

汎用計測システムによる工事施工管理

Generalized Monitoring System Applied For Construction Management

佐藤工業株式会社 ○ 福島 晴夫 *

植松 健 **

伊東 良浩 ***

By Haruo FUKUSHIMA , Takeshi UEMATU , Yoshihiro ITOH

最近の土木工事は、品質、工程、出来高、安全、環境という工事施工管理に適切なデータを収集、処理、分析し、施工への対応を図るとともに、新たな工事に対しても役立てていくという施工の情報化が計られている。

汎用計測システムは、これらへの対応の一つとして開発したもので、施工の各段階での構造物や地盤の状態を測定・分析して施工にフィードバックし、工事の施工管理に役立てた例として、「斜面動態観測」、「土留壁の挙動予測解析」、「トンネル最終内空変位量の予測」を挙げ、いずれもシステムの有効性を得ている。

【キーワード】 工事施工管理、情報化施工、計測システム

1. はじめに

土木工事を効率的および経済的に運営するためには、品質、工程、出来高、安全、環境保全などの最適な計画とともに、施工中のそれぞれの管理においては、施工の状況評価、事態予測が可能となるデータ（判断の資料・材料）をリアルタイムに把握し、これを速やかに施工にフィードバックして目標達成のために必要な対策の実施などを行うことが重要である。

近年、現場計測による品質管理・安全管理を中心に情報化施工が盛んに取り入れられている。情報化施工とは、総合的な工事管理を実行するためのもので、工事前や工事中の観測による客観的な情報を収集し、分析・解析手法などにより施工管理に適切な

データとする情報処理を行い、施工に伴って発生するトラブルを未然に、あるいは許容制限度内に防止するために施工法の検討、対策の実施、設計の修正を行っていくこと、さらに、これらのデータを蓄積して新規工事の設計・計画・施工管理に役立てていくことであると考える。

汎用計測システムは情報化施工への対応の一つとして、施工の各段階における構造物や地盤の状態を測定、分析して施工にフィードバックし、工事の施工管理に役立てるとともに、計測データを統一した形式で処理し、解析し、蓄積して、必要に応じて工事の計画・管理に提供できるようにする技術情報システムを目指している。

このシステムは、

- ① 計測データ処理システム
- ② 逆解析システム
- ③ 統計処理システム
- ④ 情報検索システム

の4つのサブシステムから構成されており、ここでは主に各システムの適用例について概述する。

* 土木本部技術部

(〒103 中央区日本橋本町 4-12-20)

** 電算室技術システム課

(〒103 中央区日本橋本町 4-12-20)

*** 中央技術研究所土木研究部

(〒243-02 神奈川県厚木市三田 47-3)

2. 急斜面挙動の自動観測システム

(1) 工事概要

ここでは、急斜面下におけるトンネル坑口掘削時の斜面動態観測について述べる。

このトンネルは、本坑と避難坑からなる2本の道路トンネルであり、図-1に示すように勾配40~50°の急斜面を等高線と平行に近い角度で掘削するように計画されている。

坑口付近の地質は、新生代古第三紀に属する凝灰角礫岩や流紋岩質凝灰岩などの火山碎屑岩類を基盤とし、その上位を土流堆積物（層厚15~20m）および崖錐（層厚5~8m）が覆っている。基盤岩と二次堆積物との層境は厚さ数mにわたり風化、粘土化が進み、特に変質の著しい区間はN値25~40と土砂に近い値を示している。

このような地形、地質条件下におけるトンネル坑口掘削では、

- ① 片勾配のため偏圧が作用する。
 - ② 地質が不良のため掘削後の地山が自立せず、切羽や天端の崩壊を起こす。
 - ③ トンネル掘削で地山をゆるめると、斜面全体が安定を失い崩壊を誘発する可能性がある。
- などの問題点が考えられる。

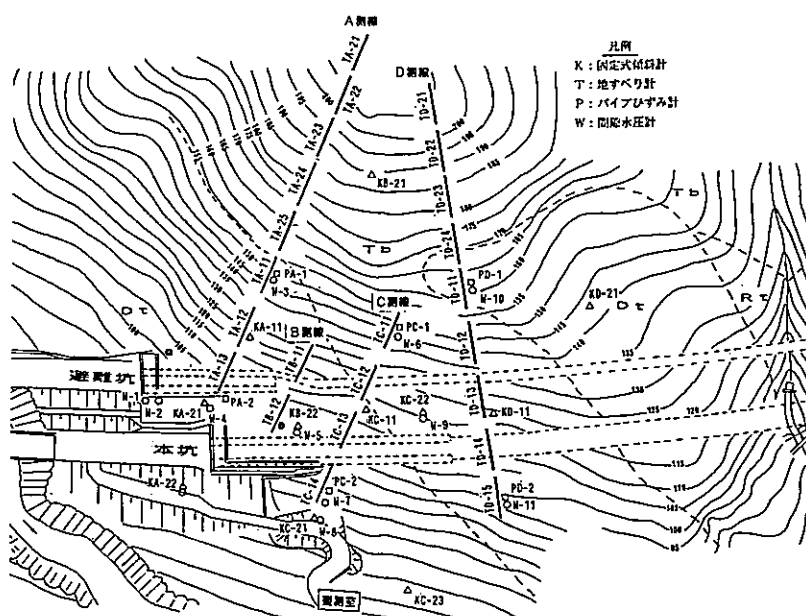


図-1 坑口平面図

このため、坑口部 25~30m は深礎、擁壁、押え盛土などで偏圧に対処するとともに、グラウトにより地山を補強した後、吹付け、ロックボルト工を併用した側壁導坑先進上半 NATM 工法で掘削した。また、斜面の動態観測を行い、地山の安定を確認しながら施工することとした。

(2) 動態観測システムの概要

本工事は豪雪地帯のため、冬期間、計器設置地点への接近が困難なこと、斜面下部の切り取り掘削を伴うため、異常事態の発生時に迅速な対応が要求されることなどから、自動計測システムを採用した。

このシステムは、以下の条件を満足するように設計されている。

- ① 斜面の挙動を定時観測できるとともに、異常が認められた場合には分単位の測定が可能であること。
- ② データの処理、蓄積、図化などの処理が容易にできること。
- ③ 高圧ケーブルや重機の走行その他による電氣的、物理的な障害を極力排除できること。
- ④ 定期的に計器の作動状況をチェックできること。

図-2に全体システムを示す。

測定データは、変換器から計器の近傍に設置したジョイントボックスに送り込まれ、さらに多芯ケーブルで約 250m 離れた観測室に伝送され、データロガを介してパソコンに取り込まれる。ジョイントボックスとデータロガ間は長距離伝送となるために、信号電圧の低下を考慮して定電流方式とした。

(3) 観測状況

坑口掘削は、昭和61年5月から開始された。掘削当初は各計器とも顕著な変位を示さなかった。

昭和61年8月頃から、坑口に最も近いA側線の傾斜計KA-11において、切羽との距離が100m以上離れているにもかかわらず、変位が次第に累

積する傾向が認められた。変位方向は、X、Y 方向の変位ベクトル合成によるとトンネル軸にほぼ平行で、最大変位は17mmであった。しかし、同側線のパイプひずみ計や地すべり計にはほとんど変化が認められなかった。(図-3)

この計測結果を踏まえて綿密な坑内調査を実施したところ、避難坑山側壁導坑の側壁コンクリート目地および坑口面壁に山側からの偏圧に起因すると推定される幅 1~2 mm の開口クラックが発見された。

また、D側線の傾斜計 KD-11は、切羽到達前の昭和61年 7月頃から深さ約20m を変曲点として、斜面傾斜方向への変位の累積傾向が認められた。(図-4)

これらの計測結果を総合的に検討した結果、

- ① 斜面はいくつかのブロックに分けられ、個々のブロックが互いに独立または相互干渉しながら挙動している。
- ② この斜面の挙動を地すべりと仮定した場合、すべり面は現在の計器設置

深度(GL-20m)より深く、GL-30 ~ -40m 付近に存在する。

- ③ 地形、地質から推察すると、斜面の動きは、標高約 250m の尾根付近から発生している可能性がある。

などが推定された。このため、大深度の傾斜計および地すべり計を追加して設置し観測を継続しているが、大きな変化は認められず、斜面の動きはほぼ止まっているものと考えられる。

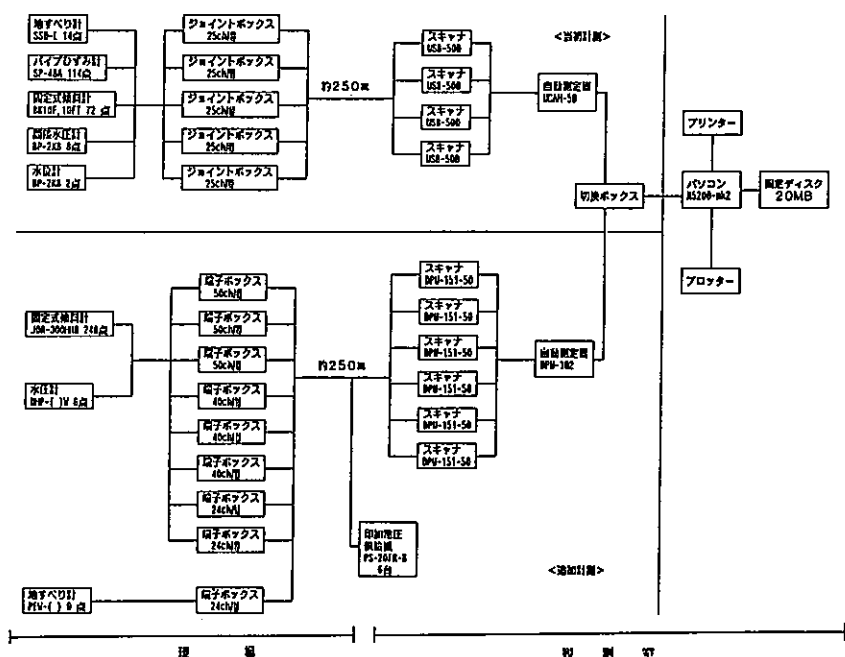


図-2 自動計測システムの構成

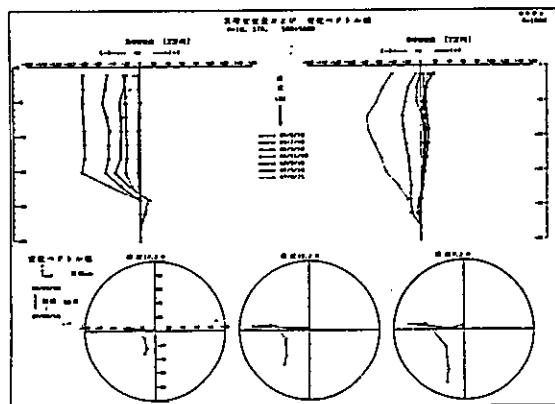


図-3 傾斜計変位状況 (KA-11)

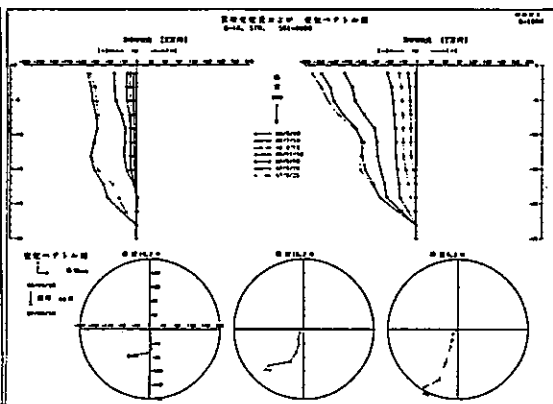


図-4 傾斜計変位状況 (KD-11)

3 逆解析システムによる切梁解体時の施工管理

(1) 工事概要

ここでは土留逆解析システムを用いた土留工の切梁解体時における予測解析について述べる。

本工事は、地上5階地下2階のRC構造物の基礎工事である。掘削は平面が36.2m×32.5m、掘削深度が11.85mの中規模のものであり、切梁プレロード工法を採用している。土留壁は厚さ60cmの鉄筋コンクリート地下連続壁である。敷地地盤は図-5に示すように、上部より埋土層、N値が2~5の沖積シルト層およびN値が50以上の泥岩層となっている。

(2) 計測概要

本工事では、既設建物に近接していることから、施工中は図-6に示すように、土留壁の変位、応力および切梁の軸力、温度、土圧の計測を実施した。計測方法は、土留壁および周辺地盤の挙動を把握し、異常事態の発生時に即座に適切な対応を行えるように自動計測システムを採用した。

計測期間中は、計測データをあらかじめ設定した管理基準値と比較し、現状の安全性について総合的に検討した。また、同時に、土留逆解析システムにより次工程以降の土留壁の挙動の予測解析を実施し、計測管理に役立てた。

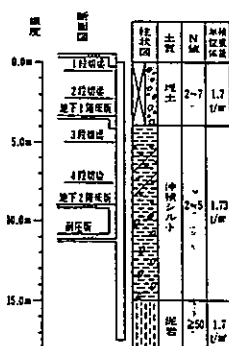


図-5 土質概要

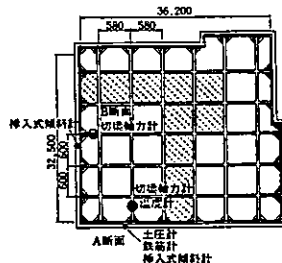


図-6 計画断面

(3) 土留逆解析システム

土留逆解析システムは、測定された計測データを現場において即時に解析し、土留構造の現状の安全性を把握し、次工程以降の安全性を予測するために開発したものであり、現場のパソコンで使用可能で

ある。

本システムは、

- ① 土留壁の現在の状態を把握するために、壁面変位などのデータから最適な地盤定数の組み合わせを求める解析（逆解析）を行う。
- ② これにより得られた地盤定数を用いて次工程以降の土留構造物の挙動を予測解析する。

逆解析に用いる基本的な解析方法は、土留計算法の一つである弾塑性法（拡張法）である。解析モデルの概念図は図-7に示す。逆解析で用いる計測データは、土留計測の標準的な項目ある壁面変位と切梁軸力であり、これらを用いて、各側圧係数および地盤反力係数を推定する。

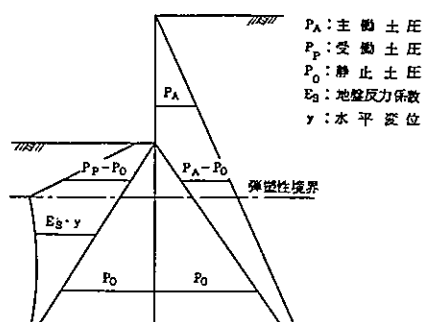


図-7 解析モデル概念図

(4) 切梁解体時の予測解析

工期の短縮を目的として最終掘削以降に、図-8に示す解析ステップに従い、切梁解体順序の変更時の安全性について予測解析を行った。その結果、各切梁解体時において、土留壁の変位、応力および切梁の軸力などが管理基準値以内であると計算されたことから、実際に切梁解体順序を変更し工期を短縮することができた。その時の土留壁の変位、曲げモーメントおよび切梁の軸力の予測解析結果と実測値の比較を図-9、図-10、表-1に示す。

これらによると

- ① 壁面変位は、3段切梁解体時および4段切梁解体時とも精度良く推定されている。
- ② 掘削底付近に生じている大きな曲げモーメント

は2段階とも予測値とよく一致している。

- ③ 切梁軸力については、2段階ともに、実測値が予測値以内となっている。

以上のように、今回の予測解析では土留壁の壁面変位、曲げモーメント、切梁軸力とも実測値とほぼ一致しており、本システムは土留構造の予測解析に有効であると考えられる。

表-1 切梁軸力

(t)			
step	1	2	3
1 実測値	2.7	3.6	12.4
段予測値	*2.7	9.5	8.8
2 実測値	41.5	53.9	73.8
段予測値	*41.5	77.4	109.8
3 実測値	90.8		
段予測値	*90.8		
4 実測値	166.0		
段予測値	*166.0	209.4	

*: 地盤定数の推定に用いた値である。

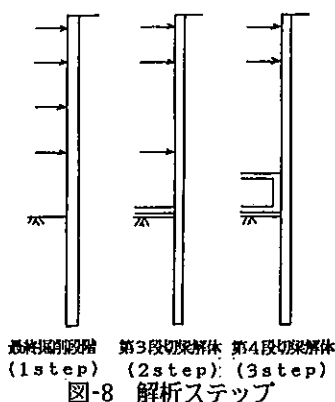


図-8 解析ステップ

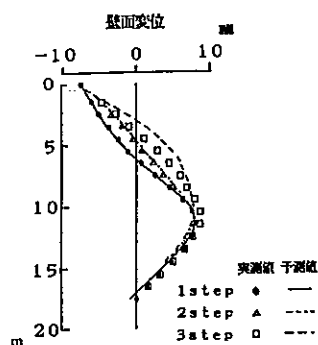


図-9 壁面変位分布

4 計測データの統計処理による最終変位量の予測

ここでは、A、B 2本のトンネルで実施した計測データの統計処理に基づくトンネル最終内空変位量の予測法について述べる。Aトンネルは、掘削径が7mの道路トンネルで、全断面工法で施工されている。地質は、新第三紀の流紋岩で構成され、岩石自体は堅硬であるが、全体に節理が発達し、一部に幅2~3mの破碎帯も認められる。Bトンネルは、掘削径が9mの鉄道トンネルであり、ショートベンチカット工法で施工されている。地質は新第三紀の泥岩、砂岩、砂質泥岩の互層であり、全体に節理が発達している。また、一部に膨張性の区間があり、かなり大きな変位を示した。

(2) 支保パターンの選択について

NA TMでは、施工中に実施される各種計測結果を総合的に判断し、適切な支保パターンを選択していくことが基本であり、この過程を円滑に進めるためには、工事を管理する人々が地質状況や計測データなどに対して共通の認識、判断基準を持つことが重要となる。

この観点からA、B両トンネルでは、切羽観察と計測データに基づき、いくつかの切羽で発注者、施工管理者、作業員の協議による最適支保パターンの選択について検討した結果、いずれのトンネルにおいても最終変位量と内空変位の初期変化率（掘削直後の単位 m 当たりの内空変位）は、図-11、図-12に示すようにかなり相関性の高い直線関係を得ることができた。このことは、支保を適切に選択すれば、

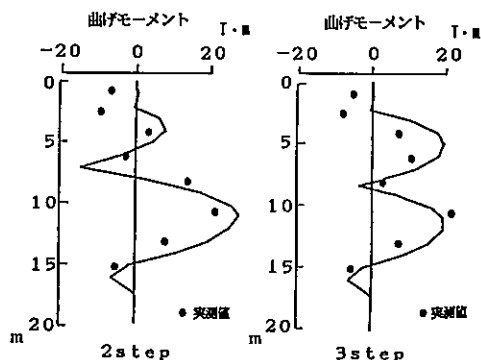


図-10 曲げモーメント分布

初期変位量から最終変位量を予測できることを示している。

しかしながら、このような選択法は経験的な判断が大きなウェイトを占めており、常時施工にフィードバックして情報化施工に活用していくためには、評価の基準を定量化することが必要である。

ここでは、これまで現場技術者が、個々の経験に基づいて判断している地質状況や地圧の大小などの定性的な項目を定量化し、内空変位との関係について統計処理し、最適支保パターンの選択と最終変位量を予測する方法について述べる。

(3) 統計処理システムの概要

a) 最終変位量を支配する要因

最終変位量を支配する要因は様々考えられるが、ここでは地山状況と初期応力状態の2つの要因に着目した。地山状況や初期応力状態を支保選定のための客観的な因子とするには、これらを適切な方法で数量化する必要がある。地山状況は、岩石強度、節理状況、湧水状況などの地質因子から構成されており代表的な評価方法にBieniawskiのRMR値、BartonのQ値などがある。これらの評価方法は、各地質因子ごとに一定の判断基準を設け、その基準に基づいて地山を評価する方法であり、客観的に地山状況を表現するのに適していると考えられる。ここでは、比較的適用が容易であるRMR値(表-2)を用いて地山状況を数量化する。また、初期応力状態については、鉛直土被り荷重 γh (γ :地山単位体積重量、 h :土被り高さ)で換算している。

各トンネルにおける地山状況および初期応力状態と最終変位量の相関係数を表-3に示す。また、図-13に、地山状況と初期応力状態の重回帰式から求めた最終変位量の予測値と実測値との関係を示す。地山状況、初期応力状態ともに最終変位量との相関性が高く、さらに、両者の重回帰式による予測値には、実測値との良好な一致が認められる。これらのことから、最終変位量は地山状況と初期応力状態の2つの要因に強く支配されていることが確認できる。

b) 最終変位量の予測方法

a)の結果に基づきここでは、地山状況の評価因子をRMR値、初期応力を γh として、これらの2つの要因により最終変位量の予測を行う。

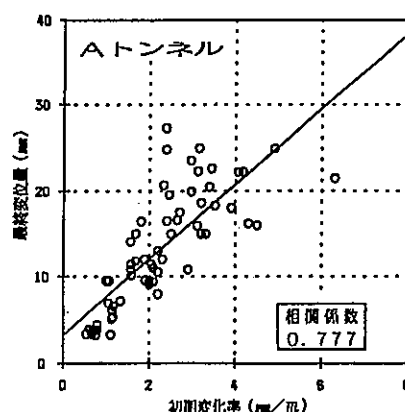


図-11 変位の相関関係 (Aトンネル)

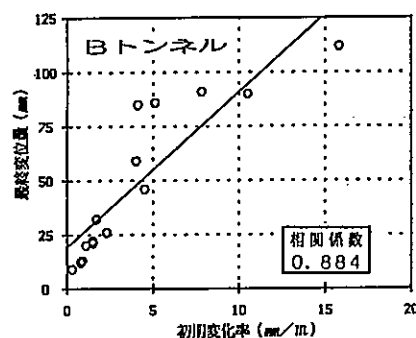


図-12 変位の相関関係 (Bトンネル)

表-2 RMR値を構成する各項目

NO.	項目	評点
1	岩盤強度	R1
2	RQD	R2
3	節理の間隔	R3
4	節理の状態	R3
5	湧水状態	R5
6	節理の方向性	R6
RMR値 = R1+R2+R3+R4+R5+R6		

表-3 各要因と最終変位量の相関係数

最終変位量を支配する要因	Aトンネル	Bトンネル
地山性状(単相関)	0.827	0.824
初期応力状態(単相関)	0.677	0.842
地山性状、初期応力状態(重相関)	0.865	0.901

既設断面における実測データの重回帰分析だけではその分析結果を以降の断面における支保パターンの選定に反映していくことは難しい。このため本システムでは、図-14 のフローに示すように、統計分析法と特性曲線法を組み合わせる。この方法は、①既設断面において、土被りと最終変位量の実測値から特性曲線法による逆解析を行い、地山の弾性係数Eを求める。②EとRMR値の統計分析から、既設断面における両者の関係式を求める。③その関係式に基づき、新規掘削断面においてRMR値からEを推定する。④推定したEを用いて特性曲線法の順解析を行う。という計算ステップから構成されており、既設断面においては実績のない、任意の支保パターンについての最終変位量を予測できるという特徴がある。

(4) 計算結果との比較

AトンネルにおけるRMR値と地山弾性係数Eの関係を図-15 に示す。この散布状況から、両者の関係は双曲線に近似できる。この近似曲線を用いて、特性曲線法により求めた最終変位量の予測値と実測値との散布状況を図-16 に示す。表-4に、A、B2本のトンネルにおける最終変位量の予測値と実測値との相関係数を示す。以上の結果から、本方法は最終変位量の予測に有効であると考えられる。

図-17、図-18 に、A、B両トンネルで計算した最終変位量の予測値と実測値の比較を示す。いずれのトンネルにおいても、予測値と実測値がよく一致していることが認められており、今後、他のトンネルの最適支保パターンの選択に適用し、さらに精度を高めていく所存である。

表 -4 最終変位量の予測値と実測値の相関係数

	Aトンネル	Bトンネル
相関係数	0.784	0.832

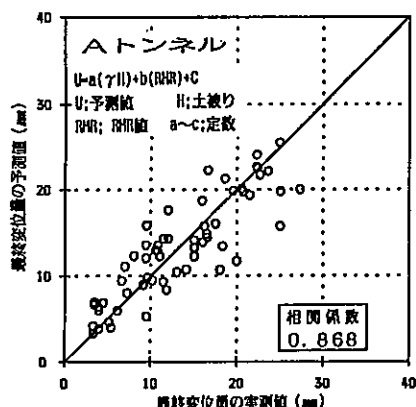


図 -13 最終変位量の予測値と実測値の関係

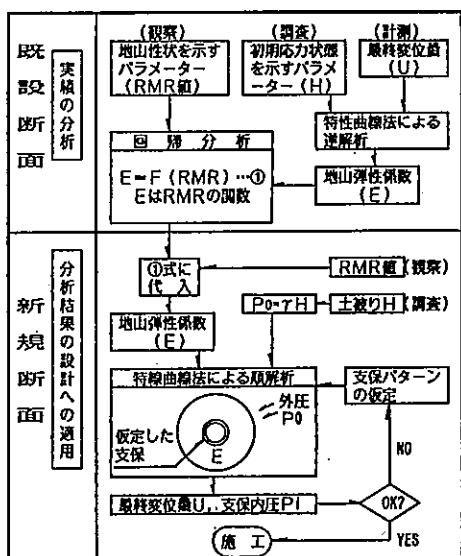


図 -14 最終変位量予測計算順序

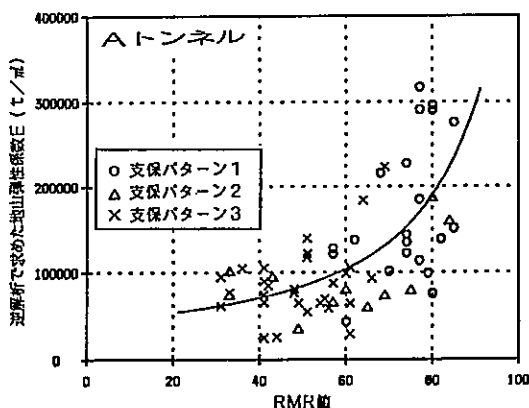


図 -15 RMR値と地山弾性係数Eの関係

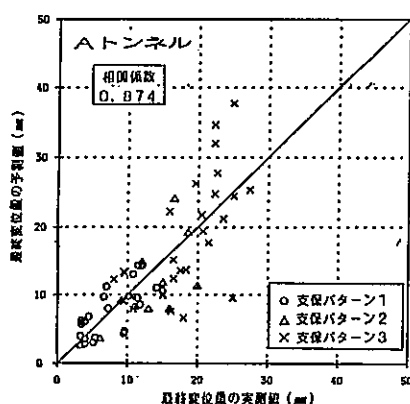


図 -16 最終変位量予測値と実測値の散布図

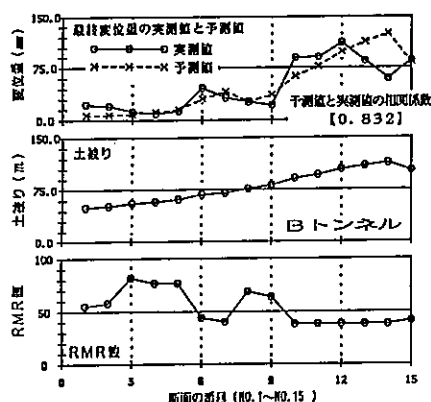


図 -18 最終変位量と土被り、RMR値との関係 (Bトンネル)

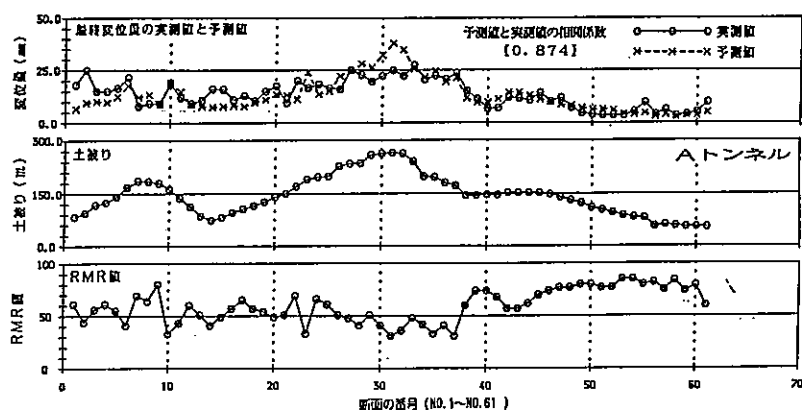


図 -17 最終変位量と土被り、RMR値との関係 (Aトンネル)

5 おわりに

ここでは汎用計測システムの主に施工中における技術管理への適用例を紹介した。しかしながら、施工管理においてはそれぞれの管理面での的確な対応が同時に必要である。

現在、目的とする構造物の品質管理はもちろん、作業の安全管理や工程・出来高管理、水質・騒音にかかわる環境管理などを含めた情報化施工を進めている。これによって、工事の進捗に適合したよりの確な施工管理が行えるものと考えている。

【参考文献】

- 1) 福島、伊東、植松：「汎用計測システムの開発と適用」建設マネジメントV、土木学会建設マネジメント委員会、1987年 6月
- 2) 古屋、伊東：「土留工の切梁解体時における挙動予測」第41回土木学会年次学術講演会概要集、1986年11月
- 3) 西野、篠川、矢田：「切羽観察に基づく変位予測と支保選定」第7回岩の力学シンポジウム講演論文集、1987年12月
- 4) 「土質工学における情報化施工研究報告書」：土木学会土および基礎委員会、1988年 1月