

台形 CSG ダム

樋口 淳美

本報告は台形 CSG ダムの概要，設計，施工，品質管理の基本的考え方について紹介するとともに，平成 24 年 6 月に刊行された「台形 CSG ダム設計・施工・品質管理技術資料」の内容について報告するものである。

キーワード：台形 CSG ダム，台形ダム，CSG 工法，台形 CSG ダム設計・施工・品質管理技術資料

1. はじめに

ダムの建設においてはこれまで多くの技術開発がなされてきたが，今日の社会情勢，経済情勢の下で，より一層のコスト縮減と環境保全に配慮した技術開発が望まれている。一方，堤体材料を得るための原石山の地質条件等が厳しくなっており，歩留りの低下，掘削法面の長大化等によるコストの上昇や環境負荷の増大が大きな課題となってきた。このため，“材料の合理化”を図ることができれば，大規模なコスト縮減と環境負荷軽減に資することができる。台形 CSG ダムは，この“材料の合理化”に着目した新しい型式のダムであり，あわせて“設計の合理化”，“施工の合理化”にも資するものである。

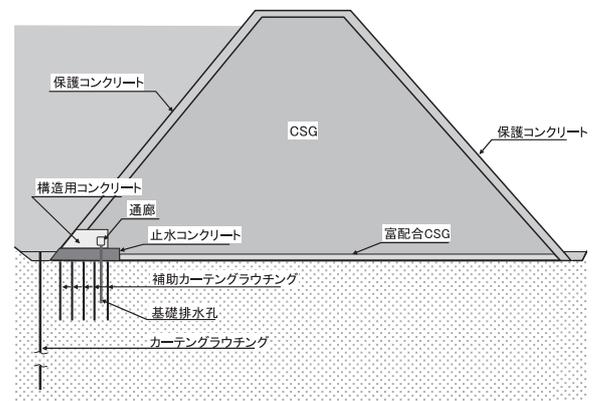
本報告では台形 CSG ダムについて紹介するとともに，平成 24 年 6 月に刊行された「台形 CSG ダム設計・施工・品質管理技術資料」の内容について報告するものである。

2. 台形 CSG ダムの概要

(1) 台形 CSG ダム

図—1 に台形 CSG ダムの標準断面を示す。台形 CSG ダムは，堤体材料として CSG を用い，表面には耐久性の確保を目的とした保護コンクリートを配置する。また，上流面下部に通廊，構造用コンクリートおよび浸透路長の確保のための止水コンクリートを設ける。なお，堤体底面の CSG には，基礎岩盤との密着性および耐久性に配慮して富配合の CSG を用いることとしている。

CSG (Cemented Sand and Gravel) とは建設現場



図—1 台形 CSG ダム標準断面

周辺で手近に得られる材料を，基本的に分級・粒度調整，洗浄を行うことなく，必要に応じてオーバーサイズの除去や破碎を行う程度で，セメント，水を添加し，簡易な施設を用いて混合したものであり，後で述べる強度の定義とその決定法並びに強度管理手法を有するものである。CSG 工法とはこの CSG をブルドーザで敷均し，振動ローラで転圧することによって構造物を造成する工法である。台形 CSG ダムは，3 章で述べる台形ダムと，この CSG 工法の特徴をあわせ持つ新しい型式のダムである。

台形 CSG ダムの大きな特徴は，CSG を弾性体とみなせる応力の範囲で用いることから，「弾性体として設計」されることである。このため，コンクリートダムと同様に堤体内に放流設備や通廊を，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。

(2) 台形 CSG ダムの開発と現状

我が国で最初に CSG 工法を適用した構造物は長島ダム上流仮締切堤である。これ以降，CSG 工法は，

多くの仮締切堤、押え盛土工などに採用され、実績を急速に増やし、大保ダム沢処理工、灰塚ダム川井堰堤、嘉瀬川ダム副ダムについては、ダム本体ではないが、台形CSGダムの理論を用いて設計されている。一方、ダム建設においては、これまで以上にコスト縮減と、環境への配慮が強く求められており、そのためコスト縮減や環境負荷軽減に資するCSG工法が着目され、台形CSGダムを材料、設計、施工の合理化に資する新たなダム型式として捉え、その設計方法の検討が行われた。

これらの検討結果を受けて、平成13年5月に開催された第29回ダム技術会議において、億首ダム、サンルダム、本明川ダムの3ダムを台形CSGダムとして検討を進めることが認められた。また、大保ダム沢処理工および灰塚ダム川井堰堤では、台形CSGダムの設計・施工・品質管理等に関する多くのデータが得られ、これらの結果は「台形CSGダム施工・品質管理技術資料」(平成19年9月)に反映されている。

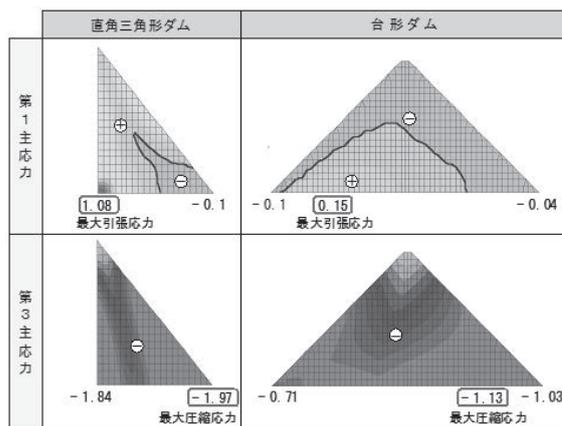
上記3ダムに引き続き、当別ダム、厚幌ダム、三笠ぼんべつダム、鳥海ダムについて検討が進められた。このうち、当別ダムについては補助ダムとして最初に大臣特認の認定を受け、平成20年8月には本体発注を行い、平成24年10月に竣工しており、月間打設量11万7千m³という大量高速施工を実現している。また、億首ダムについては、平成21年3月に本体発注を行い、平成24年9月からは試験湛水を実施中である。

なお、当別ダム、億首ダム、嘉瀬川ダム副ダムの施工実績を踏まえて、台形CSGダムの設計施工全般について再検討を行い、平成24年6月に「台形CSGダム設計・施工・品質管理技術資料」がまとめられており、その概要については5章で記述する。また、ダム本体以外では大滝ダム、浅川ダムで地すべり対策工をCSG工法で実施しているほか、仮締切などの仮設構造物として、CSG工法が多くのダムで適用されている。

3. 台形CSGダムの設計 (台形ダム)

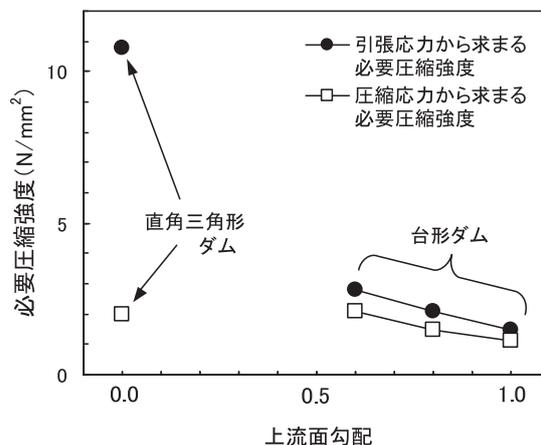
図一2に従来の直角三角形形状のダムと台形形状のダムの自重・静水圧・地震荷重を考慮した場合の最大応力の分布を示す。地震荷重は動的解析により考慮し、その際、兵庫県南部地震時に一庫ダム(水資源機構)で得られた上下流方向の加速度波形を最大加速度250galに調整したものをを用いている。

引張応力の最大値として直角三角形ダムでは1.08 N/mm²、台形ダムでは0.15 N/mm²となっており、



計算条件

- ・ 堤高50 m, 貯水深45 m
- ・ 堤体の弾性係数(Ec)/基礎岩盤の弾性係数(Er)=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。)



図一2 堤体形状と必要圧縮強度

圧縮応力の最大値としては各々1.97 N/mm²、1.13 N/mm²となっている。引張応力については、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、引張強度は圧縮強度の10%程度とされており、この関係を用いると、直角三角形ダムでは1.08 N/mm²の引張強度を確保するために、この値を10倍した10.8 N/mm²の圧縮強度が必要となる。台形ダムでは同様に1.5 N/mm²の圧縮強度が必要となる。つまり、台形ダムは、直角三角形ダムの14%程度の強度でよいことになる。この関係を図一2に併せて示す。(ここでは簡単のため、安全率を1として考えている。)

この図から内的安定性については、直角三角形ダムと比較して台形ダムは、小さな圧縮強度を有する材料でも満足することが分かる。

外的安定性の転倒については、台形ダムはその形状から、擁壁などで想定・検討されるような転倒はあり得ない。台形ダムでは、常時はもちろんのこと、地震

時（動的解析による）においても底面全域で鉛直応力が基本的に圧縮状態であること、これをもって転倒防止の条件としている。この条件は、台形ダムに必要な条件である。

台形ダムは堤敷長が直角三角形ダムに比べて長く、かつ形状が左右対称であることから、せん断応力の変化が少ない。また、上記の転倒の条件から、鉛直応力が堤体底面全域で圧縮側にあり、全面的に摩擦力が期待できるため、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。

4. 台形 CSG ダムの施工

(1) 台形 CSG ダムの施工の概要

台形 CSG ダムに用いられる母材は、掘削ズリなどの現地発生材、河床砂礫、段丘堆積物、風化岩など比較的容易に入手し得る岩石質の原材料である。前章で述べたように台形ダムの必要強度は高くないため、台形 CSG ダム型式の場合、母材に要求される品質もコンクリート骨材と比較して低くてよいことになり、材料の合理化に大きく寄与するものである。CSG 材とは、原材料である母材のオーバーサイズ除去又は破碎を行ったもので、分級・ブレンドなどの粒度調整および洗浄は基本的に行わない。このため、通常のコンクリートダムの建設で必要となる骨材製造設備や濁水処理設備などの大がかりな設備が不要となる。CSG は CSG 材にセメント、水を添加し混合したもので、コンクリートの混合設備より簡易な施設で連続的に混合することとしている。

一般的な CSG の製造工程は図-3 に示すとおりであり、混合された CSG は、RCD 工法などと同様に面状工法により施工され、打設に用いる機械は、通常のダム工事で用いられるダンプトラック、ブルドーザ、振動ローラなどの汎用機械である。CSG は単位セメ

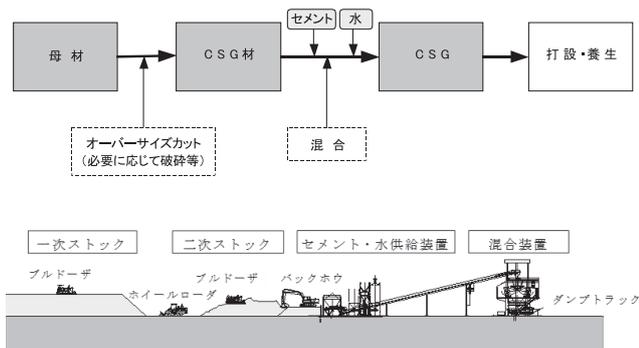


図-3 CSG の製造工程

ント量、単位水量が少なくブリージングが極めて少ないことから（単位セメント量 80 kg/m^3 程度以下を想定）打設時のグリーンカットを必要とせず、また横縦目の間隔も大きくしており、施工の簡略化、高速化を図ることができる。

このように、台形 CSG ダムは手近に得られる材料を有効に用い、粒度調整、洗浄を行うことなく簡易な設備、汎用機械で施工するため、施工の簡略化、環境への影響低減、コスト縮減、高速施工を可能とするものである。

(2) 台形 CSG ダムの品質管理

CSG の母材は、分級・粒度調整は基本的に行わないことから、粒度は同一採取地の材料であっても当然変動する。また、粒度が変動するため、単位水量を一定に保つことも困難となる。このため、以下の手順により CSG の強度を設定し、品質管理を行うこととしている。

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 材の最も粗い粒度と最も細かい粒度を把握し、この粒度について強度試験を行う。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設定して試験することで、単位水量の影響を把握することとし、図-4 に示すように、粒度を変数とした単位水量—CSG の強度線が得られる。

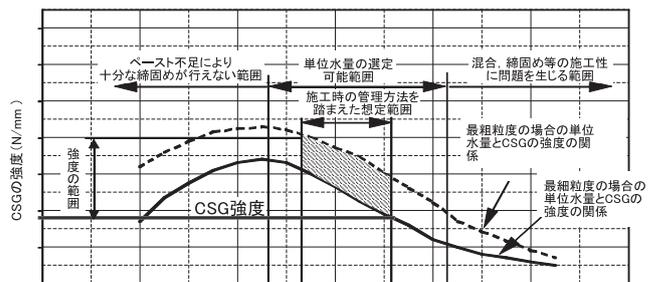


図-4 「ひし形」理論

単位水量に関しては、水量が少なくなると明らかに水不足で強度が発現しない状況が現れ、また、多すぎると混合時にミキサの羽根などに付着が著しく、実際の施工に不向きとなる現象が現れる。これは、単位水量に選定可能範囲—許容範囲—が存在することを示すものであり、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（図-4 の斜線部分）に分布する。この「ひし形」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。これを「ひし形」理論 (Diamond Shape Theory)”と呼んでいる。

次に、試験施工によって必要な転圧回数を決定し、決定した転圧回数での CSG の現場締固と同等のエネルギーによって締固められた室内大型供試体強度から得られるひし形を作成し、これにより CSG 強度が決定される。したがって現場においては、振動ローラの転圧回数で品質管理が行われる。

5. 台形 CSG ダム設計・施工・品質管理技術資料

本格的な台形 CSG ダムとして、当別ダム、億首ダム、嘉瀬川ダム副ダムの本体工事が実施され、これらのダムの試験、設計、施工、品質管理の各分野で得られた知見を整理分析し、現時点での台形 CSG ダムに関する技術水準を示す資料として「台形 CSG ダム設計・施工・品質管理技術資料」がまとめられた。以下、その主要な点について説明を加える。

(1) 台形 CSG ダムの設計

台形 CSG ダムの設計に関しては、有限要素法を用いた動的設計が行われるが、その設計の手法について整理した結果を記述するとともに、外的安全性 (滑動) 及び内的安定性の安全率の考え方についての整理を行っている。設計地震時 (フィルダムの耐震設計指針 (案) [修正震度法] のダム底面位置での設計地盤震度を入力地震動の最大加速度とする) については安全率 1.5、検証地震時 (最大加速度 250 gal) は 1.2 としており、常時 (非地震時) の安全率は 2.0 としている。なお、外的安定性 (転倒) については、3 章でも述べたように、地震時 (動的解析による) においても底面全域で鉛直応力が基本的に圧縮状態であることが条件である。

細部形状について、施工結果を受けて設計へのフィードバックが行われている。例えば、CSG の左右岸アバット部は、温度応力によるダム軸方向の引張応力が発生しやすいため、これまでも左右岸アバット部付近に横目地を設けることとしていたが、河床部においても、ひび割れ予防のため、ダム軸方向長 100 m 程度の間隔で横目地を設けることとした。

このほか、堤体の細部形状 (保護コンクリート厚、継目の止水構造等) について、施工結果を踏まえて必要な形状を定めた。また、端部法面構造については図

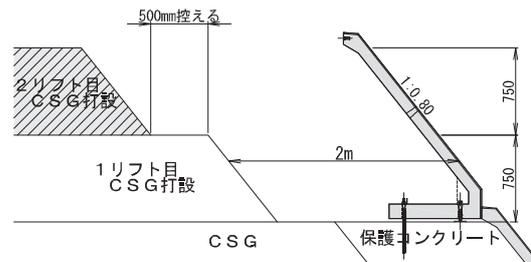


図-5 端部法面形状

一5に示すように、施工の際に法肩からの CSG のこぼれ落ちによる清掃作業が極力少なくなるように配慮する必要性から、2層目の端部を 50 cm 引いた位置とするなど、施工性を考慮して形状を定めた。

(2) 材料の調査および CSG の試験

台形 CSG ダムにおける合理化の主要部分は「材料の合理化」であり、母材が設計、施工に及ぼす影響が大きい。そのため、母材採取地の適切な選定、母材の調査が重要である。ここでは、母材採取地の調査、母材の調査、CSG 材の試験及び室内供試体試験について記述している。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の値を用いることとしている。したがって、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という特徴があり、これらの試験方法についても記述を加えた。

(3) 試験施工

CSG の試験施工は、実際に使用する CSG 材を用いて、実機による現地試験を行うことで施工性を確認するとともに、本体工事における施工仕様 (転圧回数) の決定および「ひし形」を決定することを目的として実施するものであり、これに加えて、打継面処理方法、転圧開始までの許容時間等の施工仕様、必要な品質管理項目や頻度および材料ストックの方法に関する検討等を行うものである。ここでは、従来からの知見に加えて、混合機として簡易な自走式土質改良機を用いた例を紹介するなど、記述の充実を図っている。

(4) 確認試験

確認試験は本体工事着手に先立って、実際に使用する材料および施工設備を用いて、基本事項の確認、CSG の細部施工仕様の決定、CSG の施工技術の習熟を図ることを目的に実施されるものである。特に、CSG 混合装置の性能確認は実施工で使用される CSG 混合装置が、「ひし形」作成に用いられた傾胴型ミキサ

(ポットミキサ)と同等以上の混合性能を有することを確認するものであり、試験の結果、実機の混合設備によるCSGの強度がポットミキサによる強度より小さい場合(実機の混合性能がポットミキサより劣る場合)には、単位セメント量を増やすか、混合装置を再検討することを検討する必要がある。確認試験については、当別ダム、億首ダム、嘉瀬川ダム副ダムにおける実施結果を受けてまとめられたものである。

(5) 品質管理

台形CSGダムの品質管理は①粒度・単位水量が設定した幅の中にあることを確認する材料管理、②その密度・吸水率が変化するCSG材の変化を事前に把握し、「ひし形」に影響するか否かを判断し、遅滞なく材質変化に伴う「ひし形」の再構築を行う材料品質管理、③振動ローラの転圧回数管理から構成される。また、強度の変動傾向、すなわちCSG材の品質の変動傾向、管理システムのトラブル等を把握するために現場における密度測定、供試体強度試験も実施され、供試体強度も、できれば7日強度程度の早期材齢の強度を用いることが望ましいとされている。ここでは、3ダムでのこれらの品質管理の例が示されており、「ひし形」の再構築を行った例も示されている。

品質管理のための手法(品質管理のフロー、品質管理のための試験方法等)についても、3ダムの施工例をもとに取りまとめを行っているが、粒度や含水量の測定について、さらに合理的な試験方法の開発の試みもなされている。また、ICTによる施工管理を含めた管理の合理化についても試行されており、今後のさらなる合理化が望まれる。

(6) 施工

台形CSGダムの施工は、CSG打設、保護コンクリート打設、型枠設置が、それぞれ異なった場所で独立して互いの干渉なく実施することを基本としており、2層(15m)を4日間で施工することが行われている。CSGの運搬方法、堤体への進入部分の工夫等も行われており、これら各ダムでの施工例が紹介されている。また、材料採取に関しては、特に細粒分の多い河床砂礫を、地下水位以下から採取する場合の水切り方法について、当別ダムの例を基に記述されている。

基礎掘削については、岩盤の噛み合わせ(摩擦抵抗)が十分に期待できるよう適切に施工する必要がある、各現場における岩盤性状に応じて掘削や岩盤清掃の仕様を設定する必要がある。このため、掘削仕様について現地試験を行って決定した例が示されている。

打継面の処理については、広い範囲を施工する必要性から、清掃車を用いた打設面の清掃が行われている。また、セメントペーストの散布のための散布車の工夫なども行われている。さらに、CSG打設後の養生方法や、積雪寒冷地における越冬面の保護及び越冬後の処理について記述されている。

保護コンクリートの打設に先行してCSGの打設が行われるため、端部法面の施工方法に工夫が必要であり、その施工手順については図-5に示したとおりであるが、端部については振動ローラによる転圧ができないため、専用の締固め機械等が開発されている。

このほか、プレキャスト型枠、横断構造物、構造物周辺の施工、コンクリート部のチップング、モルタル塗布、洪水吐き及び取水設備の施工等について記述が加えられている。

6. おわりに

当別ダム、億首ダム、嘉瀬川ダム副ダムの実施により、設計・施工・品質管理において貴重な知見が得られたが、台形CSGダムに関する技術は発展途上の技術であり、今後さらに検討が必要となる。したがって、ここで紹介した「台形CSGダム設計・施工・品質管理技術資料」についても、現時点での最新情報を基に作成されたものであるが、あくまで現時点での評価であることから、今後の台形CSGダムの検討は、更なる進化を目指して進んでいく必要がある。

JCMA

[筆者紹介]

樋口 淳美(ひぐち あつよし)
財団法人ダム技術センター
首席参事役

