

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：水工構造物チーム

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。そのために、CSG の繰返し載荷時の強度・変形特性、クリープ特性など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重力式ダムの設計方法を開発する必要がある。

本研究では、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、台形 CSG ダムの構造安定性への影響を検討した。また、モンテカルロ法によるダム堤体の応力解析から、材料のばらつきを考慮した台形 CSG ダムを含む重力式ダムの設計方法を提案した。さらに、実際に施工された台形 CSG ダムの CSG 材の品質管理データをもとに、品質管理方法の妥当性を判定する方法を提案した。

キーワード：CSG、繰返し載荷、クリープ、品質管理、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型式のダムである。

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、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実績を経て、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十分ではないのが現状である。また、CSG の繰返し載荷時の強度・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。

本研究では、台形 CSG の長期信頼性を確保するための CSG の強度指標の提案を念頭に、CSG の長期載荷時の変形

特性を把握するため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、堤体の構造安定性への影響を検討した。また、重力式ダム（直角三角形ダム、台形ダム）について堤体の物性のばらつきが堤体局所の安全性に与える影響を、モンテカルロ法による堤体応力解析により検討し、物性のばらつきを考慮した台形 CSG ダムを含む重力式ダムの設計方法を提案した。さらに、実際に施工された台形 CSG ダムの CSG 材の品質管理試験データを分析し、合理的な配合設計・品質管理方法を設定するため、品質管理の妥当性を判定する方法について提案した。

2. 繰返し載荷試験

2.1 目的

CSG は弾塑性体であるが、台形 CSG ダムの設計では CSG は弾性体として扱うことから、一軸圧縮試験における応力-ひずみ曲線から求まる弾性領域での最大応力に相当する値を「CSG の強度」とし、これを CSG の圧縮強度とする（図-2.1 参照）。しかし、長期的な繰返し載荷による変形特性については十分な解明がなされていない。本試験では、CSG を想定して作製した試験体に、CSG の強度の範囲内で変化する繰返し応力を与え、試験体配合および材齢による影響を確認した上で、繰返し載荷に対する変形特性について検討した。

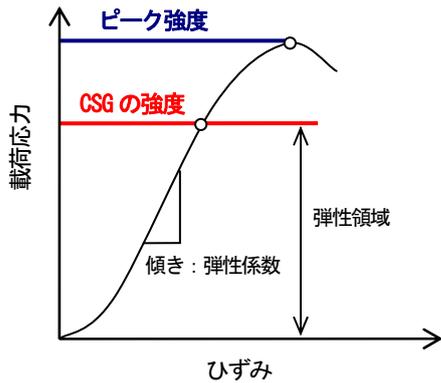


図-2.1 CSGの一軸圧縮試験における応力-ひずみ曲線の例

2.2 試験体条件

土木研究所ダム構造物チームの既往の研究成果¹⁾により、CSG母材に含まれる微粒分(粒径0.075mm未満、主に粘土分)の含有率が強度・変形特性に与える影響が大きいことが判明している。このため、CSGを想定した試験体には微粒分を加え、比較対照として微粒分を含有しないRCDを想定した試験体により、繰返し載荷試験を行った。材料とした母材は微粒分の影響を明確にするため、コンクリート用骨材(製品骨材)を用いた。CSG及びRCDの使用材料の物性を表-2.1に示す。試験の実施時期が異なる場合でも、可能な限り同じ条件とするため、材料は同一箇所から購入した(骨材:兵庫県産、粘土:藤の森粘土)。使用材料のCSG材/骨材粒度分布を図-2.2に示す。なお、CSG材の粒度分布は、CSGを用いて築堤された構造物のCSG材の粒径加積曲線を参考に設定した。また、CSGを想定した試験体に添加する粒径0.075mm未満の微粒分については、CSG材全質量に対して6%(CSG1)及び10%(CSG2)に設定した。RCDの使用材料のセメント、粗骨材、細骨材はCSGと同じ骨材を用い、混和材としてフライアッシュを用いた。CSGとRCDの試験体の配合を表-2.2に示す。単位セメント量はCSG、RCDともに80kg/m³とし、単位水量は各試験体についてVC試験等から締め固めに適切な単位水量を設定した。

なお、後述するクリープ試験についても、同配合の試験体を用いた。

2.3 試験方法

繰返し載荷試験は、写真-2.1に示す変位速度制御方式の一軸圧縮試験機を用いて行った。表-2.3に繰返し載荷に用いた試験機の仕様を示す。載荷・除荷速度は、ともに0.2~0.3N/(mm²・min)とし、荷重はロードセルにより、また、軸ひずみはひずみゲージ(供試体側面の中心付近に対方向2箇所設置)により測定した。

表-2.1 CSG及びRCD試験体の使用骨材物性

材料	物性	繰返し試験A	繰返し試験B	
骨材	80-40mm	表乾密度(g/cm ³)	2.60	2.60
		吸水率(%)	0.80	0.80
	40-20mm	表乾密度(g/cm ³)	2.59	2.59
		吸水率(%)	1.30	1.30
	20-10mm	表乾密度(g/cm ³)	2.59	2.59
		吸水率(%)	1.42	1.42
	10-5mm	表乾密度(g/cm ³)	2.59	2.59
		吸水率(%)	1.42	1.42
5mm-	表乾密度(g/cm ³)	2.58	2.58	
	吸水率(%)	1.42	1.42	
粘土	表乾密度(g/cm ³)	2.67	2.71	
	塑性指数	29.9	19.2	
フライアッシュ	密度(g/cm ³)	2.31	2.31	

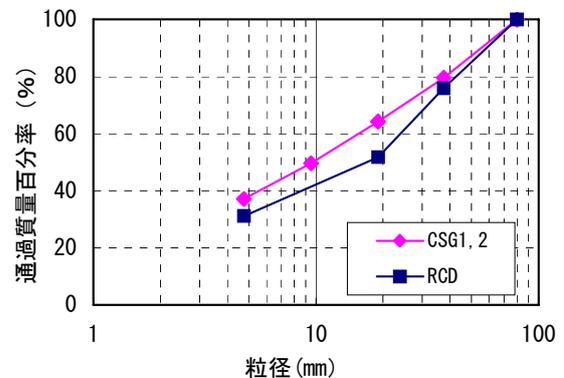


図-2.2 骨材粒度分布

表-2.2 CSG及びRCD試験体配合

試験体	CSG1	CSG2	RCD
最大粒径	40mm (最大粒径80mmの試料をウェットクリーニングした)		
微粒分添加量(%)	6	10	-
単位セメント量(kg/m ³)	80		
フライアッシュ(kg/m ³)	-		20
単位水量(kg/m ³)	120	140	97
養生方法	封緘養生		



写真-2.1 繰返し載荷試験実施状況

表-2.3 繰返し載荷試験機仕様

負荷方式	コンピュータコントロールシステムによる高精度ひずみ方式 引張・圧縮両張り負荷フレーム
秤量	0.01N~250kN
計測制御方式	コンピュータ計測制御方式
クロスヘッド速度と許容負荷	250mm/min以下：250kN 250mm/min以上：50kN
クロスヘッド速度	0.1~500mm/min
クロスヘッド速度精度	±0.1%以内

まず、本試験実施前に、弾性領域強度内（弾性領域強度の 30~50%程度）で 1 往復の試験載荷を実施し、載荷速度、除荷速度の設定が正しく行われていることを確認した後、本試験を行った。

また、繰返し載荷試験用の試験体と同一の配合で作製した試験体により、繰返し載荷試験と同じ材齢条件で一軸圧縮試験を行い、応力-ひずみ関係から CSG の強度、ピーク強度、静弾性係数を得た。なお、これらの値は、各配合 3 つの試験体の平均値とした。RCD では「CSG の強度」に相当する強度を設計上の強度に規定する概念は無いが、CSG と同様に応力-ひずみ曲線が直線と近似できる上限の応力値を弾性領域強度（以下、繰返し試験及びクリープ試験について、RCD の弾性領域強度を CSG 同様に「CSG の強度」という）とし、これにより両者を比較することとした。

2.4 試験条件

試験ケースは CSG の強度に対する比率で載荷応力レベルを変化させる試験（繰返し試験 A）と、実際の貯水位変動による応力変化を想定した荷重条件による試験（繰返し試験 B）を行った。各試験条件を表-2.4 に示す。

繰返し試験 A は材齢 91 日の CSG1, CSG2, RCD について各試験体の CSG の強度の 30%, 50%, 70% を最大載荷応力として 400 回の繰返し載荷を行った。なお、試験数は各載荷パターンで各配合 2 回ずつ実施した。

繰返し試験 B では各試験体に対して同じ載荷応力とした。載荷応力は実際の台形ダムの貯水位変動による応力変化を FEM 解析から算出した。この解析は表-2.5 の物性により堤高 100m の台形ダムモデルで貯水有り（貯水位 90m）と無しの条件でおこなった。なお、地震力は考慮していない。解析結果（堤体内の最小主応力分布）を図-2.3 に示す。貯水の有無による応力変化が最も大きくなる下流端に着目すると、貯水無しの状態の堤体の圧縮応力は 1.04N/mm² であり、貯水位が上昇することで増加し、貯水位が堤高の 9 割に達した際の圧縮応力は 1.53N/mm² となった。この応力変動を繰返しの応力設定の参考とした。なお、本試験で用いる試験体は通常のダムで用いられる CSG（平均粒径における単位セメント量 80kg/m³ の配

表-2.4 試験条件

試験	繰返し試験A	繰返し試験B
試験体	CSG1, 2, RCD	CSG1, RCD
材齢 (日)	91	91, 182, 365
載荷応力	max	CSGの強度 × 30, 50, 70%
	min	CSGの強度 × 10%
繰返し回数	400回	

表-2.5 台形ダム静的解析モデル物性値

物性値	堤体	岩盤
単位体積質量 (kg/m ³)	2,300	2,300
弾性係数 (N/mm ²)	2,000	5,000
ポアソン比	0.25	0.3

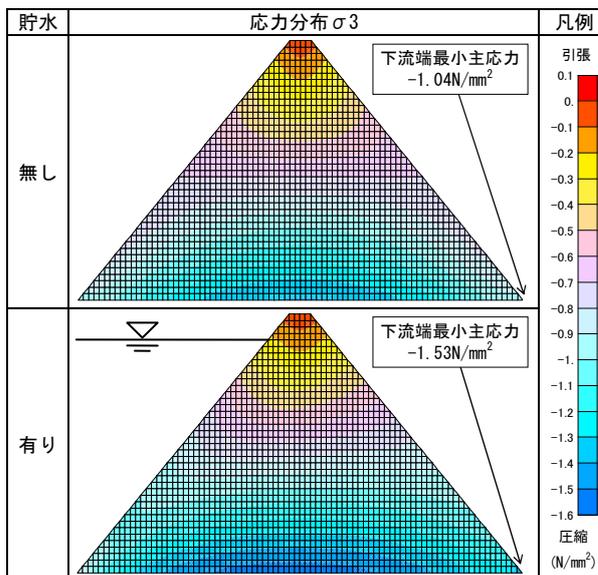


図-2.3 貯水有無による応力分布σ₃ 変化
(貯水有りの貯水位は堤高×0.9 = 90m)

合で CSG の強度 2~4N/mm² 程度、弾性係数 2,000~3,000N/mm² 程度) より比較的強度や弾性係数が大きいため、試験の載荷応力は解析で得られた応力より大きめに設定した。実際のダムでは材齢の伸びにより強度が増進した後に、貯水位変動による繰返し応力を受けることから、材齢による繰返し載荷に対する影響を確認するために、材齢は 91 日, 182 日, 365 日の 3 種類設定し、CSG1, RCD について 1~2, 1~4N/mm² の 400 回の繰返し載荷を行った。なお、試験は各載荷応力・配合で 3 回ずつ実施した。

2.5 試験結果

試験結果は載荷応力に対する残留ひずみ（試験終了後の応力 0 時のひずみ）、及び載荷 100, 200, 300, 400 回でのひずみを評価した。

2.5.1 試験結果（繰返し試験 A）

繰返し試験 A に用いた試験体による一軸圧縮試験結果

(3 供試体の平均値) を表-2.6 に示す。微粒分を加えた CSG1, CSG2 は RCD より強度が小さく、また、微粒分を CSG1 より多く含む CSG2 はさらに CSG の強度が小さくなる。設定した繰返し载荷応力の最大値を表-2.7 に示す。CSG1 の载荷応力については、強度試験 3 回の内、他の 2 回と CSG の強度に差の大きい 1 回を棄却し、载荷応力を設定した。

载荷応力と残留ひずみの関係を図-2.4 に示す。また、図-2.4 の横軸を CSG の強度に対する载荷応力の比で表したものを図-2.5 に示す。载荷応力が大きくなるほど残留ひずみは大きくなる。微粒分を含む CSG1, CSG2 は RCD より残留ひずみが大きくなる傾向がある。各試験体の繰返し载荷 100, 200, 300, 400 回目のひずみ(载荷応力が CSG の強度×10%となる時) を図-2.6~2.8 に示す。CSG1, CSG2 は σ_{max}/CSG の強度が 30%, 50% の場合でも 100 回以降も残留ひずみが伸びているが、RCD は伸びが小さい。

表-2.6 試験体の一軸圧縮試験結果 (繰返し試験 A)

試験体	CSGの強度 (N/mm ²)	ピーク強度 (N/mm ²)	静弾性係数 (N/mm ²)
CSG1	9.8	14.1	9,700
CSG2	7.6	11.1	10,500
RCD	10.3	14.9	9,100

表-2.7 载荷応力 (繰返し試験 A)

試験体	CSGの強度 (N/mm ²)	繰返し载荷応力の最大値 σ_{max} (N/mm ²)		
		30%	50%	70%
CSG1	10.9	3.3	5.5	7.6
CSG2	7.6	2.3	3.8	5.3
RCD	10.3	3.1	5.2	7.2

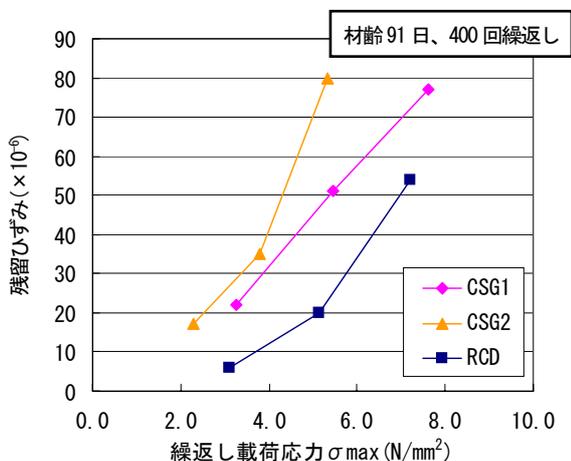


図-2.4 繰返し载荷後の残留ひずみ (繰返し試験 A)

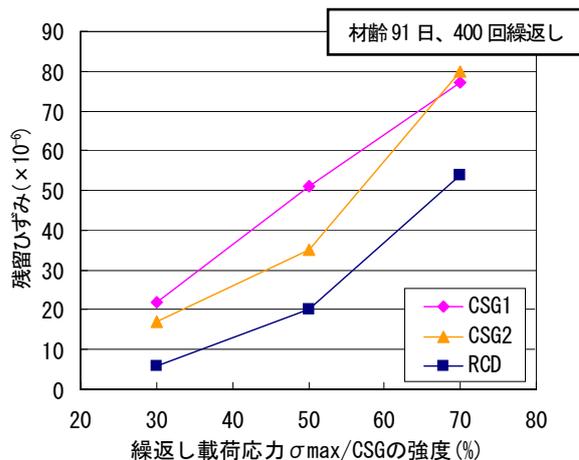


図-2.5 繰返し载荷後の残留ひずみ (繰返し試験 A)

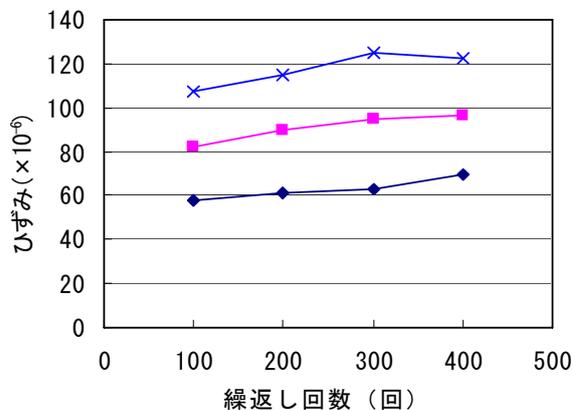


図-2.6 CSG1 (微粒分 6%) の繰返し回数と σ_{min} におけるひずみの関係

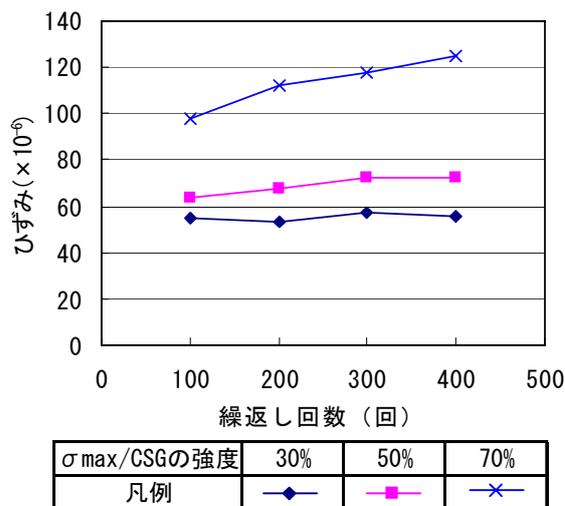


図-2.7 CSG2 (微粒分 10%) の繰返し回数と σ_{min} におけるひずみの関係

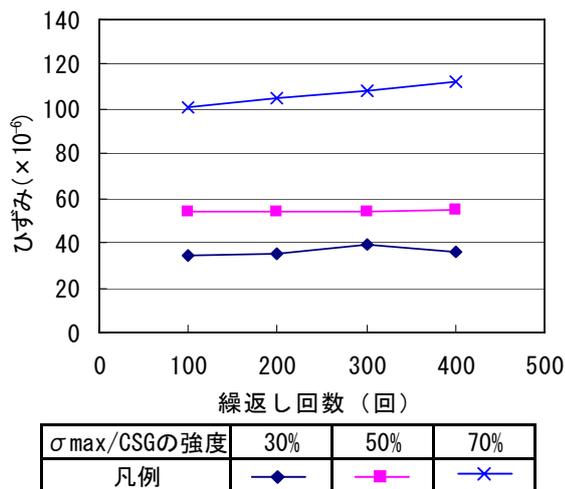


図-2.8 RCDの繰返し回数と σ_{min} におけるひずみの関係

表-2.8 試験体の一軸圧縮試験結果 (繰返し試験B)

試験体	材齢 (日)	CSGの強度 (N/mm ²)	ピーク強度 (N/mm ²)	静弾性係数 (N/mm ²)
CSG1	91	7.4	11.7	10,600
	182	7.2	13.0	11,300
	365	9.0	14.1	9,300
RCD	91	8.2	14.1	9,900
	182	10.2	17.2	12,400
	365	13.0	19.3	15,900

2.5.2 試験結果 (繰返し試験B)

繰返し試験Bに用いた試験体による一軸圧縮試験結果 (3供試体の平均値) を表-2.8に示す。ややばらつきがあるが、材齢が伸びるほど強度は増加する。

載荷応力と残留ひずみの関係を図-2.9に示す。載荷応力が大きくなるほど残留ひずみは大きくなる。同じ載荷応力ではCSG1はRCDよりも残留ひずみが大きくなるが、ともに材齢が伸びるほど残留ひずみは小さくなる。また、各繰返し載荷応力条件の繰返し載荷100, 200, 300, 400回目のひずみ (載荷応力1N/mm²時) を図-2.10, 11に示す。CSG1は100回目以降もひずみが伸びているが、RCDは伸びが小さい。また、材齢が伸びるほどひずみの伸びは小さくなる傾向がある。

2.6 考察

CSGを想定して作製した微粒分を含む試験体では、微粒分を含まない試験体より残留ひずみが大きくなる傾向があり、また微粒分の含有率が増える程残留ひずみは大きくなる傾向があることが分かった。微粒分を含む場合、載荷応力が弾性領域の範囲内であれば繰返し載荷応力が大きい場合 (CSGの強度×70%) でも、残留ひずみは100 μ

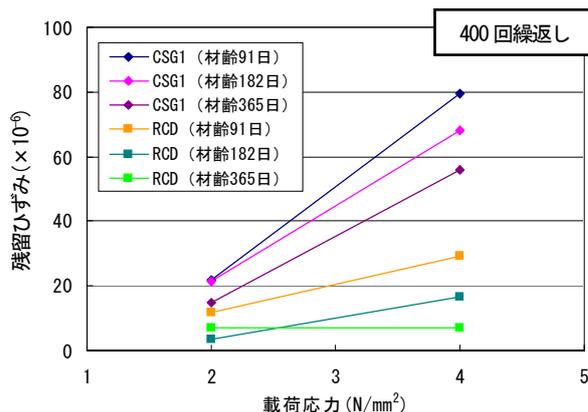


図-2.9 残留ひずみ (繰返し試験B)

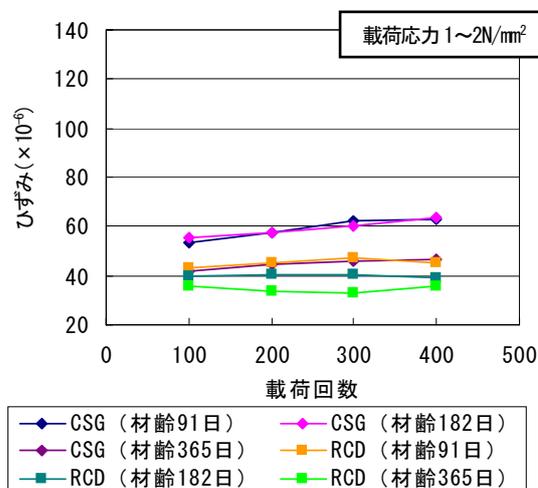


図-2.10 繰返し回数と σ_{min} におけるひずみの関係 (載荷応力1~2N/mm²)

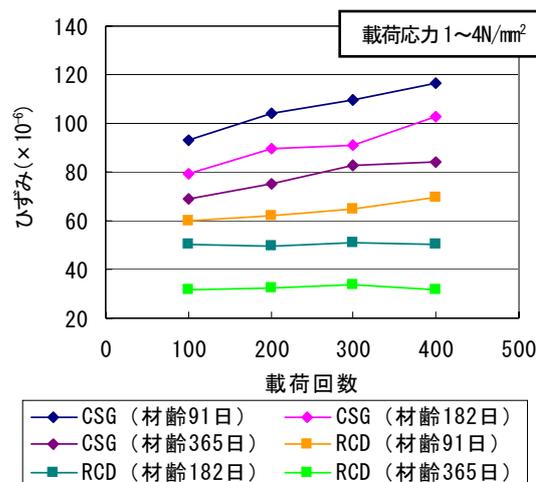


図-2.11 繰返し回数と σ_{min} におけるひずみの関係 (載荷応力1~4N/mm²)

程度であった。長期的な水位変動を想定した繰返し載荷では、堤高100m級のダムにおける発生応力に対しても残留ひずみは20μ未満となることが見込まれる。また、材齢が長いほど残留ひずみは小さくなる傾向がある。微粒分を含む試験体では、繰返しによるひずみ増加が400回でも収束しなかったが、これは繰返し載荷試験が1ケースあたり数時間かかっており、繰返しの載荷以外の要因（乾燥及びクリープ）の影響を受けていたことも考えられる。さらに、貯水位条件を考慮して設定した繰返し載荷の応力は、堤体内の応力変動が最大となる局所の応力を設定しているため、堤体全体での残留ひずみは極めて小さいものと推定される。よって長期的な貯水位変動による応力変化を受けた場合でもその影響は極めて小さいと考えられる。

以上のことから、今回の試験で用いた CSG では弾性領域内での応力変動に対して、生じる残留ひずみは微小であり、微粒分の影響が小さく、台形 CSG ダムでの堤体材料として長期的な応力変化に対しても一定の信頼性を有していると考えられる。

ただし、実際のダムでは CSG 材の採取場所により特性が大きく異なることから、個別ダムにより粘性の微粒分を特に多く含む場合や、今回の試験条件より貧配合の CSG を用いる場合については、本研究での試験結果を参考に当該採取場所での CSG 材を用いた試験の実施などによる検討が必要となる。

3. クリープ試験

3.1 目的

台形 CSG ダムの長期信頼性を確保する観点から、CSG のクリープ特性を把握するため、CSG を想定して作製した試験体及び実際の CSG ダムで使用した CSG 材を用いた試験体にクリープ荷重を与え、試験体配合や載荷状態及び材齢による影響を確認した上で、CSG のクリープ特性を明らかにした。また、実験により得られた CSG のクリープ特性から、クリープが台形 CSG ダムの内部構造に及ぼす影響を FEM による応力解析により検討した。

3.2 試験体条件

本試験では、前節で示した繰返し試験と同配合の試験体(CSG1, 2及びRCD)及びCSG3(CSG1から単位セメント量を増やした試験体)の他、実際の CSG ダムで使用した CSG 材により試験体を作製した。繰返し試験と重複する条件もあるが、試験体の使用材料の物性値を表-3.1に、CSG 材/骨材の粒度分布を図-3.1に、配合条件を表-3.2に示す。繰返し試験同様に、クリープ試験A~Dに使用した試験体材料は実施時期が異なる場合でも、可能な限り

同じ条件とするため、材料は同一箇所から購入した（骨材：兵庫県産、粘土：藤の森粘土）。

表-3.1 CSG1~3, RCD, 実ダム CSG の使用材料・物性値

材料	物性	試験ケース					
		クリープ試験A	クリープ試験B	クリープ試験C	クリープ試験D	クリープ試験E	
骨材※	表乾密度 (g/cm ³)	80-40mm	2.60	2.60	2.60	2.60	2.62
		40-20mm	2.59	2.59	2.59	2.59	2.62
		20-10mm	2.59	2.59	2.59	2.59	2.61
		10-5mm	2.59	2.59	2.59	2.59	2.60
		5mm-	2.58	2.58	2.58	2.58	2.60
	吸水率 (%)	80-40mm	0.80	0.80	0.80	0.80	0.89
		40-20mm	1.30	1.30	1.30	1.30	1.09
		20-10mm	1.42	1.42	1.42	1.42	1.15
		10-5mm	1.42	1.42	1.42	1.42	1.24
		5mm-	1.42	1.42	1.42	1.42	1.01
粘土	土粒子密度 (g/cm ³)	2.67	2.67	2.71	2.71	-	
	塑性指数	29.9	29.9	19.2	19.2	-	
フライアッシュ	密度 (g/cm ³)	2.31	-	2.31	2.31	-	

※クリープ試験A~Dの骨材はコンクリート用骨材、クリープ試験Eの骨材は実際の CSG ダムで使用された CSG 材。

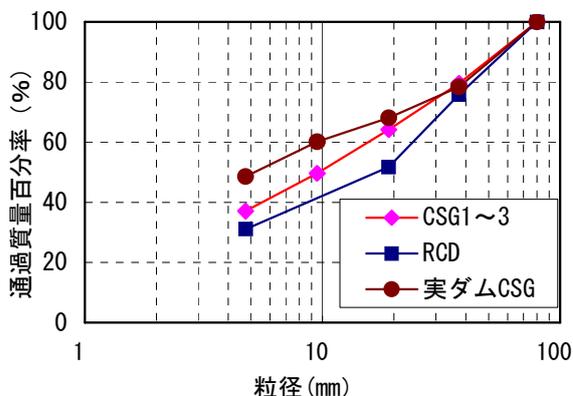


図-3.1 CSG1~3, RCD, 実ダム CSG の CSG 材/骨材粒度分布

表-3.2 CSG1~3, RCD, 実ダム CSG 試験体の配合

試験体	CSG1	CSG2	CSG3	RCD	実ダムCSG
最大粒径	40mm (最大粒径80mmの試料をウェットスクリーニングした)				
微粒分添加量 (%)	6	10	6	-	-
単位セメント量 (kg/m ³)	80		120	80	80
フライアッシュ (kg/m ³)	-			20	-
単位水量 (kg/m ³)	120	140	120	97	110
養生方法	封緘養生				

3.3 試験方法

クリープ試験は、PC 鋼棒式²⁾を採用し(図-3.2)、温度 20±3℃、湿度 60±5%の恒温恒湿室で行った。試験体は所定の材齢で試験体中央部にコアドリルを用いて穴(φ23.3mm)を空け、PC 鋼棒(φ23mm)を差し込み軸力荷重した。測定は、試験体中央両面に、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、試験体に荷重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 の荷重応力を加え、一旦除荷した後、本荷重を行った。予備荷重は、荷重応力の 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。クリープに伴い荷重応力が減少するため、設定した応力が与えられるように適宜荷重応力を調整した。試験は 1 ケースあたり試験体を 2 個(クリープ試験 E は 3 個)用いた。

また、クリープ試験 A~C、E では、クリープ荷重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。

3.4 試験ケース

クリープ試験は、CSG のクリープ特性を明らかにするために試験ケースにより異なる試験体条件、荷重条件を設定した。表-3.3 に試験ケースを示す。

なお、各試験ケースに用いる試験体作製時に同一の配合で作製した標準供試体(φ150mm×300mm)により一軸圧縮試験を行い、応力-ひずみ関係を計測し、CSG の強度、ピーク強度、静弾性係数を得た。なお、これらの強度値は、各配合で 3 本の供試体の平均値とした。通常、RCD では「CSG の強度」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 CSG の強度を規定し、CSG と比較することとした。各試験ケースについて着目点と試験方法を以下に述べる。

3.4.1 クリープ試験 A : 微粒分含有率の影響

クリープ試験 A は、土木研究所ダム構造物チームの既往の研究成果¹⁾により、CSG 母材に含まれる粒径 0.075mm 未満の微粒分含有率(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、微粒分含有率を変化させた 2 種類の CSG 試験体(含有率 6% : CSG1、含有率 10% : CSG2)を比較検討した。また、比較対照として微粒分を加えない RCD を用いて比較検討を行った。荷重応力は各試験体の CSG の強度に対して 30%、50%、70%の値に設定した。

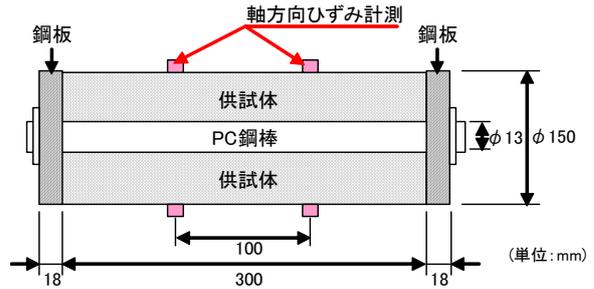


図-3.2 PC 鋼棒式クリープ試験装置



写真-3.1 PC 鋼棒式クリープ試験装置

表-3.3 試験ケース

条件	クリープ試験A	クリープ試験B	クリープ試験C	クリープ試験D	クリープ試験E	
試験体	CSG1 CSG2 RCD	CSG1	CSG1 RCD	CSG3	CSG1 RCD 実ダムCSG	
形状	φ150×300mm	150×150×300mm	φ150×300mm			
材齢(日)	91			91, 182, 365	91	
荷重応力	CSGの強度×30, 50, 70%	CSGの強度×50%	0.79N/mm ² 1.55N/mm ²	1.55N/mm ²	1.55N/mm ²	1.55N/mm ²
荷重状態	気中	封緘 塩ビ	封緘 気中 封緘	封緘	封緘	封緘 気中 封緘

3.4.2 クリープ試験 B : 側方拘束の影響

クリープ試験 B は、実際のダムにおいてクリープ荷重(常時受ける荷重)を最も受ける場所はダム堤体の底部であり、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を実施した。クリープ荷重による側方への膨らみを抑制するため、試験体を塩ビ管(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-3.2)。また、比較対象として塩ビ管拘束を行わない試験体についても、乾燥による影響を同じ条件にするため、試験体表面をシール(アルミ箔粘着テープ t=0.5mm)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-3.3 に示す。

また、クリープ荷重によって生じている側方への膨らみを把握することを目的としてコンタクトゲージによる側方方向のひずみ計測し易い角柱供試体による試験を別

途おこなった。計測箇所は、**図-3.3** 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、この試験体についても同様に試験体表面をシール（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。クリープの載荷状況を**写真-3.4**に示す。試験体配合はCSG1の1種類のみとした。



写真-3.2 塩ビで拘束した試験体



写真-3.3 封緘試験体載荷状況

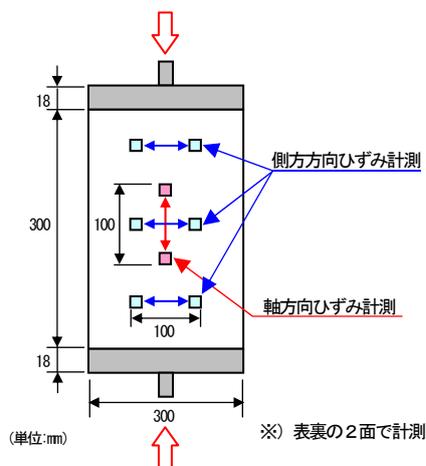


図-3.3 角柱供試体の計測箇所

3.4.3 クリープ試験C：乾燥クリープの影響

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-3.4**）。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、また台形CSGダムにおいてはCSGの周囲を保護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状態でのクリープ特性を把握する必要がある。よって、クリープ試験Cでは、試験体にシール（アルミ箔粘着テープ $t=0.5\text{mm}$ ）による被覆をし、封緘状態で載荷を行った。

載荷応力については、堤高50m級、100m級の台形ダムを想定し、自重と静水圧（貯水位は堤高の90%）により発生する応力を**表-3.4**に示すモデル条件で、FEMによる台形ダムモデルの応力解析により得られた最大圧縮応力値（堤高50m級： 0.79N/mm^2 、堤高100m級： 1.55N/mm^2 ）を設定した。

試験体はCSG1とRCDの他、CSG1の単位セメント量 80kg/m^3 を 120kg/m^3 に増やした試験体CSG3により行った。CSG3についてはCSG1との比較を行うことを目的として気中条件では実施せず、封緘条件による載荷応力 1.55N/mm^2 の条件でのみ試験を行った。

3.4.4 クリープ試験D：載荷時材齢の影響

クリープ試験Dは、堤敷部にFEM解析で求めた圧縮応力が載荷する状態になるのは、CSGの材齢が91日以降になることが想定されることから、クリープ載荷開始時の材齢がクリープ特性に与える影響を把握するため、材齢の異なる試験体によるクリープ試験を行った。材齢のみに着目し、載荷条件は1種類（堤高100m級の台形ダムモデルによるFEM応力解析結果から得られた最大圧縮応力値である載荷応力： 1.55N/mm^2 、封緘状態）とした。なお、封緘条件では乾燥収縮によるひずみが非常に小さい



写真-3.4 角柱供試体のクリープ載荷状況

ことをクリープ試験Cで確認できたことから、クリープ試験Dでは乾燥収縮の計測は省略した。

3.4.5 クリープ試験E：実ダムCSGによる試験体及びコンクリート試験体による試験

クリープ試験A～Dにおいては、微粒分の有無に着目してRCD試験体との比較を行うため、通常コンクリートに用いられる骨材に微粒分として粘土を添加することにより作製した試験体によりCSGを想定した試験をおこなった。クリープ試験Eでは実際のダムで使用されたCSG材によりCSG試験体を作製し、クリープ試験を行った。載荷応力は、堤高100m級の台形ダムモデルによるFEM応力解析結果から得られた最大圧縮応力値である 1.55N/mm^2 とし、気中条件と封緘条件で試験を行った。

3.5 試験結果

クリープ試験A～Eの試験結果について述べる。各試験は実施時期が異なることから、同条件の試験体でも強度が異なる。以下は各試験で使用した試験体の一軸圧縮試験結果とクリープ計測結果(クリープひずみ)を示す。

3.5.1 試験結果(クリープ試験A)

クリープ試験Aでは、気中状態でCSGの強度に対して30%、50%、70%の応力を載荷した。試験体の一軸圧縮試験結果(3供試体の平均値)を表-3.5に示す。

試験結果によるクリープひずみ及びびクリープひずみを載荷応力で除した値(単位クリープ)を図-3.6に示す。微粒分が多いほど、クリープひずみは大きくなる傾向がある。また、単位クリープは載荷応力によらず同程度であることから、クリープひずみは載荷応力に比例する傾向にある。

3.5.2 試験結果(クリープ試験B)

クリープ試験Bでは、載荷方向に対して鉛直方向(ここでは試験体側方)の変位を拘束した条件による試験を行った。また、角柱供試体により、側方への変位(クリープポアソン比)を計測した。試験体の一軸圧縮試験結果(3供試体の平均値)を表-3.6に示す。

試験結果によるクリープひずみ及びびクリープによるポアソン比を図-3.7に示す。側方を拘束することで、クリープひずみは若干小さくなった。クリープによる側方への変位は、載荷直後の変形に比べて小さく、ポアソン比は0.05～0.1程度であった。

3.5.3 試験結果(クリープ試験C)

クリープ試験Cでは、CSG1、CSG3、RCDについて堤高50m、100mのダムモデルにおける最大圧縮応力相当の載荷応力により試験を行った。乾燥によるクリープへの影響を確認するため、CSG1とRCDについては気中条件及び封緘条件での試験を行った。一軸圧縮試験結果(3供試体の

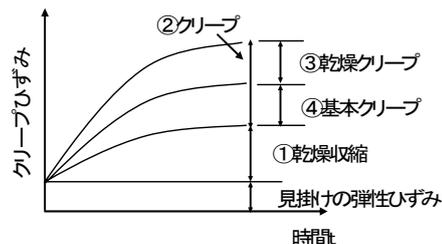


図-3.4 クリープの概念

表-3.4 モデル諸元

堤体	堤高(m)	50
	天端幅(m)	8
	上下流勾配	1:0.8
	単位体積質量(kg/m ³)	2,200
	弾性係数(N/mm ²)	2,000
岩盤	ポアソン比	0.25
	高さ(m)	100
	幅(m)	588
	弾性係数(N/mm ²)	5,000

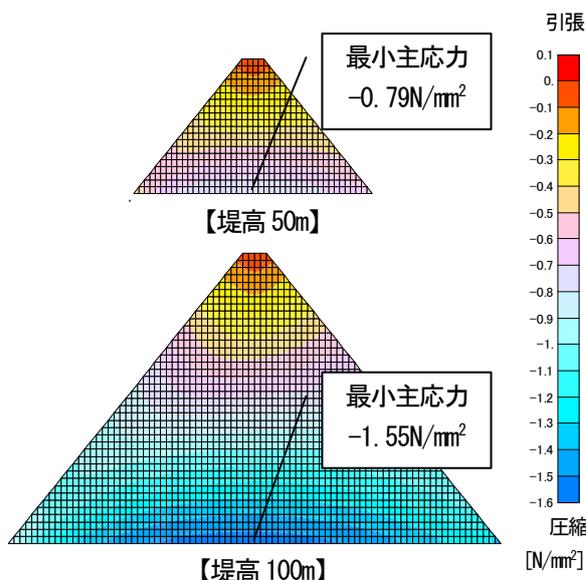


図-3.5 最小主応力コンター
(堤高50m, 100mモデル：自重+静水圧)

表-3.5 クリープ試験Aの一軸圧縮試験結果

試験体	CSGの強度(N/mm ²)	ピーク強度(N/mm ²)	静弾性係数(N/mm ²)
CSG1	9.8	14.1	9,700
CSG2	7.6	11.1	10,500
RCD	10.3	14.9	9,100

表-3.6 クリープ試験Bの一軸圧縮試験結果

試験体	CSGの強度(N/mm ²)	ピーク強度(N/mm ²)	静弾性係数(N/mm ²)
CSG1	5.2	6.3	6,500

平均値)を表-3.7に示す。

試験結果によるクリープひずみを図-3.8に示す。乾燥によるクリープへの影響を除くことで、載荷後2年でのクリープひずみは3/4程度となった。封緘状態のクリープひずみは気中状態に比べて載荷初期のクリープひずみが低減されるが、長期ではその差は小さくなる。

単位セメント量を増やしたCSG3はCSG1に対してクリープひずみが半分程度となった。しかし、それでも微粒子を含まないRCDに比べると、その値は大きい。セメント量を増やしたことで、CSG3の弾性係数はRCDと同程度である。RCDと比べてCSG1とCSG3は単位水量が多いが、CSG3は単位セメント量が多いことでセメントとの水和反応に用いられない水が少なくなり、クリープ特性に影響したと考えられる。また、RCDはフライアッシュを含むことで水密性が高まり、クリープひずみが小さくなる効果があったと考えられる。

3.5.4 試験結果 (クリープ試験D)

クリープ試験Dでは、材齢の異なるCSG1, RCD試験体により試験を行った。載荷応力はクリープ試験C同様に堤高100mのダムモデルから1.55N/mm²とし、封緘状態のみとした。事前の試験から封緘条件では乾燥収縮が極めて小さかったため、乾燥収縮は計測しなかった。一軸圧縮試験結果(3供試体の平均値)を表-3.8に示す。

試験結果によるクリープひずみを図-3.9に示す。載荷時材齢が伸びるほど、クリープひずみは若干低減する。

表-3.7 クリープ試験Cの一軸圧縮試験結果

試験体	CSGの強度 (N/mm ²)	ピーク強度 (N/mm ²)	静弾性係数 (N/mm ²)
CSG1	6.8	11.6	8,300
CSG3	10.8	16.5	12,000
RCD	7.6	13.7	12,300

表-3.8 クリープDの強度試験結果

試験体	材齢	CSGの強度 (N/mm ²)	ピーク強度 (N/mm ²)	静弾性係数 (N/mm ²)
CSG1	91	7.4	11.7	10,600
	182	7.2	13.0	11,300
	365	9.0	14.1	9,300
RCD	91	8.2	14.1	9,900
	182	10.2	17.2	12,400
	365	13.0	19.3	15,900

表-3.9 クリープEの一軸圧縮試験結果

試験体	CSGの強度 (N/mm ²)	ピーク強度 (N/mm ²)	静弾性係数 (N/mm ²)
実ダムCSG	3.8	6.9	2,340

3.5.5 試験結果 (クリープ試験E)

クリープ試験Eでは、実ダムのCSG材を用いたCSG試験体により試験を行った。載荷応力はクリープ試験C同様に堤高100mのダムモデルから1.55N/mm²とし、気中条件及び封緘条件で実施した。一軸圧縮試験結果(3供試体の平均値)を表-3.9に示す。実ダムCSGは、同じ単位セメント量であるCSG1のCSGの強度の半分程度、静弾性係数は1/3~1/4程度である。

クリープひずみを同載荷条件によるクリープ試験CのCSG1(封緘、載荷応力1.55N/mm²)の試験結果とあわせて図-3.10に示す。短期間の試験結果ではあるが、実ダムのCSGのクリープひずみは同じ試験条件におけるCSG1(クリープ試験C)と同等程度となった。

3.6 クリープひずみによる台形CSGダムへの影響検討

試験で得られたCSGのクリープ特性を用いて、堤体及び内部構造への影響を検討した。

3.6.1 検討方法

検討は有限要素法により応力解析を行い、クリープによるひずみを時刻歴で与えて応力の影響を確認した。理論式はNorton-Baileyのクリープモデル³⁾を用いた。

$$\dot{\epsilon}^c = A \bar{\sigma}^m t^n \quad (\text{式 3.1})$$

ここに、

$\dot{\epsilon}^c$: クリープひずみ速度

A, m, n : 係数

(A < 0, m > 0, -1.0 < n ≤ 0.0)

$\bar{\sigma}$: ミーゼス応力

$$\left(\bar{\sigma} = \sqrt{\frac{1}{2} \{ \sigma_1^2 + \sigma_3^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 \}} \right)$$

※2次元条件による算定式

t : クリープ載荷後の時間

なお、係数A, m, nは、CSG1の封緘条件を想定して試験値(クリープ試験C)から以下の手順で設定した。

まず、クリープひずみは載荷応力に比例する傾向が確認できたため、載荷応力の係数m=1とした。次に、クリープ試験Cの気中条件の試験値のクリープ載荷後1年から2年の値に対して誤差が最小となる係数A, nを得た。試験値全体の値を用いると、クリープひずみ速度の減少に対して理論曲線が近似せず、今回は試験値より長い期間の解析をおこなうため、1年~2年の試験値により近似させた。そして、理論上は封緘条件によるクリープは気

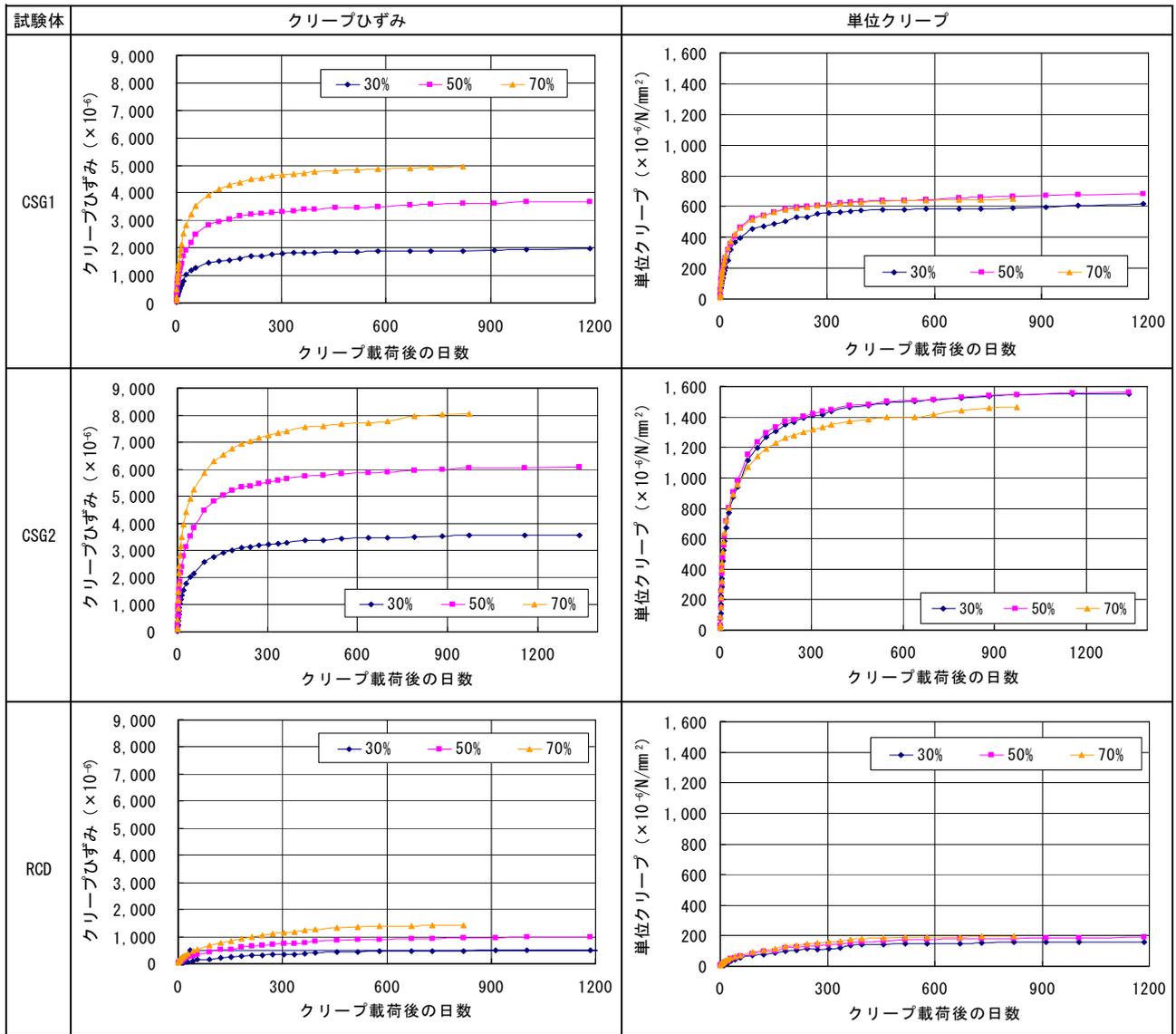


図-3.6 クリープ試験結果 (試クリープ試験A)

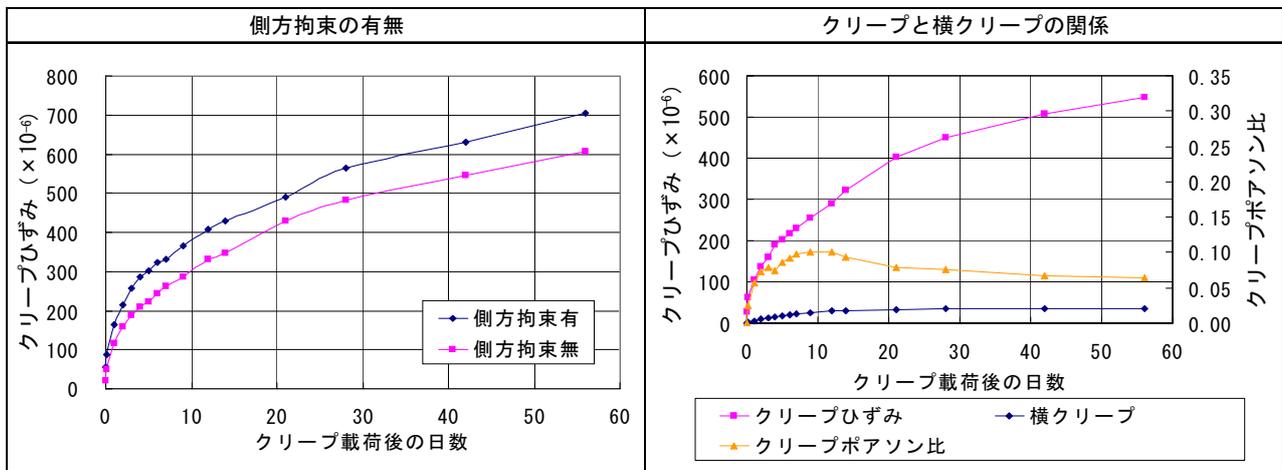


図-3.7 クリープ試験結果 (クリープ試験B)

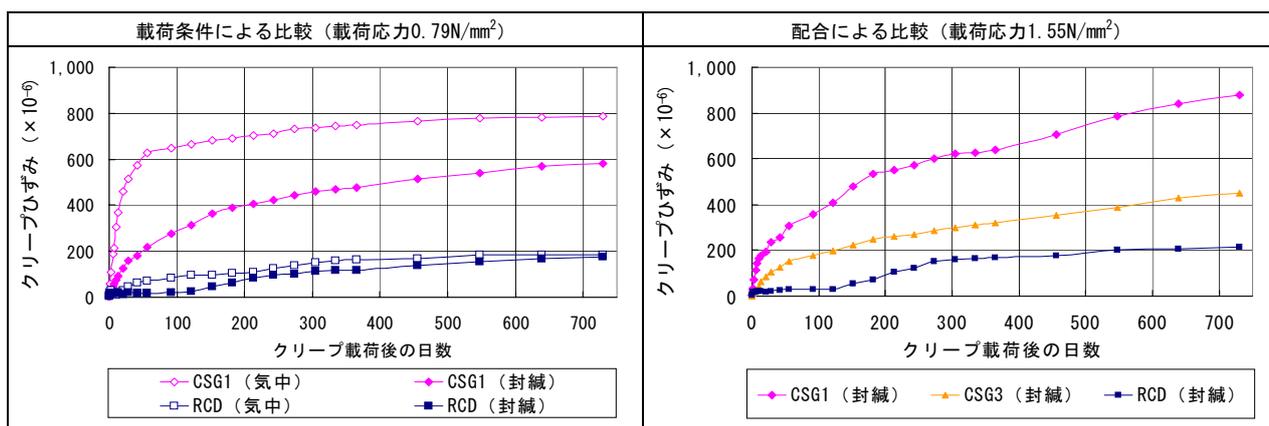


図-3.8 クリープ試験結果 (クリープ試験C)

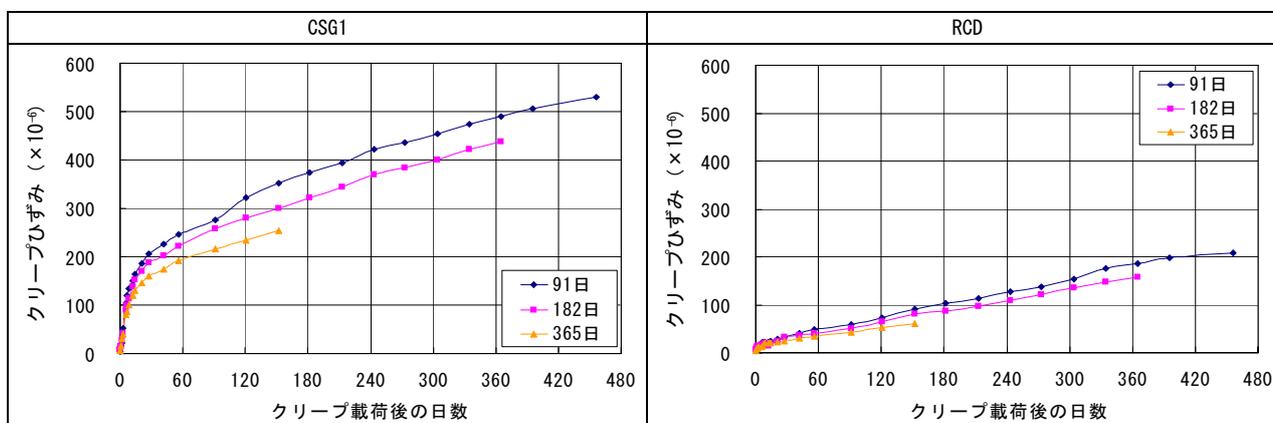


図-3.9 クリープ試験結果 (クリープ試験D)

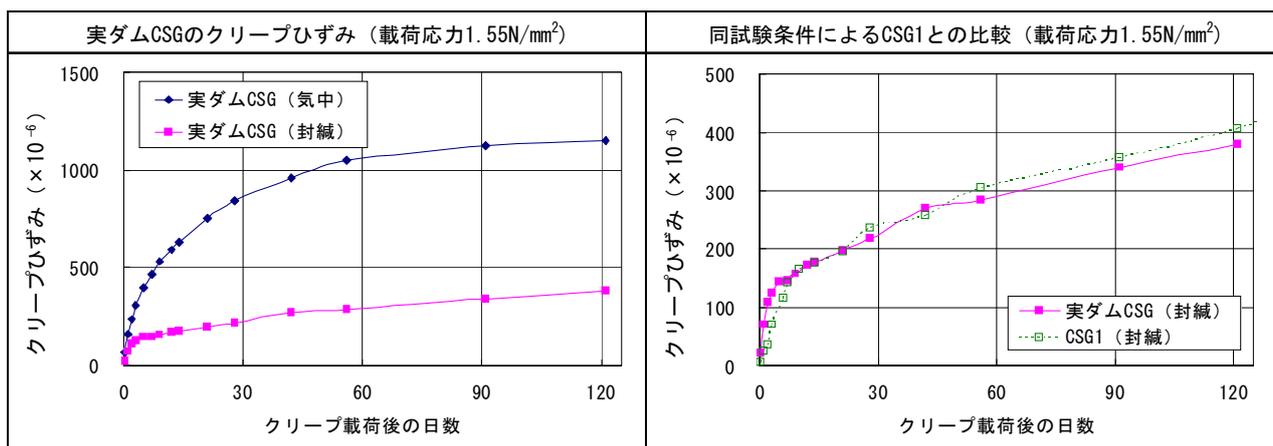


図-3.10 クリープ試験結果 (クリープ試験E)

中条件より小さくなることから、解析で考慮する期間では気中条件を超過せず、かつ安全側をとるために気中条件のクリープひずみに近づけるように解析に用いる係数 A, n を設定した。

係数を設定した理論式による曲線を図-3.11 に示す。

3.6.2 解析条件

モデルはCSG 堤体内にコンクリートの剛性を持つ構造（放流管等。ただし、空洞形状は考慮していない。）を想定した場合について解析を行った。解析モデルを図-3.12 に、主要諸元を表-3.10 に示す。コンクリートは構造コンクリートを想定し、強度 24N/mm^2 の普通コンクリートに相当する弾性係数 $25,000\text{N/mm}^2$ とした⁴⁾。CSG は実ダムにおける大型供試体による試験結果から平均的な値である $2,000\text{N/mm}^2$ とした。CSG のクリープ特性として Norton 則に試験から得られた係数を設定した。コンクリート及び岩盤についてのクリープは考慮しない条件として解析をおこなった。これは、コンクリートのクリープはCSG のクリープに比べて極めて小さいことと、従来のダムの設計で岩盤のクリープ特性は特に考慮しておらず、仮にCSG 相当のクリープ特性を与えた場合にはコンクリートに発生する引張応力が緩和し、圧縮応力についてはやや増加するが、安全性に影響を及ぼす程の増加でない結果となることから、CSG のクリープのみを考慮した条件による解析結果について示す。解析は初期応力に対して次ステップまでの時間に発生するクリープひずみを与え、発生するひずみに対する応力解析を行い、次ステップではその応力を用いて次々ステップまでの時間でひずみを与える。これを繰り返し、100 年後までの発生応力、ひずみを解析した。解析ステップは初期～1 年までは 1 日、1 年～10 年は 45 日、10 年～100 年までは 1 年ごとに設定した。

3.6.3 解析結果

クリープを考慮した応力解析結果を図-3.13、3.14 に示す。理論式ではクリープひずみは終値が無いので、ここでは 100 年後までの解析を行った。CSG 部のクリープにより堤体の CSG 部の応力が緩和しているが、コンクリート部の圧縮及び引張応力が大きくなる。しかし、コンクリートの強度に比べると圧縮応力及び引張応力ともに小さい値である。

3.7 考察

クリープ試験により、台形 CSG ダムにおける CSG は、微粒分を含まないRCD相当のコンクリートの3~4倍程度のクリープひずみを発生する。しかし、その値は、内部に構造コンクリートを配置する場合についても影響は小さい。また、実施した解析では実施工（築堤）を考慮せ

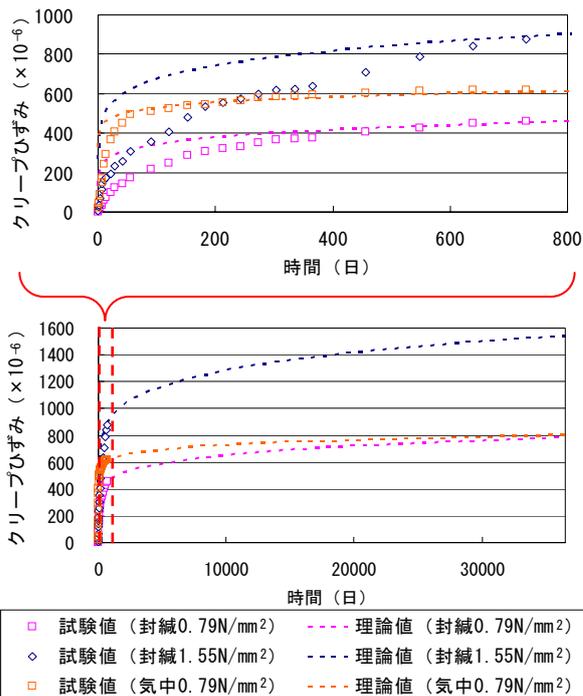


図-3.11 試験値と Norton 則による理論値

(封緘 : $A=32, m=1, n=0.86$ 、気中 : $A=34, m=1, n=0.93$)

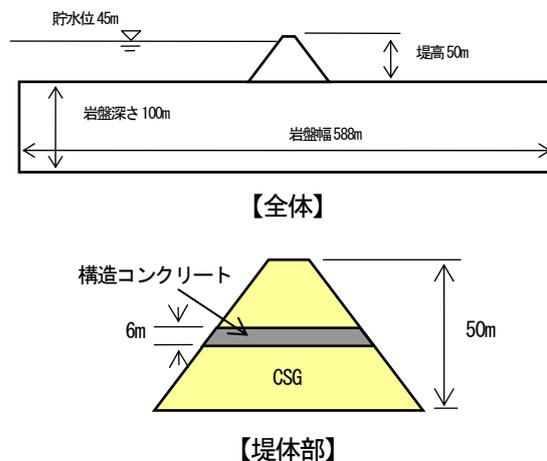


図-3.12 クリープ解析モデル

表-3.10 モデル諸元

物性	堤体		岩盤
	CSG	コンクリート	
単位体積質量 (kg/m^3)	2,300	2,300	2,300
弾性係数 (N/mm^2)	2,000	25,000	2,000
ポアソン比	0.25	0.2	0.3

ずに応力解析を行っているため、初期状態でコンクリート上部に圧縮応力が集中しているが、築堤を考慮すれば応力の集中は小さくなると考えられる。さらに、本試験では 40mm 以上の骨材はウエットスクリーニングにより

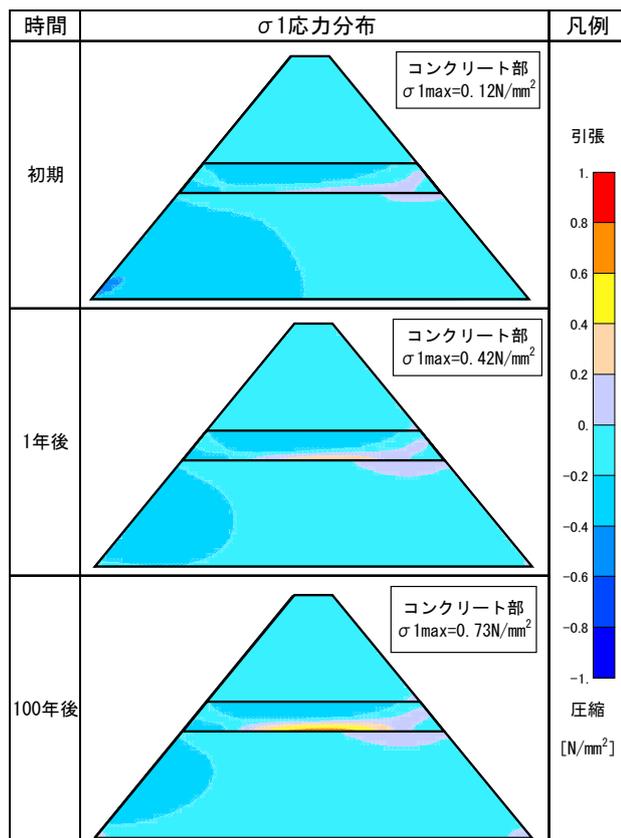


図-3.13 クリープ解析結果σ1 (初期~100年後)

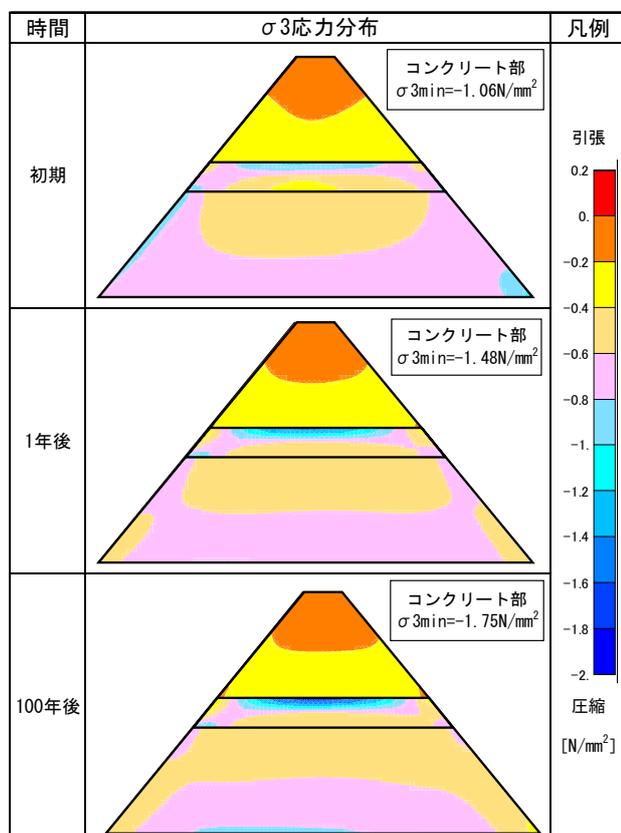


図-3.14 クリープ解析結果σ3 (初期~100年後)

除いている。ウェットスクリーニングによりペースト分の割合が増えることでクリープは大きくなる傾向がある⁵⁾ことから、実ダムの CSG は今回の試験値よりクリープが小さくなることを見込まれる。

本試験と解析結果から、CSG のクリープについては、特に設計上考慮する必要性は小さいと考えられるが、本試験における試験体の配合条件よりも単位水量が多い配合や、単位セメント量を極端に少なくする配合ではその影響も大きくなることも考えられるため、個別ダムの条件によっては試験の実施などにより留意する必要がある。

4. 材料のばらつきによる重力式ダムの構造安定性への影響

4.1 目的

CSG は現地発生材に必要な最小限の処理を施した CSG 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、各ダムにおける CSG 母材採取地でもその品質が異なる。通常のコンクリートでは粒度や単位水量は配合設計によって設定された値に調整するため、強度等の物性のばらつきは小さい。しかし、CSG は施工上、図-4.1 に示すような、CSG 材粒度分布のばらつきに応じた CSG の強度のばらつき幅と単位水量の管理範囲とによって形成される「ひし形」の範囲内となるように面的管理が行われるため、コンクリートに比べて物性のばらつきが大きい。

従来のコンクリートダムでは、物性のばらつきが少なく、強度が様に小さい場合でも設計により考慮されることで構造安定性上の問題はほとんど生じないと考えられる。物性のばらつきが大きい場合でも、現在の台形 CSG ダムの設計で採用されている方法のように、施工管理に

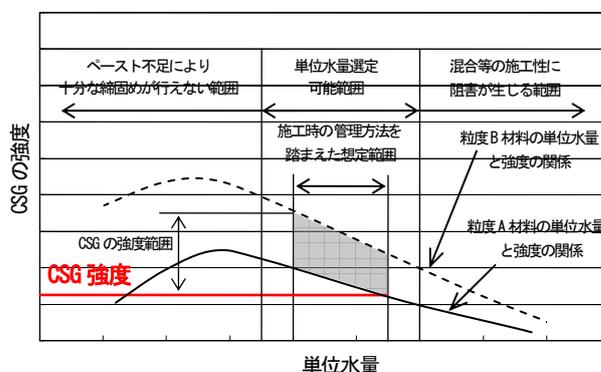


図-4.1 CSG 材の粒度と単位水量管理範囲から設定される CSG の強度の範囲 (ひし形)

より規定される範囲内の強度の最小値で構造安定性を評価する方法とすれば、設計上安全側であるとされているが、強度のばらつきを考慮した設計方法を用いることで、さらに合理的な設計を行うことができると考えられる。

本研究では、台形 CSG ダムを含む重力式ダムにおける強度のばらつきが局所的な安全性に与える影響を検討した。

4.2 検討方法

本検討は、現行の台形 CSG ダムの設計で採用されている FEM 解析による方法を基本として行った。材料のばらつきが堤体局所の安全性に与える影響を評価するために、ダム堤体の強度及び弾性係数のばらつきを考慮したモンテカルロ法による応力解析を実施した。解析対象として堤高 50m、上下流面勾配 1:0.8 の台形ダムモデルを用いた。また、従来の重力式ダムを模した直角三角形ダムモデルによる解析も行い、ダム形状による物性のばらつきの影響について検討した。以下、解析条件を示す。

4.2.1 解析手順

解析手順を図-4.2 に示す。まず、強度のばらつきは正規分布に従うと仮定して変数（平均値・変動係数）を設定し、弾性係数は強度との相関により設定した。次に、モデルの各要素に強度及び弾性係数を設定し、地震動を入力した動的解析を行った。そして、各要素の静的解析による初期応力状態と動的解析による地震時の応力状態を重ね合わせ、最大及び最小となる主応力に対して局所安全率（＝設定強度／最大応力）を計算した。この過程を繰り返し行い、各ケースにおける最小局所安全率を算出した。

4.2.2 解析モデル及び解析条件

解析は堤高 50m、上下流面勾配 1:0.8 の台形ダムモデル及び堤高 50m で上流面が鉛直で下流面勾配が 1:0.8 の直角三角形ダムモデルを用いた。解析モデルを図-4.3 に、モデルの主要諸元を表-4.1 に示す。本解析では、初期応力解析は岩盤の条件を考慮して、地震力を与えた動的解析では、堤体だけのモデルを用いた。堤体のメッシュサイズは、基本的に 1.5m×1.5m として、局所的な発生応力も把握できるようにした。堤体要素数は台形ダムモデルが 1110、重力式ダムモデルが 472 である。解析に用いた入力地震動（図-4.4）、は兵庫県南部地震時に一庫ダムで観測した地震波を照査用下限加速度応答スペクトル⁶⁾に適合するように調整した上で振幅（最大加速度）を「フィルダムの耐震設計指針（案）」⁷⁾に示される中震度帯の地盤設計震度を想定して 156.8gal に調整したものである。

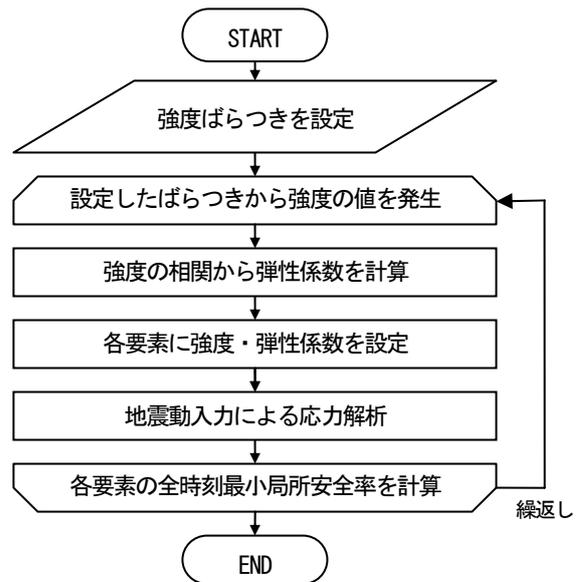
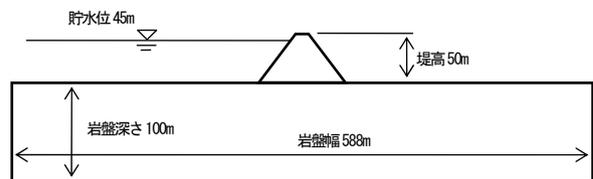
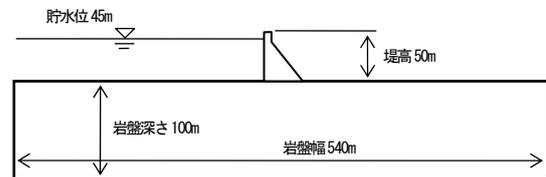


図-4.2 解析手順



【台形ダムモデル】



【直角三角形ダムモデル】

図-4.3 解析モデル

表-4.1 モデルの主要諸元及び物性値

モデル		台形	直角三角形
堤体	堤高 (m)	50	
	下流面勾配	1:0.8	
	上流面勾配	1:0.8	鉛直
	堤頂幅 (m)	8	5
	単位体積質量 (kg/m ³)	2,300	
	ポアソン比	0.25	
	減衰	レイリー10%	
岩盤	深さ (m)	100	
	幅 (m)	588	540
	弾性係数 (N/mm ²)	2,000	
	単位体積質量 (kg/m ³)	2,300	
	ポアソン比	0.3	
貯水深 (m)		45	

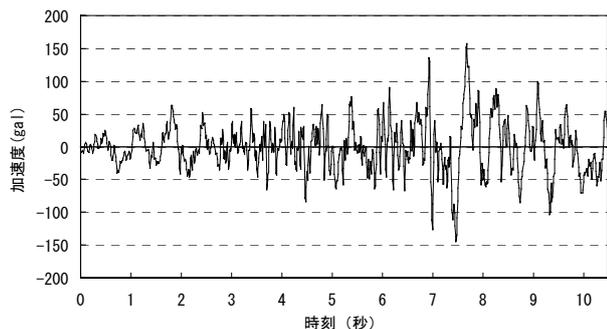


図-4.4 入力地震動（下限一庫波調整波）

4.2.3 強度と弾性係数の関係

解析では、堤体モデルの各要素に対して、強度との相関により弾性係数を設定することにした。そこで、計画中のCSGダムであるMダムのCSG材を用いた大型供試体（φ300mm×600mm）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）の関係を参考にした。このデータから得られた相関から弾性係数を設定した（図-4.5）。

$$E = 328.3 \times \sigma_c + 183.5 \quad (\text{式 5.1})$$

E : 弾性係数 (N/mm²)

σ_c : CSGの強度 (N/mm²)

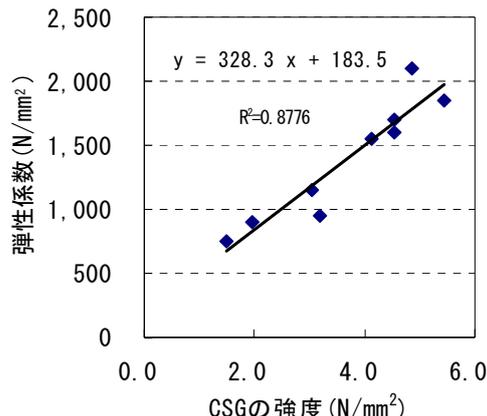


図-4.5 CSGの強度と弾性係数の関係 (MダムのCSGの大型供試体)

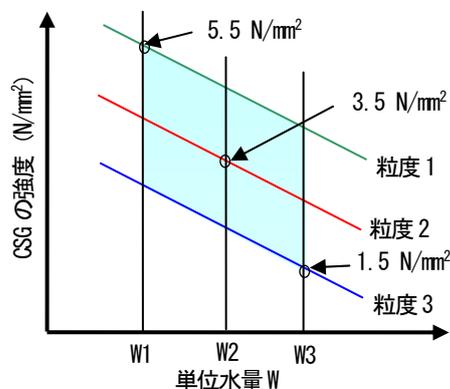


図-4.6 設定したひし形

4.2.4 解析ケース（強度のばらつき）

解析に用いる強度のばらつきの設定には、台形CSGダムとして、計画または施工中である堤高50m程度の4基の実ダムのCSG材の材料試験によるひし形を参考とした。図-4.6に本研究で設定したひし形を示す。設定したひし形の強度は1.5N/mm²～5.5N/mm²に分布するとし、平均の強度は3.5N/mm²とした。解析ケースはこのひし形の平均強度や強度範囲からばらつきを設定した。

解析ケースを表-4.2に示す。ケース1は現行の台形CSGダムで採用されている方法から、安定性評価に用いるCSGの強度の最小値（CSG強度：1.5N/mm²）とし、弾性係数については実ダムの設計で安全側の解析を行う観点でひし形で規定される範囲内における最大値程度を採用していることから、想定する強度範囲での最大強度にあたる5.5N/mm²に相当する弾性係数1,989N/mm²とした。

ケース2～7は平均強度を3.5N/mm²の正規分布で、変動係数を10～30%に変化させてばらつきを設定した。ばらつきを持つケースの強度範囲は平均±3σ（標準偏差）以内とした。これにより各ケースで想定するばらつきに対して発生確率99%以上までを考慮できる。ばらつきの

表-4.2 解析条件（強度のばらつき）

ケース	CSGの強度 (N/mm ²)				変動係数	ケース1に対する最小強度比
	最小	平均	最大	標準偏差		
1	1.500	1.500	1.500	0	0%	-
2	3.500	3.500	3.500	0	0%	2.333
3	2.450		4.550	0.350	10%	1.633
4	1.925		5.075	0.525	15%	1.283
5	1.400		5.600	0.700	20%	0.933
6	0.875		6.125	0.875	25%	0.583
7	0.350		6.650	1.050	30%	0.233
8	1.200		3.000	4.800	0.600	20%
9	1.000	2.500	4.000	0.500	0.667	
10	0.800	2.000	3.200	0.400	0.533	
11	0.600	1.500	2.400	0.300	0.400	

範囲の設計条件から、本検討で想定したひし形の範囲（1.5～5.5N/mm²）は平均強度3.5N/mm²で変動係数19%の正規分布に相当する。

ケース8～11は変動係数を20%で一定として、平均強度を1.5～3.0N/mm²の範囲で低下させた。

台形ダムモデル及び直角三角形ダムモデルにおいて表-4.2に示すケース1～11の条件で解析を行った。

4.3 解析結果

4.3.1 台形ダムモデルによる解析結果

台形ダムモデルでは、解析結果から安全率を評価する上で、最大主応力（引張）は極めて小さいため、以下は最小主応力について示す。解析結果の一例（弾性係数と動的解析全時刻の最小主応力の分布）を図-4.7に示す。また、各ケースの最小主応力及び局所安全率を表-4.3に示す。

ケース 2~7 では強度のばらつきが大きいほど発生する最大の圧縮応力も大きくなり、最小局所安全率は小さくなる。図-4.8 に弾性係数と最小主応力の関係の一例として、ケース 7 における下流端要素の弾性係数と最小主応力の関係を示す。弾性係数と発生応力は相関があり、弾性係数が大きいほど発生する応力は大きくなる。

また、ケース 8~11 では最小主応力の最小/平均/最大の値は同程度であった。平均強度が変化してもばらつき（変動係数）が同じ場合、今回の解析のように強度と弾性係数を線形関係で対応させていると、発生する圧縮応力の変化は小さい。

図-4.9 に平均強度を一定（3.5N/mm²）として強度のばらつきの大きさ（変動係数）を変化させた各ケース（2~7）について、変動係数とケース 1 に対する最小局所安全率の比の関係を示す。強度のばらつきが大きくなるほど最小局所安全率は小さくなる。本検討で想定したひし形の範囲のばらつき（変動係数約 19%）では、最小局所安全率は現行設計手法に相当するケース 1 の 2 倍程度となることがわかる。よって、実施工において強度のばらつきが設計時のひし形の想定範囲内であれば、十分な構

表-4.3 各ケースの最小主応力と局所安全率(台形ダム)

ケース	最小主応力 (N/mm ²)※			局所安全率			ケース1に対する 最小局所 安全率比
	最小	平均	最大	最小	平均	最大	
1	-1.43	-0.66	-0.03	1.05	3.12	44.99	-
2	-1.10	-0.64	-0.04	3.19	7.34	99.72	3.03
3	-1.21	-0.64	-0.03	2.73	7.32	127.27	2.60
4	-1.25	-0.64	-0.03	2.49	7.30	133.19	2.37
5	-1.33	-0.64	-0.03	1.95	7.28	145.89	1.85
6	-1.35	-0.64	-0.02	1.49	7.25	159.04	1.41
7	-1.47	-0.65	-0.02	0.83	7.22	193.61	0.79
8	-1.24	-0.64	-0.03	1.69	6.27	110.42	1.61
9	-1.22	-0.64	-0.03	1.49	5.23	102.84	1.42
10	-1.24	-0.64	-0.03	1.17	4.15	82.83	1.11
11	-1.25	-0.63	-0.03	0.88	3.12	57.89	0.84

※応力は圧縮が負

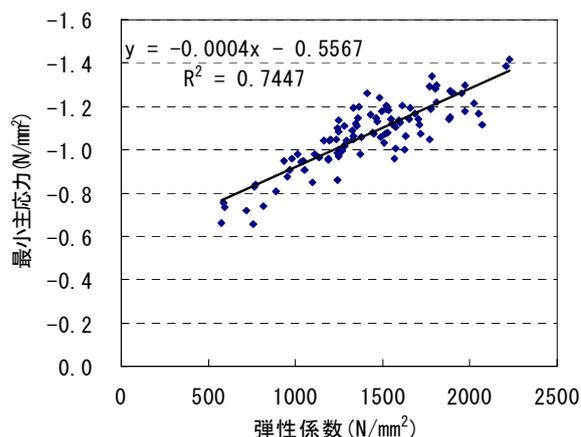


図-4.8 台形ダムモデル下流端要素の弾性係数と最小主応力の関係（ケース 7）※応力は圧縮が負

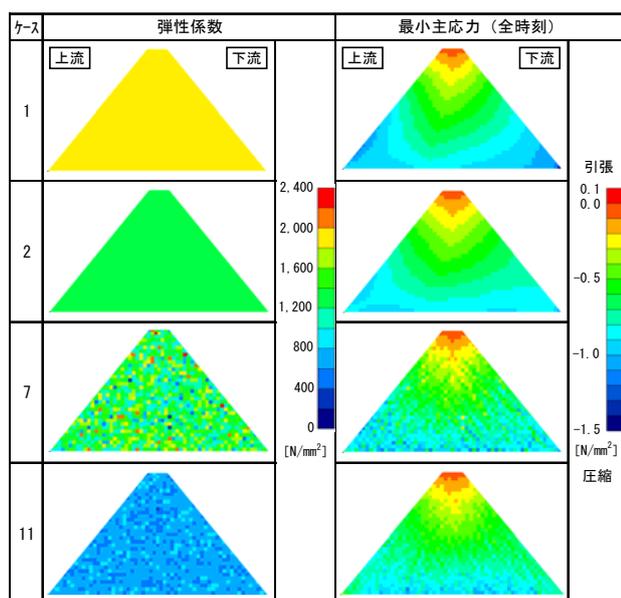


図-4.7 弾性係数と発生応力分布の一例（台形ダム）

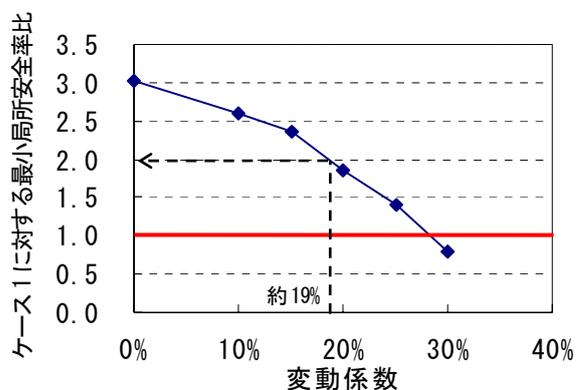


図-4.9 変動係数と最小局所安全率比の関係（台形ダム：平均強度 3.5N/mm²）

造安定性を得ることができることがわかる。

図-4.10 に変動係数を一定 (20%) として、平均強度を変化させた各ケース (5, 8~11) について、平均強度とケース 1 に対する最小局所安全率の比の関係を示す。現行設計法に相当するケース 1 の最小局所安全率は、変動係数を 20% とした正規分布では平均強度が半分 (1.75N/mm^2) 程度まで低下した場合と同程度となり、現行の設計手法は強度低下に対しても安全側となっていることがわかる。平均強度を低下しても、最小局所安全率が低下しにくい結果となったのは、堤体の弾性係数が全体的に低下したことで、応力の集中箇所が堤体上下流端付近から堤敷中央付近に変化したことが要因のひとつと考えられる (図-4.7)。

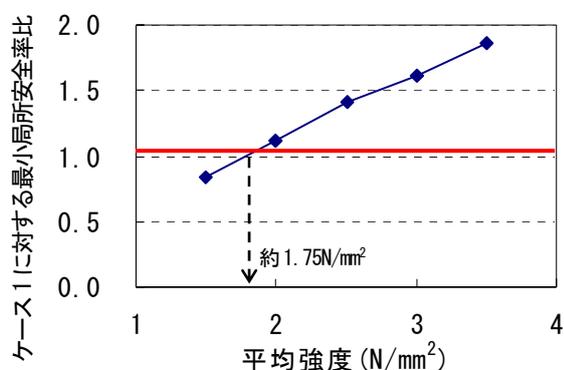


図-4.10 平均強度と最小局所安全率比の関係 (台形ダム：変動係数 20%)

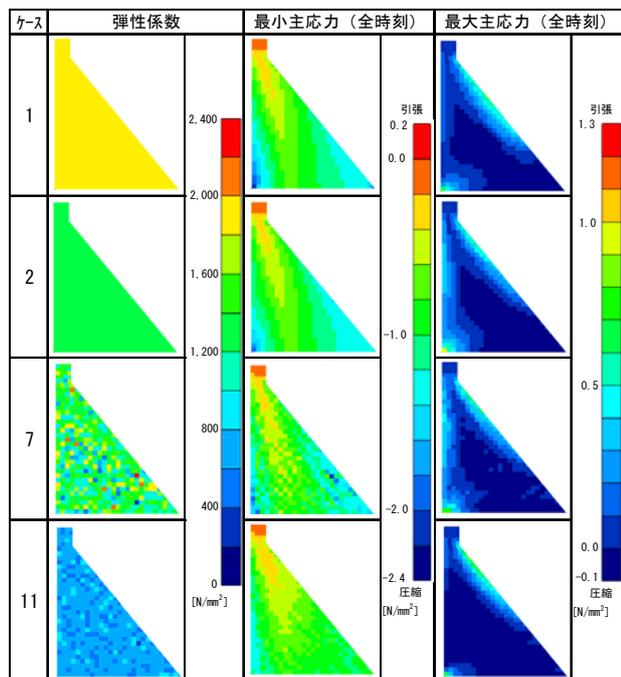


図-4.11 弾性係数と発生応力分布の一例 (直角三角形ダム)

4.3.2 直角三角形ダムモデルによる解析結果

直角三角形ダムモデルによる解析結果の一例 (弾性係数と動的解析全時刻の最小主応力) を図-4.11 に示す。また、各ケースの最小主応力を表-4.4 に、最大主応力を表-4.5 に示す。なお、引張に対する安全率の算定に用いる引張強度は、CSG の強度の $1/7$ とした⁸⁾。

最小主応力 (圧縮) に対する最小局所安全率は現行の設計方法を想定したケース 1 やばらつきが大きいケース 6, 7 で 1 を下回る結果となった。また、最大主応力 (引張) に対する安全率は全てのケースで安全率 1 を下回る結果となった。最小局所安全率が 1 を下回らないためには、強度を増加させるか、構造に影響を与える程度の引張を発生させない形状とする必要がある。このことより、

表-4.4 各ケースの最小主応力と局所安全率 (直角三角形ダム)

ケース	最小主応力 (N/mm^2) [*]			局所安全率			ケース1に対する最小局所安全率比
	最小	平均	最大	最小	平均	最大	
1	-2.11	-0.90	-0.02	0.71	2.30	61.10	-
2	-1.83	-0.90	-0.02	1.92	5.77	158.12	2.72
3	-1.98	-0.90	-0.02	1.61	5.75	187.34	2.28
4	-2.07	-0.90	-0.02	1.27	5.72	204.18	1.80
5	-2.12	-0.90	-0.02	1.15	5.70	236.33	1.63
6	-2.17	-0.90	-0.02	0.78	5.66	266.19	1.11
7	-2.31	-0.90	-0.02	0.50	5.58	275.16	0.70
8	-2.19	-0.90	-0.02	0.98	4.67	180.54	1.40
9	-1.82	-0.88	-0.02	0.95	3.90	150.01	1.34
10	-1.67	-0.81	-0.02	0.71	3.42	133.89	1.01
11	-1.53	-0.76	-0.02	0.66	2.74	104.14	0.93

※応力は圧縮が負

表-4.5 各ケースの最大主応力と局所安全率 (直角三角形ダム)

ケース	最大主応力 (N/mm^2) [*]			最小局所安全率	ケース1に対する最小局所安全率比
	最小	平均	最大		
1	-0.10	0.08	0.67	0.32	-
2	-0.09	0.07	0.92	0.54	1.70
3	-0.11	0.08	1.02	0.47	1.47
4	-0.12	0.08	1.06	0.38	1.19
5	-0.13	0.08	1.14	0.39	1.22
6	-0.14	0.08	1.12	0.34	1.07
7	-0.17	0.08	1.24	0.19	0.61
8	-0.13	0.09	1.01	0.34	1.05
9	-0.14	0.09	1.07	0.23	0.73
10	-0.14	0.04	0.99	0.21	0.65
11	-0.18	0.02	0.87	0.17	0.52

※応力は引張が正

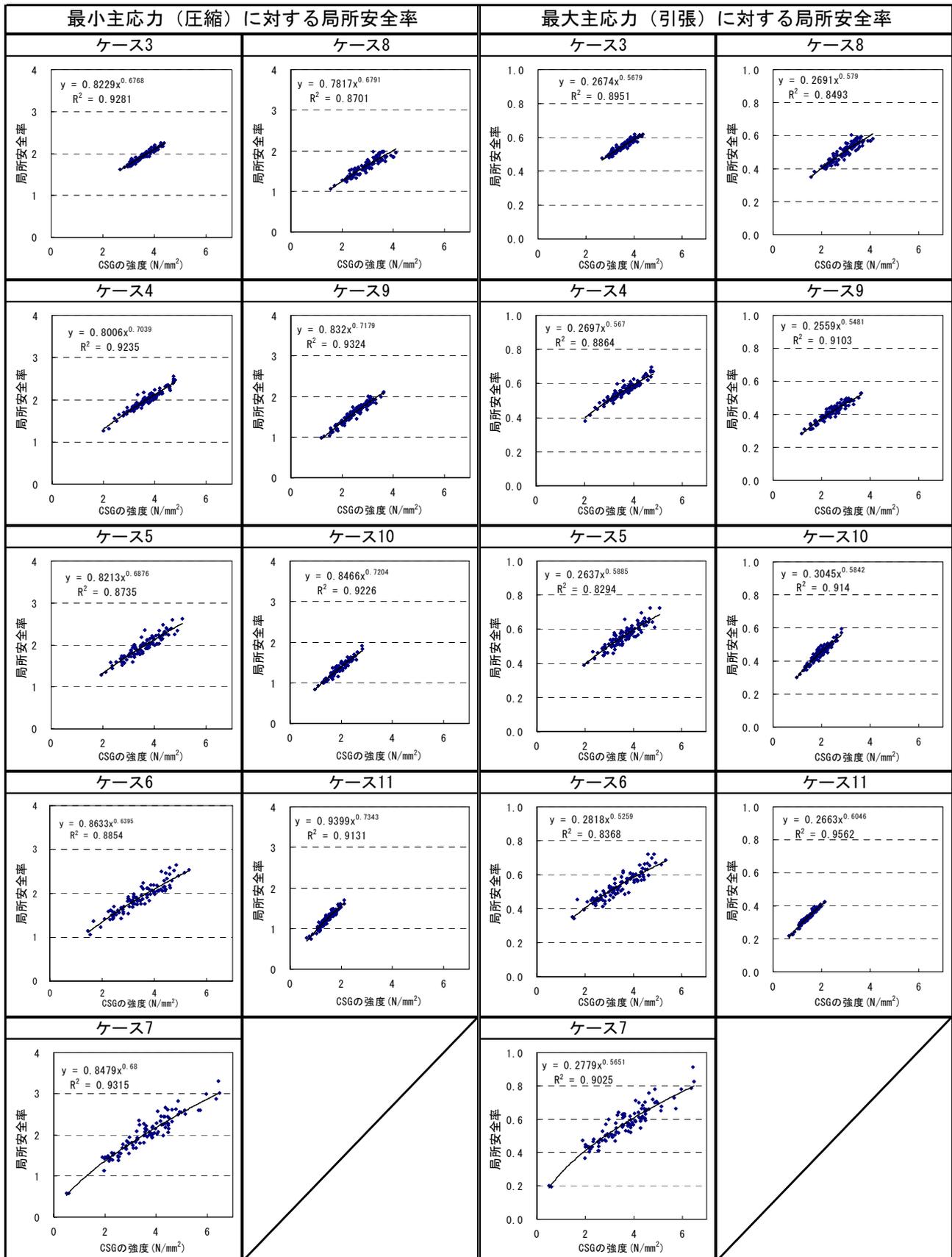


図-4.12 各ケース堤敷上流端要素の強度と局所安全率の関係（直角三角形ダム）

同じ堤高のダムである場合、台形ダムに発生する応力は直角三角形ダムに発生する応力より小さくなり、また直角三角形ダムでは、圧縮応力より引張応力に対する最小安全率が小さくなるのがわかる。なお、本検討では、安全率の値そのものには着目せず、ばらつきによる最小局所安全率の変化傾向に着目した。

台形ダムモデル同様に、ケース 2~7 では強度のばらつきが大きいほど発生する応力は大きくなり、局所安全率は小さくなる傾向がある。また、ケース 8~11 では、平均強度が小さくなるほど発生する応力は小さくなる傾向があり、発生応力の変化が小さい台形ダムモデルによる解析結果とは傾向が異なる。台形ダムモデルについては応力が局所に集中しにくい形状であるため、繰返し回数に起因する結果への影響は小さいと考えられるが、直角三角形ダムモデルでは、圧縮及び引張応力が堤敷上流端に集中するため、各ケースの繰返しの中で最小強度付近の値が堤敷上流端に発生しなかった場合は強度のばらつきの影響が現れにくい結果となった。そこで直角三角形ダムモデルでは、解析結果の最小局所安全率と併せて、発生応力が集中する堤敷上流端部の局所安全率の傾向により最小局所安全率の推定値を算定し、ばらつきによる影響を検討した。各ケースにおける堤敷上流端要素の強度と局所安全率の関係を図-4.12 に示す。発生応力は弾性係数に相関があると考え、本検討のように弾性係数を強度との相関式により設定した場合の局所安全率は、強度との比較的高い相関関係で表すことができると考えられる。ここでは累乗の関係を仮定し、近似曲線を設定した。なお、最小局所安全率の推定値は表-4.2 に示した各ケースの強度の最小値を図-4.12 中に示す近似曲線式に代入して外挿値として算定している。

図-4.13 に平均強度を一定 (3.5N/mm^2) として強度のばらつきの大きさ (変動係数) を変化させた各ケース (2~7) について、変動係数とケース 1 に対する最小局所安全率の比の関係を示す。なお、最小局所安全率比の推定値は前述の方法により求めている。強度のばらつきが大きくなるほど最小局所安全率は小さくなる。本検討で想定したひし形の範囲のばらつき (変動係数約 19%) では、圧縮応力に対する最小局所安全率はケース 1 の 1.5 倍程度、引張に対する最小局所安全率はケース 1 と同程度となることが見込まれる。台形ダムモデルでは同じばらつき条件 (変動係数約 19%) の最小主応力に対する最小局所安全率はケース 1 の 2 倍程度であり、引張応力はほとんど発生しなかったため、ばらつきを考慮した場合の構造安定性は台形ダムの方が優位であると考えられる。

図-4.14 に変動係数を一定 (20%) として、平均強度

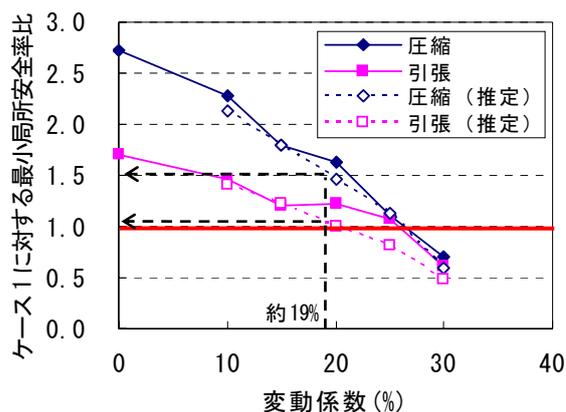


図-4.13 変動係数と最小局所安全率比の関係
(直角三角形ダム：平均強度 3.5N/mm^2)

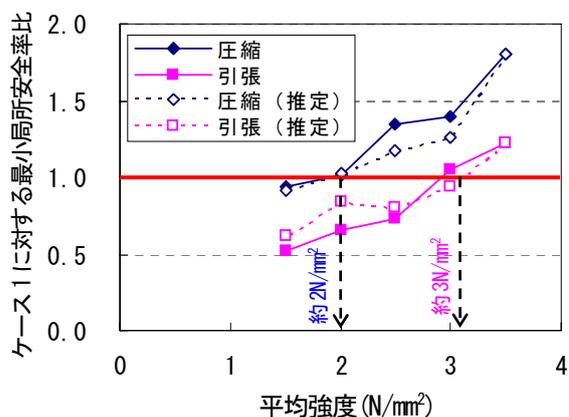


図-4.14 平均強度と最小局所安全率比の関係
(直角三角形ダム：変動係数 20%)

を変化させた各ケース (5, 8~11) について、平均強度とケース 1 に対する最小局所安全率の比の関係を示す。圧縮応力に対してケース 1 の最小局所安全率は、変動係数を 20% とした正規分布では平均強度が 2N/mm^2 程度まで低下した場合と同程度となる。引張に対しては 3N/mm^2 程度に低下した場合にケース 1 の局所最小安全率を下回ることが推定される。ケース 2~7 同様に台形ダムと比べて直角三角形ダムは強度低下に対しても、局所安全率への影響は不利となる傾向となった。

4.4 考察

本研究では、堤体の強度のばらつきを考慮した台形 CSG ダムの構造安定性について、モンテカルロ法による応力解析により検討した。さらに、直角三角形ダムモデルにより形状によるばらつきの影響の違いを検討した。これらの検討により、強度や弾性係数などの物性のばら

つきが台形 CSG ダムを含む重力式ダムの設計方法について検討した。

本検討における条件では、CSG 強度で構造安定性を確認する現行の設計手法は、ひし形の範囲内で強度がばらつく場合に対して十分に安全側であり、また CSG 強度を一部下回るような強度を含む程度のばらつきに対しても、条件によっては安全側となる。ただし、本解析では個別ダムを参考に強度や弾性係数を設定し、さらに強度のばらつきが正規分布であることを仮定しているため、強度と弾性係数の相関やばらつきの分布形状が異なることで、強度のばらつきによる構造安定性への影響の大小が変化する。CSG は母材採取場所により品質が大きく異なるため、今後、ばらつきを考慮した上での合理的な設計や施工を実現するためには、個別のダムにおける CSG の物性やそのばらつきを把握する必要がある。

また、台形ダムの形状は直角三角形ダムの形状に比べて、局所的な応力を緩和できるほか、強度のばらつきに対して安全性に優位であると考えられる。特に引張応力に対しては、台形 CSG ダムの現行設計で採用している方法は、ばらつきを考慮した解析と最小局所安全率がほぼ同等に評価されることから、設計上考慮する必要がある引張応力は発生させない形状とした方が、構造の信頼性を確保できると考えられる。

以上より、台形 CSG ダムを含む重力式ダムの設計方法について、図-4.15 に示す手順を提案できる。堤体材料の強度や弾性係数のばらつきを評価し、本検討で示したようなモンテカルロ法による応力解析を行い、所要の安全率を満たすことを確認する設計方法が提案できる。なお、所要の安全率として、現行の台形 CSG ダムの設計方法における設計地震時の安全率として用いられている 1.5 等が有効となる。

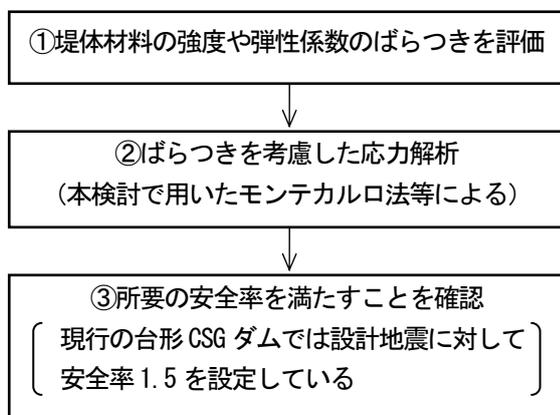


図-4.15 材料のばらつきを考慮した設計手順

5. 現場管理試験データの分析と管理合理化の提案

5.1 目的

CSG とは建設現場周辺で手近に得られる材料を、分級・粒度調整、洗浄を基本的に行うことなく、必要に応じて大玉の除去あるいは破碎を行う程度で、セメント、水を添加し、簡易な施設を用いて混合した材料である。そのため、CSG を製造する際の CSG 材の粒度はある程度幅を持ったものとなる。この結果、単位水量が一定でも得られる強度に幅を持つことから、CSG の配合計画にあたっては、CSG 材の粒度の分布幅をあらかじめ想定しておく必要がある。

また、CSG 材の表面水率が変動することから、CSG の製造では単位水量の変動もある程度許容する。このため、CSG の配合計画にあたっては、管理方法を踏まえた上で単位水量の幅についても想定しておく必要がある。

このような状況に対応するため、設計上 CSG の強度は以下の手順により合理的に CSG の強度を設定することとしている⁹⁾。まず粒度については、母材採取地で得た材料で数多くの粒度試験を行い、CSG 材の最も粗い粒度、最も細かい粒度を把握する。CSG 材の粒度は、すべてこの最粗粒度、最細粒度の中に分布することになる。強度試験に用いる粒度として、この最粗粒度と最細粒度を選定する。さらに、粒度の影響をより明確にするため、通常平均粒度も試験粒度として設定している。強度試験に用いる単位水量としては試験水量幅を広くとり、その間の複数の単位水量を用いて試験を実施することで単位水量の影響を把握する。試験結果は、図-5.1 に示すように縦軸を CSG の強度 (弾性領域強度)、横軸を単位水量として、最粗、最細粒度の強度を単位水量ごとにプロットする。粒度ごとの強度を結ぶと、単位水量を変数とした粒度-強度線が得られる。

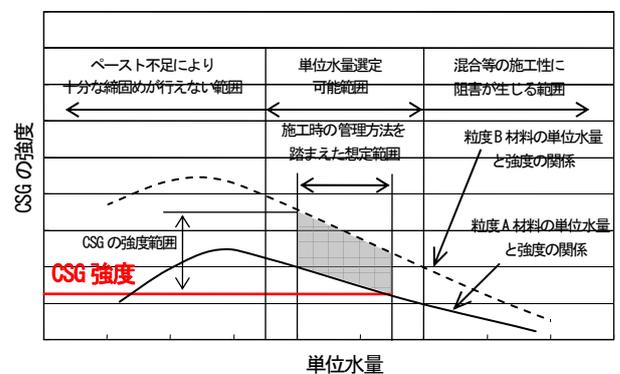


図-5.1 CSG 材の粒度と単位水量管理範囲から設定されるひし形の最小強度 (CSG 強度)

強度試験における単位水量に関する情報から、水量が少なくなると明らかに水不足で強度がでない状況がわかる。一方、多すぎると混合時にミキサーの羽根などの付着が著しく実際の施工に不向きとなる現象が現われる。これは単位水量に許容範囲が存在することを示すものである。そこで、図-5.1 のようにこの単位水量の許容範囲を縦線で記入すると、CSG の強度は上下 2 本の粒度-強度線で挟まれる内側で、2 本の許容単位水量範囲を示す縦線で区切られるひし形の範囲内に分布することとなる。これを CSG の強度の「ひし形理論」と呼んでいる。

実際の CSG の品質管理は、上述のようにして作成したひし形を基本として、CSG 材の粒度が想定範囲内であることを確認し、そのうえでひし形範囲内のある単位水量を目標に CSG の締め固めを行い、所定の強度を得るために必要な密度を管理するという流れとなる。

そこで、実際に施工された CSG ダム及び構造物の管理試験データを用いて、CSG 材の品質のばらつきや CSG の強度のばらつきの傾向から、合理的な品質管理方法を設定するために品質管理の妥当性を判定する方法を提案した。なお、管理試験データは 4 基のダム及び構造物（以下、Aダム、Bダム、Cダム、Dダムという）を用いた。

なお、このように品質管理の合理化についての検討結果を踏まえた、品質管理方法だけの対応では必要な CSG の強度が確保できない場合は、前述のひし形理論を基にした単位セメント量増加などの配合設計の変更を組み合わせることでいくことになる。つまり、品質管理の合理化を検討しておくことにより、適切な配合設計が可能になるものと考えている。

5.2 各ダムにおける CSG の特徴と管理試験値の傾向

5.2.1 CSG 材の特徴と強度特性

CSG 材は母材採取場所とその品質が大きく異なる。表-5.1 に A~D ダムに用いた CSG 母材の種類を示す。現在施工されている CSG ダムや構造物では、ここで示す河床砂礫や原石廃棄岩の他に、掘削ズリなどを用いる場合もある。

図-5.2~5.5 に各ダムのひし形を示す。単位セメント量を増やすことで CSG の強度は大きくなる。A, C, D ダムでは単位水量が増えるほど強度が低下する傾向があるが、B ダムは反対に単位水量が増える程強度が増す傾向があ

表-5.1 CSG 母材の種類

Aダム	Bダム	Cダム	Dダム
河床砂礫	原石廃棄岩	原石廃棄岩	河床砂礫

る。A 及び D ダムでは粗粒側の強度が小さく、B ダムでは細粒側が小さい。C ダムでは単位水量により傾向が異なるため、粒度だけでは強度の傾向が決まらない。なお、D ダムでは施工性の観点から実施工時の単位水量範囲を 90~110kg/m³に変更している。

5.2.2 粒度分布のばらつき

河床砂礫を用いた A, D ダムの CSG 母材は粒径 80mm 以上の材料をほとんど含んでおらず、CSG 材ではそれらを除いている。原石山の廃棄岩を用いた B, C ダムでは破碎により最大粒径が 80mm 未満になるように調整している。各ダムのひし形作成時に想定した粒度分布と、施工時の管理試験値を図 5.6~図 5.9 に示す。各図中のハッチングは管理試験値の最大値と最小値の範囲を示している。A, B, D ダムでは、すべて想定した粒度分布の範囲内となっている。C ダムではふるいの呼び寸法で 20mm 及び 40mm の通過率が想定範囲を超えて、若干細粒側の傾向が強いが、強度への影響が大きい粒径 5mm 未満の管理試験値は想定範囲に入っている。また結果として管理範囲全体にはばらつかず、A, C, D ダムは平均粒度から細粒側に、B ダムは平均粒度付近に集中する傾向となった。D ダムでは施工当初はばらつきが大きかったが、CSG 製造前に CSG 材のストックヤードを混合することで粒度分布が安定化し、ほぼ最細粒度~平均粒度の範囲内の分布となった。

5.2.3 表面水量のばらつき

表面水量は、施工の 3 日前に計測した吸水率と、当日の管理時間毎に計測する含水率、粒度分布から計算されている⁹⁾。そのため、得られた表面水量は複数の誤差要因を含んでいる。各ダムの管理試験による表面水量と管理時間毎の変動（ある管理試験値と、連続して施工する場合における 1 回前の管理試験値の差）を図-5.10~13 に示す。管理頻度は簡易法によるふるい分け試験と含水率試験による表面水率の計測の頻度であり、これらは施工期間中に変更している。管理試験に要する時間を考慮すると、1 回/1 時間の試験頻度は現状では最高頻度と考えている。施工期間を通してのばらつきは大きい、施工初期や降雨の影響を受けた場合など、CSG 材の品質が不安定になる時期を除けば、管理時間毎の変動はおおよそ ±10kg/m³ 程度である。A, D ダムは特にばらつき ±5kg/m³ 程度と特にばらつきが小さい。これは CSG 材の粒度分布のばらつきが小さいことと、気候条件（気温、降雨等）が安定していることに起因すると考えられる。気象条件を加味することも管理時間の設定には重要となる。

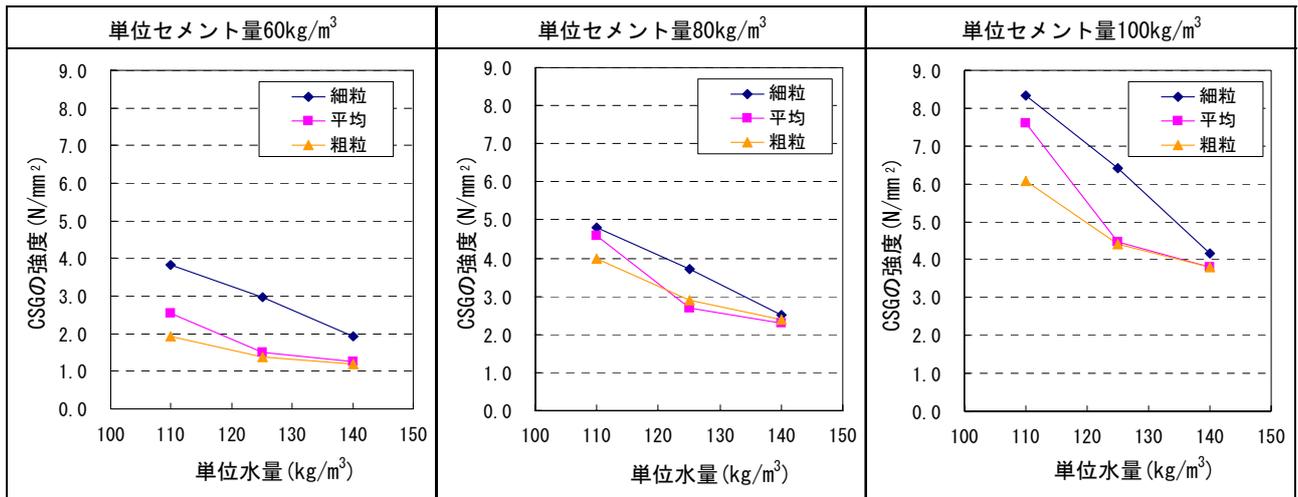


図-5.2 A ダムのひし形

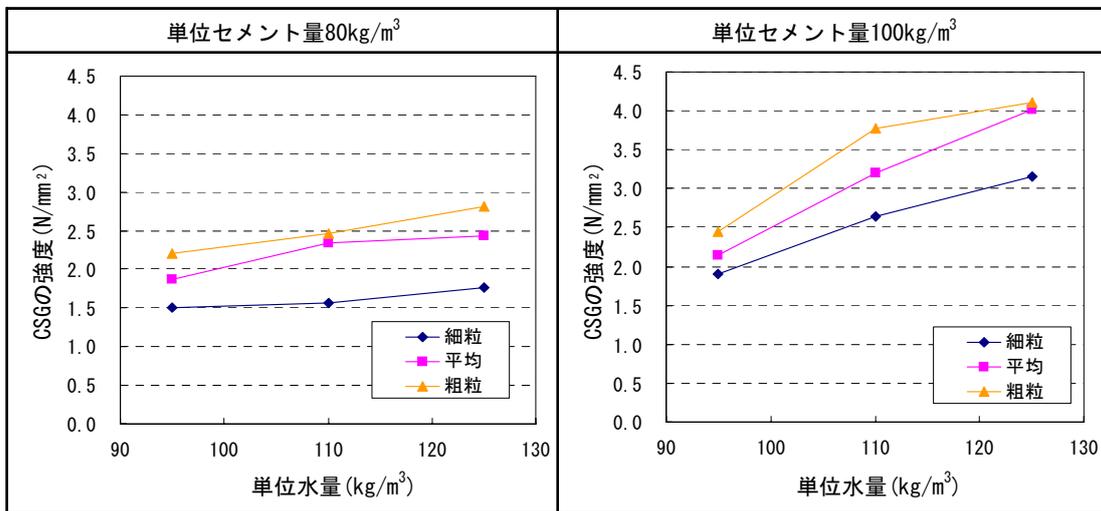


図-5.3 B ダムのひし形

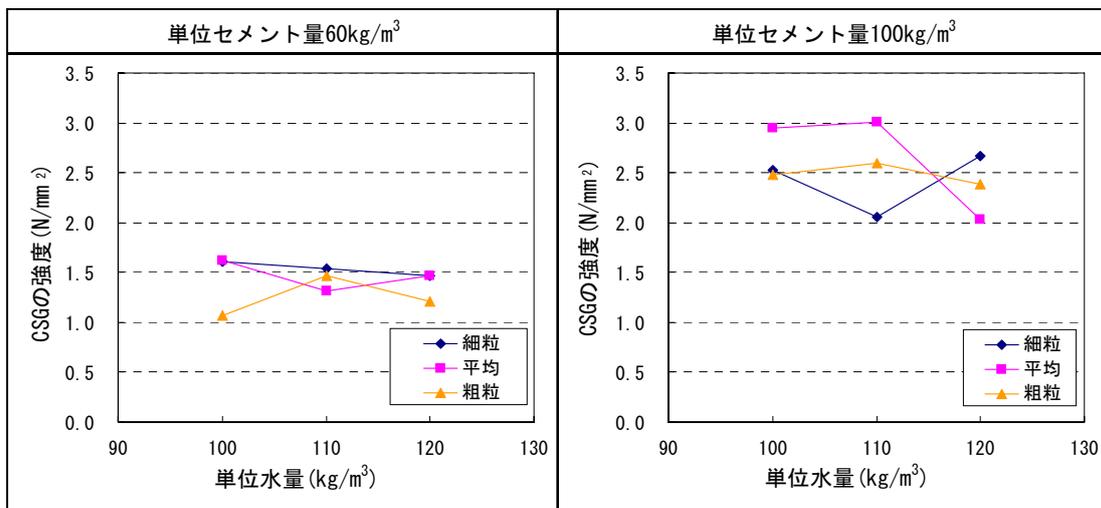


図-5.4 C ダムのひし形

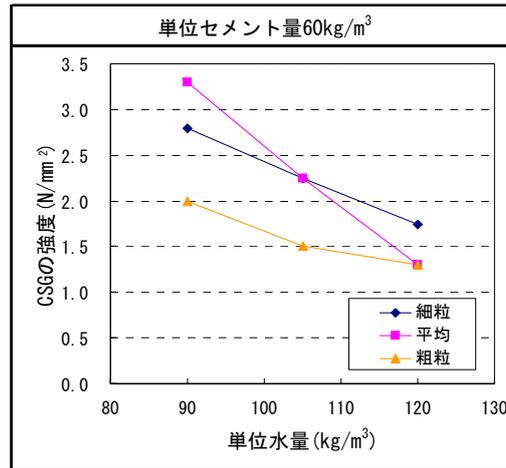


図-5.5 Dダムのひし形

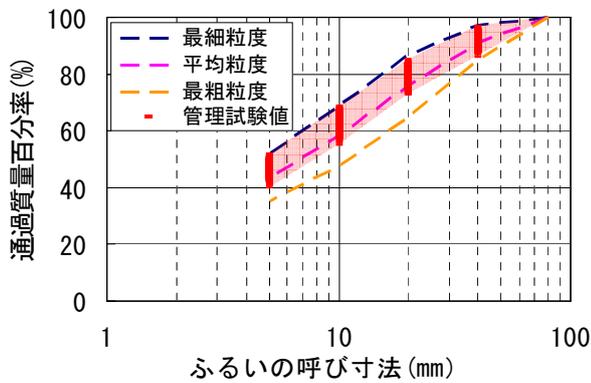


図-5.6 Aダム CSG 材の粒度分布

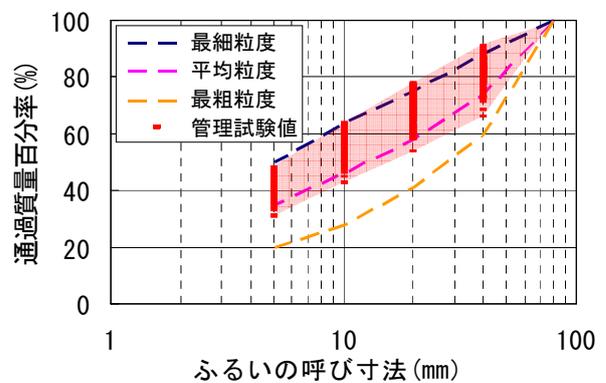


図-5.8 Cダム CSG 材の粒度分布

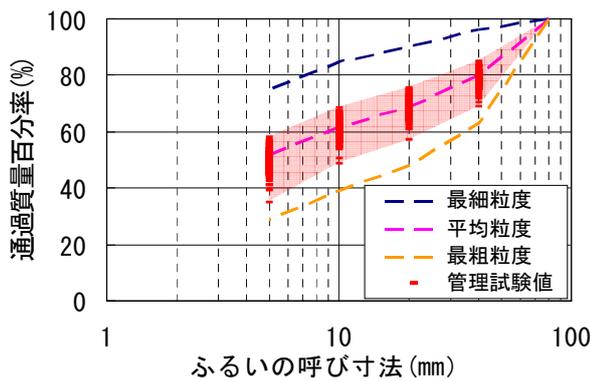


図-5.7 Bダム CSG 材の粒度分布

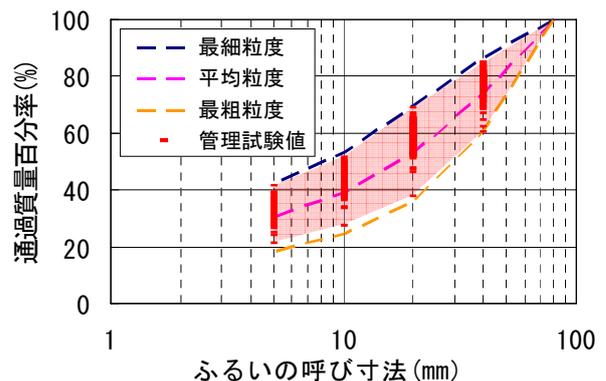


図-5.9 Dダム CSG 材の粒度分布

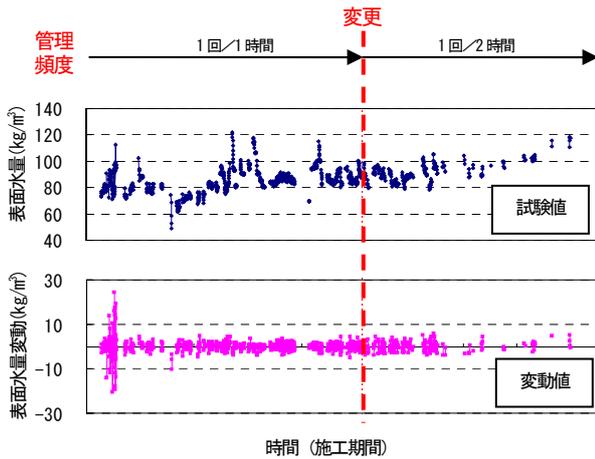


図-5.10 Aダム CSG 材の表面水量

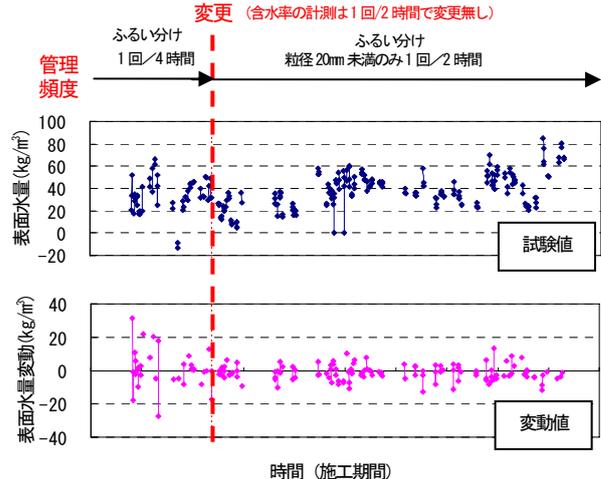


図-5.12 Cダム CSG 材の表面水量

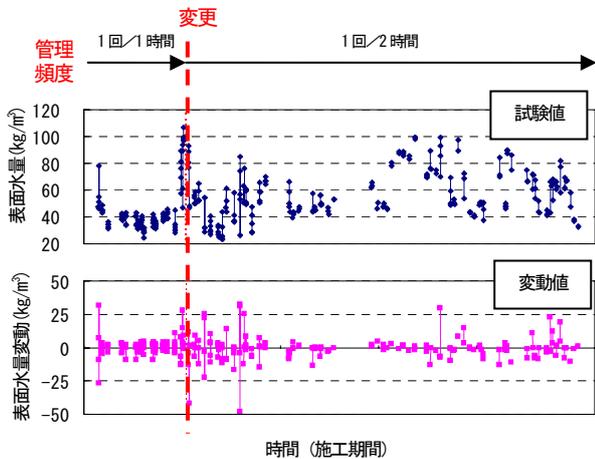


図-5.11 Bダム CSG 材の表面水量

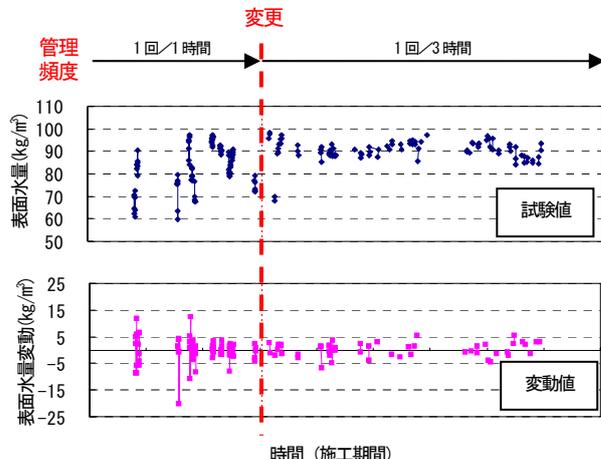


図-5.13 Dダム CSG 材の表面水量

5.2.4 強度のばらつき

CSG の強度管理は施工日毎に標準供試体の材齢 7 日及び 28 日、大型供試体では材齢 28 日で一軸圧縮試験が実施されている⁹⁾。A ダムについてはさらに、標準供試体及び大型供試体の材齢 91 日でも実施されている。各ダムの強度管理試験結果の一覧を表-5.2 に示す。各ダムにより強度やばらつきは異なるが、材齢 28 日以降では変動係数は 20%前後である。また、A ダムでは、単位セメント量が多いほど、あるいは材齢が伸びるほどばらつきは小さくなる傾向がある。管理が十分におこなわれている重力式コンクリートダムでのコンクリート強度の変動係数が 15%以内¹⁰⁾であることから、ばらつきが大きい材料である CSG で品質管理を密に行うことで、安定した強度が得られると考えられる。

各ダムの CSG の強度の確率密度分布の一例 (標準供試体材齢 28 日でデータ数が多い単位セメント量条件)を図-5.14~17 に示す。分布傾向を把握するため、材齢 28

日の強度の確率密度についての移動平均をあわせて示した。分布は平均値付近にピークを持ちつつ強弱側双方に広がりをもっており、おおむね正規分布による近似が可能と考えられる。

5.3 品質管理試験の設定方法の提案

CSG は材料の品質のばらつきが大きいほど、所定の強度を得るための管理試験を密に行う必要がある。品質管理だけでの対応では効果的・効率的でない場合は、配合設計変更、特に単位セメント量の増加を検討することも念頭に置く必要がある。台形 CSG ダムでは設計時に設定した必要な強度である CSG 強度を下回らない強度を得る必要があるため、徹底した品質管理のもとで CSG を製造、打設する必要がある。しかし、必要 CSG 強度に対して十分安全側である条件下にある場合は管理頻度を低減できる可能性を有すると考えられる。そこで、合理的な管理頻度を設定するため、強度の観点から管理試験頻度の妥当性を判定する方法を検討・提案した。

表-5.2 各ダムの強度管理試験値 (CSG の強度)

ダム		A			B		C				D		
単位セメント量 (kg/m ³)		60	80	100	80	100	60	80	100	125	60	100	
標準供試体	材齢7日	データ数	29	77	106	76	79	28	26	83	12	43	8
		平均強度 (N/mm ²)	1.16	1.72	2.40	2.01	2.85	1.15	1.47	1.89	2.52	1.46	2.69
		最大強度 (N/mm ²)	2.07	2.57	3.40	3.33	4.30	1.51	1.91	3.07	3.51	2.42	3.28
		最小強度 (N/mm ²)	0.57	1.17	1.53	0.99	1.52	0.89	1.04	1.22	1.85	0.88	2.33
		標準偏差 (N/mm ²)	0.35	0.29	0.38	0.38	0.64	0.17	0.24	0.38	0.54	0.30	0.37
		変動係数 (%)	29.82	16.59	15.77	18.85	22.41	14.86	16.48	20.12	21.41	20.94	13.65
	材齢28日	データ数	25	52	87	76	79	26	26	83	12	43	8
		平均強度 (N/mm ²)	1.82	2.70	3.44	3.00	4.17	1.48	1.84	2.57	3.30	2.75	5.86
		最大強度 (N/mm ²)	2.87	3.97	5.10	4.35	6.40	1.90	2.24	3.74	4.27	5.15	7.28
		最小強度 (N/mm ²)	1.13	1.87	2.43	1.55	2.60	1.11	1.33	1.83	2.36	1.77	5.13
		標準偏差 (N/mm ²)	0.43	0.45	0.51	0.57	0.94	0.23	0.27	0.42	0.63	0.61	0.62
		変動係数 (%)	23.52	16.61	14.67	18.99	22.59	15.79	14.93	16.19	19.13	22.10	10.63
	材齢91日	データ数	24	31	68	/	/	/	/	/	/	/	/
		平均強度 (N/mm ²)	2.88	3.91	4.71	/	/	/	/	/	/	/	/
		最大強度 (N/mm ²)	3.63	4.87	6.10	/	/	/	/	/	/	/	/
		最小強度 (N/mm ²)	1.80	3.10	4.00	/	/	/	/	/	/	/	/
		標準偏差 (N/mm ²)	0.57	0.44	0.47	/	/	/	/	/	/	/	/
		変動係数 (%)	19.66	11.32	9.92	/	/	/	/	/	/	/	/
大型供試体	材齢28日	データ数	24	33	70	66	64	26	26	19	12	43	8
		平均強度 (N/mm ²)	1.76	2.75	3.38	2.74	3.64	1.40	1.85	2.25	2.82	2.90	5.61
		最大強度 (N/mm ²)	2.37	3.63	4.60	3.75	5.33	1.73	2.33	2.57	3.89	4.18	7.02
		最小強度 (N/mm ²)	1.20	1.97	2.23	1.52	2.51	1.06	1.32	2.06	2.19	1.73	3.83
		標準偏差 (N/mm ²)	0.37	0.44	0.47	0.51	0.65	0.21	0.31	0.14	0.54	0.49	0.97
		変動係数 (%)	21.24	15.97	13.78	18.69	17.86	15.30	16.59	6.17	19.05	17.02	17.37
	材齢91日	データ数	24	33	70	/	/	/	/	/	/	/	/
		平均強度 (N/mm ²)	2.92	3.96	4.66	/	/	/	/	/	/	/	/
		最大強度 (N/mm ²)	3.83	4.63	6.20	/	/	/	/	/	/	/	/
		最小強度 (N/mm ²)	1.67	3.07	3.93	/	/	/	/	/	/	/	/
		標準偏差 (N/mm ²)	0.49	0.47	0.47	/	/	/	/	/	/	/	/
		変動係数 (%)	16.94	11.95	10.09	/	/	/	/	/	/	/	/

…図-5.14~17で示した試験結果

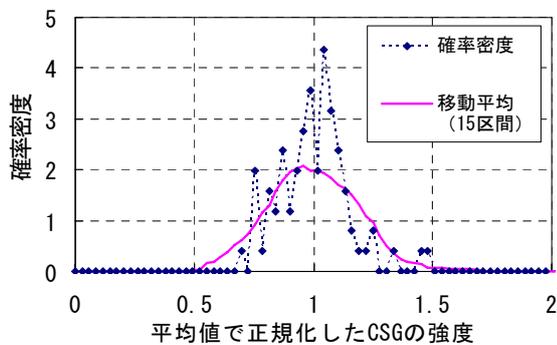


図-5.14 A ダム CSG の強度分布の確率密度分布 (材齢 28 日標準供試体、単位セメント量 100kg/m³)

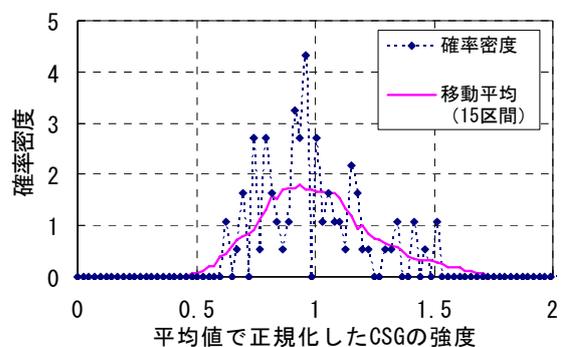


図-5.15 B ダム CSG の強度の確率密度分布 (材齢 28 日標準供試体、単位セメント量 100kg/m³)

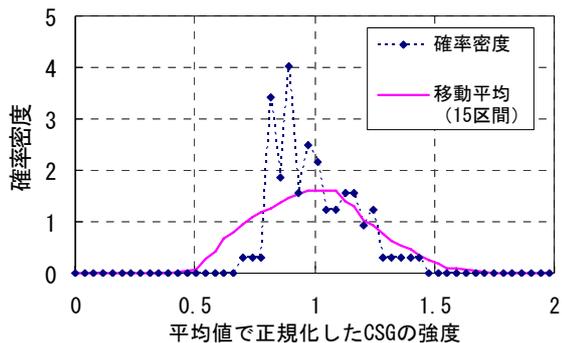


図-5.16 C ダム CSG の強度の確率密度分布
(材齢 28 日標準供試体、単位セメント量 100kg/m³)

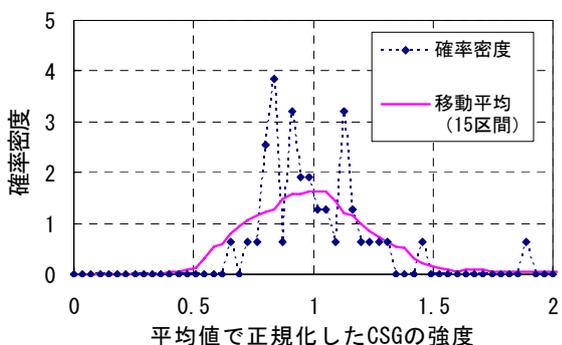


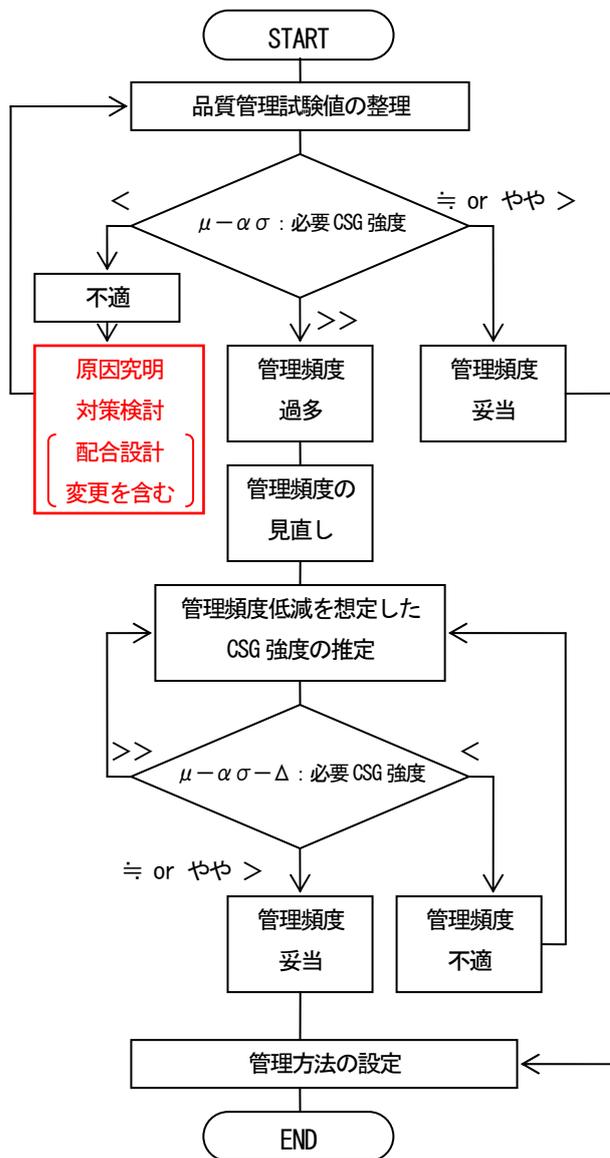
図-5.17 D ダム CSG の強度の確率密度分布
(材齢 28 日標準供試体、単位セメント量 60kg/m³)

5.3.1 管理試験頻度検討手順

まず、施工初期の管理試験による CSG 材の粒度分布や表面水量、CSG の強度等のデータを蓄積し、CSG の強度のばらつきの傾向を把握する。試験値から、現状の品質管理で想定される CSG 強度（試験の最小値、もしくは平均値から標準偏差の 2~3 倍の強度低下を見込んだ値、以下施工 CSG 強度という）を設定する。施工 CSG 強度が必要 CSG 強度に対して十分に大きい場合は管理頻度を低減できる可能性がある。もし、管理試験を密に行っている施工初期の段階で、施工 CSG 強度が必要 CSG 強度を下回る場合には、現状の CSG 材の取り扱い方法や管理試験方法に問題があると考えられるため、原因究明と対応策の検討が必要である。繰り返しになるが、検討すべき対応策の中には配合設計の変更も含まれる。施工 CSG 強度が必要 CSG 強度より大きく、ほぼ同等である場合は現在の管理頻度が妥当と判定できる。

次に管理頻度を低減できる可能性がある場合には、管理頻度が強度低下に与える影響を把握することで、管理頻度を変更した際に想定される最小の CSG の強度（以下、

管理頻度低減 CSG 強度という）を得ることができる。強度管理の観点から、管理頻度低減 CSG 強度が必要 CSG 強度に対して同等かつ大きい値となる管理頻度が適した管理頻度であると考えられる。管理頻度の妥当性を強度の観点から判定する方法について、フローを図-5.18 に示す。



μ : 品質管理試験による CSG の強度の平均値
 σ : 品質管理試験による CSG の強度の標準偏差
 α : 想定される CSG の強度範囲（標準偏差の係数）
 Δ : 管理頻度低減に起因する強度誤差

$\mu - \alpha \sigma$: 施工 CSG 強度
 $\mu - \alpha \sigma - \Delta$: 管理頻度低減 CSG 強度

図-5.18 管理試験頻度の妥当性判定フロー

以上の手順により、管理試験を1回/1時間の頻度で3ヶ月行ったAダムのCSG材の管理試験値（単位セメント量100kg/m³）から、管理頻度の低減による強度低下を検討し、管理頻度の妥当性を判定した。

5.3.2 必要CSG強度に対する施工CSG強度の比較

管理試験における材齢91日の大型供試体の一軸圧縮試験値を表-5.3に示す。最小値及び $\mu - 2\sigma$ の値でも必要CSG強度（Aダム堤体の応力解析から算出される応力に対して必要とされるCSGの強度：3.1N/mm²）より2割以上大きく、 $\mu - 3\sigma$ でも必要CSG強度より大きい。よって管理頻度の低減できる可能性を有すると考えられる。実際の施工では長期材齢の大型供試体による強度試験は行っていない場合もあり、また、長期材齢の強度を用いる場合は検計時期も遅くなることから、早期に管理頻度の評価を行い、施工に反映するためには材齢7日や28日の強度試験値との相関により推定した材齢91日相当の強度を用いる必要がある。

5.3.2 粒度分布の分類

管理頻度による強度への影響を推定するために、まず粒度分布の傾向を明確にするため、CSG材の粒度分布について細粒側・平均粒度付近・粗粒側に分類した。最細粒と最粗粒の分布範囲を3等分してそれぞれの分布範囲とした。設定した粒度区分を図-5.19に示す。実際の適用にあたっては、この等分数を5等分にして、より品質

表-5.3 CSGの強度試験値（材齢91日、大型供試体）

項目	試験値 (N/mm ²)	必要CSG強度 (3.1N/mm ²) に対する比
平均値 μ	4.66	
標準偏差 σ	0.47	
最大値	5.30	
最小値	4.30	1.39
$\mu - 2\sigma$	3.73	1.20
$\mu - 3\sigma$	3.26	1.05

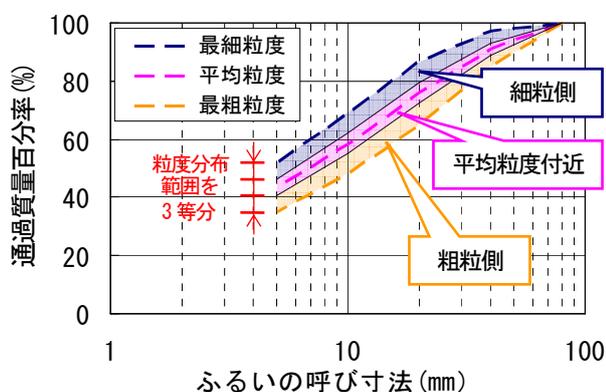


図-5.19 粒度範囲の区分

管理精度を上げることも考えられる。この設定区分により試験値を分類したものを表-5.4に示す。5割弱が平均粒度付近であり、細粒側は3割程度、粗粒に分布するデータは無かった。複数の粒度範囲にまたがる分布もあったが、今回の検討ではこの粒度分布については除外した。もし、このような分布が頻出して、粒度区分に分けられる試験値が少ない場合には、表面水量や強度に与える影響が大きい粒度条件に着目した粒度区分の分類を行うことで、有効な粒度分布傾向が得られると考えられる。

5.3.3 管理試験頻度による単位水量の変動

管理試験頻度による単位水量の変動を推定した。推定の方法として、図-5.20に管理頻度を低減することにより発生する誤差のイメージを示す。表面水量の計測頻度が1時間に1回であれば、単位水量の補正が1時間に1回行われるが、2時間に1回の場合は1時間後に計測が行われなため、1時間前の試験値から給水量を設定することになり、単位水量の誤差が大きくなる。下図の【1回/2時間の場合】では管理試験時刻10:00と12:00に管

表-5.4 各粒度区分の割合（検討対象期間）

粒度区分	データ数	割合
細粒側	651	30.3%
平均粒度付近	993	46.2%
粗粒側	0	0.0%
その他*	504	23.5%
合計	2148	100%

*複数の粒度区分にまたがる粒度分布

表-5.5 粒度別CSGの強度試験値（材齢91日、大型供試体）

粒度区分	細粒側	平均粒径付近
平均値 μ (N/mm ²)	4.64	4.82
標準偏差 σ (N/mm ²)	0.50	0.28
変動係数 (%)	0.11	0.06
最大値 (N/mm ²)	6.20	5.30
最小値 (N/mm ²)	4.00	4.30
$\mu - 2\sigma$ (N/mm ²)	3.64	4.25
$\mu - 3\sigma$ (N/mm ²)	3.14	3.97

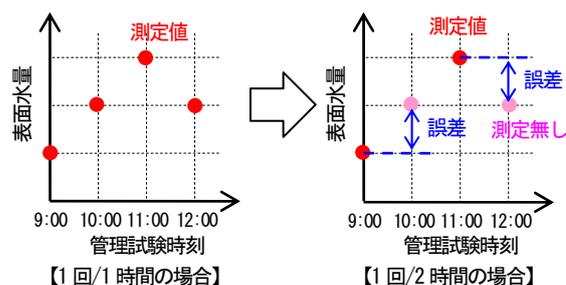


図-5.20 管理頻度低減による表面水量誤差のイメージ

理試験を行っていないため、1回/1時間の管理試験値に対して誤差が生じる。

以上の方法により管理頻度を1回/1時間から1回/2時間・1回/3時間・1回/4時間に低減したと仮定した場合の単位水量の変動について分析した結果を表-5.6に示す。また、細粒側及び平均粒度付近における単位水量のばらつきについて管理試験を行った時間の値を除いた分布(15区間移動平均値)を図-5.21, 22に示す。事実上の最頻と考えられる1回/1時間の管理で125kg/m³の単位水量のCSGが得られると仮定して、推定の単位水量を示している。管理頻度を低減させると、ばらつきが大きくなる傾向がある。また、管理頻度を低減させることでやや単位水量が少なくなる傾向があった。これは施工時間の中では表面水量は乾燥などの要因により変動幅をもって減少する傾向であったことを示している。Aダムでは単位水量が増加するほど強度が低下するため、単位水量の最大値に着目する。管理頻度を低減することで発生する誤差による単位水量の最大値は、平均値に対して標準偏差の3~4倍増加させた値となる。

5.3.4 単位水量変動による強度への影響

単位水量の変動による強度への影響はひし形から想定することができるが、粒度分布によりその影響度合が異なる。先に仮定したように粒度を3区分にわけて、ひし形の単位水量とCSGの強度の関係から、単位水量変動による強度の誤差を推定した。

Aダムの単位セメント量100kg/m³のひし形を図-5.23に示す。管理頻度が構造の安定性に与える影響を検討し、その妥当性を判定するため、単位水量減少による強度増の傾向については考慮せず、強度の低下のみに着目するため、単位水量が管理目標値(125kg/m³)から増加する傾きにより、単位水量-強度の関係を得た。管理試験で

は明確に粗粒側に分布する試験値が無かったため、ここでは細粒側と平均粒度についてのみ用いる。細粒側では単位水量が1kg/m³増えることでCSGの強度が0.15N/mm²(単位水量125kg/m³のひし形の強度に対して2.34%)低下し、同様に平均粒度では0.044N/mm²(単位水量125kg/m³のひし形の強度0.99%)低下する。単位水量の増加に伴う強度低下量の評価精度を上げるためには、設計時に強度試験を実施する単位水量の条件を増加させることが考えられる。

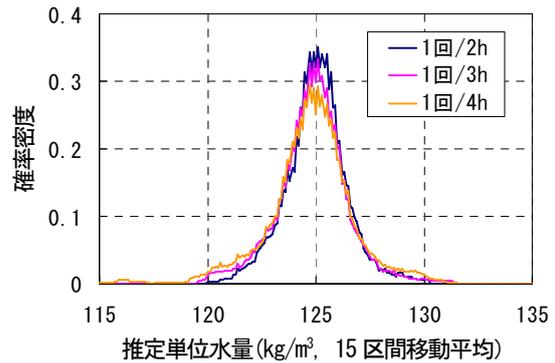


図-5.21 管理頻度による単位水量の誤差(細粒側)

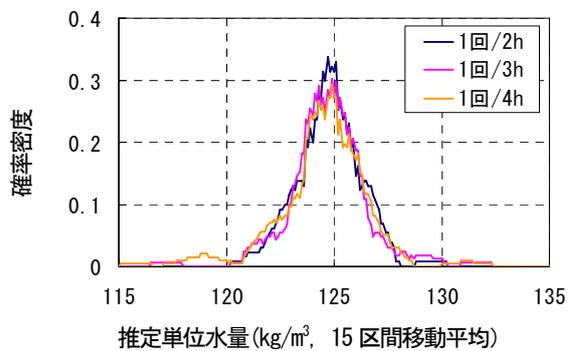


図-5.22 管理頻度による単位水量の誤差(平均粒度付近)

表-5.6 管理頻度による単位水量の誤差

粒度区分	項目	単位水量 (kg/m ³)		
		1回/2時間	1回/3時間	1回/4時間
細粒側	平均値 μ	125.01	124.79	124.71
	標準偏差 σ	1.36	1.76	2.09
	最大値	129.53	130.75	130.75
	最小値	120.71	112.30	112.30
	μ + 3σ	129.10	130.07	130.98
	μ + 4σ	130.47	131.83	133.07
平均粒度付近	平均値 μ	124.76	124.75	124.46
	標準偏差 σ	1.45	1.81	2.13
	最大値	129.52	131.59	131.59
	最小値	120.88	117.22	115.79
	μ + 3σ	129.11	130.18	130.87
	μ + 4σ	130.56	131.99	133.00

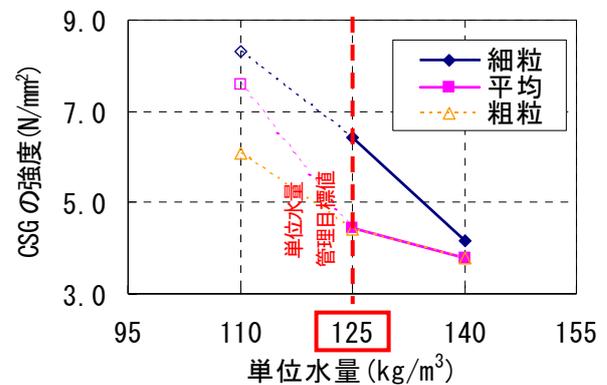


図-5.23 Aダムのひし形(単位セメント量100kg/m³)

上述の単位水量と CSG の強度の関係をを用いて、表-5.6 に示した管理頻度による単位水量の誤差（最大値、 $\mu+4\sigma$ ）から算定した管理頻度と CSG の強度低下率の関係を 図-5.24 に示す。単位水量の最大値は平均値に対して標準偏差の3~4倍増加させた値であるため、ここでは最大値で強度低下率を算定するよりも安全側となる標準偏差の4倍を考慮した。単位水量の最大値を用いて強度低下率を計算した場合、管理頻度を1回/3時間にした場合と1回/4時間にした場合で同じ値であるが、実際には管理頻度を低下するほど単位水量の誤差は大きくなると考えられる。誤差をどの程度の確率まで見込むべきかについては、得られた試験値とデータ数を考慮する必要がある。

5.3.5 管理頻度の妥当性判定

前項までに示した粒度区分ごとの施工 CSG 強度および管理頻度低減による強度低下率から、管理頻度低減 CSG 強度を推定した。結果を表-5.7 に示す。同表では、想定される誤差について試験値から得られた CSG の強度の最小値及び単位水量誤差の最大値をそのまま用いた場合と標準偏差に係数を設定した場合について示した。施工 CSG 強度を $\mu-2\sigma$ とし、単位水量誤差については $\mu+4\sigma$ とすることで試験値から得られた値をそのまま用いるよりも安全側となる。

図-5.25, 26 には強度と単位水量誤差について標準偏差から設定した場合の管理頻度低減 CSG 強度の値を示す。A ダムの単位セメント量 100kg/m^3 の配合条件における必要 CSG 強度は 3.1N/mm^2 であり、細粒側の粒度分布では管理試験頻度を1回/2時間にしても、必要 CSG 強度を下回らないが、1回/3時間にすると、管理頻度低減を考慮した CSG 強度は必要 CSG 強度を下回る。よって、この場合は1回/2時間まで管理頻度を低減できると考えられる。また、平均粒径については管理頻度を1回/4時間にしても必要 CSG 強度を満たす結果となった。平均粒度

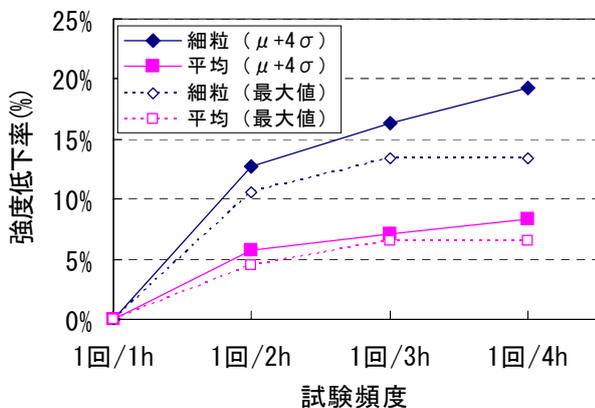


図-5.24 管理試験頻度による CSG 強度の誤差

付近の粒度分布が頻出する場合には管理頻度をより低減できる可能性がある。

以上、管理頻度と強度の関係から、品質管理頻度の妥当性を判定した。現状の管理頻度における CSG の強度の最小値の設定条件、及び管理頻度による単位水量誤差の設定条件により異なる結果となるが、試験値に対して安全側となるように誤差を考慮した場合でも管理頻度を1回/1時間から1回/2時間に低減が可能と考えられる。

5.4 考察

実際に施工された CSG ダム及び構造物の管理試験データにより、粒度分布や表面水量、強度の変動傾向を得た。他にも管理項目として、CSG 材の外観・吸水率・表乾密

表-5.7 管理試験頻度と誤差

粒度区分	施工 CSG 強度設定条件	単位水量設定条件	管理頻度低減 CSG 強度 (N/mm ²)			
			1回/1h	1回/2h	1回/3h	1回/4h
細粒側	管理試験	最大値	4.00	3.58	3.46	3.46
		$\mu+4\sigma$	4.00	3.49	3.36	3.24
	$\mu-2\sigma$	最大値	3.64	3.26	3.15	3.15
		$\mu+4\sigma$	3.64	3.18	3.06	2.95
平均粒度付近	管理試験	最大値	4.30	4.11	4.02	4.02
		$\mu+4\sigma$	4.30	4.06	4.00	3.96
	$\mu-2\sigma$	最大値	4.25	4.06	3.98	3.98
		$\mu+4\sigma$	4.25	4.02	3.96	3.92

※ハッチングした値を図-5.25, 26 に示す。

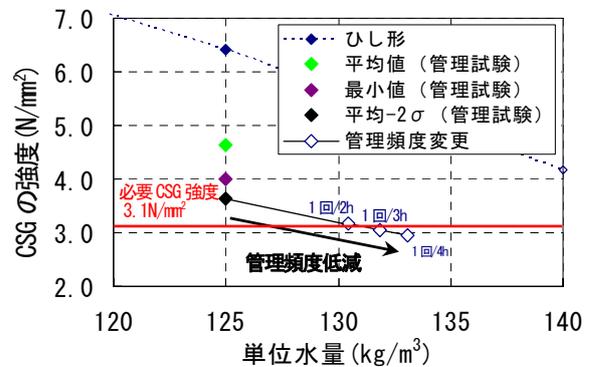


図-5.25 管理試験頻度と誤差の関係（細粒側）

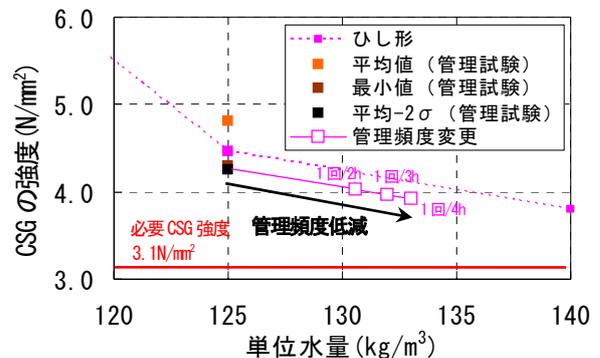


図-5.26 管理試験頻度と誤差の関係（平均粒度付近）

度、CSG の現場密度などの管理項目があるが、本検討では管理頻度に対して定量的な判定が可能と考える項目について述べた。4 ダムでは想定した粒度範囲内の CSG 材が得られており、強度のばらつきについてもセメント配合・材齢条件によってはコンクリートダムにおけるコンクリート強度の変動と同程度の安定した強度が得られている。「台形 CSG ダム 施工・品質管理技術資料」⁹⁾に基づき、近年実施された台形 CSG ダムの CSG 材の品質管理を方法は非常に安全側であり、さらなる設計や施工の合理化が可能と考えられる。

品質管理の合理化のため、管理頻度が強度低下に与える影響からその妥当性を判定する方法を提案し、A ダムの単位セメント量 $100\text{kg}/\text{m}^3$ の配合条件による管理試験値から管理試験頻度の妥当性を判定した。妥当となる管理頻度は個別ダムにおける CSG 材のばらつきや必要 CSG 強度等の条件により異なる。ひし形の作成時には粒度は 3 種類で行うことを基本としているが、C ダムのひし形(図-5.4)のように、ダムによっては単位水量の変化により粒度と強度の大小関係が逆転していることもあるため、このような CSG に対して同様に管理頻度の妥当性を判定する際には、更に細かく粒度分布と強度の関係を把握する必要があると考えられる。また、管理頻度を低減しても必要 CSG 強度を確保できることを確認できた場合でも、施工日の前に実施する管理試験により CSG 材に大きな材質変化が確認された場合や、気候条件の変化により表面水量の変動が大きくなることを見込まれる場合には、管理頻度を元に戻すなどの対応が必要となる。

6. まとめ

本研究では、台形 CSG ダムの長期信頼性を確保するための CSG 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、繰返し載荷試験やクリープ試験を行い、CSG の特性を評価した上で構造への影響を検討した。また、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による FEM 解析を行い、重力式コンクリートダム(台形 CSG ダムを含む)の材料物性のばらつきが堤体安定性に与える影響を評価し、ばらつきを考慮した重力式ダムの設計方法を提案した。さらに、実際に施工された CSG ダムの CSG の管理試験データを分析し、合理的な品質管理を行うために品質管理の妥当性を評価する方法を提案した。

(1) CSG の長期信頼性

繰返し載荷試験では、粘性の微粒分を加えることで CSG を想定した試験体により、配合条件や材齢、載荷応

力の異なるケースについて試験を実施した。CSG を想定した試験体は粘性の微粒分を加えない試験体に比べて繰返しによる残留ひずみが大きくなる結果となったが、台形ダムでは発生する応力が重力式ダム形状よりも小さく、実際のダムの貯水位変動による応力変動程度では構造に影響を及ぼす変形は生じないと考えられる。

クリープ試験では、繰返し載荷試験同様の試験体配合や材齢の条件の他、実際に CSG ダムで使用された CSG 材による試験体により、試験を実施した。CSG のクリープは、粘性の微粒分を加えない試験体に比べて約 3~4 倍程度大きい。堤体内に放流管(コンクリート構造物)を設置することを想定した FEM モデル解析では、クリープにより放流管部では CSG 部との境界付近に応力が集中するが、破壊に至るような影響は無いことを確認した。

CSG を想定した試験体による繰返し載荷試験とクリープ試験により CSG は長期信頼性を有しており、安全性を確認することができたが、CSG は個別ダムによりその性質が異なる。このため、実際のダムでは CSG 材の物性や配合を考慮し、必要に応じて同様の試験の実施や解析による検討を行うことで、個別ダムにおける CSG の長期信頼性を確認することも必要と考えられる。

(2) 物性のばらつきを考慮した重力式ダムの設計

物性のばらつきを考慮したモンテカルロ法による応力解析では、弾性係数を強度との相関から設定した場合に、現行の台形 CSG ダムの設計手法は、ばらつきを有する材料を台形ダムに用いる場合は十分に安全側であることを明らかにした。また、直角三角形ダムは台形ダムと比べてばらつきに対する安全性が低く、特に堤敷上流端付近に圧縮及び引張の応力が集中することで、現行の台形 CSG ダムの設計手法と最小局所安全率がほぼ同等に評価される。そのため、CSG のように品質のばらつきが大きい材料を用いる場合には、台形形状のように応力が集中しにくく、引張を極力発生させない形状とした方が、強度等の物性のばらつきに対する安全性を確保できる。材料のばらつきを考慮した重力式ダムの設計方法として、強度や弾性係数を評価し、本研究で示したようなモンテカルロ法による堤体応力解析を行い、所要の安全率を評価する方法を提案した。

(3) CSG の品質管理

実際に施工された CSG ダムの品質管理データによれば、「台形 CSG ダム施工・品質管理技術資料」⁹⁾に基づいた現行の品質管理方法により、台形 CSG ダムおよび CSG 構造物では十分な品質の CSG が施工されており、施工され

た CSG の強度はコンクリートダムより若干ばらつきが大きい程度である。よって、さらに合理的な品質管理方法を採用することが可能であると考えられる。また、品質管理方法だけで対応する事が効率的・効果的でない場合は、配合設計の変更を念頭に置く必要がある。本研究では、品質管理データを用いて CSG の強度や CSG 材の粒度分布、表面水量に着目して、施工管理頻度を低減することによる CSG の単位水量の誤差から強度への影響を評価することで、合理的な管理頻度を設定する方法を提案した。

CSG はその品質が採取場所により大きく異なり、また同じ採取場所のなかでも品質のばらつきを有することから、個別ダムにおける設計・施工では CSG 母材の粒度分布（特に CSG の品質への影響が大きいと考えられる微粒分含有量）や吸水率等の品質、及びそのばらつきを十分に把握する必要があるが、本研究で明らかになった、CSG の長期信頼性に対する知見や材料のばらつきを考慮した構造安定性の評価手法を踏まえ、さらなる設計・施工管理の合理化が期待される。

参考文献

- 1) 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
- 2) 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.
- 3) 鷺津久一郎, 宮本博, 山田嘉昭, 山本善之, 川井忠彦共著:有限要素法ハンドブック, p218, 1983. 1
- 4) 2007 年制定コンクリート標準示方書 [設計編], p44, 2008. 3
- 5) 君島弘次:ダムコンクリートのクリープの基礎的研究とその応用について, 土木学会論文集第 72 号, pp. 23-30, 1961. 1
- 6) 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), 2005. 3
- 7) 建設省河川局開発課監修:フィルダムの耐震設計 (案), (財) 国土開発技術研究センター, 1991. 6
- 8) 2007 年制定コンクリート標準仕法書 [ダムコンクリート編], p97, 2008. 3
- 9) 台形 CSG ダム施工・品質管理技術資料, ダム技術センター発行, 2007. 9
- 10) (財) ダム技術センター:多目的ダムの建設 第 5 巻 設計 II 編, pp. 21-28, 2005. 6

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

Budget : Grants for operating expenses

General account

Research Period : FY2006-2010

Research Team : Dam and Appurtenant Structures
Research Team, Hydraulic
Engineering Research Group

Author : YAMAGUCHI Yoshikazu

IWASHITA Tomoya

KIRINASHIZAWA Toru

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 study, we conducted cyclic loading tests and creep tests for CSG to precisely evaluate the strength and deformation characteristics of CSG. Furthermore, we carried out the numerical stress analysis of gravity dams including trapezoid-shaped CSG dams to establish an advanced design method, considering the dispersion of strength distribution of the CSG material by the Monte Carlo method. In addition, we analyzed the results of quality control tests for a CSG structure construction to establish an advanced quality control method.

Key words : CSG (Cemented Sand and Gravel), Creep Test, Cyclic Loading Test, Quality Control, Monte Carlo method.