾性係数を割り付けるものとした。そして、各要素への

弾性係数を割り付けた後、応力解析を行った。各要素への弾性係数の割付けから応力解析までの作業は 500 回繰り返した。

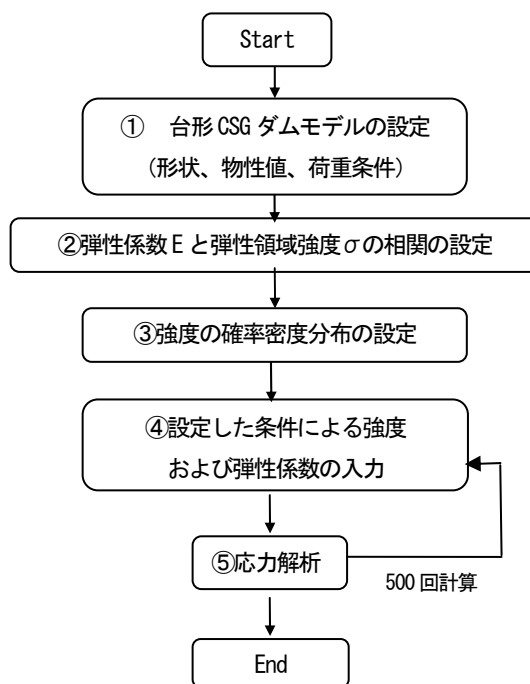


図-11 解析手順

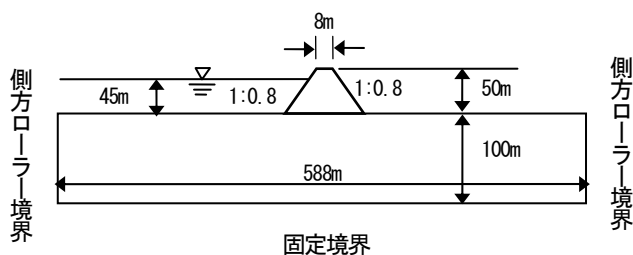


図-12 解析モデルのイメージ

表-10 モデルの主要諸元及び物性値

諸元		設定値
堤体	堤高 (m)	50
	下流面勾配	1:0.8
	上流面勾配	1:0.8
	堤頂幅 (m)	8.0
	単位体積質量 (kg/m³)	2,300
	ポアソン比	0.25
岩盤	深さ (m)	100
	幅 (m)	588
	単位体積質量 (kg/m³)	2,300
	ポアソン比	0.3
貯水深 (m)		45

3.1.4 弾性係数と圧縮強度の相関の設定

FEM 解析では、堤体モデルの各要素に対して、強度に応じた弾性係数を割り付けることとなる。そこで、解析に先立って、弾性係数と圧縮強度の関係を設定した。圧縮強度と弾性係数の相関にあたっては、M ダムの CSG 材を用いた大型供試体による圧縮強度試験（材齢 91 日）において、計測された弾性係数（弾性領域における応力-ひずみの直線関係から抽出）と CSG の強度（弾性領域強度）の関係を使用した。このデータからの近似式を、本解析で使用する強度と弾性係数の関係式とした（図-18）。

$$E = 0.3283\sigma_e + 0.1835 \quad (1)$$

E : 弾性係数 (kN/mm²)

σ_e : CSG の強度 (N/mm²)

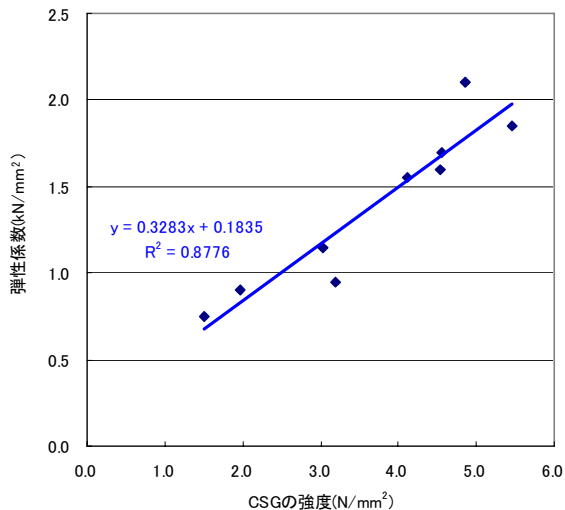


図-13 CSG の弾性係数と CSG の強度の関係 (M ダムの CSG)

3.1.5 強度範囲の設定

解析で使用する強度の確率密度分布を設定するためのひし形から強度範囲の設定を行った。図-14 に設定したひし形を示す。ひし形の設定にあたっては、現在、台形 CSG ダムとして、計画または施工されている堤高 50 m 級の 4 つの実ダム (AP ダム、S ダム、M ダム、T ダム) の CSG 材の材料試験によるひし形を参考とした。本研究において設定したひし形の設定強度は、1.5 N/mm² ~ 5.5 N/mm² に分布するとし、平均の強度を 3.5 N/mm² に設定した。

本検討においては、CSG の強度のばらつきを考える上で、設計上見込む最小強度 1.5 N/mm² を設定下限強度、つまり CSG 強度とした。

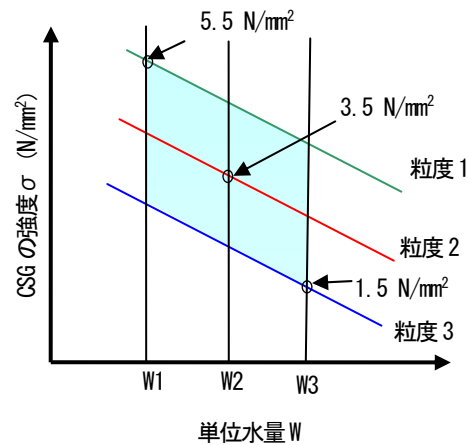


図-14 設定したひし形

3.1.6 荷重条件

荷重条件を表-11 に示す。現行の台形 CSG ダムの設計では、地震力は動的解析を実施して発生応力を算定しているが、本解析ではモンテカルロ法による繰返し計算を行うため、解析過程を簡便にする目的から静的慣性力(水平震度 0.12) を作用させた。

表-11 荷重条件

荷重	条件
自重	○
静水圧	0.9H (H:堤高)
地震時慣性力	水平震度 0.12
地震時動水圧	Westergaard 式による

表-12 材料強度のばらつき設定ケース

Case	分布形状	強度 (N/mm ²)					1.5N/mm ² を下回る確率 (%)	強度のばらつきの確率密度分布
		最大値	最小値	最頻値	平均値	標準偏差		
Case1	一定	-	-	3.5	3.5	-	-	強度一定値
Case2	正規分布	5.5	1.5	3.5	3.5	0.67	0	
Case3	正規分布の変形	5.5	0.5	3.5	3.27	3.5以上 0.67 3.5未満 0.95	2	
Case4					3.11	3.5以上 0.67 3.5未満 1.17	5	
Case5					2.92	3.5以上 0.67 3.5未満 1.52	10	
Case6	正規分布	5.0	1.0	3.0	3.0	0.67	1.1	
Case7		4.5	0.5	2.5	2.5	0.67	6.6	
Case8	正規分布の変形	5.5	1.0	3.5	3.25	3.5以上 0.67 3.5未満 1.00	2	
Case9					3.08	3.5以上 0.67 3.5未満 1.33	5	

3.1.7 材料強度のばらつき設定

解析においては、出現する強度の確率密度分布及び設定下限強度 (1.5 N/mm²) を満たさない強度のCSGの混入割合、最小強度および分布をパラメータとし解析を行った。

解析ケースを、表-12 に示す。CSG の強度のばらつきの確率密度分布の作成方法は以下の通りである。正規分布の場合は、平均強度及び標準偏差を設定し、乱数発生時に最小強度～最大強度の範囲を超えた場合は同条件で再度乱数を発生させて設定範囲に収まるようにした。正規分布の変形について分布の作成フローを図-15 に示す。まず、正規分布確率であるCase2を基本として、最頻強度未満の分布についてのみ、各ケースの設定下限強度 (1.5N/mm²) を下回る確率となるように標準偏差を調整した。このとき最頻強度付近の確率について、最頻強度未満の分布が最頻強度以上の分布より小さくなるが、最頻強度未満の分布割合を高くし、最頻強度以上の分布割合を低くすることで、最頻強度付近の確率を同程度となるように調整した。また、正規分布のケース同様に、乱数発生時に最小強度～最大強度の範囲を超えた場合は同条件で再度乱数を発生させて設定範囲に収まるようにした。なお、設定下限強度を下回る確率は、各ケースごとに調整した。

Case1 は、堤体の強度を一定値としたケースである。他のケースと比較対照のために設定した。

Case2 は、設定したひし形内の最小強度、最大強度の範囲内 (1.5～5.5N/mm²) で、最頻強度をCase1の平均強度 (3.5N/mm²) の正規分布としたケースである。ほぼ設定強度の範囲内に収まることを想定して、 μ (平均強度: 3.5 N/mm²) $\pm 3\sigma$ (標準偏差) が 1.5N/mm²、5.5N/mm² となる標準偏差として 0.67N/mm² を設定した。このケースは、平均的な粒度の分布が頻出し、かつ品質確保できた想定した基本ケースとなる。

Case3 は、最頻強度を 3.5N/mm²、最小強度を 0.5N/mm² とした分布であり、設定下限強度 (1.5N/mm²) を下回る強度の要素が 2%含まれるケースである。これは、施工時に当初設定した材質を下回るようなCSG材が混入した場合や、局所的な施工上の不良などの影響により設定下限強度を満たさない施工箇所が発生した場合を仮に想定したケースとなる。この想定条件は、Case4、5でも同様である。

Case4 の条件は、Case3 の条件から設定下限強度 (1.5N/mm²) を下回る強度のCSGを5%含むケースであり、下回る確率を10%としたケースがCase5である。

Case6 は、Case2 の最頻強度 (3.5N/mm²) よりも低

い最頻強度 (3.0N/mm²) となることを想定したケースである。標準偏差は Case2 と同じとし、最小強度を 1.0kN/mm²とし、最大強度を 5.0 kN/mm²とした。つまり Case2の分布の形をそのまま0.5N/mm²小さく移動させた分布である。確率密度分布をスライドさせたことにより、設定下限強度 (1.5N/mm²) を下回る割合は約 1.1% となった。これは、調査設計段階で設定したひし形が妥当ではなく、使用したCSGが全体的に強度が小さい場合を仮に想定したケースなどがこれに当たる。この想定条件は、Case7でも同様である。

Case7はCase6からさらに0.5N/mm² (Case2からは1.0 N/mm²) 強度を小さくし、最頻強度を 2.5N/mm² としたケースである。設定下限強度 (1.5N/mm²) を下回る割合は約 6.6%となった。

Case8はCase3の条件から最小強度を1.0N/mm²に変更したものであり、Case3と同様の想定により設定下限強度を満たさない確率を設定したものの、最小強度はCase3ほど小さくないことを想定したケースである。この想定条件はCase9でも同様である。

Case9はCase8とCase3の関係同様に、Case4から最小強度を1.0N/mm²に変更したものである。

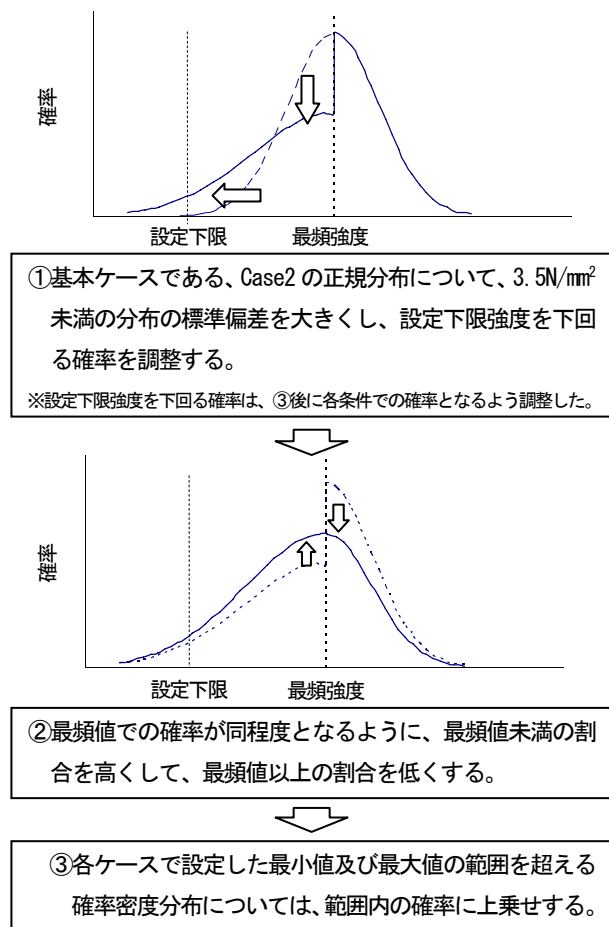


図-15 正規分布の変形分布の作成フロー

3.2 解析結果と考察

3.2.1 ダム堤体内の強度・応力・安全率分布

応力解析の結果、台形 CSG ダムは台形形状のため、どのケースにおいても、発生引張応力は小さかったことから、本検討では、圧縮応力（最小主応力 σ_3 ）を評価している。

図-16 に Case1 及び Case2~9 については試算 250 回目における強度、圧縮応力、及び圧縮応力に対する安全率のコンター図を例として示す。

発生圧縮応力コンターについては、強度が一定の Case1 と比較しても、強度がばらつく Case2~Case9 は、分布傾向はあまり変わらない。設定下限強度を下回る確率が 10%含まれる Case5、平均強度が他ケースより小さい Case7 についても、発生圧縮応力コンター図では他のケースと比べて大きな変化は確認できない。本解析では地震時慣性力として水平震度 0.12 の条件による疑似静的解析をおこなったため、発生圧縮応力に対する弾性係数の影響が少なかった事も一因と考えられる。

安全率コンターについては、特に設定下限強度を下回る確率が高く、最小強度が小さい Case4, 5, 7 については低い安全率の箇所が分布する。

3.2.2 圧縮応力のばらつきの頻度分布

各ケースでの圧縮応力分布を図-17 に示す。図-17 は各解析結果の圧縮応力を 0.1MPa 区切りにまとめて集計したデータを確率で示したものである。発生応力の確率分布は、各ケースでやや異なるが、分布の形状に大きな違いは見られない。

図-18 は、図-17 について発生圧縮応力が大きい確率から累加した確率を示したものである。ここで、Y 軸の確率は X 軸で示す強度未満の発生確率を示す。図-19 ~図-21 はそれぞれのケースを比較対象ごとに図-18 から抽出したものである。最大強度、最小強度、最頻強度を固定条件として設定下限強度（1.5N/mm²）を下回る確率 2%、5%、10%の違いを比較するための比較ケース Case1~5 について図-19 に示す。最頻値の違いを比較するため、ばらつき（標準偏差）が Case2 と同じ正規分布について最大値、最小値、最頻値をそのまま 0.5N/mm²、1.0N/mm² 分だけ小さい強度へスライドした分布の比較ケース Case2, 6, 9 および一定強度条件ケースの Case1 を図-20 に示す。最小値の違いを比較するために、最大値、最頻値、設定下限強度を下回る確率を固定条件として、設定下限強度を下回る確率が 2%の Case2 と Case8、同じく設定下限強度を下回る確率が 5%の Case3, 9 を図-21 に示す。

設定下限強度（1.5N/mm²）を下回る確率について比較し

た図-19 では、設定下限強度を下回る確率が高いほど、高い圧縮応力が発生する確率が若干高く、確率分布が広がる傾向がある。

標準偏差が同じ正規分布で、最頻強度の違いについて比較した図-20 では最頻強度が小さいほど、発生応力が大きい確率がわずかに高くなるが、ほぼ同程度である。

設定下限強度の違いに着目して比較した図-21 では最小強度が異なる条件においても下回る確率が同じ場合は、発生応力の確率分布はほぼ同程度であった。

図-19~図-21 のグラフにより、発生応力のばらつきは強度の設定下限強度を下回る確率と相関が高く、最小強度の違い、および平均値（最頻値）のちがいはあまり相関はない。

3.2.3 安全率のばらつきの頻度分布

各ケースでの安全率の分布を図-22 に示す。図-22 の安全率 F_s は、式 (2) より算出したものを 0.1 区切りにまとめて集計したデータを確率で示したものである。安全率 F_s は、設定したひし形の強度（1.5N/mm²~5.5N/mm²）が計画中の CSG ダムの材料試験結果を目安にして設定したものであり、具体的な個別ダムを想定した条件ではないため、(2)式で求まる安全率 F_s の値の絶対値は、各ケースの相対比較のための指標として扱っていることに留意する必要がある。

$$F_s = \sigma_e / \sigma_3 \quad (2)$$

F_s :安全率

σ_e :弾性領域強度

σ_3 :発生した圧縮側主応力

圧縮応力の分布は全体で評価すると各ケースとも大差ない結果であったが、安全率は(2)式の示すとおり、強度に強い影響を受けるため、各条件によりばらつきが顕著に現れた。

図-23 は図-22 について安全率が小さい確率から累加した確率を示したものである。ここで Y 軸は X 軸に示す安全率未満の確率を示す。図-24~図-26 は、それぞれのケースを比較対象ごとに図-23 から抽出したものである。最大強度、最小強度、最頻強度を固定条件として、設定下限強度（1.5N/mm²）を下回る確率 2%、5%、10%の違いを比較するための比較ケース Case1~5 について図-24 に示す。最頻値の違いを比較するため、ばらつき（標準偏差）が Case2 と同じ正規分布について最大値、最小値、最頻値をそのまま 0.5N/mm²、1.0N/mm² 分だけ小さい強度へスライドした分布の比較ケース Case2, 6, 9 および一定強度条件のケース Case1 を図-25 に示す。最小

値の違いを比較するために、最大値、最頻値、設定下限強度を下回る確率を固定条件として、設定下限強度を下回る確率が2%のCase2とCase8、同じく設定下限強度を下回る確率が5%のCase3とCase9を図-26に示す。

設定下限強度(1.5N/mm²)を下回る確率について比較した図-24では、設定下限強度を下回る確率が大きくなるほど、最小安全率は小さくなり、また低い安全率の確率も高くなる。

最頻強度の異なる正規分布について比較した図-25では、最頻強度が小さいほど最小安全率も小さくなり、低い安全率の確率も高くなる。

最小強度の異なる条件について比較した図-26では、最大値・最頻値・設定下限強度を下回る確率(2%)が同じであるCase3とCase8では、最小強度が小さいCase3(0.5N/mm²)の方が、最小強度が大きいCase8(1.0N/mm²)とより最小安全率が小さく、低い安全率の確率も高い。しかし、Case3とCase8では最小強度が小さい方(Case3)が安全率2.7未満の確率が高いが、安全率2.8未満の確率は最小強度が大きい方(Case8)が高くなる。これは、ばらつきを設定する際に、最小強度が大きいCase8について最小強度(1.0N/mm²)付近の確率が片寄って高くなったことが主な要因として挙げられる。また、図-26については、設定下限強度を下回る確率が同じ5%のCase4(最小値0.5N/mm²)とCase9(最小値1.0N/mm²)の比較でも同様のことがいえる。

図-27は、Case2~Case9の安全率について、要素ごとにCase1の安全率との比をとり、500回繰返し分の比を0.01で区切りでまらめて、確率で示したものである。主に強度のばらつきがそのまま反映された結果となっており、各ケースの確率のピークとなる比(X軸の値)は、Case1での強度3.5N/mm²と各ケースの平均強度の比とほぼ同じである。ここで、Case2~Case9の強度の分布について、Case1(強度3.5N/mm²一定)との比をとり、確率で示したものを図-28に示す。Y軸の確率は図-27と比較するために、強度比0.01区切りでの確率となるよう比例調整している。安全率は(2)式で示したように、強度に大きく影響を受けるため、各ケースでの強度分布と一定強度であるCase1との比は図-27と似た形状ではある。安全率のピーク確率は強度のピーク確率よりも大きく、ばらつきが小さい。

3.3 まとめ

CSGの強度や弾性係数のばらつき特性が堤体の安全性に与える影響についてモンテカルロシミュレーションにより解析的に検討した。解析では、CSGの強度のばらつ

きを正規分布を基本とし、最小値、最頻値、設定下限強度をパラメータとして、台形CSGダムの堤体内部応力の安全率について分析した。

①発生応力の評価

- 発生圧縮応力は、強度(弾性係数)のばらつきの条件により全体的な違い(平均強度、頻度分布の違い)はあまり生じないが、部分的にはばらつきの影響を受ける。
- 発生圧縮応力のばらつきは設定下限強度を下回る確率に若干影響を受け、最小強度及び最頻強度(平均強度)の違いによる影響はあまりない。

②安全率の評価

- 強度のばらつきについて最頻強度、最大強度、最小強度が同じ条件では、設定下限強度を下回る確率が高いほど最小安全率は小さくなり、また低い安全率の確率も高くなる。
- 標準偏差が同じ正規分布のケースについて、最頻強度が小さいほど、最小安全率は小さくなり、安全率の低い確率も高くなる。また、最頻強度が低いケースの方が安全率のピークの確率が高くなる。
- 安全率のばらつきは、強度(弾性係数)のばらつきに影響を受けるが、強度(弾性係数)のばらつきほど、安全率のばらつきは大きくはない。

③今後の課題

- 今後は、様々なタイプの材料物性のばらつきや大きさについて解析を行い、それらを考慮した、ダムの設計方法、品質管理方法について検討していく。

参考文献

- 岡田清, 六車熙: コンクリート工学ハンドブック, 朝倉書店, pp.1408~1409, 1981.

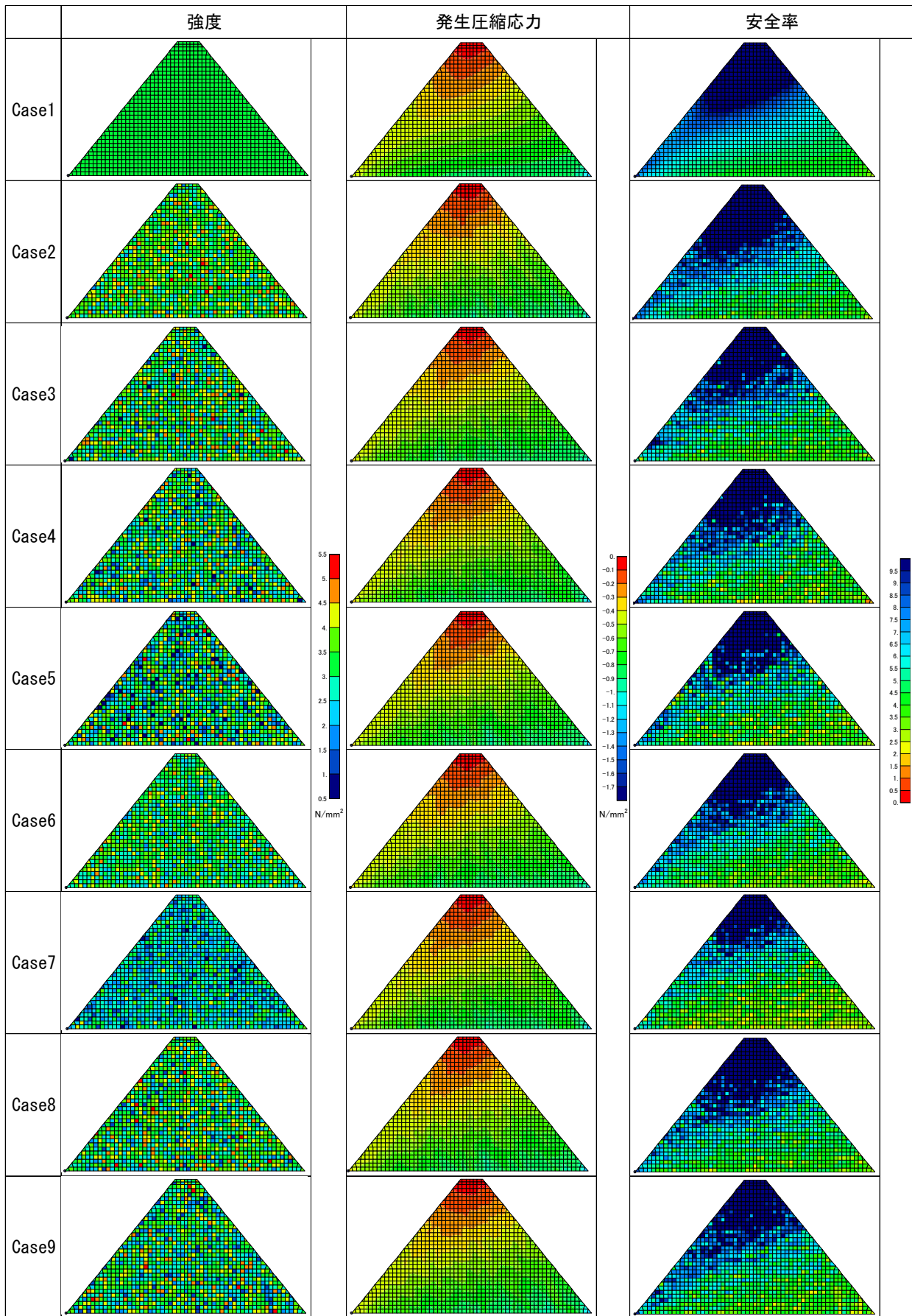


図-16 弾性領域強度、発生圧縮応力、圧縮応力に対する安全率のコンター図の一例

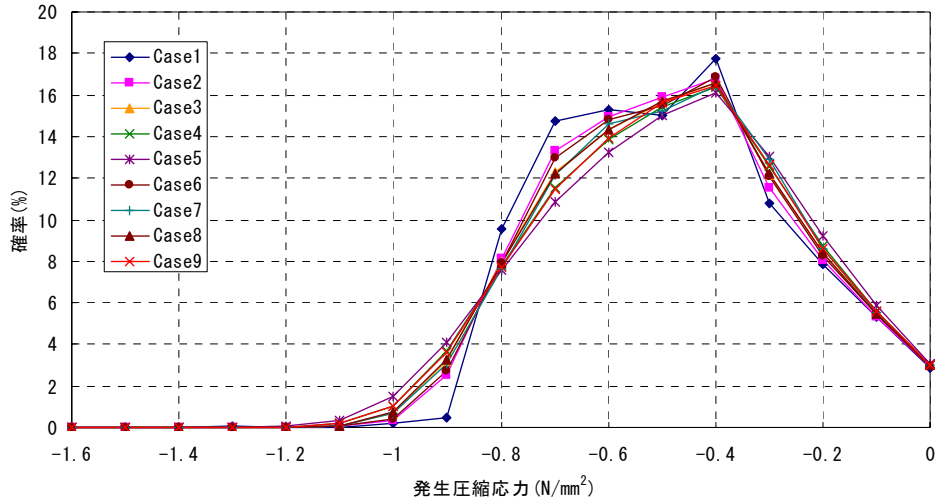


図-17 各ケース発生圧縮応力の確率分布

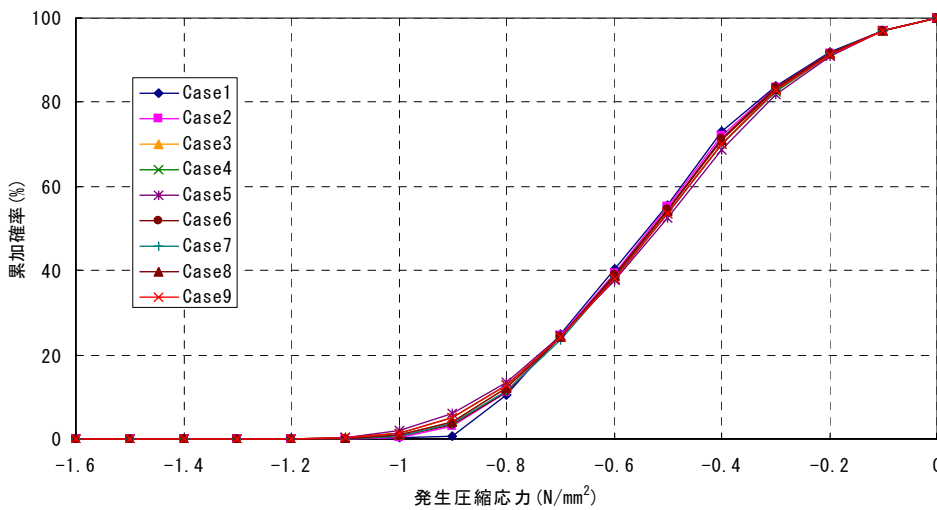


図-18 各ケース発生圧縮応力の確率分布 (図-17の大きい応力から確率を累加)

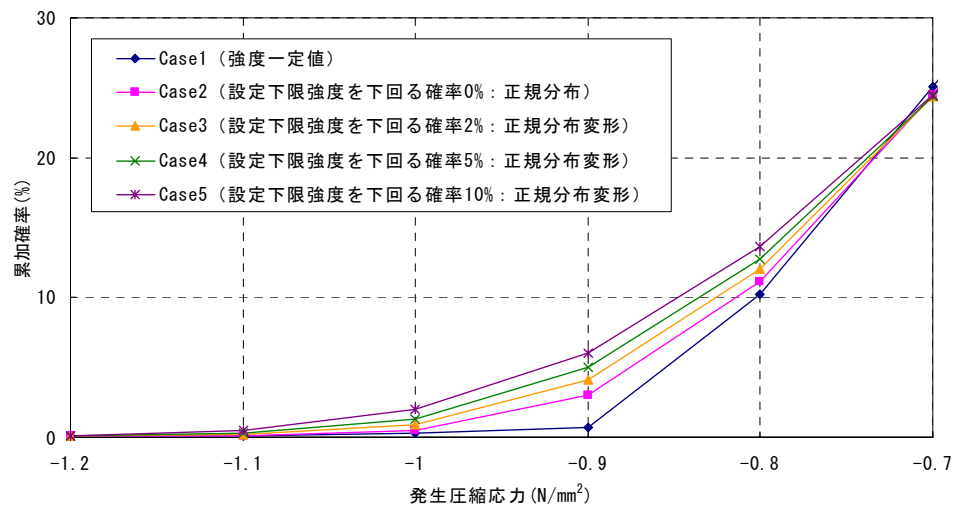


図-19 設定下限強度を下回る確率の違いによる発生圧縮応力の確率分布比較
(Case3, 4, 5の最大値・最小値・最頻値は同じ、Case1, 2は比較対象として表示)

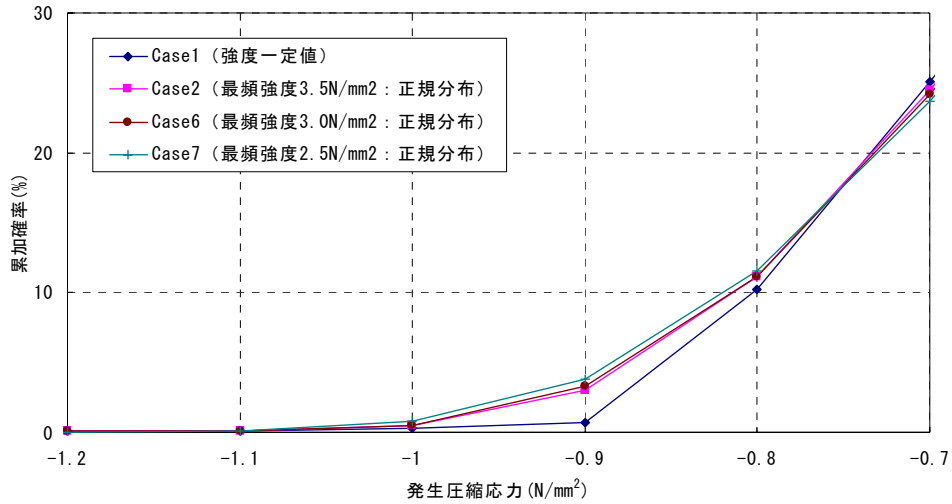


図-20 最頻強度の違いによる発生圧縮応力の確率密度比較
(Case2, 6, 7は標準偏差が同じ正規分布、Case1は比較対象として表示)

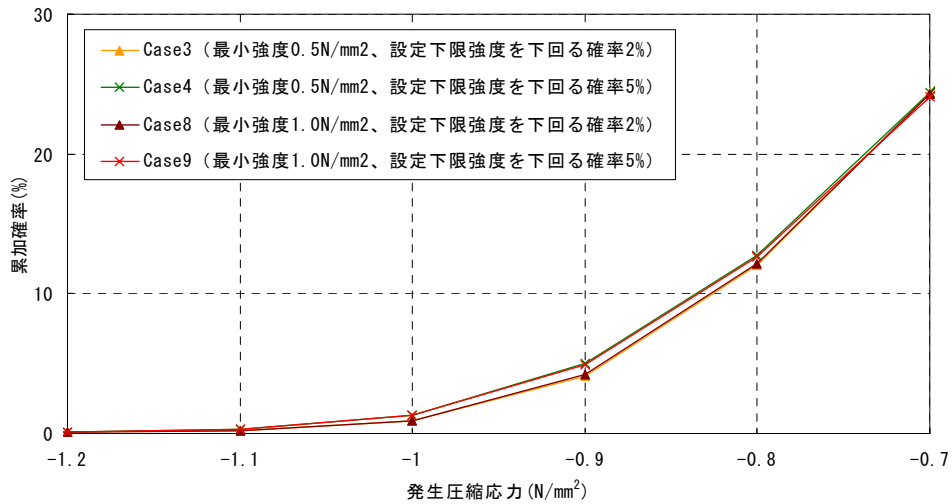


図-21 最小強度の違いによる圧縮応力の確率分布比較
(各ケースの最大値・最頻値は同じ、設定下限強度を下回る確率が同じケース (Case3 と Case8、又は Case4 と Case9) について比較)

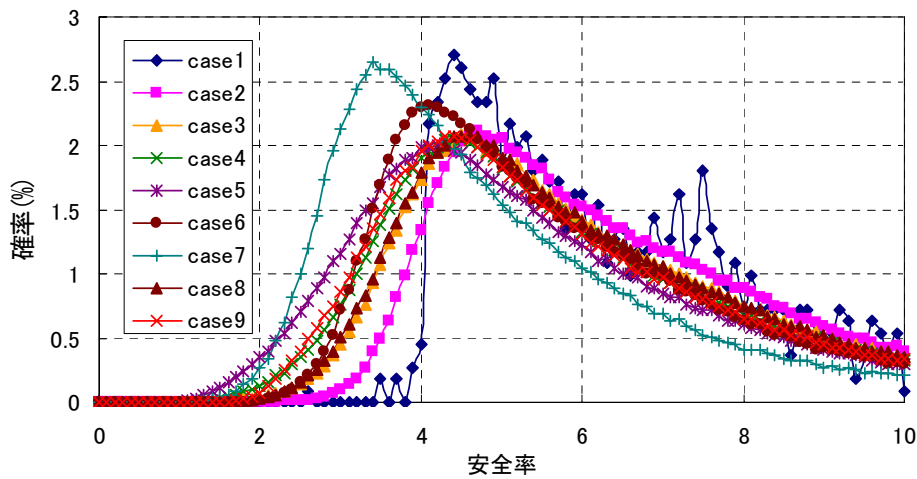


図-22 各ケース安全率の確率分布

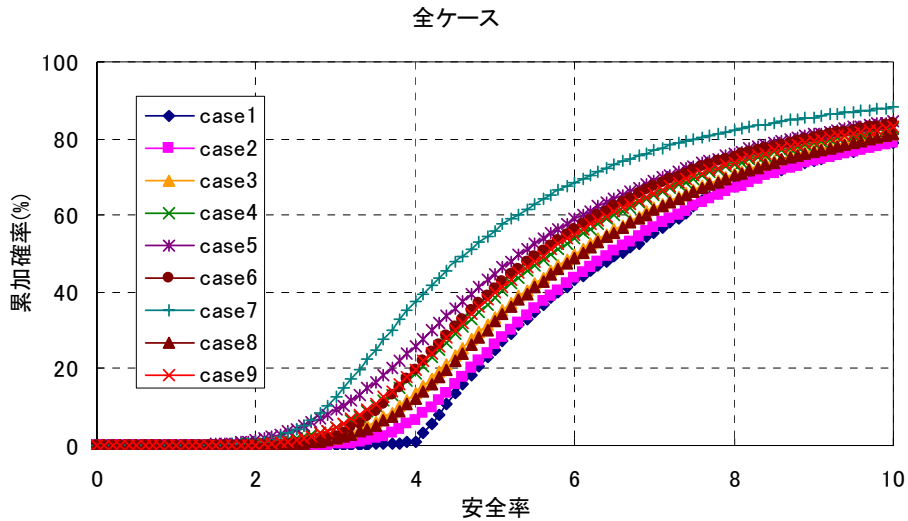


図-23 各ケース安全率の確率分布 (図-22 の小さい安全率から確率を累加)

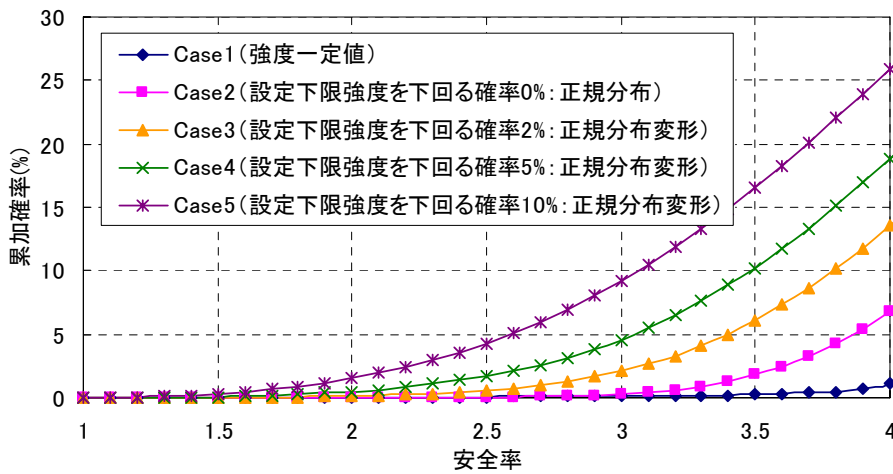


図-24 設定下限強度を下回る確率の違いによる安全率の確率分布比較
(Case3, 4, 5 の最大値・最小値・最頻値は同じ、Case1, 2 は比較対象として表示)

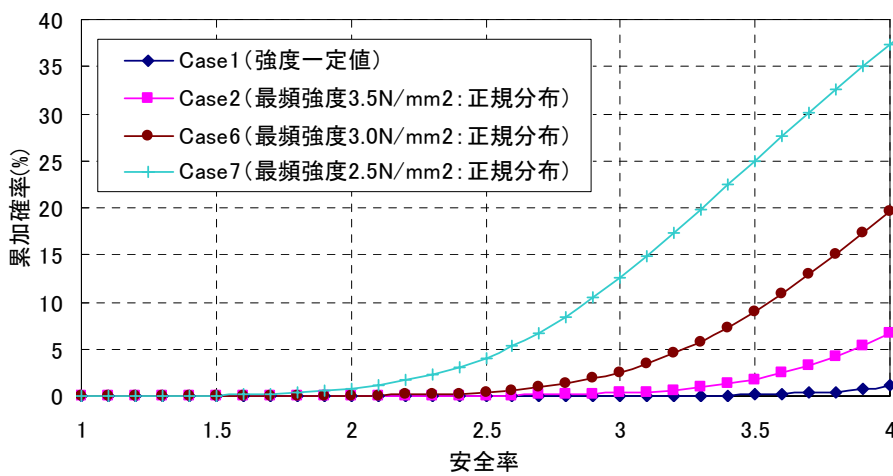


図-25 最頻強度の違いによる安全率の確率分布比較
(Case2, 6, 7 は標準偏差が同じ正規分布、Case1 は比較対象として表示)

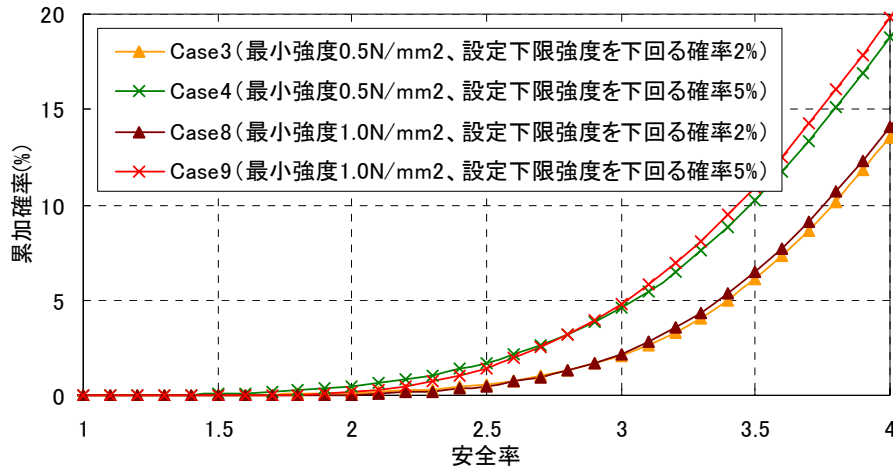


図-26 最小強度の違いによる安全率の確率密度比較

(各ケースの最大値、最頻値は同じ、設定下限強度を下回る確率が同じケース (Case3 と Case8、又はCase4 と Case9) で比較)

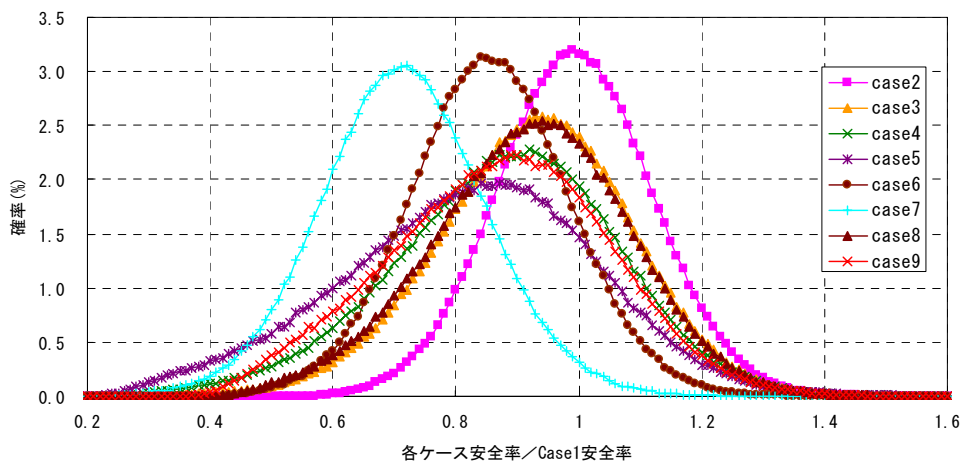


図-28 各ケース安全率/Case1 安全率比の確率分布

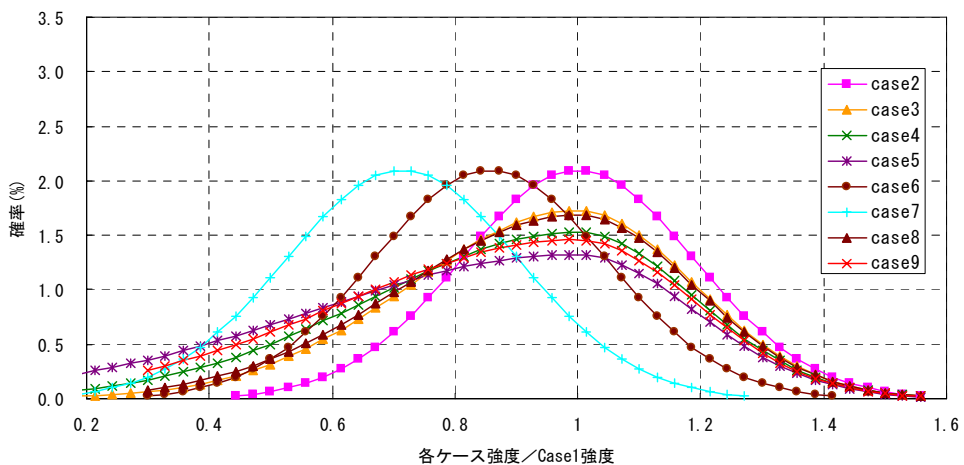


図-29 各ケース強度/Case1 強度の確率分布

※Y 軸の確率は図-28 に示した安全率の確率との比較のため、X 軸の値が 0.01 区切りでの確率となるように調整している

STUDY ON DESIGN AND PHYSICAL PROPERTIES OF TRAPEZOID-SHAPED CSG DAM

Budgeted : Grants for operating expenses

General account

Research Period : FY2006-2010

Research Team : Hydraulic Engineering Research Group
(Dam Structure)

Author : YAMAGUCHI Yoshikazu

IWASHITA Tomoya

KIRINASHIZAWA Tohru

Abstract: The trapezoid-shaped CSG dam is a new type of dam that combines the merits of a trapezoid shape and CSG (Cemented Sand and Gravel), and simultaneously rationalizes the design, execution, and materials. The raw material for CSG covers a wide range of materials such as riverbed gravels, excavation mucks obtainable at the dam site, terrace sediments, or weathered rocks. CSG is based on no gradation of raw materials except that large aggregate may be crushed. As a result, the gradation of CSG materials varies widely, even for materials obtained at the same place. Furthermore, the variation of gradation makes it difficult to stabilize the unit water content. Thus, these variations in materials and water content make it difficult to maintain stable CSG quality, especially strength. Therefore, the design and quality control methods for such materials should be established.

In this fiscal year, we conducted creep tests for CSG to specimen evaluate the deformation characteristics of CSG for long period and we carried out the numerical stress analysis of Trapezoid-shaped CSG Dams, considering the dispersion of strength distribution of the CSG material by the Monte Carlo method.

Keywords: Dam, CSG(Cemented Sand and Gravel), Creep Test, Dispersion, Monte Carlo method.