土木学会論文集 No. 486／VI-22, pp. 115-124, 1994. 3

山岳トンネルにおける新しい計測方法の開発とその適用

鍛治茂仁*・田中政芳**・古川浩平***・
中川浩二****

山岳トンネルを安全かつ経済的に建設していくためには，計画時の地質調査はいうまでもなく，施工時に岩盤挙動の観察，計測，解析を綿密，合理的に行い，その結果を設計・施工に反映させることが重要となっているが，従来の計測方法では測定時期の遅れや必要な情報が測定困難であるため実際の変位状況を把握しずらい等の問題があった．本論文は，計測データの採取を確実・迅速に行うトンネル壁面変位計測部とこれらのデータを整理・解析し有効に活用できるようにする計測データ処理システム部とからなる新しい三次元トンネル計測管理方法について述べるものである．

Key Words：*measurement, analysis of ground behavior*

1. はじめに

トンネル掘削に伴う岩盤挙動を把握する手法としては，切羽観察に代表される「目視観察」と，支保部材，岩盤の変形・応力状態を直接測定する「坑内計測」とが一般的である．計測のうち特殊な計器を設置して測定する地中変位測定・覆工応力測定・ロックボルト軸力測定等の「B 計測（地山条件を考慮して，「A 計測」に追加して選定すべき項目）」と呼ばれているものは，多大な手間とコストを要することからトンネル全域での計測は難しく，特定箇所の測定に限定されているのが現状である．そこで現実的な計測としては，内空変位測定・天端沈下測定と現状ではあまり測定されていないが脚部沈下測定等の「A 計測（日常の施工管理のため必ず実施すべき項目）」と呼ばれているものが岩盤挙動計測の主流となっている．表—1 に建設省指針に基づく「A 計測」の計測間隔と頻度を，表—2 に内空変位測定・天端沈下測定の特徴を示す．しかし，「A 計測」においても計測開始時期，計測可能時間帯，計測方法，データの整理・解析等の面において問題点が多く，計測結果の設計・施工への素早いフィードバックが困難であった．そのため山岳トンネル掘削において各種計測を迅速確実に実施し，それらの計測データを整理することによって将来のトンネル挙動の予測・解析を行うことは必ずしも十分と言えない現状であった．そこで本研究では計測データの中で最も計測頻度が高く，また，速やかなトンネル安定性評価に最も有用なデータである「A 計測」を 主体としたトンネル内部壁面の変位状況を迅速に観測・解析する計測システムの開発を行いその有用性を示すとともに，実工事に適用した結果を報告する．なお，本計測法の開発は筆者の一人（鍛冶）らによって以前より進められており[1]，今日ではいろいろの形で実工事に適用され，かなり一般的となっている．しかし，その計測の原理や現場実測における精度，さらにはその計測結果の施工への応用等について詳しく報告された例はみられない．今後の情報化施工にとってこれらのデータは必要不可欠であり，本研究ではこれらをまとめて報告するものである．

表—1 建設省指針による計測間隔と頻度

計測間隔

条件		測定間隔
坑口部	土被り 0～2D区間	10m
施工初期段階	掘深長200m迄	20m
その他一般部	土被り 0～2D区間	10m
	土被り 2D以上	30m

計測頻度

頻度	測定位置と切羽の離れ	変位速度（内空変位）
2回／1日	0～0.5D未満	10mm／日以上
1回／1日	0.5D～2.0D未満	5～10mm／日
1回／2日	2.0D～5.0D未満	1～5mm／日
1回／1週	5.0D以上	1mm／日以下

（D：トンネル掘削幅）

切羽の離れ，変位速度 から決まる測定頻度のうち高いほうを採用する．

表—2 内空変位測定・天端沈下測定の特徴

	内空変位測定	天端沈下測定
測定概要	トンネル内空の壁面に設置した測点間の距離を測定するもの	トンネル内空の天端部に設置した測点の絶対高さを測定するもの
測定機器	一定張力で測定できるスチールテープであるコンバージェンスメジャー使用	測点にスタッフ，スチールテープ，ロッド等を置きレベル使用
測点	金属製の測定専用ピンをホールインアンカー，モルタルアンカーで固定	内空変位の測点流用，あるいは測量鋲の打込み
データ	相対変位	絶対変位

2. 現時点におけるトンネル計測の意義と問題点

（1） 計測の意義

山岳トンネルは地中深くに構築される線状構造物であるという特殊性をもつ．そのため事前に得られる地山情報は，過去の調査実績・施工実績等の既存資料調査，周辺の地形および地質構造等の地質調査，弾性波探査とボーリング調査が全般的な調査として一般的に実施され

* 正会員 鹿島 土木技術本部工務部山岳土木課長
（〒107 東京都港区元赤坂 1-2-7）
** ソキア 技術本部第三開発部部長
*** 正会員 工博 山口大学教授工学部社会建設工学科
**** 正会員 工博 山口大学教授工学部社会建設工学科

る．しかしこれらの質・量には限界があり，計画段階では少ない情報をもとに設計せざるを得ない場合もある．そこでトンネル施工における鋼製アーチ支保工，吹付コンクリート，ロックボルト等の支保工のグレードを施工時の掘削に伴い現れる地質に適したものに増減したり，必要な補助工法を併用したりする等の設計変更を行う必要があり，時にはこの設計変更がトンネル延長の大部分を占めることもある[2]．

トンネル周辺地山の挙動，支保部材の効果等を定性的かつ定量的に評価しながら，設計・施工の変更が必要か否かを判断する材料を得るために各種の計測が必要となる．そのときトンネルの進行に合わせてトンネル全域にわたり定量的かつ比較的容易に測定でき，設計変更の評価に役立てることが可能な内空変位測定・天端沈下測定・脚部沈下測定等の計測は切羽の目視観察とともにその果たす役割は大きい．

トンネルの計測は時系列に測定され，通常採用されているショートベンチカット工法では上半掘削，下半掘削等の切羽位置の前進ならびに時間の経過に伴い変化する値をとらえるものである．そして変位量・変位速度・変位収束状況および断面の変形状況を知り，周辺地山の安定性評価，支保の設計・施工の妥当性確認，補強工の要否判断，二次覆工施工時期の判定等に使用される．また，将来の類似条件工事に対する資料としても使用される．

（2） 従来の「A計測」測定方法と問題点

表—3に「A計測」で用いられている変位計測における問題点とそれに伴う不具合事項を示す．トンネル工事における「A計測」の測定方法としては直接計測法が一般的に用いられており，トンネル内空に数箇所の測定点を設けて各方向の幅をコンバージェンスメジャー（スチールテープ）で測る内空変位測定と，トンネル壁面各部の沈下量をレベル・スタッフ（標尺）で測る天端沈下測定・脚部沈下測定が通常行われている．これらの計測作業を行うためには，重機車両等の動きがない時間帯を選ばなくてはならず，昼夜体制で作業が連続して行われている坑内作業環境を考えた場合，複数の計測断面を限られた時間内に測定することは大変困難であるのが現状であった．

また，トンネル掘削においては切羽掘削時に先行変位が未掘削区間に発生し，切羽到達時には変位速度がほぼ最大となることは良く知られている．したがって計測は早ければ早いほどその意義が向上するが，切羽の安定性を向上させるために中央部に地山を残すリングカット工法（核残し）を採用したトンネルでは初期値の採取が極端に遅れていたのが現状であった．また，地耐力の不足等を補う側壁導坑先進工法を採用したトンネルでは左右の両側壁導坑コンクリート間の変位量計測は非常に難しかった．そのうえ，沈下測定を除いて相対的な動きしかとらえられない等の問題があった．さらに，支保工脚部の沈下はトンネルの断面形状の性格上，レベル・スタッフでの測定が非常に困難であり，天端部は高所作業車等を使用する高所作業となり危険性が高かった．以上のことから，コンバージェンスメジャー，レベル・スタッフを用いた接触型の計測法には限界があり，精度の良いしかも簡便な非接触型の計測法が切望される状況にあった．

表—3　変位計測における問題点とそれに伴う不具合事項

問　題　点	不具合事項
上半リングカット掘削工法採用時に初期値採取が遅れる	施工状況によって初期値の採取時期がバラバラとなり，計測値の科学的な管理ができない
下半掘削時に斜路により初期値採取が遅れる	同上
作業空間にテープ，高所作業車が必要となり他作業中に測定できない	必要な時期に測定ができない
測定に時間がかかる	測定箇所の増加が困難である（大きな変位発生ポイントの見逃し）
沈下測定以外測定値が相対値であり，絶対的な変位がとらえられない	実際の変位状況を把握できない（変位の方向・性質の取り違え）

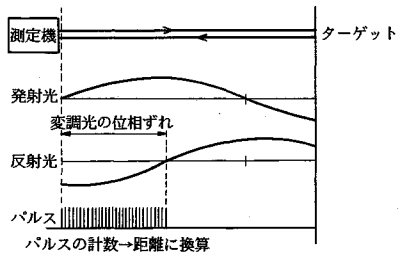
3.　光波測定機

2. で述べたように直接計測法では多くの問題点があり，NATMの特色である施工時の情報を設計変更に迅速に取り入れるのは難しかった．そこで，直接計測法にかわる光波測定機を開発し，それによって上記の問題点の克服を試みた．

（1） 本光波測定機の測距原理と特徴

光波測定機のなかの測距部である光波距離計は，理論的には『距離＝光の速さ×時間』という基本法則により距離を測定する．しかし，0.1 mmの精度で距離を測定するためには，時間を10^{-13}秒～10^{-14}秒の精度で計らねばならず現実的ではない．そこで本測定機においては『v（波の速さ）＝f（波の振動数）・λ（1波長の長さ）』を用いる位相差方式を用いることが実用的となる．λ（1波長の長さ）は光自身の波長ではなく，測距光源である光波距離計で使用される赤外線に近い発光ダイオードの発光を，水晶発振器で電気的に変調周波数と呼ぶf（波の振動数）で強弱を与え，この強弱の山から山を1波長としたものである．測定光と反射光との一定変調周波数の1波長の位相差を細かいパルスで精密に測定することで距離を求めるのが位相差方式である．

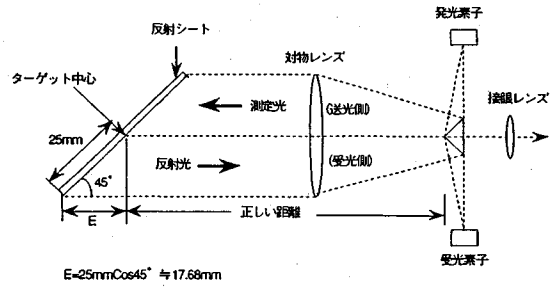
本光波測定機の光波距離計は原理的には一般の測量用光波距離計と同じであるが，f(波の振動数・変調周波数)を一般の光波距離計（15 MHz）よりも高く（75 MHz）して高分解能を取得している．具体的には，図—1に示すように上記の近赤外光を使った位相差方式によっており，発光源である発光ダイオードは変調をかけられて，明暗の光の繰り返しが発射される．これが測定対象点に貼られた光波反射シート（後述）で反射されて返ってくると，その光は往復した距離だけの時間の遅れを生じる．時間遅れのない発射光に対する反射光の時間遅れは，変調光の位相のずれを精密なクロックで数えると距離とし



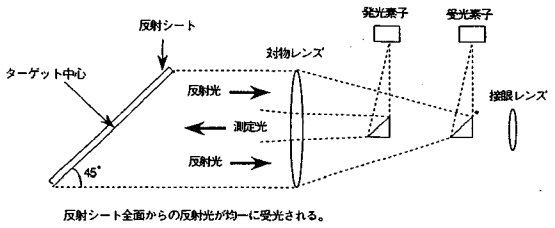
図—1 本光波測定機での距離測定の原理

1.5MHZ変調光による換算距離：	○○m○
75MHZ変調光による換算距離：	○m○○○○
表　　示　　：	○○m○○○○

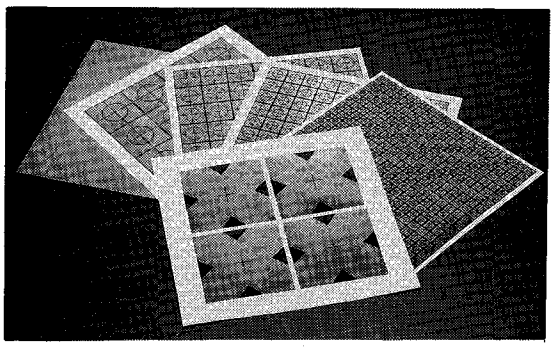
図—2 距離の表示方法



図—3 従来の光波距離計の光学系



図—4 本光波距離計の光学系



写真—1 光波反射シート

て知ることができるものである．本光波測定機では75 MHzの変調周波数を用い，精密クロック計数を1万回繰り返し平均をとることにより，距離の分解能を0.1 mmまで可能としている．しかし．この周波数における半波長は2 mなので，それ以上の距離の表示ができない．そこで別に1.5 MHzの変調光を出して100 mまでの距離の測定を行い，図—2のように両方の表示をつないで6桁の表示を行っている．

本光波測定機はこの光波反射シートを用いて精度を向上させるために，光波距離計の光学系を開発（受光範囲を改良）している．図—3に従来の光波距離計の光学系，図—4に本光波測定機の光学系をそれぞれ示す．従来の光波距離計では発光素子からの光は対物レンズの右側半分から発射され，プリズムからの反射光が受光範囲である対物レンズの左側半分に返るようになっており，反射光が発射光の方向に返るという性格に反しているのに対し，本光波測定機では受光範囲が対物レンズの外周となっており反射光が発射光と同心円上で捕らえることができる点に差がある[3]．

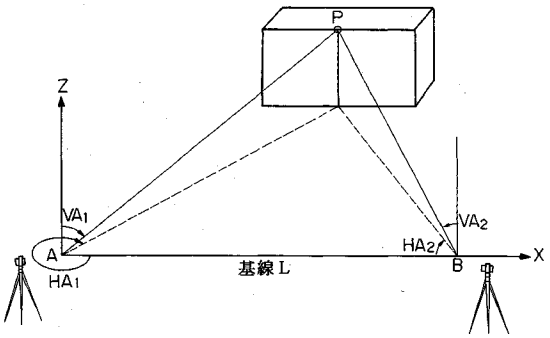
（2） 本光波測定機の関連機器と測角

測点部のターゲットについては，従来ガラス製反射プリズムが使用されていた．しかし，プリズムに入射される測距光が±20°以内に限定されたり，プリズムの奥行があり測点に直設置できない，設定位置が確認しづらいなどのことから，測地測量以外の分野においては実績が少なかった．これに対し本光波測定機で使用する光波反射シートは極めて小さく取扱いが容易で，かつ，入射される測距光が±45°以上の場合も測定可能となっている．このターゲットは，厚さが0.4 mmのプラスチック製で，裏面からほぼ1/3厚さ程度のところに反射面があり，写真—1のように前面には視準場所が特定できるようなラインが書かれているとともに，裏面に粘着剤が塗布してあるのでどこにでも容易に貼り付けることができるようになっている．

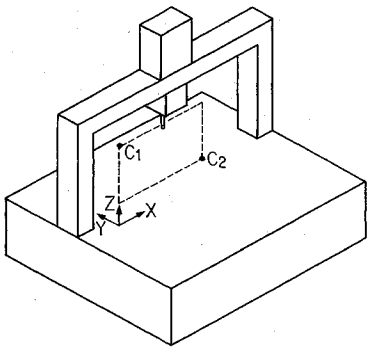
測角には縦軸，横軸とも光学式ロータリー・エンコーダが使用されている．等間隔の目盛りの刻まれたメイン・スケールとそれと平行して同じように目盛られたインデックス・スケールによって構成され，1秒の表示が可能となっている．また，x軸，y軸それぞれに測定機の傾きをモニタし自動補正する2軸コンペンセータが内蔵されているので，正確な測角ができる．

（3） 本光波測定機の座標決定法

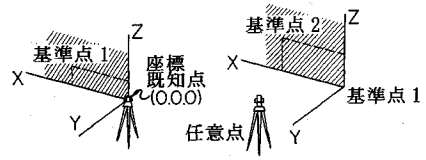
大型の構造物等を測定する場合，5 m～100 m程度の寸法のものを±1 mm場合によっては±0.1 mmという測定精度で測ることを要求されることがある．測定する寸法が大きいという点で一般に測量機が使用されるが，測量を目的とした装置ではこのような高精度の測定を行うのは必ずしも容易でない．これまで採用されてきた測定方法は，図—5に示すように2台の測量機を使って，用意された基線の両端から対象とする点の角度を測定し，三角形を解いてその座標を求める前方交会法と呼ば



図—5　前方交会法による測定



図—7　カールツアイス製門型三次元測定機



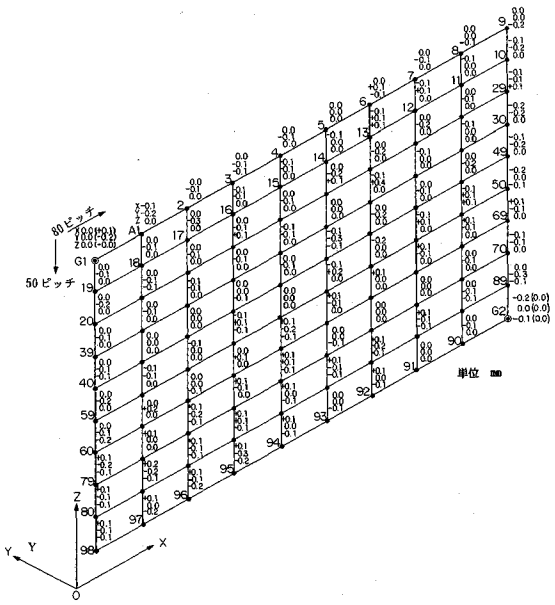
図—6　座標軸設定の違い

れるものである．これは，角度測定を基本とした方法で，測量機における角度の測定精度が，距離の測定精度に比べてより高いということを理由としている．しかし，この方法では基線の用意が困難で，かつ，その基線の両端に精度の高い測定機を設置する必要があることから現在あまり使用されていない．

次に光波測距儀と電子セオドライトを一つに結合した，電子トータル・ステーション形の測量機を用いる方法があるが，この方法では対象点の距離，天頂角，水平角を得ることによって容易に座標計算等が行えるので，現在広く使用されている[4]．

本光波測定機は，従来の電子トータル・ステーションの測距精度を上げ，座標決定の高精度化を目的とすると共に，図—6に示すように従来のものが測定機を既知点に据え付ける必要があったのに対し，測定機を視準しやすい任意位置に据え付け可能となる新しい座標軸設定の機構を有している．

座標系は右手系（数学的座標系）を採用しており，測定機を設置した地点の鉛直方向が z 軸となるとともに，最初に測定した点が座標の原点と定められ，2番目に測定した点の方向が xz 面となり，その面での水平方向が x 軸となる．なお，y 軸は x 軸と z 軸に対して互いに直角となるように自動的に決められる．このように原点の設定は任意であり，測定後座標変換により原点の移動・回転が可能であると共に，一度に必要な全ての測定ができず測定機を移動した後に採取したデータについても，既に測定されて座標が知られている2点を測定することにより座標の連結を容易に行うことができる．つまり新しい機械点から見た座標の旧座標に対する偏位角を求めて，水平角に加えることによって統一された座標に変換ができるが，これにより広範囲にわたる測定データも同一のテーブルで種々の解析を可能としている．

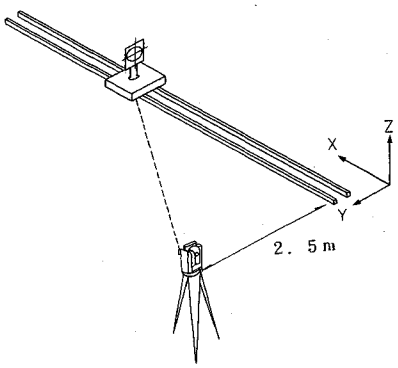


図—8　鉛直面の各点の誤差（x, y, z）

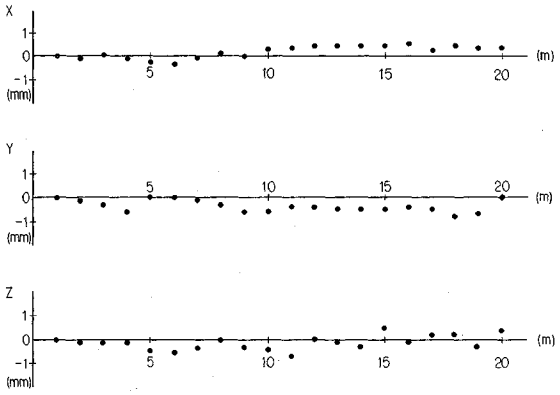
（4）明りにおける精度の検討

原理的に，測定機の設置に基づく誤差は発生しないが，距離，天頂角，水平角の測定誤差が座標に変換されることで直接的な誤差要因となるので，本光波測定機を使用して鉛直面及び直線を計測する作業を仮定した測定を行い，基準値と比較することによって精度の検討を行った．

鉛直面については，既知の鉛直面を作るのが非常に難しい．そこで図—7に示す．カールツアイス製の門型三次元測定機（分解能 0.1 μm，精度 5 μm 以内）のプローブにターゲットを取付け，2.5 m の距離からそれぞれの位置のターゲットを測定してデータを比較した．移動範囲は y 軸を固定とし，x 方向に 80 mm ピッチで 720 mm，z 方向に 50 mm ピッチで 450 mm とした．その結果を図



図—9　レール基線と測定機



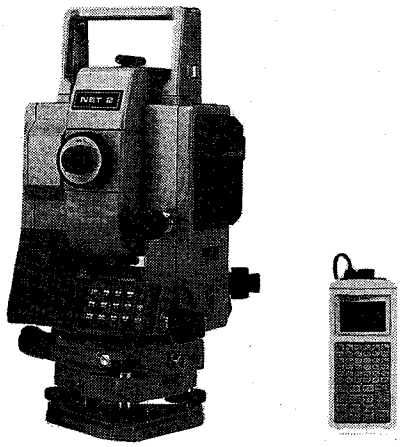
図—10　レール基線との比較データ

表—4　システム構成

システム部位	機成機器
測定部	高精度光波測定機（距離、水平角、天頂角同時測定） 3DステーションNET2
測点部	粘着テープ付き反射シート（T=0.5mm） シートサイズは10mm角～50mm角の4種類
データ集積計算部	16ビットハンドヘルドコンピュータ SDR4B

—8 に示す．y 座標の前後の出入りの誤差は最大 +0.4 mm，最小 −0.3 mm，平均 −0.066 mm，標準偏差 0.114 mm となった．

直線については，水平でかつ一直線の条件を持ったレール基線上で，ターゲットを 1 m ずつ 20 m まで動かしてそれぞれの位置のターゲットを測定し，データを比較した．レール基線は光波距離計の検定用に作られているもので，x 軸の精度は ±0.1 mm，y，z 軸の精度は ±0.3 mm 程度で管理されている．計測はレール基線の 0 m を原点とし，19 m 地点を x 軸方向の第 2 点として座標軸を決め，図—9 に示すように原点から 2.5 m 離れて測定機を設置して測定した．その結果を図—10 に示す．計測値の分布範囲は，x 座標で最大 +0.5 mm，最小 −0.3 mm，y 座標で最大 +0.0 mm，最小 −0.9 mm，z 座標で最大 +0.5 mm，最小 −0.7 mm となった．これらの分布範囲の幅はいずも非常に小さく，実用に供するには問題のないことがわかる．



写真—2　本光波測定機とハンドヘルドコンピュータ

4. 新三次元トンネル計測システム

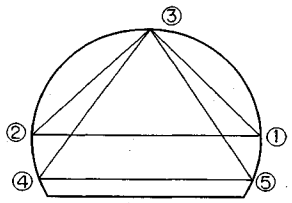
（1） 新三次元トンネル計測システムの概要

当システムは，上記の新しい光波測定機を用いてトンネル工事の「A 計測」を間接計測法で実施し，それらのデータを有効利用しようとするものである．実際にデータを採取する部分は表—4 のように測定部，測点部，データ集積計算部の三つの部分から構成される．

測定部は，前記光波測定機を使用するが，前述のように座標軸の設定にあたっては，従来のものが測定機を座標既知点に据え付ける必要があったのに対し，本測定機では座標軸の設定が任意の 2 測点の測定によって設定ができるので，測点が視準しやすい任意の位置にレベルの感覚で据え付けが可能であり，据え付け時間が大幅に短縮できる．また，測線途中に障害物があっても，測点が視準できれば測定が可能である．写真—2 測定機とハンドヘルドコンピュータを示す．

測点部は前記光波反射シートを使用する．土木工事の特徴として距離を必要とする測定が多々あるが，その際にはキャッツアイと呼ばれる光波反射板を使用する．この反射板を使用すると 250 m 程度まで測定が可能となる．また，光波反射シート等は測点や基準点としてトンネル内空の吹付コンクリート面等に設置するため，埋め込みアンカー等を使用する．座標のつなぎを行う場合には，回転式のターゲットを用い測点が前後左右から視準できるようにすることも可能である．これを使用することにより座標軸設定用の 2 点の測点が視準できる範囲であれば，測点を計測するだけで速やかに多数の座標値を得ることが可能となり，トンネルのように細長い構造物でも，途中に仮の基準点を設けることで容易に測定ができる．

図—11 に示すように従来の計測方法では，①—②，②—③，①—③，④—⑤，③—④，③—⑤の 6 測線がコ



図—11　A計測における測点と測線

ンバージェンスメジャー，①，②，③，④，⑤の5測点がレベル・スタッフによる測定となり合計11回の測定を必要とする．それに対して本測定方法では5測点の測定だけで従来の情報が得られる．

測定座標を全体座標に変換する為にはいろいろな測定方法が考えるが，基準点については以下の通りとなる．

① すべての測点を絶対座標で欲しい場合，測定時には基準点を2点必要とする（x値，y値，z値がすべて絶対座標となり，高度なデータが得られる）．

② 高さだけ絶対座標で欲しい場合，測定時には基準点を1点必要とする（z値だけが絶対座標となり，従来の計測方法と同じ内容のデータと脚部沈下測定データが得られる）．

③ その断面内のみでの相対座標で良い場合，測定時には基準点を必要としない（従来の内空変位測定と同じ内容のデータが得られる）．

このように本計測システムでは必要な情報量に応じた測定が可能で，従来の手法に比べると自由度ははるかに大きなものとなっている．

（2） トンネルにおける測定精度の検討

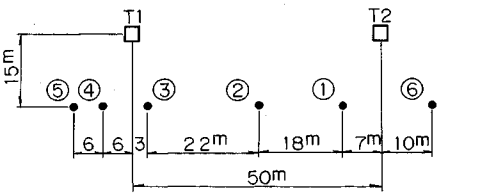
これまでの光波測定機を用いた山岳トンネル・空洞の内空変位測定は，地下発電所の空洞掘削等において実施されてきた．しかし，測定精度が低い（50 mの測定で±5 mm程度）上，測点部に使われるターゲットが高価なプリズムである等の理由から一般的なトンネル工事における内空測定等にはあまり用いられなかった．

従来の内空変位計測に使われているコンバージェンスメジャーによる測定が最小測定単位0.1 mm，天端沈下測定・脚部沈下測定の計測に使われているレベル・スタッフによる測定が最小測定単位1 mmであるのに対し，本測定機では最小測定単位が0.1 mmであり，測距精度（標準偏差）が±(1 mm+2 ppm×測定距離[mm])，測角精度が水平角・天頂角とも2秒の高い測定精度となっており，十分その要求精度を満足するものと思われる．しかし，この光波測定機を用いてトンネル内で測定するに当たって，坑内の高温・多湿で粉じんが多量に浮遊している条件下で所要の精度が得られるかどうかの確認が必要と考えられる．

以上の理由から以下に示す4項目についてトンネル坑内における精度の確認を行った．

表—5　坑内の悪環境下での測定可能範囲実証実験

シート寸法	吹　付　時	RB打設時
20×20mm	20m	40m
30×30mm	30m	60m
50×50mm	50m	80m



図—12　測定機位置の違いによる測定精度確認実験のための測定機設置図

表—6　計測機位置による測定精度の結果（単位：m）

	①	②	③	④	⑤	⑥	②再測
1	50.4063	50.4063	50.4050	50.4031	50.4019	50.4038	50.4066
2	50.4059	50.4060	50.4045	50.4034	50.4027	50.4039	50.4061
3	50.4064	50.4060	50.4051	50.4033	50.4021	50.4037	50.4069
4	50.4055	50.4057	50.4045	50.4032	50.4020	50.4038	50.4066
5	50.4064	50.4061	50.4048	50.4033	50.4018	50.4041	
6	50.4056	50.4067	50.4053	50.4031	−	−	−
7	50.4057	50.4061	50.4046	50.4021	−	−	−
18	50.4056	50.4062	50.4043	50.4029	−	−	−
19	50.4048	50.4062	50.4050	50.4028	−	−	−
20	50.4036	50.4058	50.4048	50.4025	−	−	−
μ	50.4053	50.4061	50.4048	50.4028	50.4021	50.4039	50.4066
σ	7.2140 ×10⁻⁴	3.2509 ×10⁻⁴	4.0429 ×10⁻⁴	6.0739 ×10⁻⁴	3.5355 ×10⁻⁴	2.3452 ×10⁻⁴	3.2711 ×10⁻⁴
max −min	0.0028	0.0012	0.0015	0.0024	0.0009	0.0006	0.0008

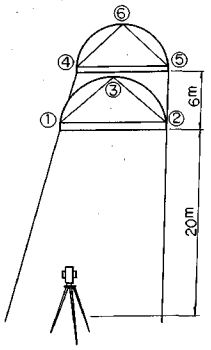
注）■■は計測値の最大、最小

① 坑内環境の違いによる測定可能範囲の確認

トンネル坑内の悪環境下における光波測定機の特性及び性能を明らかにすべく，吹付けコンクリート作業時・ロックボルト作業時の坑内環境下での実証実験を実施した．表—5にその結果を示す．坑内視界が最も悪くなる吹付作業時においても，光波反射シートを大きくすることで入射される測距光が45°以内の場合50 m程度まで測定が可能であった．条件の変化により若干の変動は予想されるが，一般的なトンネルではほぼこの程度の値が期待される．

② 測定機位置の違いによる測定精度の確認

坑内においてターゲットに対する測定機の設置位置の違いによる距離測定値の再現性（測定精度）を確認する目的で行った．図—12に示すように約50 m離してセットした2点のターゲット（T1，T2）に対し，測定機の設置位置を①から⑥に変えてターゲット間の距離を約20回ずつ計測した．表—6にその結果を示す．測定機が2つのターゲットのいずれか一方に偏っていても測定値のばらつきは非常に小さく，各ケースにおける測定値の最大値と最小値の差は最大2.8 mmであり，位置による



図—13 測定断面と測定機の位置図

表—7 測定位置の違いによる測定精度の実証実験結果（単位：m）

	① − ②	① − ③	② − ③	③ 標高	④ − ⑤	④ − ⑥	⑤ − ⑥	⑥ 標高
1	12.1387	7.9627	7.8468	5.0290	12.1284	7.5922	8.2149	4.8245
2	12.1382	[illegible]	7.8472	5.0284	[illegible]	7.5926	8.2140	[illegible]
3	12.1386	7.9620	7.8466	[illegible]	12.1279	7.5928	8.2145	4.8237
4	[illegible]	7.9624	[illegible]	5.0289	12.1283	7.5923	8.2140	4.8238
5	12.1384	7.9619	7.8469	5.0285	12.1282	7.5925	[illegible]	[illegible]
6	12.1386	7.9622	7.8473	5.0287	12.1285	[illegible]	[illegible]	4.8241
[illegible]	[illegible]	7.9620	7.8469	5.0284	[illegible]	7.5918	8.2142	4.8239
18	12.1[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	8.2145	4.8243
19	12.1382	7.9623	[illegible]	5.0290	12.1276	7.5919	8.2146	4.8247
20	12.1379	7.9622	7.8464	5.0289	−	7.5921	8.2149	4.8243
μ	12.1383	7.9622	7.8468	5.0289	12.1280	7.5923	8.2146	4.8242
σ	3.1187 ×10⁻⁴	3.5285 ×10⁻⁴	2.9429 ×10⁻⁴	4.2128 ×10⁻⁴	5.4558 ×10⁻⁴	3.5851 ×10⁻⁴	4.4129 ×10⁻⁴	5.0304 ×10⁻⁴
max −min	0.0010	0.0017	0.0012	0.0014	0.0021	0.0013	0.0021	0.0019

注1）⑤、⑥の標高は①の標高を基準（＝0）としたもの
注2）[illegible]は計測値の最大、最小

差は実用上問題がないことが確認できた．また，図—12の②地点付近に再度機械を設置した計測においても同様の結果が得られた．このことから測定値の再現性が確認され，さらに再測データから機器の据付誤差も大きくないことが確認できた．

③ 測定位置の違いによる測定精度の確認

内空変位及び天端沈下などの測定値の測定位置の違いによる再現性を確認する目的で，図—13に示すように6m離れた2つの計測断面から約20m離れたところに測定機を設置し各測線を20回ずつ同一人が計測した．計測結果を表—7に示す．MAX-MINの値は最大でも2.1mmで，かつ標準偏差の差も小さいので，測定位置の違いによる計測誤差の大小は無視できることが確認できた．

④ 測定者の違いによる測定精度の確認

図—13において，測定者の違いによる測定精度の確認を行うため測定者を替えて手前の計測断面を計測した．5回ずつ4人で合計20回計測した結果を表—8に示す．同一人が計測した表—7と比較してみても，MAX-MINの値は2mm以内でかつ標準偏差の差も小さいので，測定者の違いによる計測誤差の大小は無視できることが確認できた．

表—8 測定者を替えた実証実験結果（単位：m）

	① − ②	① − ③	② − ③	③ 標高
1	12.1387	7.9626	7.8467	5.0291
2	12.1381	7.9618	7.8469	5.0291
3	12.1384	7.9626	7.8470	5.0297
4	12.1377	[illegible]	7.8469	5.0291
5	12.1384	[illegible]	[illegible]	5.0290
6	12.1393	7.9619	[illegible]	5.0293
17	12.1387	7.9623	7.8470	5.0296
18	12.1383	7.9614	[illegible]	[illegible]
19	12.1385	7.9619	7.8472	5.0294
20	12.1382	[illegible]	7.8465	[illegible]
μ	12.1385	7.9620	7.8471	5.0293
σ	4.7895 ×10⁻⁴	5.3648 ×10⁻⁴	4.4319 ×10⁻⁴	2.9996 ×10⁻⁴
max −min	0.0018	0.0020	0.0016	0.0010

注1）③の標高は①の標高を基準（＝0）としたもの
注2）[illegible]は計測値の最大、最小 又、（ ）は計測ミス

表—9 従来手法による実証実験結果（単位：m）

	水平 1	水平 2	天端沈下
1	12.3566	12.2987	4.179
2	12.3565	12.2986	4.177
3	12.3568	12.2984	[illegible]
4	12.3565	12.2986	4.178
5	12.3570	(12.3104)	(4.199)
6	12 [illegible]	[illegible] 3107)	4.181
[illegible]	12.3572	12.2985	4.188
18	12.3562	12.2984	[illegible]
19	12.3569	12.2984	−
20	12.3570	12.2983	−
μ	12.3568	12.2985	4.181
σ	2.4767 ×10⁻⁴	2.0864 ×10⁻⁴	4.1713 ×10⁻³
max −min	0.0010	0.0007	0.014

⑤ 従来の測定法との精度の比較

実使用条件下で，従来の手法による測定と本測定機による測定との精度を比較するために，図—13の同一地点で従来の手法による測定も実施した．本測定機では内空変位・天端沈下の各測定ともに表—7に示したように標準偏差は0.3~0.5mm程度であるのに対し，従来手法の結果を表—9に示す．両者を比較すると従来手法の内空変位の標準偏差は0.2mm程度であるので，内空変位の計測精度は同程度であることが，また，従来の手法の天端沈下の標準偏差は4mm程度であるので，天端沈下の計測精度は本測定機が高いことがそれぞれ確認された．

（3） トンネル内での測定の特殊性と本計測システムにおける対応策

トンネル内の工事では明りの工事と異なり，種々の悪条件が存在する．本計測法ではこれらの問題点について以下のような方法をとることにより問題を解決している．

① 形状測量と変位計測の根本的な違いは時間にある．すなわち，トンネル内での変位計測の場合は経時変化を取る必要があるので，形状測量の場合は問題にならなかった測定時間が，大きな意味を持ってくる．このためソフトを改良して時間管理ができるようにし，同じ測定点で測定時間の異なるデータの採取を可能とした．

② トンネル工事は種々の状況下で施工されており，発破・重機等によるターゲットの破損，吹付コンクリートの粉塵・重機の排気ガス等によるターゲットの汚れ等が避けられない障害となる．また，湧水の多いトンネルではターゲットの劣化が著しい．これらの問題は着脱可能

なターゲットを開発し，定期的な清掃等のメンテナンスを行うことによりこの問題を解決した．

③　坑内が暗く，ターゲットを探しにくいという問題については，反射シートの反射性を利用して高性能ハロゲン懐中電灯を計測器に取り付け可能な構造にすることにより，ハンドリングを悪くすることなく解決している．

④　上記③とも関連するが，一般に暗いトンネル坑内ではシートの大きさが大きいほどターゲットを探し易く測定可能距離も長いため，大きなシートを開発し，また，それがどのような場所であれ取り付けやすい構造にした．

⑤　坑内で機械十字線がはっきり見えないという不具合があったが，これについては③でも述べたように，高性能ハロゲン懐中電灯を計測器に取り付けることによって改善されている．

⑥　トンネルは延長が長く見通しが悪いので，測定がターゲットを挟んで行われることが多く，その場合ターゲットを反転して測定しなければならない．当初ターゲットの反転誤差が大きく問題が生じたが，反転精度が高いターゲットを開発することによって解決できた．反転誤差の確認は，最初にターゲットを視準したあとターゲットを水平・鉛直の両軸に対して各180°回転させて，同じ面をもう一度視準して確認するが，その誤差は旧ターゲットで0.3 mm，新ターゲットで0.1 mmであった．

⑦　基準点は通路路盤に設置されているので，基準点を測定する際には通常のターゲットが据え付けられず測定が困難であった．しかし，1本のポールに2枚の反射シートが取り付けられ，直接視準できないポイントが測定できる「2点ターゲット」の使用や，基準点自体を覆工コンクリートの側壁部に移行する方法等を開発することにより解決した．

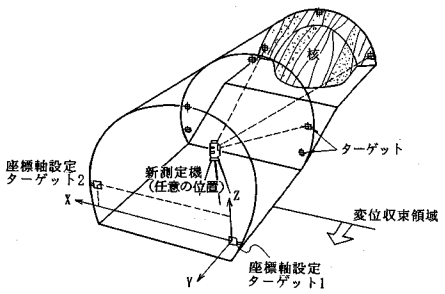
その他にも，初期コストの問題や，視準距離により精度が変化する問題等があるが，実現場で何件か使用した経験では，余り大きな支障とはなっていない．

5.　トンネル計測への適用

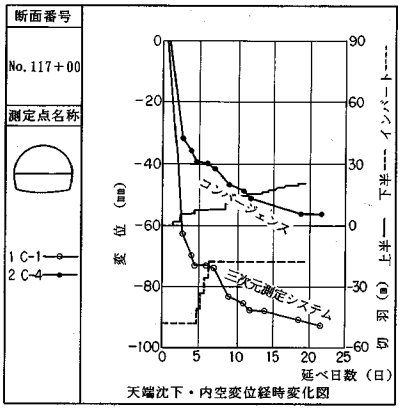
（1）　日常計測への適用

実証実験を実施したAトンネル工事は2車線道路トンネルであり，高規格道路であるにもかかわらず，曲率半径が小さく，視距確保のために拡幅を要する断面（掘削断面積125 m²）が426 m続いている（通常区間の掘削断面積100 m²）．当トンネルの地質は，中世代に堆積した砂岩・頁岩が主体であるが，造山活動の結果生じたと思われる断層が縦横に走り，岩盤亀裂が発達しているうえ，広範囲にわたる断層破砕帯も存在しており差別破砕を受けた頁岩は粘性化・土砂化が進行し，トンネル湧水に伴うぜい弱化が見られる．このため本トンネルは掘削面積が大きい上に，切羽の自立性が低いので，先受け工・排水工等の補助工法を併用してNATMリングカット工法で施工している．当工事は，昼夜を通して24時間体制で作業が行われているため切羽近傍でタイムリーに計測を行うことが困難であり，採取されるデータは測定開始時期のバラツキ等により，あいまいなものになりやすく，いかに早く初期変位量を取得するか，いかに切羽状況の変化に遅れないかが大きな問題になっていた工事であった．

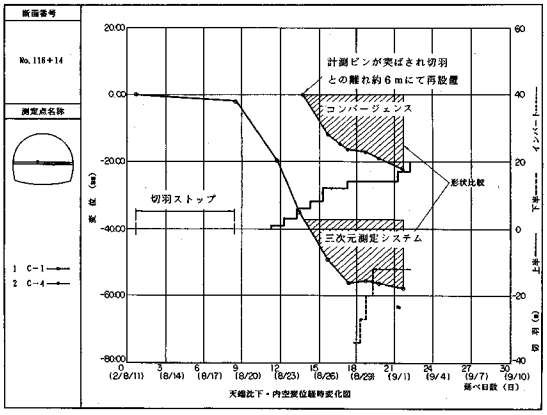
図—14に本測定機による計測の概念図示す．図—15



図—14　新測定機による計測の概念図



図—15　従来手法と本測定方法の経時変化の比較



図—16　計測ピン再設置時の経時変化の比較

は上部半断面部の水平測線における経時変化の一例であるが，従来計測手法と本測定手法との測定値の比較を行うために，同一地点を両手法で計測した例である．これによると，コンバージェンスメジャーによる測定開始時期が，新三次元トンネル計測システムを利用したものに比べて核が支障となり2m遅れ（切羽から2.5m遅れ）た測定となり，その結果収束した変位に大きな違いが出ていることが明らかである．図より両者とも同形の経時変化曲線を描いていることから，初期変位の把握に大きな差があること，内空変位挙動を同程度の精度で把握していることがそれぞれ確認された．また，従来の方法では計測開始時期の遅れから，変位量・変位速度が相当小さく測定されていたことが確認された．図—16は従来の計測ピンが施工機械によってとばされたため，切羽から6m程度離れて再設置した場合の計測例であるが，この例によって内空変位挙動を同程度の精度で把握していることが確認された．このように計測ピンが施工中にとばされることはよくあり，従来の方法ではあくまで相対的な値しか求まらず，計測開始時からの総変位量は分からないが，本測定法の場合絶対値が得られるため，途中でシートがとばされた場合でも計測上の問題が小さい．

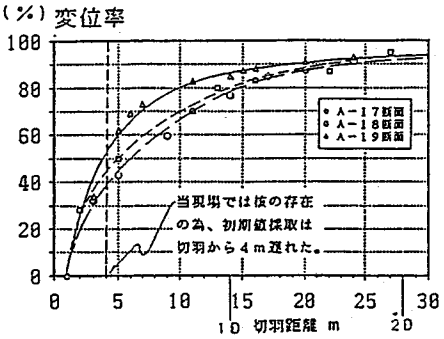
上でも述べたようにトンネル用の測点の特徴として，発破作業があったり大型施工機械が狭い空間内で稼働しているので，従来の計測手法においても測点の破損が大きな問題とされていた．そこで本システムでは着脱式のターゲットを標準装備し，破損の恐れのある距離内のターゲットは施工時には外しておき，測定時に取り付けることにより確実なデータの採取が可能となった．

（2） データの利用

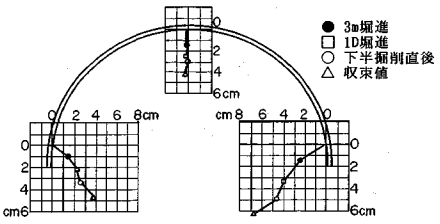
本システムの導入により，内空変位測定・天端沈下測定・脚部沈下測定の管理基準値を決定したり，初期変位速度をもとにした補強工の要否・支保の変更等の施工管理を行うことが可能になった．また，機動性の高い計測，すなわちより早い初期データの採取，計測頻度の増加，計測間隔の短縮等の向上が可能となった．

図—17は，本システムを用いて上部半断面部水平測線の変位測定データをもとに，上部半断面掘削前後の収束を1としたときの切羽進行と変位率の関係を表わしたものである．変位が大きくなり特に計測管理が重要となるリングカット工法等で，切羽から遅れて（4m程度）初期値の測定を行わざるを得ないときには，この図から絶対変位量，変位速度が相当小さく測定されると推測されるので，内空変位等の初期変位速度等の管理基準値については，見直す必要が出てくると思われる．

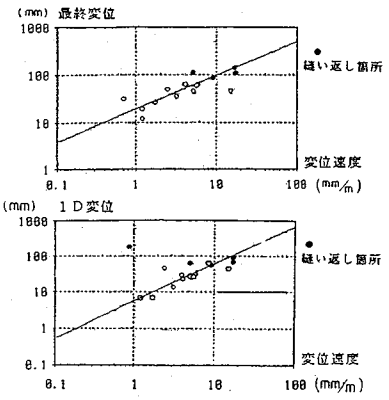
図—18に絶対変位計測による変位ベクトルを示す．各測点の経時変化変位ベクトルをとることにより，切羽観察データと合わせて荷重方向，支保周辺地山の動きを



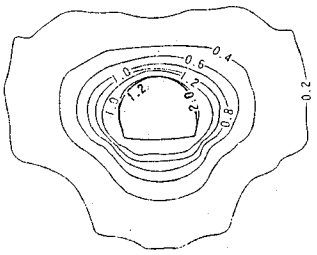
図—17 切羽進行と変位率の関係



図—18 絶対変位計測による変位ベクトル



図—19 初期変位速度，最終変位量・1D変位量の関係図



図—20 圧縮ひずみ分布出力例

予想し，トンネルの変状が支保工の座屈等に起因するものか，地耐力不足による沈下に起因するものか，もしくは，偏圧に起因するものかが明確に判断できるので，それぞれの現象に応じて適確な対策の実施が可能となる．従来，脚部沈下は測定が困難であることから余り測られ

ておらず，内空変位についても相対値でしかないため左右どちらの変位が大きいかが判定できないことがしばしばあったものと思われる．

図—19に初期変位速度，最終変位量・1D変位量の関係図をそれぞれ示す．初期変位速度と最終変位量・1D変位量との間にはそれぞれ高い相関があることが認められる[5]．本計測システムでは早期から計測が可能であるから本計測結果をもとに極めて早い段階から（切羽から，3.4 m遅れ），トンネルの安定性評価を行う管理等が可能になると思われる．図中の黒点が実際に変状が大きく縫い返しが必要となった地点であり，初期変位速度との高い相関が確認できる．従来はこのように構造物が建築限界を侵し，縫い返しが必要となるほど変状が大きくなるまで対策が打てなかったのが現状であったが，切羽が10 m程度進行した時点に少ない手間で対策が可能となる．

（3） データの処理・解析

本測定機の一部であるデータレコーダ内に記録されている計測情報を，専用ケーブルを介することによってコンピュータに取り込み，逆解析を行った一例を図—20に示す．図では圧縮ひずみの分布を出力例としている．解析システム，プログラムについては今日多くの発表例があり，本システムとの結合において測定データをもとにした変位予測さらには逆解析など安全管理上有用な情報が速やかに得られるものと考えられる．

6. まとめ

本研究は新しく開発された三次元光波測定機の原理・精度を報告するとともに，トンネルA計測にこれを用いる場合のシステムの有用性を述べたものである．

本研究で得られた結論は以下の通りである．

① 2段階の変調光の位相ずれを計測することにより，0.1 mmの分解能を期待できる光波測距機を開発した．

② 同機の精度は明りの検証では検証項目について最大1 mm以下であった．

③ 計測条件の著しく劣るトンネル内の計測において，計測値の標準偏差は0.3～0.5 mm程度であった．この精度は従来のコンバージェンスメジャー・レベルを用いた場合の精度と比べてむしろ良好といえる．

④ 本測定機の設置・計測機は，はなはだ容易であり，また非接触型の計測法であるためリングカット工法でも早期の計測が可能であるといえる．そのため切羽離れの小さい段階からの計測が可能となり安全管理上有用なデータの取得が期待できる．

⑤ データ採取時期の統一が可能となるので，測定開始時期のずれが少なくなり測定値の比較が容易である．

⑥ 脚部沈下を測ることにより側壁部の変位が絶対値で測定できるので，従来不可能あるいは困難であった変位量のベクトル表示が可能となった．

⑦ メンテナンス等を除いて高所作業車を必要としないため，計測のために坑内作業を中断しない．

⑧ 重機から離れたところで計測ができ安全である．

⑨ 本測定機では計測結果が絶対値で得られるため，施工途中でシートなどがはがれた場合でも継続してデータ収集が可能である．

なお，本計測機の実施面における個々の精度向上，あるいは取扱い上の工夫については各現場で種々の試みがなされているようであり，今後ますますの発展が期待される．

参考文献

1) 鎌田深己・福田博之・鍛治茂仁・高橋祐治：山岳トンネル用計測管理システム，第2回建設ロボットシンポジウム論文集，pp. 205～212，1991年7月．
2) 鈴木昌次・古川浩司・井上洋司・中川浩二：NATM施工実績に基づく事前設計の評価に関する一考察，土木学会論文集，第427号，VI-14，pp. 261～270，1991年3月．
3) 稲田清夫：近赤外光を利用した非接触3次元計測システム，応用機械工学，pp. 122～127，1991年3月．
4) 桜井春輔・岡野兼夫・清水則一・北村 元：トータルステーションを用いた地盤変位計測手法の開発，建設工学研究所報告第32号，pp. 1～20，1990年11月．
5) 吉川恵也：NATM計測実績の統計分析，土木学会，第15回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，pp. 220～224，1983年．

（1993. 6. 15受付）

DEVELOPMENT OF NEW THREE-DIMENSIONAL MEASURING AND ANALYSIS SYSTEM FOR TUNNELING

Shigehito KAJI, Masayoshi TANAKA, Kohei FURUKAWA and Koji NAKAGAWA

For the safe and economical construction of tunnels in the extremely complex and diverse geological conditions which prevail in Japan, it is essential to perform in the construction stage detailed and rational observation, measurement and analysis of ground behavior, and reflect the results back into design and construction. The New Three-Dimensional Measuring and Analysis System for Tunneling was developed as a system to perform this "data based construction execution" satisfactorily. This system is composed of two subsystems ; a three-dimensional measurement instrument to collect measurement data accurately and swiftly, and a data processing system to analyses this data so that it can be utilized effectively.

地盤の有限要素法解析ソフト

3月リリース開始

未来設計企業 CRC

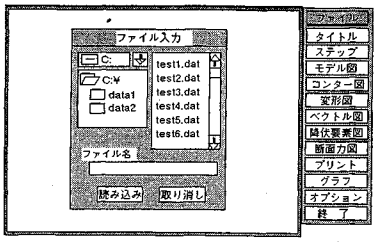
世界標準のソフトウェア

Mr.SOIL Ver.3.0 WINDOWS 版

Mr. SOILの新バージョン (Ver.3.0) はWindows※で稼働する強力なシステムに生まれ変わり大モデルも扱えるようになりました。
また、マウスを使ったメニュー形式の導入、画面上での出力が可能になるなどの新機能により、すぐれた操作性をもたらします。

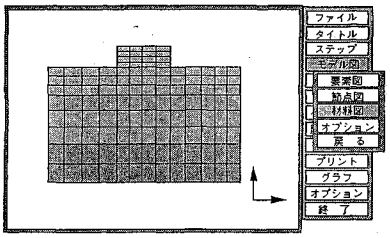
※Windowsは、米国マイクロソフト社の登録商標です。

バージョンアップ項目



入力部

- モデル作成のためのメッシュジェネレート機能。
- モデル図を参照しながら荷重条件、境界条件、材質条件、はり、棒要素のデータを**メニュー画面**のテーブルにより入力することが可能。

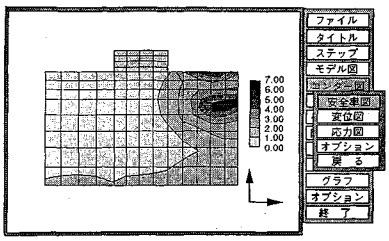


ソルバー部

- 強制変位。
- 解析途中の材質の変更。(薬注施工のモデル化)
- **節点数制限のUP。(約3000節点が可能)**

出力部

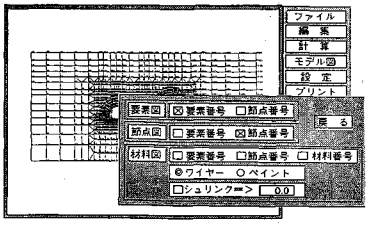
- 線画だけでなく画面塗りつぶし処理が可能。
- **マウス入力とメニュー型式**による操作性の大幅な向上。

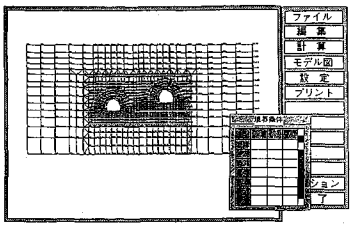


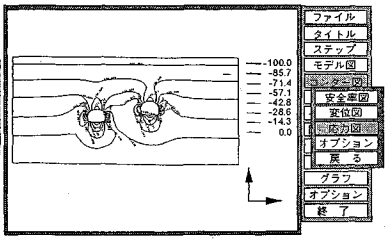
動作環境

CPU 80386 以上 (推奨 80486 以上)
Windows 3.1 以上
メモリ 640Kbyte + 7Mbyte (プロテクトメモリー)
ハードディスク 10Mbyte以上

以上のメモリーは今後、改良により小さくなる場合もあります。







製品版は、一部異なる場合があります。

株式会社CRC総合研究所 西日本支社

大阪市中央区久太郎町4丁目1-3
(06)241-4121 担当／村中 一意

自動車交通問題解析ソフト

TRシリーズ

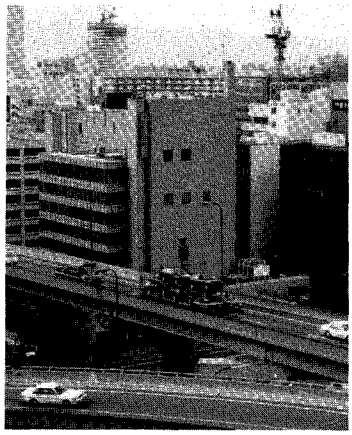
未来設計企業
CRC

自動車騒音解析システム
TRNOISE

パソコン用に開発された自動車騒音解析システムです。道路に直角な断面における騒音レベルの中央値を予測します。計算方法は、日本音響学会式によるもので、1970年の提案以来、最も広く利用されている方法です。

操作は、画面に表示されるメニューを選択し、指定されたデータを入力しますので、特にコンピュータに関する知識を必要としません。

計算結果は、プリンタ及びフロッピーディスクに出力され、断面等騒音線図、距離減衰曲線を描くことが出来ます。　計算点は、格子点、環境基準評価高さ点、任意点の3方式による選択ができます。



自動車排ガス解析システム
TRGAS

パソコン用に開発された自動車排ガス解析システムです。道路に直角な断面における一酸化炭素（CO）・窒素酸化物（NO_x）の濃度（ppb）を予測します。計算方法は、建設省提案モデルです。

操作は、画面に表示されるメニューを選択し、指示に従ってデータを入力します。特に、コンピュータに関する知識は必要としません。

結果は、プリンタ及びフロッピーディスクに出力され、距離減衰曲線を描くことができます。　計算予測点は、任意に10点まで設定できます。

自動車振動解析システム
TRVIB

パソコン用に開発された自動車振動解析システムです。道路に直角な断面における振動レベルの80%レンジの上端値を予測します。計算方法は、建設省提案モデルです。

操作は、画面に表示されるメニューを選択し、指示に従ってデータを入力します。特に、コンピュータに関する知識は必要としません。

結果は、プリンタ及びフロッピーディスクに出力され、距離減衰曲線を描くことができます。　計算予測点は、任意に10点まで設定できます。

□お問い合わせ先

「TRシリーズ」機能アップ
新バージョン1.5を
好評出荷中

株式会社CRC総合研究所
西日本支社　総合研究部

担当：薮内・中川

〒541 大阪市中央区久太郎町4－1－3　伊藤忠ビル　☎06-241-4126
本社／〒103 東京都中央区日本橋本町3-6-2 小津本館ビル　☎03-3665-9711(案内)

地球を切る!視る!創る!

未来設計企業
CRC

3次元地質解析システム

GEORAMA

ジオラマ

概　要

地質調査で得られたデータを基に、利用者の判断を加味して3次元地質モデルを作成します。この3次元モデルより地質・岩級区分・地下水位等をグラフィック表示並びに作画します。今後この3次元モデルを利用して解析用メッシュ作成等への応用が考えられます。

特　徴

- 走向・傾斜データも考慮できる高度な推定法
- 複雑な地質体モデルの表現が可能
- ビジュアルで豊富な出力機能
- 図面間での整合性がとれる
- 操作性の高いシステム

出力図面

地形図	任意	平面図
地質図	任意	鉛直断面図
岩級区分図	任意	水平断面図
入力位置図	組合せ	任意断面図
ボーリング柱状図	組合せ	パネル図
地下水位図	組合せ	ブロック図

ユーザーインターフェースにより、拡がる適用分野

データベース　　土量計算　　構造物マッピング

メッシュジェネレータ　　プレゼンテーション資料　　その他

標準適応機種(EWS)

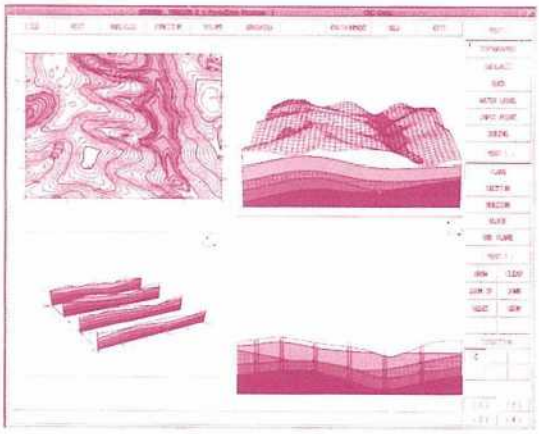
- SONY-NEWSシリーズ*
- Sun-3,Sun4,Sun-SPARCシリーズ*
- HP9000／300,HP9000／800シリーズ*

*ウィンドウシステムとしてX-Windou System,Version 11(X11)が必要です。
(標準以外のものにつきましても御相談に応じます)

GEORAMA Ver.4.0 リリース開始

㈱アイ・エヌ・エー	㈱情報数理研究所	東電設計㈱
アイサワ工業㈱	㈱新日本技術コンサルタント	東電ソフトウェア㈱
アイドールエンジニヤリング㈱	住鉱コンサルタント㈱	東洋地質調査㈱
アサヒ地水探査㈱	住友建設㈱	動力炉・核燃料開発事業団
㈱エイトコンサルタント	石油資源開発㈱	㈱中堀ソイルコ
応用地質㈱	全日本コンサルタント㈱	西松
大阪ガス㈱	大成建設㈱	
大手開発㈱	大豊建設㈱	土開発㈱
㈱大林組	㈱ダ	㈱日本パブリック
㈱奥村組		エンジニアリング
川崎地質㈱	工務店	㈱間組
基礎地	中央開発㈱	㈱阪神コンサルタンツ
	㈱地球科学総合研究所	ヒロセ㈱
	中電技術コンサルタント㈱	フジタ工業㈱
建設省　土木研究所	通産省　地質調査所	㈱富士和ボーリング
五洋建設㈱	電源開発㈱	北光ジオリサーチ㈱
佐藤工業㈱	㈱電力中央研究所	北海道開発コンサルタント㈱
サンコーコンサルタント㈱	東急建設㈱	三井建設㈱
㈱四国総合研究所	東建地質調査㈱	三菱金属㈱
㈱四電技術コンサルタント	東京電力㈱	村本建設㈱
清水建設㈱		明治コンサルタント㈱

3次元地質解析システム研究会　参加メンバー



株式会社CRC総合研究所 西日本支社

〒541 大阪市中央区久太郎町4丁目1-3
(06) 241-4121 営業担当:岩崎
(03)3665-9741 本社窓口:菅原

土木学会論文集

昭和三十七年五月二十八日　第三種郵便物認可
平成六年三月十五日・印刷
平成六年三月二十日・発行
土木学会論文集(毎月一回二十日・二十一日発行)

定価=1000円(本体価格・九七一円)