

2. ダム建設のライフサイクル評価

REPORT ON A PRELIMINARY LIFE CYCLE ASSESSMENT OF ROCKFILL DAM

小泉 泰通* ・ 高柳 則男**

Yasumichi KOIZUMI, Norio TAKAYANAGI

ABSTRACT ; Dam project entails a large scale civil works and is liable to incur a significant environmental effects. This paper briefs the results of a preliminary life cycle assessment of a rockfill dam in terms of CO₂ exhaustion. Site conditions such as topography, geology and hydrology govern the design and work volume of a dam. The input requisite to dam construction such as materials and energy, therefore, varies from site to site. Subsequently breakdown of work items, excavation for example into ripping, hauling and others, and estimation of CO₂ exhaustion volume thereby are necessary as well as to apply a standard CO₂ yield derived from the input/output analysis in the LCA of a dam. This assessment identified that the exhaustion by diversion works, excavation works, embankment works and spillway tallies 43,000 ton or 84% of total exhausted CO₂ of 54,000 ton from a rockfill dam with an embankment volume of 3,500,000 m³.

1. ダムの特性

ダムは山間部に建設され、谷の地形、地質や雨量といった自然条件を考慮して、地点、タイプ、規模、形状、水処理、基礎処理などが設計される総合土木構造物である。したがって投入される原材料、エネルギーは案件ごとに千差万別なものになる。またダムは本体以外に、工事用道路、天端橋、仮排水トンネル、管理事務所といった土木建築構造物が集積されているという特徴を持つ。加えて掘削ズリを盛立材、骨材の原材料として再利用できることもダムの特性といえる。

ダムの運用は主として放流設備の操作にかぎられる。洪水時の放流、水位制御のための放流、維持用水確保のための放流操作である。多目的ダムの場合、上水取水施設の操作、水力発電用取水施設の操作、灌漑用水取水施設の操作、閘門の操作などがあるが、いずれもダムそのものの運用にはあたらない。放流設備は一般にゲートまたはバルブからなり、電動で操作される。

2. C排出量からみたダムのライフサイクル

ダムのライフサイクルは調査、設計、施工、運用、維持管理、廃棄という段階で構成される。各段階で必要となる作業は以下のとおりである。

調査	: 地形、地質、水文、社会化・環境影響評価、材料試験、概略設計
設計	: 水文、水理、土質、基礎解析、構造解析、設計、各種詳細調査
施工	: 土木、建築、機械、電気・通信工事、仮設備工事

*; (株)フジタ地球環境室 Global Environment Research Dept, FUJITA CORPORATION.

**; 日本工営(株)中央研究所 Research and Development Center, NIPPON KOEI CO., LTD.

運用 : 放流設備操作

維持管理 : 水文テレメータ、ダム管理システムおよび堤体の監視、潤滑油補充、塗装、その他点検・試験

廃棄 : 廃棄のための作業は特にしない

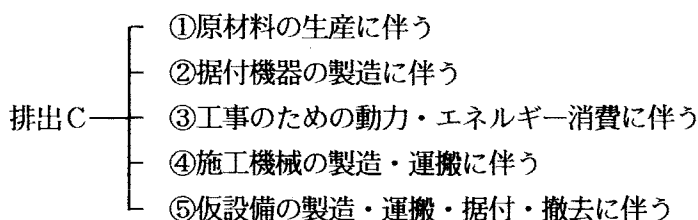
LCAの対象とすべき環境負荷は二酸化炭素の形で排出される炭素（以下、Cとする）、NO_xなどの大気汚染物質、水質汚濁物質、廃棄物の排出量など広範であるが、ここでは検討の第1歩としてCに限定した。

調査設計の段階で最も多量のC排出を伴う作業は運搬と各試験機器の操作によるものであるが、運搬量・負荷は極めて小さい。また維持管理段階の電力消費や塗装・潤滑油の消耗も施工時のものに比べれば無視できる程度である。

排砂門を持たないダムの貯水池が堆砂により機能しなくなった場合、ダムはそのまま放置され自然河道になじませるか、浚渫により機能の回復を図る。前者の場合、特に新たな作業を伴わない。後者の場合は、かなり大規模な工事となるが、それは廃棄のためというより新たな貯水池の誕生に負荷すべきものと考えられる。いずれにしても、ダムの廃棄に伴うC排出はないものとして良い。

3. ロックフィルダム建設工事とC発生原因

建設工事のC排出をライフサイクルで検討する場合、発生原因別に以下のように分類することができる。



ダムは構造上また材料によっていくつかの種類に分類される。ロックフィルダムの場合、主な原材料はロック材とコア材とフィルター材であり、プロジェクト毎に現場で生産することに大きな特徴がある。したがって生産に伴うCの排出は重機やプラントの動力・エネルギーとしての積み上げを行う必要がある。セメントは工業製品として一般的なC原単位が使用できる。その他制御機器、計測や通信機器についてもダムとしての特異性はなく、一般的な原単位を適用することが可能である。

掘削、盛立、打設および基礎処理などの工事は重機や電動機でなされるので、動力用エネルギー消費がC発生の主要原因である。地形や運搬距離、現場の地盤条件を考慮に入れて積み上げる必要がある。

施工機械の製造・運搬に伴うCの排出量は工業製品として一般的な原単位を用いることができるが、当該案件での損耗分を負荷量と考える。損耗分は現地での稼働時間の関数であり、稼働時間は当該案件の工事別数量と現場条件に深くかかわっている。したがって現場毎に積み上げなくてはならない。

仮設備も概ね工業製品であるから一般的な原単位が適用可能である。しかし損耗に応じた割合で各案件に負荷されるべきものであり、施工機械と同様に現場毎に積み上げる必要がある。

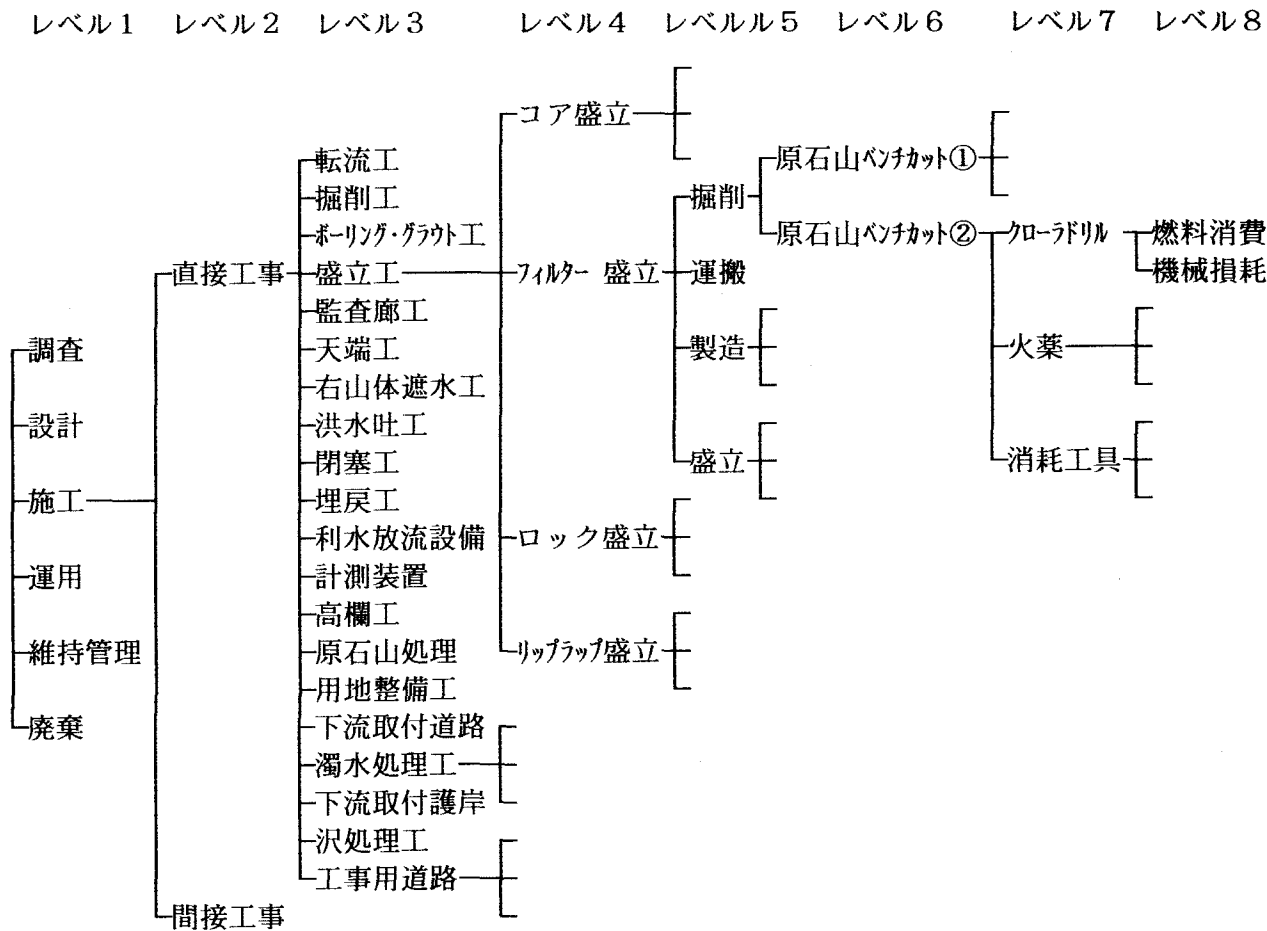
以上の観点から土木施設の中でも主原材料を現場で調達するという特性を持つロックフィルダムを取り上げることにした。

4. 業務および工種の分割と絞り込み

ダム構築の業務を図-1に示すようにレベル1で調査、設計、施工、運用、維持管理、廃棄に分割した。そしてこれまでに述べたダムの特性、C発生という側面からみたライフサイクルを考慮し、検討の対象を施工段階に絞った。

さらに施工をレベル2の分割で直接工事と間接工事に分けた。本検討で対象としたのは直接工事である。直接工事のレベル3で転流工、掘削工、ボーリング・グラウト工、盛立工、洪水吐工、工事用道路など全20

の工種に分割した。以下、最大レベル8まで細分化して、C排出量を積み上げた。

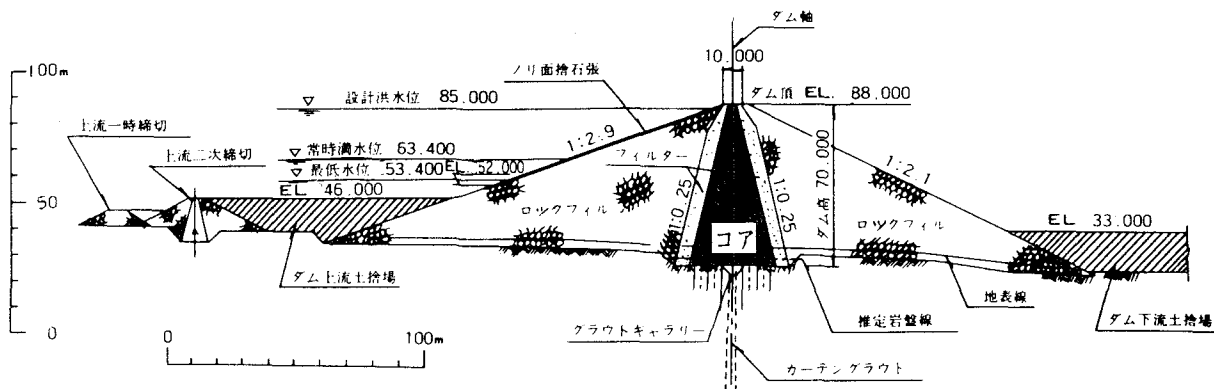


図－1 C排出のツリー図の一部

5. 検討したダムの概要

C排出量を試算したダムは、洪水調節水を主目的として昭和60年代に東北地方に建設されたものである。このダムは当初から、地形と基礎などの制約のため複雑な構造を持っていた。また建設段階でも種々の設計変更が行われた。ここでは当初設計を基本に、構造の一部を統合整理して単純化し検討モデルにした。

モデルにしたダムの諸元および標準断面を図－2に、主要数量を表－1に示す。



図－2 ダム 標準断面図

表-1 ダム諸元および主要数量

型 式	中央コア型ロックフィルダム	掘 削 土 量	295 万m ³
堤頂標高	88.0 m	ロ ッ ク 盛 立 量	254 万m ³
堤 高	70.0 m	フィルター盛立量	32 万m ³
堤 頂 幅	8.0 m	コ ア 盛 立 量	64 万m ³
堤 頂 長	416.5 m	グ ラ ウ ト 延 長	94,600m
堤 体 積	350 万m ³	洪水吐コンクリート量	192,000m ³
総貯水容量	1,260 万m ³	仮 排 水 路 延 長	780m
堆砂容量	160 万m ³	監 査 廊 延 長	613m

6. 試算の方法

ダムを建設していた時期と現在を比較すると、関係技術図書や使用機械が飛躍的に拡大・充実した。今回の試算では、最新の資料と基準により施工するものと想定して使用機械などを使用することにした。

ロックフィルダムはダムサイト周辺に賦存する自然材料を最大限効率的に使用するよう設計されているため、一般的な土木構造物や他のタイプのダムよりも複雑な設計になっている。一方、同じ理由で重機土工が主体となるため、多数の大型重機が大量の燃料を消費するといった特徴を持っている。

このような背景により、重機土工をはじめとする機械作業はできる限り積み上げ方式で燃料消費量などを詳細に算定し、その値に原単位を乗ずることにして現実に近づけることを期した。

ダム建設工事では施工数量が多く、多量の燃料・セメント・鋼材を使用する部分から多量のCが排出すると考えられるので、これに該当する掘削・基礎処理・堤体盛立・洪水吐工事に注目して詳細に検討した。その他の工事には主要4工事で求めた値を準用するか、別途算定してある原単位を用いることとした。

6.1 掘削工からのC排出量

(A) 使用重機の選定

使用する重機の機種・規格は現地の地形・地質により最適のものとするところから「多目的ダムの建設」に示された標準によった。

(B) 重機の施工能力

重機の施工能力は「建設省土木工事積算基準」により算定した。

掘削押土の例をあげると次のようになる。

$$Q = \frac{60 \times q \times f \times E}{C_m}$$

Q : 運転1時間当りの作業量 (m³/hr)

q : 1サイクル当りの掘削押土量 (m³) ----- (地山土量)

f : 土量換算係数

E : 作業効率 ----- 現場条件、土質により0.40～0.85

C_m : 1サイクル当りの所要時間 (min)

$$C_m = 0.027 \ell + 0.78$$

ℓ : 平均掘削押土距離 (m) ----- 標準は20m

(C) 重機の燃料消費によるC排出量

重機の時間当り燃料消費量は「建設機械等損料算定表」に示されている機関出力と燃料消費率表を乗じて求めた。この値にオイル・作動油等の分として10%を加え、軽油の原単位を乗じて燃料消費によるC排

出量を求めた。したがってこの数値は重機の機種・規格により固有の値（単位：kg-C/hr）になる。

(D) 重機の損耗によるC負担量

LCAの基本的な考えでは、鉄鉱石を採取するところから輸送・製鉄・鍛造・加工・組立てに要するすべての段階で排出するCの量を求め、これに鉄鋼以外の部品の生産に要するCを加えて、個々の重機固有のC排出量を算定することになる。この値を基礎にして作業現場での使用時間に応じたC排出量を算出して、重機の損耗によるC負担量（単位：kg-C/hr）を求めれば論理的である。

重機は機械用炭素鋼の他に特殊鋼やステンレス鋼を使っているし、部品には鉛・銅・合金・プラスチック・ゴムなどを使用したものがあるが、重量の大部分が機械用炭素鋼であるので、全自重を機械用炭素鋼として扱い、損耗重量に鉄鋼の原単位を乗じて重機の損耗によるC負担量を算出することにした。

しかし重機メーカーの工場を調査したところ、工場では同時に多種多様の重機を生産しているし、生産ライン自体が多機種混流ラインになっている。原料の鉄鋼にしても部材により、高炉もの電炉ものを使い分けている。電装品をはじめ大半の部品を外注業者に依存しているので、製造段階の詳細工程を把握できない。生産技術には企業秘密もあるなどの問題があって、メーカーでは個々の重機固有の製造時C排出量を算定していない。また作業現場でも重機を新車から耐用年数一杯まで使うことはないし、在籍途中でも修理などに要する補修部品の点数・重量・消費エネルギーなどを把握していないため、在籍中の重機のC負担量を論理的に算定できない。

このような事情から、ここでは「建設機械等損料算定表」に示されている損料率（運転時間1時間当たり換算値）をもとに重機の損耗によるC負担量を求めることにした。

すなわち重機を標準的に運転し、標準的な維持修理と年間管理を繰り返して耐用年数一杯まで使用して廃棄するものとした。廃棄された重機はスクラップの価値をもつ。これを原料にして鉄鋼を再生し、加工・組立てをして重機を製造するものとする。このフローは次のようになる。

鉄鉱石→鉄鋼→（製造）→重機→（使用・維持・管理）→廃車＝製鉄原料
計算式は下記の通りである。

$$\begin{aligned} \text{時間当り損料率} &= \left(\frac{\text{償却費率} + \text{維持修理費率}}{\text{耐用年数}} + \text{年間管理費率} \right) \times \frac{1}{\text{年間標準運転時間}} \\ &= \frac{\text{償却費率} + \text{維持修理費率} + \text{年間管理費率} \times \text{耐用年数}}{\text{耐用年数} \times \text{年間標準運転時間}} \end{aligned}$$

償却費率とは重機が耐用命数を終え廃棄処分される際に残る経済価値を10%として、90%を耐用年数に応じ比例法で配分したものである。したがってその作業現場における重機の価値の減少額、すなわち新車重機本体の損耗によるC負担量に該当する。残存価値の10%は重機を製造する際に要するエネルギーのC排出量の一部に相当するものと仮定した。

維持修理費率とは重機の効用を持続するために必要な整備・修理費用の重機基礎価格に対する比率で、機種・規格によって固有の値でおおむね30～50%である。整備の費用とは作業中の故障を予防したり、低下した性能を復元するための費用である。修理の費用とは作業中の事故による故障の修理に必要な費用である。整備および修理に要する部品類を製造する段階で排出するCの量および故障部品を取り外したり、新しい部品を組みつける作業などに要するエネルギーのC排出量に相当するものとした。

年間管理費率は保管格納などの経費・保険料・税金の重機基礎価格に対する比率で7%である。ここでは保管格納・回送・組立てなどに要するエネルギーのC排出量に相当するものとした。

機械損料を算定する場合は、重機の基礎価格に時間当り損料率を乗ずることになるが、ここでは時間当り損料率を時間当り損耗係数と考え、重機の自重に時間当り損耗係数を乗じて損耗重量を求めた。

(E) 重機作業によるC排出量

重機作業によるC排出量は次式で求めた。

$$C\text{排出量} = \frac{\text{対象土量}}{\text{重機の施工能力}} \times (\text{燃料消費によるC排出量} + \text{重機の損耗によるC負担量})$$

(F) 火薬類消費によるC排出量

岩石掘削で火薬類を消費する際に排出するCの量は「多目的ダムの建設」に示された標準から薬量を求め、これに「トンネル発破技術指針」から求めた後ガス量に乗じて算定した。この時、ブースターに使われているダイナマイトはANFOと同等に扱った。

(G) 軽機械の使用によるC排出量

重機以外の軽機械を使用する作業から排出するC量は上記の(A)～(E)に準ずる方法で算出した。

6.2 盛立工からのC排出量

(A) 重機作業によるC排出量

盛立工はフィルター材生産工程を除き大半が重機作業である。重機作業は掘削工と同じ方法でC排出量を算出した。なお、ロック材およびフィルター材を採取する際に消費する火薬類から排出したCは、それぞれの工程に算入した。

(B) フィルター材生産工程からのC排出量

フィルター材生産工程も重機に準じ、次の方法でC排出量を算出した。フィルタープラントにはジョークラッシャー・振動フィーダー・ベルトコンベア等の電動機械がある。これらを動かす電力量と運転時間を算定し、これに原単位を乗じて電力消費によるC排出量を算出した。また各機械の自重と損料率（運転時間当たり換算値）から、機械の損耗重量を求め原単位を乗じて機械損耗によるC負担量を算出した。なお、この工程のC排出量はフィルター盛立工程に算入して計算した。

(C) 軽機械の使用によるC排出量

重機以外の軽機械を使用する作業から排出するCの量は、掘削工と同様の方法で算出した。

6.3 洪水吐工からのC排出量

(A) 重機作業によるC排出量

洪水吐工事のうち原石採取・運搬は重機作業であるから、盛立工と同じ方法でC排出量を算出した。また採取する際に消費する火薬類から排出したCは、それぞれの工程に算入した。

(B) コンクリート製造工程からのC排出量

コンクリート製造工程は、一次破碎（フィルター材生産と同じ）、二次破碎、製品引き出し、練り混ぜ工程からなるプラント作業なので、フィルター材生産工程と同じ方法でC排出量を算出した。

(C) コンクリート打設工程からのC排出量

コンクリート打設工程は、型枠組み、コンクリート運搬、打設、締め固め、グリーンカットおよび型枠スライド工程からなる。重機作業部分は盛立工と同じ方法でC排出量を算出した。クレーンは消費電力量からC排出量を算出した。

(D) 軽機械の使用によるC排出量

重機以外の軽機械を使用する作業から排出するCの量は、掘削工と同様の方法で算出した。

(E) 購入資材の製造時のC排出量

資材の種類別に所要数量と原単位を乗じてC排出量を算出した。なお鋼製型枠材・仮設金物類などは重量の95%を償却するものとした。

6.4 ボーリング・グラウト工からのC排出量

(A) 使用機械の選定

使用する機械の機種・規格は「多目的ダムの建設」に示された標準によった。

(B) ボーリングによるC排出量

マシンなど機械類の損耗重量、ロット類の損耗重量および電力消費量は「多目的ダムの建設」に示された標準によった。C排出量はフィルター材生産工程からのC排出量に準ずる方法で算出した。

(C) グラウチングによるC排出量

ポンプなど機械類の損耗、パイプ類の損耗重量および電力消費量は「多目的ダムの建設」に示された標準によった。C排出量はフィルター材生産工程からのC排出量に準ずる方法で算出した。中央プラントのセメントサイロ・ミキサー・ポンプも同様とした。

(D) 購入資材の製造時のC排出量

資材の種類別に所要数量と原単位を乗じてC排出量を算出した。

7. 工事全体のC排出量

主要4工種からのC排出量は前項の 6.1～6.4 で述べた方法で算出した。その他の工種は主要工種で求めた値を準用してC排出量を算出した。C排出量の多い上位6工種をそれぞれ単独に、他14工種を一括してC排出量を表－2に示す。工事全体のC排出量は 53,808tで、これに対する各工種からのC排出量の比率と工事の金額による比率を比較して示す。また各工種のC排出元の内訳を示す。

表－2 工 種 別 C 排 出 量 集 計 表

	排 出 元 別 C 排 出 量 (t)						C排出量 比率%	工事費 比率%
	重機関係	コン・セメント	鋼・鉄	プラント	その他	合計		
洪水吐工	2,695	13,114	1,086	1,235	0	18,130	33.7	19.5
盛立工	14,447	0	0	106	0	14,553	27.0	31.7
掘削工	7,507	0	0	0	0	7,507	14.0	13.6
転流工	1,069	2,771	886	23	230	4,979	9.3	8.5
ボーリング・グラウト工	0	2,302	0	237	0	2,539	4.7	10.1
工事用道路	1,190	276	88	0	0	1,554	2.9	5.2
その他14計	1,330	2,656	385	6	169	4,546	8.5	11.3
合 計	28,238	21,119	2,445	1,607	399	53,808	100.0	100.0
C排出量比率	52.5	39.2	4.5	3.0	0.7	100.0		

C排出量が大きいものは盛立工と洪水吐工であるが、盛立工のC排出量比率は27.0%で工事金額比率31.7%より小さい。洪水吐工は逆にC排出量比率が33.7%で工事金額比率19.5%よりかなり大きい。

中位のC排出量の4工種のうちボーリング・グラウト工と工事用道路は盛立工と同様にC排出量比率が工事金額比率より小さく、掘削工と転流工はC排出量比率がやや多い。

他の14工種は合計でC排出量比率 8.5%・工事金額比率11.3%である。

工事全体のC排出元の内訳を見ると重機関係が52.5%、コンクリート・セメントが39.2%で大半を占め、残りの 8.3%が鋼材・鉄筋、プラント関係、その他である。

このダム工事には約 480万m³ (約 1,150万 t) の建設資材が投入された。資材のうち約12%は再利用土を使い、約85%を工事地域内で採取した。セメント・鋼材・アスコンなど地域外から搬入した資材は約3%であった。一方、約 330万m³ (約 630万 t) の副産物が発生したが、約18%は本工事に再利用し、その他を運動用地の造成および運動施設と県道との連絡道路などに使用して全量を再利用した。先に工事全体のC排出量は 53,808tと記したが、運動用地造成などへの効用を勘案すると、ダム建設によるC排出量は 33,000t程度とも考えられる。

8. 設計変更案の検討

ダムの型式・仕様は地質など多くの与条件から決められる。ここではそれらの条件を考慮せずに、技術的裏付けなしに単純な設計比較をして、C排出量に与える効果を試算してみる。

- | | |
|--|------------|
| ①法面勾配変更（上下流とも勾配を1分づつ急にする） | 400tの減少 |
| ②ゾーニングの変更（コア、フィルターを半減して、相当分のロックを盛る） | 372tの減少 |
| ③押え盛土の増加（下流側に20万㎡増加する） | 242tの増加 |
| ④基礎岩盤の底上げ（10万㎡減、グラウト増とする） | 1,861tの増加 |
| ⑤基礎岩盤の底下げ（10万㎡増、グラウト微減とする） | 551tの増加 |
| ⑥重力式コンクリートダム（105万㎡、グラウト増、仮排水トンネル減とする） | 66,662tの増加 |
| ⑦中空重力式コンクリートダム（94.5万㎡、グラウト増、仮排水トンネル減とする） | 60,455tの増加 |

①②はC排出量を抑制する効果があるが、総量の1%にも満たず実質的な効果は期待できない。③～⑦はいずれも効果がない。特に⑥⑦は原設計の2倍以上になる。

9. ダムの耐用年数延長策の検討

表-1に示すように、このダムの総貯水量は1,260万㎡で、堆砂容量は160万㎡である。堆砂量は100年分を見込んでいるから年当り1.6万㎡になり、このダムの貯水池は787年後に土砂で完全に埋まることになる。建設時のC排出量を787年で割ると、年当りC負担量68t余りとなる。

取水口の高さの問題、排除した土砂の処分法など技術的裏付けはないが、単純に土砂を排除すれば耐用年数が延長できるものとして、2案を比較しC排出量に与える効果を試算してみる。

- | | |
|---|------------------------------------|
| ①上流に30,000㎡級の砂防ダムを造り土砂を貯め、10年毎に堆砂を掘削・捨土 | 建設時のC排出量 2,858t、787年間の年当りC負担量 44t |
| ②10,000㎡級のダムを造り仮排水トンネル同断面の長さ3,000m級の排砂トンネルで自然流下 | 建設時のC排出量 17,228t、787年間の年当りC負担量 42t |

10. まとめ

以上の検討により、ロックフィルダムのC排出量に関し、次のことが明らかになった。

- ①このロックフィルダムのC排出量は53,808tである
- ②現地に賦存する材料を使用するため、同規模のコンクリートダムに比しC排出量が少ない
- ③発生する建設副産物を全量再利用しているので、再利用先にC排出量を負担させことも可能である
- ④工種別に見ると工事費の比率とC排出量の比率には、かなり大きな差異がある
- ⑤盛立工と洪水吐工で全C排出量の60%余りを占め、盛立工よりも洪水吐工の方が多い
- ⑥C排出元の内訳では重機関係が約50%、コンクリート・セメントが約40%を占める
- ⑦ダム本体の $\frac{1}{3}$ ～ $\frac{2}{3}$ のC排出量を負担して流入土砂を排除する措置を講ずればダムを永久に使用できる
- ⑧重機関係からのC排出量は燃料消費によるものが約90%で、重機の損耗による負担が約10%である

この検討はLCAの第1歩としてC排出量に限定したものである。他の環境負荷物質、例えばNO_xならば燃料による排出が極めて多くなるため、全く違う結果を得ることは言うまでもない。

〈参考文献〉

- | | |
|---|---|
| ☐ 多目的ダムの建設（ダム技術センター） | ☐ 建設物価（建設物価調査会） |
| ☐ 建設省土木工事積算基準（土木工事積算研究会） | ☐ トンネル発破技術指針（日本トンネル協会） |
| ☐ 建設機械等損料算定表（日本建設機械化協会） | ☐ 当該ダム施工計画書 |
| ☐ 日本建設機械要覧（日本建設機械化協会） | |