

新形式ダムを可能にした CSG工法の特徴とその展開

(土研新技術ショーケース2015in静岡)

平成27年12月18日(金)

(静岡市民文化会館)

(国研)土木研究所 地質研究監

山口 嘉一

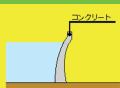
(博士(工学)、技術士(建設部門))

I ダムの型式と設計方法

ダムの型式

(注)ここでいう「ダム」とは、「堤高15m以上の水を貯めるダム」を指す。

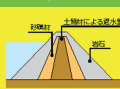
アーチ式コンクリートダム



重力式コンクリートダム



ロックフィルダム



丹波ダム | 東北地方整備局
(丹波ダム管理所ホームページより)



丹波ダム | 四国地方整備局
(丹波ダム管理所ホームページより)



丹波ダム | 九州地方整備局
(丹波ダム管理所ホームページより)



丹波ダム | 関東地方整備局
(丹波ダム管理所ホームページより)



丹波ダム | 水資源機構
(丹波ダム管理所ホームページより)



丹波ダム | 水資源機構
(丹波ダム管理所ホームページより)

ダムの構造(設計)基準

○河川管理施設等構造令

性 格: 河川法第13条第2項に基づく構造基準。法的拘束力のある基準。

内 容: 河川に設置する構造物の安全確保上必要最低限の基準を示したもの。

適用対象: 法河川に設置される全てのダム(河川管理施設であるダムおよび河川法第26条の許可を受けて設置されるダム)新築、改築時だけでなく、維持管理時にも適用される基準。

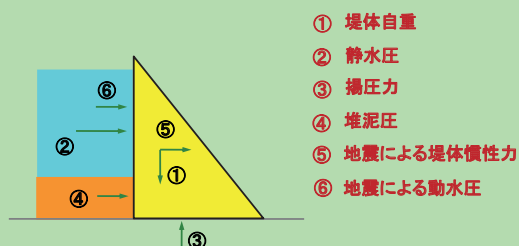
○各種型式のダムの設計方法の取扱い

コンクリートダム・フィルダム: 河川管理施設等構造令により規定。

台形CSGダム: 河川管理施設等構造令73条(適用除外)の「特殊な構造の河川管理施設」として、コンクリートダム及びフィルダムと同等の安全性を有していることについて国土交通大臣による承認を受けて設計(大臣特認制度)

重力式コンクリートダムの設計(震度法)

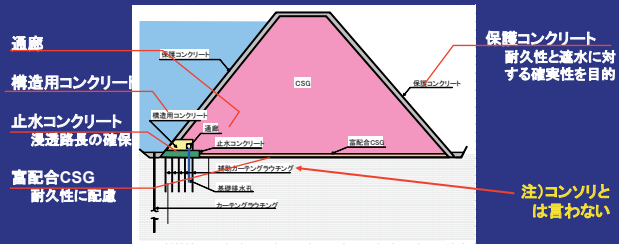
- ・堤体の地震時慣性力: 設計震度 × 堤体自重の水平力
- ・地震時動水圧: Westergaardの式により設計震度を考慮して算出



II 台形CSGダムの概要

1. 台形CSGダムの位置づけ

台形状のダムにCSG工法を適用し、「材料の合理化」、「設計の合理化」、「施工の合理化」という3つの合理化を同時に達成する新しい型式のダム。



CSGを弾性体とみなせる範囲で用いることから、「弾性体として設計」される。このため、コンクリートダムと同様に堤体内に放散設備や通廊を、堤頂部に非常用洪水吐きなどを設置することを可能としている。

台形CSGダム

台形ダム（設計）

- ・所要強度が低い
- ・応力の変動が小さい
- ・安全性が高い

CSG工法（施工）

- ・材料の有効利用
- ・簡易な施工設備
- ・急速施工

台形CSGダム

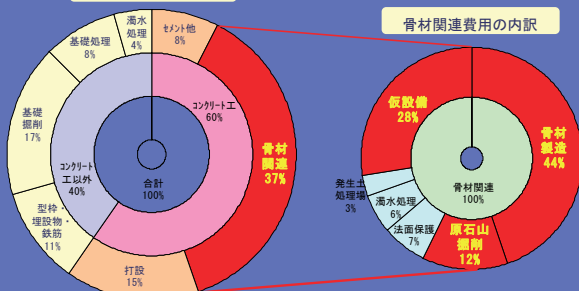
設計の合理化
材料の合理化
施工の合理化

CSG...Cemented Sand and Gravel

台形CSGダム開発の背景

良質な骨材の確保 → 環境影響、コスト増の主因

全体工事費の内訳



直轄重力式コンクリートダム工事費の分析結果

台形CSGダム開発の経緯

CSG工法の適用

- ・長島ダム仮締切（最初にCSG工法を適用（1992））
- ・仮締切、押え盛土工等に適用

台形CSGダムに関する検討

- ・「CSGダム研究会」の発足（1999）
- ・徳首、サンル、本明川について比較検討（2000～2001）
- ・第29回ダム技術会議（2001.5）
（徳首、サンル、本明川を台形CSGダムとして進める）

台形CSGダム理論の構築物への適用

- ・大保ダム沢処理工（2003～2004）、灰塚ダム川井堰堤（2004～2005）、嘉瀬川ダム副ダム（2009～2010）が、台形CSGダムの理論を用いて設計・施工される

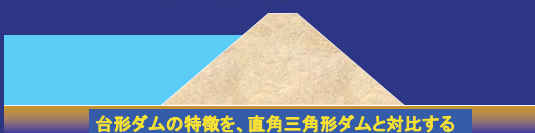
台形CSGダム理論によるダム本体の施工

- ・当別、徳首ダム（完成）、サンル、厚幌ダム（建設中）

台形ダムの特徴

特徴

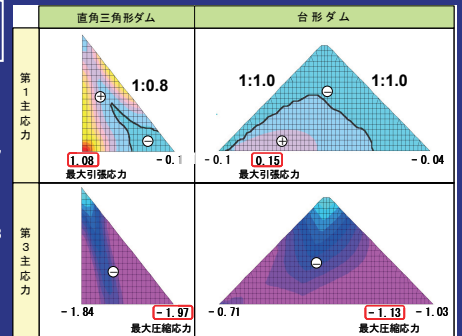
- (1) 発生応力が小さく、所要強度が低い
- (2) 荷重の変化に対し、応力の変動が小さい
- (3) 転倒や滑動に対する安全性が高い



応力と必要強度（内的安定性）

直角三角形ダム
最大引張応力1.08
最大圧縮応力-1.97

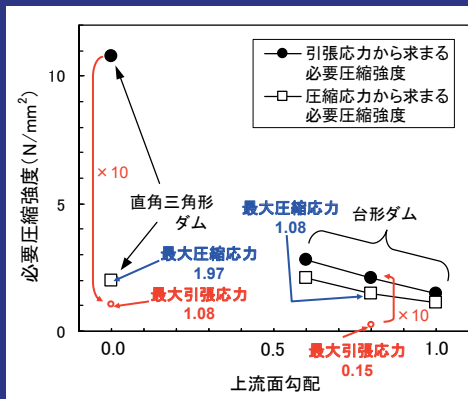
台形ダム
最大引張応力0.15
最大圧縮応力-1.13



計算条件

- ・堤高50m、貯水深45m
- ・堤体の弾性係数(E_c)／基礎岩盤の弾性係数(E_r)=2
- ・自重＋静水圧＋地震時慣性力・動水圧
(地震荷重としては、兵庫県南部地震時に一庫ダムで得られた上下流方向の加速度波形を、最大加速度250galに調整したものをを用いている。)

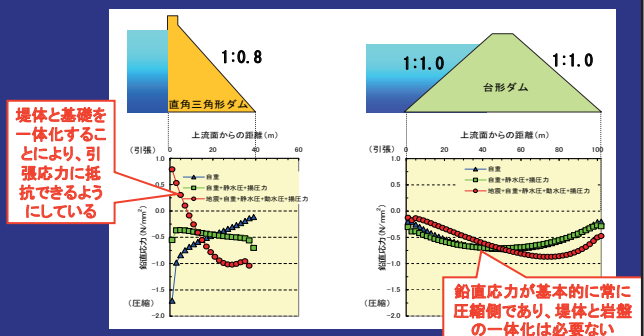
必要強度



※重力式コンクリートダムに用いられる程度のコンクリート強度では、引張強度は圧縮応力の10%程度とされている

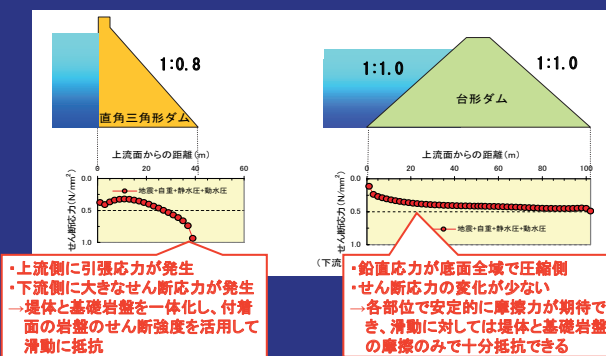
転倒(外的安定性)

直角三角形ダムの転倒防止の条件 (重力式コンクリートダム ミドルサード)
台形CSGダムの転倒防止の条件
 常時、地震時(動的解析)において、底面全域で鉛直応力が基本的に圧縮状態であること(台形CSGダムの必要条件)



滑動(外的安定性)

直角三角形ダムの滑動の安定条件 (重力式コンクリートダム せん断摩擦安全率4)
台形ダムの滑動の安定条件
滑動に対しては堤体と基礎岩盤の摩擦のみで十分抵抗できる



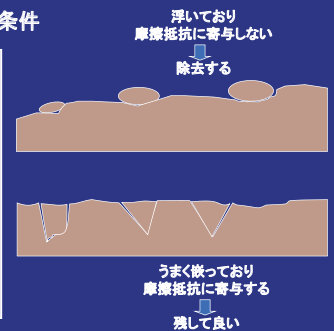
台形ダム設計での基礎岩盤条件

転倒・滑動の条件で、台形ダムが堤
体と岩盤の一体化を必要としない
→基礎岩盤の引張・せん断強度を月
いなくて良い
(…補助カーテングラウチング)
↓
台形ダムの基礎岩盤の条件が緩和
できる

直角三角形ダム

岩盤との一体化を必要としている(…コンソリデーショングラウティング)

岩盤強度を活用することで断面積最小の設計を可能としている



台形CSGダムの設計手順

CSGの材料特性に応じた設計

台形CSGダムは、CSGの材料特性に応じた堤体設計を行う。

←(重力式コンクリートダム)
堤体形状を決定後、必要な材料強度を有するコンクリートを製造する。

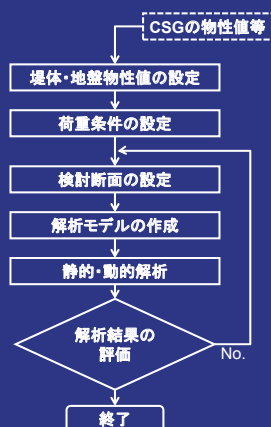
弾性領域の範囲で設計

CSGはコンクリートとロック材の中間の弾塑性的な材料であるが、弾性体として取り扱える範囲で堤体設計を行う。

外的安定性・内的安定性を満足

堤体断面形状を仮定(例:上下流面勾配
1:0.8、天端幅8m)

↓
 所要の安定性を満足しない場合は、堤体
 勾配を変更するなど、断面形状を変更し
 検討を繰り返す



台形CSGダムと重力式コンクリートダムの違い

重力式コンクリートダム

台形CSGダム

- ①堤体積が最小となる設計
(高品質なコンクリート)
- ↓
- ②良質な材料と厳密な施工管理

- ①手近にある材料の強度に
応じた堤体設計
- ↓
- ②簡易な施工設備と急速施工

「設計優先」から「材料優先」へのコペルニクスの転換

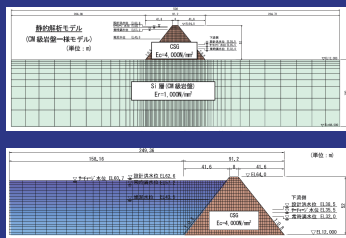
環境保全＋コスト縮減

堤体の応力解析方法

台形CSGダムは新しい型式のダム

↓
新型式に適した設計法の採用

↓
有限要素法と動的解析
(従来のダムは剛体法、円弧すべり)



有限要素法と動的解析を用いることとした理由

- ①基礎岩盤の変形等を考慮可能となり、合理的な解析が可能
- ②堤体内の応力、底面反力等が合理的に求められる
- ③兵庫県南部地震後の委員会で検証に用いられたものと同様の手法であり、他のダム型式との安全性の比較・判定が可能となる
(他型式ダムとの同等ないしはそれ以上の安全性証明は大臣特認の条件)

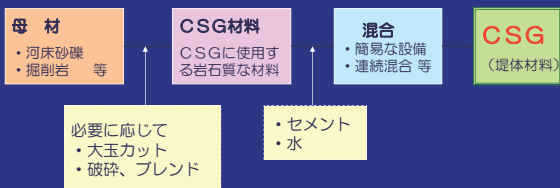
CSG工法（CSGの利用）の特徴

特徴

- (1) ダムサイト周辺の材料を有効活用
- (2) 施工の簡略化と連続打設による急速施工
- (3) 原石山、施工設備の簡素化による環境保全とコスト縮減

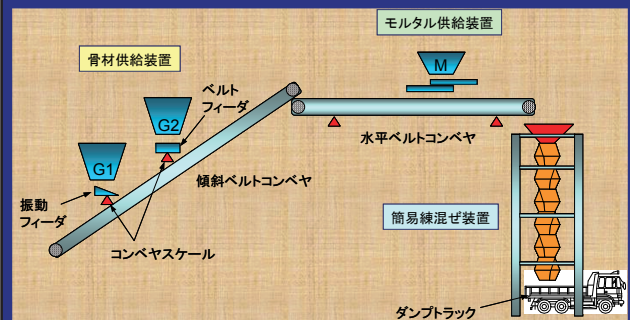
CSG工法の特徴

- (1) 材料の有効活用 → 原石山の規模縮小
環境改変面積縮小
- (2) 施工設備の簡略化と急速施工



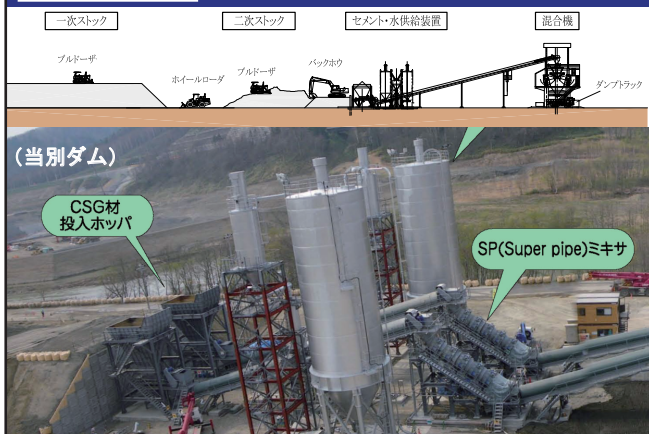
*)コンクリート骨材よりも低品質な材料に極力手を加えず、簡易な混合設備で連続的に製造したCSG材を急速施工することが重要！

簡易な製造設備



簡易混合装置の例

混合設備の例



施工設備の例

- ・面状工法による施工(RCD工法と同様)
- ・汎用機械による施工(ダンプトラック、ブルドーザ、振動ローラ等)
- ・グリーンカットを必要としない
(単位セメント量、単位水量が少なくブリージングが極めて少ない)
- ・100m程度の間隔で横目地を設置する
(重力式コンクリートダム: 15m間隔で横目地を設置)

- ・施工の簡略化、高速化を図ることができる
- ・環境負荷の低減、コスト縮減を可能とする



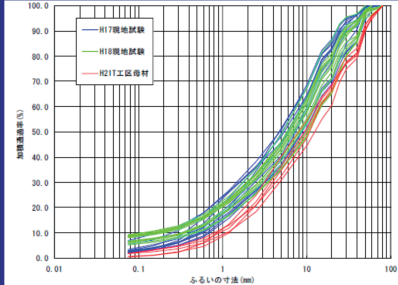
CSGの強度とひし形の決定

ひし形理論

同一採取地の材料であっても粒度が変動する
 粒度が変動するため単位水量を一定に保つことが困難
 →セメント量が一定でもCSGの強度は変動する

粒度範囲の把握

CSG材について多くの
 粒度試験を実施
 ↓
 最粗粒度・最細粒度の
 把握
 ↓
 CSG材の粒度はこの
 範囲に分布



単位水量範囲

単位水量と施工性

- ・水量が少なすぎると、バサついて締まらず、強度が出ない
- ・水量が多すぎると、細粒分が玉状となったり、ミキサの羽根に付着して施工に不向きとなる

観察項目	粒度	単位水量 (kg/m ³)				
		85	95	105	115	125
混合後の CSG 状況	粗 粒 度	○	◎	◎	○	△
	平均粒度	△	◎	◎	◎	○
	細 粒 度	△	◎	◎	◎	○

◎：良好。水分が適度である。
 ○：水分がやや多いが混合は均一である。
 △：水分が少なくバサついている。水分が多く細粒分が玉状になる。

CSG材の自然含水量

河床砂礫では含水量が多く、ある範囲までしか低下しないことがあり、この面から制約を受ける

施工時の管理方法

どの程度の頻度で測定が可能であるかにより、水量の範囲に制約がある

施工性確認試験および標準供試体試験

ポットミキサにより以下の試験を実施

CSGの混合状況及び供試体締固め状況の目視確認による施工性の確認
 粒度・単位水量・単位セメント量をパラメータとした標準供試体でのCSG強度の把握

大型供試体試験の単位水量範囲、単位セメント量を設定

項目	最 大 粒 度				
	W=25kg/m ³	W=30kg/m ³	W=105kg/m ³	W=115kg/m ³	W=125kg/m ³
ミキサ内でのCSG拌合状況					
CSG状態 (目視確認)					
供試体の状況					

ひし形作成の流れ

ダムコンクリートの場合

Φ150mm×H300mmの供試体(40mmウエットスクリーニング)

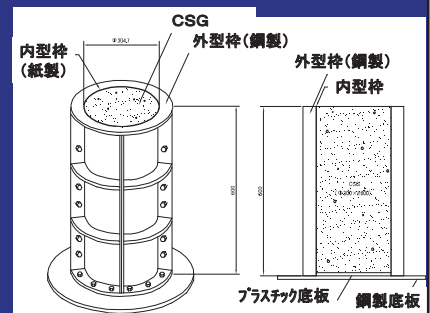
→多くの経験からこの方式が確立している

CSGにおける大型供試体試験の必要性

- ・実施工における転圧エネルギーと同等の締固めエネルギーで作製された大型供試体により「ひし形」を作成
- ・CSGについては経験がない

フルサイズのCSGを用いて試験を行う

最大粒径80mmから、供試体はΦ300mm×H600mmとする



標準供試体

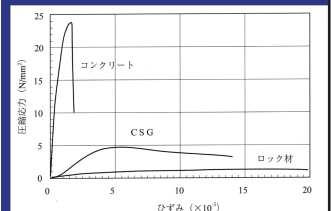
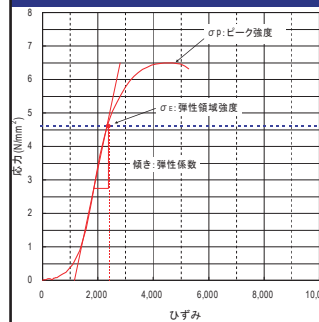


大型供試体



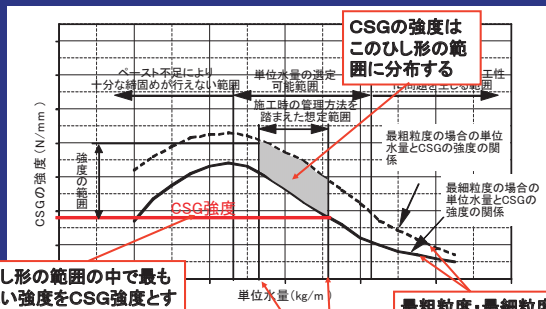
CSGの性質

CSG 弾塑性体の性質を示す
 (コンクリートとロック材の中間的な変形特性を有する)



CSGの強度はコンクリートと異なり、ピーク強度ではなく、強度試験における応力-ひずみ曲線が直線関係を示す区間の最大値を用いることとしている(弾性領域強度)。従って、強度試験時には、常に応力のみならず変形を測定する必要がある。

ひし形理論(Diamond Shape Theory)



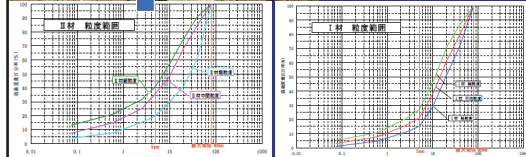
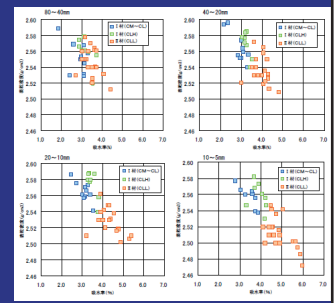
ひし形の範囲の中で最も低い強度をCSG強度とすれば、粒度・単位水量が設定した範囲内にあるCSG材を用いた強度は、それ以上の値が確保されていることとなる

最粗粒度・最細粒度の強度を単位水量ごとにプロットしたもの

単位水量の許容範囲

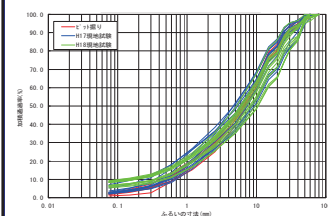
億首ダム(現 金武ダム)

母材は新生代・古第三紀の嘉陽層の砂岩優勢砂岩・粘板岩互層
Ⅰ材とⅡ材の区分



当別ダム

ダムサイト及び貯水池内の河床砂礫
構成岩種は砂岩が主体であり、新鮮堅硬で、風化を受けて軟質化したものはほとんど含まれていない



骨材粒径 (mm)	表乾密度 (g/cm³)	吸水率 (%)	微粉分量 (%)
60-40	2.52 ~ 2.67 (2.60)	1.30 ~ 2.94 (2.12)	0.07 ~ 1.18 (0.63)
40-20	2.58 ~ 2.64 (2.61)	1.87 ~ 2.98 (2.43)	0.11 ~ 1.22 (0.67)
20-10	2.59 ~ 2.63 (2.61)	1.85 ~ 2.55 (2.20)	0.06 ~ 1.26 (0.66)
10-5	2.60 ~ 2.63 (2.62)	1.88 ~ 2.59 (2.24)	0.04 ~ 1.69 (0.87)
5-0	2.50 ~ 2.61 (2.56)	2.71 ~ 5.16 (3.94)	2.28 ~ 20.90 (11.58)

Ⅲ 台形CSGダムの施工実績

億首ダム(現 金武ダム: 沖縄総合事務局)

堤高	39.0m	集水面積	14.6km²
堤頂長	461.5m	湛水面積	0.61km²
非越流部標高	EL.29.0m	総貯水容量	8,560,000m³
竣工年月	H26年2月	有効貯水容量	7,860,000m³

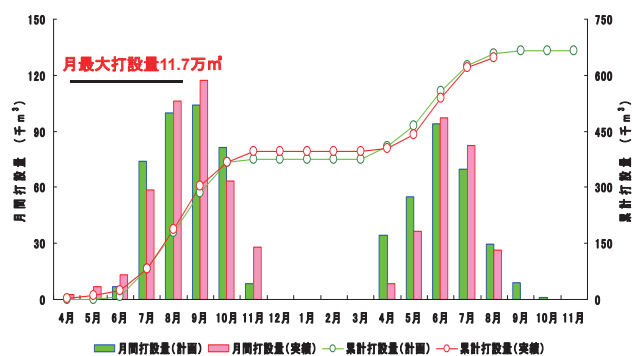


当別ダム(北海道)

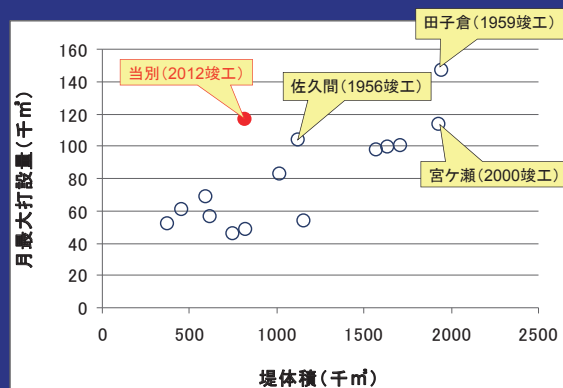
堤高	52.0m	集水面積	231.1km²
堤頂長	432.0m	湛水面積	5.8km²
非越流部標高	EL.64.0m	総貯水容量	74,500,000m³
竣工年月	H24年10月	有効貯水容量	66,500,000m³



当別ダム月別CSG打設量(計画と実績)



重力式コンクリートダムの堤体積と月最大打設量

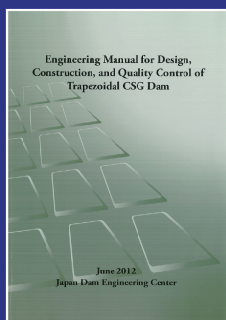


Ⅳ 台形CSGダム及びCSG工法の今後の展望

台形CSGダム及びCSG工法の今後の展開

- ・ 台形CSGダムの建設数の増加・大規模化
- ・ 台形CSGダムに関する技術の海外展開
- ・ CSG工法及びCSG構造物のダム堤体以外への適用
(設計方法は、各種構造物の設計方法も踏まえて対応する)

台形CSGダムに関する技術の海外展開



国際ダム会議のCMD (Cemented Materials Dams) 技術委員会への参画

英文技術資料の作成

エジプトの突発洪水用ダムへの適用に向けた技術協力



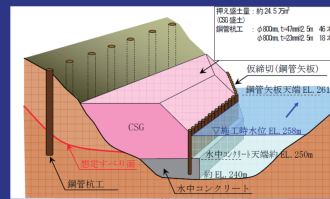
エジプトの洪水調節専用ダムの事例



洪水調節ダム堤体への台形CSGダムの適用が望まれている。



CSG工法の地すべり対策工への適用事例



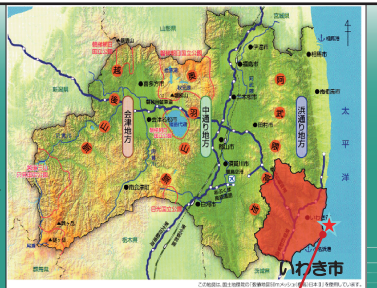
地すべり対策工の押え盛土としてのCSG構造物への適用概念

大滝ダム（近畿地方整備局）
地すべり対策工へのCSG構造物
（永久構造物）の適用

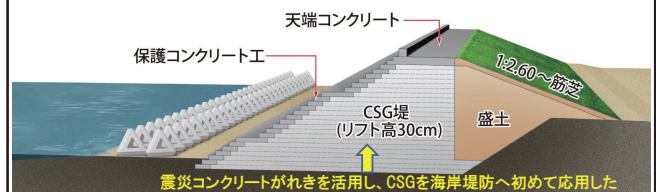


2011年5月：施工中の状況

福島県夏井地区 海岸堤防事業



事業の概要



震災コンクリートがれきを活用し、CSGを海岸堤防へ初めて応用した

諸元

海 岸 名	夏井地区海岸
事 業 名	高潮対策事業
延 長	920m
体 積	60,000m³(うちCSG堤40,000m³)
施 設	海岸堤防(新設)
天 端 標 高	T.P.+7.2m

コンクリートがれきの有効活用



鉄筋・ブロック・レンガ等が混入
→ 分別せずに使用

・福島県いわき市では、津波で被災した住宅基礎等の
コンクリートがれき約50万m³が発生した

一般廃棄物としていわき市が処分に困窮

⇒ 4万m³を堤防材料に有効活用

CSG堤の設計



津波が越流しても倒壊するまでの時間を少しでも長くする
「粘り強い構造」の海岸堤防の構築が必要

⇒ 「災害復旧で嵩上げする建設海岸堤防の考え方」
に基づき従来方式の土堤と同等以上の「粘り強い構造」

[illegible]