

億首ダム本体設計 及び施工計画について

上原 功¹・大木 鉄夫²

¹北部ダム事務所 開発調査課 (〒905-8501 沖縄県名護市大北三丁目19番8号)

²北部ダム事務所 開発調査課 (〒905-8501 沖縄県名護市大北三丁目19番8号)

沖縄本島北部の金武町で建設中の億首ダムは、沖縄東部河川総合開発事業の一環として、沖縄県企業局所管の金武ダム（水道専用ダム）を、洪水調節・既得用水や下流河川流量の安定化・水道用水及び灌漑用水の供給を目的とした特定多目的ダムとして再開発する事業である。

億首ダムのダム型式については、地質条件やコスト縮減等の観点からダム本堤で先駆的な「台形CSGダム」を採用している。

今回は、億首ダム本体に関する設計及び施工計画の概要について紹介する。

キーワード 億首ダム,台形CSGダム

1. 事業の概要

億首ダムが建設される金武町は、沖縄本島のほぼ中央部、東海岸側に位置し、町土面積の約6割は米軍基地に占められており、億首川は、標高150m前後の山地を源流とし、町内の集落を経て、太平洋に流下する流域面積約16.4Km²、流路延長約8kmの河川で、そこに建設される億首ダムの建設事業地もまた、在沖米軍基地施設用地として提供されており、平成18年度の日米合同委員会において、ダム用地の返還が正式に決定されている。

億首ダム建設事業は、沖縄東部河川総合開発事業（億首ダム、漢那ダム）の一環として、既設の水道用水専用の金武ダムを再開発する事業であり、この金武ダムは、総貯水容量約82万m³、堤高13mのアースダム

で、昭和36年に米軍海兵隊が建設し、昭和43年には、琉球列島米国民政府が設立した琉球水道公社に管理・運営が移管された後、昭和47年の沖縄県の本土復帰に伴い県に移管され、現在は、沖縄県企業局が管理を行っているところである。

再開発される億首ダムは、平成5年度に事業に着手し、これまで、用地買収、工事用道路等の整備を実施し、本年度から本体工事に着手している。

事業の目的としては、億首川の洪水調節、既得用水及び河川流量の安定化、並びに特定かんがい用水の確保、沖縄本島の水道用水を供給するもので、高さ39m、堤体積32万m³、総貯水容量約856万m³の多目的ダムとして建設されるものである。



図-1 位置図および沖縄東部河川総合開発事業の経緯

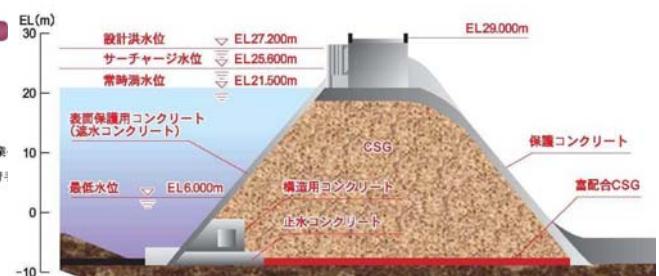


図-2 億首ダム諸元

2. 億首ダムの地質

沖縄本島の地質は、北から本部累帯、国頭累帯、島尻類帶に区分され、億首ダム周辺の地質は、国頭累帯に位置しており、砂岩粘板岩互層が卓越する古第三紀

の嘉陽層を基盤岩とし、これを覆って第四紀更新世の琉球層群及び第四紀完新世の未固結堆積物が分布している。ダムサイトの地質の課題として、右岸側の嘉陽層に深部まで風化の影響を受けた「脆弱部」が存在する。



図-3 地質断面図

3. 億首ダムにおける台形CSGダム採用の考え方

億首ダムの建設においては、地形的条件等から既設金武ダムの下流に建設する必要があり、また、ダムサイト近傍には水道用水の導水管が敷設されていることや、県道が近接しているため、これらに影響を及ぼさないことなどの厳しい制約条件のもとで、ダム軸を選定することが要求された。また、地形、地質上の課題として、ダムサイト右岸側に地中深部まで風化の影響を受けた脆弱部が確認されたため、重力式コンクリートダムを採用した場合には、特殊な基礎処理対策が必要なこと、さらには、堤体に使用する良質なコンクリート骨材を確保するための原石山候補地は、いずれも風化が深部に及び良質な骨材の入手が困難であることが、ダムを建設する上で大きな課題となった。

これらの制約条件や技術的課題等を解決するために、材料の有効活用、経済性の向上、施工の合理化、環境への負荷軽減等の観点から総合的に検討を行った結果、当ダムでは、それらに対応できる新しいダム形式である台形CSGダムを本体に採用することとした。この台形CSGダムについては、河川管理施設等構造令に規定されていない新しいダム形式であることから、平成14年6月に全国で初めて国土交通大臣の特認を受けた。

4. 億首ダム堤体設計概要

(1) 台形CSGダムとは

CSG工法とはセメントで固めた砂礫のこと (Cemented Sand Gravel) で、現場周辺で手近に得られる材料に極力手を加えず (分級・粒度調整・洗浄を基本的に行わない)、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る。

図-4に台形CSGダムの標準断面を示す。台形CSGダムは、表面には耐久性と遮水に対する確実性を目

的とした保護コンクリートを配置し、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。また、堤体底面のCSGは、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の性質として大きな特徴はCSGが「弾性体として設計」されることである。CSGの設計においては、弾性領域範囲内の最大値を「CSGの強度」とし、弾性体として設計を行うため、億首ダムではコンクリートダムと同様に堤体内に放流設備や通廊、堤頂部に洪水吐き等の設置が可能である。これは、塑性体として設計されるフィルダムとの大きな相違である(図-4-1)。

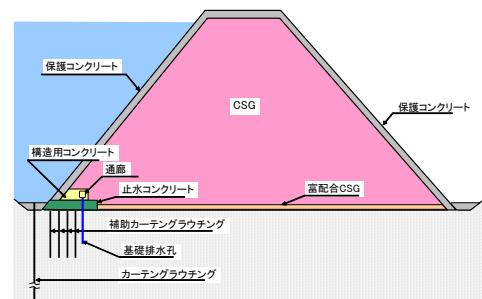


図-4 台形CSGダムの標準断面図

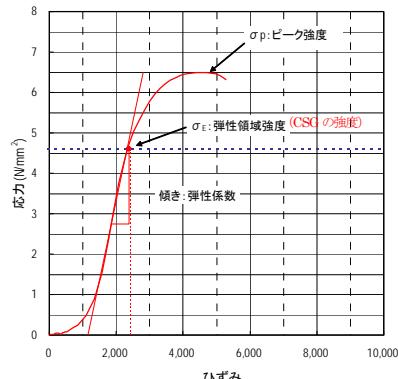


図-4-1 CSG供試体の応力ひずみ曲線例

(2) 台形CSGダムの堤体設計

台形ダムは、従来の直角三角形ダムと比較して内的・外的安定性に以下の特徴がある

(a) 応力 (内的安定性)

比較事例として図-5 の左側が直角三角形ダム、右側に台形ダムの動的解析の応力分布を示す。直角三角形ダムでは、引張応力の最大値として 1.08 N/mm^2 に対し、台形ダムは、その約 $1/10$ の 0.15 N/mm^2 の値が示される。このような応力分布になる理由は、図-6 の堤体変形図に示すように、直角三角形ダムは地震時に「曲げ変形」で挙動し、台形ダムは「せん断変形」で挙動する形状的特性があるからである。

億首ダムの内的安定性については、各種ケースで解析を行った結果、堤体中央部に発生する引張応力から定まり 3.5 N/mm^2 の値となる（図-7）。この値は「必要CSG強度」と呼び、後述する「ひし形」はこの値以上の範囲で設定される。

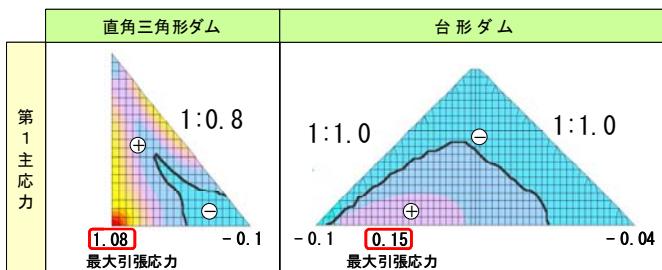


図-5 堤体内応力分布の例

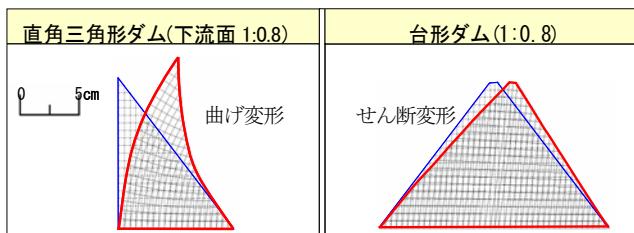


図-6 堤体変形図の例

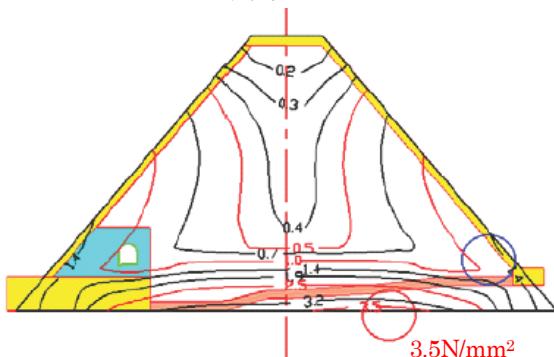


図-7 億首ダムCSG必要強度コンター図

(b) 転倒 (外的安定性)

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形状である。台形ダム

では、底面全域で鉛直応力が基本的に圧縮状態であることが必要条件となっている。一方、直角三角形ダムでは、堤体と基礎を一体化することによりこの引張応力に抵抗できるようにしている。このため、台形ダムでは、前述した必要条件により、堤体と岩盤の一体化は必要ではなく、これが直角三角形ダムとの大きな相違である。図-8 に直角三角形ダムと台形ダムの堤敷に作用する鉛直応力分布を示す。

億首ダムにおいても全ての条件において堤体底面の鉛直応力は圧縮側となっており転倒の安定性は確保されている。

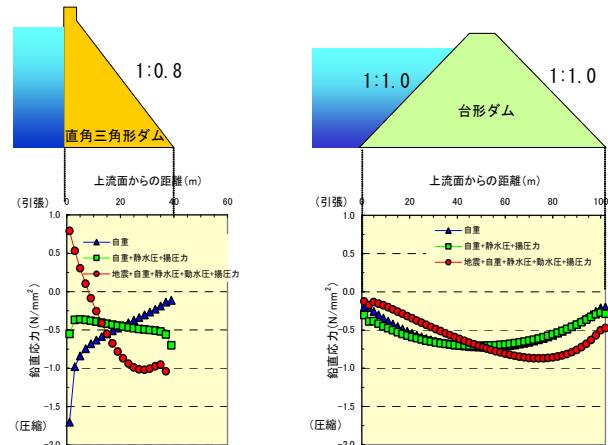


図-8 ダム堤敷に作用する鉛直応力分布例

(c) 滑動 (外的安定性)

台形ダムは、前述したように鉛直応力が堤体底面全域で圧縮側にあるためせん断応力の変化が少ない。この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。一方、直角三角形ダムでは、堤体と基礎を一体化し、付着面の岩盤せん断強度を活用して活動に抵抗することが必要である。

(d) 設計検討手順

台形CSGダムと重力式コンクリートダムの検討手順は、基本的に異なるものであり、この関係を図-9 に示す。台形CSGダムでは手近に得られる材料とそれを用いたCSGの物性値（強度・弾性係数）が第一に検討され、それに合わせた堤体形状の設計、施工方法の検討がなされる。したがって、材料に合わせた合理的な設計が可能であるとともに、材料・設計・施工が互いに密接に関連し合うという大きな特徴がある。



図-9 台形CSGダムと重力式コンクリートダムの検討手順

図-10 は、億首ダムの堤体設計に用いた解析モデルである。堤体の物性値（弾性係数）は実際に堤体材料として用いる材料より試験を行い算出した値である。これに基礎岩盤の物性値（弾性係数）の条件を与える「有限要素法」と「動的解析法」を用いた解析を行い堤体内の最大発生応力が定まり、必要CSG強度 3.5N/mm^2 が求まる（図-7）。

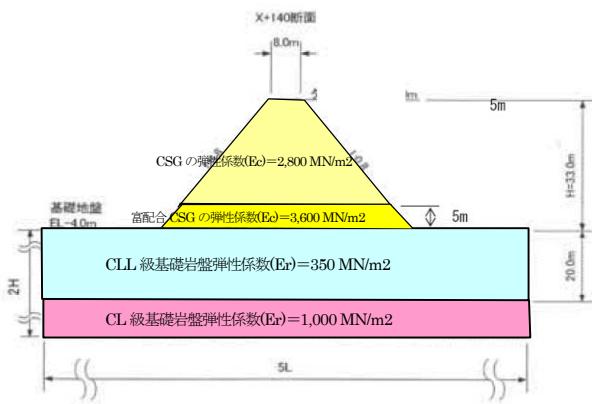


図-10 億首ダム解析モデル（脆弱部）

（3）億首ダムにおける試験施工とひし形作成

（a）ひし形理論

台形CSGダムは「ひし形理論」に基づきCSGの強度の管理がなされる。これは、CSGの材料（母材）は、分級、粒度調整を行わないことが基本であり、材料の粒度は当然変動するもので単位水量も一定に保つことが困難となる。このように、粒度、単位水量が変動する材料を使用すれば当然セメントが一定でもCSGの強度は変動するため、材料採取地での粒度試験結果、粒度と単位水量を変動させた材料での強度試験結果により、図-11に示す四角形の「ひし形」を作成し、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。

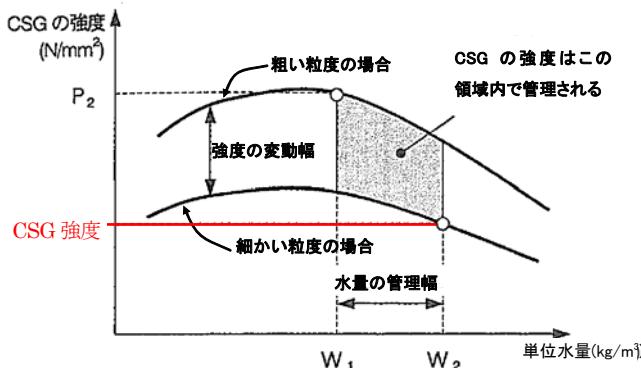


図-11 CSGの粒度、単位水量、強度の関係

（b）試験施工

CSGの強度あるいはひし形を求めるためには、試

験施工が必要であり、試験施工は実際に使用する転圧機械を用いて実施した。億首ダムでは、母材採取地より採取した母材を破碎し、これを用いて作製した大型供試体で予め室内試験を実施し、締固めエネルギー（締固め時間）別のCSG強度を設定している。

＜試験施工目的＞

- ①試験を行い転圧回数を決定する。
- ②現場転圧の締固めエネルギーが大型供試体締固めエネルギーの何秒に相当するか把握する。

＜試験施工結果＞

- ①億首ダムにおける適切な転圧回数は、無振動2回+有振動6回が妥当である。
- ②振動ローラ無振動2回+有振動6回の締固めエネルギーに相当する大型供試体の締固めエネルギーは、電動ハンマで60秒程度に相当する。

（c）ひし形の作成

試験施工により設定した億首ダムのひし形を図-11、に示す。億首ダム堤体の内的安定性より定まった必要CSG強度は 3.5N/mm^2 であるため、この値を最も低い強度とする。単位水量が 70kg/m^3 の場合、細粒側で必要強度を下回るので、ひし形の単位水量の管理幅を $80\sim100\text{kg/m}^3$ に狭めて管理を行う。

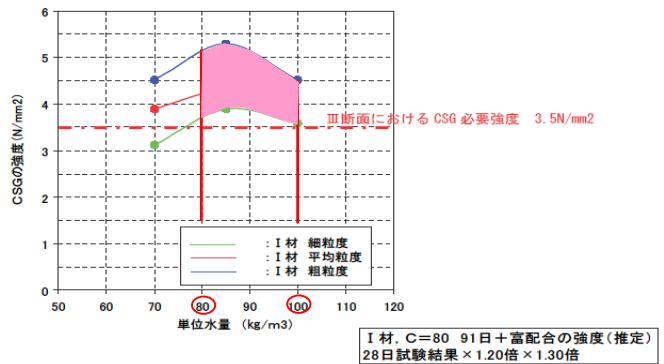


図-11 富配合CSGの91日材齢のひし形

5. 基礎処理計画概要

（1）基礎処理計画

億首ダムの基礎処理計画は、基礎岩盤の遮水を目的に、堤体底面上流側の止水コンクリート部において以下に示す基礎処理工を実施する（図-4）。

（a）カーテングラウチング

基礎の深い部分の浸透流を抑制し、堤体に作用する揚圧力を低減を図る。

（b）補助カーテングラウチング

堤体と基礎地盤接合部の遮水性を改良し、浸透流の発生を極力抑制する。

（c）土質ブランケット

脆弱部の浸透流抑制を目的とし、堤体に作用する揚圧力を低減を図る。

(2) 弱部地質構造

億首ダム基礎処理検討において最も留意すべき“みずみち”は、「右岸脆弱部」である。脆弱部及びその周辺は、地質構造の形成に伴う小規模な破碎部、割れ目が多く、深部まで風化の影響を受けている。このような地質性状、地質構造、岩盤性状を反映して、掘削線より80mの深度においても高透水性を示しており、上下流方向に連続している（図-12）。

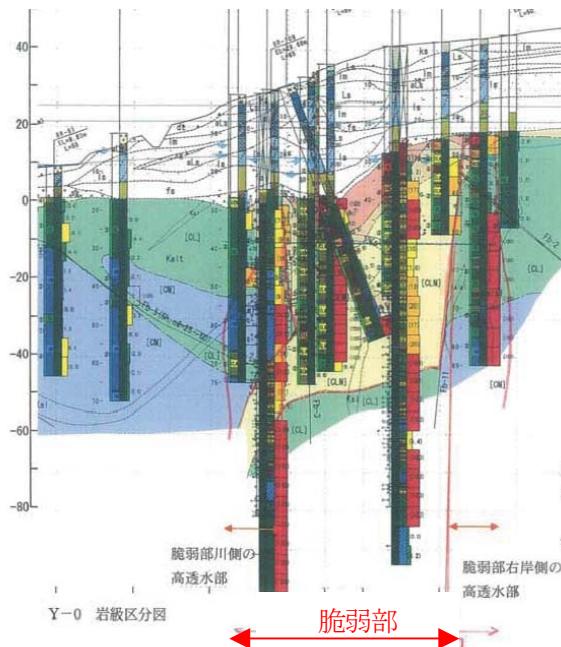


図-12 右岸脆弱部の岩級区分図

(3) 土質プランケット工

(a) 脆弱部基礎処理検討

脆弱部基礎処理において、浸透流解析を行い、適切な止水処理工法の検討を行った。

① カーテングラウチングによる場合（図-13）

施工深度を40m～120mと変化させて遮水効果を検討する。

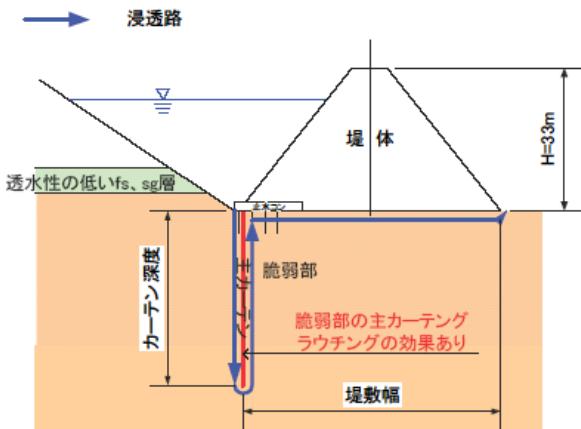


図-13 カーテングラウチングの浸透モデル

② 土質プランケットによる場合（図-14）

脆弱部の高透水部は上下流に連続しているが、その上は琉球層群の低透水層「非石灰質砂層(fs)」「砂礫層 sg」が分布している。この低透水層は、ダムサイト上流まで分布しているため“みずみち”となるのは、基礎掘削により脆弱部が露出する箇所である。このため、難透水の土質プランケットを露出面に施工する場合の遮水効果の検討を行う。

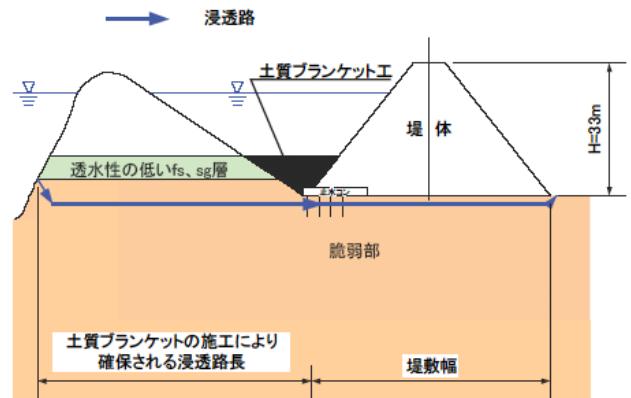


図-14 土質プランケットの浸透モデル

(b) 検討結果

検討結果は、カーテングラウチングを80m施工した場合の効果とプランケット工のみの場合（施工厚さが1.5m）で同等の遮水効果が得られた。土質プランケット材については、現地材料が流用可能であり工事コストも大幅に削減できる。また、明かり施工となるため、カーテングラウチングと比較し、確実な止水処理が可能である。土質プランケット工計画図を図-15に示す。

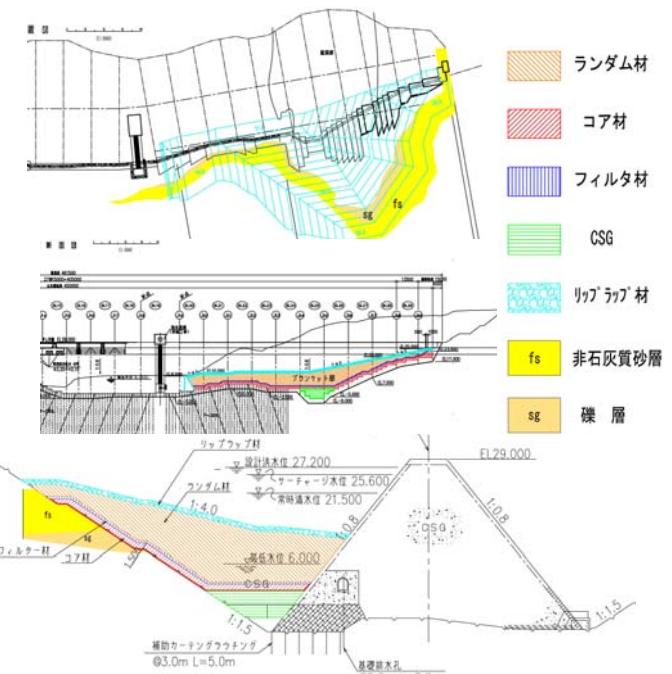


図-15 土質プランケット工計画図

6. 施工計画概要

(1) 基礎掘削計画

基礎掘削により発生した約100万m³の掘削土砂は、主に46tダンプトラックで事業地内の土捨場へ搬出する予定である。

掘削期間は、平成21年7月から着手し約13ヶ月で実施する。

(2) 母材採取計画

CSG材の原料となる母材の採取は、貯水池上流の母材山より採取を行う。地質は、基礎掘削の基盤岩と同じ砂岩粘板岩互層であり、材質は硬さや風化の程度からI材(CM～CLH級)、II材(CL級)に分けて採取し、I材を堤体内の応力が発生する下部標高に使用し、上部標高でII材を用いる。母材必要量は約21万m³、歩留まりは約49%である。ちなみに、重力式コンクリートダムに求められる材料を採取した場合、歩留まりは約24%であり、8割近く捨てる事となる。台形CSGダムは、“材料の合理化”を最も重要視した形式である。母材の採取にあたっては、母材の材質、粒度などを出来るだけ早く確認しておくことがCSG材の品質、施工に大きく影響するため、億首ダムでは、打設を開始する平成22年8月までに全量を採取し仮置きする計画である。仮置きは場所は母材仮置きヤードのほか、土捨場造成後の平場に仮置きする計画である。

(3) 施工設備計画

採取した母材は一旦仮置きした後、仮設備ヤードへダンプトラックで運搬を行う。母材は、CSGの最大粒形が80mmであるため、母材の80mmオーバーを1次破碎で破碎処理を行う。なお、母材のうち硬質なI材は、大玉の投入割合が増えることが想定されるため、1次破碎後更に80mmオーバーサイズを2次破碎にかける計画である。これはあくまで粒度の調整ではなく、80mmオーバーサイズの除去を意図したものである。

破碎後、製造されたCSG材は4日分程度ストックを行い品質管理規定に定められた粒度、表面水量等の管理を行なったのち、CSG混合設備にてセメント、水を混合しCSGを製造する。なお、CSG工法の用語の定義として、コンクリートに例えると原石にあたるもの「母材」、骨材を「CSG材」、コンクリートを「CSG」と称している。

堤体にはCSGのほかコンクリートが約8万m³打設されるため、仮設備ヤードにはコンクリート製造設備を設置する。コンクリートに使用する骨材は、コスト比較の結果、購入骨材とした。

(4) CSG打設

CSGの打設は、CSG製造設備からダムサイトまで10tダンプトラックで直送し、ブルドーザ(16t級)で敷均し、振動ローラ(11t級)で締固める。転圧回数は、試験施工(発注前・発注後)で決定した回数(発注前→無振動2回、有振動6回、計8回)とする。なお、施工されるCSGの強度管理は、振動ローラの転圧回数で管理されることから、億首ダムではICT技術を導入し、GPSを使った締固め自動管理システムを導入する計画である。

台形CSGダムの施工は、高速施工を可能とするよう計画しており、1リフト1.5mを2日サイクルで施工し、約24万m³のCSGを約7ヶ月で施工する計画である。この高速施工を可能とした要因の一つとして上下流面の型枠にプレキャスト型枠を採用したことが挙げられる。従来のコンクリートダムでは、上下流面の型枠に鋼製のスライド型枠を用いるのが基本であり、スライド型枠での養生期間、型枠移動の時間が打設の“待ち”となっていたことがあったが、プレキャスト型枠の採用により効率的な打設サイクルが可能となった。プレキャスト型枠の採用にあたっては、これまで「大保脇ダム沢処理工」等で施工の実績があり、その後の検証で施工の確実性が実証されている。

5. さいごに

億首ダムの堤体積は約32万m³であり打設期間は約12ヶ月(CSG、コンクリート打設も含め)であり、ほぼ同規模の大保ダム(コンクリートダム:約40万m³)の打設期間が約30ヶ月に比べて、打設速度は約3倍と超高速施工が可能となった。これには、「大保脇ダム沢処理工」、「灰塚ダム川井堰堤(中国地方整備局)」において、台形CSGダム理論に基づき試験・設計・施工・品質管理がなされ多大な知見が得られたことが基礎となっている。

億首ダム本体建設工事は、平成21年7月から基礎掘削に着手し、平成22年8月から堤体工に着手、同年12月から堤体CSGの打設を開始する予定である。工事にあたっては、地元金武町のキャッチフレーズ「海外雄飛の里」にふさわしい台形CSGダムの先駆的役割を使命として肝に銘じ、台形CSGダムの施工技術、品質の管理手法、情報化施工の導入等の新たな技術の確立に向け努力するとともに、自然環境への保全対策を着実に行い工事を進めていくこととする。

参考文献

- 1) 台形CSGダム -施工・品質管理技術資料-
H19.9 (財)ダム技術センター