

大規模埋立工事のマネジメントシステムのデザインに関する方法論的研究

京都大学工学部 正員 吉川 和広

京都大学工学部 正員 春名 政

京都大学工学部 学生員 〇江尻 良

1. はじめに

近年、臨海部の高度な土地利用をめざした沿岸埋立工事プロジェクトが数多く計画され、実施されて来ている。これらの埋立工事プロジェクトは、神戸市ポートアイランド・穴甲アイランド事業や新聞西国際空港計画のように、投入資金・投入資源・工期が従来の埋立工事プロジェクトに比較して、いずれも大型化の傾向を示していると言える。この工事規模の大型化は、大型施工機械等の導入、新たな施工法・施工材料等の開発とその適用によって引き起こされたものと考えられる。一方では工事規模の大型化によって、PERT系手法を代表とするさまざまな施工計画管理技術の開発とその適用に対する要請が、数多く見受けられるようになって来た。本研究では、このような大規模埋立工事プロジェクトを対象として、工事を合理的に遂行していくための計画・管理方法に関するシステム論的な検討を行うことを目的としている。以下において、まず2.では、工事施工を合理的に遂行するための計画・管理の技術をマネジメントシステムという視点からとらえることとし、そのシステム設計のための基本的方針に関する考察を行う。ついで3.では、まずマネジメントシステムの支配的要因になると考えられる施工計画の策定プロセスについての考察を行う。ついでマネジメントシステムの構築という観点からみた、埋立工事の施工計画策定に関しての問題点の抽出を行ない、計画問題を合理的に解決していくための方針に関して、検討を加える。また、4.では、埋立工事プロジェクトの中でもとくに合理的な計画策定方法の確立が望まれている土砂埋立工程に着目して、より詳細な検討を加える。あわせて合目的性・実行可能性の高い土砂埋立工事計画を策定するための施工計画システムの提案を行うこととする。最後に5.では、土砂埋立工事を円滑に遂行していくために重要な役割を占める土砂運搬システムに関して検討を加え、システム設計に対する提案を行う。そしてここでは、システムの合理的な構成内容や機能的な要件を決定するためのシミュレーションモデルによる実証的分析に関して述べることとする。

2. システム設計の検討対象範囲と検討のための基本的方針

一般に、土木構造物の建設プロジェクトは、調査→計画→設計→施工→維持・使用という一連の過程にそって行なわれている。マネジメントシステムは、この一連の過程を合理的かつ合目的的に遂行するための計画・管理行為や各種情報処理等の総体であると考ええる。本研究ではマネジメントシステムの研究対象範囲を次のように限定して考えることとした。すなわち、工事の合目的的な実施という側面からマネジメント問題をとらえて、それらの関連要因を次のように把握することとした。

(1) 工事施工における実体的要因

① 施工機械・資材・労働力等の工事用資源

② 施工法・技術管理基準・作業仕様等の施工仕様

(2) 対象別マネジメント要因

③ 実施工程を主体とする工程計画・管理

④ 工程計画・管理をサポートしていくための費用計画・管理や資材計画・管理などをはじめとする各種工事用資源の計画・管理

(3) 工事のマネジメントにおける評価要因

⑤ 原価の計画・管理

⑥品質の計画・管理

⑦安全の計画・管理

そしてマネージメントシステムの設計に際して、これらの各構成要因を合理的に具体化することが必要であるといえる。3.以下では、工事施工計画の策定プロセスについて、現実の埋立工事計画の作成プロセスを概念的に想定するとともに、このプロセスにおける課題や問題点と、それらについての達成方法や解決方法に関する考察を行うこととする。

3.埋立工事の施工計画策定プロセスに関する検討

ここでは、2.で示したマネージメントシステムの構成要因を具体的に計画化していくための検討手順についての考察を行う。まずあわせて、一般的な施工計画の策定プロセスとして

Stage1. 工事施工の計画化のための初期入力情報の作成

Stage2. 工事施工の構想化

Stage3. 工事施工の実施計画の策定

Stage4. 管理計画の策定

という手順を経ることによって実行されることを望ましいと主張して来た。そこで以下においては、大規模埋立工事の施工計画の策定プロセスを、上記のような計画化のステップにもとづいて記述し、あわせて計画化の過程における検討項目の抽出と、課題の設定を行うこととする。まず、現実の施工計画策定手順をもとにして、対象とする埋立工事の施工計画の策定プロセスを(図-1)のように想定する。

Stage1.の初期入力情報の作成プロセスでは、

- ①自然環境情報：地形、地質、気象、海象等
- ②設計情報：設計図面、契約書、各種示様書等
- ③社会環境情報：現場付近の他構造物の有無、公営規制等

を後のStepで利用上便利な形で整理しておく必要がある。

Stage2.の工事施工の構想化のプロセスでは

- ④各構造物の施工法
- ⑤機械・船舶の投入数
- ⑥稼働対象月・日
- ⑦構造物の施工順序
- ⑧仮設計画

等を設定し、Stage1の情報と上記の5つの想定にもとづいて

⑨概略工程表

⑩工種別稼働日数

⑪工種別投入資源量

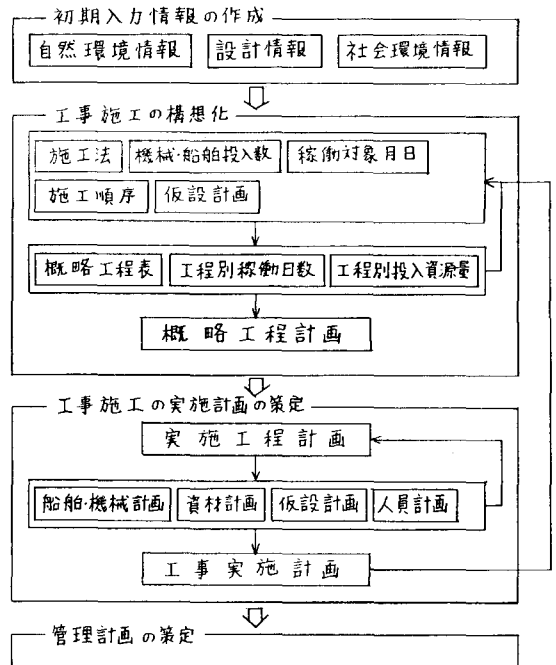


図-1 埋立工事の施工計画策定プロセス

などを一次案として決定するプロセスである。このため④～⑤の設定された条件の変更に応じて、効率的な方法で⑥～⑪の結果を修正することが可能となるようなシステムであることが望ましいといえる。

Stage3の工事施工の実施計画の策定プロセスでは、Stage2の検討の結果得られた概略工程にもとづいて、これに対応するように、かつ実施レベルで有効なように

⑫工程計画

②関連諸計画(船舶機械計画, 資材計画, 仮設計画, 人員計画等)

などを作成(実施計画化)する。

Stage 4 の管理計画の策定のプロセスでは、上記の各プロセスでの検討結果を実施の段階でできる限り実現していくとともに、不測の事態等の発生に対しても可能な限り、工事進捗に対する障害を取りのぞき当初目的の達成ができるようにあらかじめ検討を行っておく段階である。

以上の一連の各プロセスを、各々の Stage における検討内容とその目的にそった形で出来る限り合理的かつ効率的に実施することが、埋立工事の工事計画策定段階の主要な問題として考えることができる。近年では、この問題の合理的な解決手段として、コンピュータシステムや、各種のシステム的手法の開発・適用が行われて来ている。しかしながら大規模な埋立工事は次のような一般的な特徴を有しており、施工計画立案プロセスの明確な記述・システム化に對しての障害となっている。すなわち、埋立工事は工事の実施順序等の設定に自由度が大きく、また工事進捗に対する気象・海象等の影響が非常に大きい等の他の工事とは若干異なった特徴を有している。このため経験を積んだ技術者による施工計画の作成に當って、検討される代替案の作成や評価のための一連のプロセスに對して、多大な努力が必要とされている。こうした現状をふまえて埋立工事の特徴を十分に考慮した合理的な計画システムの開発が要請されていると考えられる。本研究では、このような埋立工事の施工計画システムの中で、土砂埋立工事を対象として設定し、計画化の方法についての考察を行うこととする。また同時に土砂埋立工事の施工計画の策定を合理的に行うための一連の計画システムについての提案を行うこととする。土砂埋立工事を対象として設定することは次の理由による。つまり土砂埋立工程の計画化の方法について、計画の代替案の作成に関する自由度が大きいことや、これといった合目的性の評価方法の確立が未だ行われておらず体系的な検討が行えないのが現状である。しかしながら、土砂埋立工事は、投入資源量・資材運搬システム(土砂運搬システム)の規模も大きく、埋立工事の中での主要な工事として考えることが必要である。このため、土砂埋立工事に對して合目的な施工計画の立案は埋立工事全体を合目的的に遂行するための基本的な課題であると判断したためである。以上の考察から、本研究では土砂埋立工事の施工計画の作成のために、一連のプロセスシステムとして土砂埋立工程計画策定プロセスをとらえることとした。そしてシステム化の方針として

④代替案作成段階における過度の自由度の存在を前提とした、合理的かつ効率的な代替案の作成方法の確立

⑤代替案の評価段階における合目的性の明確な検討方法の確立。

という2つの基本的な方針を設定することとした。

4. 土砂埋立工事の工程計画作成のためのシステム論的分析

4-1. 土砂埋立工事の工程計画作成システム

本節では、上記3.において述べた埋立工事の工事計画策定システムの中から、土砂埋立工程計画の作成プロセスに関して、・代替案の合理的・効率的な作成・代替案の実行可能性・合目的性の検討のための評価方法の確立を目的とする計画システムについての検討を行うこととする。

本研究では、土砂埋立工程計画作成システムとして次の4Stepからなる一連の分析プロセスを考えることとした。(図-2)。以下では各Stepの内容に関する説明を加える。

STEP1. 入力情報の作成プロセス

このステップでは、3.で述べた初期入力情報の作成プロセスと同様に、自然環境情報・設計情報・社会環境情報等の入力情報を、後の各Stepで利用可能な形に整理しておく。具体的には、

①自然環境情報

地形……埋立対象区域内の水深をメッシュ化

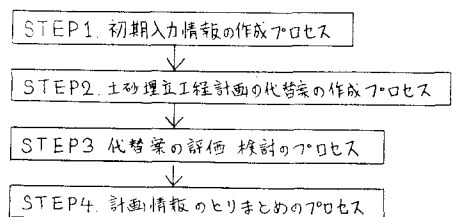


図-2 土砂埋立計画の策定プロセス

地質…埋立対象区域内の土質パラメータをメッシュデータ化。

気象・海象…過去の気象・海象データから、天候・雨量・風速・風向・波高等をデータ化。

②設計情報

埋立護岸形状・施工数量

埋立地地盤改良の方式・施工数量

土砂埋立の施工数量・埋立方式

③社会環境情報

土運船の運行航路規制

埋立地の土砂汚濁等に関する規制。

等について調査・整理を行う。

STEP2. 土砂埋立工程の代替案の作成プロセス

このstepでは、土砂埋立工事の作業パターンの代替案の作成と、これをもとにした埋立工程計画の代替案の作成を行う。このため本stepでは土砂の埋立作業の進捗に伴う工事の動態を、可能な限り現実的な形で検討を加えるために、シミュレーションモデルを作成した。そしてモデル内のパラメータを変更することによって、工程計画の代替案をシステムチックに作成することとした。(シミュレーションモデルの内容構成については4-2で述べる。)

STEP3. 代替案の評価・検討のプロセス

このstepでは、step2で作成された土砂埋立工事の工程計画の各代替案を、合目的性・実行可能性の側面から評価・検討を行う。評価項目として、

①工期…埋立工事プロジェクト全体の工期の中での土砂埋立工程と他工事工程との適合性の検討

②投入船舶・機械…必要数量・運用パターン等の検討

③投入土量…土取・土運搬システムの運搬土量・運搬パターンの変動に対する、埋立工事進捗への影響に関する検討

④コスト…投入機械・船舶の設置・運用コスト

等について、step2の結果をもとにして検討を加える。

STEP4. 計画情報のとりまとめのプロセス

以上の一連の検討の結果として得られた土砂埋立工程計画を、関連諸計画との適合性の保たれる形で整理するstepである。

4-2. シミュレーションモデルの内部構成

上記のstep2において述べた、土砂埋立工程計画の代替案作成のためのシミュレーションモデルについて、以下でその内容構成を順に説明していくこととする。このシミュレーションモデルは、護岸工事・地盤改良工事等の土砂埋立工事に関連する諸工事の進捗状況と、埋立土砂の投入パターンをパラメータとして、一日単位の埋立工事の進捗状況をシミュレートするとともに、後の代替案の評価のプロセスで必要となる、各種の指標の値を算定するものである。モデル化を行う土砂埋立作業は、現在最も一般的な工法と考えられる、バージ船による直接作業と、揚土機→コンバ→スフレッダ等の揚土システムによる揚土作業の2つである。そして、土運船による埋立土砂が埋立対象区域内に到着した時点から、直投・揚土作業を行い、日々の土砂埋立作業をくり返すものとして、全埋立区域内に土砂を投入し終わるまでの過程をシミュレートする。(図-3)にモデルの内部構成を示すと

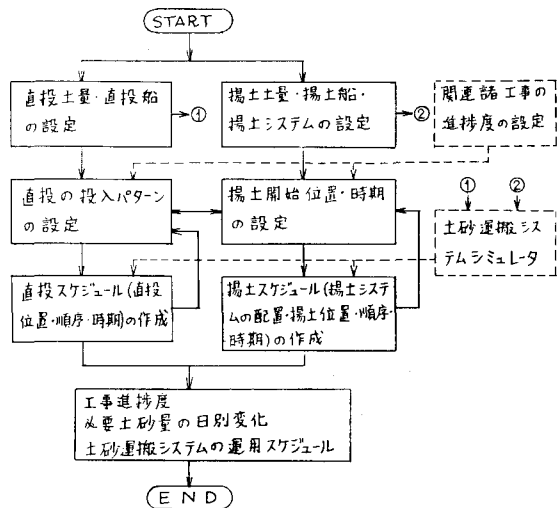


図-3 シミュレーションモデルの内部構成

ともに、以下で各ブロックの説明を行うこととする。

(1) 直投土量・船団数の設定ブロック

Step1の入力情報をもとにして、直投土量・直投船団数の設定を行うブロックである。直投土量は、敷砂完了後の土砂埋立区域の水深から、直投限界水深(土運船の形式、積込土砂量によって決定する)までの全体の容積をもとに算定を行う。また一日当りの平均的な直投土量 Q_1 を同時に算定する。次に土砂運搬船の、一運行サイクル当りの運搬土量、サイクルタイム、一日当りの平均稼働時間から、土運船の必要船団数の下限を算定する。

(2) 直投の投入パターン設定ブロック

一日ごとの直投作業の進捗順序の基本パターンを設定するブロックである。基本パターンを構成する要素として、一日当りの土砂堆積量の増加量、一日当りの土砂投下の平面的な広がり的大小さ等の制約と、この要素の可能な組み合わせによって、基本的な直投パターンを設定する。この直投の投入パターンを設定に際して、護岸工事、地盤改良工事等関連諸工事の進捗度から、直投土砂投入開始位置・開始時期等についての主要な制約条件を設定する。そしてこの投入開始位置・開始時期の設定結果から対応した直投パターンの決定を行うことになる。例として、④護岸工事の進捗度が、直投開始時期において全体の50%である場合、と⑤直投開始時点において、護岸工事の進捗度が土運船の運航のための開口部を除いて完了している場合を考えると、

④の場合、土砂投入による海上汚濁・場土撤設置位置の決定等の問題を検討するために、直投開始位置・投入順序に制約が生じる。

⑤の場合、埋立工事区域内の土運船の運航等の問題を検討するために、直投投入順序に制約が生じる。

という形で直投開始位置・投入順序等に関する異なった特徴を持つ制約が生じる。この結果として直投の投入パターンの設定にも、異なった決定を行う必要があるといえる。以上のことから、本モデルでは関連する諸工事の進捗度を外生的に与えて、これを制約として主要な直投パターンの代替案の設定を行うこととした。

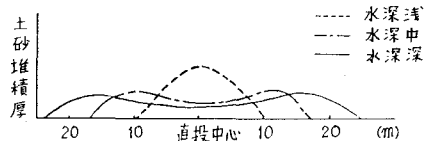
(3) 直投スケジュールの作成ブロック

このブロックでは、一日ごとの直投作業の進捗状況に関して、投入位置・順序・時期等の代替案を作成するとともに、直投作業の工程計画の代替案の評価のための情報を作成する。まず、直投埋立対象区域を、50(m)×50(m)のメッシュに分割し、直投作業一回当りに、このメッシュ分割された区画(以降これをユニットと呼ぶ)が均一の高さで直投埋立されていくものと仮定しておく。底間式バージによる土砂投下実験や機型実験等による報告では、次のことが一般的に言われている。つまり直投土砂の水中にお

図-4

ける拡散分布ならびに形状は、投下される水深・投下速度・投下土 直投土砂堆積実験による土砂の散布状態

砂量などによって通常異なるものとされている。(図-4)本研究では、直投方法を能率よく少量ずつ多投する方法等を用いることとして、上記の均一な拡散分布・形状として土砂堆積のモデル化を行うこととした。このブロックでは以下の手順で処理を行う。



④(1)で設定した直投開始位置から、第一層目の直投作業を行う。第一層の直投可能ユニットとして、護岸あるいは地盤改良等の施工を実施中の区域のユニットから、あらかじめ設定したユニット数だけ離れたユニットを設定する。そして直投の投入パターンに従って、一日当りの直投土量だけのユニットの地盤高さを変更する。

⑤直投作業は、地盤の破壊・不均沈下等の防止、圧密の促進、均等な層状埋立の実施等を行うことが必要とされている。このため直投可能ブロックの中で、前日の施工ユニットに隣接するユニットに対して順次直投を行っていくものとする。

⑥各ユニットに対する、第2層以降の直投作業は次の2つの条件を満たすユニットを、順次直投パターンに従って施工していくものとする。

・前回の直投実施時期から、ある決った日数(圧密促進等のための定数)以上経過している。

・埋立法尻部のユニットから、1ないし2ユニット以上離れている(内蔵スバリ等の防止)

④ 以上の手順によって、各ユニットの土砂投入水深が、直投限界水深になるまで直投作業をくり返す。

(4) 揚土土量・揚土機・揚土船数の設定ブロック

(1)と同様の考え方で、一日当りの揚土量・揚土機・揚土船数の設定を行う。

(5) 揚土開始位置・揚土開始時期の設定ブロック

このブロックでは、(2)の直投投入パターン設定ブロックの結果を用いて、揚土の開始位置・開始時期の設定を行う。ここで揚土開始時期は、直投開始後何日目からという形で設定しておく。

(6) 揚土スケジュールの作成ブロック

(5)の結果を初期条件として、日々の揚土作業位置・揚土順序・時期の算定を行うとともに、揚土システムの配置と運用スケジュールの代替案を作成するブロックである。本研究では、揚土システムとして、揚土機→シフタルコンバヤ→スフリング等による揚土作業のモデル化を行うこととした。この揚土スケジュールの作成ブロックでは、次の主要なパラメータの変更によって日ごとの揚土位置・順序・時期の算定を行っている。

① 扇形シフトか平行シフトか……シフト一回当りの揚土可能面積に影響を与える。

② コンバヤの長さ……各コンバヤの長さによって、コンバヤシステムの敷地内での物動一回当りの揚土可能面積が変化する。

(7) 代替案の整理のブロック

以上の一連のプロセスを経て得られた、土砂埋立工程の代替案を、評価検討のステップで利用するために、

① 日々の埋立必要土量・必要船舶数

② 工事工程の進捗度

③ 揚土システムの規模・配置・運用スケジュール等のとりまとめを行っておく。

4-3 代替案の評価のプロセス

4-2で説明を行ったシミュレーションによって、土砂埋立工事計画の代替案を効率的に作成することが可能となる。以下ではこの代替案の中から、工事の実行可能性・合目的性の側面から評価・検討を加えるために、

・全体工事工程の中での土砂埋立工事工程の実行可能性・合目的性の検討として、工期・必要コスト・出来形(工事進捗度)等の評価を行い、次に

・埋立土砂運搬システムと土砂埋立工事工程との間の土砂のやりとりに関する検討を加えて望ましい土砂埋立工事工程の代替案を選定する。

5. 埋立土砂運搬システムの設計のためのシステム論的分析

5-1. 分析の目的

2.で述べたように、大規模埋立工事の工事計画の策定に当たって、マネジメントシステムの各構成要因を、工事の合目的的な遂行を行うことを目的として、可能な限り合理的な形でシステム化しておく必要があると判断される。本節では、4.で述べた土砂埋立工事の計画システムに密接な関係を持つ、土砂の運搬システムを対象として設定し、埋立工事を合目的的に実施していくため、必要とされる土砂運搬システムの機能的な構成と、システム設計のための提案を行うこととする。具体的には、まず、土砂運搬システムの埋立工事における位置付けと、機能的な構成を検討するための課題の設定を行う。次に、分析を行うための手法としてシステムシミュレーションを取りあげ、本研究での通用の方法に関する説明を行う。最後に、シミュレーションモデルによる土砂運搬システムの最適構成についての議論を、土砂埋立工事計画システムとの関連をふくめて、システムの評価の段階で考察を行うこととする。

5-2 埋立工事における土砂運搬システムの位置付けと、システム構成に対する課題

本研究では、対象とする土砂運搬システムを次のように想定する。すなわち、現在大規模な埋立工事において

実施あるいは適用の検討が数回こなされているコンベア・バージ方式による土砂運搬のためのシステムをとりあげることとした。この土運搬システムは、土取場での採土→ベルトコンベアへの投入→ベルトコンベアによる輸送→シップローダによる土砂運搬船への搬込み→土運船による海上輸送→直接埋立あるいは揚土機による揚土→埋立区域におけるベルトコンベアによる埋立、という一連の土砂運搬系列の全体としてとらえることができる。海上埋立工事においては、この土砂運搬システムの機能構成の良し悪しが、工事の進捗に対して非常に大きな影響を持つものと判断できる。このため、土砂運搬システムの機能構成の状態を正確に判断可能とするような分析方法を構築しなければならないと考える。また、上記の土砂運搬システムは、システムを構成する船舶・機械等を一つのサブシステムとして考えると、それぞれのサブシステムが時間の経過とともに、その前段階に位置するサブシステムから土砂を受け取り、連続的あるいは断続的に、次段階のサブシステムへと土砂を受け渡す。そしてこのような結果として全体システムの機能を発揮することになる。以上のような特徴を有するシステムの設計を検討する段階においては、

- ①個々のサブシステムの間に存在する能力のバランス
- ②サブシステム間の土砂の受け渡しの形態

という2つの側面から、システムの構成についての分析を行う必要があると判断した。さらに④のサブシステム間の能力のバランスの問題にしても、作業の形態が連続的な作業と断続的な作業との間の能力についてのバランスは、システムの構成上問題を生じやすいと考える。従来から土砂運搬システムのサブシステム間の能力差の緩衝装置として、ストックパイルの設置がしばしば検討されて来た。ストックパイルの設置に対して、上述した土砂運搬システムのどの位置に設置し、その規模・運用についてどのようなものが望ましいのかという問題についても、土砂運搬システムの機能構成を検討する際、同時に明確にしておく必要があるといえる。

本研究では以上の考察の結果から、土運搬システムの最適な機能構成や運用方法に関する検討を行うために、土砂運搬システムの構成や稼働状況をできるだけ現実 に即した形でモデル化を行い、システムシミュレーションモデルを構築することとした。そして、土砂運搬システムの設計に際して有効な情報を得ることを目的として考察を行っていくこととした。

5-3 シミュレーションモデルの構成

土砂運搬システムのシミュレーションモデルのモデル化対象範囲を概念的に(図-5)に示す。

モデルのインプットとして、土取現場における土砂の投入パターン(投入土砂量とその時間的分布)アウトプットとして直接あるいは揚土機における

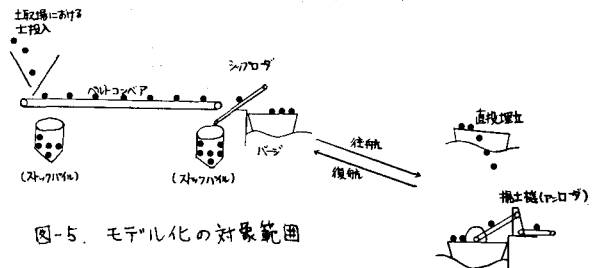


図-5. モデル化の対象範囲

る運搬土量パターン(運搬土砂量と時間的分布)ならびに、各機械・船舶・ストックパイル等の稼働状況に関する情報である。シミュレーションモデルの構築のために、システムの稼働状況を(図-6.7)のようにモデル化した。

モデル化のためのシミュレーション言語として本研究ではGPSS/Xを用いた。シミュレーションの実施に際して、単位時間・単位土砂量を十分小さく設定することによってベルトコンベアによる作業のように連続的な稼働特性を有するサブシステムについても利用上の問題は生じないものと判断した。モデルの構成を(図-8)に示す。以下ではパラメータに関して、モデル化における検討項

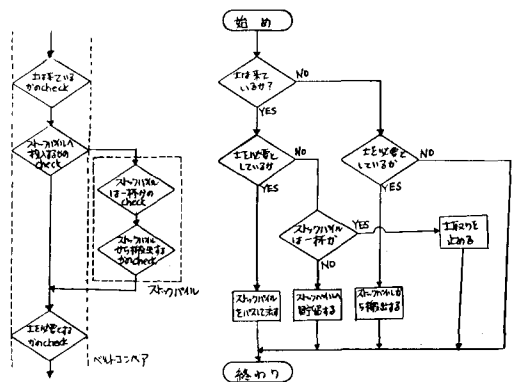


図-6 稼働状況のモデル化(ストックパイル)

目を説明する。

(1) 土取場からの出土量とその時間的分布

地山の地形・土質、投入機械系の種類、土取りスケジュール等によって決定される。本モデルでは実測データ等をもとにして仮想的に与えることとした。

(2) ストックパイルの位置

ストックパイルの位置として、i) 土取場に隣接 ii) シップローダに隣接、iii) 埋立地（ストックヤード）等が想定される。

(3) ストックパイルの容量

ストックパイル容量は、通常1日当りの出土量程度とされている。しかしながら、システムの機能構成上明確な根拠が存在しているわけではなく、本モデルでは、これをパラメータとして考えた。

(4) 土運船の能力

（土運船一隻当りの容量×船団数）によって決定される。土運船は直投の場合、底開式押航バーンが用いられる。揚土の場合、揚土専用バーンを用いることもあるが、揚土機形式によっては、直投用底開バーンが用いられることも多い。配船は原則として土運船（バーン）1に対して押船1とする。

(5) 土運船の運航距離

土運船の運行速度とともに、往航・復航所需時間で表わすこととした。

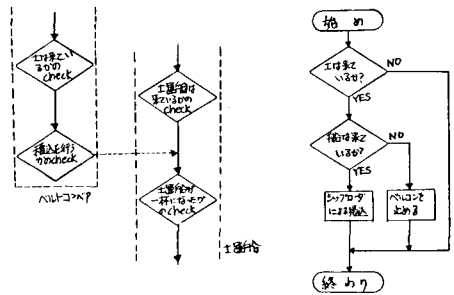


図-7 稼働状況のモデル化（シップローダ）

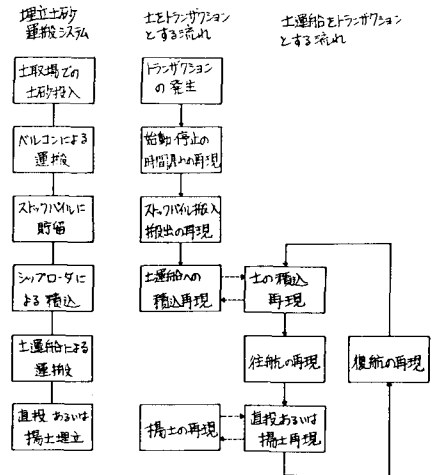


図-8 シミュレーションモデルの構成

5-4. シミュレーションの実施と代替案の評価・検討

シミュレーションのインプットデータとして、4.で述べた埋立工程計画の代替案の中から、埋立投入土量・投入時期を満たすように、土取現場の土砂投入パターンを設定する。この土砂投入パターンを用いて、1日稼働をシミュレーションの単位として、埋立工期全体に渡ってシミュレーションの実施を行う。システムの機能構成の代替案を作成するために、主要パラメータとして、

① 土運船の能力・船団数

② ストックパイルの容量・位置

を設定することによって、各代替案の稼働特性に関する情報を得ることとした。

土砂運搬システムの評価の方針として、埋立工事工程との間に整合のとれた形で土砂運搬システムの最適な機能構成を得るために次の手順を設定した。

- ・土砂埋立工程計画の代替案の中で、最も望ましいと判断されたケースについて、埋立投入土砂量・投入時期・土運船の運行サイクルタイム等を満たす、土砂運搬システムを設定し、その中から
- ・土砂運搬システムの総コスト（インシャルコスト＋稼働コスト）の最小な代替案を選定する。

6. おわりに

以上、大規模埋立工事を対象とする、工事施工計画・管理の問題について、若干の考察と検討を行って来た。本文中のモデルの詳細や実証分析、問題点等については、講演時に具体的に述べることとする。

最後に、研究の遂行にあたって有益な御示唆をいただいた（株）五洋建設 土木本部 土木設計部、高階実雄氏、澤田 誠氏に感謝の意を表します。