

(II-4)

トンネル工事を対象とした 工程計画・管理のシステム化に関する研究

A Study on Systems Approach to a Development of
Scheduling and Controlling System of Tunneling Project

立命館大学 春名 攻・
大成建設(株) 浅見 俊明・
立命館大学大学院 原田 満・
立命館大学大学院 ○辻井 裕・

By Mamoru HARUNA, Tosiaki ASAMI, Mituru HARADA, Yutaka TUJII

これまで、本研究グループでは、システム論的な観点から工事マネジメント業務全体の整理を行い、その中でも中核をなしている工程計画・管理業務について検討を加えていくことにより、トータルなマネジメントシステムの構築が可能であると考え、線形土木構造物工事を対象とした座標式工程モデルの開発研究を行ってきた。

本論文においては、まず、座標式工程モデルの特徴をマネジメントのツールという視点から概観し、次いで、近年、技術革新が著しく大規模土工とならんで機械化施工が進んでいる、山岳トンネル工事を対象工事にとりあげ、実証的検討成果を報告する。特に、山岳トンネル工事は、施工空間が限定されるため施工技術的制約を受けやすいことや、サイクリックな作業が連続して行われることから、このような施工特性を十分考慮して、従来モデルの拡張の検討を含め、工程計画・管理のシステム化についての開発研究を行った。

【キーワード】 座標式工程モデル、工程計画・管理、トンネル工事

1. はじめに

近年では、建設工事の大規模化・複雑化が進むとともに、慢性的な作業員不足や、作業環境の変化といった問題が益々大きなものとなっている。

本研究グループでは、このような状況のもとで、業務の合理化と生産性の向上をはかるためには、建設工事のマネジメントシステム化が必要であると考え、工程計画・管理業務を中核的業務とする、トータルな工事マネジメントシステムの構築を目指した

研究を行ってきている。

本論文においては、まず、これまでの検討成果として開発を行った概略工程計画システムの概要を述べるとともに、システムの中心となる座標式工程モデルについて、その特徴をマネジメントのツールという視点から外観する。そして、機械化施工が進んでいる、山岳トンネル工事を対象事例として取り上げ、本システムの実証的検討を通じて、工程計画・管理作業のシステム化のための方法論的検討の成果をとりまとめて述べることにする。

2. 工程計画・管理のシステム化への基本的姿勢

(1) システム開発への基本的姿勢

技術者不足に対応していくとともに、過去の施工実績を有効に活用していくためには、計画情報のデータベース化はもちろん、処理プロセスの標準化が不可欠である。

- ・ 正 員 工博 理工学部土木工学科教授
(075-465-1111 EX3701)
- ・ 正 員 工修 土木技術部技術情報室室長
(03-3348-1111)
- ・ 学生員 理工学研究科土木工学専攻
(075-465-1111 EX3701)

本研究では、工事種別に整理した全社共通の基本的なフレーム構造を持つことが必要であると考え、WBS (Work Breakdown Structure)によって、7つのレベルからなる工事項目階層の整理を行った。この工事項目階層と、それらのレベルに応じた計画情報およびデータを整理することによって、より効率的に計画作業を進めることが可能であると同時に、その後の管理や施工実績に関する情報の収集・更新等も容易に行えるものとする。

本研究では、このような過去の施工実績をもとに共通データとして整備した標準データベースを中心に、施工計画システムの全体構成を、図-1に示すような形に設計した。本システムにおいては、標準データベースより与えられる工事階層を共通フレームとすることによって、中心となる工程計画・管理と、他のサブ・システムとの連動をはかるとともに、サブ・システム単位に実際のコンピュータシステムとして開発する方法をとっている。

また、本研究では、メイン・システムとなる工程

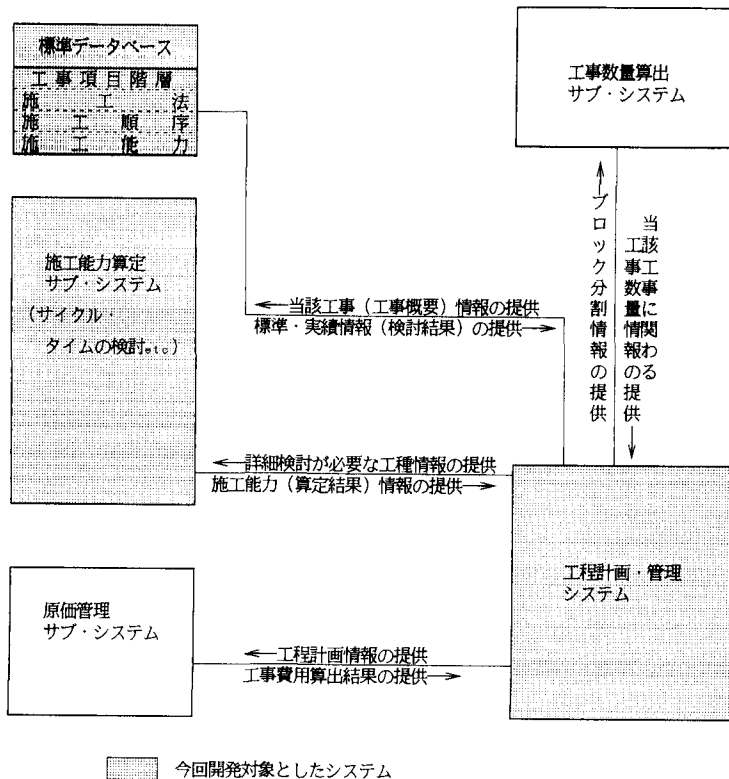


図-1 施工計画システム全体構成

計画・管理システムの開発を早期に着手しているが、ここでは、無理に高度化されたシステムとはせず、いかに工程表を出力するかといった単純な基本機能を取りあげた開発を行った。すなわち、本システムは、図-2に示すような5つのステージにより構成されており、人為的な判断や実行をとみなわない機能のみをコンピュータシステムとして、取り上げ、処理の迅速化と幅広い検討の可能性を実現するものである。標準・実績情報を除く個別入力情報は全て計画者の判断入力にまかされ、ステージ2からステージ4を繰り返すことで、ヒューリスティックに計画案の策定を目指すこととした。

そして、より合理的な計画策定方法を目標に据えて処理機能の高度化をはかり、実務での適応が十分に保証された段階で随時、置き換えていくといった実際の開発方法を用いることで、システム全体の高度化にも対応していくこととしている。

(2) 計画情報の精度的問題への対応

概略工程を計画するにあたっては、概略的検討でありながらも詳細工程のフレーム

としての機能を満足するような検討が必要であり、計画データの取り扱いや精度には十分な注意を払わなければならない。本研究では、工程計画業務を過去の経験から標準的に取り扱える部分と、個別性・多様性を考慮して具体的に掘り下げて検討を加えなければならない部分とに分けて、システム化を行った。特に過去の工事経験が多く、標準的な考え方や方法が用いられると判断される工種や、その計画内容が工事施工の結果にあまり影響をおよぼさないと考えられる工種に対しては、トップダウン的なアプローチを実施し、工種単位で施工能力等の検討を行うことにした。また、過去にあまり工事経験がない場合や、工事全体に影響を与えられとされる工種、さら

には、構造物構築工事のように、作業パターンがリフト構造であったり、複雑な作業形態を持つ工種に対しては、次のような異なったアプローチをすることとした。すなわち、ここではボトムアップ的なアプローチを実施し、作業レベルの検討結果を工種レベルに集約して、概略工程の工程要素とすることとした。

以上に述べたように、ここでは全体工程の検討と、それに付属するサブ工程の検討の両方を保有するシステム開発を行った。これにより、データ精度の克服はもちろんのこと、詳細工程との整合性についても確保することが可能であると考えた。

3. 座標式工程モデルの概要

現在、PERT/Time が工程計算の主流となっているが、機械の稼働空間や安全空間の確保等による空間

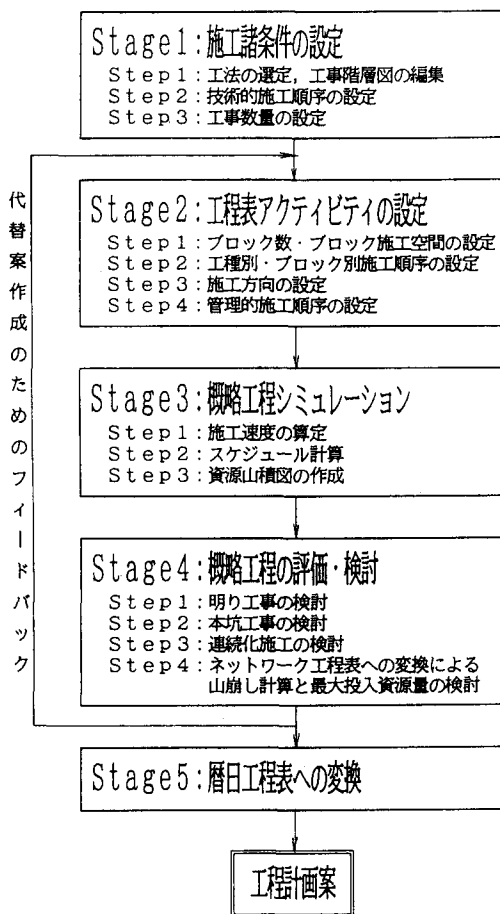


図-2 工程計画システム全体構成

制約や、施工能力の関係によるタイムラグの設定については考慮することができない。そこで、本研究グループでは、より総括的な工程計算方法の確立を目的として、施工延長と時間の2軸からなる座標空間上で検討を行なう、座標式工程表モデルを既に開発している。

(1) 座標式工程モデルの概要

座標式工程モデルは、ネットワーク工程モデルのように完全なグラフ構造ではなく、比較的単純なモデルとあると考える。先行と後続アクティビティの錯綜を禁止した状態により、スケジュール計算を実行していくため、ネットワーク工程モデルのような煩わしい順序設定も不要である。しかし、対象アクティビティが、工種とブロックの2つの階層を有していることから、それぞれ独自に順序関係を設定することとしている。

時間的な縦の関係につながれ、技術的な順序関係を持つ工種の施工順序関係には、後続工種の第1施工ブロックの施工空間にある先行工種のブロックが工事を完了すれば、後続工事が施工開始できるFS(Finish Start)と、場所を問わず先行工種の全ブロックの工事が終了しなければ開始できないPFS(Perfect Finish Start)の順序関係を与えている。一方、ブロックは、施工空間の横の関係を持つものと考えられ、工事の施工状況によって計画者の意思を反映できるように、ネットワークと同じFS(Finish Start)、SS(Start Start)を採用することとした。

工種間の技術的順序のみを設定することにより、スケジュール計算が可能であり、他は必要に応じて随時計画者が設定することとしている。また、順序関係とともに、後続作業は一定の期間施工が禁止されることがある。このような、施工法上、あるいは安全確保の上から制約を受ける空間的なタイムラグと、時間的なタイムラグの2種類を設定することとしている。なお、座標式工程モデルにおけるスケジュール計算方法については、例えば、文献3)等を参照されたい。

(2) 「資源の山崩し」方法

時間的な工程のデザインは、座標式工程表が有効な手段であると考えて、本研究では、座標式工程モデルによるスケジュール計算方法を提案したが、出力する工程表を座標式工程表に限定する必要はない。

本研究では、バーチャート工程モデルやネットワーク工程モデルに等価変換を行なう機能も付加しており、計画者が出力工程表を選択する方法を採用している。

特に、「主要資源の山崩し」をもとにした、資源配分計画の立案にあたっては、ネットワーク工程表を用いた方が効率的であると考えられる。しかし、ネットワーク工程表による山崩し計算を行った結果には、工種・ブロック間で工事の錯綜が生じている可能性があり、これを計画案として選択することは不可能である。そこで、再度座標式工程表に再変換を行うことによってこれらの錯綜関係をはじめ、実行可能性について検討・確認を行うこととしている。

4. トンネル工事への適用による実証的検討

(1) 対象工事の概要

対象とするトンネル工事は、2車線の山岳道路トンネルであり、主要工法にNATM工法が採用された工期2年の工事である。掘削工法には、発破によるベンチカット工法が用いられ、ずり出し方式はタイヤ工法となっている。施工区域は、切盛造成工事を中心とする明り工事区間が272m、本坑工事区間が759.5mであり、地質区分はB～Dに分けられており、支保パターンは比較的複雑である。坑口は1箇所であることから、坑口から片押し的に工事は進行することになる。

(2) トンネル工事の特性に関する検討

a) ベンチカット工法への対応

本工事の掘削工事に用いられているベンチカット工法では、地山の安定を保つために、地質区分に応じて上半掘削の後になるべく早く下半掘削を行なうショートベンチカット工法と、多少の余裕を持って下半掘削を行なうロングベンチカット工法が併用されている。このような掘削工種のブロック・リフト分割にあたっては、地質区分を延長方向のブロック分割として捉えるとともに、ベンチ数を垂直方向のリフト分割として捉えることとした。

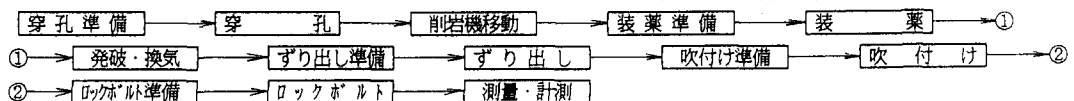


図-3 本坑掘削工事のサイクル・タイム（一例）

（地山区分B 上半掘削工の場合）

しかし、リフト分割されている場合には、ユニット間の先行ブロックと後続ブロックの施工空間が重複するため、工種間の順序関係と同様の関係が、ブロック間に存在することになる。

そこで、このように工種間順序関係がFSの場合には、計算対象ブロックの施工空間と重複する施工空間を持つ先行工種のブロックから求めた開始時刻と、対象（後続）工種とのブロック順序関係から求めたそれとを比較して決定するだけでなく、リフト分割が行われている場合には、工種間と同様に、施工空間の重複する先行ブロックから求められる値についても比較検討を行うこととした。

b) サイクル・タイムの検討

トンネル工事における本坑工事の施工過程は、図-3に示すようなパターン化された一連の作業がサイクリックに繰り返される構造となっており、このサイクルが各工種あるいはブロックにおいて繰り返されることによってトンネルの施工は進行していく。つまり、トンネル工事においては、1サイクルが終了することによって切端が進行するわけであるから、サイクル・タイムと1サイクル当りの進行が明確になれば各工種（ブロック）の移動速度、すなわち切端の進行速度がわかることになる。しかし、サイクル・タイムは工事によって大きくその値が異なるため、決定にあたっては、各個別工事の条件を十分に考慮する必要がある。このことは、トンネル工事（本坑工事）施工の特性といえる。

そこで、本研究においては、全体工期に占める割合が高く、サイクリックな作業が多い、本坑掘削工事を対象として、サイクル・タイムの検討のためのシミュレーションを行い、本システムのボトムアップのアプローチ方法・機能の拡充をはかることとした。

トンネル坑内という限定された施工空間内での掘削工事の施工が合理的に行われるためには、掘削により排出されたずりの運搬や吹付けコンクリートの運搬が、掘削機の進行を妨げないようにするだけで

なく、インバートコンクリートの施工により運搬車両の使用制限をについても考慮する必要がある。すなわち、図-4に示すようサイクル・タイムの構成要素を切端部と運搬部に分けてサイクル・タイム間の相互のバランスを考慮することとした。切端部においては、掘削グループのサイクル・タイム、ずり出しグループのサイクル・タイム、支保グループのサイクル・タイムおよびインバートコンクリートの打設状況に対しての検討を行い、運搬部においては、

ダンプトラックやトラックミキサといった、ずりやコンクリート等の運搬車両のサイクル・タイムに対しての検討を行うこととした。そして、これら切端部と運搬部の両者のサイクル・タイムについての検討を加えることによって、サイクル・タイムを決定することとした。

各作業のサイクル・タイムの算定方法を検討したところ、土質や岩質、支保パターン、設計断面等の定型条件は計画段階での変更は不可能であることから、

機械能力を中心とする変更が可能な要素である削岩機の使用台数、のみ下がり速度、穿孔数（1ブーム1㎡当り）、ずり積み機バケット容量、吹付け機施工能力およびこれらの諸次元から構成される一発破進行長を、サイクル・タイム検討シミュレーションの操作変数とした。

シミュレートした結果の1例を図-5に示す。地山区分Bの上半掘削に対しては、一発破進行長の変更が、機械能力においては、ずり積み機のバケット容量、コンクリート吹付け機施工能力、削岩機使用台数の順に工期への影響が大きいたことが判明した。

c) 明り工事部への対応

トンネル工事は、明り部とトンネル部の2つに大きく分類される。トンネル部は、多少の曲線区間を含む場合があるものの、代表的な線形工事として取り扱うことが可能であるが、明り部では、土工事が主体となる平面工事となってしまう。両者を分離して、明り部ではネットワーク工程表による検討、トンネル部では座表式工程表による検討が望ましいものと考えられるが、施工順序関係を見てみると、トンネル部坑口取付工事までは、

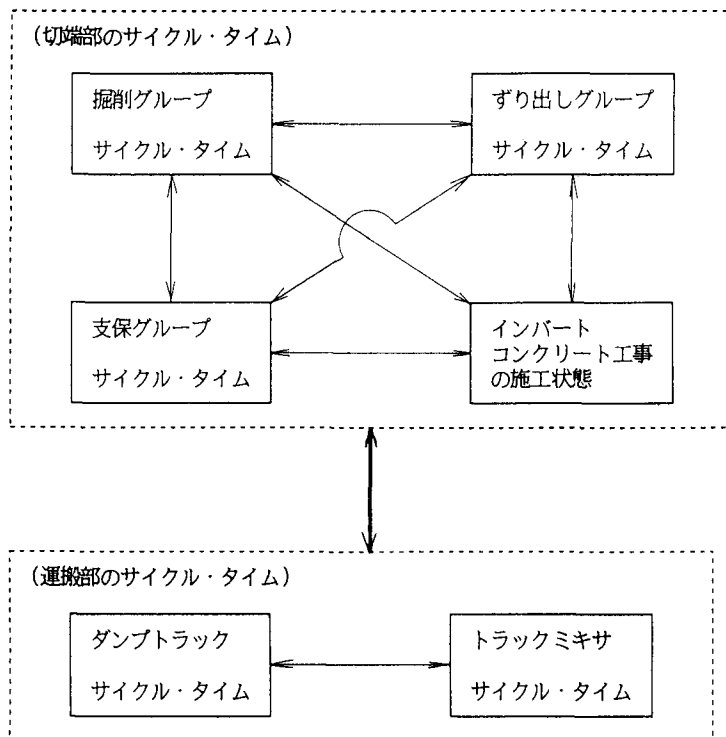


図-4 切端部と運搬部とのサイクル・タイムの関係

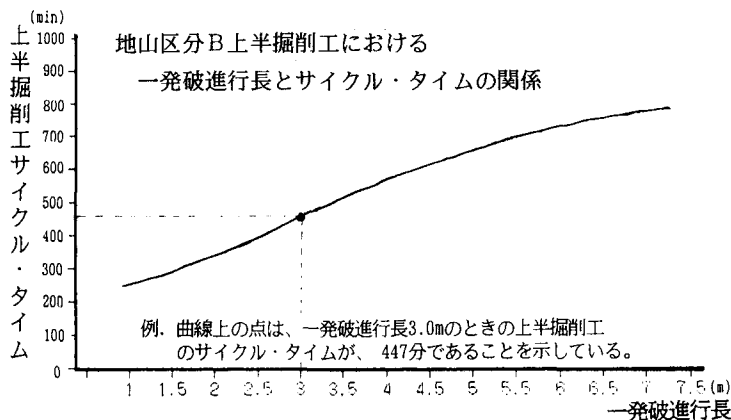


図-5 サイクル・タイム検討シミュレーションの例

明り工事の施工に大きく影響されるものの、トンネル部が施工可能となると、工事車両の運行以外、全く影響を受けずに施工されるといった特性を有しているため、完全に分離した検討は不可能である。

本研究では、とりあえず座表式工程表による検討を行なうこととしたが、無理に平面を線形に置き換えたため、切盛造成工事を２種に分離する必要がある。さらに、工程表の傾きは必ずしも施工速度を示さず、傾きをつけたことにより、かえって切盛造成工事の検討の妨げとなってしまうことも確認された。

(3) 工程計画案の策定

一部分ではボトムアップ的な検討を行い、標準データをベースにして標準工程を作成したところ、所要工期は、736日となった。代替案の検討に先立ち、本研究では、現場技術者に対して、実務における代替案検討内容とその検討プロセスについてヒアリン

グを実施している。そして、本研究においても、実務と同様の検討プロセスを踏まえることによって効果的な検討が行えるものと判断して、図－6のような代替案検討プロセスを設定した。

各段階における検討内容は、以下のとおりである。

- a) Step 1：本坑工事より、自由度が高い明り工事に対して、工期短縮及び投入資源の側面からの検討を行う。
- b) Step 2：全工期に対する所要期間のしめる割合が大きい本坑工事に対して工期短縮の検討を行う。
- c) Step 3：使用資源の有効活用といった側面から施工の連続性の検討を加える。
- d) Step 4：ネットワーク工程表に変換を行い、使用資源の最大投入量の低減を試みる。

本研究では、柔軟性や機動性に富んだ検討を行うためには、豊かな実務経験に裏付けられた計画者の適切な判断を活用することが、最も有効な手段であると考えた。そして、解の改善を重ね、目標となる解を発見するといったヒューリスティックな計画方法を採用することにより、時間と資源の２方向からの総合的な評価が可能になるものと考え、上記の検討プロセスにしたがって、代替案の作成を行った。

Step 1では、工事用道路に付随する明り部のブロックについて、工期短縮を中心に検討を行った。3つの代替案のうち、切盛造成工事を２工区に分割したNo.3代替案が最も工期が短縮されたが、資源投入量が大幅に増加し、工事費用面から考えると効率的でないと判断された。また、施工方向を変更すると大幅に工期が長くなり、以後の本坑工事に大きな影響を与えることが確認された。そこで、このStepでは、投入資源量も工期短縮日数と比例して増加する能力変更方法を採用することとした。ここでは、省略したが、施工能力を操作変数として、シミュレーションを行った結果、施工能力を10%引き上げれば、以後の検討の中で、制約工期を十分に満足することが可能であると判断されたため、No.2代替案を次ステップの検討対象とした。

Step 2においては、地山区分Bにおける上半掘削の一発破進行長について検討を行った。No.6代替案が最も工期が短くなったが、一発破進行長を3.5mとした場合は、地山の安定条件に影響を与えるこ



図－6 代替案設計フロー

とが予測された。また、1日当りの方数を2方とすれば、サイクル・タイムが446分となる一発破進行長が3.0mのNo.5代替案は、他の代替案と比較しても、最も作業の施工性・効率が高いと判断されたため、この代替案を選択することとした。

Step 3では、連続化施工による最大投入資源量の低減について検討を行った。まず、全工程の中でも最も資源転用率の低い下半掘削について検討を行った。つまり、上半掘削に比べて下半掘削の施工速度が早いにもかかわらず、上半掘削との間に、空間的な制約を受けるため、上半掘削と同程度まで、下半掘削の施工能力を低下させる（工程の傾きを大きくする）ことで、連続化施工に近づけることが可能であると考えた。そこで、ドリルジャンボの使用台数を1台に減少させ、No.7代替案を作成した。結果的にNo.7代替案は計算工期700日となり、投入資源も一定の制約を満足した。これ以上の代替案の検討の余地はないと判断されたので、このNo.7代替案

を概略工程計画案に採用した。なお、これらの検討過程を図-7に、概略工程計画案を図-8に示す。

5. おわりに

本研究においては、線形土木構造物工事の中でも代表的な事例であるトンネル工事を取り上げることにより、実証的な検討を行った。この検討を通して、以下のような成果を得た。

(1) 人為的な判断や機能をともなわない定型的な業務をコンピュータシステムとして構築することにより、処理の軽減と迅速化は勿論、よりきめ細やかな計画者の判断、意志決定を可能にした。また、工程計画案の策定にあつたては、ヒューリスティックなアプローチが有効であることも示した。

(2) トンネル工事施工上の特徴の1つであるサイクル・タイムの検討を例に取り上げ、事前にシミュレーションを行なうといったボトムアップ的なアプローチを施工能力算定サブ・システムと連動させることによって、不確定な工事内容の明確化および、工事データの精度向上を行うことを可能とした。

(3) トンネル工事は、明り部とトンネル部とに分けられる。平面的な広がりを持つ明り部の工事については、別途検討することが必要であると考え、トンネル部においては、視覚的に優れ、施工空間的な干渉についての検討が可能な、座標式工程モデルを活用することが望ましいことを示した。

今後は、以下の項目について検討を行ない、システム機能の向上を図りたいと考えている。

(1) より機能的なシステムの整備・開発を目的として、本システムを他のトンネル工事現場にも順次適用を行なう。これにより、工事階層図のデータメンテナンスをはじめとして、サブ・システム群のシステム機能の整備が可能になると考える。

(2) 本研究においては、工期と資源についての2つの側面から評価・検討を行ったが、工事原価や機械の稼働率といった側面からも評価を行うことが必要である。工程

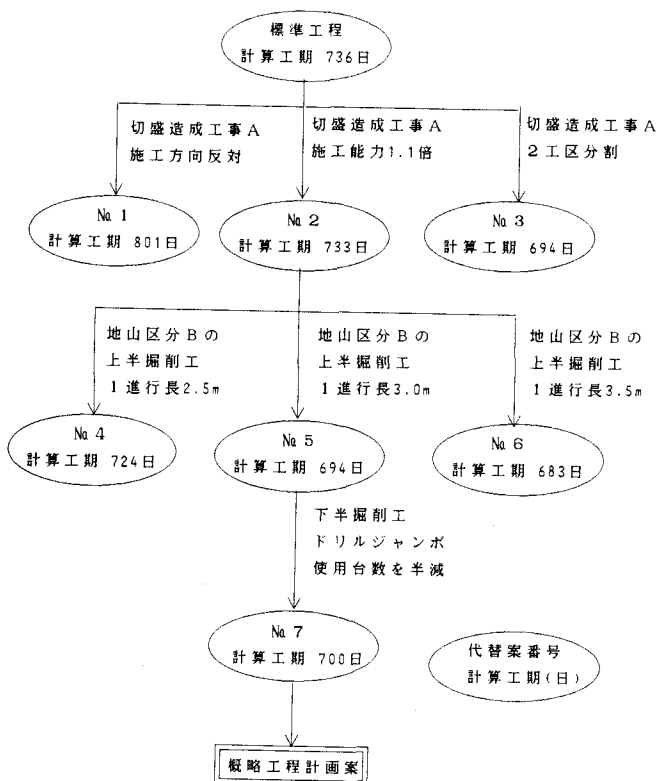


図-7 代替案探索過程
(工程計画案に結びつくもののみを示す)

と連動する工事費用算定の方法や、機械・労務の効率的運用が可能な方法について検討を進め、より目的な工程計画案の策定を目指す必要がある。

(3) 明り工事のような平面工事についても、座標式工程モデルと同様な空間干渉検討が可能な、計算処理方法および、工程表現方法について検討を行いたいと考えている。

(4) 工事マネジメント業務の一貫した処理プロセスを実現するため、各工程レベルでの計画作業のシステム化および、管理段階におけるフォローアップ作業のシステム化の検討を行ない、トータル・マネジメントシステムの構築を行っていきいたいと考えている。

【参考文献】

- 1) 河原畑良弘；施工計画・管理システムの合理的な設計法に関する実証的研究，京都大学学位論文，1978年11月
- 2) 春名 攻；建設業の現場マネジメント業務のシステム化に関する研究；第14回土木情報シンポジウム，1989年10月
- 3) 春名，原田；座標式工程表を用いた概略工程計画システムの開発研究；第8回建設マネジメント問題に関する研究発表・討論会 講演集，1990年12月
- 4) 春名，原田，辻井；線形構造物工事を対象とした工程計画方法に関する研究—座標式工程モデルのトンネル工事への適用を中心として—；平成3年度関西支部年次学術講演会講演概要集，1991年6月

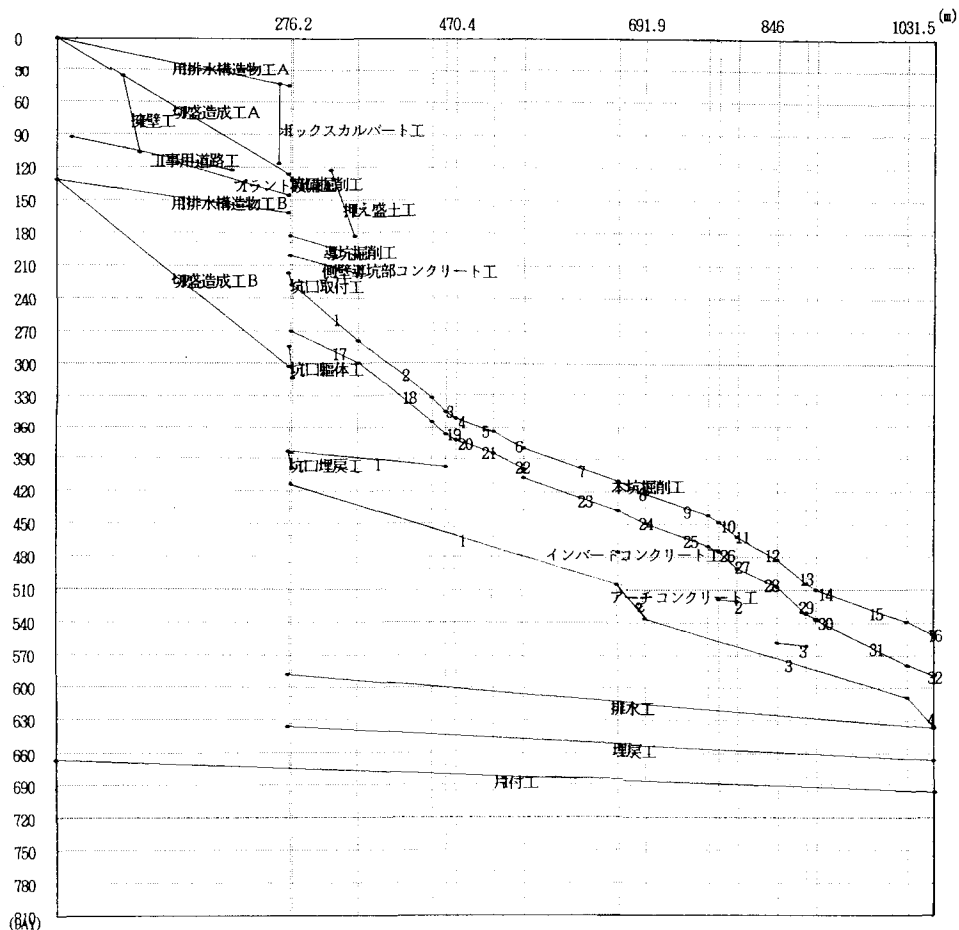


図-8 座標式工程表 (概略工程計画案)