

パイプライン敷設工事における 座標式工程計画モデルの開発

DEVELOPMENT OF SCHEDULING MODEL USING
TIME-SPACE DIAGRAM FOR PIPE-LINE LAYING WORKS

福永 剛* 和田かおる** 山本幸司***

by Takeshi Fukunaga , Kaoru Wada , Koshi Yamamoto

Up to the present, scheduling plans of pipe-line laying works have been generally made manually and interactively. Time-space scheduling model is very useful for works whose construction processes form linear structure such as pipe-line laying work. However existing time-space scheduling model is inapplicable to scheduling problems under resource constraints. Therefore, in this paper, we develop a resource-constrained time-space scheduling model not only for making a schedule plan but also for following up the slippage. This model is systematized for micro computer and some useful informations such as time-space scheduling diagram, distribution of road occupied duration at each site, and variation of excavated road length can be displayed graphically on computer. This model will be applied to the projects similar to pipe-line laying works with small modification.

1. はじめに

従来、パイプライン敷設工事における工程計画の策定は、すべて手作業により行われてきたため、多大な労力・時間を要していた。また、バーチャート的な工程計画では、各作業の位置関係がわかりにくく、実際には、実行可能性の検証が不十分であった。

一方、座標式工程計画モデル^{1), 2)}は、面的な広がりを持つ工事や、直線的に進行する工事の施工計画・管理の各段階において利用可能なモデルであり、

また、その工程表の表示方法が有する特徴から、工事遂行上支障となる作業空間の重複を直観的に発見することも可能なモデルである。

そこで著者らは、パイプライン敷設工事への座標式工程計画モデルの適用を試みた³⁾。しかし、このモデルの立案方法では、資源制約を考慮することができず、また、同一工区内の両端から同時着工するような場合にはうまく対処できない。

そこで、本研究では、作業空間上の制約と投入資源の量的制約を同時に考慮し得る座標式工程計画モデルを開発する。また、工事を実施していく過程において進捗状況をチェックし、もし遅れがあれば工程計画を修正し、日程の短縮を図ることのできるフォローアップモデルも併せて開発する。

なお、本モデルはパイプライン敷設工事専用のモデルであり、他工事へ適用するためには多少の改良が必要である。

キーワード：パイプライン敷設工事、座標式工程計画、資源制約、フォローアップモデル

* 学生会員 名古屋工業大学大学院 社会開発工学科

** 正会員 工修 名古屋工業大学 社会開発工学科

*** 正会員 工博 名古屋工業大学 社会開発工学科

(〒466 名古屋市昭和区御器所町)

また著者らは、パイプライン敷設工事を行う際に、工事現場の交通量等を考慮して最大許容道路占有長を決定するシミュレーションモデル⁴⁾を別途開発しており、この値（各種表示板や仮設信号機等を配置するためのスペースを含んでいる）をもとに最大許容掘置距離を算定し、これを座標式工程計画モデルのインプットデータとして用いる。

2. 現状に即した座標式工程計画モデルの構築

まず、パイプライン敷設工事の作業工程を簡略化（主要工程の選定）すると、準備工、乾燥エアーク封入工、路面本復旧工を除けば、図-1のように掘削工、管吊降工、溶接工、埋戻工の4作業に分類することができ、パイプライン敷設工事の工程はこの4作業の繰り返し工程になる。したがって、工事を実施するためには、土工、溶接工に携わる作業員が必要となる。また、本稿で提案する工程計画モデルの概要はすべて基本的に図-2のように示される。

まず工事実施順序の決定においては、それぞれの作業が関連し合うため、各作業がどのような状態において実施可能となるかについて以下に述べる。

まず、工程計画立案に必要な定数値としてパイプ長（12m）が挙げられるが、その他の必要な数値、すなわち掘削能率、埋戻能率、最大許容掘置距離および総工事区間長は、インプットデータとして取り扱うこととする。このうち、掘削能率と埋戻能率は、工事機械の能率（ m^3/h ）、1日の工事時間、工事幅、および深さにより1日あたりに換算し求める。また、最大許容掘置距離は、通常、工事地域の状態により平日昼間80m以下、日祝日および平日夜間100m以下という値が、管轄警察署より許可されることが多い。しかし、この値は当然道路の交通状況等を考慮したうえで理論的に決定されるべきであると判断し、著者らは数値解法やシミュレーションによる方法を提案した^{4), 5)}。

さて、現状のパイプライン敷設工事では以下の3項目が工事実施順序決定のための前提条件として存在する。

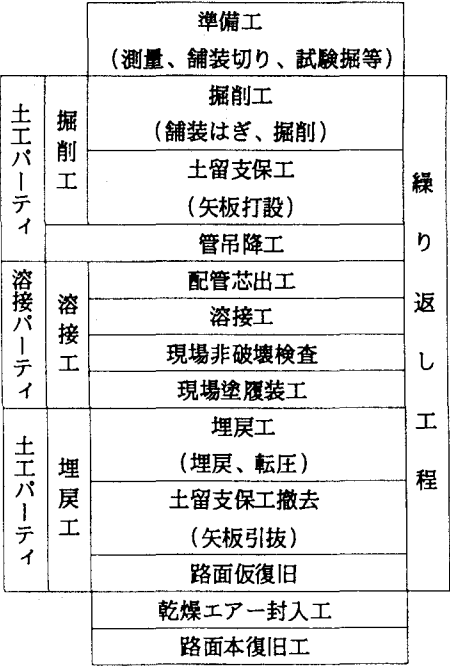


図-1 パイプライン敷設工事の作業工程

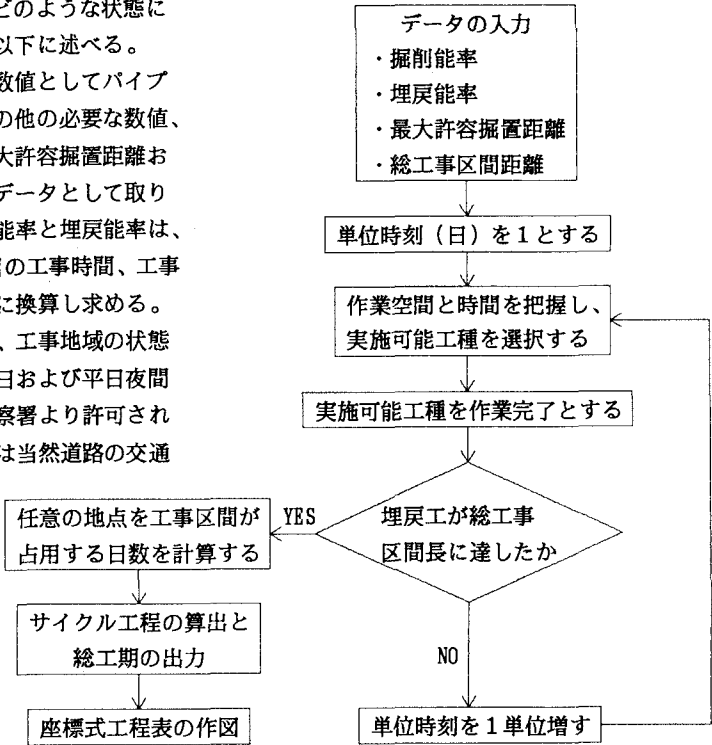


図-2 工程計画モデルのフローチャート

条件1：掘削工と埋戻工は同日に行わない。

条件2：溶接工はパイプを吊降ろした翌日に実施することを原則とするが、埋戻工と同日実施は不可能であり、その場合はパイプ吊り降ろしの翌々日以降に実施するものとする。

条件3：管吊降工は掘削完了日に掘置距離の中に納まるだけ吊り降ろす。

このうち条件1において、掘削工を行うか、埋戻工を行うかは次の条件に従うものとする。

①掘削工を実施すると掘置距離が最大許容掘置距離を超えてしまい、埋戻工を実施すると未溶接箇所またはパイプ先端を覆ってしまう場合は、掘削工も埋戻工も実施しない。

②掘削工を実施しても掘置距離が最大許容掘置距離を超えない場合は、掘削工を実施する。

③埋戻工を実施しても未溶接箇所、またはパイプの先端を覆わない場合は、埋戻工を実施する。

④②、③双方が実施可能な日は、いずれか一方を実施する。

工程計画立案のための制約条件は上記の条件1～条件3および①～④であり、この条件を満たしながら進められた工程計画は時間的および空間的に実行可能となる。

また、パイプライン敷設工事を構成する4種類の作業の所要日数から判断して、総工期に直接影響を及ぼす作業は土工（掘削工、埋戻工）であるため、工程計画は土工中心に進めることになる。また、上記の④から工程計画立案に際しては掘削工、あるいは埋戻工のいずれを優先させるかを決定しておくことが望ましい。

このような条件のみで実行可能な工程計画を作成するモデルをMODEL 1とする。

3. パイプライン敷設工事における資源制約

一般的に投入資源制約の内容としては、作業員と工事機械の制約が考えられるが、パイプライン敷設工事は工事の特殊性より、これらを1つの制約として扱うことが可能である。なぜなら、4工種において工事機械を稼働させるために必要な作業員数は自ずと決まり、工事機械1台とその運行に必要な作業員数で1つのパーティを組ませ、そのパーティ数を

制限することによりすべて解決できるからである。

なお、この考え方では、作業実施に必要な作業員数および工事機械の数を工程計画立案に際してまず決定しておくこととなる。

次に、パーティの種類として、掘削工と埋戻工は同一機械を用いること、および作業を実施する人員数も同じで、管吊降工は掘削作業を実施していた作業員が行うことから、掘削工、埋戻工、管吊降工は1つのパーティとして扱い、これを土工パーティとする。また、溶接工は単独で溶接パーティとする。このことから、2. で述べた工程計画立案においては、1日（単位時間）に土工は掘削工、または埋戻工どちらか一方しか実施していないことから、結果的に土工パーティは1日（単位時間）当たり1パーティと制限していたことになる。

4. 資源制約下の座標式工程計画モデルの構築

投入資源の制約を考慮するならば、前述の2. に示した工事実施条件にいくつかの条件を追加、および変更する必要がある、それらを以下に示す。

①土工パーティの投入可能数に制限がないとき（制限2以上のとき）、掘削工と埋戻工を同時に実施可能とする。

②1日に溶接可能な箇所数を溶接パーティの制限として与え、溶接可能箇所が1日に多数存在しても制限数までしか溶接できないとする。

③溶接を実施する日にも埋戻工の実施を認める。

これらによって、資源制約下での座標式工程計画モデルの作業実施条件についても、前述の2. の場合とほぼ同様に工程計画作成プログラムを組むことが可能である。

この工程計画作成モデルをMODEL 2とする。

5. 同一工区内の両端から同時着工する場合の資源制約下座標式工程計画モデルの構築

座標式工程計画モデルの課題の一つであった同一工区内の両端から同時着工する場合の資源制約下座標式工程計画モデルの構築について考える。

例えば総工期を短縮すべく、パイプライン敷設工事を工事着工地点と工事完了地点から同時着工する

場合がある。このとき一方の工事箇所が他方の工事箇所に影響を与える事項としては、資源制約量に関することと、工事終了間際の道路占用距離に関することが挙げられる。したがって、この2点を調整することができれば、このような場合についてもモデルの構築が可能となる。

そこで以下ではこの2点について調整方法を述べる。

1) 資源制約量に関して

それぞれの施工パーティに関し、あらかじめ実施作業の優先順位を決定しておけば、資源制約量に見合っただけの実施作業を選択することができる。このときの実施可能条件は前述した4. のモデルと同様である。

2) 工事終了間際の道路占用距離に関して

最初に設定した最大許容掘置距離を超えなければ工事を遂行できない場合に限り、最大許容掘置距離を超えることを認めることとする。

まず、工程計画立案に先立ち、上記1) に示したように工事実施における作業優先順位をしっかりと決定しなくてはならず、また、決定した作業順序に応じてプログラムの変更を行う必要がある。工事実施条件の変更点、および本モデルにおける優先順位を以下に示す。

①実施可能な土工が制約パーティ数を超える場合の選択基準は、以下に述べる優先順位に従う。

- 1) 工事着工地点から進む工事の埋戻工
- 2) 工事完了地点から進む工事の埋戻工
- 3) 工事着工地点から進む工事の掘削工
- 4) 工事完了地点から進む工事の掘削工

②溶接可能箇所数が複数存在し、制約パーティ数を超える場合の選択基準は、以下に述べる優先順位に従う。

- 1) 溶接を実施しなければ翌日に埋戻工が実施不可能となる箇所（工事着工地点から進む工事を優先する）
- 2) 工事着工地点から進む工事の溶接可能箇所
- 3) 工事完了地点から進む工事の溶接可能箇所

③溶接を実施する日にも埋戻工の実施を認める。

④工事終了間際に、最初に設定した最大許容掘置距離を超えなければ工事を進行できなくなる状態が発生する可能性があるが、その場合には最大許容

掘置距離を超えることを認める。

このような工程計画作成モデルをMODEL 3とする。

6. サイクル日数の算出

パイプライン敷設工事は、すでに述べたように掘削工、管吊降工、溶接工、埋戻工の繰り返し作業となるため、サイクル工程の出現が十分考えられるが、この値が事前に予測できれば作業段取りが立てやすくなる。いま工事現場の概略を示した図-3を参考にすれば、

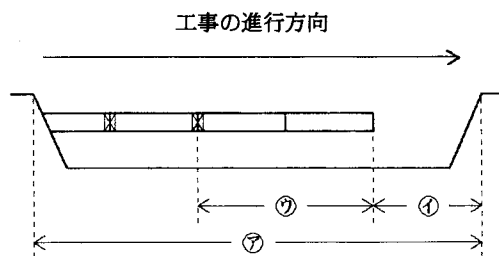


図-3 工事現場の概略断面およびサイクル日数決定に関連する3種類の距離

⑦掘置距離

①掘削先端から吊降済管先端までの距離

②吊降済管先端から溶接済までの距離

の3つの値が、作業開始から第I日目と第J日目においてすべて等しければ、I日目から(J-1)日目までがサイクルとなり、サイクル日数は(I-J+1)日間となる。

本研究では、各作業実施順序決定後自動的にこのサイクル工程が計算できるよう、以上で構築した工程計画策定プログラムに組み込んだ。

7. 適用事例とその考察

ここでは、以上により構築したMODEL 1~MODEL 3の適用事例とその考察について述べることにする。

(1) MODEL 1の適用事例とその考察

以下に示す数値をインプットデータとして与える。

掘削能率 : 12.0 (m/日)
 埋戻能率 : 17.0 (m/日)
 最大許容掘置距離 : 60 (m)
 総工事区間距離 : 1500 (m)

適用事例の座標式工程表の一部を図-4に示す。
 掘削工を優先した場合のサイクル工程は4日目から32日目まで、総工期は214日間となり、埋戻工を優先した場合のサイクル工程は4日目から32日目まで、総工期は214日間となる。掘削工を優先すると掘置距離が最大許容掘置距離(60m)に近い値で工事が進行していくが、埋戻工を優先すると掘置距離が最大許容掘置距離に近くなることはなく、その最大値は52mである。

上記2つの工程計画案のうち、どちらが望ましいかについてであるが、総工期が等しいため工事区域の周辺環境などを考慮し、工程計画作成に携わる技術者の判断によることになる。そこで総工期以外の評価項目として、工事区間が占用する日数を出力し、そのばらつきから判断することにした。その結果、

埋戻を優先した工程計画案の方が全体的に占用日数が短くなっていることから、この評価項目においては埋戻を優先した工程計画案が優れていると判断することができる。

(2) MODEL 2の適用事例とその考察

インプットデータはMODEL 1と同じものを用い、それに以下の数値を追加入力する。

土工パーティ制限数 : 2

溶接パーティ制限数 : 2

土工パーティ制限数が2ということは、掘削工と埋戻工の同日実施を認めることを意味している。

溶接工実施日埋戻不可の場合と溶接工実施日埋戻可の場合を比較するために、まずMODEL 2で溶接日埋戻能率0m/日として、溶接日埋戻不可の場合を計算する。この事例の座標式工程表の一部を図-5に示す。この工程計画案の総工期は178日間と短縮されるが、山積み図を見てみると、土工パーティの利用率が悪いことが読み取れる。これは、溶

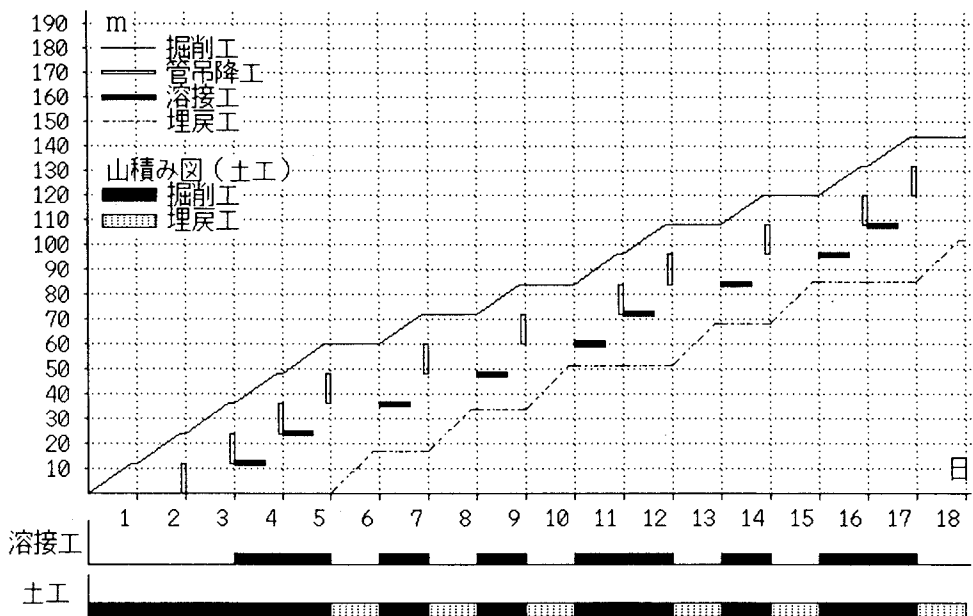


図-4 MODEL 1 (掘削優先) の適用事例に対する座標式工程表と山積み図

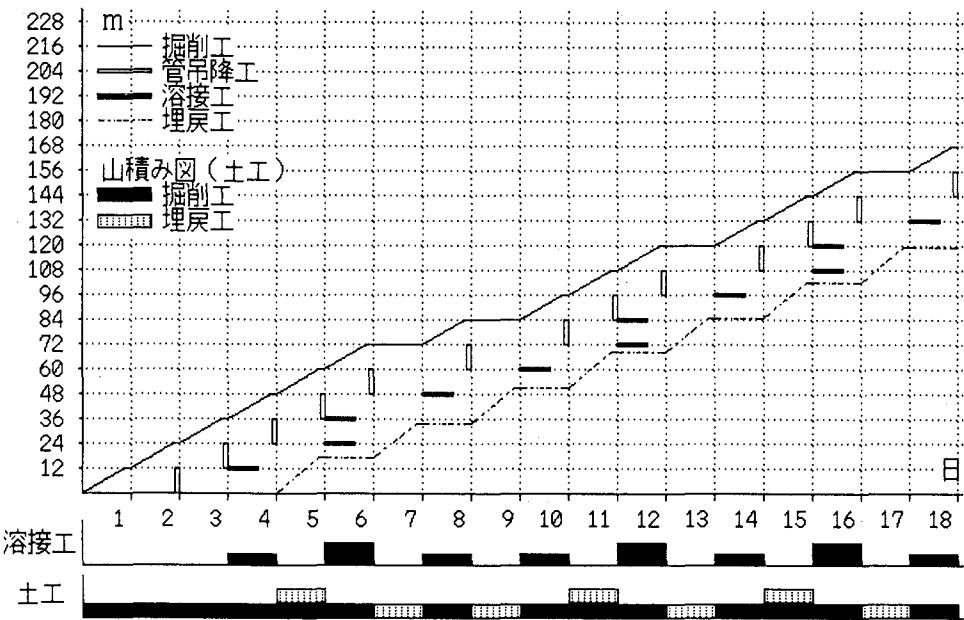


図-5 MODEL 2 (溶接工実施日埋戻工なし) の適用事例に対する座標式工程表と山積み図

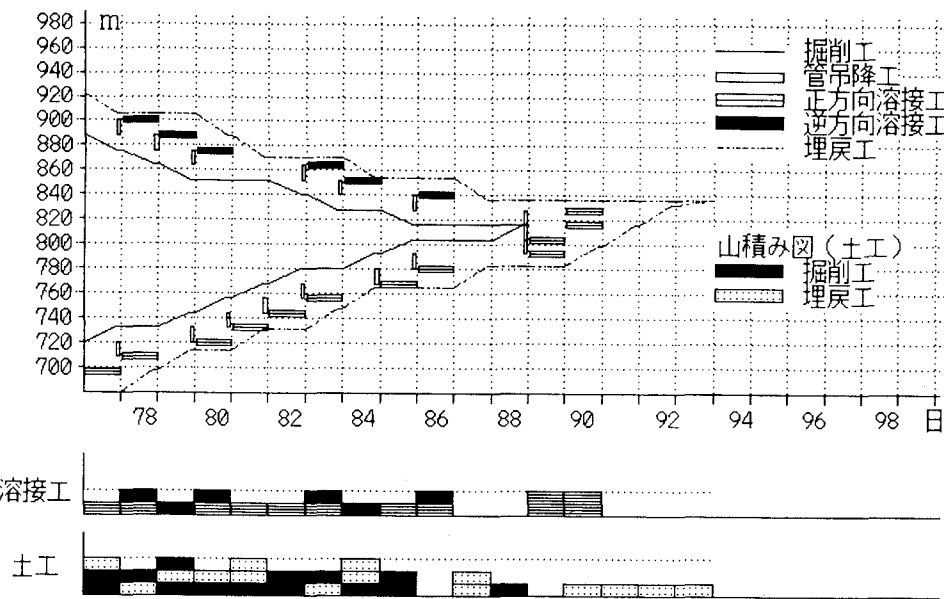


図-6 MODEL 3の適用事例に対する座標式工程表と山積み図

接工実施日に埋戻工を認めていないことに起因していると判断できる。そこで、溶接工実施日にも埋戻工を認める（溶接工実施日埋戻能率：10.0m/日）と、紙面の都合上座標式工程表は省略するが、総工期は148日間と短縮されるだけでなく、溶接パーティを1パーティとすることが可能となり、投入資源の節減にもつながることになる。

(3) MODEL 3の適用事例とその考察

MODEL 3における工程計画立案のために、MODEL 2の以下の数値をインプットデータとして数値に追加する。

土工パーティ制限数：3

溶接パーティ制限数：2

適用事例の座標式工程表の一部（工事終了間際の数日間）を図-6に示す。この工程計画立案の総工期は93日間であり、MODEL 2に比べ土工パーティ制限数を1.5倍にすることで総工期をおよそ2/3倍にすることができる。山積み図からも理解できるように、2箇所同時着工とすることで、MODEL 2に比べ投入資源の有効利用が可能となり、また総工期も大幅に短縮することができる。

なお、図-6に示すように、本事例の85～88日目においては、2つの工事現場が隣接してくるため実際には1つの工事区間と判断すべきである。したがって、最大許容道路占用長が仮に80mと設定されているならば、掘置距離だけでもほぼ90mとなっているため、その値を超えてしまう。MODEL 3により策定される工程計画の工事終了間際においては、本事例のように最大許容道路占用長や最大許容掘置距離を超えたり、その地点の占用日数が他の工事箇所と比べ多少延びる可能性があるため、工事を終結させる地点について十分な検討が必要である。

8. フォローアップモデルの構築

工事を実施していく過程において、天候不順等のため、当初策定した工程計画よりも工事の進捗が遅れることがある。もし遅れが許容範囲を超える場合には、それだけ日程の短縮を図らなければならない。そこで、工事の進捗状況により進捗管理が可能なフォローアップモデルを構築する。

このモデルの概要は図-7に示すとおりである。

まず、MODEL 1～MODEL 3によって工程計画を作成し、各作業能率、総工期、資源制約等のデータをファイルにセーブしておく。そして工事の進捗状況をチェックし、遅れが許容範囲を超えた場

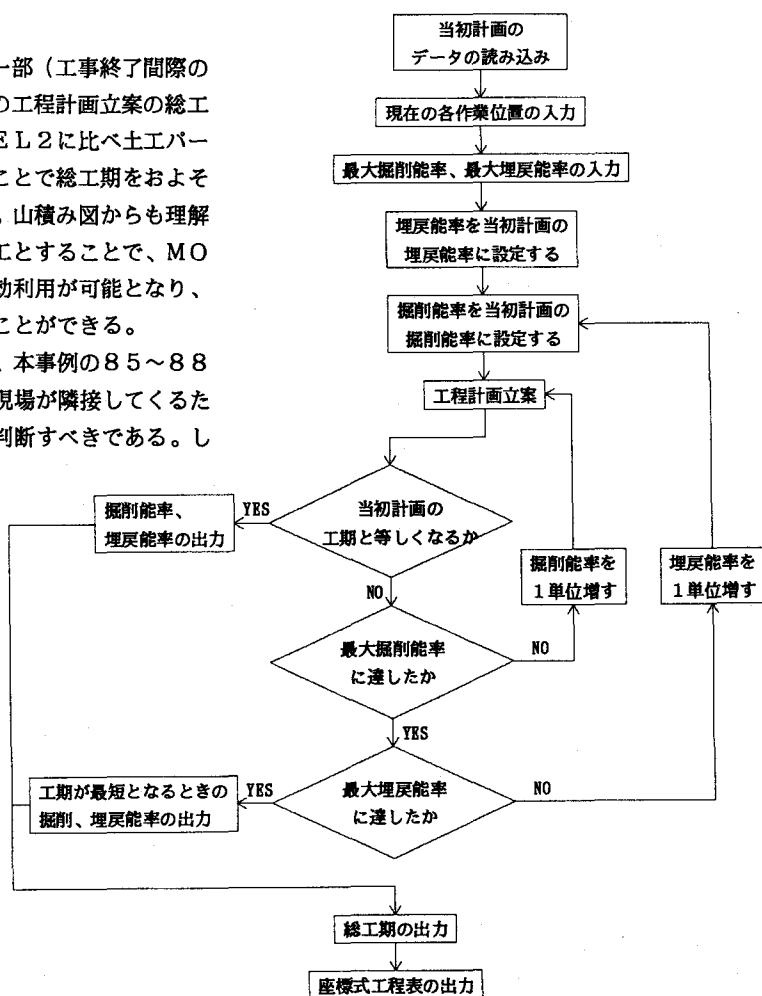


図-7 フォローアップモデルの概要

合にその時点での工程データを読み込み、次いで現在の各作業の工事開始位置からの距離を入力する。次に掘削能率、埋戻能率の最大許容値を入力し、その範囲内でこれらの値を変更しながらインタラクティブな方法で当初の工程計画の総工期と等しくなるまで繰り返し計算を行う。

なお、ここでは各作業手順の決定に関する条件と資源制約は当初計画と同じとすることから、当初計画の総工期に等しくならない場合は、工期が最短となる場合の数値を出力する。そして最後に座標式工程表を表示する。

9. フォローアップモデルの適用事例

上述したフォローアップモデルの適用事例とその考察について述べることにする。

ここでは、MODEL 1（掘削優先）により策定された工程計画案を当初計画として用いることにする。インプットデータはこのMODEL 1の適用事例として用いた数値をそのまま使用することにする。

いま、工事100日目において計画と実績との差が表-1に表されるように発生したとする。

表-1 各作業の先端位置

	当初計画	現況
掘削	720 m	670 m
埋戻	680 m	620 m
パイプ	708 m	660 m
溶接	684 m	648 m

このような状況に対してフォローアップモデルを適用すると、掘削能率を13.4 m/日（当初計画では12.0 m/日）にすれば、埋戻能率はもとのままでもこの遅れを取り戻すことが可能となった。

10. おわりに

建設工事の工程計画策定法としては、いくつかの計画モデルが提案されているが、本研究では作業工程が線形構造となるパイプライン敷設工事に対して資源制約と2箇所同時着工を併せて考慮できる座標式工程計画モデルの構築を行った。この種の座標式

工程計画モデルは過去に開発された事例がないため、本研究の意義は大きいと判断する。本モデルにより策定される工程計画は実行可能性が高く、工程計画表を瞬時にパソコンのディスプレイ上に表示できることから、計画案の視覚的把握が可能になった。また、工程計画作成に要する計算時間は数十秒と短いため、工程計画作成に携わる技術者の負担がかなり軽減できることとなった。

さらに、進捗管理のためのフォローアップモデルも併せて構築できたことから、現場にノートパソコンを配置することにより、工事途中における工程計画の変更にもすぐに対応可能となり、計画者の判断を十分にサポートできるであろう。

今後の課題としては、工程計画案の最適性を判断する基準を定め、より合理的な工程計画の策定方法を構築することが挙げられる。

【参考文献】

- 1) Oldrich Stradal, Josef Cacha: Time Space Scheduling Method, ASCE, Journal of the Construction Division, pp445-457, Sep. 1982
- 2) Toshiaki Orita, Koshi Yamamoto, Atsushi Murabayashi: A DEVELOPMENT ON SCHEDULING SYSTEM TAKING WORK SPACE INTO CONSIDERATION, JSCE, Transaction of the Consideration Management Committee, vol.4, pp97-102, 1991
- 3) 福永、山本、大住、棚橋: パイプライン敷設工事合理化のための座標式工程計画モデルの開発、土木学会中部支部研究発表会講演概要集、pp415-416, 1992
- 4) 福永、山本、前田: SLAMII/PCによるパイプライン敷設工事における最大許容道路占用長の決定、土木学会第46回年次学術講演会講演概要集、第4部、pp150-151, 1991
- 5) Koshi Yamamoto, Satoshi Osumi, Katsutoshi Maeda: MATHEMATICAL APPROACH TO DECISION OF OCCUPATION AREA LENGTH FOR PIPE-LINE LAYING WORKS, Proceedings of 4th Yugoslav Symposium on Organisation and Management in Construction, pp117-122, 1991