

精密写真測量を用いた 構造物モニタリングシステムの研究

(株) アーステック東洋 中井卓巳^{*1}
 (株) アーステック東洋 龍 明治^{*1}
 京都大学大学院工学研究科 大西有三^{*2}
 京都大学大学院工学研究科 大津宏康^{*2}
 京都大学大学院工学研究科 西山 哲^{*2}
 国土交通省近畿地方整備局 東川直正^{*3}
 国土交通省近畿地方整備局 石田秀成^{*3}
 国土交通省近畿地方整備局 廣田光秀^{*3}
 (財) 道路保全技術センター 宮本 毅^{*4}

By Takumi NAKAI, Meiji RYU, Yuzo OHNISHI, Hiroyasu OHTSU, Satoshi NISHIYAMA, Naomasa TOGAWA, Hidenari ISHIDA, Mitsuhide HIROTA, Tsuyoshi MIYAMOTO

昨今では土木構造物の建設・維持・補修・更新を含めて、その費用・便益を総合的に評価する方法論として、土木構造物のインフラ資産評価・管理という概念が注目されるようになってきた。成熟型社会における道路構造物の維持・補修・更新の最適化という課題に対処するためには、その資産の評価・管理という概念を導入することが必要になる。このような概念を導入する基礎として、構造物の性能や機能水準を的確に把握するいわゆるモニタリング手法の開発が不可欠な要素となる。この効率的なモニタリング技術として様々な手法が挙げられるが、この中で本研究は、精密写真測量手法を取り上げ、その構造物の維持点検手法への適用性について論じた。具体的にその適用性を示すため、供用中のトンネルにおいて、実証実験を行い、精密写真測量の土木構造物（トンネル）への適用性を確認した結果についても述べる。

【キーワード】モニタリング、維持点検、精密写真測量、トンネル

1. 序 論

バブル崩壊後の経済不況に加えて、今後の少子高齢化社会の到来に伴う税収不足が想定される厳しい社会情勢の下では、道路に代表されるインフラ構造物整備の Paradigm は、従来の「潤沢な予算の下で足らざるものを建

設すること」から、「限られた予算の中で質の高いインフラストラクチャ（以下インフラと称する）構造物を創造（Create）・保生（Sustain）すること」へと変貌を遂げることが必要となる。このような社会情勢の下で、昨今では土木構造物の建設・維持・補修・更新を含めて、その費用・便益を総合的に評価する方法論として、土木構造物のインフラ資産評価・管理という概念が注目されるようになってきた。

従来、道路構造物の維持・補修・更新という問題は、防災という観点から検討されてきた。もちろん、この防災という観点からの議論は今後とも不可欠であるが、

*1 本社 075-575-2233
 *2 都市環境工学 075-753-5129
 *3 京都国道事務所 075-351-3300
 *4 関西支部 06-6944-9831

成熟型社会における道路構造物の維持・補修・更新の最適化という課題に対処するためには、その資産の評価・管理という概念を導入することが必要になる。

このような概念は、アセットマネジメント¹⁾と呼ばれ議論が活発になりつつある。基本概念は、筆者らの解釈では、以下の3つのサブシステムを構築し、それらを有効に結合・運用することであると考えられる。

- 1) 資産会計システム
- 2) 構造物（資産）マネジメントシステム
- 3) 点検・修繕システム

この内、2)の資産マネジメントシステムに着目する同システム構築するため、次に示す事項について総合的に検討することが必要となる。

- ①構造物の性能、機能水準の現在状態の規定
- ②劣化あるいはハザードの到来に対する将来の状態の予測
- ③構造物の性能や機能水準のモニタリング
- ④費用対効果の評価を含めた、適切な箇所およびタイミングでの維持・補修・更新のルール化

本研究では、③に掲げる構造物の性能や機能水準のモニタリングのための手法として、デジタル画像を利用した計測手法の開発とその適用例を通して構造物の維持点検手法を高度化する具体的事例について示す。

2. 構造物モニタリング手法の開発

(1) モニタリング手法の概要

本研究はデジタルカメラで構造物を撮影した画像から、当該構造物の3次元変位を計測する精密写真測量技術²⁾³⁾を、構造物の性能や機能水準のモニタリングのための手法として適用することを試みる。

本研究で検討するモニタリング手法は、対象物を複数枚の画像に撮影し、この画像からカメラの位置や角度をコンピュータ上で復元し、さらにその復元された撮影状態を利用して、光線の交点から構造物上の計測点の3次元座標を算出する技術を応用したものである。通常の写真測量とは異なり、計測点をいろいろな撮影位置から多数枚の画像に撮影して高精度で座標値を算出するところに特徴があり、精密写真測量と称されている。

精密写真測量手法は、多数の計測点を写真撮影という簡便な計測作業で計測できる手法であり、本研究に

おいては、近年低コスト化と高画素化の進展が著しいデジタルカメラを使った計測を試み、リアルタイム計測という付加価値を加える。そのために試行した手法は、セルフキャリブレーション付きバンドル調整法というもので、これによって計測用ではない市販のデジタルカメラの使用が可能になり、モニタリングシステムの低コストを実現する。本手法をインフラ構造物、例えばトンネルの変状または変位計測に適用することにより、供用中の交通に影響を与えることのないモニタリングが可能となる。計測精度は撮影条件にも依存するが、300万画素クラスのデジタルカメラを用いて、撮影距離20mでトンネルを撮影した場合±1mm程度である⁴⁾。

一般に測量においては、座標軸を決定するために基準となる点（以下基準点と称する）を設ける必要があり、この基準点の精度に計測精度が大きく影響される。しかしながら、トンネル内には高精度で基準点を設置することが困難であり、また基準点を設けたとしても常に当該基準点を視準しなければならず、トンネルのような軸方向に長い構造をしている物をその方向に連続的に測量する際には、測量という計測自体に労力を要することになる。そこで、本研究では、基準点無しの計測が可能となる精密写真測量の理論の構築を試みた。これにより、トンネルの変状あるいは変位の計測が、軸方向に連続的に写真撮影するという作業で容易に実施することが可能となり、構造物のマネジメントシステムに対して最適なモニタリングシステムとすることが可能になった。

(2) デジタル精密写真測量の原理

撮影されたターゲットは、一つの撮影画像中に複数個写し込まれているとする。写真撮影によってターゲットPが画像上に点pとして撮影される。これらの点とカメラのレンズ中心が一直線上にあるという共線条件によって式(1)のような観測方程式が導かれる。

$$\begin{aligned}x + \Delta x &= -c \frac{a_{11}(X - X_0) + a_{12}(Y - Y_0) + a_{13}(Z - Z_0)}{a_{31}(X - X_0) + a_{32}(Y - Y_0) + a_{33}(Z - Z_0)} \\y + \Delta y &= -c \frac{a_{21}(X - X_0) + a_{22}(Y - Y_0) + a_{23}(Z - Z_0)}{a_{31}(X - X_0) + a_{32}(Y - Y_0) + a_{33}(Z - Z_0)}\end{aligned}\quad (1)$$

観測方程式における変数が表現するものを図-1に示す。ただし、cは画面距離であり、 Δx と Δy はレンズ歪み補正項である。また、aは撮影時のカメラの対象空間座標系に対する座標回転要素を表現している。

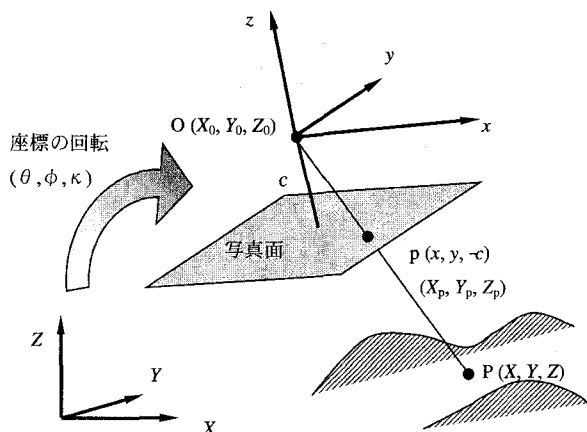


図-1 共線条件

写真計測では、観測方程式における未知数を次のように分類する。

・外部標定要素： (X_0, Y_0, Z_0) 及び a

撮影したカメラの位置（ただし対象空間座標系でのレンズ中心の座標）と撮影方向（カメラの回転角）

・レンズ歪み補正項： $\Delta x, \Delta y$

半径方向歪みと周方向歪み等からなる。

レンズ中心からCCDまでの距離 c （画面距離）、レンズ中心からCCD面へ下ろした垂線の座標（主点位置）およびレンズ歪みを表すパラメーターが決定できると歪みを含む画像を補訂できるので、これらを内部標定要素と称する。

・計測点の対象空間座標での座標値： X, Y, Z

上記未知数を同時に求めるバンドル調整法で解析する。外部標定要素も未知数として計測点の座標値と共に算出するということは、写真撮影時にカメラの位置と角度は未知数のままでよく、任意の位置と角度でフリーハンド撮影できることを意味する。さらに、レンズ歪みなどの値も未知数のままでよく、何ら計測用に較正されていない市販のデジタルカメラでも利用できることを意味する。このようにカメラの内部構造に起因する未知数をも同時に求める手法をセルフキャリブレーションと称する。本研究は、このセルフキャリブレーション法を適用することで、システムに要するコスト、特にカメラに要するコストの低減を図ることにした。

(3) 撮影と解析

現場での撮影から解析に至る過程を説明する。

a) 反射ターゲットの設置と撮影

反射ターゲットを対象区間に設置し撮影する。デジタル精密写真計測法では撮影者の位置は測量などで決める必要が無く、自由に撮影してもよい。これは、撮影点として定点を求める必要がないことを意味し、手軽にスピーディにデータを取得できる。ただし解析手法は、(1)式において左辺の計測点の画像上での2次元座標値から右辺の各未知数を求めるものであるため、この2次元座標値の計測が各未知数の計測精度に影響する。そこで、本手法では当2次元座標値を精度良く計測するために、計測点に反射ターゲットと称する標点を設置する。

b) 画像処理

現場で取得した画像をパソコンに取り込み、各画像の反射ターゲットの座標を計測する作業をまず行うのであるが、ここでは反射ターゲットの重心位置を画像処理によって求めることにより、1/10から1/20画素の精度で当2次元座標を計測する。また、この段階で各反射ターゲットに番号を割り当て、各計測点がどの画像のその位置に撮影されているのかの認識が行われる。

c) 計測点の3次元座標の算出

共線条件式の解法について述べる。まず、未知数と観測地の関係が1次でないので、初期値の周りでテラー展開して線形化する。一般に観測値を L として、そこに含まれる誤差を V 、未知数を X とすると

$$V = A * X - L \quad (2)$$

と表現できる。ここで、 L は観測値ベクトル、 V は誤差ベクトル、 X は未知数ベクトル、そして A は係数行列であり、式(2)は観測方程式と呼ばれる。未知数を初期値とその補正量とに分解して線形化し、それを整理すると、計測値である反射ターゲットの2次元座標に含まれる誤差ベクトル V 、未知数の補正量からなる X ベクトル、および計測値と共線条件式による理論値の差の残存量ベクトル L を用いて再度式(2)を表し、式(3)のように誤差を最小にする最小二乗条件を考慮する。

$$V^T V \rightarrow \min \text{ より } (A^T A)X = A^T L \quad (3)$$

(3)式によって導かれた式は正規方程式と称される。この正規方程式は線形化されているので、連立一次方程式の構造となり、それを解けばよいことになる。ただし、この方程式を解くにあたり、座標軸を決定しなければ計測点の対象空間座標の3次元座標を算出する

ことができない。正規方程式を解く際に座標軸が決定されていないということは、図形を構成する十分な観測値が無いことに相当する。しかしながら、前述のようにトンネルにおける変位計測においては正確に計測された基準点を設定することが困難となる。

一般に式(3)を $N \times X = D$ のように表現すると、両辺に左から逆行列を掛けることで $X = N^{-1} \times D$ として解が求められるが、基準点無しの計測では、この N に逆行列が存在しないことになる。これは、行列 N におけるrank欠損として現れるが、これを補うために式(4)の制約条件を設ける。これは、式(3)式を満たすと推定される未知数の中で、その分散の最小のものを得るという制約条件のもとで式を解くことに等しい。

$$X^T X \rightarrow \min \quad (4)$$

この条件を付加した場合、幾何学的には各計測点の重心を固定して計測点の座標値を計算することになる。ノルム最小解とも呼ばれるこの制約条件と、最小二乗条件を組み合わせることで、基準点が無くても未知数を求めることが可能になる。

3. トンネルへの適用事例

(1) 概 要

老ノ坂トンネルにおいて、精密写真計測が、道路トンネルの断面形状変化を長期的に、より効率的な計測及び作業中の交通規制に伴う渋滞による社会損失の低減効果が期待できる適用性を持つことが実証された。

デジタル精密写真測量は、計測の簡易さ、撮影位置の自由度、測定機器のコストが安く短時間で多点の精密な3次元座標を得ることが出来るなどの多くの利点を持っており、供用中のトンネルにおいても交通規制をせずにできる計測手法として優れていると考えられており、供用中の老ノ坂トンネルにおいて、設置性、簡便性、精度などを実証することができた。

本研究では、トンネルの継続的な供用に伴う反射ターゲットの劣化影響などの中期的な適用性の検討、撮影枚数と精度の関係など合理化の検討及び低速移動車からの写真撮影の可能性などの高度化に対する検討を行う目的で実施した。また、機能水準を把握するための計測結果の表示方法についても検討した。

図-2に計測のフローチャートを示す。

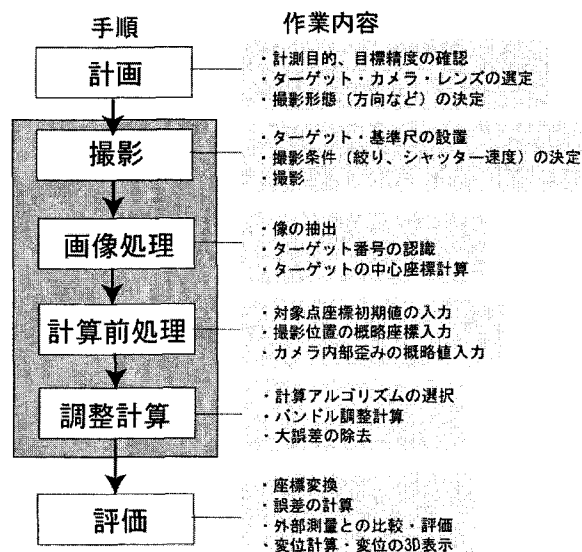


図-2 計測のフローチャート

(2) 計測区間の設定

計測区間は図-3に示すように、トンネルの一部の30m区間である。

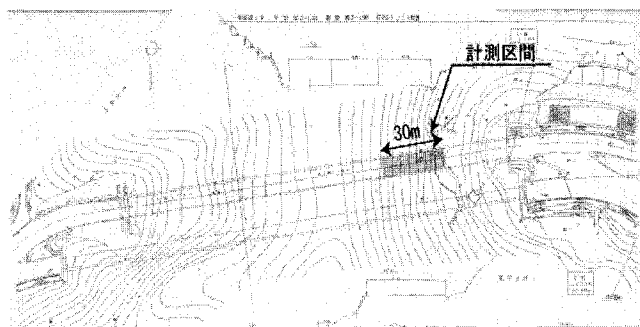


図-3 計 測 区 間

老ノ坂トンネルは、昭和41年(1966年)に竣工した延長189.2m、道路幅員6.00mのトンネルである。過去に、時期は不明であるが、漏水防止工事が行われている。

また、平成11年6月29日の豪雨でトンネル内への噴水及び流水が発生し、交通への支障を与えた記録がある。この漏水問題を契機に、同年6月～11月に覆工の観察と地下レーダーによる探査が実施されている。

平成12年3月には、近接目視観察と打音調査が実施された。

その結果、対策が必要な部分には、炭素繊維による補強対策が実施された。

補強区間以外は、定期点検での対応で十分とされて

いる。このため、計測は炭素繊維などの補強対策が施されていない点検監視区間に含まれる終点側の156～172m区間を選んだ。

(3) 計 測

a) 反射ターゲットの設置

- ・ターゲットは、 $\phi 30\text{mm}$ の反射ターゲットを使用した。
- ・ターゲットの台座は、接着性、効率性を考えて、2mm厚の亚克力板とし、接着剤により、坑壁に貼り付けた。通過する車の風圧に影響されないものとした。
- ・ターゲットは横断方向に10点として、トンネル縦断に沿って30m区間(31断面)で合計310点とした。設置区間は前節で示した区間とした。

- ・反射ターゲットを $6 \times 6\text{cm}$ の大きさ、2mm厚の亚克力板に貼り付け、それを接着剤(コニシ株式会社コンクリート・金属用ボンドK120)にて、コンクリートに貼り付けた。コンクリートはサンダーで、研磨した。

b) 撮 影

機材の選定は、カメラはNikon D1 284万画素、レンズは焦点距離18mmのものを用いた。

撮影は、ストロボ光を利用してイメージを取得(撮影)した。解析用のイメージは黒地にターゲットだけが白く撮影される。このようにコントラストを大きくすることで、ターゲットの位置読み取り精度が向上する。また、撮影方向は、監査路から、対象に向けて収束撮影を実施した。撮影枚数は、140枚とした。取得されたイメージの例を図-4に示すが、図では説明のためトンネル坑壁も認識できるように画像を調整している。

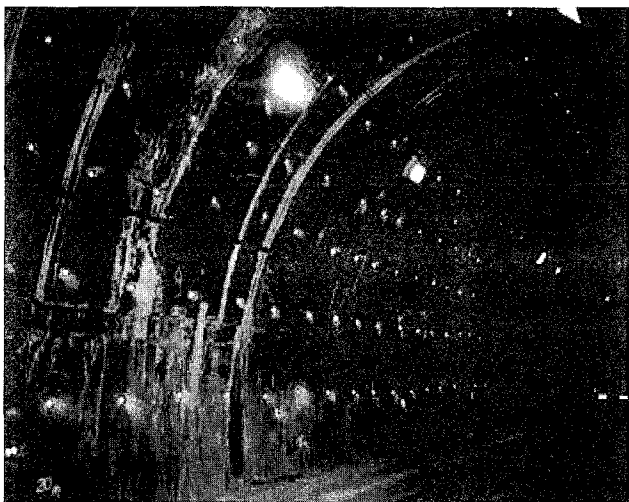


図-4 撮影画像例

現地での写真撮影は、対象物に対して各方向から撮影する。一般に、撮影対象区間が広い場合には、全体を1枚の画像におさめることができないので、対象物をオーバーラップするように写し写真を接続する。

(4) 反射ターゲットの性能劣化の評価

平成13年3月15日から平成14年2月27日までの約1年間の期間において、反射ターゲットの性能の劣化具合を解析した結果を図-5に示す。この期間中、平成13年12月4日に計測を行い、前記計測日を含めて計3回の計測結果によって経時変化を検討した。図は横軸に計測日を、縦軸に反射ターゲットの2次元座標の計測精度を示す。但し、今回使用した反射ターゲットの初期状態の2次元座標の計測精度は $1/20$ 画素($0.5\mu\text{m}$)であることが分かっているので、それに比較して何倍の精度の劣化が生じているかの値で縦軸は表現している。即ち、縦軸が2.0ならば、 $1.0\mu\text{m}$ の精度で2次元座標を読み取ったことになり、この値が大きくなるほど読み取り精度は劣化していることになる。

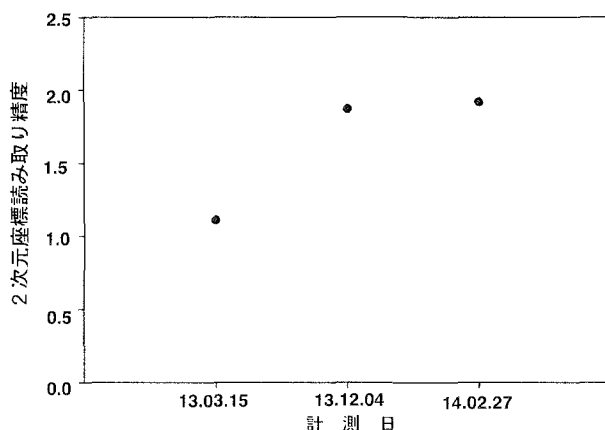


図-5 排気ガス煤煙による劣化状況の変化

図-5より、最初の計測では縦軸の値は1.0であり、ほぼ理想的な状態で反射ターゲットの2次元座標を計測することが可能であったことを示している。それに対し、縦軸は計測期間の間隔が長くなるにつれて大きくなっており、計測精度が劣化していることが分かる。これは、通行車両の煤煙による汚れが大きな原因であると考えられ、1年後にほぼ性能は半分以下に劣化している。但し、図における縦軸の値の変化を見ると、劣化状態はある一定の値に収束しつつある傾向を示している。従って、今後1年以上の中期的適用において、性能劣化は半分の状態で留まることが予想される。

(5) トンネル劣化変状のモニタリングの可能性

a) 撮影の合理化

これまでの精密写真測量は、できるだけ多くの写真を撮影し、高精度を確保する試みがなされてきた。しかしながら、トンネルの維持管理のための実用を考えると、最適な撮影枚数をあらかじめ設定することで、過度な労力を省略する必要がある。本業務はこのような事情を鑑み、要求精度を確保するための最低写真枚数をどのようにして設計できるのかを検討し、計測の現地作業の合理化の可能性を考察していくことにする。

精密写真測量においては、測定（計測）は写真撮影であり、1つの対象点は何本の光線によって解析されたことによって計測精度は決定されると考えられる。この場合、

$$\text{計測精度} \propto \sqrt{\text{写真枚数}}$$

が成立すると考えられる。実証実験データを用いて、

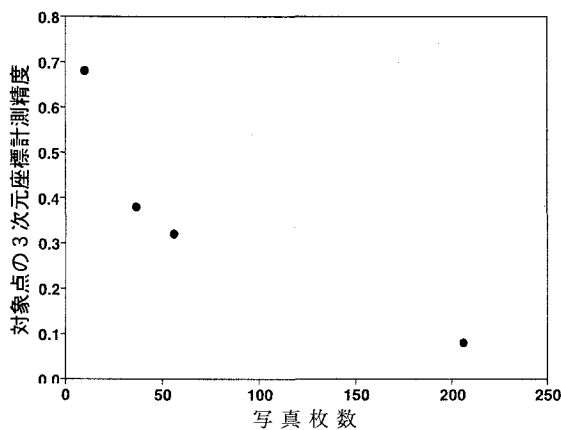


図-6 写真枚数と内的精度の関係

写真枚数と対象点の3次元計測精度の関係を求めたものが、図-6である。データは平成13年3月15日分の計測結果を用いた。

b) 変位の判定

供用中の老ノ坂トンネルに設置した反射ターゲットの1年間の計測結果の表現方法について検討した。計測は、初期値と継続として5回実施し、合計6回のデータ(変位量)をグラフ化して、トンネルの機能水準の変化を効率的に判定する可能性について検討した。今回は、各解析結果の各ターゲットの距離変化を2種類の方法でグラフ化した。

その2種類については、節を分けて述べる。

4. 内空変位の計測

内空変位を図-7のように表現することで、トンネルの長期的変位の判定を試みる。この中でも、トンネル横断の内空変位を表すグラフとトンネルの縦断方向の伸び縮みを表す2つの手法を提案した⁵⁾。

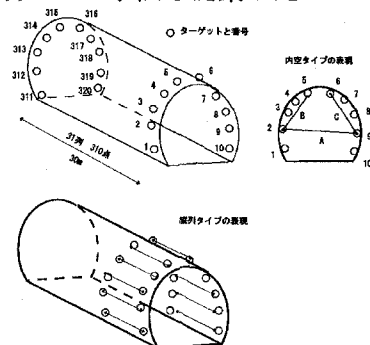


図-7 内空変位を表現する3種類の方法

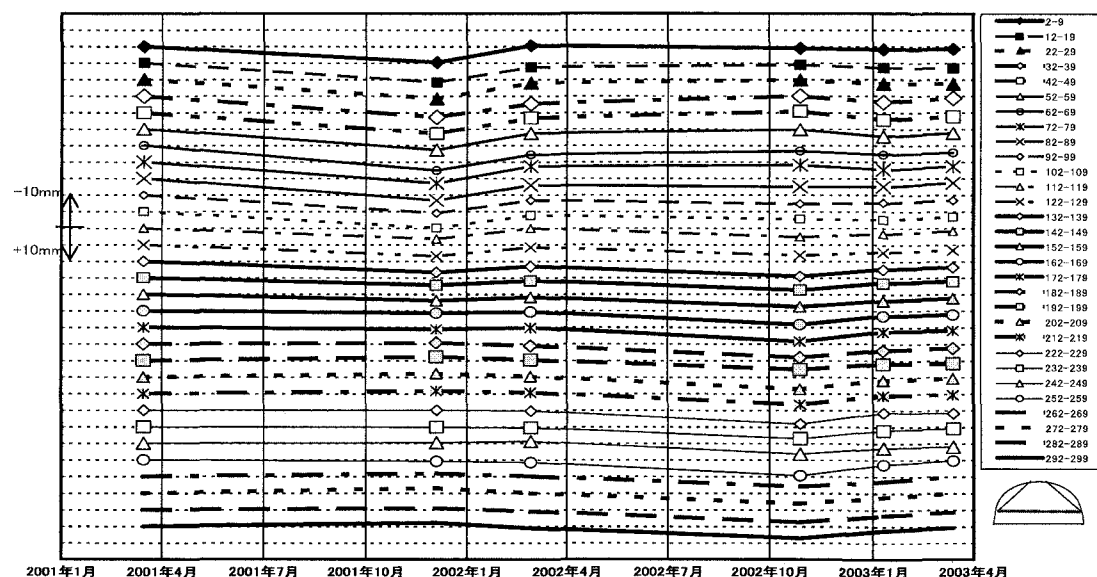


図-8 車道トンネル内空変位 (Aライン)

図-8は、図-7に示したトンネルの内空を表すAラインの距離の変化を時系列に示したものである。測定におけるデータとして、プロットは5回図示されており、計測されている横断面は合計30断面存在するため、30のグラフが示されている。

図-9は、図-7に示した縦断方向の距離の変化(トンネルの長手方向の伸縮)を表現したものであり、図は、第3列目と第8列目のターゲット群の間の伸び縮みを図化したものである。

5. 計測点の3次元変位計測結果

解析より得られた反射ターゲットの位置は3次元座標で求まるため、初期値との比較をすることが可能である。図-10に示すことができる。図中の点は初期位置を示し、点から伸びる線は変位ベクトルを示している。コンピュータ上では任意の視点から見る事ができるため、変位の方向などは理解しやすいが、図に出力すると一面からの観察になるため、やや制約が生じる。また、今回は、反射ターゲットの経時的な劣化に

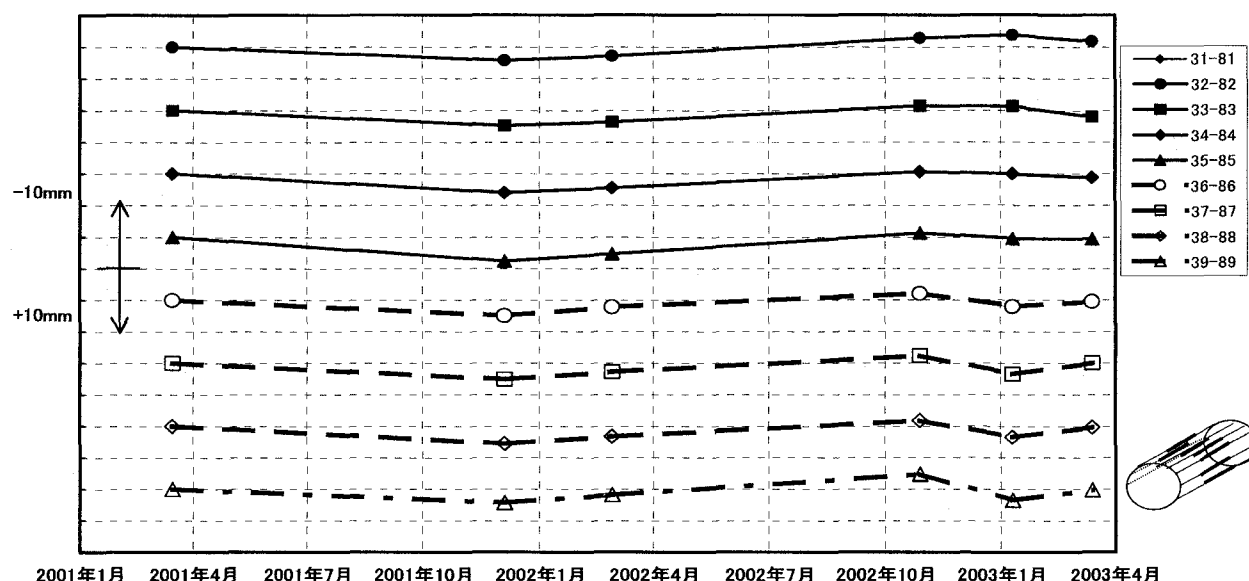


図-9 車道トンネル内空変位(軸方向 31-81)

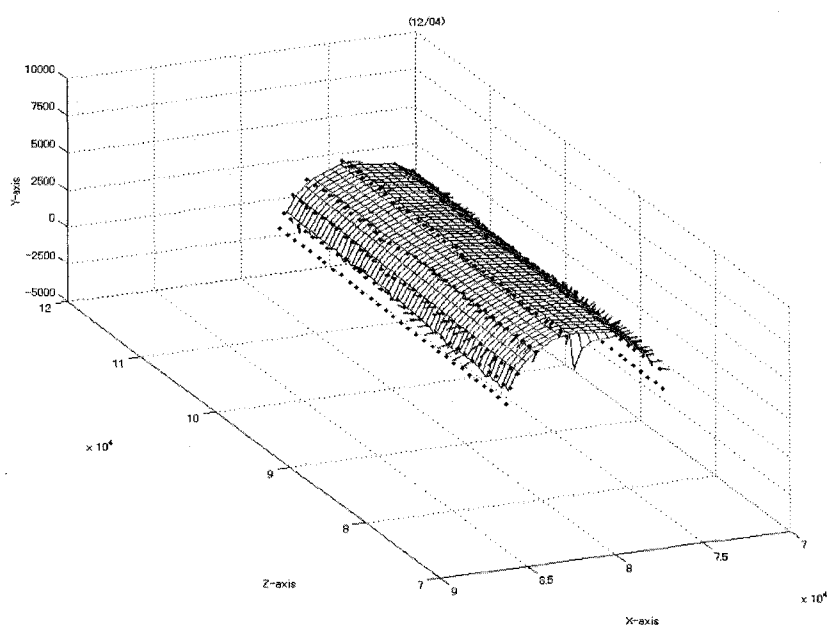


図-10 コンピュータ画面上の3次元表現

よる誤差の評価を取り入れていないため、これらの3次元変形についてはモードが正しく評価されているものの、変位量については、改良の余地がある。

6. ま と め

本研究においては、土木構造物に関するアセットマネジメントの一環としての構造物の変状あるいは劣化という挙動を的確に把握するためのモニタリング技術としての精密写真測量の適性について、実証実験の結果を示したものである。

デジタル精密写真測量は、計測の簡易さ、撮影位置の自由度、測定機器のコストが安く短時間で多点の精密な3次元座標を得ることが出来るなどの多くの利点を持っており、供用中の老ノ坂トンネルにおいて、設置性、簡便性、精度などを実証することができた。また、供用中のトンネルにおいて、実証実験を行い、供用中のトンネルにおいても交通規制をせずにできる計測手法として優れている事を確認できた。

なお、同手法は、トンネルに限定せず、道路斜面、道路橋梁の変位計測にも適用可能であり、長期に渡り供用されるインフラ構造の簡便なモニタリング手法としてシステムを開発する所存である。

参 考 文 献

- 1) 大津宏康：「建設分野におけるリスク工学の適用性とその展望」土木学会論文集，2003-03，No. 728，VI-58
- 2) Ohnishi, Y., Nishiyama, S., Nakai, T & Ryu, M.: Monitoring and Analysis of Tunnel in Discontinuous Rock Masses by using Digital Photogrammetry and Key Block Theory, Proceeding of The 5th International Conference on Analysis of Discontinuous Deformation, 2002.
- 3) 大西有三，中井卓巳，龍明治，西山哲：「トンネルの変形計測のためのデジタル写真測量法の研究」材料，第52巻第8号，p1006~p1011，2003-8.
- 4) 秋本圭一：情報化施工のためのデジタル画像計測法に関する研究，京都大学大学院土木システム工学専攻 博士論文，2002
- 5) Nakai, T., Ohnishi, Y., Ohtsu, H., Nishiyama, S. & Ryu, M.: Monitoring and Analysis of Tunnel in Discontinuous rock Masses by using Digital Photogrammetry and Key Block Theory at Houou Tunnel, EIT-Kyoto University-AIT Joint Workshop on Development of Rock Mechanics and Engineering, pp57-63, 2002.
- 6) 中井卓巳，若林良二，渡辺紀彦，大西有三：デジタル精密写真測量による岩盤斜面の動態観測，第30回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，土木学会，pp213-217，2000.

A STUDY OF MONITORING METHOD FOR TUNNEL WITH TRAFFIC USING PHOTOGRAMMETRY SYSTEM

By Takumi NAKAI, Meiji RYU, Yuzo OHNISHI, Hiroyasu OHTSU, Satoshi NISHIYAMA, Naomasa TOGAWA, Hidenari ISHIDA, Mitsuhide HIROTA, Tsuyoshi MIYAMOTO

In these days, as a method of evaluating synthetically the expense and the cost of the construction, the maintenance, repair, and renewal of an engineering-works road structure. From which the concept of assets management (infrastructure valuation of assets and management) has come to attract attention, in order to cope with a subject called optimization of the maintenance, repair, and renewal of a road engineering-works from now on.

In order to build such a system, the monitoring of the performance of a road structure and a functional level are required. The precision photogrammetry technique was used and it was shown that the efficient monitoring of a road structure is possible. Moreover, in the tunnel with traffic, the actual proof experiment was conducted and it checked actually functioning.