

建設省 土木研究所

見波 潔

(株) 奥村組 技術研究所

河原畑良弘 北角 哲○杉本博史 岡本伸一

三井建設(株)

技術研究所

梅園輝彦

佐藤広司○宇都宮 透

1. はじめに

岩盤中に設けられる地下構造物は、岩盤の強度を有効に生かすため、その健全性を損なうことなく構築される必要がある。キレツが多く不均一でしかも現位置調査が困難な岩盤でこのような地山の強度を十分に利用した構造物を構築するためにはその設計の確認、施工の管理が重要であり、このため現場計測が実施されている。

計測情報の収集、処理においては、従来は主に人的作業に頼っており、測点数が多いことから計測結果を迅速に提出できず、したがって重要な情報を見落としがちであった。また計測、図化の個々の作業についてコンピュータを利用した自動計測を行った例もあったがこれらをシステムとして確立するには至っていない。

本研究の目的は①現場のトータル・マネジメント・システムにおける計測情報の位置づけ、②計測情報処理システムの持つべき機能の分析、③これを可能とするシステム開発であり、地下空洞掘削工事を対象に施工および管理システムの求めに応じて、信頼性の高いデータを迅速に処理し提出できる機能と、データ評価機能をもつ計測情報処理システムの開発を行った。

2. 施工情報処理システムにおける計測情報処理の位置づけ

i. 現場計測の必要性和その役割

現場計測が必要とされる理由の第1は施工の安全管理である。しかし土木工事のトータル・マネジメント・システムは対象工事を指定工期内に、設計図書に記された構造物をできるだけ安く確実に施工していくために施工者の計画・管理行為を合理的にサポートする目的で提案されるものでなければならない。このことから考えて現場計測においても安全性の他に施工の経済性、迅速性を無視することはできない。

一方設計に際しての、コンピュータの助けを借りた解析技術は非常に高精度化され、FEM等を用いた数値解析結果はあたかも現象を完全な形で表現しているかのごとき盲信すら与えている。

しかし岩盤(地盤)を対象とする設計や施工においては、材料(岩盤・地盤)そのものを品質管理を通じて人間が創造することは不可能であり、特に岩盤のような現位置における物性が実験室におけるテスト結果と非常に異なる場合には地山物性推定時の不確定性の介入は避け難い。

調査から設計に至る課程でも不確定は介入する。すなわち調査における平均という単純化や解析理論におけるモデルの理想化である。

このような場合、バランスのとれた設計にするためには解析だけが高精度化されても片手落ちであり、現場における実測結果と解析結果の対比・検討を通じてその最適化をはかり適用の限界を知っておく必要がある。このような意味で現場計測の意義は大きい。

ii. 計測情報処理システムの位置づけと役割

計測情報を必要とするマネジメントは前節で示したように、作業の安全や経済性といった作業管理レベルでのマネジメントである。すなわち高次の分析のための上位レベルへの情報の正確な伝達とそのための加工、貯蔵等を除けば現場単位の作業のマネジメントのサイクルにそった役割りを果たすべきシステムと言える。そ

したがって計測情報処理システムの役割は、計測器によるデータの収集および一次加工とその蓄積、警報の発生、加えて高次の分析に必要なデータの検索・転送などを可能とすることである。

計測情報処理の目的は技術管理を効果的に行うことによって、作業レベルのマネジメントを効果的に実施することである。

- a. 作業の技術管理の目的としての安全性や施工精度が確認できるような力学的分析モデルを有していること。（現在の現象に対して合理的な分析モデルであること。）
- b. 現時点以降の将来時点での状況（技術管理にとって必要な将来状況）の推定が可能なような分析モデルを有していること。
- c. 管理（計測）の対象とすべき項目が十分に含まれていること。
- d. 測点の空間的な配置が現象を十分に解明できる精度を有しかつこれらの情報を処理し得る容量を有していること。
- e. 入力情報や提供情報（出力情報）の精度が十分に実用に耐えうること。
- f. 時間的なスケール（ミクロスケール）に対応することのできるようなデータの収集・処理・伝達が可能なような迅速性を持っていること。

- g. 現場条件に適合して十分に稼動しうるようなシステムであること。
- h. 現場の技術者がオペレートしやすいようなまた判断を下しやすいようなシステムであること。
- i. あまり高価でなくコスト／パフォーマンスの良いシステムであること。

などがあげられる。

i. 施工における計測情報の流れ

しかし、原設計の段階で得られる岩盤物性は、現在のところ地山での性質を完全に表現するに至っており、（岩盤における原位置での物性は、サンプリングの困難さ、岩盤の不連続性などにより、土質材料に比して数段と精度が悪い）さらに、地山の初期応力状態は計測がむづかしくきわめて精度の悪いものである。

The diagram illustrates a project cycle with the following components and flows:

- Design (設計):** The starting point of the cycle, labeled "START".
- Construction (施工):** The central activity, labeled "(a) 安全管理" (Safety Management).
- Evaluation (評価):** The final stage, which feeds back into the Design stage.
- Measurement (計測):** Divided into two types:
 - Management Information System (マネジメントインフォメーションシステム):** Associated with "Date Data" (日付データ).
 - Physical Information System (フィジカルインフォメーションシステム):** Associated with "Measurement Data" (計測データ).
- Flow (a) Design Change (設計変更):** A loop from Design to Construction and back to Design.
- Flow (b) Change in Engineering, Materials, Labor, etc. (工程、資機材、労働力等の変更):** A loop from Construction to Evaluation and back to Construction.
- Flow (c) Design Change (設計変更):** A loop from Evaluation back to Design.

—514—

地下空洞掘削工事における計測情報の流れを図-1に示す。図に示したように、それぞれの作業は相互に関連していくつかのサイクルを形づくっている。図中の記号(a),(b),(c)は計測情報から得られる最終の情報の流れとその利用形態を示しており以下の評価に利用される。

- 将来予測(再設計)に用いる入力データの修正 → (c)
- 管理値以内か?(掘削継続可能か?) → (a),(b)
- 次回の掘削(位置の変更を含む)を行っても空洞は安定か? → (a),(b)
- 岩盤補強工はどの位置まで必要か? ——

ii. 対象となる計測項目とその利用

現場計測の対象は主に地山の変形と支保部材に加わる応力であるが、以下に計測項目列挙し、そのマネジメントの内容についてのべる。

a. 岩盤変位(内空断面の変化, 岩盤内変位)

- 設計時の許容変位と対比させ安全性をチェックする。
- 地山内部と空洞壁面の変位を比較し, 岩盤の降伏域を知る。
- 降伏域の外 の地山の変形を測定し, 岩盤の物性, 初期地圧をチェックし原設計の入力データの妥当性を調べ再設計(数値シミュレーション)を行う。

b. アーチ部天端のロックボルトおよび側壁補強工の応力

- 設計時の許容応力と対比させ安全性をチェックする。
- 応力分布を調べ岩盤の降伏域を調べる。

c. アーチの覆工応力(NATM方式の場合は例外)

- 設計時の許容応力と対比させ安全性をチェックする。

なお, ロックボルトと側壁補強工の応力, 覆工の応力を第1位の安全管理基準として用いる。

iii. 計測情報処理システムの設計

2-iiiで定めたシステムの持つべき要件に従い計測システムを設計する。

a. 力学的安全性の分析モデルについて

当初設計の管理値を用いる。

b. 将来予測モデルについて

弾塑性有限要素法を用いる。(データ通信を利用してホスト・コンピュータを呼び出す)

c. 管理対象について

前節の計測項目a~cとする。

d. 測点の配置について

測点の配置と数を考える場合の基本的な条件は次に示すとおりとする。

<岩盤変位>

- 岩盤変位計(5点用) 1壁面の最低1ヶ所は設置する。そう入長は $2D$ (D :空洞の巾)
 L (L :空洞の長さ)が $2D$ をこえる場合は $L/2D$ ヶ所に計測断面を
 もうける。(あまりは切り上げ)
 H (H :空洞の高さ)が $2D$ をこえる場合は1断面で上下2ヶ所に設置
 する。但し下の方の分は3点用。アーチ部の測定断面は壁面とあわせる。
- コンパージェニス・ 測定断面は岩盤変位計の設置断面に合わせる。
 メジャー 1断面で上下方向に3ヶ所で測定

＜補強工応力＞

- ロックボルト軸力計

測定断面は変位と合わせるが、地山が悪い場合は L/D ケ所に計測断面をもうける。

アーチ部では一断面当り 3 本のロックボルトを対象に測定を行う。

- 側壁補強工の荷重計

測定断面はロックボルト軸力の測定断面と合せる。

2 本で 1 対と考え 1 断面で上下に 3 ケ所、左右の側壁に対し合計 6 対の測定を行う。

＜アーチの覆工応力＞

- 鉄筋計・コンクリート歪計

測定断面は岩盤変位計の設置断面にあわす。

1 断面に入れる計器の数量は 12 ～ 16 個。

温度センサーも同時に設置（1 断面 2 ～ 3 ケ所）

＜その他＞

- アーチ部天端あるいはアーチアバットの沈下測定は 5 m ごとにレベルを使用して実施する。システムにはこのためのキー入力を用意する。

出力 120 万 KW 級、空洞の寸法が高さ 40 m、巾 20 m、長さ 150 m の地下発電所を対象とした場合の、岩盤変位関係の測点配置の例を図-2 に示す。

e. 精度について

変形（変位）の分解能は $1/10\text{ mm}$ ，歪，応力，荷重の分解能は歪計換算で $5\text{ }\mu$ 以下とする。

最大測定容量は、変位は設計値の、応力・荷重については補強工の許容応力の 3 倍とする。

システム側の読み込み精度の向上に関しては多数回読み込みを行う。

f. 測定サイクルについて

基本的には 1 日 1 回とするが、初期の変動を正確にとらえる目的で、自動化効果を生かし 1 日に多数回の測定を可能とするシステムとする。

4. 計測情報処理システムの開発

i. システムの機能

前章までで述べた設計方針に従い、地下空洞掘削工事における計測情報処理を行なうシステムを開発した。本システムでは予め与えられたスケジュールに従って、コンピューターが自動的に計測、得られた情報の加工

・図化を行なう。本システムの主な機能は以下である。

- a. 自動 256 点。手動による機械式計測 128 点の測点に対して、1000 回分の記録を磁気記録シランダムアクセスによる記録の読み出しを可能とする。

機械式計測には、測定者の習熟が必要であること、データ取扱い中に誤差が混入するおそれがあることなど問題点もあるが、経済性、実績に裏づけられた信頼性から地下空洞掘削工事における計測に採用されており、今回も機械式を用いることにする。

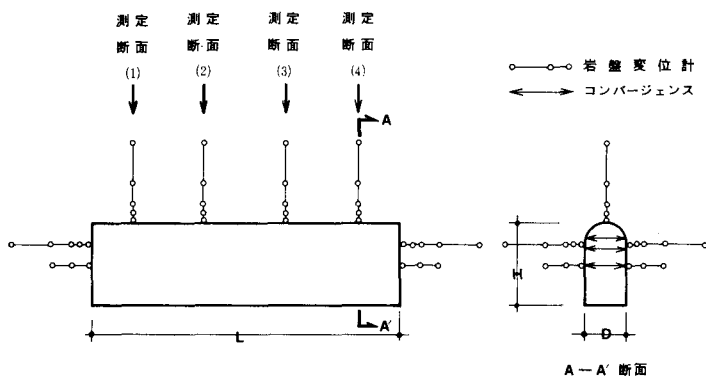


図-2 計測断面の例（岩盤変位の場合）

b. 各プログラムの機能

① 計測条件入出力プログラム

表-2は計測条件入出力プログラムが備えているコマンドとその機能を示したものである。

コマンドを選択することにより会話形式で、フロッピーディスクのイニシャライズなどの管理、変換器の初期値・計測スケジュールなど計測条件の入力、計測条件・計測データの出力、別プログラムの呼び出しの処理が行なわれる。

② 計測制御プログラム

本プログラムではスケジュールに従った自動

計測が行なわれる。自動計測の状態になると、マイコン内部の時計から時刻が読まれスケジュールに定められた時刻と対比する。指定時刻になるとサンプリングが行なわれる。サンプリングは1測点について5回行ない、その間の最大値と最小値の差を求め管理値と比較し、超過があったとき警告を印書する。5回のデータの上・下を捨て残り3回の平均を計測データとし、校正係数を乗じ初期値を引き所定の物理量とする。求められた物理量は累積量・日変動量について与えられている管理値と比較され、超過があったときは警告が印書される。また全計測データは印書されると同時に磁気記録される。1日1回の計測データは正規のファイルに記録され、その他の時刻での計測データはテンポラリー・ファイルに収録され1日以内の読み出しを可能とする。

自動計測状態の時、タイプライターからの入力によりコマンド入力待ちの状態になる。コマンドは3つありそれぞれ手動による計測開始、マイコン内部の時計の時刻印書、計測条件入出力プログラムの呼び出しの処理を行なう。

③ 図化制御プログラム

計測条件入出力プログラムにより入力された図面構成の情報に従い図化処理を行なう。

図面の大きさはA8またはA4で4本のペンをプログラムにより選択する。

図化処理の仕方は2つあり、図面1枚に1図を収容するタイプと、1枚の図面に1ないし複数の小図を収め、例えば1計測断面で必要な情報を1枚の図面に盛りこみ技術者の判断を容易にするタイプがある。それ

ぞれ経時変化図(1つの軸に時間をとる)、分布図(1つの軸に測点間の距離をとる)をかくことができる。

後者の複数の小図を収めるタイプでは、図面名称、軸の単位等が予め印刷された用紙に計測データを作図することにより、作業時間の短縮と明瞭な図とすることををはかる。作図する内容としては、岩盤内および内空の変位、岩盤内歪、ロックボルト軸力、側壁補強工の荷重、アーチコンクリート応力についての計測断面毎に編集されたものである。

④ 計測結果入力プログラム

本システムでは、内空変位、アーチ沈下それぞれテープ、トランシットによる機械式計測を行う。

本プログラムは手動により得られたデータをタイプライターより入力・処理し、ファイルへ収録する。

⑤ データ転送プログラム

表-1 使用データ・ファイル

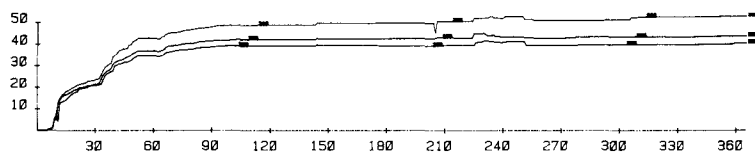
名 称	内 容	形 式
実行条件ファイル	実装計測点数など実行に必要な整定数	シーケンシャルファイル
実行状態ファイル	書込み済のレコード数など実行により変化する整定数	"
スケジュールファイル	計測を行なう時刻(時、分)	"
センサー情報ファイル	センサーの校正係数、管理値など	"
作図情報ファイル	縮尺、方向など図面構成の情報	"
計測データファイル	計測データを収録する	ランダムアクセスファイル
テンポラリーデータファイル	計測データを一時的に収録する(1日以内)	"

表-2 計測条件入出力プログラム

第1位のコマンド	第2位のコマンド
T : 係数の入力	F : 実行条件の入力
	S : センサー情報の入力
	T : スケジュールの入力
	P : 作図情報の入力
D : データの出力	S : センサー情報の出力
	T : スケジュールの出力
	P : 作図情報の出力
	D : 計測値の出力
C : 別プログラムの呼出し	M : 計測制御プログラムの呼出し
	P : 図化制御プログラムの呼出し
	T : 計測結果入力プログラムの呼出し
	H : データ転送プログラムの呼出し
I : フロッピーの管理	I : フロッピーのイニシャライズ
	X : フロッピーの更新

計測結果は設計（解析）結果と対比され、施工の安全性、確実さを確認すると同時に設計の最適化すなわち岩盤条件に合った設計へと変更していく必要がある。設計に際しては、数値解析による必要があるが、本システムで考えているマイコンでは、記憶容量、演算時間の点から処理は不可能である。

本プログラムは計測結果をホスト・コンピュータに転送し、またホスト・コンピュータにより行なわれた数値解析結果をマイコンに転送する。



iv. システムのテスト

前述したシステムの機能を確認する目的で、室内でのシミュレーション・テストを行なった。

テストは、計測を制御する機能のテストと、図化を制御する機能のテストに分けて実施した。

a. 計測機能のテスト

ストレインゲージ用チャンネル切換ボックス6台、電圧用チャンネル切換ボックス2台をデータロガに接続し、変換器としてはストレインゲージ・タイプの変位計と定電圧発生装置からの信号を用いた、計測のスケジュールは15分毎で1日96回とし、上記の状態ですべて1週間の自動計測運転をした。

1回の自動計測に要する時間は、計測の開始から結果の出力を終了するまで約6分であった。スケジュールで指定した時刻以外の手動による計測では、1測点について5回サンプリングする機能を停止することによって約1分で作業を終了した。累積量、日変動量および5回のサンプリング間の変動量についての監視は、人為的に過大な値を与えてその警告機態を確認した。

b. 図化機能のテスト

図化機能を確認する目的で、過去の計測データを元に模擬のデータを作成し、計測結果入力プログラムにより入力、計測データ・ファイルを作り図化を行なった。

図-5は上の図がアーチ部岩盤変位の経時変化図で、下の図がアーチ・アバットの変位経時変化図である。それぞれ1年間の計測結果を図化している。図-6は側壁部岩盤変位の計測結果より岩盤の歪を求め、1計測断面について分布図4図を1枚の図面にまとめて示している。図-7はFEMの解析結果に基づいて描い

図-5 図化出力の例（アーチ部沈下）

80 10 31

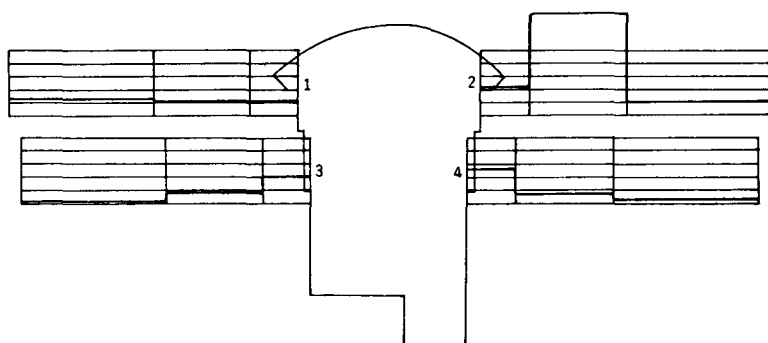


図-6 図化出力の例（岩盤内部の歪）

た変位図の上に実測の壁面変位をベクトルとしてプロットしたものである。

図-5, 6, 7の作図に要する時間はそれぞれ約10分, 2分, 1分であった。図-5に要した時間10分は長すぎるが、プロットする間隔を1日毎から、1週間毎にすることによって約4分に改善された。

予め情報が印刷された用紙を使用するときは、用紙上の2点の座標を読みこむことによって座標軸の方向と原点を定めている。

5. おわりに

我々は過去の実験と教訓をもとに、理想像としての今後の計測情報処理システムを提案した。従って現場計測の必要性や役割については独断にすぎること多いと考える。

システムの持つべき要件については、分科会の計測グループの討議の中からまとめたものであるが、京都大学の春名氏からは特に有益な助言をいただき、本紙の一部は氏の論文よりの転載をお許しいただいた。またシステムの設計・開発については東京理科大学の計画学研究室、大林助教授の助言と同研究室の鈴木君の協力をいただいた。本紙を借りて深く感謝の意を申し上げる次第である。

システムのテストは室内で実施したものであり、過去の計測データと施工データを用いたシミュレーションテストも実施したが、十分なものではない。我々の目ざすシステムはあくまでもワークシステムであるから、今後の実証的研究が重要と考える。

今までの研究を通して我々が目ざすものの一つに、計測情報処理システム作成のためのマニュアル作りがある。我々が提案したシステムの持つべき要件に従ってこれを確立する実際の手法のブレークダウンは今後の研究課題である。

さらにもう一つの課題としては、計測情報とマネジメント情報との有機的結合をはかった作業所管理の実証的研究が必要と考える。

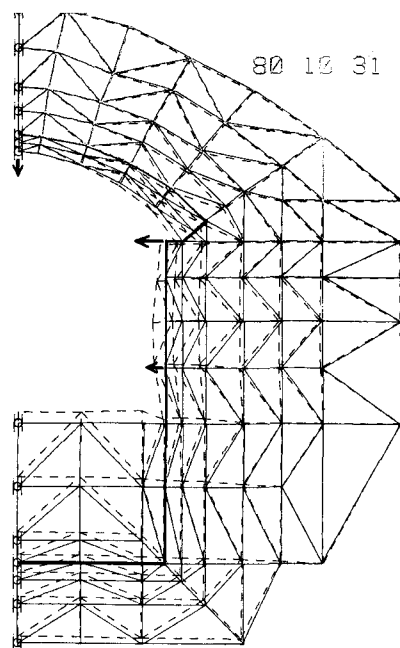


図-7 図化出力の例(壁面変位)