

## メッシュ式工程管理モデルによる港湾工事の工程管理

EXECUTION CONTROL OF THE PORT CONSTRUCTION BASED  
ON THE COMPUTER SIMULATION MODEL

須田 熙\*・湯沢 昭\*\*

By Hiroshi SUDA and Akira YUZAWA

The execution control of the port construction such as the breakwaters and the reclamations are required to express the spot of works in schedule. The major part of these constructions are worked in or on the sea, and covered a wide area. It is very difficult to express the spot of works in the usual execution control.

Purpose of this paper is to propose a new type execution control method by using computer simulation. The project is divided into the multi-layers cell structures. Three kinds of concept such as the precedence distance, the time distance and the safety distance are introduced in the model. This is a reason why we can discuss the spot of works in terms of space and time. Following four items of study are carried out in this paper.

- (1) Sensitivity analysis of the activities.
- (2) Calculation of schedule to consider wave conditions.
- (3) Parallel execution control of the multi-projects.
- (4) Application to the reclamation construction.

## 1. 諸 言

本研究で対象としている港湾工事（防波堤工事や埋立工事等の海上や海中での工事を狭義の意味で港湾工事と定義する）は、一般の陸上の土木工事と比較して次のような特徴がある。

(1) 海中工事が多く、工事の出来高の確認や作業の進捗状況の把握が困難な場合が多い。また作業員の熟練度が作業効率を大きく左右する。

(2) 大型の船舶や機械を使用し、また海中での作業が多いため作業区域の制限が厳しい。

(3) 使用資源が高価なため、資源の稼働率が工事費用を大きく左右する。

(4) 波浪による影響が大きいため、一般の陸上工事に比べ作業日数が限定される。

このような港湾工事の特殊性を考慮して工程管理を行う場合、工程管理手法の中に施工位置（作業位置）を明示することが要求される。これは港湾工事の大部分が水面下で行われるため、たとえば捨石の投入位置の指定や資源間の保安距離の確保上、不可欠な要因となる。

表一は、従来の工程管理手法の特徴を比較したものであるが、工程管理の中に距離の概念を導入する方法としては、座標式工程管理<sup>1),2)</sup>が挙げられる。これはある工種の進捗状況と作業位置を同一と考えているため、線形構造物（たとえば道路工事や護岸工事）の工程管理には適用可能であるが、平面構造物への適用は困難である。

本研究は、メッシュ式工程管理モデル<sup>3)</sup>を港湾工事に適用するものである。この手法は、工事全体を多層のメッシュ構造に分割し、工種間に先行距離と保安距離の概念を導入し工程管理を行うため、施工位置を空間的に表現

表一 各種工程管理手法の比較<sup>1)</sup>

工程管理手法 項目	横線式工程 管 理	座標式工程 管 理	ネットワーク式 工 程 管 理
工 期 の 把 握	○ (見やすい)	○ (見やすい)	○
施 工 順 序 の 把 握	△	○	○
進 捗 状 況 の 把 握	△	○	△
重 点 工 種 の 把 握	×	×	○
工 種 関 連 の 把 握	×	○	△
工 程 表 の 精 度	×	△	○
作 業 の 難 易 度、煩 雑 さ	○	○	×
適 用 性	小規模,概略	直線的工事	大規模,複雑

(港湾技術研究報告, Vol. 23, No. 3, 座標式工程表による  
工程計画手法の開発, 1984. 9. 8頁より抜粋)

\* 正会員 工博 東北大学教授 工学部土木工学科  
(〒980 仙台市荒巻字青葉)

\*\* 正会員 東北大学助手 工学部土木工学科 (同上)

できるという特徴がある。しかし従来のメッシュ式工程管理モデルにおいてはコンクリートの養生期間や埋立工事における地盤の安定期間のように工種間の時間間隔の確保という観点から大きな問題があった。そこで本論文では新たに時間距離<sup>4)</sup>を導入し工程管理を行うことを試みた。なお時間距離とは、ある施工位置においてある工種が終了してから次の工種が施工できるまでの最短時間間隔として定義され、施工条件により変化する。

論文の目的は以下のとおりである。

- (1) 工種の感度分析——重点的に管理すべき工種を明らかにするため、ある工種と工事全体との関係を明らかにする。
- (2) 工期の算定——港湾工事は波浪による作業不能日が多く、また工種によりその影響も異なるため、波高と作業効率との関係を明らかにし、工期の算定手法を開発する。
- (3) 複数工区の同時管理——前述したように港湾工事は高価な資源を使用し、またある資源は工事期間の一部しか使用しない等の条件下で資源の効率的運用を図るため、複数工区を同時に管理する手法を開発する。
- (4) 埋立工事への適用——メッシュ式工程管理モデルを埋立工事に適用する場合の検討を行う。

## 2. メッシュ式工程管理モデルの構造

メッシュ式工程管理モデルの基本的考え方は参考文献3)に詳しいので、本節では特にその構造について説明を行う。このモデルは、工事全体を多層の基本メッシュに分割し、基本メッシュをいくつか統合し、ジョブを構成することにより工程管理を行うため、各ジョブの作業量と空間的位置を表示することができる。ここで基本メッシュとは工種を構成する最小単位であり、またジョブは作業グループの単位時間当たりの標準作業量を基本として基本メッシュをいくつか統合したものである。図-1はこれらの関係を図化したものであり、次のようにして作成する。まず工事を構成する工種間の先行関係(先行距離)よりZ方向の関係を決定する。つまり図-1のZ方向は、構造物の立体関係を表わしているのではなく、工事を構成する工種間の先行関係を表わしている。

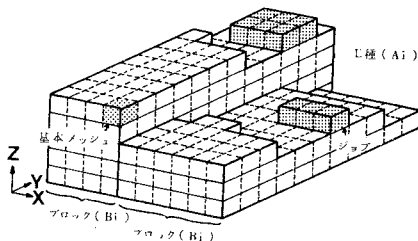


図-1 基本メッシュとジョブの関係

したがって最も下層に位置する工種は、その上に位置する工種とは無関係に工事を進めることができる(この場合、下から2層目以上の工種との先行距離は無限大と定義される)。また下から2層目の工種は最下層の工種が終了してからでないといと工事を進めることはできないが、下から3層目以上の工種とは無関係に工事を進めることができる(最下層との先行距離は零となり、3層目以上の工種との先行距離は無限大となる)。この場合各工種間に時間距離が設定されていると、着目している工種より下層の工種が終了しても一定期間(時間距離により設定する)が経ってからでないといとその位置での作業を開始することはできない。また、同じ工種(同一の層)内においても先行距離を設定する必要がある。これはたとえば防波堤工事において基礎本均し工事を後続する工種(この場合はケーソン据付工事)より必要以上に先行させることは波浪等による手戻り工事の原因となるため、その先行距離は必然的に限定されることになる。

図-2は、メッシュ式工程管理モデルのフローを表わしており、次のような流れに沿って工程管理を進める。

- (1) 始めに各種のデータおよび工種間の優先順位を入力する。

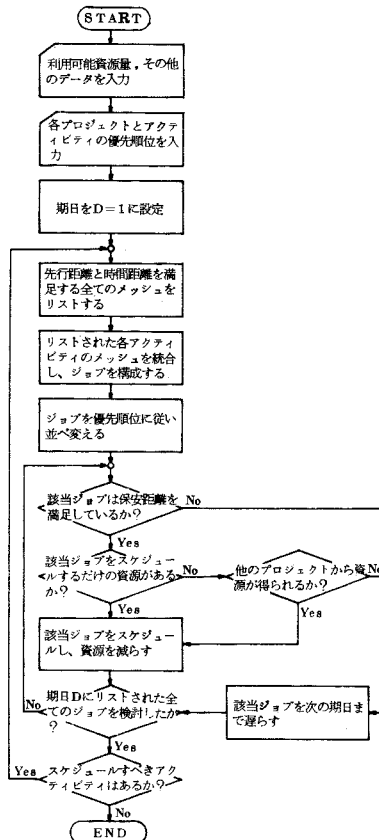


図-2 メッシュ式工程管理モデルのフロー

(2) 次に先行距離と時間距離を満足する基本メッシュをすべてリストする(当然  $D=1$  においては最下層の工種からリストされる)。

(3) リストされた各工種のメッシュを作業グループの単位時間当たりの標準作業量を基準としていくつか統合<sup>3)</sup>し、ジョブを構成する。

(4) ジョブをあらかじめ定められた優先順位に従い並べ変える。

(5) 最も優先順位の高いジョブをスケジュールし、利用可能資源量の中から該当資源を減じる。

(6) スケジュールされたジョブと保安距離が満足するジョブを次々にスケジュールし利用可能資源量がなくなるか、すべてのジョブを検討するまで繰り返す。

(7) 以上の操作をすべての工種が完了するまで(2)へ戻る。

以上が、メッシュ式工程管理モデルの構造であるが、この場合問題となるのは、工種間の優先順位の設定方法である。本論文では、ブロック別優先順位と後続アクティビティ最大<sup>3)</sup>を併用する。ここでブロックとは図-1に示すように工種間の先行関係(Z方向)が共通する工種の集合であり、ブロック間の関係は保安距離だけに依存し、先行距離と時間距離の制約は受けない。また後続アクティビティ最大とは、同一ブロック内において後続する工種数が多い工種ほど優先順位を高く設定するものであり、これは後続する工種の隘路を防止するのが目的である。問題となるブロック間の優先順位に関しては、その優先順位を変化させ、最短工期を与えるような優先順位の組合せについて検討する。

### 3. 工程曲線による工種の感度分析

工程管理を行う場合、各工種の進捗状況の把握は最も重要な要因の1つである。工種は互いに関連し合っており、工事全体を構成しているため、工事に及ぼす影響は工種により異なる。そのため重点的に管理すべき工種を把握する必要がある。表-1に示すようにネットワーク式工程管理手法がこの面で優れていることがわかるであろう。以下に工種の出来高工程曲線を用い、メッシュ式工程管理モデルを使用した場合の重点工種の把握についての検討を行う。

図-3は、工種( $A_i$ )の出来高工程曲線を表わしており、時点( $t_0$ )において計画と実績の累積出来高に( $C_1 - C_0$ )の差があり、この状態が続くと工種( $A_i$ )の予測出来高工程曲線は( $\bar{0} \rightarrow a$ )となり、計画工期( $T_p$ )が( $T_a$ )まで遅れると予測される。この遅れが工事全体の工期に大きく影響を及ぼす場合には、何らかの作業改善や資源の増加等の対策を講じる。その結果最終的には、出来高曲線が( $\bar{0} \rightarrow b$ )となり、工種( $A_i$ )の最終工期は( $T_b$ )

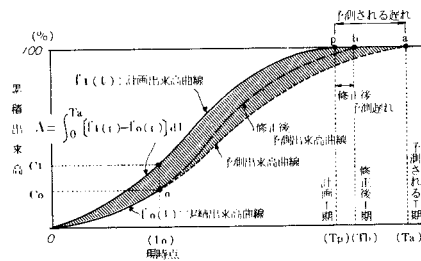


図-3 工種 ( $A_i$ ) の出来高工程曲線

と改善されることになる。この場合工種 ( $A_i$ ) の遅れの原因と、その遅れの全体工期に対する影響が問題となり、その組合せにより対策も異なる。工種 ( $A_i$ ) の遅れの原因は、次の2つのケースが考えられる。

(Case I) : 作業速度や積込み容量の低下による作業効率の低下。

(Case II) : 自然条件や事故等によるジョブの中断。

(Case II) の場合には、中断しているジョブの資源を他の作業可能なジョブに回すことが可能なため、工事全体の工期に及ぼす影響は (Case I) より小さくなる場合もある。次に工種 ( $A_i$ ) の工期遅れが工事全体の工期に及ぼす影響について考えてみる。図-3より、時点 ( $t_0$ ) において実績と計画累積出来高に ( $C_1 - C_0$ ) の差があり、今後もその状態が続くとすれば、予測出来高工程曲線は ( $\bar{0} \rightarrow a$ ) となり、その結果、工種 ( $A_i$ ) の工期が ( $T_a - T_0$ ) 日延長されることになる。しかしこの場合、単なる工期の延長日数だけでなく、工程曲線の履歴が問題となる。つまり、図-3に示す斜線部の面積 ( $A$ ) を考慮する必要がある。

$$A = \int_0^{T_a} [f_1(t) - f_0(t)] dt \dots \dots \dots (1)$$

なぜならば、時点 ( $t_0$ ) において何らかの作業改善を行い、出来高工程曲線が ( $\bar{0} \rightarrow b$ ) となり ( $b$ ) と ( $p$ ) の値が一致した場合、工種 ( $A_i$ ) の工期の遅れは生じないが、工期全体の工期には影響を与える。しかし対象とする工種によりその影響の大きさは異なるため、本論文では各工種の式 (1) の値と工事全体の工期遅れの関係を工種 ( $A_i$ ) の感度と定義する。

$$\text{工種 } (A_i) \text{ の感度} = \frac{\text{工事全体の工期遅れ}}{A} \dots \dots \dots (2)$$

式 (2) において工事全体の工期遅れの計算は、メッシュ式工程管理モデルを用い、工種別、遅れの原因別に次のようにして求めることができる。作業効率の低下 (Case I) による工期遅れの評価は、対象とする工種 ( $A_i$ ) の作業グループの単位時間当たりの標準作業量を減らすことにより工種 ( $A_i$ ) の  $A$  の値と工事全体の工期を求めることができる。またジョブの中断 (Case II)

による評価は、工種 ( $A_i$ ) のジョブをランダムに中断させることにより、同様に求めることができる。また、遅れの原因が同じ場合、感度が大きいほどその工種の重要度が高いことがわかる。

#### 4. 工種別作業効率による工期の算定方法

工事全体の工期を算定するうえで重要なことは、各工種の作業可能日数がどの程度確保できるかであり、この場合作業不可能日としては次の2つの場合が考えられる。1つは休祭日や船舶機械等の点検補修日であり、もう1つは自然条件による作業不可能日である。前者に関してはあらかじめ評価することは可能であるが、後者に関しては予測によるしかなく、その精度が工期の算定に大きく影響を与える。特に本研究で対象としている港湾工事においては、自然条件の中でも波浪による影響が大きく、またその影響も工種や季節により異なる。本節では、工種別の作業限界波高と月別の波高分布を考慮した場合の工期の算出方法について検討を行う。

図-4は、北東北A港における捨石工事（基礎捨石と被覆捨石）と均し工事（本均し、荒均しおよび被覆均し）の波高別工事実績を示しており、いずれの工種とも波高が1.5m以上になると作業を行っていない。図-5は、図-4の場合の作業効率  $g_i(H)$  を表わしている。ここで作業効率は次式により求めるものとする。

$$g_i(H) = \frac{\text{工種}(A_i)\text{が波高}(H)\text{のとき}}{\text{工種}(A_i)\text{の作業可能期間中に}} \cdot \frac{\text{作業を行った回数}}{\text{波高}(H)\text{が出現した回数}} \dots\dots\dots (3)$$

しかし、実際の作業が波高だけに左右されるものでないため、若干のばらつきはみられるが波高の増加に伴い作業効率は低下することがわかる。当然、各工種に作業限界波高を設定した場合の作業効率は次のように表わすことができる。

$$\left. \begin{aligned} g_i(H) &= 1.0 & H < H^* \\ g_i(H) &= 0.0 & H \geq H^* \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (4)$$

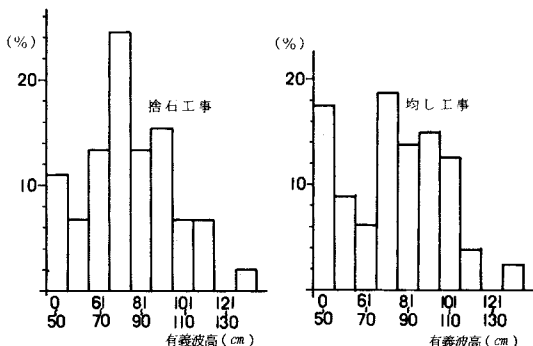


図-4 捨石および均し工事の波高別工事実績（北東北A港防波堤工事，昭和56年）

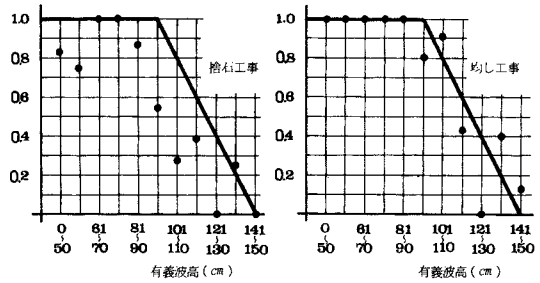


図-5 捨石および均し工事の波高別作業効率（北東北A港防波堤工事，昭和56年）

表-2 工種別作業限界波高の例（北東北A港防波堤工事，昭和56年）（単位：m）

	基礎捨石 被覆捨石	本均し、荒均し 被覆均し	ケーソン 掘付	根固方 塊掘付	消波ブロック 掘付
$H_{i,j}$	1.0	1.0	0.8	1.2	1.0

ただし、 $H^*$ ：工種 ( $A_i$ ) の作業限界波高（表-2参照）。

次に、工種別作業効率と月別波高分布を用い、メッシュ式工程管理モデルを使用した場合の工事全体の工期の算定は次のように行う。

(1) 工種別作業効率（式（3）または式（4）より求める）と月別波高分布をあらかじめ計算機に入力しておく。

(2) 月別波高分布に合わせて、期日 ( $D$ ) の波高 ( $H$ ) を乱数を用い計算する。

(3) 期日 ( $D$ ) の利用可能資源量を式（5）より求める。

$$RS_i(D) = g_i(H) \times \text{工種}(i)\text{の全利用可能資源量} \dots (5)$$

$RS_i(D)$ ：期日 ( $D$ ) の工種 ( $i$ ) の利用可能資源量

(4) 図-2に示したメッシュ式工程管理モデルにおいて期日 ( $D$ )、工種 ( $i$ ) の利用可能資源量を  $RS_i(D)$  とする。

(5) それ以後は図-2のフローに従って計算を行う。

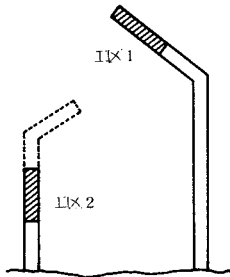
#### 5. 複数工区の同時管理の適用例

複数工区とは、図-6に示すように同一現場において工区が複数個あり、それらの各工区間においては使用資源に共通性がある場合を想定している。このような複数の工区をメッシュ式工程管理モデルを用い、同時に管理する場合の問題点は、先行距離、保安距離および時間距離と資源の配分方法にある。本論文では基準座標を各工区ごとに設定しているため、各工区間の先行距離、保安距離および時間距離は図-7、図-8、図-9のように表現することができる。ただし、各工区間の距離が近接している場合には、工区間の工種についても保安距離を設定する必要がある。その場合は、各工区ごとの基準座標

ではなく、絶対座標系を考え、図—8の対角以外の小行列部分には実際の保安距離を入れる必要がある。

次に資源の配分方法としては、次の2つの方法が考えられる。

(1) 各工区間に優先順位を設定し、最も優先順位の高い工区にすべての資源を配分し、その工区内で資源に遊休が生じた場合のみ次の工区へ資源を配分する。



図—6 防波堤工事における複数工区の例

	P <sub>1</sub>		P <sub>2</sub>		P <sub>u</sub>	
	A <sub>11</sub> .. A <sub>1s</sub>	A <sub>21</sub> .. A <sub>2t</sub>			A <sub>u1</sub> .. A <sub>uv</sub>	
P <sub>1</sub>	A <sub>11</sub> - A <sub>1s</sub>	d <sub>ij</sub> <sup>01</sup>	∞		∞	
P <sub>2</sub>	A <sub>21</sub> - A <sub>2t</sub>	∞	d <sub>ij</sub> <sup>02</sup>			∞
P <sub>u</sub>	A <sub>u1</sub> - A <sub>uv</sub>	∞	∞			d <sub>ij</sub> <sup>0u</sup>

P<sub>i</sub>:Project A<sub>ij</sub>:Activity

図—7 複数工区間の先行距離

	P <sub>1</sub>		P <sub>2</sub>		P <sub>u</sub>	
	A <sub>11</sub> .. A <sub>1s</sub>	A <sub>21</sub> .. A <sub>2t</sub>			A <sub>u1</sub> .. A <sub>uv</sub>	
P <sub>1</sub>	A <sub>11</sub> - A <sub>1s</sub>	d <sub>ij</sub> <sup>11</sup>	0		0	
P <sub>2</sub>	A <sub>21</sub> - A <sub>2t</sub>	0	d <sub>ij</sub> <sup>12</sup>			0
P <sub>u</sub>	A <sub>u1</sub> - A <sub>uv</sub>	0	0			d <sub>ij</sub> <sup>1u</sup>

P<sub>i</sub>:Project A<sub>ij</sub>:Activity

図—8 複数工区間の保安距離

	P <sub>1</sub>		P <sub>2</sub>		P <sub>u</sub>	
	A <sub>11</sub> .. A <sub>1s</sub>	A <sub>21</sub> .. A <sub>2t</sub>			A <sub>u1</sub> .. A <sub>uv</sub>	
P <sub>1</sub>	A <sub>11</sub> - A <sub>1s</sub>	d <sub>ij</sub> <sup>21</sup>	0		0	
P <sub>2</sub>	A <sub>21</sub> - A <sub>2t</sub>	0	d <sub>ij</sub> <sup>22</sup>			0
P <sub>u</sub>	A <sub>u1</sub> - A <sub>uv</sub>	0	0			d <sub>ij</sub> <sup>2u</sup>

P<sub>i</sub>:Project A<sub>ij</sub>:Activity

図—9 複数工区間の時間距離

(2) あらかじめ資源配分上競合する工区にある一定量の資源を配分し、各工区内で資源に遊休が生じた場合のみ、各工区間で資源のやりとりを行う。

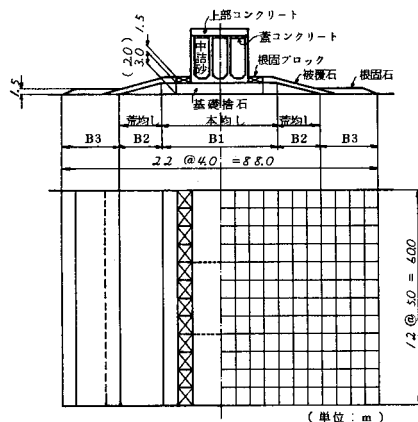
続いて、複数工区の同時管理の適用例として図—10に示すケーソン式防波堤工事を2か所設定し工程管理を行う。なお工事断面の寸法は、基礎捨石高さのみが異なり、工区1 (P<sub>1</sub>) が3.0 m、工区2 (P<sub>2</sub>) が2.0 mとし、その他の寸法はすべて同じとする (したがって、基礎捨石の総量が工区1では7920 m<sup>3</sup>、工区2では5280 m<sup>3</sup>となる)。図—10からもわかるように、工事全体を3種類のブロックに分割し、各ブロック別の工種を表—3に示す。また工種間の先行距離 (d<sub>ij</sub><sup>1j</sup>, d<sub>ij</sub><sup>2j</sup>) と保安距離 (d<sub>ij</sub><sup>1j</sup>, d<sub>ij</sub><sup>2j</sup>) を表—4、表—5に、各工種の総工事量および作業グループの単位時間当たりの標準作業量および作業グループと資源の組合せを表—6に示す。ただし時間距離はすべて零とする。なお本システムの前提条件は次のとおりである。

(1) 工種の優先順位はブロック単位で考え、各ブロック内においては後続する工種数の多い工種を優先する。

(2) 資源の配分は、工区別にあらかじめ一定量 (資源の総量は変えずに各工区への配分量を変化させる) の資源を配分し、資源に遊休が生じた場合のみ工区間で資源のやりとりを行う。また、工区間で資源のやりとりを行わない場合についても検討を行う。

(3) ケーソン工事は、3日間の連続作業とし、また作業開始後2日目は据付工事に1日を要し、ケーソン据付時はすべての工区とも他の作業は行わないものとする。なお、ケーソン据付から次のケーソン据付までの時間間隔は2日以上とする。

(4) ジョブの大きさは、工種別に作業グループの単位時間当たりの標準作業量を基本として定める。また基本メッシュをいくつか統合しジョブを構成する方法は、



図—10 ケーソン式防波堤工事例 (P<sub>1</sub>, P<sub>2</sub>)

重みつき非階層的クラスター分析<sup>3)</sup>を適用する。

表一七は、工区1 (P<sub>1</sub>) のブロック別優先順位を (B<sub>1</sub>-B<sub>3</sub>-B<sub>2</sub>)<sup>3)</sup> と固定し、また利用可能資源量の総量を (捨石船4隻、潜水士船16組、クレーン2台) として、工区

2 (P<sub>2</sub>) のブロック別優先順位とあらかじめ各工区に割当てる利用可能資源量を変化させた場合の実質工期との関係を表わしている。ただし各工区において、資源に遊休が生じた場合は工区間で資源のやりとりを行うものとする。

始めに、各工区にあらかじめ割当てる資源量を同じくし、工区2のブロック別優先順位を変化させた場合、工期が最も短くなるのは、No.3の (B<sub>2</sub>-B<sub>1</sub>-B<sub>3</sub>) である。また工区2のブロック別優先順位を (B<sub>2</sub>-B<sub>1</sub>-B<sub>3</sub>) と固定し、各工区にあらかじめ割当てる利用可能資源量を変化させても42日以下の工期は得られず、逆に初期値の与え方により工期が大きく変化することがわかる。本計算例の場合、基礎捨石工事 (A<sub>1</sub>) を除いて、2つの工区とも全く同じ工事量および工種間の関係であるため、あらかじめ割当てる利用可能資源量も同程度になるものと思われる。

図一11は、表一七のNo.3の場合の各工区の工種別工程表および潜水士船と捨石船の山積み図を表わしてい

表一三 各工区のブロック別工種

		工 種	
B <sub>1</sub>	A <sub>1</sub>	基 礎 捨 石	
	A <sub>2</sub>	基 礎 本 均 し	
	A <sub>3</sub>	ケ ー ソ ン 工 事	
	A <sub>4</sub>	根 固 ブ ロ ッ ク	
	A <sub>5</sub>	被 覆 捨 石	
	A <sub>6</sub>	被 覆 均 し	
B <sub>2</sub>	A <sub>7</sub>	基 礎 荒 均 し	
	A <sub>8</sub>	被 覆 捨 石	
	A <sub>9</sub>	被 覆 均 し	
B <sub>3</sub>	A <sub>10</sub>	根 固 捨 石	

表一四 工種間の先行距離 (d<sub>ij</sub><sup>0</sup>, d<sub>ij</sub><sup>2</sup>)

	B <sub>1</sub>										B <sub>2</sub>			B <sub>3</sub>					
	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>	A <sub>4</sub>	A <sub>5</sub>	A <sub>6</sub>	A <sub>7</sub>	A <sub>8</sub>	A <sub>9</sub>	A <sub>10</sub>	A <sub>7</sub>	A <sub>8</sub>	A <sub>9</sub>	A <sub>10</sub>					
B <sub>1</sub>	A <sub>1</sub>	50	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞
	A <sub>2</sub>	0	20	50	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞
	A <sub>3</sub>	0	0	20	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞
	A <sub>4</sub>	0	0	4	20	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞
	A <sub>5</sub>	0	0	8	4	50	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞
	A <sub>6</sub>	0	0	8	4	0	20	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞
B <sub>2</sub>	A <sub>7</sub>	0	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	20	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞
	A <sub>8</sub>	0	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	0	50	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞
	A <sub>9</sub>	0	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	0	0	20	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞
B <sub>3</sub>	A <sub>10</sub>	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	50

(単位：m)

表一五 工種間の保安距離 (d<sub>ij</sub><sup>1</sup>, d<sub>ij</sub><sup>3</sup>)

	B <sub>1</sub>										B <sub>2</sub>			B <sub>3</sub>					
	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>	A <sub>4</sub>	A <sub>5</sub>	A <sub>6</sub>	A <sub>7</sub>	A <sub>8</sub>	A <sub>9</sub>	A <sub>10</sub>	A <sub>7</sub>	A <sub>8</sub>	A <sub>9</sub>	A <sub>10</sub>					
B <sub>1</sub>	A <sub>1</sub>	25	25	∞	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25
	A <sub>2</sub>	25	4	∞	25	25	4	4	25	4	25	4	25	4	25	4	25	4	25
	A <sub>3</sub>	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞
	A <sub>4</sub>	25	25	∞	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25
	A <sub>5</sub>	25	25	∞	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25
	A <sub>6</sub>	25	4	∞	25	25	4	4	25	4	25	4	25	4	25	4	25	4	25
	A <sub>7</sub>	25	4	∞	25	25	4	4	25	4	25	4	25	4	25	4	25	4	25
B <sub>2</sub>	A <sub>8</sub>	25	25	∞	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25
	A <sub>9</sub>	25	4	∞	25	25	4	4	25	4	25	4	25	4	25	4	25	4	25
B <sub>3</sub>	A <sub>10</sub>	25	25	∞	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25

(単位：m)

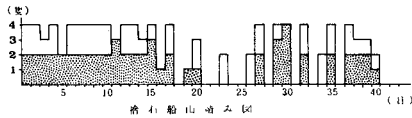
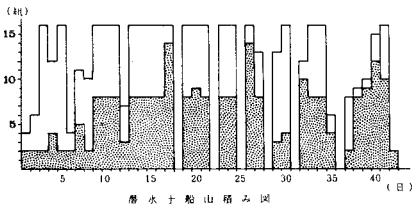
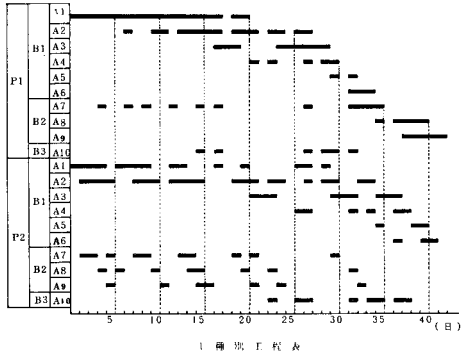
表一六 各工種の諸データ

	単位	総工事量	作業グループの標準作業量		作業グループ			
			R <sub>1</sub>	R <sub>2</sub>	R <sub>1</sub>	R <sub>2</sub>	R <sub>3</sub>	
B <sub>1</sub>	A <sub>1</sub>	m <sup>2</sup>	7 920 (5 280)	250		1	1	
	A <sub>2</sub>	m <sup>2</sup>	1 920	20			1	
	A <sub>3</sub>	基	3	1				
	A <sub>4</sub>	個	24	4				1
	A <sub>5</sub>	m <sup>2</sup>	720	250	1	1		
	A <sub>6</sub>	m <sup>2</sup>	480	40			1	
B <sub>2</sub>	A <sub>7</sub>	m <sup>2</sup>	1 440	40			1	
	A <sub>8</sub>	m <sup>2</sup>	2 160	250	1	1		
	A <sub>9</sub>	m <sup>2</sup>	1 440	40			1	
B <sub>3</sub>	A <sub>10</sub>	m <sup>2</sup>	2 520	250	1	1		

(R<sub>1</sub>: 捨石船, R<sub>2</sub>: 潜水士船, R<sub>3</sub>: クレーン)

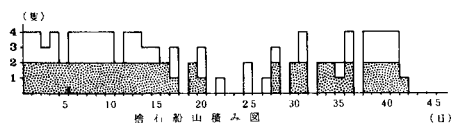
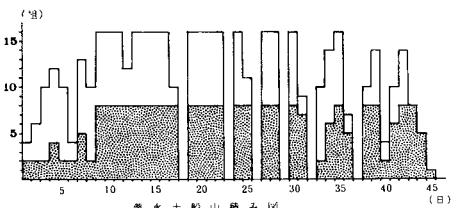
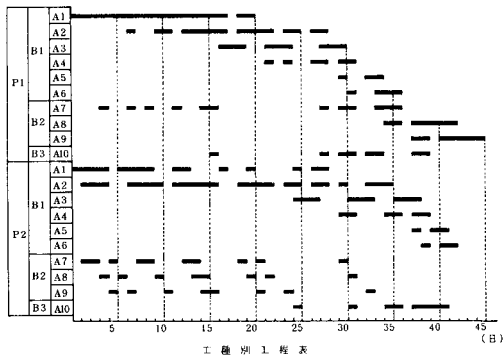
表一七 ブロック別優先順位および資源の配分量と実質工期

No.	ブロック別優先順位		工区1 (P <sub>1</sub> )			工区2 (P <sub>2</sub> )			工期 (日)
	工区1 (P <sub>1</sub> )	工区2 (P <sub>2</sub> )	R <sub>1</sub>	R <sub>2</sub>	R <sub>3</sub>	R <sub>1</sub>	R <sub>2</sub>	R <sub>3</sub>	
1	B <sub>1</sub> -B <sub>3</sub> -B <sub>2</sub>	B <sub>1</sub> -B <sub>2</sub> -B <sub>3</sub>	2	8	1	2	8	1	43
2	〃	B <sub>1</sub> -B <sub>3</sub> -B <sub>2</sub>	〃	〃	〃	〃	〃	〃	44
3	〃	B <sub>2</sub> -B <sub>1</sub> -B <sub>3</sub>	〃	〃	〃	〃	〃	〃	42
4	〃	B <sub>2</sub> -B <sub>3</sub> -B <sub>1</sub>	〃	〃	〃	〃	〃	〃	44
5	〃	B <sub>3</sub> -B <sub>1</sub> -B <sub>2</sub>	〃	〃	〃	〃	〃	〃	44
6	〃	B <sub>3</sub> -B <sub>2</sub> -B <sub>1</sub>	〃	〃	〃	〃	〃	〃	44
7	〃	B <sub>2</sub> -B <sub>1</sub> -B <sub>3</sub>	〃	12	〃	〃	〃	4	48
8	〃	〃	〃	10	〃	〃	〃	6	42
9	〃	〃	〃	6	〃	〃	〃	10	43
10	〃	〃	3	9	〃	1	7	〃	51



(注) 山積み図の点線部は工区1を、白抜部は工区2の山積みを示す

図-11 工区別工程表および資源の山積み図(資源のやりとりあり)



(注) 山積み図の点線部は工区1を、白抜部は工区2の山積みを示す

図-12 工区別工程表および資源の山積み図(資源のやりとりなし)

る。また、図-12は工区間で資源のやりとりを行わない場合の同じ結果を表わしている。各工区間で資源のやりとりを行わない場合には、工期が45日となり、図-11と比較して工期が3日延長することがわかる。当然、工区間で資源のやりとりを行う場合は、資源の稼働率も高い結果となっている。このように各工区間において、資源を共同利用することは工期の短縮や工事費の節約につながるものと思われる。そのためには、複数工区の同時管理が必要となる。

### 6. 埋立工事への適用例

埋立工事は、一般に沿岸付近の比較的水深の浅い所に土砂等を投入して陸地を造成することが多く、その投入方法としては直接投入と間接投入に分けることができるが、本節では土運船による直接投入方式を考え工程管理を行う。

大規模な埋立工事の場合は、採土管理、配船管理および埋立管理と土砂の採取から投入に至る一連の作業をいかにスムーズに管理するかが大きなポイントとなり、中でも埋立管理は次のような点について注意を必要とする。

(1) 作業範囲が広大なため、投入位置の指定や出来高管理が必要である。特に直接埋立が進捗し水深が浅くなると、船舶が浅部に乗り上げないようにするとともに、地盤を均等に仕上げるよう土運船の誘導を必要とする。

(2) 使用船舶が大型であるため、保安距離に十分注意する必要がある。

(3) 軟弱地盤等に投入する場合は、地盤破壊を防止するため、各工種間に十分なる時間距離を確保する必要がある。

(4) 施工を連続して行うため、先行距離に注意する必要がある。

また大規模な埋立工事の場合は、埋立地の部分的な共用や埋立地に建設される構造物等を考えて、埋立予定地

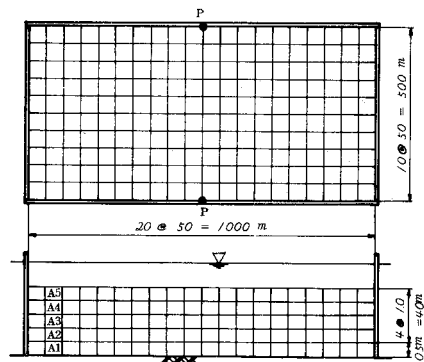


図-13 埋立工事の概略図

表—8 埋立工事の工種

	工 種
A <sub>1</sub>	敷 砂 工
A <sub>2</sub>	埋 立 工(直投1)
A <sub>3</sub>	〃 (〃 2)
A <sub>4</sub>	〃 (〃 3)
A <sub>5</sub>	〃 (〃 4)

表—9 工種間の先行距離

	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>	A <sub>4</sub>	A <sub>5</sub>
A <sub>1</sub>	100	∞	∞	∞	∞
A <sub>2</sub>	0	100	∞	∞	∞
A <sub>3</sub>	0	0	100	∞	∞
A <sub>4</sub>	0	0	0	100	∞
A <sub>5</sub>	0	0	0	0	100

(単位：m)

表—10 工種間の時間距離

	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>	A <sub>4</sub>	A <sub>5</sub>
A <sub>1</sub>	0	0	0	0	0
A <sub>2</sub>	5	0	0	0	0
A <sub>3</sub>	5	4	0	0	0
A <sub>4</sub>	5	4	3	0	0
A <sub>5</sub>	5	4	3	2	0

(単位：日)

表—11 工種間の保安距離

	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>	A <sub>4</sub>	A <sub>5</sub>
A <sub>1</sub>	100	100	100	100	100
A <sub>2</sub>	100	100	100	100	100
A <sub>3</sub>	100	100	100	100	100
A <sub>4</sub>	100	100	100	100	100
A <sub>5</sub>	100	100	100	100	100

(単位：m)

表—12 各工種の諸データ

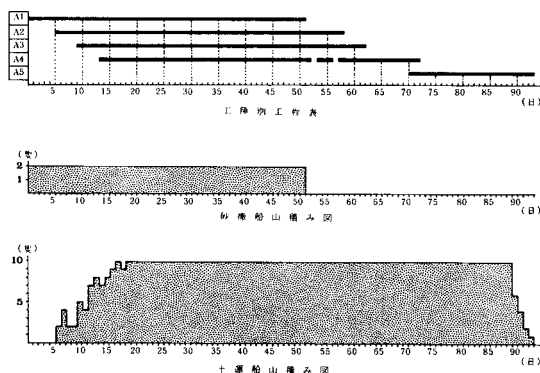
	単 位	総工事量	作業グループの標準作業量	作業グループ	
				R <sub>1</sub>	R <sub>2</sub>
A <sub>1</sub>	m <sup>3</sup>	250 000	2 500	1	
A <sub>2</sub>	〃	500 000	〃		1
A <sub>3</sub>	〃	〃	〃		1
A <sub>4</sub>	〃	〃	〃		1
A <sub>5</sub>	〃	〃	〃		1

(R<sub>1</sub>:砂撒船, R<sub>2</sub>:土運船)

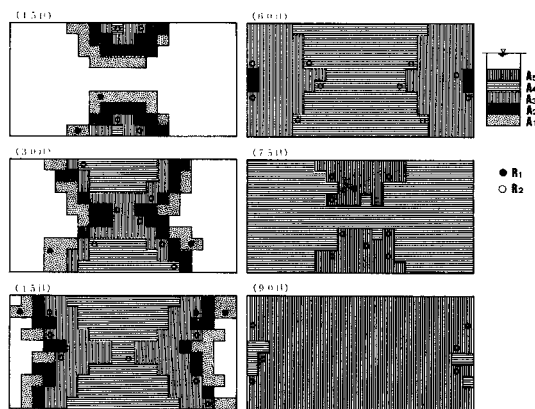
を適当な工区に分割し、各工区の優先順位を決めて工事を実施する場合がある。この場合には前節で述べた「複数工区の同時管理」が適用できる。また、施工区域に複数の基準点を設け、その基準点を中心として工事を進めることも考えられる。

図—13は、土運船による直接投入部分だけを示しており、全体は5層からなっている。一番下の層は敷砂工(A<sub>1</sub>)を表わしており、2層目(A<sub>2</sub>)から5層目(A<sub>5</sub>)までは埋立工(直投1から直投4)である(表—8参照)。先行距離、時間距離および保安距離を表—9、表—10、表—11に、また各工種の総工事量、作業グループの単位時間当たりの標準作業量および作業グループと資源の組合せを表—12に示す。ここで表—10に示す工種間の時間距離が下層の工種間ほど大きくなっているのは、軟弱地盤等の破壊を防止するためである。

埋立工事の工程管理モデルの考え方は、基本的に前節のケーソン式防波堤工事の例と同じである。ただし、工事全体を工区やブロックに分割せず、基準点を複数個設け(図—13のP点)、基準点を中心として工事を進める。つ



図—14 埋立工事の工種別工程表および資源の山積み図



図—15 工事の進捗状況と資源の配置

まり基準点に近いジョブほど優先順位が高く、また工種間の優先順位は下層の工種ほど高いものとする。

図—14は、工種別工程表と砂撒船および土運船の山積み図を示している(利用可能資源量は、砂撒船が2隻、土運船が10隻である)。ここで砂撒船は埋立工には使用できないとしているので、52日以後は稼働していない。また土運船も工事の初期においては、時間距離と保安距離の制約により稼働率が低い結果となっている。

図—15は、工事の進捗状況と砂撒船(R<sub>1</sub>)および土運船(R<sub>2</sub>)の投入位置を平面的にみたもので(15日ごとの出来高を平面的に表示)、工事の進捗状況が単に累積出来高だけでなく、空間的にとらえることができ、またその進捗状況も基準点を中心に広がっていることがわかる。このようにメッシュ式工程管理モデルを用い、工事の進捗状況を空間的に表示することができるため、土砂の投入位置の指定や出来高管理が容易に行える。また本計算例の場合は、基準点を2か所設定し基準点を中心に工事を進めているが、基準点が1か所の場合でも工期的には同じ結果となった(ただし、工事の進捗状況は異なる)。



### 7. 工種の感度分析と工期の算定例

本節では、図一10に示したケーソン式防波堤工事の工区1 (P<sub>1</sub>) を例に、工種の感度分析と工種別作業効率を考慮した場合の工期の算定を行う。この場合の利用可能資源量としては、捨石船が2隻、潜水士船が8組およびクレーン1台とし、ブロック別優先順位は (B<sub>1</sub>-B<sub>2</sub>-B<sub>2</sub>)<sup>3)</sup> とする。なお、前提条件として

〈工種の感度分析に関して〉

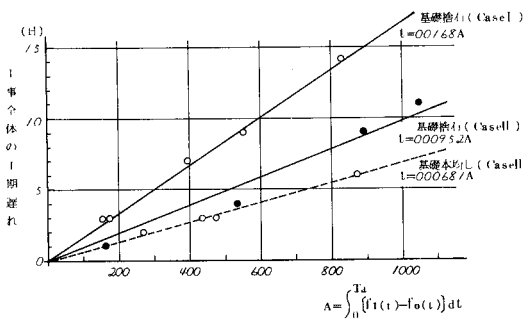
(1) 工種の感度分析は、基礎捨石 (A<sub>1</sub>) と基礎本均し (A<sub>2</sub>) について行う。

(2) 作業効率の低下による感度 (Case I) は、作業グループの単位時間当たりの標準作業量を低下させることにより評価し、事故等によるジョブの中断による感度 (Case II) は、上記の工種を任意の時点において中断させることにより評価を行う。なお、いずれの場合もそれらの値を変化させ、数ケースについて検討する。

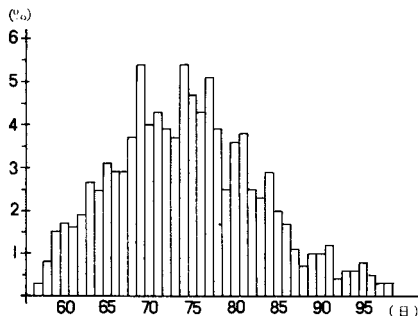
〈工期の算定に関して〉

(1) 作業効率は式 (4) を用い、その場合の工種別作業限界波高はすべての工種とも H<sub>1/3</sub>=1.0 m とする。

(2) 月別波高分布は、北東北A港の昭和47年から昭和54年までの有義波高8年分を月別に集計し、その分布に基づいて乱数を発生させ、任意の期日の波高を求める。



図一16 基礎捨石 (A<sub>1</sub>) と基礎本均し (A<sub>2</sub>) の感度曲線



図一17 工事全体の工期分布 (平均 74.5 日, 標準偏差 8.6 日)

図一16は、基礎捨石 (A<sub>1</sub>) と基礎本均し (A<sub>2</sub>) の A の値 (式 (1) 参照) と工事全体の工期遅れの関係を表わしている。図より A の値と工期遅れは、ほぼ線形関係にあり、また遅れの原因が作業効率の低下 (Case I) の方が、工期に及ぼす影響が大きいがわかる。次に基礎捨石と基礎本均しの感度を比較してみると、遅れの原因がともに Case II の場合、図一16より 0.00681/0.00952=0.72 となり、基礎本均しは基礎捨石より感度が低いことがわかる。つまり、基礎捨石の方が基礎本均しよりも工事全体に対する重要度が高いということである。

以上のように原因別に各工種の感度曲線を作成することにより、各工種の工事全体に対する重要度を把握することが可能となる。また重要度の高い工種を重点的に管理することが工程管理を進めるうえで重要なポイントとなる。

図一17は、波浪の影響のみを受けた場合の工事全体の工期の分布を表わしている。波高分布は対象とする月、あるいは年により大きく変化するため、工事全体の工期も最短は57日から最大で98日まで変化する (波浪の影響がない場合の実質工期は42日<sup>3)</sup>)。

### 8. 結 語

本研究は、工事全体を多層のメッシュ構造に分割し、先行距離、時間距離および保安距離の概念を導入することにより、工程管理を空間的・時間的に表現する方法を提案した。この手法は、特に工種間の関係が多層構造を構成し、かつ工事領域が広範囲にわたるような工事に対しては有効であると思われる。またメッシュ式工程管理モデルの応用として、工種の感度分析、作業効率による工期の算定、複数工区の同時管理および埋立工事への適用を図った。本研究により得られた結論は次のとおりである。

(1) 工事全体を多層のメッシュ構造に分割することにより空間的表示が可能となる。したがってグラフィックディスプレイを用い、作業箇所やジョブ間の関係が視覚により判断できる。

(2) 先行距離、時間距離および保安距離を導入することにより、ジョブ間の関係が明確になり、また容易に工事をシミュレートすることが可能となった。

(3) したがって、種々の条件下で経済的資源量や工期の評価および工程表の作成、資源の山積み図が容易に作成できる。

(4) 毎日の工程管理において工種別作業可能位置や工事量を明示することが可能なため、資材計画が容易となる。

(5) 工種別の感度分析を行うことにより、重点的に

管理すべき工種が明らかとなる。

(6) 工種別作業効率を用いることにより、工期の算定が容易に行える。

(7) 複数の工区を同時に管理することにより、資源の稼働率を上昇させ、工期の短縮や工事費の節約が考えられる。

(8) 埋立工事にメッシュ式工程管理モデルを適用することにより、土砂の投入位置の指定や出来高管理が容易となる。

#### 参 考 文 献

- 1) 奥山・佐藤：座標式工程表による工程計画手法の開発，港湾技術研究所報告，Vol.23, No.3, 1984-9.
- 2) 吉川・春名：建設工事における総括工程計画モデルの開発研究，土木計画学研究論文集，No.1, pp.243～250, 1984-1.
- 3) 須田・湯沢：外洋波浪の影響を受ける港湾工事の工程管理と波浪予測，土木計画学研究論文集，No.1, pp.235～242, 1984-1.
- 4) 湯沢・須田：メッシュ式工程管理モデルによるマルチプロジェクトの同時管理，土木学会年次学術講演会集Ⅳ，pp.105～106, 1984-10.

(1984.6.18・受付)

---