

工程計画管理の最適化に関する現実的諸問題

SOME PRACTICAL PROBLEMS CONCERNING OPTIMIZATION OF CONSTRUCTION SCHEDULING AND CONTROL

荒井 克彦*
By Katsuhiko ARAI

1. ま え が き

機械化土工工事を主な対象として、筆者は工程計画・管理における意志決定の合理化に関する報告を行った^{1)~5)}。これらの一連の報告における基本的な目標は、大規模かつ複雑な建設工事の施工計画・管理に対しても正確な意志決定を行うために必要な判断資料を、最適性の定量的な評価に基づいて提供する手法体系を得ることであった。現在までに得られた結果の概要は以下のとおりである。機械化土工を主対象とする工程計画最適化問題が、施工段取（工程上における施工機械や作業員などの操作方法）に関する費用最小化問題として数学的に定式化された²⁾。定式化された工程計画最適化問題に対して、最適制御理論におけるこう配法と SUMT・外点法を適用することにより、現実的に妥当な数値解が得られることを示した³⁾。さらに、共役こう配法と SUMT・外点法を用いて、数値解析に関する詳細な検討を行った結果、筆者の提案する工程計画手法を実際の大規模な建設工事に適用する準備が整えられた⁴⁾。一方、工程上の不確実性が施工計画や管理における最適性の評価に重要な影響を及ぼすと判断される。そこで、実際の工程上における工程管理に関する検討を行い、工程管理の明確な意義づけを行った⁵⁾。

以上の検討を通じて、1つの新たな工程計画・管理手法が得られたと考えられる。この手法を「工程計画最適化手法 (Scheduling Optimization Technique; SOT)」と称する。SOT は実際の建設工事のいくつかに試験的に適用され、現実的に妥当な工程計画が得られることが確かめられている。本論文では、あるロックフィルダム工事における大型施工機械の工程計画を具体例として、筆者が SOT をいくつかの建設工事に適用した際に遭遇した種々の問題と、その解決方法を述べる。SOT を実

際の工事に適用する際には、以下に述べる現実的な問題に配慮を加えることにより、よい結果を得る場合が多い。

2. 工程計画最適化手法 (SOT) の概要

(1) 基本的定式化の要約

a) 定式化のための要素^{2),3)}

定式化の便宜のために、図-1 に示す5つの要素を導入する。これらの要素の意味を以下に簡単に述べる。

① 資源 (Resource)

施工作業を遂行するために必要な施工機械や作業員などの総称であり、次の4つの資源費用成分により規定される。下添字 i は資源番号を表わす。

- RCD_i : 固定費用 (円/日)
- RCH_i : 稼働費用 (円/時間)
- $RCIM_i$: 搬入費用 (円/回)
- $RCEX_i$: 搬出費用 (円/回)

② 資源グループ (Resource Group)

常に1つの Crew として稼働する資源の集まりである。その資源グループを構成する資源の作業能力のバランスに基づいて、グループ構成比率を表わす資源数量、

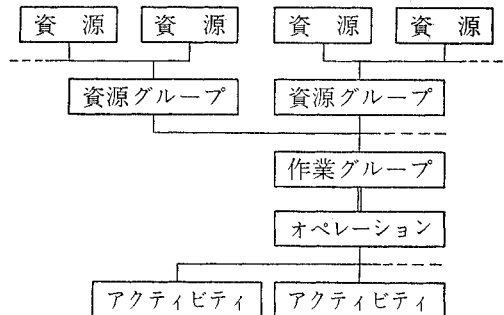


図-1

* 正会員 工修 鹿島建設技術研究所 企画調査室

稼働時間率，共用可能性により規定される。

③ 作業グループ (Operation Group)

次に述べるオペレーション (作業) を遂行するために必要な資源グループの集まりであり，オペレーションと1対1に対応する。その作業グループを構成する資源グループの構成比率により規定される。

④ オペレーション (Work Operation)

工事 (Project) を表わすための作業であり，遂行されるべき作業数量のみにより規定される。工事はオペレーションの集合として表わされる。

⑤ アクティビティ (Activity)

工程上の作業条件や作業順序関係の制約を表現するための作業であり，オペレーションを作業数量で分割したものと定義される。遂行されるべき作業数量と，アクティビティ間の作業順序関係により規定される。

以上に述べた要素の具体例は表-1, 2, 図-4 に示す。

b) 多段決定過程としての定式化^{2),3)}

① 多段決定過程

図-2 に示す多段決定過程において， θ^n ：自由に操作しうる操作変数， x^n ：操作変数 θ^n を通じてのみ操作しうる状態変数， U^n ：まったく操作しえない外乱，とする。上添字 n は本論文を通じて図-2 におけるステージ番号 (1~N) を示すものとする。これらの変数は次式の状態方程式により関連づけられている。

$$x^n = f^n(x^{n-1}, \theta^n, U^n) \dots\dots\dots(1)$$

② 工程の表現

施工工程の推移を図-2 に示す多段決定過程として表現するために，工期単位 ΔT (日) を選び，全体工期 T を 1~N までの N 段階のステージに分割する。

$$T = \Delta T \cdot N \dots\dots\dots(2)$$

③ 操作変数 θ^n

施工段取の選定は次の2種類の操作変数を決定することに置き換えられる。

- u_i^n ：資源 i の搬入または搬出数量
- v_j^n ：アクティビティ j における作業グループの投入数量

④ 状態変数 x^n

- q_i^n ：資源 i の存置数量
- r_j^n ：アクティビティ j の累積出来高
- x_2^n ：全累積費用

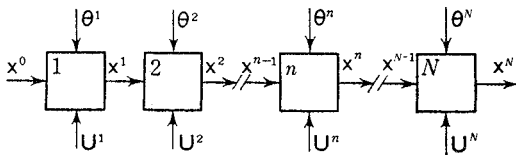


図-2

⑤ 外乱 U^n

外乱に相当する以下の作業条件の推定値を各アクティビティおよび各ステージごとに定数で与える (表-3 参照)。

- 1 作業グループ・時間当り作業能力
- 作業グループ投入数量の限界 (作業グループ最大投入数量)
- 1 日当り稼働時間
- (月当り) 稼働日数

⑥ 状態方程式

$$q_i^n = q_i^{n-1} + u_i^n \dots\dots\dots(3)$$

$$r_j^n = r_j^{n-1} + W_j^n \cdot v_j^n \dots\dots\dots(4)$$

$$x_2^n = x_2^{n-1} + \sum_i \{ RCD_i \cdot \Delta T \cdot q_i^n + RCIM_i \cdot V[u_i^n] + RCEX_i \cdot V[-u_i^n] \} + \sum_j \{ CW_j^n \cdot v_j^n \} \dots\dots\dots(5)$$

ここで W_j^n ：アクティビティ j における1作業グループ当り出来高， CW_j^n ：アクティビティ j における1作業グループ当り稼働費用であり，前述の作業条件などに基づいて計算される^{2),3)}。また $V[x]$ を次式で定義する。

$$V[x] = x : x > 0, V[x] = 0 : x \leq 0 \dots\dots(6)$$

⑦ 制約条件

- その工事で利用できる資源の数量に限度がある。
- 工程上の各ステージでの稼働資源総数量は存置されている資源数量以下である。
- 各アクティビティに投入しうる作業グループ数量に限度がある。
- 各アクティビティの累積出来高は，各アクティビティの総出来高以下である。
- アクティビティの順序関係が守られなければならない。
- すべてのアクティビティが工期内に終了している必要がある。

これらの制約条件は等式または不等式制約条件式により簡単に定式化される^{2),3)}。

⑧ 目的関数

全体費用を最小にする施工段取を選定することが評価基準であるから，目的関数が次式で表わされる。

$$J = x_2^N + \sum_j \{ RCEX_j \cdot q_j^N \} \rightarrow \min \dots\dots\dots(7)$$

上式右辺は最終累積費用と，最後まで存置された資源の搬出費用との和すなわち全体費用を表わす。

(2) 数値計算法

多段決定過程として定式化された工程計画最適化問題は，数値解析の面からは非線型最適化問題とみなされる。工程計画最適化問題の数値計算に関する種々の検討

の結果、詳細については省略するが、制約条件式の処理には SUMT・外点法を、極値探索には共役こう配法 (Fletcher・Reeves の方法) を適用する方法が現段階では最も有効と結論できるようである³⁾⁴⁾。これらの数値計算手法を適用することにより、現実的に妥当な範囲の計算量で工程計画最適化問題の数値解を得ることができる。

(3) SOT の特色

工程計画最適化問題の解として与えられる結果は、施工段取 (工程上における各資源存置数量、および各アクティビティに対する作業グループ投入数量) である。これらの具体例は 表一4, 5 に示す。施工段取が得られることにより、工程上の各時点で遂行される作業数量や累積作業数量などのように、施工段取に基づく種々の結果を得ることができる。前述の工程計画最適化問題の定式化によると、作業条件や要素の定義などに関して要求されるデータの大半が基本的な性格のものである。したがって、SOT を適用するためのデータを準備する際には複雑な配慮がほとんど不必要である。この利点により、実際の工程上で工程計画と実際の施工結果との不一致が生じた場合にも、基本的なデータの一部を変えて最適化計算を行うことにより簡単に実際の施工と工程計画を適合させて、現実に近い工程管理を行ってゆくことができる。SOT の特色は、基本的なデータを準備するだけで簡単に多くの有用な結果が得られることであり、SOT の適用により、工程計画や管理における意志決定のかなりの部分を自動化することができると考えられる。

3. 工事のモデル化に関する問題

(1) 適用対象工事の概要

ここでは、あるロックフィルダム工事における大型施工機械 (重機) の工程計画を具体例として、SOT を実

際の工事に適用する際に生じる現実的問題とその解決方法を述べる。対象とする工事の概要は以下のとおりである。図一3 に盛立て断面図を示すようなロックフィルダムを建設し、かつ水力発電に必要な種々の構造物 (発電所・取水路など) を建設することが工事の主な目的である。工事を構成する主な作業はロックフィルダム建設に伴う河川処理、搬路造成、ダム基礎掘削、原石山掘削、コア材採取、ダム盛立てなどと、構造物建設に伴う掘削、コンクリート打設などである。SOT は主に機械化土工工事を対象として開発された手法なので、コンクリート工事などは適用対象から外し、土工工事関係だけを対象とする。

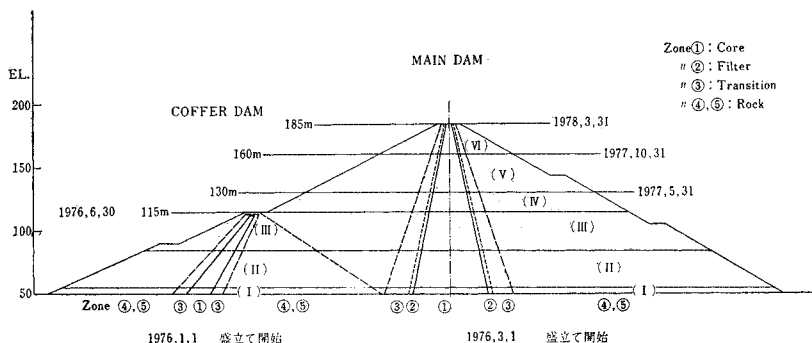
(2) オペレーションとアクティビティ

a) オペレーション・アクティビティ設定の具体例

工程計画における最初の段階として、工事をいくつかの作業に分割して表現する。ここで例にするロックフィルダム工事については、工程上の作業条件や順序関係の制約を表わす作業として、図一4 に順序関係を示すようなアクティビティを設定する。また 表一1 にオペレーションとアクティビティ関係の一部を示す。これらの設定に際して考慮した主な点は以下のとおりである。

① ダム盛立て

図一3 に示すように、対象とするロックフィルダムは Main Dam と Coffer Dam (締切りダム) の2部分から成り、盛立て工程に関して 図一3 中に示すような部分工期が存在する。ダム盛立ての施工に関しては次の2点を考慮しなければならない。第1に、盛立ての初期や終期には準備作業や地形上の制約から単位時間当りの盛立て量を大きくすることができないという例のように、盛立ての各段階で作業条件が異なることである。第2に、施工作業上の制約からロック、フィルター、コアの各部分の盛立て高さに、工程上の各時点で大きな差が生じないようにする必要がある。これらの2点と部分工期を考慮して、盛立て工程を 図一3 に示すように Coffer Dam I~III, Main Dam I~IV の9段階に分割し、それぞ



図一3

表-1 オペレーションとアクティビティ

No.	オペレーション	No.	アクティビティ	作業数量	単位	備 考
1	ダム基礎掘削用搬路掘削 (掘削・運搬・捨土)	1	ダム基礎掘削用搬路掘削	33,000	m ³	土砂 159,500m ³ 岩 33,000m ³
2	ダム基礎両岸掘削 (掘削・運搬・捨土・仮置き) E.L. 185m以上	2	ダム基礎両岸掘削	599,000	m ³	COFFER DAM MAIN DAM 左岸 右岸 左岸 右岸 土砂 73,000m ³ 10,000 6,000 37,000 20,000 岩 599,000m ³ 60,000 31,000 310,000 140,000 捨土場 (D-1) (D-2) (D-1) (D-2) 岩 400,000m ³ を仮置き (S-11) 199,000m ³ 捨土
3	ダム基礎両岸掘削 (掘削・運搬・捨土) E.L. 185m以下	3	ダム基礎両岸掘削	60,000	m ³	COFFER DAM MAIN DAM 土砂 51,000m ³ 28,000 23,000 岩 60,000m ³ 38,000 21,000 捨土場 (D-1)
4	仮設切り盛立て (積み・運搬・盛立て)	4	仮設切り盛立て	33,000	m ³	土流掘 F.左側 土砂 73,000m ³ 40,000 33,000 岩 33,000m ³ 28,000 5,000 73.9-75.10
5	構造物掘削用搬路掘削A (掘削・運搬・捨土)	5	構造物掘削用搬路掘削A	121,100	m ³	土砂 43,200m ³ 構造物I用掘削用搬路 岩 121,100m ³
6	構造物掘削用搬路掘削B	6	構造物掘削用搬路掘削B	155,600	m ³	土砂 76,200m ³ 構造物II用掘削用搬路 岩 155,600m ³
7	構造物I掘削A (掘削・運搬・捨土)	7	構造物I掘削A	171,600	m ³	土砂 107,000m ³ 岩 171,600m ³
8	構造物I掘削B C (掘削・運搬・仮置き)	8	構造物I掘削B	114,400	m ³	岩 114,400m ³ 掘削 0m ³ 捨土 114,400m ³ 仮置き
		9	構造物I掘削C	538,700	m ³	岩 538,700m ³ 掘削 0m ³ 捨土 538,700m ³ 仮置き
9	構造物I掘削D (掘削・運搬・Dam仮送) 盛立ては含まず	10	構造物I掘削D	623,300	m ³	岩 623,300m ³ 掘削 0m ³ 捨土 0m ³ 仮置き 623,300m ³ Dam仮送
10	構造物II-堰土砂掘削 (掘削・運搬・捨土)	11	構造物II-堰土砂掘削	75,000	m ³	構造物II 1,500m ³ ・ III 11,600m ³ ・ IV 13,600m ³ ・ V 15,000m ³ ・ VI 17,000m ³ ・ VII 0m ³ ・ VIII 18,000m ³

れを1つのアクティビティとする。Coffer Dam I, Main Dam I, Main Dam VIは盛立て初期および終期における作業能率の低下を評価するために設定されたアクティビティである。ロック、フィルター、コア盛立て高さの差を小さくするために、9段階に分割した盛立て工程において前の盛立て工程のロック、フィルター、コアのすべてが終了してから次の盛立て工程に進むという順序関係の制約を与える(図-4参照)。3部分盛立ての高低差を小さくするためには、このような制約条件だけでは不十分なので3.(6)で後述する制約条件を別に加える。

② 構造物掘削

適用対象工事の施工計画によると、発電所や取水路などの構造物掘削が主に地盤高に従って施工区分I~VIIIに分割されている。実際の施工においては地形上の制約や施工機械の稼働可能性などに基づく複雑な順序関係が存在するので、上述の施工区分より詳細なアクティビティを図-4に示すように設定する。施工計画によると、構造物掘削の結果生じる掘削ズリをダム盛立てでロック材として流用する方針である。構造物掘削工程がコンクリート打設工程の制約でダム盛立て工程よりかなり先行せざるをえないので、構造物掘削ズリの一部を仮置きする必要が生じる。したがって構造物掘削ズリの処分方

法としては図-5に具体例を示すようにi)ロック盛立て直送、ii)仮置き、iii)捨土の3通りがある。これらの作業は並行して同時に遂行されると考えられるので1つのオペレーションにまとめる。ただし、ロック盛立てについては次に述べる理由により構造物掘削-運搬とは別のオペレーションとする。

③ ロック盛立て材の採取

ロック盛立て材としては構造物掘削ズリが流用されるが、この流用分だけでは数量が不足するので、原石山からもロック材を採取する。ロック材採取の関係は図-6に示される。構造物掘削に関しては図-4に示すような複雑な順序関係の制約があり、ロック盛立てに関しても図-4の下部に示すような順序関係の制約がある。SOTにおいては、並行して行われる作業をできるだけ1つのオペレーションにまとめる方針である。しかし、上述のように構造物掘削とロック盛立てに関して別の施工条件が存在する場合には、掘削-運搬-盛立てという一連の作業を1つのオペレーションにまとめることが適切な処置ではない。ここでは構造物掘削-運搬作業とロック盛立て作業を別々のオペレーション・アクティビティとして、それぞれの施工条件を表わす。このため3.(6)で後述するよう

に、掘削-運搬量と盛立て量が常に等しいという制約条件を別に考慮しなければならない。

④ その他

SOTは大型電子計算機の利用を前提とするから、SOTを適用しうる工事規模は、利用できる電子計算機の記憶容量や計算速度などにより制約を受ける。このため、並行して遂行される作業はできるだけ1つのオペレーションにまとめて表わすことにより、オペレーションやアクティビティ総数の削減を図る必要がある。たとえば表-1のダム基礎掘削用搬路掘削という作業は岩掘削33,000m³と土砂掘削159,500m³から成る。この作業は岩掘削と土砂掘削の2つのオペレーションに分けて表わす方が簡便であるが、ここでは2つの作業がまったく並行して遂行されるとみなし、表-1に示すように岩掘削数量だけで表わして1つのオペレーションとする。そして、後述するように作業グループを適切に設定することにより、岩掘削が終了する時点で土砂掘削も終了するという条件を表わすことにする。図-4から明らかのように、トランジション盛立てやフィルター盛立てなどの作業も同じ考え方でロック盛立てとコア盛立てというオペレーションにそれぞれ含まれている。

b) オペレーション・アクティビティの設定方針

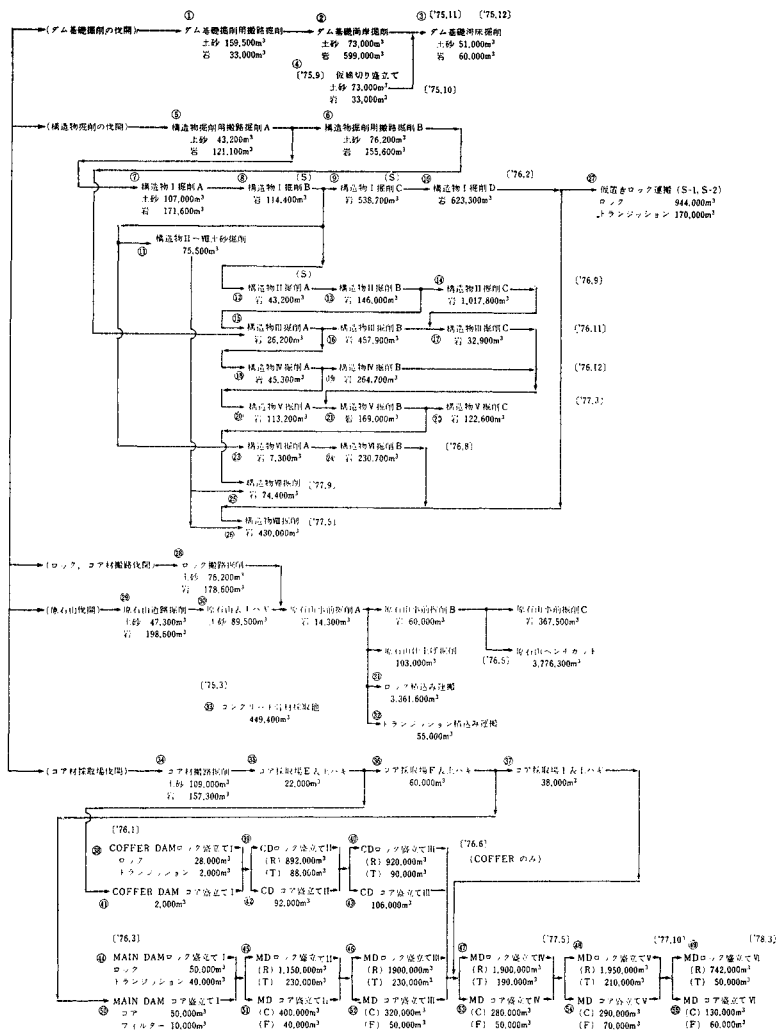


図-4

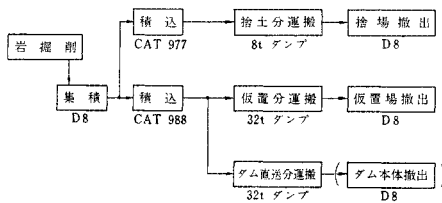


図-5

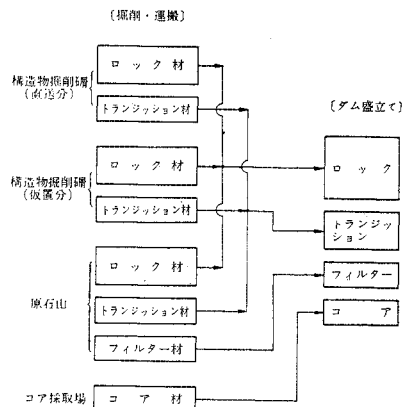


図-6

オペレーションとアクティビティの設定により、いかに実際に近く工事を表現するかは、工事のモデル化における最も基本的な問題である。これらの設定に際しては a) で例をあげたような現実的な要素に対する配慮と併せて、考慮対象資源の選択や工程計画作成の立場などに関する総合的な判断が要求される。筆者が SOT を実際の工事に適用した限りでは、ロックフィルダム工事のように複雑な作業の組合せから成る工事についてはオペレーションやアクティビティを完全にシステマティックに設定することが困難であり、各工事の特徴に応じた工夫が必要なのである。ただし、土地造成工事のように比較的簡単な土工作業の組合せから成る工事については、これらの設定を規格化することが可能と判断される。したがって、工種・作業コードなどによる規準を参考にし、各工事の特性を考慮したオペレーション・アクティビティを設定する方法が現段階では最も現実的といえるであろう。

(2) 作業グループと資源グループ

a) 作業グループと資源グループの具体例

表-1 に例を示したオペレーションを遂行するために必要な資源の組合せとして作業グループと資源グループを設定する。資源グループは基本的定式化における定義からも明らかのように、工程計画や見積り作業の規格化を意識した概念である。通常組合せて用いられる機械などの組合せを1つのセットとして与えておくことにより業務の規格化が期待できるからである。このような規格化が現時点では十分に行われていないので、ここでは各オペレーションを遂行するために必要な資源の組合せを直接、作業グループとして設定することにし、その一部を表-2 に示す。ただし、ここではすべての資源を共用可能とし、資源数量だけで作業グループにおける資源の組合せ比率を表わす。表-2 の作業グループ・ダム基礎掘削用搬路掘削を例にとると、この作業グループに対応するオペレーション(表-1)は岩掘削 33 000 m³、土砂掘削 159 500 m³ から成る。岩掘削、土砂掘削ともにブルドーザ D8 を用いるとし、それぞれに対する D8 の時間当り作業能力が表-2 に示すように 106 m³/hr、

169 m³/hr と与えられたとする。表-1 に示すように、このオペレーションは岩掘削数量 33 000 m³ で表わされているから、岩掘削押土に用いる D8 を基準として資源の組合せ比率を与える(資源組合せ比率の基準とした資源については表-2 の資源稼働率欄に * 印がつけられている)。岩掘削押土用 D8 の 1.0 台に対する土砂掘削押土用 D8 の必要台数は次のように 3.03 台と求められる。

(i) 岩掘削延べ稼働時間

$$= 33\,000\text{ m}^3 / 106\text{ m}^3/\text{hr} \cdot \text{台} = 311\text{ hr} \cdot \text{台}$$

(ii) 岩掘削と同期間で土砂掘削を行うために必要な土砂掘削の時間当り作業能力

$$= 159\,500\text{ m}^3 / 311\text{ hr} \cdot \text{台} = 512.9\text{ m}^3/\text{hr} \cdot \text{台}$$

(iii) 土砂掘削押土用 D8 の必要台数

$$= 512.9\text{ m}^3/\text{hr} \cdot \text{台} / 169\text{ m}^3/\text{hr} \cdot \text{台} = 3.03$$

このような操作に基づく作業グループの設定は多少複雑であり、前述のように岩掘削と土砂掘削を別のオペレーションに分けた方が簡便である。しかし、このような操作は簡単に自動化できるので、実際の業務で SOT を利用する際には岩掘削と土砂掘削を別のオペレーションとして設定する。そして、最適化計算を行う際に、オペレーションやアクティビティの総数を少なくするための便宜的な措置として、上述のように1つのオペレーショ

表-2 作業グループと資源グループ

作 業 No. (オペレーション)	機 械 (資 源)	No.	作 業 内 容 対象 処理 作業	時間当り 作業能力	インプットデータ			備 考
					資源数量	資源稼働率	共用可能性	
1 ダム基礎掘削用 搬路掘削	D8	1	岩 掘土 押 土	106m ³ /hr	1.00	*	可	岩 33,000m ³ /106m ³ /hr・台 = 311hr・台 (延稼働時間) 土砂 159,500m ³ /311hr・台 = 512.9m ³ /hr・台 512.9m ³ /hr・台 / 169m ³ /hr・台 = 3.03
	D8	1	土砂 掘土 掘 掘	169	3.00			117m ³ /hr/76m ³ /hr = 1.54
	D50	3	掘込み	117	1.00	*		117m ³ /hr × $\frac{480,060}{599,000} = 78.1\text{m}^3/\text{hr}$ (換算値)
	951C							" $\frac{199,580}{599,000} = 38.9\text{m}^3/\text{hr}$ (12.1)
	UHO3							" 38.9m ³ /hr/25.4m ³ /hr = 1.53
	20クランプ Rt	6	岩 掘土	25.4	1.53			" 38.9m ³ /hr/167m ³ /hr = 0.23
	D8	1	岩 掘土	167	0.23			" 78.1/25.4 = 3.07
	20クランプ Rt	6	岩 掘土	25.4	3.07			" 78.1/167 = 0.47
	D8	1	岩 掘土	167	0.47			" $\frac{599,000\text{m}^3}{117\text{m}^3/\text{hr} \cdot \text{台}} = 5,119.7\text{hr} \cdot \text{台}$ 1.69 $\frac{73,000\text{m}^3}{25,119.7\text{hr} \cdot \text{台}} = 14.3\text{m}^3/\text{hr}$, 14.3/122 = 0.12
	CAT988	3	土砂 掘土 押 土	122	0.12			14.3/117 = 0.12
20クランプ D8	6		34.8	0.41			14.3/34.8 = 0.41	
D8	1		500	0.03			14.3/500 = 0.03	
3 ダム基礎掘削用 搬路掘削	D8	1	岩 掘土 押 土	76	1.54			117/76
	CAT988	3		117	1.00	*		"
	20クランプ Rt	6		25.4	4.61			117/25.4
	D8	1						117/167
	D8	1	土砂 掘土 押 土	122	0.82			" $\frac{60,000\text{m}^3}{117\text{m}^3/\text{hr} \cdot \text{台}} = 512.8\text{hr} \cdot \text{台}$ 1.69 $\frac{51,000\text{m}^3}{512.8\text{hr} \cdot \text{台}} = 99.5\text{m}^3/\text{hr}$
	CAT988	3		117	0.85			99.5/122 = 0.82
	20クランプ D8	6		34.8	2.86			99.5/117 = 0.85
	D8	1		500	0.20			99.5/34.8 = 2.86
	D8	1						99.5/500 = 0.20
	D8	1	土砂 掘土 押 土	181	1.43			" $\frac{33,000\text{m}^3}{117\text{m}^3/\text{hr} \cdot \text{台}} = 282.1\text{hr} \cdot \text{台}$ 1.69 $\frac{73,000\text{m}^3}{282.1\text{hr} \cdot \text{台}} = 258.8\text{m}^3/\text{hr}$
CAT988	3		181	1.43			258.8/181 = 1.43	
20クランプ D8	6		34.8	7.44			258.8/181 = 1.43	
D8	1		148	1.75			258.8/34.8 = 7.44	
D8	1						258.8/148 = 1.75	
5 構造物掘削用 搬路掘削A	D8	1	岩 掘土 押 土	106	3.0	*		岩 121,100m ³ /106m ³ /hr・台 = 1,142.5hr・台 土砂 43,200m ³ /1,142.5 = 37.8m ³ /hr 37.8/109 = 0.22
	D8	1	土砂 掘土 押 土	169	0.22			"
6 構造物掘削用 搬路掘削B	D8	1	岩 掘土 押 土	106	1.0	*		岩 155,600m ³ /106m ³ /hr・台 = 1,467.9hr・台 土砂 76,200m ³ /1,467.9 = 51.9m ³ /hr 51.9/169 = 0.31
	D8	1	土砂 掘土 押 土	169	0.31			"

にまとめる操作を自動的に行わせる方法が便利であろう。

b) 作業グループと資源グループ設定に関する問題

基本的定式化におけるように、作業グループの投入数量 v_j^n を操作変数（決定変数）にする場合には、作業グループを構成する資源の組合せ比率が固定されている。実際の施工においては、上述の基本的定式化が妥当でない場合が生じる。たとえばブルドーザによる掘削押土作業に D8 と D7 という 2 種類の機械を投入する場合を考える。D8 の利用可能数量に限界があり、D8 が不足したら D7 を代わりに投入するような計画によると、作業グループにおける D8 と D7 の組合せ比率が一定ではなくなる。この問題を正確に定式化するためには、作業グループの投入数量ではなく、資源グループの投入数量を操作変数に選ぶ必要がある。この場合には式 (4) が次式のように修正される。

$$r_j^n = r_j^{n-1} + \sum_m (W_{jm}^n \cdot v_{jm}^n) \dots\dots\dots (8)$$

ここで W_{jm}^n , v_{jm}^n はそれぞれ第 n ステージ・アクティビティ j における資源グループ m の 1 資源グループ当り出来高と資源グループ投入数量であり、 W_{jm}^n は基本的定式化における W_j^n と同様に計算される。式 (5) や制約条件式なども同じ考え方で簡単に修正される。このように資源グループ投入数量を操作変数として最適化計算を行う場合には、全体費用最小化という観点からみて効率の悪い資源グループの投入数量が小さくなるであろう。したがって、あらかじめ数種類の資源グループを 1 つのオペレーションに与えて最適化計算を行うならば、種々の制約を考慮したうえで全体的にみて最も経済的な資源グループを選択しうる可能性がある。ただし、施工機械などの選択には経済性だけでなく、土質その他の作業条件の影響が大きいので、上述の方法が現実的には必ずしも妥当な方法とは結論できない。

c) 作業グループと資源グループの設定方針

オペレーションの設定を規格化することが前述のように困難な場合が多いので、オペレーションと 1 対 1 に対応する作業グループの設定も一般的には規格化しにくいようである。一方、施工上の制約を表わすために、似た内容の作業を、少しずつ作業グループの構成が異なる別々のオペレーションとして表わさざるをえない場合が多い。したがって、実際の工事について作業グループを直接、資源の集合として設定してみると、いくつかの作業グループに同じ資源の組合せがしばしば出現する。このような資源の組合せを資源グループとして、あらかじめ設定しておくならば、作業グループの設定がシステムティックになり、業務の簡素化が行われるであろう。作業グループの設定と関連づけた資源グループの標準化が

工程計画や見積り作業の規格化の糸口を与えると考えられる。

(3) 資源

a) 資源費用成分

実際の工事においては、基本的定式化で述べた 4 つの資源費用成分のほかに次のような費用が生じる場合がある。

① 越冬費用（現地保管費用）

数年を費やして山岳地帯でダム建設を行う場合には、大型施工機械の越冬費用が生じる。越冬費用をそのまま評価するためには、基本的定式化における 4 つの資源費用成分のほかに、越冬費用成分を新たに加える必要がある。組立解体費などのすべての費用を含めて、資源 i 1 台を一冬越冬させるために必要な費用を RCW_i とする。工期が K 年にわたるとして、第 k 年におけるステージ数（工期単位数）を M_k とする。

$$M_1 + M_2 + \dots + M_k + \dots + M_K = N \dots\dots\dots (9)$$

第 $(M_k + 1)$ ステージで存置されている資源数量が越冬資源数量に相当するから、全越冬費用は次式で求められる。

$$\sum_{k=1}^{K-1} \sum_i \{q_i^{(M_k+1)} \cdot RCW_i\} \dots\dots\dots (10)$$

この費用を目的関数式 (7) に加えることにより、越冬費用がそのまま評価される。

② 償却費用

施工機械などの購入費用を一つの建設工事だけで償却させる場合には、償却費用という新たな資源費用成分が生じる。償却費用は、その工事に資源を投入するときのみ生じる費用であるから、基本的定式化における資源費用成分である搬入費用とまったく同じ性格をもつ。したがって償却費用が生じる場合には、その費用を搬入費用に加えることにより、そのまま評価できる。

これらの例から明らかなように、基本的定式化における資源費用成分の意味を適当に拡張して解釈するか、あるいは必要に応じて新たな資源費用成分を加えることにより、実際の工事で生じる種々の費用をそのまま評価できると判断される。

b) 考慮対象資源の選択

大型ショベルなどの重機械と、ポータブル・コンプレッサなどの小型機械の資源費用成分の数値には大きな差があるので、これらと同じレベルの資源として扱うことは最適化計算における数値計算上の精度からみて不利である。このような資源のとり扱いは、工程計画における精度のバランスからみても妥当ではない。SOT を適用する際には、大型機械などのように多額の資源費用成分をもつ資源だけを対象として最適化計算を行い、比較

$$r_j^n = r_j^{n-1} + W_j^n \cdot v_j^n \dots\dots\dots(16)$$

$$x_2^n = x_2^{n-1} + \sum_j (CW_j^n \cdot v_j^n) \dots\dots\dots(17)$$

式(14)~(17)における記号の意味は、上添字 m が m ブロックの変数を表わすことを除き、式(3)~(5)における意味と同一である。

式(7)に対応する目的関数は次式で表わされる。

$$J = \{x_2^M + \sum_i (RCEX_i \cdot q_i^M)\} + x_2^N \rightarrow \min \dots\dots\dots(18)$$

制約条件式も図-8に示す ΔT ブロックと Δt ステージの対応を考慮することにより簡単に定式化される。

b) 考察

以上に述べた方法により、資源搬入搬出の制約を満たす妥当な数値解が得られる。この方法は基本的定式化による方法より一般に計算量が少なく、数値解も安定している。また図-7に概念的に示すように、この方法により、基本的定式化による方法より一層の資源存置数量の均し (Resource Leveling) が行われる場合が多い。したがって、この方法は数値計算の面からも、実際的な応用の面からも有利な方法といえる。ただし、本論文の数値計算モデルは基本的定式化に従っている。

(6) 対象工事個々の制約条件

実際の工事においては、基本的定式化で述べた一般的な制約条件のほかに種々の制約条件が存在する。対象としているロックフィルダム工事において考慮した制約条件を以下に列挙する。

a) 部分工期

図-3に示したように、ダム盛立て作業についてはいくつかの部分工期の制約がある。このほか、雨期などの影響で仮締切り作業の期間および期日が制約されるなど、多くの作業について開始可能期日や最遅終了期日が指定されている。このような部分工期の制約は、部分工期以外のステージにおける作業グループ最大投入数量 (基本的定式化における作業条件) を0とすることにより簡単に表わされる。作業グループ最大投入数量に関する制約条件式は操作変数だけを含むから、この制約条件が収束計算の過程で侵されるときには単純に制約条件の境界値をとればよい^{3),4)}。したがって、部分工期の制約として作業グループ最大投入数量が0とされている場合には、作業グループ投入数量が0以外の値をとりえないから、部分工期の外では、その作業グループ投入数量に関する目的関数の計算を行う必要がないことになる。このため部分工期を与えることは数値計算量を削減する上でも効果的な措置である。

b) ダム盛立てに関する制約条件

ダム盛立ての施工中に、ロック、フィルター、コアの盛立て高さに大きな差が生じないようにするには、前述

のように、9段階に分割した盛立て工程に関するアクティビティ順序関係の制約を与えるだけでは不十分である。そこで、工程上の各ステージにおける3部分の盛立て作業量が、9段階に分割した各盛立て工程における3部分の盛立て総数量の比率に従うという制約を別に与える。

$$\begin{aligned} & \text{第 } n \text{ ステージのロック盛立て作業量/第 } n \text{ ステージのコア盛立て作業量} = \text{その盛立て工程のロック盛立て総数量/その盛立て工程のコア盛立て総数量} \dots\dots\dots(19) \end{aligned}$$

上式が満たされれば、各盛立て工程におけるロック、コア盛立て総数量の比率に従って、各ステージでのロック、コア盛立てが並行して行われる。そして、各盛立て工程のロック盛立てが終了する時点で、その盛立て工程のコア盛立ても同時に終了することになる。このような制約を与えても、ダム本体の形の影響で、ロック・コア盛立てには多少の高低差が生じる可能性がある。しかし、盛立て工程は Main Dam 6 段階、Coffer Dam 3 段階と比較的細かく分割してあるから、式(19)が満たされれば、ロック・コア盛立て高さの差はそれほど大きくならないと判断される。式(19)は、ロック・コア盛立てについて異なる、月当り稼働日数率などの作業条件をそのまま考慮したうえで、基本的定式化における操作変数や状態変数などを用いて定式化できる。

c) ロック材採取に関する制約

図-6について述べたように、ロック盛立て作業については掘削-運搬作業とダム盛立て作業を別のオペレーションに分けている。そこで当然の制約として、掘削-運搬数量と盛立て数量が等しいという条件が存在する。

$$\begin{aligned} & \text{各ステージの構造物掘削ブリダム直送分中の} \\ & \text{ロック材数量} + \text{各ステージの仮置きロック材運搬数量} + \text{各ステージの原石山採取ロック材運搬数量} = \text{各ステージのロック材盛立て数量} \dots\dots\dots(20) \end{aligned}$$

上式も操作変数や状態変数などにより容易に定式化される。

b), c) で述べた制約条件式は、基本的定式化における制約条件式と同様に SUMT・外点法により処理できる。

4. 数値計算に関する問題

(1) 数値計算量の削減

a) スケーリング (Scaling)

土地造成工事の機械化土工のように、似た内容の作業で構成される工事においては、各作業の時間当り作業能

における多面的な要素を客観的に表現しうるモデルが得られていなかったことがあげられる。筆者は実際の施工における意志決定問題をできるだけ現実に近い形で数学的に定式化することを目標として、工程計画管理の最適化に関する一連の検討を行った^{1)~5)}。その結果、工程計画最適化手法 (SOT) と称する1つの新たな手法が得られたと考えられる。本論文では、必要に応じて多少の修正や工夫が加えられることにより、SOT を実際の工事で汎用的に利用できることが示された。筆者は実際の工事のいくつかに、SOT を試験的に適用して妥当な結果を得ている。しかし、SOT が広範に利用されるためには、さらに多くの試行と組織的検討が必要である。残された検討課題の大半は、SOT の実際的な適用実績を積み重ねたうえで解決されるべきものである。今後、SOT が種々の分野で検討されることを期待したい。

最後に、この研究の遂行に際してご指導とご助力をいただいた 京都大学工学部土木工学教室 皇昭治郎教授、同太田秀樹助教授に感謝の意を表します。また、筆者に研究環境を与えて下さり、常に有益なご助言とご批判を与えて下さった 鹿島建設 (株) 電子計算センター 庄子幹雄次長に感謝致します。さらに、本論文の作成に際して多大のご助力をいただいた鹿島建設 (株) 多田義雄常務取締役と永山岸夫、福永康昭、時枝 甫、鷹野 襄、

工藤幸光、吉添 孝の各氏、および同技術研究所 有泉昌次長に感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 島・荒井：土工機械の待合せに関する基礎的考察，土木学会論文報告集，No. 194，pp. 127~140 (1971)。
- 2) 庄子・荒井：機械化土工における工程計画管理最適化問題の定式化，土木学会論文報告集，No. 214，pp. 57~70 (1973)。
- 3) 庄子・荒井：こう配法による機械化土工・工程計画管理の最適化，土木学会論文報告集，No. 215，pp. 61~74 (1973)。
- 4) 庄子・荒井：共役こう配法による機械化土工・工程計画管理の最適化，土木学会論文報告集，No. 230，pp. 55~67 (1974)。
- 5) 荒井：不確定条件下における建設工事工程計画管理，土木学会論文報告集，No. 236，pp. 145~154 (1975)。
- 6) 庄子・荒井：ロックフィルダム工事における重機工程計画，土木学会第29回年次学術講演会講演概要集 IV，pp. 232~233 (1974)。
- 7) 庄子・荒井：宅地造成工事における重機工程計画，土木学会第30回年次学術講演会講演概要集 IV，pp. 326~327 (1975)。
- 8) D.A. Wismer, ed. : Optimization Methods for Large-scale Systems, McGraw-Hill (1971)。
- 9) T.M. Antill, R.W. Woodhead : Critical Path Methods in Construction Practice, John Wiley & Sons (1965)。
- 10) G.E. Deatherage : Construction Scheduling and Control, McGraw-Hill (1965)。
- 11) D.M. Himmelblau : Applied Nonlinear Programming, McGraw-Hill (1972)。 (1975. 2. 14・受付)