

工程計画を考慮した搬土計画手法

A HAULING PLANNING METHOD FOR EARTH MOVING BASED ON CONSTRUCTION SCHEDULING

荒井 克彦*

By Katsuhiko ARAI

1. まえがき

機械化土工工事を経済的に行うためには、適切な搬土計画を作成することが不可欠である。たとえばロックフィルダムやアースダムなどのフィルダム工事においては、ロック材やコア材の運搬計画が施工計画における重要な位置を占める。フィルダム工事においては、洪水吐などダム付帯構造物工事に伴って生じる掘削ズリをダム盛立材として流用する機会が多い。付帯構造物の掘削は、構造物構築に要する工期の制約から、ダム盛立て開始よりかなり先行するのが普通である。このため、盛立材に流用する掘削ズリを一時「仮置き」する必要が生じる。これらのことから、フィルダム工事においては場所的な搬土計画だけでなく、複雑な作業順序関係などを考慮しつつ、工程的・場所的の両面で適切な搬土計画を作成する必要がある。フィルダム工事だけでなく、このような問題が生じる機械化土工工事は少なくないと考えられる。

従来、土地造成工事を主対象とする搬土計画手法が多数の組織で開発され、実際の工事に有効に適用されてきた^{1)~3)}。これらの手法の多くは次の考え方に基づいている。土工区域をメッシュ分割し、メッシュ間での土工量(搬土量×運搬距離)の合計が最小になるように搬土量を決定する。これらの手法は本来、場所的な土運搬のみを対象とするから、上述のような工程計画に関連する搬土計画問題を取り扱うことが困難である。

著者は先に SOT (Scheduling Optimization Technique) と称する工程計画手法を提案した⁴⁾。SOT は工程上の施工機械・作業員の操作に注目して、作業の出来高・順序関係・費用などを現実近く表現し、合理的に工程計画を決定する。上述のように工程計画を考慮しなければならない搬土計画問題も、工程上の施工機械・作

業員の操作に注目することにより簡潔に表現される可能性が高い。以下では SOT の考え方を発展させて、工程計画を考慮し得る新たな搬土計画手法の開発を試みる。

2. 工程計画を含む搬土計画モデル

(1) 対象とする搬土計画モデルの概要

工程計画を含む搬土計画問題を記述するために具体的なモデル工事を例にとる。説明の便宜上、図-1 に示す、きわめて単純なアースダム盛立工事を考える。図-1 において、掘削部 A, B, C はダム付帯構造物の掘削部分を表わす。地形的な制約などにより、A→B→C の順序で掘削が進められるとする。簡単のため、掘削土中の不良土の捨土はなく、掘削土の全部がダム盛立材に流用されるとする。これらの掘削作業はダム盛立作業より先行して行われるため、図-1 に示すように、掘削土の一部を仮置きする必要が生じる。掘削部 A, B, C の各掘削土量自体は与えられるが、そのうち何割かが仮置きされ、何割かがダムに直送されるかは当然未定である。

ダム付帯構造物掘削土の流用だけでは盛立材が不足するので、図-1 に示すように、盛立土採取場から盛立土をダムへ直送する。

ダム盛立ての作業条件などを表わすため、図-1 に示

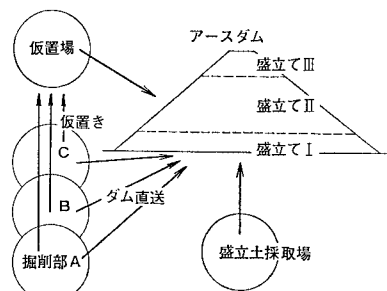


図-1 対象とする搬土計画モデル

* 正会員 工博 福井大学助教授 工学部建設工学科

すように、ダム盛立てを3段階に分ける。掘削直送土、仮置土、盛立土がどの盛立段階でどのように用いられるかも未定である。

(2) 搬土計画問題モデル化の基本方針

(1) で述べたようなフィルダム工事の搬土計画においては、工程上でどのような搬土を行うか(工程計画と関連づけた搬土計画の作成)が重要な問題である。本論文では、このような搬土計画問題を最適化問題として数式的にモデル化する。すなわち、実際工事の種々の条件を、制約条件式により、現実によく表現したうえで、適切な評価基準を満たす搬土計画を決定する問題として、搬土計画問題モデル化する。モデル化の妥当性・合理性は、制約条件式や評価基準がいかに関実に近く設定されているかで決まる。このような方針のもとに以下では機械化土工工事を表現するための準備的な定義を述べる。この定義に従って、工程計画を含む搬土計画問題を明確に(数量的に)記述する。これらの準備に基づいて3.で最適化問題としての定式化を行う。初めに述べたように、本論文の手法はSOTの拡張であり、モデル化の基本方針もSOTにおけるのと同じである。なお、このようなモデル化の妥当性については、この手法を多数の実際工事に適用したうえで改めて論じることとする。

(3) 準備的な定義

a) 施工を表現するための要素

一般的な意味での施工作业=オペレーション(Work Operation)は図-2に示すように、施工機械や作業員の組合せにより遂行される。工程上の作業順序関係や作業条件を表すためには、このオペレーションを図-2に示すように分割して、工程計画上の作業=アクティビティ(Activity)を定義する必要がある。これらの具体例については後述する。

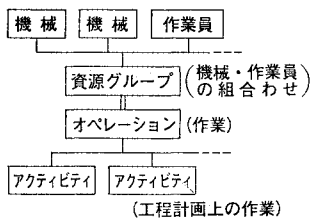


図-2 施工を表す要素

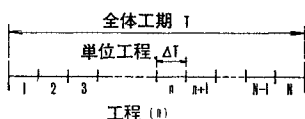


図-3 工程の表現

図-3に示すように、全体工期 T を N 工程に分割し、工程の進行を工程 $n(n=1, 2, \dots, N)$ で表わす。 $\Delta T = T/N$ を単位工程と称する。本論文の例では $\Delta T=15$ 日(0.5 か月)とする(表-7 参照)。

(4) モデルの明確な表現

a) 作業順序関係

図-1について述べた、作業順序関係と作業条件を表わすための作業=アクティビティを図-4に示すように設定する。

b) 作業数量

図-4に示すアクティビティの作業数量を表-1右欄に示すように与えられたとする。アクティビティがまったく同じ施工機械・作業員の組合せにより遂行されるときは表-1左欄に示すようなオペレーションに適当にまとめられる。逆にアクティビティは、基本的な施工作业であるオペレーションを、工程計画における作業順序関係と、作業条件を表わし得るように分割したものである(図-2参照)。オペレーション l の作業数量を QO_l 、アクティビティ j の作業数量を QA_j 、オペレーション l に含まれるアクティビティの集合を A_l とすると次式が成立する。

$$QO_l = \sum_{j \in A_l} QA_j \dots \dots \dots (1)$$

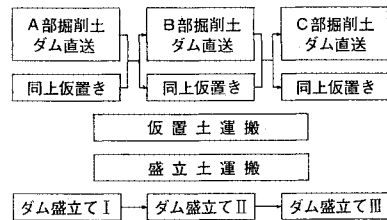


図-4 作業順序関係

表-1 作業数量

オペレーション(作業)			アクティビティ(作業)				
No.	名称	数量(QO _l)	単位	No.	名称	数量(QA _j)	
1	掘削土 ダム直送	未定	m ³	1	A部掘削土ダム直送	計 100 000	
				2	B部 "		計 200 000
				3	C部 "		
2	掘削土 仮置き	未定	m ³	4	A部掘削土仮置き	計 300 000	
				5	B部 "		
				6	C部 "		
3	仮置土運搬	未定	m ³	7	仮置土運搬	未定	
4	盛立土運搬	400 000	m ³	8	盛立土運搬	400 000	
5	ダム盛立て	1 000 000	m ³	9	ダム盛立て I	200 000	
				10	" II	700 000	
				11	" III	100 000	

表-1 中のアクティビティ「掘削土ダム直送」、
「掘削土仮置き」については、前述のようにそれ
ぞれの作業数量は未定であり、表-1 中に示すよ
うに、両者を合計した掘削土量のみが与えられ
る。このことから表-1中の「仮置土運搬」の作
業数量も未定である。

c) 部分工期・全体工期

各作業(アクティビティ)には表-2に示す
部分工期があるとす。たとえば「掘削土ダム直
送」などの構造物掘削関係のアクティビティは7
月末までに終了することが要求されている。「ダ
ム盛立て」は一部が4月から、本格的には6月か
らしか開始できないとする。このような制約によ
り掘削土の仮置きが必要になる。

全体工期は1月~12月の1年とする(N=24)。

d) 機械・作業員の組合せ

表-1に示した各作業(オペレーション)
を施工するために必要な機械・作業員の組合
せ(資源グループ)を表-3に示すように設
定する。表-3中の「掘削土ダム直送」を例
にとる。ダム付帯構造物掘削場でブルドーザ
25tを用いて掘削集積し、ホイールローダ3
m³で積込み、ダンプトラック20tでダムま
で運搬する。これらの機械の作業能力のバラ
ンスから、各機械の組合せ比率を表-3中
に示すように決定する。オペレーション*l*に
対応する資源グループ*l*における、機械・作業
員*i*の組合せ比率を R_{li} と表わす。

e) 機械・作業員の単価

機械・作業員ごとに表-4に示す単価を
与える。 CD_i : 機械・作業員*i*の固定単価(現
場に置くだけで生じる費用—円/日・台),
 CH_i : 稼働単価(稼働に伴って生じる費用—
円/時間・台), CI_i : 搬入単価(搬入に伴う
費用—円/回・台), CE_i : 搬出単価(搬出
に伴う費用—円/回・台)。

f) 作業条件

作業条件は工程上の各時点および各作業ご
とに与える。すなわち、工程 n ・アクティビ
ティ j における資源グループ l の時間当
たり作業数量: $WH_j^n (j \in A_l)$, 資源グループ
 l の最大投入数量: VM_j^n , 1日当たり実稼働時間:
 RH_j^n , 月当たり稼働日数率: UD_j^n を表-5, 6
に示すように与える。たとえば表-5のアクティビティ「ダム
盛立てI」においては、盛立初期で作業が順調に進まな
いことを考慮するため、資源グループの作業能力を通常
の80%に落して与えている。

表-2 部分工期・全体工期

アクティビティ		月											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	A部掘削土ダム直送												
2	B部 "												
3	C部 "												
4	A部掘削土仮置き												
5	B部 "												
6	C部 "												
7	仮置土運搬												
8	盛立土運搬												
9	ダム盛立て I												
10	" II												
11	" III												

表-3 各作業に必要な機械・作業員の組合せ(資源グループ)

No.	オーシェン (作業)	機械・作業員 (資源)	作業内容		時間当たり 作業能力 (m ³ /h)	組合せ比率 (R_{li})
			場所	用途		
1	掘削土 ダム直送	ブルドーザ 25 t	掘削場	掘削集積	230	1.0
		ホイールローダ 3 m ³	"	積込み	230	1.0
		ダンプトラック 20 t		運搬	20	11.5
2	掘削土 仮置き	ブルドーザ 25 t	掘削場	掘削集積	230	1.0
		ホイールローダ 3 m ³	"	積込み	230	1.0
		ダンプトラック 20 t		運搬	25	9.2
3	仮置土運搬	ブルドーザ 25 t	仮置場	敷均し	400	0.6
		ブルドーザ 25 t	仮置場	集積	230	1.0
		ホイールローダ 3 m ³	"	積込み	230	1.0
4	盛立土運搬	ダンプトラック 20 t		運搬	20	11.5
		ブルドーザ 25 t	盛立土場	掘削集積	230	1.0
		ホイールローダ 3 m ³	"	積込み	230	1.0
5	ダム盛立て	ブルドーザ 25 t	ダム本体	敷均し 転圧	350	1.0
		ソイルコンパクタ	"	転圧	175	2.0

表-4 機械・作業員の単価

No.	機械・作業員名称	固定費用 (CD_i)	稼働費用 (CH_i)	搬入費用 (CI_i)	搬出費用 (CE_i)	利用可能 数 (QM_i)
		円/日	円/時間	円/回	円/回	
1	ブルドーザ 25 t	30 000	7 000	200 000	200 000	100
2	ホイールローダ 3 m ³	35 000	8 000	200 000	200 000	100
3	ダンプトラック 20 t	20 000	3 000	150 000	150 000	100
4	ソイルコンパクタ	30 000	4 000	300 000	300 000	100

3. 問題の定式化

(1) 定式化に必要なデータ

モデル工事を明確に表現するために用いた表-1~6,

表-5 作業条件 (その1)

アクティビティ	時間当たり作業能力 (WH _{jⁿ}) (m ³ /h)	資源グループ最大投入数 (VM _{jⁿ})	1日当たり実稼働時間 (RH _{jⁿ}) (h)
1	A部掘削土ダム直送	230	10
2	B部	230	10
3	C部	230	10
4	A部掘削土仮置き	230	10
5	B部	230	10
6	C部	230	10
7	仮置土運搬	230	10
8	盛立土運搬	230	10
9	ダム盛立て I	280	3
10	〃 II	350	10
11	〃 III	280	2

表-6 作業条件 (その2): 月当たり稼働日数率—全作業共通

月	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
稼働日数率 (UD _{jⁿ})	0.77	0.51	0.54	0.58	0.59	0.48	0.77	0.73	0.63	0.41	0.70	0.64

図-4 がそのまま問題の定式化に必要なデータとなる。これらのデータが施工計画における基本的かつ本質的なものであり、搬土計画問題を現実近くに表現するためには不可欠のものであることを強調しておく。このため、搬土計画の担当者は搬土計画や工程計画に関する複雑な配慮を行うことなしに、時間当たり作業能力や機械単価などの基本的データを準備するだけでよい。当然のことながら、これらの基本的データは過去の実績や計画担当者の経験の蓄積に基づく、信頼性の高いものでなければならない。基本的データの精度を高めること、本手法により得られた結果の妥当性を検討することなどにおいて、経験ある技術者の高度な判断力が不可欠である。

(2) 定式化のための数学モデル—最適化問題

上述のデータに基づいて、工程計画を含む搬土計画問題を次の最適化問題として定式化する^{6),7)}。

$$\left. \begin{array}{l} \text{決定変数: } \mathbf{x} \\ \text{制約条件: } \mathbf{h}(\mathbf{x}) = \mathbf{0}, \mathbf{g}(\mathbf{x}) \leq \mathbf{0} \\ \text{目的関数: } J = \phi(\mathbf{x}) \rightarrow \text{minimum} \end{array} \right\} \dots\dots(2)$$

前述のように、本手法は SOT を拡張したものであるため、決定変数・制約条件・目的関数は制約条件式が一部変わる点を除くと SOT と同一である。これらの選択の妥当性は SOT においてすでに実証されているので詳細な説明は省略し、定式化の結果のみを以下に述べる⁴⁾。

(3) 最適化問題としての定式化

a) 決定変数

q_i^n : 工程 n における機械・作業員 i の現場存置数量

v_j^n : 工程 n ・アクティビティ j における資源グループ (機械・作業員の組合せ) の投入数量

b) 制約条件

i) SOT における基本的制約条件

機械・作業員に関する制約条件、および表-1 において作業数量が明確に与えられているアクティビティに関する制約条件は SOT において考慮した基本的な制約条件をそのまま用いる。

① 機械・作業員 i の利用可能数量 (表-4) を QM_i とすると

$$0 \leq q_i^n \leq QM_i \dots\dots(3)$$

② 各アクティビティ j に対する資源グループの最大投入数量が VM_j^n であるから

$$0 \leq v_j^n \leq VM_j^n \dots(4)$$

③ 機械・作業員の稼働数量は現場存置数量より小さくなければならないから

$$\sum_j (R_{ij} \cdot v_j^n) \leq q_i^n \quad (j \in A_i) \dots\dots(5)$$

④ 各工程 n における作業出来高数量は、与えられた作業数量より小さくなければならないから

$$\sum_{m=1}^n (W_j^m \cdot v_j^m) \leq QA_j \dots\dots(6)$$

$$W_j^n = WH_j^n \cdot RH_j^n \cdot \Delta T \cdot UD_j^n \dots\dots(7)$$

⑤ 作業順序関係の制約として、各アクティビティが開始できるには、その先行アクティビティ全部が終了している必要があるから

$$v_j^n \cdot \sum_{k \in P_j} \left\{ \sum_{m=1}^{n-1} (W_k^m \cdot v_k^m) - QA_k \right\} = 0 \dots\dots(8)$$

P_j : アクティビティ j の先行アクティビティの集合

⑥ 全体工期内にすべての作業 (アクティビティ) が終了している必要があるから

$$\sum_{m=1}^N (W_j^m \cdot v_j^m) = QA_j \dots\dots(9)$$

⑦ 部分工期の制約は、各アクティビティの部分工期以外の工程で、資源グループ最大投入数量 $VM_j^n = 0$ とすればよい (式 (4) 参照)。

ii) 搬土計画問題のための制約条件

表-1 において作業数量があらかじめ与えられないアクティビティがあること、掘削流用土の仮置きという特殊な作業があることなどのため、次のような搬土計画問題に個有な制約条件を考慮しなければならない。

① 仮置場に仮置土がないのに、仮置場からの搬出 (表-1 中の「仮置土運搬」) を行うことはできない。この条件は、現在の仮置土量 (= 仮置場への全搬入量累計

一仮置場からの全搬出量累計)を常に正にすることで表わされる。

$$\sum_{j \in I} \sum_{m=1}^n (W_j^m \cdot v_j^m) - \sum_{j \in E} \sum_{m=1}^n (W_j^m \cdot v_j^m) \geq 0 \quad \dots\dots\dots(10)$$

ここで、 I ：仮置場へ仮置土を搬入するアクティビティの集合(表-1における「掘削土仮置き」)、 E ：仮置土を搬出するアクティビティの集合(表-1における「仮置土運搬」とする。

② 仮置場の容量に限界があり、仮置土を無制限に搬入できない場合もある。この条件は①で述べた、各時点の仮置土量を仮置場容量： M 以下にすることで表わせる。

$$\sum_{j \in I} \sum_{m=1}^n (W_j^m \cdot v_j^m) - \sum_{j \in E} \sum_{m=1}^n (W_j^m \cdot v_j^m) \leq M \quad \dots\dots\dots(11)$$

③ 工事終了時点では仮置土が全部搬出され終わらなければならない。この条件は最終工程 N における仮置土量を 0 とすることで表わされる。

$$\sum_{j \in I} \sum_{n=1}^N W_j^n \cdot v_j^n - \sum_{j \in E} \sum_{n=1}^N W_j^n \cdot v_j^n = 0 \quad \dots\dots(12)$$

④ 前述のように表-1中の「掘削土ダム直送」、「掘削土仮置き」については、それぞれの作業数量が未定であり、両者を合計した掘削土量のみが与えられる。このため SOT における基本的制約条件式(6)、(8)、(9)は次のように改められる必要がある。「A部掘削土ダム直送」、「A部掘削土仮置き」を例にとると、式(6)は、

$$\sum_{m=1}^n (W_1^m \cdot v_1^m + W_4^m \cdot v_4^m) \leq QA_1 + QA_4 = 100\,000 \text{ m}^3 \quad \dots\dots\dots(13)$$

同じ意味で、式(8)の P_j に「A部掘削土ダム直送」が入るときには、式(8)の $\left\{ \sum_{m=1}^{n-1} (W_k^m \cdot v_k^m) - QA_k \right\}$ を $\left\{ \sum_{m=1}^{n-1} (W_1^m \cdot v_1^m + W_4^m \cdot v_4^m) - (QA_1 + QA_4) \right\}$ と変更する。

同様に式(9)を次のように変更する。

$$\sum_{n=1}^N (W_1^n \cdot v_1^n + W_4^n \cdot v_4^n) = QA_1 + QA_4 \quad \dots\dots(14)$$

⑤ 図-1からわかるように、ダム盛立部分には掘削直送土、仮置土、盛立土採取場からの盛立土の3種類の盛立土が運搬されてくる。図-4、表-1に示すように掘削運搬に関するアクティビティと、ダム盛立てに関するアクティビティを別々に設定しているの、工程上の各時点で盛立土の掘削運搬数量と盛立数量が等しいという次の制約条件が必要である。

$$\sum_{j \in C} W_j^n \cdot v_j^n = \sum_{j \in B} W_j^n \cdot v_j^n \quad \dots\dots\dots(15)$$

ここで C ：盛立土の運搬に関するアクティビティの集合、 B ：ダム盛立てに関するアクティビティの集

合であり、本論文のモデルでは次のように与えられる。

$$C = (1, 2, 3, 7, 8), B = (9, 10, 11) \quad \dots\dots\dots(16)$$

e) 目的関数(評価基準)

最小にするべき目的関数は搬土作業に必要な工事全体費用 CT であり次式で与えられる。

$$J = CT = \sum_{n=1}^N \left\{ \sum_i (CD_i \cdot \Delta T \cdot q_i^n) + \sum_j \left[\sum_k \{ R_{ik} \cdot CH_i \} \cdot RH_j^n \Delta T \cdot UD_j^n \cdot v_j^n \right] + \sum_i (CI_i \cdot V[q_i^n - q_i^{n-1}]) + \sum_i (CE_i \cdot V[q_i^{n-1} - q_i^n]) \right\} + \sum_i (CE_i \cdot q_i^N) \rightarrow \text{minimum} \quad \dots\dots\dots(17)$$

ここで、

$$V[x] = x : x > 0, V[x] = 0 : x \leq 0 \quad \dots\dots(18)$$

式(17)の右辺第1項が現場存置費用、第2項が稼働費用、第3項が搬入費用、第4、5項が搬出費用を表わす。

(4) 定式化の意味

土地造成工事を主対象とする従来の搬土計画手法では、メッシュ間の搬土量そのものを決定変数としている。この方法によると、土工量(搬土量×運搬距離)の最小化を評価基準とする場合の定式化がきわめて容易である。しかし、工事費用最小化を評価基準とする場合には、運搬距離に応じた施工機種変更に伴う費用の変化について、現時点では確立された関係が与えられていないために、定式化が非常に困難になる。このため、従来の搬土計画手法の大半が土工量最小化を評価基準としている。実際工事の搬土計画における評価基準としては、工事費用最小化が現実的であると考えられるが、この基準による結果と、土工量最小化による結果にかなりの相違がある場合も少なくないようである。

本論文の定式化においては、搬土計画における決定変数として、機械の現場存置数量と、各作業に対する機械の投入数量を選んでいる。機械化土工工事の作業出来高、費用の大部分は、工程上における機械・作業員の操作に伴って生じるから、これらの操作に注目することにより、作業出来高・費用を、より現実によく表現できるはずである。本論文の定式化で前述の決定変数を選んだことは、搬土計画問題として回り道のようにみえるが、実際には、作業出来高・費用を客観的かつ現実によく表現するための最も簡潔な方法となっていると思われる。このため、本論文の定式化では無理なく、工事費用最小化を評価基準とすることができる。また、このような観点からするならば表-3に示す機械・作業員の組合せは必ずしも実際に使用するものと考えする必要はなく、費用を評価するための標準的な機種を選んでおけばよい場合も考えられよう。

本論文の定式化では、運搬距離と費用の関係が次のよ

うに評価される。表-3 における運搬機械（ダンプトラック 20 t）の時間当たり作業能力は運搬距離が長くなるほど低下する。すなわち、資源グループ（機械・作業員の組合せ）における運搬機械の組合せ比率が高くなる。このため、運搬距離の長い作業に必要な費用が高くなる。このような、運搬距離と費用の関係の表現は現実に近いものと考えられる。

また、工程上での機械・作業員の操作方法を決定変数としたことにより、機械工程計画に裏づけられた搬土計画が得られること、工程計画における種々の条件（作業順序関係・作業条件など）を現実に近く考慮できることも本論文の定式化における基本的な利点である。

4. 数値解析

(1) 数値解析手法

前述の定式化は SOT における制約条件式の一部が変

$$\begin{aligned}
 P\{\mathbf{x}, \lambda\} = & \sum_{n=1}^N \left\{ \sum_i (CD_i \cdot \Delta T \cdot q_i^n) + \sum_j \left[\sum_i \left\{ \sum_k (R_{ik} \cdot CH_i) \cdot RH_j^n \cdot \Delta T \cdot UD_j^n \cdot v_j^n \right\} + \sum_i (CI_i \cdot V[q_i^n - q_i^{n-1}]) \right. \right. \\
 & \left. \left. + \sum_i (CE_i \cdot V[q_i^{n-1} - q_i^n]) \right\} + \sum_i (CE_i \cdot q_i^N) + \lambda_1 \cdot \left\{ \sum_{n=1}^N \left\{ \sum_i \left\{ W \left[\sum_j (R_{ij} \cdot v_j^n) - q_i^n \right] \right\} \right. \right. \right. \\
 & \left. \left. + \sum_j \left\{ W \left[\sum_{m=1}^n (W_j^m \cdot v_j^m) - QA_j \right] + W \left[\sum_{j \in E} \sum_{m=1}^n (W_j^m \cdot v_j^m) - \sum_{j \in I} \sum_{m=1}^n (W_j^m \cdot v_j^m) \right] \right\} \right\} \right. \\
 & \left. + W \left[\sum_{j \in I} \sum_{m=1}^n (W_j^m \cdot v_j^m) - \sum_{j \in E} \sum_{m=1}^n (W_j^m \cdot v_j^m) - M \right] \right\} \\
 & + \lambda_2 \cdot \left\{ \sum_{n=1}^N \left[\sum_j \left\{ v_j^n \cdot \sum_{k \in P_j} \left\{ \sum_{m=1}^{n-1} (W_k^m \cdot v_k^m) - QA_k \right\}^2 \right\} \right] + \lambda_3 \cdot \left\{ \sum_j \left\{ \sum_{n=1}^N (W_j^n \cdot v_j^n) - QA_j \right\}^2 \right. \right. \\
 & \left. \left. + \left\{ \sum_{j \in I} \sum_{n=1}^N (W_j^n \cdot v_j^n) - \sum_{j \in E} \sum_{n=1}^N (W_j^n \cdot v_j^n) \right\}^2 \right\} + \lambda_4 \cdot \left\{ \sum_{n=1}^N \left\{ \sum_{j \in C} (W_j^n \cdot v_j^n) - \sum_{j \in B} (W_j^n \cdot v_j^n) \right\}^2 \right\} \right. \\
 & \left. \dots \dots \dots (21) \right.
 \end{aligned}$$

ここで $\lambda_1 \sim \lambda_4$ はそれぞれ上式の各項の制約条件に対応するペナルティ係数である。式 (3), (4) の制約条件は決定変数とその上下限値を超えると、上下限値を決定変数の値とすることで満足される¹¹⁾。

修正目的関数の極値探索手法としては計算効率や記憶変数量などからみて、共役勾配法 (Fletcher-Reeves 法) を用いるのが最も妥当である^{9)~11)}。

(2) 収束性の改善

式 (21) の修正目的関数には費用に関する項と作業能力などに関する項が混在し、これらの項の係数値のオーダーはかなり異なる。また表-1 に示す作業数量や表-5 に示す作業能力は似た数値をもつが、一般的にはこれらが作業ごとに相当異なるオーダーの値をもつ場合もある。共役勾配法など、勾配法における一般的な特徴として、決定変数の係数値が極端に異なる場合には収束性が悪くなるということが知られている^{12), 13)}。この現象を防止

更・追加されただけであるから、数値解析手法は SOT において利用した手法をそのまま適用できる^{4), 5)}。すなわち、等式・不等式制約条件付極値探索問題（最適化問題）を SUMT (Sequential Unconstrained Minimization Technique)・外点法により修正目的関数を設定し、制約条件のない極値探索問題に置き換える⁸⁾。式 (2) の最適化問題に対する修正目的関数は次式で与えられる。

$$\begin{aligned}
 P\{\mathbf{x}, \lambda\} = & \phi(\mathbf{x}) + \lambda \cdot \sum_i \{h_i(\mathbf{x})\}^2 \\
 & + \lambda \cdot \sum_i \{W[g_i(\mathbf{x})]\} \dots \dots \dots (19)
 \end{aligned}$$

ここで $h_i(\mathbf{x}), g_i(\mathbf{x})$ はそれぞれ式 (2) の $h(\mathbf{x}), g(\mathbf{x})$ に対応する i 番目の等式、不等式制約条件とし、

$$\begin{aligned}
 W[x] = & x^2 : x > 0, W[x] = 0 : x \leq 0 \\
 & \dots \dots \dots (20)
 \end{aligned}$$

とする。また $0 < \lambda_0 < \lambda_1 < \dots < \lambda_k$ なるペナルティ係数であり、 $\lambda_k \rightarrow \infty$ のとき制約条件を満たす真の最適解が得られる。3. で定式化した搬土計画問題の修正目的関数は式 (19) に従って次式で与えられる。

するため、式 (21) の費用の項目には 100(%) / TC を乗じ、 QA_j, W_j^n には $UA_j \cdot 100(%) / TC$ を乗じて決定変数係数値のオーダーをおおまかに一致させる。ここで、 UA_j : 平均的な意味での作業数量当たり直接費、 TC : 総直接費であり、それぞれ次式で計算される。

$$\begin{aligned}
 UA_j = & \sum_i \left[R_{ik} \left\{ CD_i \left/ \left(\sum_{m=1}^N RH_j^m / N \right) \right/ \right. \right. \\
 & \left. \left. \left(\sum_{m=1}^N UD_j^m / N \right) + CH_i \right\} \right] \left/ \left(\sum_{m=1}^N WH_j^m / N \right) \right. \\
 & \dots \dots \dots (22)
 \end{aligned}$$

$$TC = \sum_j (UA_j \cdot QA_j) \dots \dots \dots (23)$$

TC は作業数量当たり直接費の計算に平均的な作業条件を用いること、機械・作業員の搬入搬出費用を含まないこと、機械・作業員の現場存置に要する費用 (CD_i) の評価があいまいであること（遊休時の存置費用が適切に評価されていない）から、実際に生じる費用をより現実に近く表現した式 (17) の全体費用（目的関数）CT

す。表—7, 図—6, 7 の結果は 図—8 に示す機械工程計画の裏付けのもとに得られた, 根拠の明確な実行可能性の高いものであることを強調しておく。表—7, 図—6~8 のほかにも, 与えられた決定変数を用いて種々の観点から必要な結果を得ることができるであろう。一方, これらの数値計算結果は SUMT・外点法利用による当然の結果として, 制約条件を完全には満たしていない場合がある, 機械台数などが整数で与えられない, などの問題点をもつ。したがって本論文の手法を適用する際は, 実際的な判断を加えて, 得られた数値計算結果の一部を修正する手順が必要であることを付言しておく。

5. 結 論

本論文では, フィルダム工事のように工程計画を考慮しなければならない搬土計画問題を対象とする合理的な搬土計画手法を開発した。得られた結果を要約すると次のとおりである。

(1) 場所的な意味での搬土計画だけでなく, 工程上での土運搬計画が施工計画において大きな比重を占める搬土計画問題を, アースダム工事を例にして明確に記述した。

(2) (1) の搬土計画問題を最適化問題として数学的に定式化した。

(3) この搬土計画問題に対して, 著者が先に提案した SOT (Scheduling Optimization Technique) と同じ数値解析手法を適用することにより妥当な数値解が得られることを示した。以上の結果, 工程計画を考慮し得る 1 つの新たな搬土計画手法が得られた。

機械化土工工事の施工計画は従来, 大まかには次のような手順で作成されている。i) 種々の施工条件を考慮したうえで, 場所的な意味での搬土計画を決定する。ii) 作業順序関係や仮置土の処理を考慮した工程計画を決定する。iii) 機械・作業員工程計画を決定する。iv) 費用の見積りを行う。v) いくつかの代替案について i) ~iv) の手順を繰り返し, 施工計画を決定する。これらの一連の手順において, 搬土計画決定の基準 (たとえば, 土工量最小) と費用見積りの関係, 作業工程計画・機械工程計画決定の基準と費用見積りの関係など, 施工計画における諸計画の整合性は施工経験の個人的蓄積に基づく判断に委ねられており, いくらかの調整は行われるものの必ずしも明確ではない。また, 多数の代替案について上述の i) ~iv) の手順を繰り返すことは膨大な作業量と時間が必要である。このため, 従来方法で得られた施工計画がその工事に対して最も適切であるという根拠が必ずしも明らかでない場合も少なくなかった。

本論文の手法は, 上述の i) ~iv) の計画段階を 1 つの

問題として定式化し, 費用最小化という統一観点から, 施工計画を全体的に決定しようとするものである。したがって, 得られた搬土計画, 作業工程計画, 機械工程計画, 費用見積りは相互関係が明確なだけでなく, 費用最小化という基準に基づく整合性をもつ。与えるデータ (施工法, 機種, 工期など) を変えて本論文の手法を繰り返し適用して, 最も適切な施工計画を選択するという手順は合理的であり, 比較的容易な意思決定手法といえるであろう。与えるデータが少量で基本的なものだけであるため, 計画作業量が少なく, 短時間に結果が得られることも利点の 1 つである。一方, 数値解析上の制約から, メッシュ分割に基づく搬土計画手法ほど多数の作業を取り扱うことは困難であり, 適用対象が簡潔な作業設定による工事の適切な表現に注意する必要がある。また, 数値計算結果をいくらか修正する必要があるので, 施工計画の比較的初期の段階で本論文の手法を適用し, 得られた結果に基づいて実際的な判断を加えた施工計画を決定するという手順が妥当と考えられる。

6. あとがき

本論文では簡単のためアースダム工事を具体例としたが, ロックフィルダム工事など工程計画を考慮しなければならない搬土計画問題は少なくないと考えられる。今後多くの建設工事施工に対して, このようなアプローチがなされることを期待する。数値解析には京都大学・名古屋大学大型計算機センターを利用した。末尾ながら本論文の作成に際し多大の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 畠 昭治郎教授, 同 太田 秀樹助教授, 有益なご批判とご助言をいただいた同 吉川和広教授ならびに春名 攻助教授に深く感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 春名・山本：大規模整地工事計画のシステム化に関する研究, 土木学会論文報告集, No. 227, pp. 71~84, 1974.
- 2) 平田・景山・中沢：搬土計画 II, 鹿島建設技術研究所年報, Vol. 19, pp. 209~215, 1970.
- 3) 石川：土工搬土計画改善に関する研究, 土木学会論文報告集, No. 239, pp. 67~76, 1975.
- 4) 荒井：機械化土工における工程計画最適化手法の開発と応用, 京大工博士学位申請論文, 1975.
- 5) 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.
- 6) 吉川：最適化手法, 土木学会誌, Vol. 57-6, pp. 77~86, 1972.
- 7) 志水：システム制御と数理計画法, コロナ社, 1970.
- 8) Fiacco, A.V. and G.P. McCormick: Nonlinear Programming; Sequential Unconstrained Minimization Techniques, John Wiley, 1968.

- 9) Fletcher, R. and C.M. Reeves : Function Minimization by Conjugate Gradient, Computer J., Vol. 7, pp. 149~154, 1964.
- 10) Lasdon, L.S., S.K. Mitter and A.D. Waren : The Conjugate Gradient Method for Optimal Control Problems, IEEE Trans. Autom. Control, Vol. AC-12, No. 2, pp. 132~138, 1967.
- 11) Pagurek, B. and C.M. Woodside : The Conjugate Gradient Method for Optimal Control Problems with Bounded Control Variables, Automatica, Vol. 4, pp. 337~349, 1968.
- 12) Himmelblau, D.M. : Applied Nonlinear Programming, McGraw-Hill, 1972.
- 13) Johansen, D.E. : Convergence Properties of the Method of Gradient, Advan. Control Syst., Vol. 3, pp. 279~316, 1966.

(1980.1.28・受付)
