

14.3 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、佐々木晋

【要旨】

環境への負荷軽減、コスト削減、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いる。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 20 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室内実験を行うとともに、CSG の材料特性のばらつきを考慮した解析を行い、材料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）ダムは堤体内に局所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、締切堤などの施工事例が増加してきている。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。

平成 20 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室内実験を行うとともに、CSG の材料特性のばらつきを考慮した解析を行い、材料特性のばらつきが堤体の安全性に与える影響についての検討を行った。

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-1~4 に示す。表-1~4 の違いは供試体の製作時期の違いにより材料の購入時期が異なるためのものである。ここで材料とした母材は CSG に含まれる微粒子の影響を明確にするため、コンクリート骨材となりうる堅固な工場製品を用いた。使用材料は、供試体の製作時期により異なるが、可能な限り同条件となるよう、同一箇所から購入した（兵庫県産、流紋岩）。

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 以下の微粒子については、6%、10%の 2 種

の設定をした。

RCD の粗骨材の配合比率を表-5 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。

表-1 CSG 及び RCD の使用材料及び物性値
(H18 年度 : Case1~3)

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 2.58g/cm ³ 吸水率 1.47%) 40-20mm (表乾密度 2.59g/cm ³ 吸水率 1.80%) 20-10mm (表乾密度 2.60g/cm ³ 吸水率 1.90%) 10-05mm (表乾密度 2.60g/cm ³ 吸水率 1.90%) 細砂 5mm 以下 (表乾密度 2.62 g/ m ³ 吸水率 1.9%)	
	(CSG) 藤の森粘土 (塑性指数 29.9 土粒子密度 2.67g / cm ³)	(RCD) 石粉 (土粒子密度 2.73g/cm ³)

表-2 CSG 及び RCD の使用材料及び物性値
(H19.7 : Case4~6)

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) 藤の森粘土 (塑性指数 29.9 土粒子密度 2.67g / cm ³)	(RCD) フライアッシュ (密度 2.31g/cm ³)

表-3 CSG の使用材料及び物性値 (H20.2:Case7,8)

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) 藤の森粘土 (塑性指数 29.9 土粒子密度 2.67g / cm ³)	

表-4 CSG 及び RCD の使用材料及び物性値
(H20 年度 : Case9~11)

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) 藤の森粘土 (塑性指数 19.2 土粒子密度 2.71g / cm ³)	(RCD) フライアッシュ (密度 2.31g/cm ³)

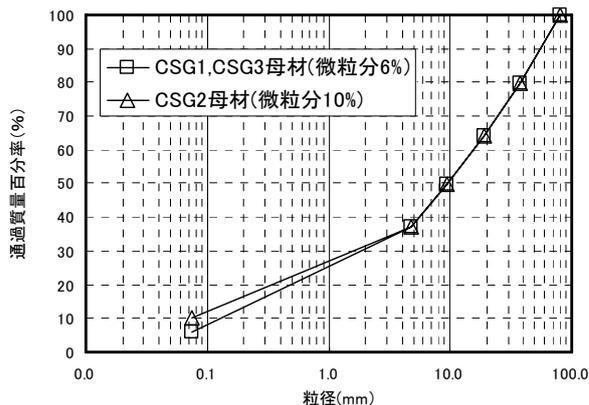


図-1 CSG の母材粒度分布

表-5 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

CSG と RCD の供試体の配合をそれぞれ表-6 と表-7 に示す。配合は CSG については、単位セメント量、微粒分含有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 との比較ケースとして設定した。なお、RCD について、平成 18 年度の供試体作製分 (Case3) においては、混和材(フライアッシュ)が強度に及ぼす影響を排するため石粉を用いたが、平成 19 年度以降の供試体作製分 (Case6,11) においては、CSG と通常の RCD との比較を目的とするため、混和材としてフライアッシュを用いた。

表-6 CSG 供試体の配合

項目	CSG 1	CSG2	CSG3
最大粒径	40mm (最大粒径 80mm の試料をエトスクリングしたもの)		
微粒分含有量 (%)	6	10	6
単位セメント量 (kg/m ³)	80		120
単位水量 (kg/m ³) ※	120	140	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-7 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
混和剤 (AE 減水剤)		0.25
養生方法		封緘養生

2.2 クリープ試験方法

長期強度の試験は、クリープ試験により行った。

クリープ試験は、PC 鋼棒式¹⁾を採用し(図-2)、温度 20 ± 3°C、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。荷重にあたっては、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、予備荷重として 1/2 の載荷応力を加え、一旦除荷した後、本載荷を行った。予備荷重は、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。

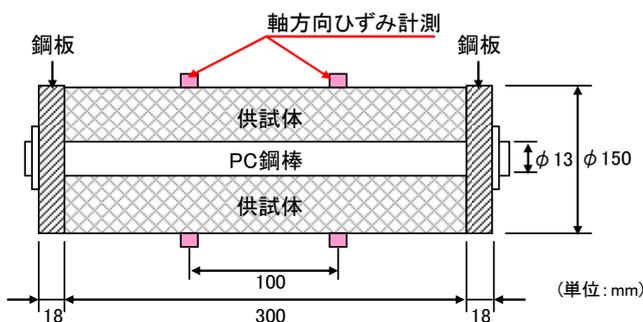


図-2 クリープ試験のイメージ

2.3 試験条件

2.3.1 試験ケース

表-8 に試験ケースと実施年度を示す。以下に、大きく条件設定が異なる①Case1~6、②Case7,8、③Case9~11 に分けて記述する。

①微粒分含有量及び材齢の比較 (Case1~6)

Case1~6 までは、土木研究所ダム構造物チームの既往の研究成果²⁾により、CSG 母材に含まれる粒径 0.075mm 以下の微粒分含有率（主に粘土分。以下同様。）が強度・変形特性に与える影響が大きいことが確認されていることから、微粒分含有量を変化させた 2 種類の CSG の供試体を比較検討した。また、比較対照として微粒分を含有しない RCD 材料を用いた供試体を用いて比較検討を行った。

Case1~3 は、載荷時材齢を 28 日とし、Case4~6 は、載荷時材齢を 91 日とした。なお、前節で記述したように、平成 18 年度実施の Case3 と平成 19 年度実施の Case6 では、RCD の混和材が異なっているため、単純比較はできない。

各ケースにおける載荷応力は、CSG が弾性領域強度内で設計されることを考慮して、弾性領域強度 σ_e に対して 30%、50%、70% の値に設定した。弾性領域強度 σ_e の算定については、クリープ試験用の供試体と同一の配合で作製した供試体に対して、一軸圧縮試験を行い、応力-ひずみ関係を求め、ピーク強度 σ_p 、弾性領域強度 σ_e を設定した。なお、これらの強度値は、各配合 3 つの供試体の平均値とした。通常、RCD では弾性領域強度という概念はないが、CSG と同様に応力-ひずみ曲線が直線と近似できる上限値の応力値をもって弾性領域強度 σ_e を規定し、CSG と比較することとした。

②側方変位拘束の影響 (Case7,8)

Case7 は、実際のダムにおいてクリープ荷重を最も受けるところはダム堤体の底面部であり、周囲が拘束された状態であることから、側方への膨らみを抑えた状態のクリープ試験である。クリープ荷重による側方への膨らみを抑制するために、供試体を塩ビ管（肉厚 1cm）で被覆し、計測するコンタクトチップを貼る箇所のみ露出させることとした(写真-1)。また、Case7 の比較対照として塩ビ管拘束を行わない供試体についても、乾燥による影響を同条件とするため、供試体表面をシール（アルミ箔粘着テープ $t=0.5\text{mm}$ ）により被覆し封緘状態とした。シールにより被覆した状況を写真-2 に示す。

表-8 クリープ試験実施ケース一覧

Case	配合	単位セメント量 (kg/m ³)	微粒分含有量 (%)	供試体形状 (mm)	載荷開始時材齢	計測期間	弾性領域強度 σ_e (N/mm ²)	載荷応力 (N/mm ²)		載荷状態※)	実施年度	
								$\sigma_e \times 30\%$	$\sigma_e \times 50\%$			
1	CSG1	80	6	$\Phi 150 \times 300$	28日	1年	3.1	$\sigma_e \times 30\%$	0.90	氣中	18	
								$\sigma_e \times 50\%$	1.60			
								$\sigma_e \times 70\%$	2.20			
2	CSG2	10	1.7				$\sigma_e \times 30\%$	0.40				
							$\sigma_e \times 50\%$	0.60				
							$\sigma_e \times 70\%$	1.00				
3	RCD	--	2.9		$\sigma_e \times 30\%$	0.90						
					$\sigma_e \times 50\%$	1.60						
					$\sigma_e \times 70\%$	2.20						
4	CSG1	6	9.8		91日	1年	9.8	$\sigma_e \times 30\%$	3.20		封緘	19
								$\sigma_e \times 50\%$	5.40			
				$\sigma_e \times 70\%$				7.60				
5	CSG2	10	7.6	$\sigma_e \times 30\%$			2.30					
				$\sigma_e \times 50\%$			3.90					
				$\sigma_e \times 70\%$			5.50					
6	RCD	--	10.3	$\sigma_e \times 30\%$	3.10							
				$\sigma_e \times 50\%$	5.20							
				$\sigma_e \times 70\%$	7.20							
7	CSG1	6	6	$\Phi 150 \times 300$	91日	56日	5.2	$\sigma_e \times 50\%$	2.50	塩ビ管拘束		20
8	CSG1	6	6	150 × 150 × 300 (角柱)				$\sigma_e \times 50\%$	2.50	封緘		
9	CSG1	80	6	$\Phi 150 \times 300$	28日	1年	6.8	堤高50mダム作用 応力相当 ($\sigma_e \times 12\%$ 相当)	0.79	氣中		
								堤高100mダム作用 応力相当 ($\sigma_e \times 22\%$ 相当)	1.55	封緘		
10	CSG3	120	6				10.8	堤高100mダム作用 応力相当 ($\sigma_e \times 14\%$ 相当)	1.55	封緘		
								11	RCD	80	--	7.6
堤高100mダム作用 応力相当 ($\sigma_e \times 20\%$ 相当)	1.55	封緘										

※) 封緘：アルミ箔粘着テープで封緘、塩ビ管拘束：封緘した上に塩化ビニル管で周囲を拘束、氣中：封緘しない



写真-1 塩ビ管で拘束した供試体 (Case7)



写真-2 シールによる被覆供試体

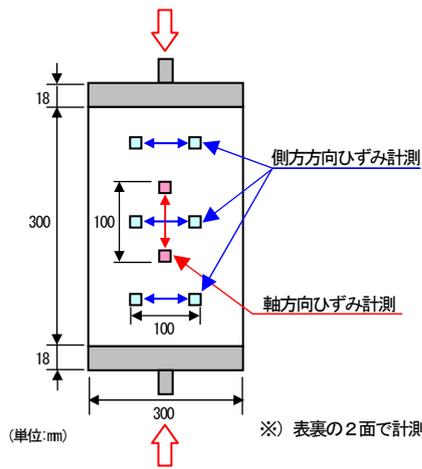


図-3 角柱供試体の計測箇所 (Case8)



写真-3 角柱供試体のクリープ荷重状況 (Case8)

Case8 は、クリープ荷重によって生じている側方への膨らみの程度の把握を目的とした試験である。コンタクトゲージによるひずみ計測は、円柱供試体では行えないため角柱供試体を用いた。計測箇所は、図-3 のように片面あたり軸方向1カ所、側方方向3カ所設け、表裏の2面について計測を行った。なお、この供試体は、Case7 と同様に供試体表面をシール（アルミ箔テープ $t=0.5\text{mm}$ ）により被覆し封緘状態とした。クリープの荷重状況を写真-3 に示す。

③乾燥クリープの影響 (Case9~11)

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-4）。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。Case9~Case11 は

全て、荷重時材齢 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、封緘状態で荷重を行った。

Case9 における荷重応力については、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応力レベルを後述の 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 ）。

Case10 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、Case11 は、CSG と RCD の配合による比較を行うために、Case9 と同様の試験を RCD 供試体で実施したものである。

なお、Case9 と Case11 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。

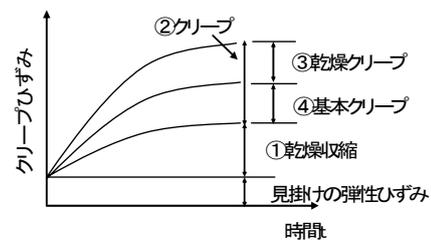


図-4 クリープ

2.3.2 Case9~11 の荷重応力の検討

Case9~11 のクリープ荷重応力は、FEM 解析を実施して設定した。図-5 に解析モデルのイメージ図を、表-9 に解析モデルの主要諸元、表-10 に入力物性値を示す。解析における荷重条件を表-11 に示す。解析では、堤高 50m 及び 100m のダムについて、それぞれ「自重のみ（水位：0m）」、「自重+静水圧（水位： $0.9 \times$ 堤高）」を作用させた。解析結果を図-6、7 に示す。図-6 は堤高 50m モデルにおける最小主応力コンター図を、図-7 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。Case9~11 のクリープ試験では、「自重+静水圧」を考慮したときの最大圧縮応力を荷重応力として、堤高 50m 相当のダムにおける荷重応力は 0.79N/mm^2 を、堤高 100m 相当のダムについては 1.55N/mm^2 を荷重応力とした。

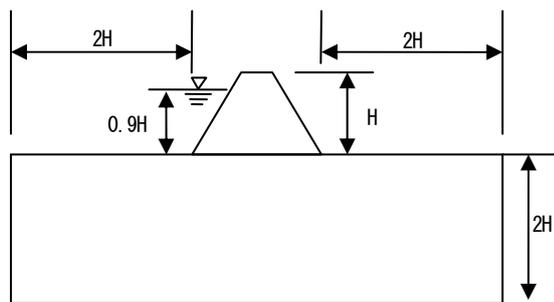


図-5 解析モデルのイメージ

表-9 モデル条件

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

表-10 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-11 荷重条件

荷重	条件
自重	
静水圧	0, 0.9H (H: 堤高)

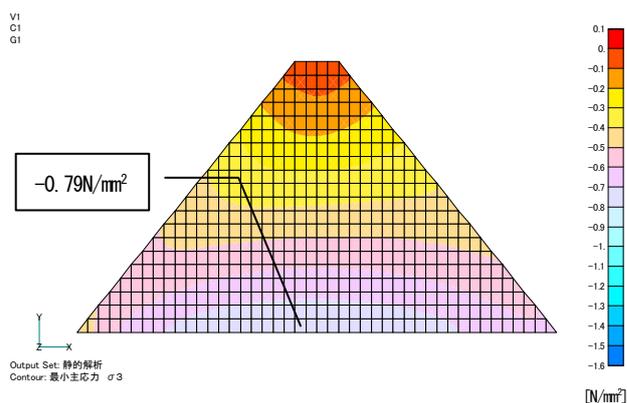


図-6(2) 最小主応力コンター図
(堤高 50m モデル: 自重+静水圧)

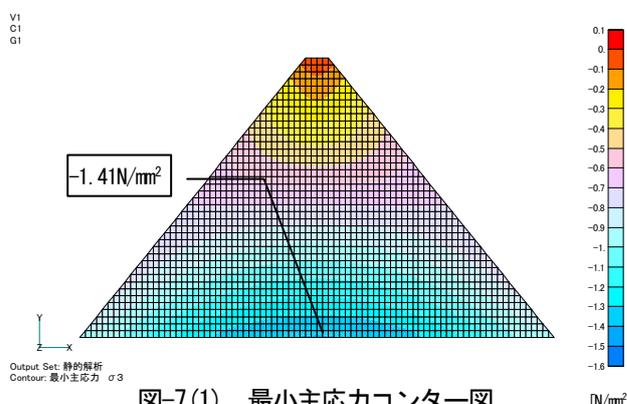


図-7(1) 最小主応力コンター図
(堤高 100m モデル: 自重のみ)

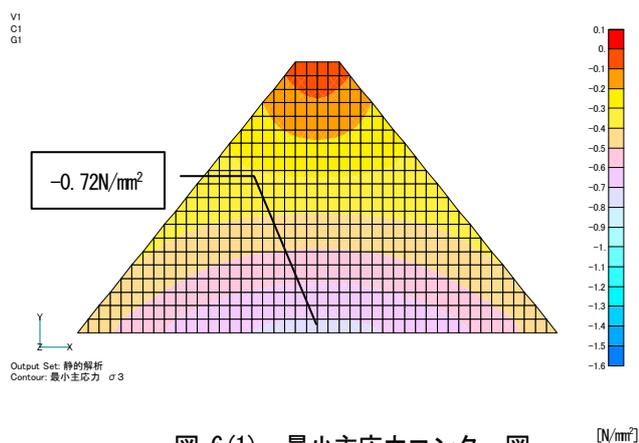


図-6(1) 最小主応力コンター図
(堤高 50m モデル: 自重のみ)

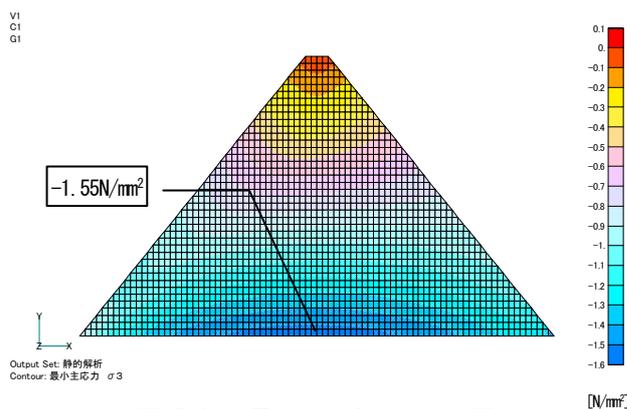


図-7(2) 最小主応力コンター図
(堤高 100m モデル: 自重+静水圧)

2.4 試験結果

2.4.1 一軸圧縮試験結果

図-8(1)～(3)に各材齢における CSG1、CSG2、CSG3、RCD の代表的な応力-ひずみ曲線を示し、表-12 に材齢と作製年度の違いに着目して整理した一軸圧縮試験結果(強度及び静弾性係数)を示す(Case1～11)。また、平成 18 年度製作の 28 日材齢供試体(Case1～3)と比較するために、平成 19 年 7 月製作の Case4～6 と同時期に同材料で作製した供試体の 28 日材齢時における一軸圧縮試験結果を表-13 に示す。

表-12 一軸圧縮試験結果(3 供試体平均)
(供試体作製時期の違いに着目(使用材料の違い))

項目	ケース	材齢 (日)	CSG1	CSG2	CSG3	RCD
弾性領域強度 σ_e (N/mm ²)	Case1～3	28	3.1	1.7		2.9
	Case4～6	91	9.8	7.6		10.3
	Case7,8	91	5.2			
	Case9～11	91	6.8		10.8	7.6
ピーク強度 σ_p (N/mm ²)	Case1～3	28	6.1	2.9		7.6
	Case4～6	91	14.1	11.1		14.9
	Case7,8	91	6.3			
	Case9～11	91	11.6		16.5	13.7
σ_p / σ_e	Case1～3	28	1.9	1.7		2.6
	Case4～6	91	1.4	1.5		1.4
	Case7,8	91	1.2			
	Case9～11	91	1.7		1.5	1.8
静弾性係数 (N/mm ²)	Case1～3	28	5,500	2,400		3,600
	Case4～6	91	9,700	10,500		9,100
	Case7,8	91	6,500			
	Case9～11	91	8,300		12,000	12,300

表-13 一軸圧縮試験結果(3 供試体平均):28 日材齢
(供試体作製年度の違いに着目)

項目	ケース	CSG 1	CSG2	RCD
弾性領域強度 σ_e (N/mm ²)	Case1～3	3.1	1.7	2.9
	Case4～6	5.3	2.6	5.6
ピーク強度 σ_p (N/mm ²)	Case1～3	6.1	2.9	7.6
	Case4～6	6.4	4.2	10.8
σ_p / σ_e	Case1～3	1.9	1.7	2.6
	Case4～6	1.2	1.6	1.9
静弾性係数 (N/mm ²)	Case1～3	5,500	2,400	3,600
	Case4～6	6,200	4,200	10,000

2.4.2 クリープ試験結果

①微粒分含有量及び材齢の比較 (Case1～6)

Case 1～6 のクリープひずみを図-9 に、クリープひずみを載荷応力で除した単位載荷応力あたりのクリープひずみ(以下、単位クリープと呼ぶ)を図-10 に示す。なお、Case2 については、クリープ試験の計測結果のばらつきが大きかったため本報告の対象からは除外している。

図-9 の 28 日材齢(Case1～3)の試験結果に着目すると、RCD のクリープひずみが最も小さく、CSG のクリープひずみは、RCD の 2 倍程度の値となっている。また、クリープひずみは RCD、CSG ともに載荷応力の増加に伴い大きくなることを確認できる。

図-9 の 91 日材齢(Case4～6)に着目すると、RCD のクリープひずみが最も小さい値を示していることや、RCD、CSG ともに載荷応力の増加に伴いクリープひずみも大きくなることは、28 日材齢の場合(Case1～3)と同様の傾向である。また、微粒分含有量 10% クリープひずみ(CSG2)は、微粒分含有量 6% の CSG1 より大きな値を示し、1.5 倍程度の値となっている。

図-9 において、載荷開始時材齢による違いを見ると、載荷開始時材齢 91 日の試験値は、載荷開始時材齢 28 日よりも大きな値を示している。これは、載荷応力が各材齢供試体における弾性領域強度 σ_e に対する一定比率で設定しているためであると考えられる。具体的には、CSG1 の弾性領域強度比 30% の載荷では載荷開始時材齢 28 日で 0.9 N/mm² であるのに対し(表-8 Case1)、載荷開始時材齢 91 日では 3.2 N/mm² となり(表-8 Case4)、載荷応力が約 3.6 倍となっている。そのため、載荷開始時材齢 91 日の供試体に大きな載荷応力が作用していたことが要因であると考えられる。

図-10 の 28 日材齢(Case1～3)の単位クリープにおいても、CSG は RCD の 2 倍程度となっていることがわかる。

図-10 の 91 日材齢(Case4～6)の単位クリープについては、微粒分含有率 10% の CSG2 の単位クリープが最も大きく、RCD のクリープひずみが最も小さい。また、CSG1、CSG2 の単位クリープは載荷の初期段階で大きく伸びている。

図-10 において、材齢開始時による違いをみると、91 日材齢供試体(Case4～6)の単位クリープが 28 日材齢供試体(Case1～3)よりも小さい値であることから、同一のクリープ荷重の下では材齢が大きくなると、クリープひずみが小さくなる傾向がある。また、91 日材齢供試

体 (Case4~6) の単位クリープは、28 日材齢供試体 (Case1~3) の単位クリープと比較して、全配合ともばらつきが小さい。これは、材齢を経て硬化が進んだことにより、各供試体の強度のばらつきが小さくなったためであると考えられる。

②側方変位拘束の影響 (Case7, 8)

図-11 に、塩ビ管による側方変位拘束の有無による違い (Case7) を示す。クリープ荷重載荷後、56 日目のクリープひずみを見ると、側方への膨らみを拘束した供試体と、拘束せずに封緘した状態の供試体の差は、 100μ 程度の小さな差である。

図-12 に、Case8 の角柱供試体を用い、クリープ荷重載荷方向 (軸方向) のひずみと、側方方向ひずみ、及び荷重載荷後の計測時点でのポアソン比を示す。ポアソン比の算出式は式(1)に示すとおりである。

$$\nu = \frac{\varepsilon_t}{\varepsilon_l} \quad (1)$$

ここに、 ν : ポアソン比、 ε_l : 軸方向ひずみ、 ε_t : 側方方向ひずみを示す。それぞれのひずみの値については、測定結果の平均値を用いている。クリープひずみの計測結果については、軸方向のクリープひずみが、クリープ荷重載荷後の日数の経過により大きく伸びているのに対し、側方ひずみは大きな伸びが認められない。また、ポアソン比の経時変化についても、クリープ荷重載荷後日数を経るに従いポアソン比が小さくなっていることがわかる。以上より、CSG の軸方向クリープひずみは、供試体の側方への膨らみに起因する大きな影響は小さいと考えられる。

③乾燥クリープの影響 (Case9~11)

Case9 と Case11 について、クリープひずみを図-13(1)に、単位クリープを図-13(2)に示す。Case9~11 はクリープ載荷期間が現在までのところ 28 日までの結果である。

CSG1 の封緘状態における単位クリープ(図-13(2)②、③)について、載荷応力 0.79 N/mm^2 (堤高 50m 級のダム相当) の場合と、載荷応力 1.55 N/mm^2 (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(図-13(2)①)は、封緘状態の単位クリープ(図-13(2)②、③)に比べて 3 倍程度大きな値となっている。以上より、単位クリープは、載荷応力の大きさによる影響はほとんどなく、乾燥クリープによる影響が非常に大きいことがわかる。

封緘状態における CSG1 (図-13(2)②、③) と RCD (図-13(2)⑤、⑥) のクリープ荷重載荷後 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。ここで、長期載荷時の Case4 と Case6 における単位クリープ(図-10)をみると、CSG1 (Case4) の場合、クリープ荷重載荷後 28 日の単位クリープは、クリープ荷重載荷後 365 日の 6 割程度であるのに対して、RCD (Case6) の場合は 3 割程度である。つまり、CSG の単位クリープは載荷の初期段階で大きくなるため、載荷後 28 日以降は収束する傾向にあると考えられるが、RCD の場合は、載荷後 28 日以降についても単位クリープがさらに変化するものと考えられる。したがって、今後クリープ試験を継続することにより、長期的なクリープひずみを計測し、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 : 97 kg/m^3) 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 : $120 \sim 140 \text{ kg/m}^3$) は、セメントとの反応に消費されるだけでなく微粒土質分への含水比もあり、クリープ載荷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。

図-14 に、クリープ載荷応力 1.55 N/mm^2 (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 CSG3 は、母材の粒度分布は同じ(図-1)であるが、単位セメント量が異なり、それぞれ 80 kg/m^3 、 120 kg/m^3 である。ピーク圧縮強度はそれぞれ 11.6 N/mm^2 、 16.5 N/mm^2 (表-12) である。クリープ荷重載荷後 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、CSG3 は 100×10^{-6} 程度となっている。以上より、単位セメント量が多い CSG の方が、ピーク圧縮強度が高く、クリープひずみが小さい。現在までのところ、クリープ荷重載荷後 28 日までの結果しかないため、今後、計測を継続していく。

2.5 まとめ

- ・ 単位クリープ (クリープひずみを載荷応力で除した単位応力当りのクリープひずみ) は、材齢が大きい供試体ほどばらつきが小さく、またその値も小さい。また、91 日材齢供試体においては、微粒分含有量が多い配合条件の方が大きなクリープひずみが生じて

いるが、28 日材齢供試体では、その傾向を確認できなかった。

- 側方変位拘束の有無によるクリープ計測や角柱供試体による側方変位の計測から、CSG のクリープ載荷軸方向クリープひずみに対して、側方方向ひずみは非常に小さいことが確認された。これは、CSG では、供試体が側方へ膨らむことによって載荷方向クリープひずみが大きくなることを助長しているのではないと考えられる。
- 封緘状態におけるクリープ荷重載荷後の初期段階である 28 日での単位クリープは、CSG が RCD に比べて 8 倍程度大きい。また、CSG は RCD に比べて

乾燥クリープの影響が大きい。RCD については、クリープ荷重載荷後 28 日以降においても単位クリープがより変化することが考えられる。したがって、今後、クリープ荷重載荷後 28 日以降の試験計測を継続し、長期載荷による CSG のクリープ特性を把握していく。また、単位セメント量を増やすことによって、CSG のクリープひずみは小さくなる。これについても今後の試験計測の継続を行う予定である。

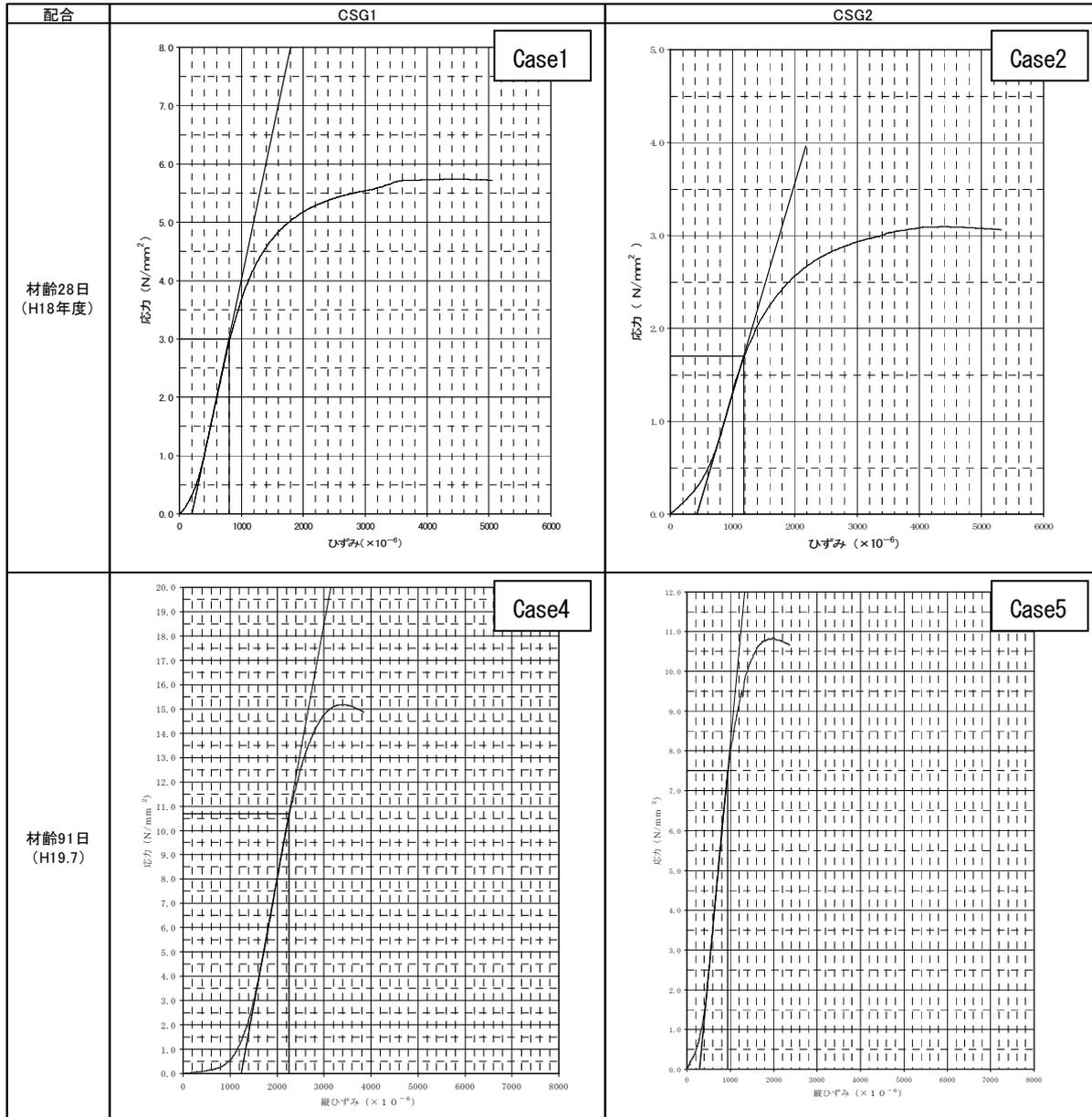


図-8(1) 応力ひずみ曲線の例

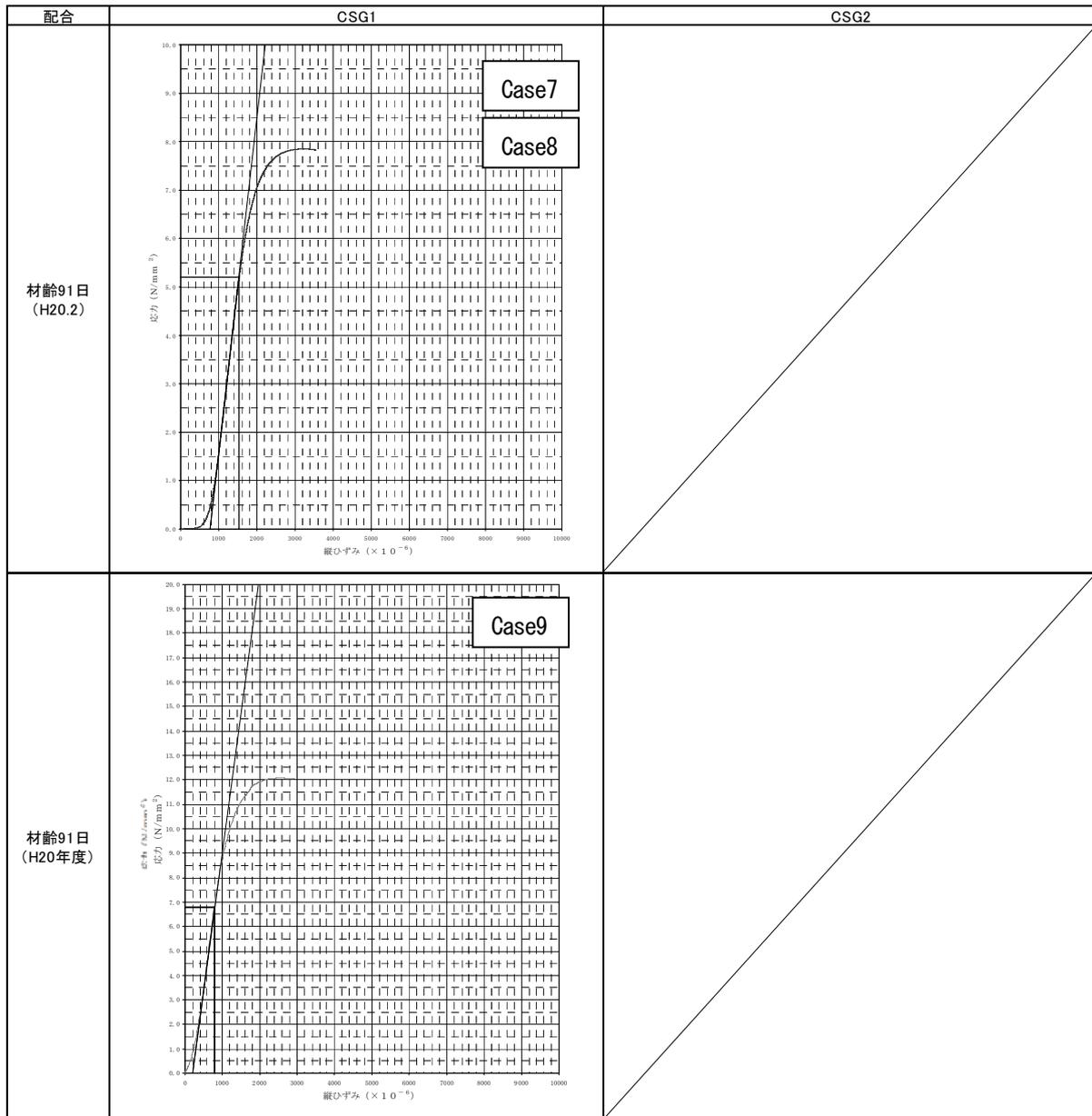


図-8(2) 応力ひずみ曲線の例

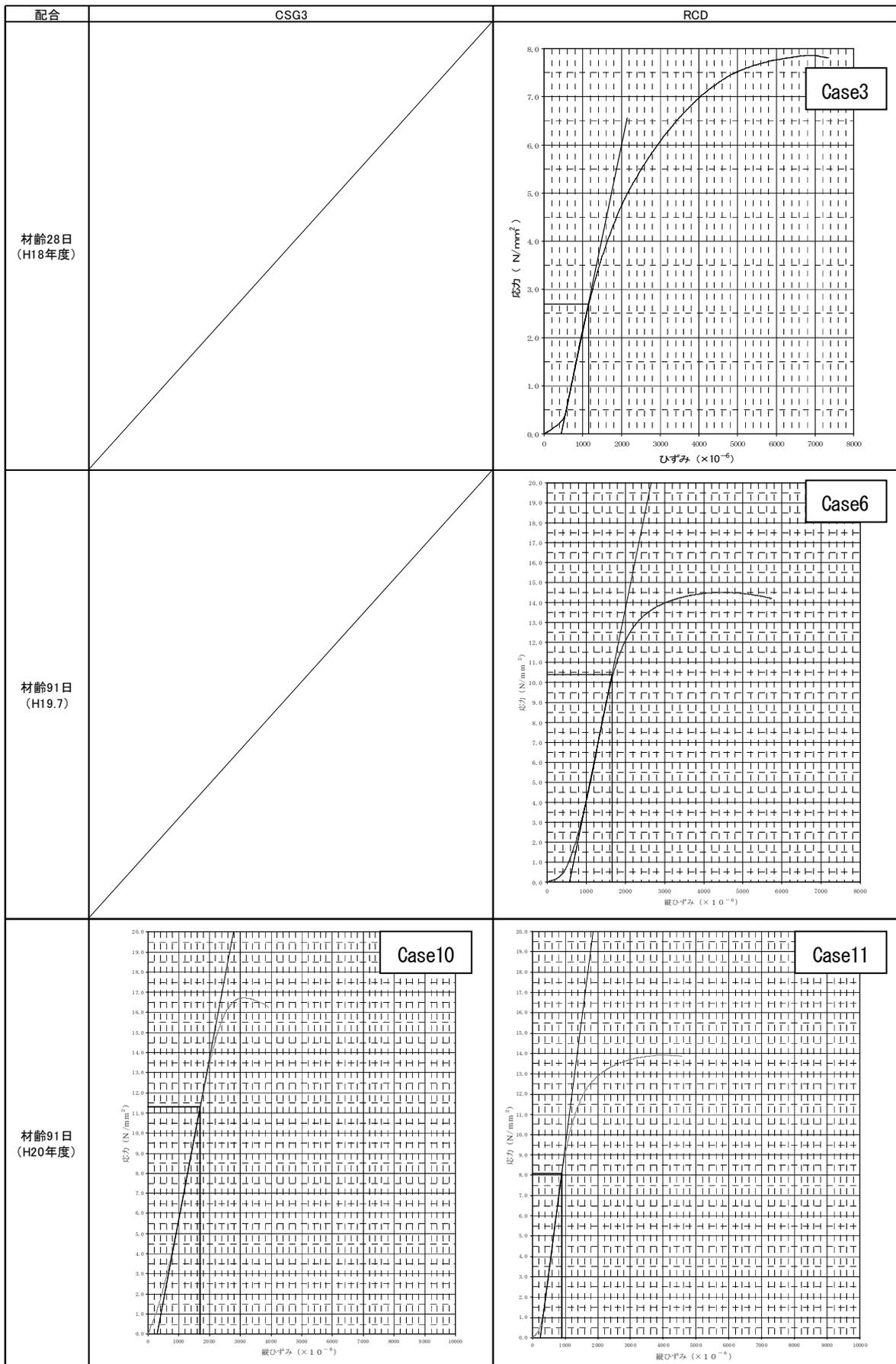


図-8(3) 応力ひずみ曲線の例

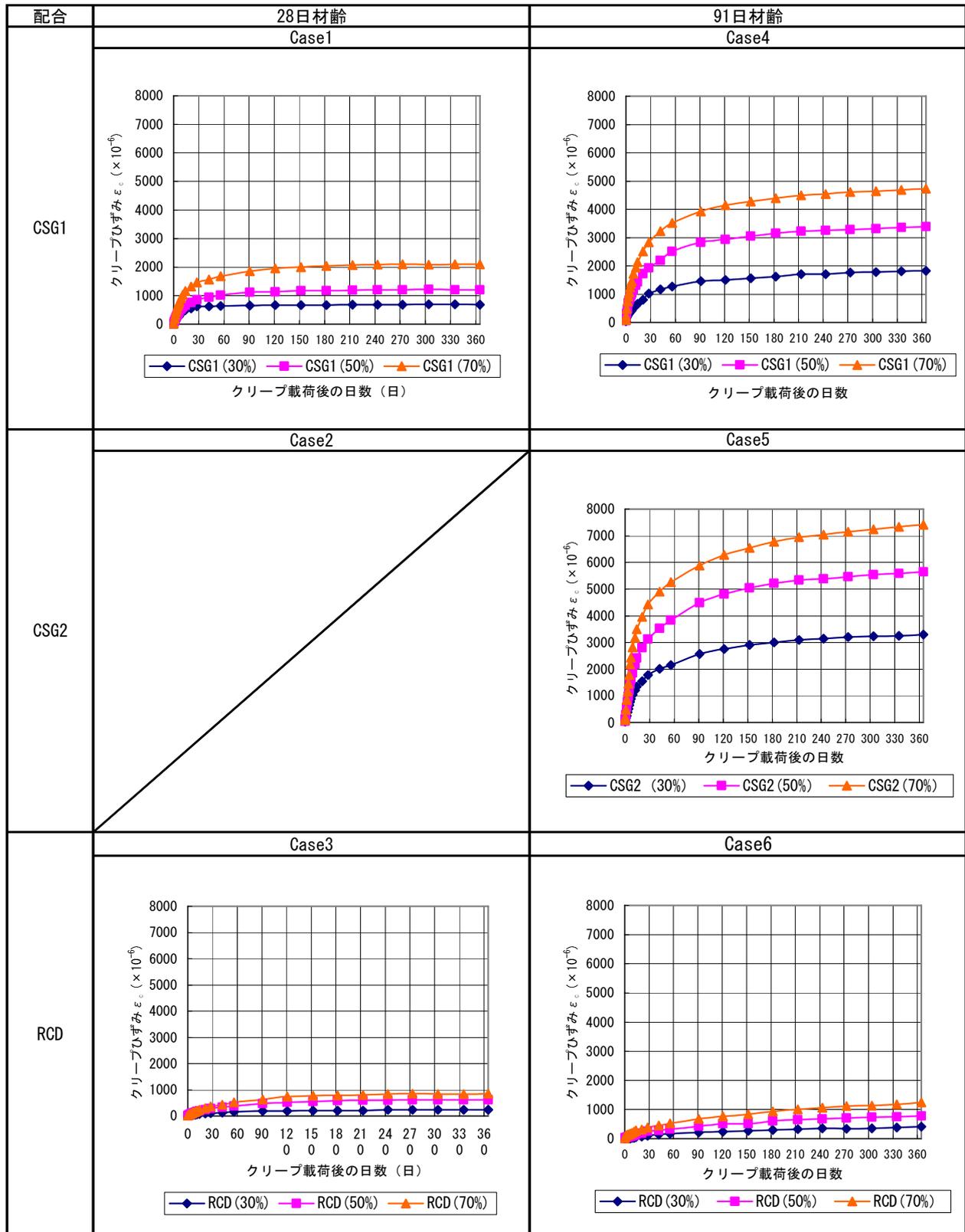


図-9 クリープひずみ(载荷開始時材齢 28 日、91 日比較) (気中)

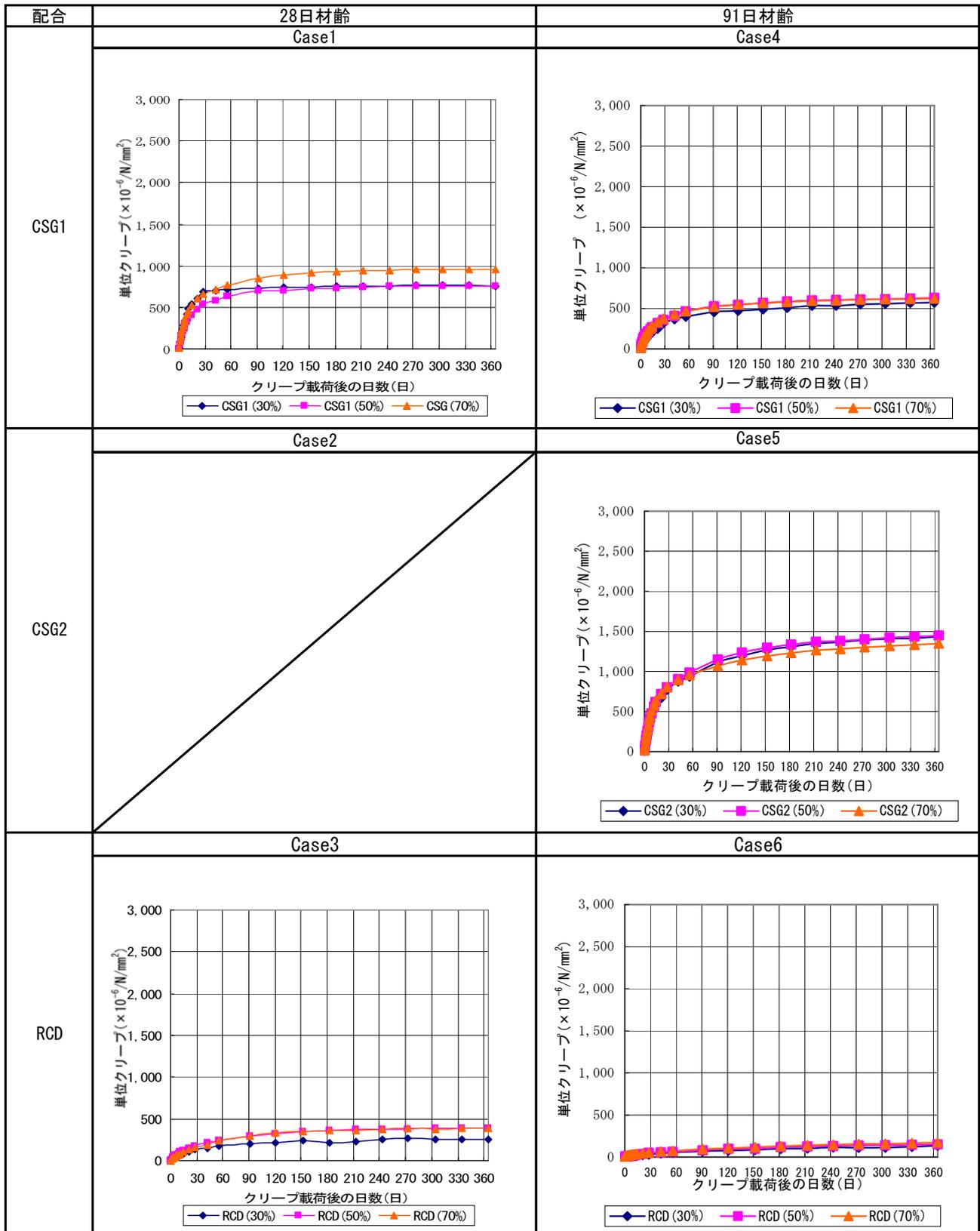


図-10 単位クリープ（载荷開始時材齢28日、91日比較）（気中）

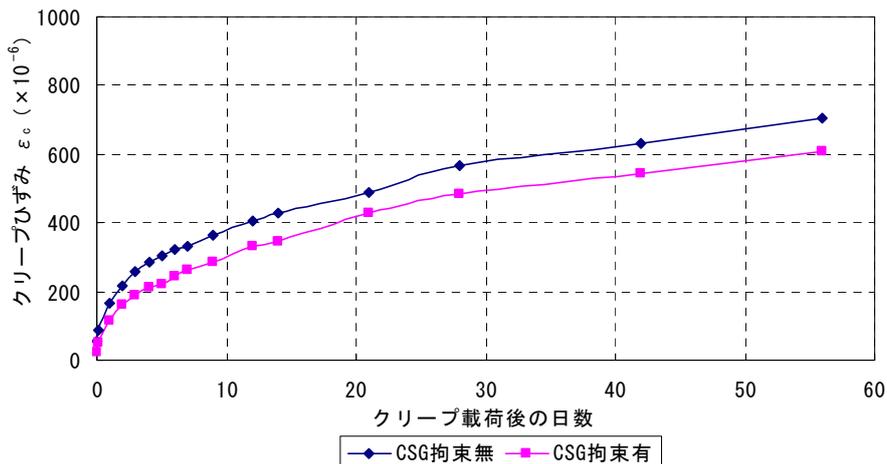


図-11 クリープひずみ (側方拘束の有無による比較 : Case7, CSG1)

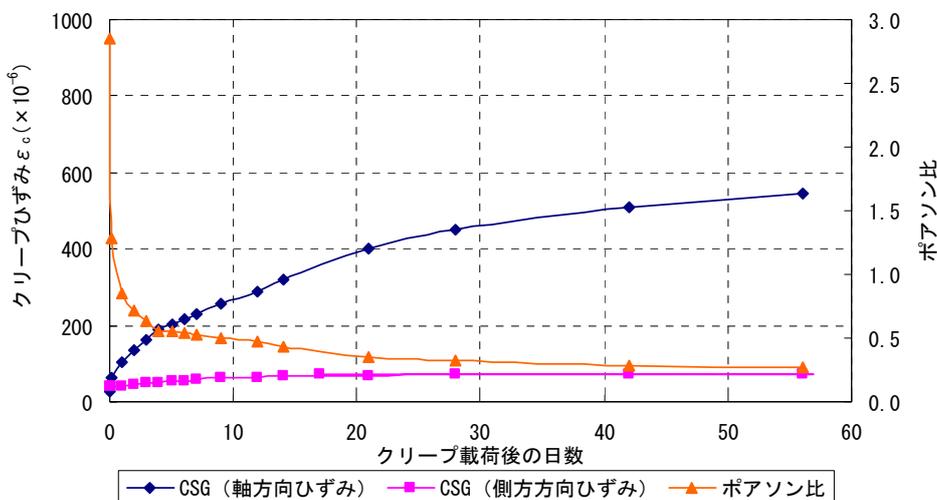
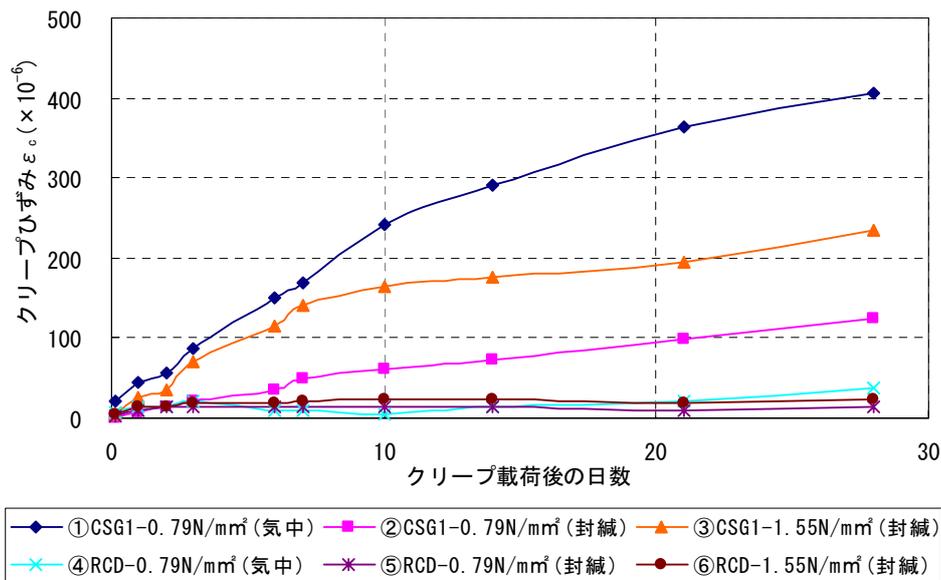


図-12 クリープひずみ (側方拘束の有無による比較 : Case8, CSG1)



※) 0.79MPa : 堤高50m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
 1.55MPa : 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
 封緘 : 供試体周囲をアルミ箔シートで封緘した状態
 気中 : 封緘しない状態

図-13(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の影響 : Case9 と Case11)

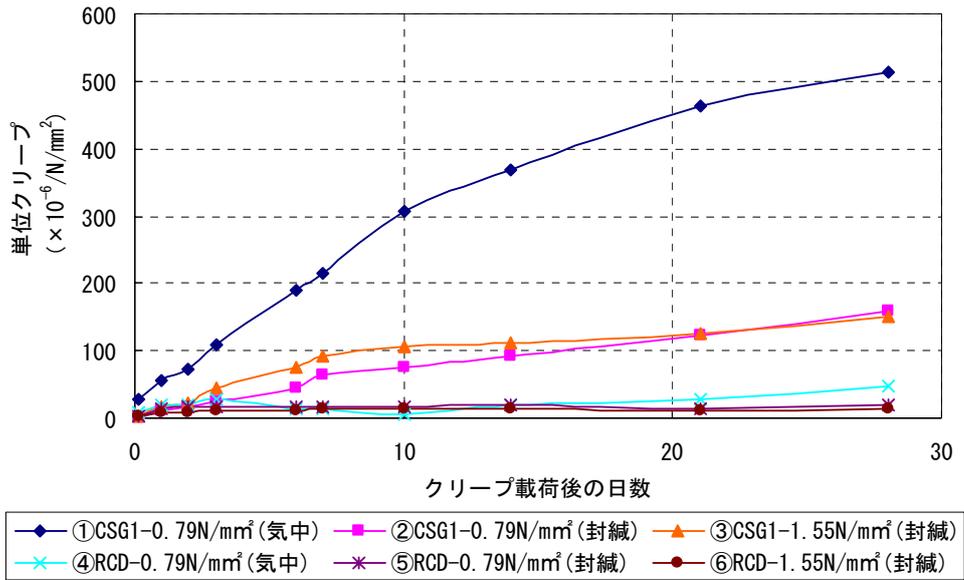


図-13(2) 単位クリープ (乾燥クリープの影響及びクリープ荷重の違いの影響 : Case9 と Case11)

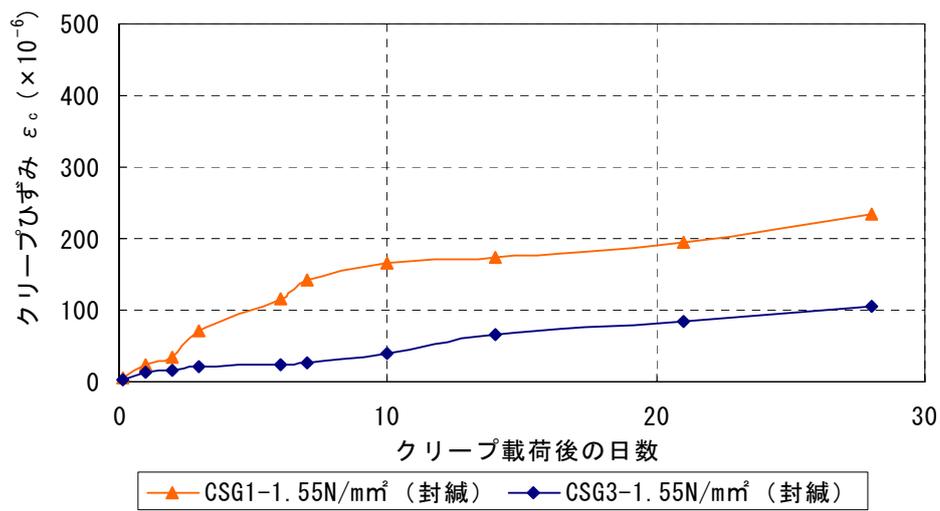


図-14 クリープひずみ (単位セメント量の違いによる比較 : Case9 と Case10)

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-15** に示すような、CSG 材粒度の分布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、ひし形内における強度の出現密度分布、及び設定したひし形の枠を外れ、必要 CSG 強度を満たさない材料の混入率や混入分布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分析を行った。

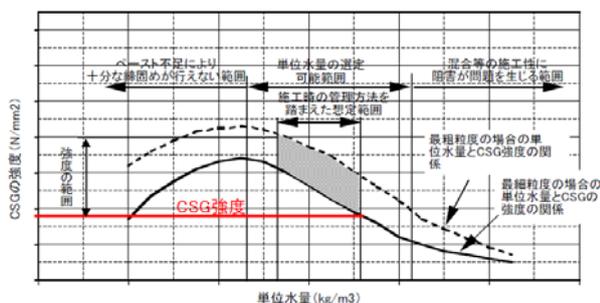


図-15 CSG 粒度の幅と単位水量管理範囲から求まる CSG の強度の範囲のイメージ

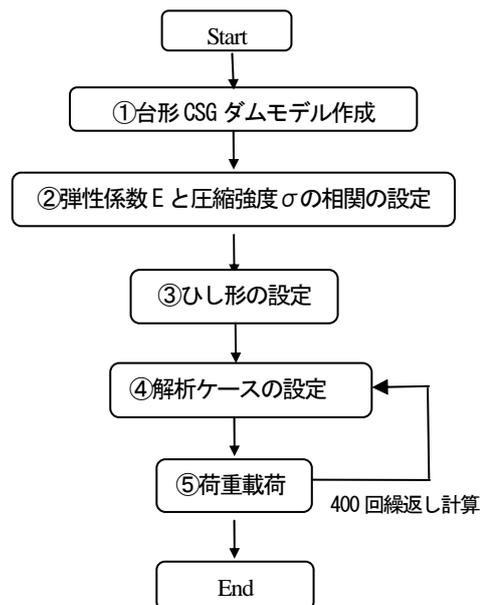


図-16 解析手順

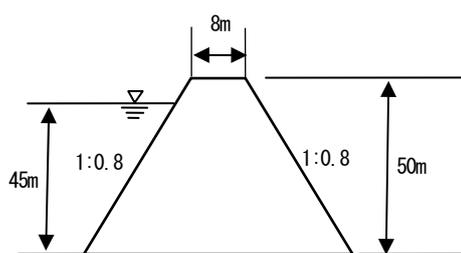


図-17 解析モデルのイメージ

3.1 解析方法

3.1.1 解析手順

解析手順を示すと**図-16**のとおりである。

3.1.2 解析モデル

解析モデルを**図-17**に、主要諸元を**表-14**に示す。解析モデルは、本解析では、ダム堤体に生じる応力について着目することから基礎岩盤は含まないモデルとした。

3.1.3 解析手法

解析方法は、モンテカルロ法を用いた。堤体の各要素に設定した強度の分布形状から不規則に強度(弾性係数)を割り付けるものとした。そして、各要素への強度(弾性係数)を割り付けた後、荷重を載荷した。各要素への強度(弾性係数)の割付けから荷重載荷までの作業は400回繰り返した。

表-14 モデルの主要諸元及び物性値

諸元	設定値
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
貯水位(m)	45
CSGの単位体積質量(kg/m³)	2,200
ポアソン比	0.25

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、弾性係数を割り付けることとなる。そこで、解析により求められる応力値と強度の比率である安全率で評価するために、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、A ダムの CSG 材料の圧縮強度試験³⁾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）とピーク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）。

$$E = 0.853\sigma_p + 0.2321 \quad (2)$$

E : 弾性係数 (kN/mm²)

σ_p : ピーク強度 (N/mm²)

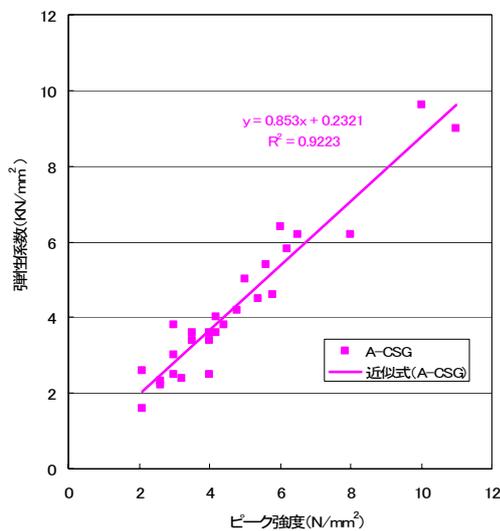


図-18 CSG の弾性係数とピーク強度の関係 (A ダム)

3.1.5 ひし形の設定

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の設定を行った。図-19 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、計画されている堤高 50m 級の 4 つの実ダム (AP ダム、S ダム、M ダム、T ダム) の CSG 材料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、1.5N/mm²～5.5 N/mm² に分布するとし、中間的粒度 (図中 粒度 2) で、中間的単位水量 (図中 W2) における強度を 3.5 N/mm² と設定した。

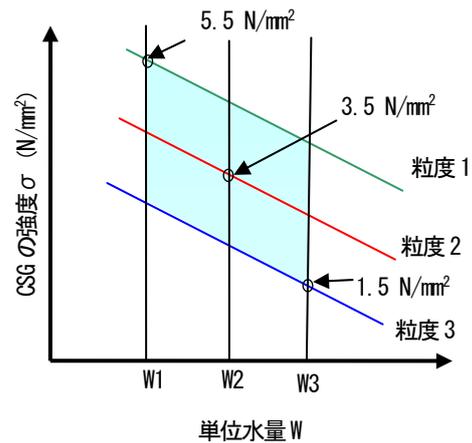
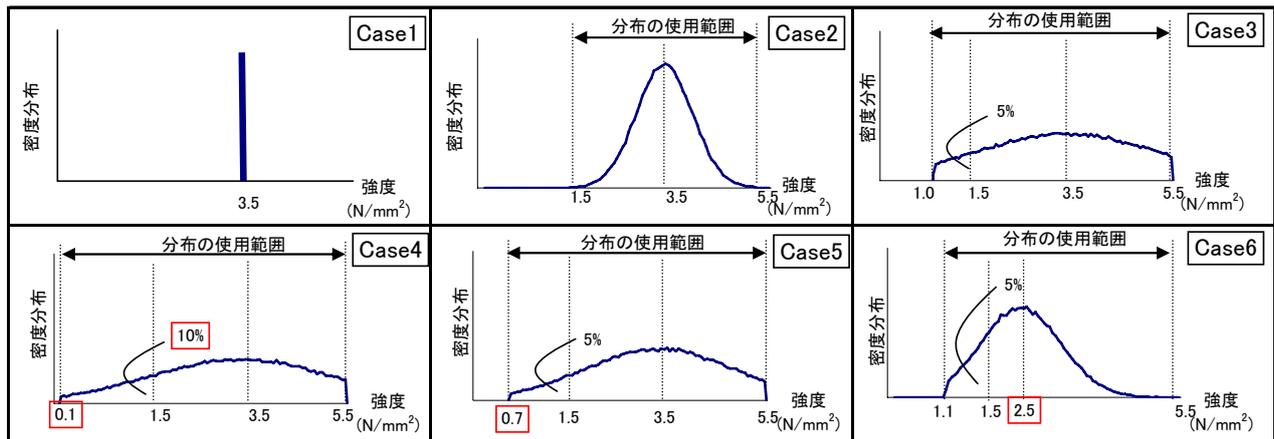


図-19 設定したひし形

表-15(1) 材料強度のばらつき設定

CaseNo	分布形状	材料強度				基準強度を下回る母材の混入率(%)	分布イメージ図
		最大値 (N/mm ²)	最小値 (N/mm ²)	最頻値 (N/mm ²)	分散 (N/mm ²) ²		
Case1	一定	-	-	3.5	-	-	
Case2	正規分布の変形	5.5	1.5	3.5	0.53	0	
Case3		5.5	1.0	3.5	1.75	5	
Case4		5.5	0.1	3.5	1.75	10	
Case5		5.5	0.7	3.5	1.4	5	
Case6		5.5	1.1	2.5	1.4	5	

表-15(2) 解析に用いた材料強度のばらつきの確率密度分布



3.1.6 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基準強度 (1.5 N/mm^2) を満たさない強度の材料の混入割合、最低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-15(1)にまとめる。また、解析に使用した各ケースの材料強度のばらつきの確率密度分布を表-15(2)に示す。材料強度のばらつきの確率密度分布の作成方法は、まず、表-15(1)に示した最頻値(平均値)として)と分散の値を元に正規乱数を発生させた。次に、その分布における下限値以下の範囲、及び上限値以上の範囲になった場合は、下限値(最小値)～上限値(最大値)の範囲になるように再度正規乱数を発生させて設定範囲に収まるようにした。そのため Case3～Case6 においては、下限値辺りで想定した条件と密度分布形状が若干不連続な分布となってしまった。各ケースにおける分布設定の想定内容について、以下に述べる。

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

Case2 は、設定したひし形内の上下限強度内 ($1.5 \sim 5.5 \text{ N/mm}^2$) で、最頻値強度 (3.5 N/mm^2) を中心に正規分布するとしたケースである。このケースは、実施工においては、平均的粒度(図-19中 粒度2)の分布が頻出し、かつ単位水量も一定値管理できたと想定したケースとなる。

Case3 は、最頻値強度を 3.5 N/mm^2 、強度の最小値を 1.0 N/mm^2 とした分布であり、基準強度 (1.5 N/mm^2) を満たさない強度の要素が 5%混入するとしたケースである。これは、施工時に当初設定したひし形の枠を下回る粒度分布の材料が混入する場合や、気象条件の影響で材料に含まれる水量が変化した場合、また局所的な締固め不足などの影響により基準強度を満たさないものが含まれたと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 は、最頻値強度を 3.5 N/mm^2 、強度の最小値を 0.1 N/mm^2 とした分布であり、基準強度 (1.5 N/mm^2) を満たさない強度の要素が 10%混入するとしたケースである。

Case5 は、最頻値強度を 3.5 N/mm^2 とし、基準強度 (1.5 N/mm^2) を満たさない要素の強度割合を 5%とした上で、強度の最小値を Case3 よりやや小さな値 (0.7 N/mm^2) としたケースである。ただし、解析に使用したばらつき密度分布(図-15(2))をみると、Case5 の分布は最小値の値を Case3 より若干小さくしただけの違いとなった。

Case6 は、強度がひし形内の最頻値強度 (3.5 N/mm^2) よりも低い最頻値強度 (2.5 N/mm^2) となることを想定したケースであり、強度の最小値を Case3 と同程度の 1.1 kN/mm^2 とし、基準強度 (1.5 N/mm^2) を満たさない割合を 5%としたものである。これは、調査からは想定外の要因により、当初、設定したひし形が妥当ではなく、平均的と考えていた粒度分布が頻出せず、強度の低い粒度分布が頻出し、また局所的な締固め不足や気象条件の影響で材料に含まれる水量が変化したことなどの影響が重なったと想定したケースである。

3.1.7 荷重条件

荷重条件を表-16に示す。現行の台形 CSG ダムの設計では、地震荷重は動的解析により考慮しているが、繰返し計算のため、本解析では、簡略化した設定として、擬似静的解析を行い、地震力を震度として与え、水平慣性力を作用させた。

表-16 荷重条件

荷重	条件
堤体自重	
静水圧	0.9H (H: 堤高)
地震時慣性力	水平震度 0.25
地震時動水圧	Zanger 式による

3.2 解析結果と考察

3.2.1 ダム堤体内の強度・応力分布

解析の評価にあたって、台形 CSG ダムは台形形状のため、また本解析では剛基礎条件としたため、大きな引張応力が発生しないことから、圧縮応力（最小主応力 σ_3 ）により評価を行うこととした。

図-19 に例示として試算 200 回目における弾性領域強度コンター図と応力コンター図を示す。

強度コンター図を概観すると、強度のばらつき範囲が一番大きい Case 4 において最も広いばらつきのある分布を示している。応力コンター図については、強度コンター図でばらつきの大きいケースにおいて、応力コンター図もばらつきが大きくなっている。最頻値強度を 1N/mm^2 低くした Case 6 では、強度コンター図では、全体的に強度の値が低い分布を示しているものの、応力コンター図では、他のケースと比べて大きな応力は発生していない。全ケースを通して強度コンター図と応力コンター図による比較からは、応力が大きく発生している要素では大きな強度の要素が張り付いていることが見受けられる。これは、強度の大きい要素は、弾性係数も大きくなるため、発生応力も大きくなったことが理由として挙げられる。

3.2.2 安全率分布

図-20 に、例示として、200 回目における堤体に分布させた強度分布（図-19 左）と発生した応力（図-19 右）から算出した各要素の安全率分布を示す。安全率 F_s は、式 (3) より算出したものであるが、設定したひし形の強度 ($1.5\text{N/mm}^2 \sim 5.5\text{N/mm}^2$) が実 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 CSG の強度ではないことや、弾性係数を弾性領域強度ではなくピーク強度との関係から設定していること (3.1.4 弾性係数と圧縮強度の関連の設定)、及び地震時慣性力として大きな水平震度 (0.25) を設定していること (表-16 参照) 等から、発生応力は大きな値となっている。そのため (3) 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う。

$$F_s = \sigma_e / \sigma_3 \quad (3)$$

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

各ケースの安全率分布図を見ると、堤体強度に一定の強度を貼り付けた Case 1、および設定したひし形内で強度が分布する Case 3 では、安全率の分布形状は類似しており、また、他のケースに比べて特に低い安全率を示す要素もない。基準強度を満足しない要素混入率が大きい (10%) Case 4 を見ると、Case 1, 2 に比べて明らかに安全率の分布がばらついており、また低い安全率を示す要素も多く見られる。基準強度を満足しない要素を 5% 混入させた Case 3, 5, 6 を見ると、最小強度値がわずかに異なるのみで、密度分布がほぼ同じ Case 3 と Case 5 では、大きな差は認められないが、Case 3, 5 と Case 6 を比較すると、安全率の分布形状は類似しているが、Case 6 では低い安全率を示す要素の比率が大きい。これは、前述したように発生応力が他のケースと同レベルであるのに対し、Case 6 は最頻値強度が低いため、低い安全率を示す要素の比率が大きくなったものと考えられる。

3.2.3 安全率のばらつきの頻度分布

図-21 に、各ケースの安全率の頻度分布を示す。図-22 は、安全率の低い箇所を拡大表示したものである。

図-22 において、最頻値強度 2.5N/mm^2 の分布 (Case 6) に対する安全率頻度分布の最頻 (ピーク) となる安全率は、2.2 程度であり (図-22①)、最頻値強度 3.5N/mm^2 の分布 (Case 1~5) の最頻となる安全率は、2.7 程度である (図-22②)。また、Case 6 は Case 1~5 に比べて分布面積が安全率の低い領域で大きくなることも確認できる。以上のことから、最頻値強度が低くなると、最頻値安全率は小さくなり、かつ安全率が小さくなる頻度が高くなる。

また、基準強度 1.5N/mm^2 を全ての要素で満足する場合 (Case 2) の安全率の最小値 (図において頻度分布が立ち上がる地点) は 1.8 程度であり (図-22③)、基準強度を満足しない要素の混入率が 5% の場合 (Case 3, Case 5, Case 6) は 1.0 程度 (図-22④)、混入率 10% の場合 (Case 4) は 0.2 程度 (図-22⑤) となった。以上のことから、基準強度を満足しない要素の混入割合が多くなると、安全率頻度の最小値が小さくなる。

3.3 まとめ

①安全率分布の評価

- ・ 強度のばらつきが大きいと、堤体に発生した応力との安全率の分布図もばらつきが大きい。

14.3 台形 CSG ダムの材料特性と設計方法に関する研究

- ・ 最頻値強度が小さい場合において、堤体内の安全率分布では、安全率の小さい要素が多くなる。

②安全率のばらつきの評価

- ・ 最頻値強度が小さくなると、最頻値安全率は小さくなり、かつ小さい安全率領域の頻度が高くなる。

- ・ 基準強度を満足しない要素の混入割合が多くなると、安全率の最小値が小さくなる。

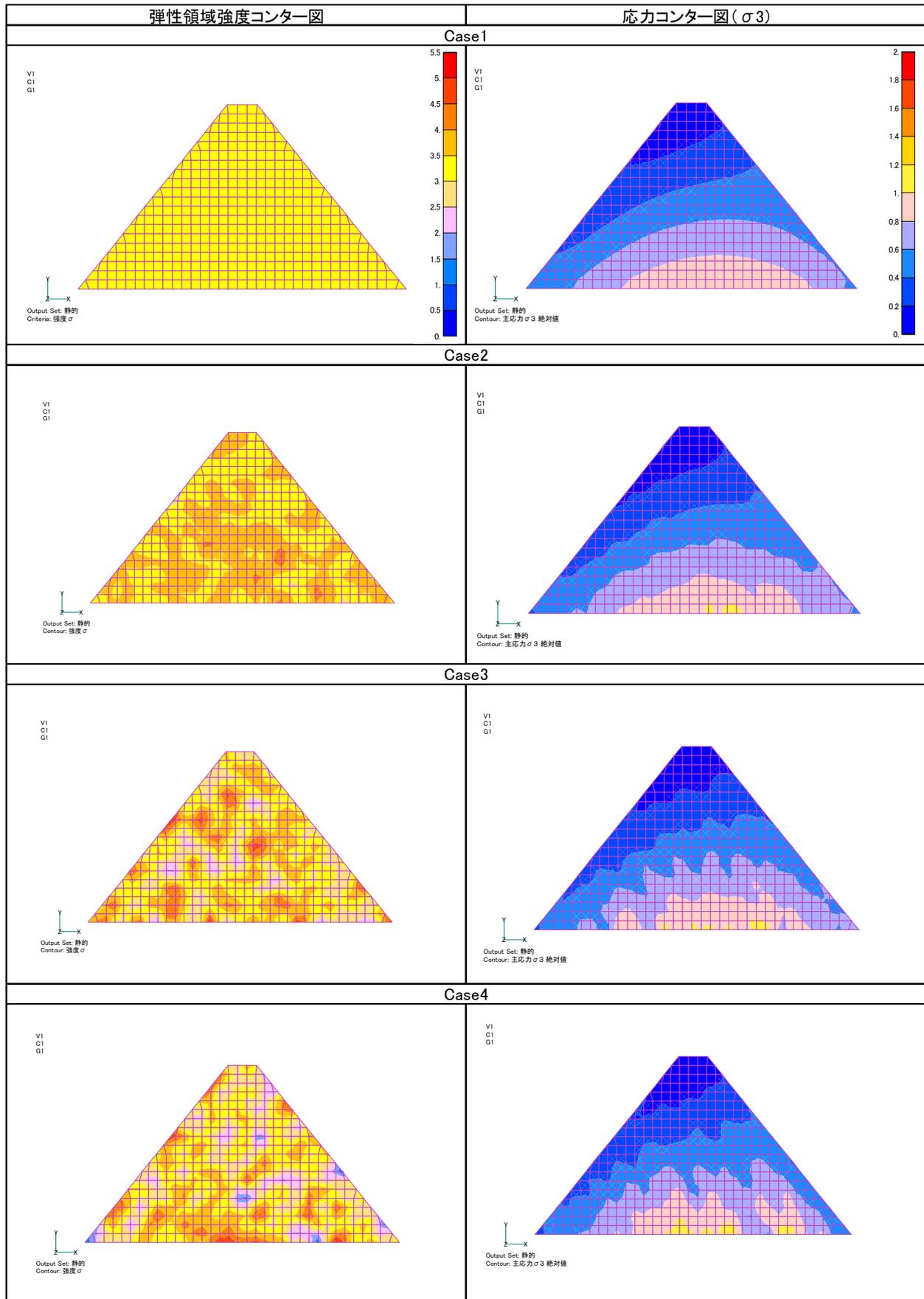


図-19 (1) 弾性領域強度コンター図と応力コンター図の一例 (Case1~4) (単位: N/mm^2)

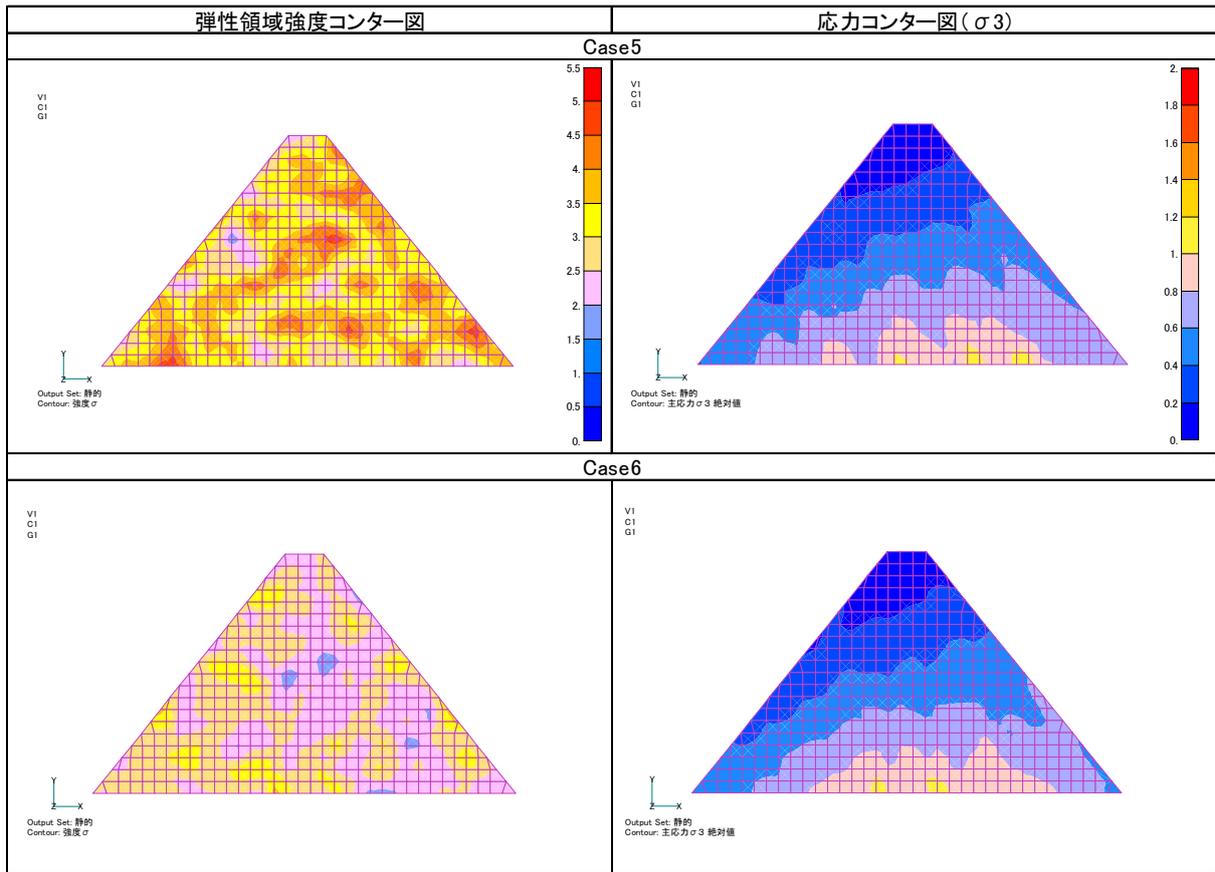


図-19 (2) 弾性領域強度コンター図と応力コンター図の一例 (Case5, 6) (単位 : N/mm^2)

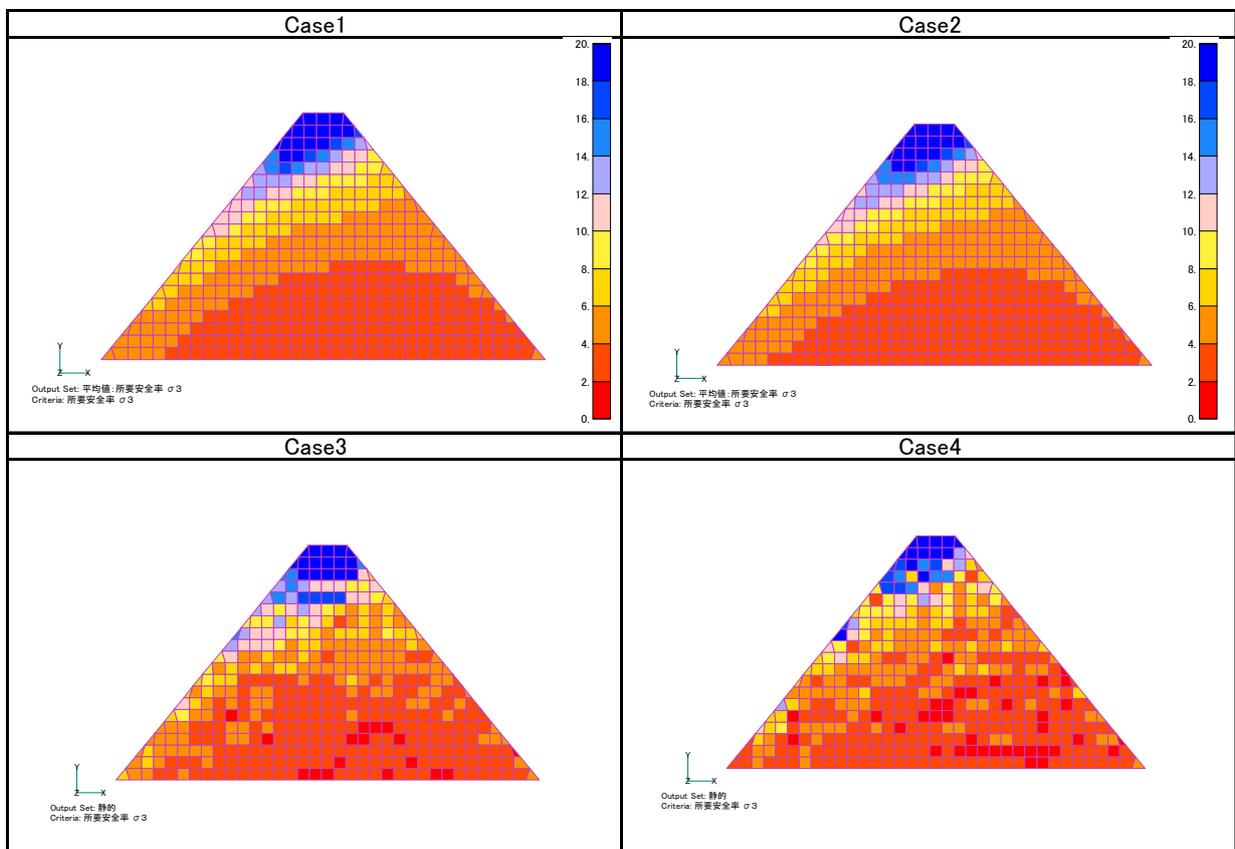


図-20(1) 安全率分布図の一例 (Case1~4)

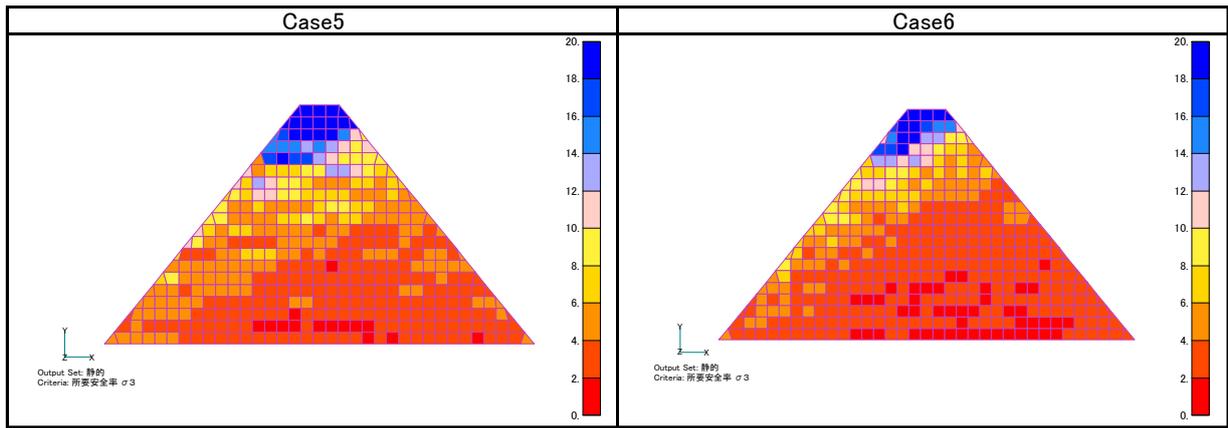
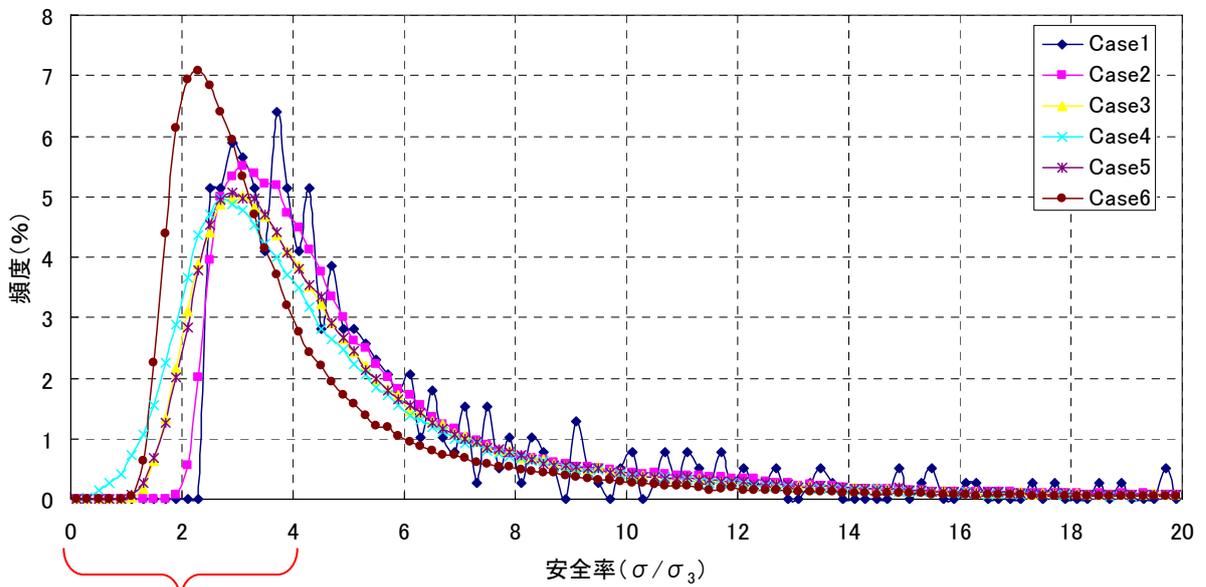


図-20(2) 安全率分布図の一例 (Case5, 6)



(拡大)

図-22 安全率の頻度分布

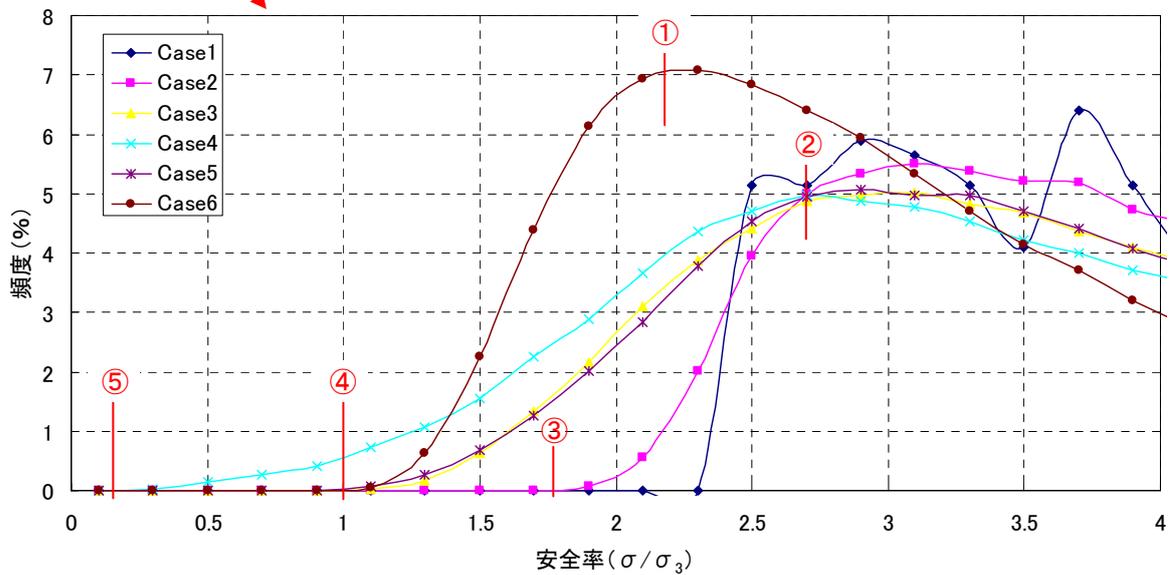


図-23 安全率の頻度分布 (拡大図)

参考文献

- 1) 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.
- 2) 山口嘉一, 佐々木隆, 中村洋祐: 「強度が不均一な堤体材料の設計法と品質管理法に関する研究」: 土木研究所成果報告書【平成 17 年度】, pp. 865-880, 2006. 3.
- 3) 藤澤侃彦, 吉田等, 平山大輔, 佐々木隆: 台形 CSG ダムの特徴と現在までの検討状況, ダム技術, No. 191, pp. 2-23, 2002. 8.

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

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.