

トンネルの効率的な維持・管理のための変状調査・管理支援システムの開発

トンネル, 現場計測, 技術開発

(有) ジーテック
 (株) 東設土木コンサルタント
 計測検査 (株)
 山形設計 (株)

後藤 和夫
 篠原 秀明
 下澤 正道
 正会員 ○ 堀内 宏信

1. はじめに

高度成長期に建設した社会基盤の多くが急速に老朽化を迎えつつあり、これには道路、鉄道、導水路などのトンネルを代表とする地下構造物も多く含まれている。膨大な数にのぼるこれらの老朽化した地下構造物の適切な維持管理による健全性の確保と長寿命化は、今後の重要な課題の一つである。

特に山岳トンネルは地山自身による支保効果を期待している構造物であることから、周辺地盤や地下水などの影響を受け易く、一旦発生した変状を放置すると地盤の緩みを誘発し、最悪の場合構造物の変状と地盤の緩みが順次進行し、構造物の破壊や大変形へと至る。このため覆工表面に発生した変状の早期発見と早期補修が維持管理の基本となるが、一方で地中に構築された線状構造物であり延長が長大であるなどの理由から、管理が難しい構造物でもある。

これに対し、トンネルの効率的な維持管理を目的として、車載したデジタルビデオカメラによる覆工表面の展開画像を高速撮影する計測手法と、変状検出及びデータの一元管理のためのソフトウェアを組み合わせた変状調査・管理支援システムを開発したので本稿にて報告する。

2. 現状の問題と開発方針

2.1 現状の問題

トンネルの維持管理の一般的な手順を図-1 に示し、従来の手法での主な問題点を以下に整理した。

- 1) 点検・調査での目視による観察は、抽出する変状のレベル、位置と形状、抽出頻度などが技術者個人の技量と主観に依存するため、結果にばらつきを生じ易い。これは、変状の経時変化を長期間に亘り計測するような場合に顕著となる。
- 2) 現場にて目視による観察結果をスケッチし、ひびわれ幅をクラックスケールで計測し、それらの結果を持ち帰り汎用 CAD 等でトレースして変状展開図を作成する。このため現場作業時間及び最終的な結果が得られるまでの所要時間がともに長く、またスケッチしたものをトレースする工程が二度手間となる。
- 3) 維持管理の各段階で作成される記録の管理がシステム化されていない。
- 4) ひびわれ等の変状には、構築直後に温度応力や乾燥収縮により発生し、その後はほとんど変化しないものと、土圧などの荷重により長期に亘り変化が継続するものがある。さらに変状の変化は、拡大や伸展といった一方向的な変化とは限らず、温度や湿度変化による膨張、収縮、補修による消失、及びその後の再発生など、さまざまなパターンを示す。汎用 CAD 等では、変状を表す線や面などのオブジェクトをレイヤー上に配置し、これを重ね合わせて透過表示するため、オブジェクトの増分により変状の拡大・進展を表現することは容易であるが、収縮や消失といった挙動変化を表現することが難しい。
- 5) 異なる変状個所の健全度の比較が難しいため、構造物の安全性及び経済性に基じた補修の優先順位付けといった合理的な補修計画の策定が難しい。

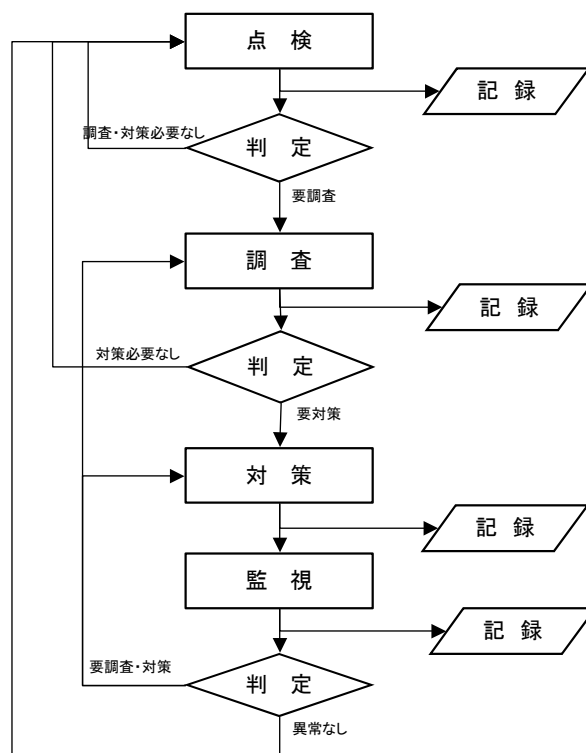


図-1 一般的な維持管理の手順

Development of a management support system for efficient maintenance management of tunnel.

K.Gotoh (Gtec Co.,LTD.) , H.Shinohara (Tosetu Civil Engineering Consultant Inc.)
 M.Shimozawa (KeisokuKensa Co.,LTD.) , H.Horiuchi (Yamagata Sekkei Co.,LTD.)

2.2 開発方針

これらの問題を解決するため、本システムの開発にあたっては以下の方針に基づいている。

- 計測精度が個人に依存することを避けるために、現場計測はデジタル撮影機器による画像撮影を基本とする。
- 現場作業時間の短縮と工程の二度手間の解消により、現場作業から結果出力までの時間を短縮するために、撮影した展開画像をソフトウェアに取り込み、画面上で直接トレースすることで変状展開図の作成を行う。
- 点検、調査、補修などの各段階で作成した記録を、トンネルごとに一元的に管理する。
- 変状の複雑な挙動変化の過程を履歴として管理とすることを目的として、一つのオブジェクトで変状の拡大、伸展及び収縮、消失、再発生などの挙動変化を表現できる”ゴーストオブジェクト”と呼ぶ特殊なオブジェクトを開発し、採用する。ゴーストオブジェクトの概念を図-2に示す。
- 異なる構造物、あるいは同一構造物であっても異なる個所同士の健全度の客観的な比較を可能とするために、任意ブロック単位での変状の数などの比較機能、及び変状数量の集計機能を持たせる。

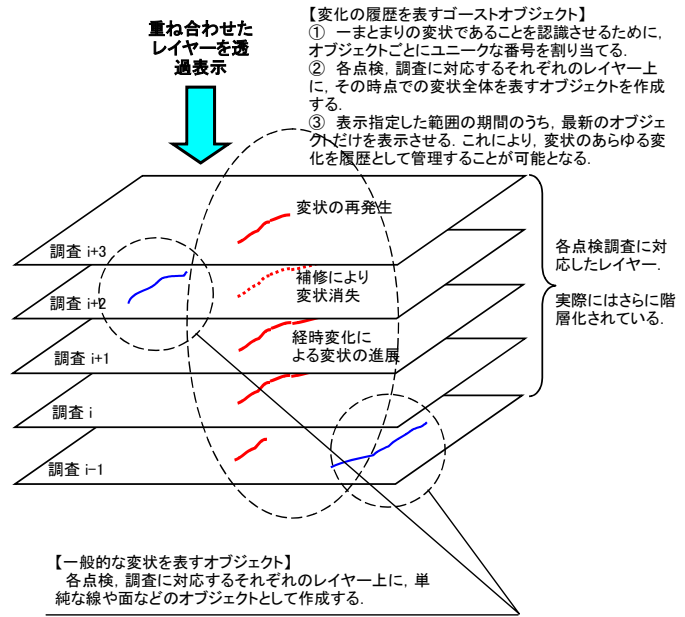


図-2 ゴーストオブジェクトの概念

3. システムの概要

3.1 画像撮影



写真-1 本システムによる撮影状況

現場での点検・調査は、前述したように車載したデジタル撮影機器による画像撮影を基本とする。

現在、トンネル覆工表面の代表的な撮影方法として、ラインセンサカメラ、レーザースキャナー、デジタルビデオカメラなどの方式があり、それぞれに特徴がある。本システムでは、このうち3CCDデジタルビデオカメラを用いた画像撮影方式を採用しており、その計測方法及び特徴などについて以下に説明する。

(1) 計測方法

本システムは、写真-1のように、測定用台車上の架台に複数台のデジタルビデオカメラと照明器を円周方向に配置して、トンネル内を走行しながら覆工表面の画像を撮影することで、連続した展開画像を作成し、この撮影画像を基にひびわれなどの変状を検出するものである。

(2) 基本構造

本システムの構造上の特徴として、計測機材が固定式ではない点が挙げられる。計測機材は、図-3に示すように測定用台車の上に単管などにより架台を組み、必要となる台数のビデオカメラ及び照明器を金具を用いて架台上に固定することで、その都度組み立てる。

このような組み立て構造を採用したことにより、トンネルの形状や内空断面、使用する台車の大きさなどの条件に合わせて架台を組み、ビデオカメラ及び照明器は架台上に自由にレイアウトすることができるので、走行できる台車の大きさや動力に制限を受ける軌道トンネル、導水路トンネル、急勾配、小断面あるいは変型断面トンネルなどにおいても計測を行うことが可能となる。

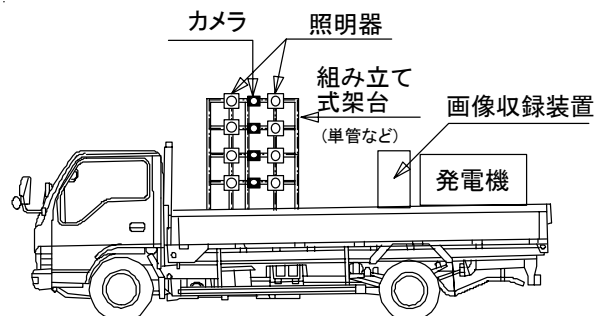


図-3 計測機材の構造

(3) 計測原理

画像撮影に基づく計測では、前述した各方式とも、対象物表面からの照明の反射光を撮像素子により検出するという基本レベルでの光学的な原理は変わらない。このため計測精度の最も基本的な指標の一つである最小分解能は、光源の種類や撮影方式に依らず、撮像素子が受け持つ画角の大きさによって決定されることとなる。これらの関係を、**図-4**に示している。なお、ここでは最小分解能を画素 1pixel に対応する画角と定義している。

しかしデジタル画像特有の現象として、ひびわれ幅などの計測精度は、必ずしも最小分解能だけでは決まらないことが挙げられる。デジタル画像における各画素の明るさは、その画素に対応する撮像素子

(CCD; Charge Coupled Devices や CMOS; Complementary Metal Oxide Semiconductor など)に入力された光の量により決定される。従って構造物表面のひびわれや欠陥など背景と大きく明るさの違いがある対象物を撮影した場合、対象物が 1 画素に満たない大きさであっても、撮像素子に入力される光の量が相対的に少なくなり画素に明暗として記録されることから、ある程度の大きさまでは検知することが可能となる。¹⁾さらにこの現象を積極的に利用して、背景と対象物の間の明度差を n 階に階調化することにより、最小分解能の $1/n$ の大きさの計測が原理的には可能となる。²⁾

以上のことから、デジタル画像を用いたひびわれ等の計測においては、最小分解能が小さいほど、また撮像素子のダイナミックレンジが許す範囲で対象物と背景との明るさの差が大きいほど、一般に計測精度を高くすることができる。

最小分解能未満の大きさの物体が明暗として画像に記録される現象も、撮影方式には依らずデジタル画像に共通したものであるが、本システムでは(2)項で示しているように、複数台のビデオカメラと照明器を必要に応じて組み立てる構造を採用しているため、**図-5**に示すようにカメラの画角や照明器の台数及び明るさを計画的にレイアウトすることで、この現象をより積極的に利用した計測を行うことが比較的容易である。

なお、具体的な計測精度については、次項にて説明している。

(4) 走行速度と計測精度

本システムでは、前述した最小分解能、画像の明度差に加えて、計測機材を積んだ測定用台車の走行速度の 3 項目が、総合的な計測精度を決定する上で重要な要因となる。走行速度が速くなると、画像のゆがみが大きくなったり、トンネル延長方向での撮影画像同士のラップが小さくなるなどの理由から、計測精度は一般に低下する。

これらの要因と計測精度との関係は、覆工表面の汚れ具合などからも影響を受けるため単純には決まらないが、これまでの実験や実績などから、良好な条件下であれば走行速度 5km/hr の条件で 0.1mm 幅、10~20km/hr で 0.3mm 幅、50km/hr でも 0.5mm 幅のひびわれの有無を検知することが可能であると判断している。

これは従来の目視点検などと比較すると非常に高速であり、現場作業時間の短縮は、作業の省力化・効率化のみならず、車線規制や通行止めを不要としたり規制時間を短縮できるので、安全管理や利用者へのサービス等の面からもメリットが大きい。

(5) カラー画像

3CCD デジタルビデオカメラを用いた本システムの特徴の一つとして、鮮明なカラー画像が得られる点が挙げられる。

トンネルの覆工表面に発生する変状はひびわれだけでなく、漏水、遊離石灰や剥落など多岐に及ぶため、変状の内容を特定し、その程度と範囲を把握するために、カラー情報は非常に有効であると考えている。

またカラー画像は、トンネル内に設置された避難誘導施設や消火施設などの各種付属設備の維持管理にも有効である。実際に撮影した展開画像の事例を**写真-2**に示している。

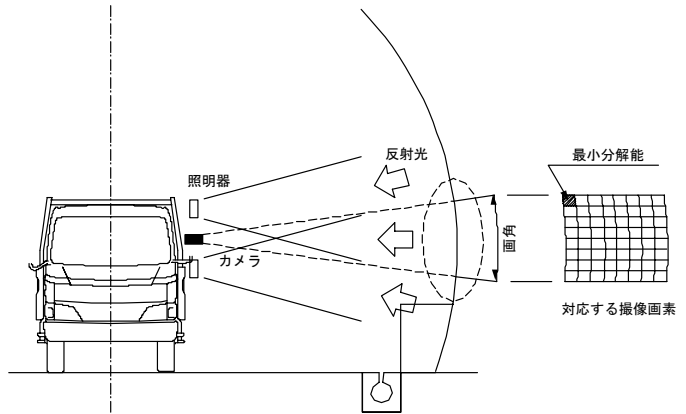


図-4 画像撮影の基本原則

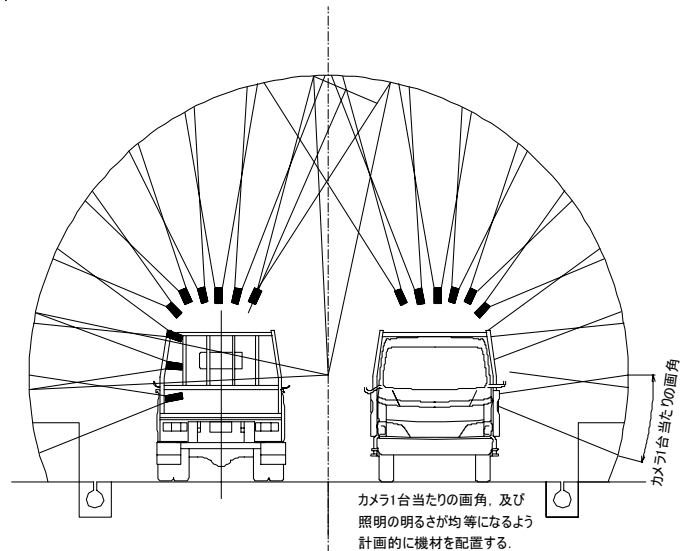


図-5 機材の配置計画例



写真-2 撮影した展開画像

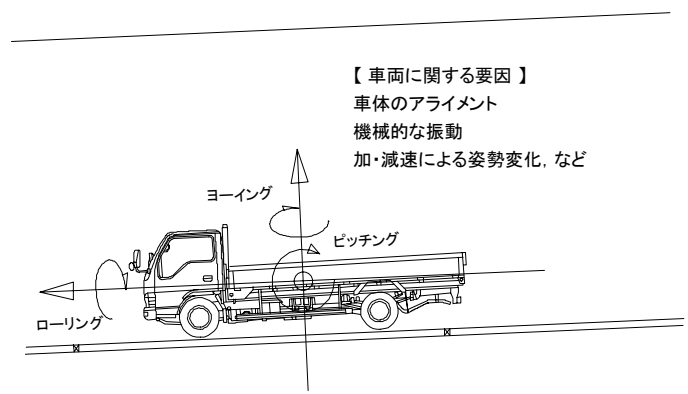
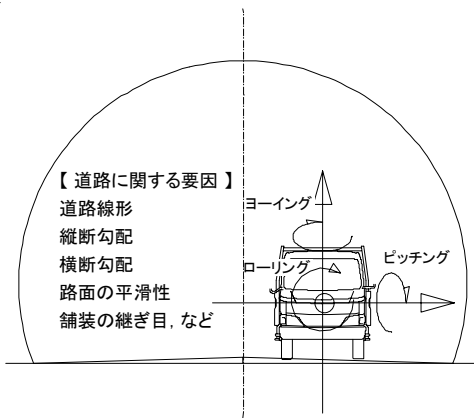


図-6 走行中の車体の運動

3.2 変状検出とデータ管理

前述のように撮影、作成したトンネルの展開画像を基に、併せて開発したソフトウェアによって変状検出と各種のデータ管理を行う。

(1) 変状検出

トンネルの変状を図面化する際の基図となる展開図は、トンネル各部の形状寸法をパラメータとして入力することで、自動的にパラメトリック生成している。

また変状展開図は、写真-3 に示すように、生成した基図に撮影した展開画像を重ね合わせ、変状箇所を液晶タブレットなどで直接トレースすることで作成し、作業の省力化を図っている。写真-2 の展開画像から、実際にひびわれを検出した事例を写真-4 に示している。



写真-3 トレースによる変状展開図作成

(6) あと処理

撮影した画像を基に、最終的なトンネル覆工の展開画像を作成するためには、あと処理による画像編集が必要となる。

このようなあと処理として、トンネルの円周方向に配置した複数台のビデオカメラの撮影画像の貼り合せ処理と、画像のゆがみの補正処理がある。

本システムでは、撮影機器として複数台のデジタルビデオカメラを使用していることから、撮影した動画の各コマを静止画に変換し、変換した静止画像の有効部分をトンネルの円周方向及び延長方向に貼り合わせることで一枚の展開画像を作成している。

また、トンネル内を撮影する測定用台車の運動は、図-6 のように道路や車両から様々な影響を受けるため、厳密にはトンネル軸線に対して直進しておらず各方向に蛇行、回転している。このため、撮影したオリジナルの画像には、さまざまな要因によるゆがみを含んでいるため、単純に貼り合わせただけでは展開図として利用することはできない。これらのゆがみを除去し、画像がトンネル展開図と一致するよう、幾何補正処理を行っている。

ゆがみの補正に関するあと処理は、撮影方式に依らず共通した問題であり、その後の計測精度を左右する重要な工程の一つであるが、ノウハウに直結した部分でもあり話題に挙げられることは意外と少ない。

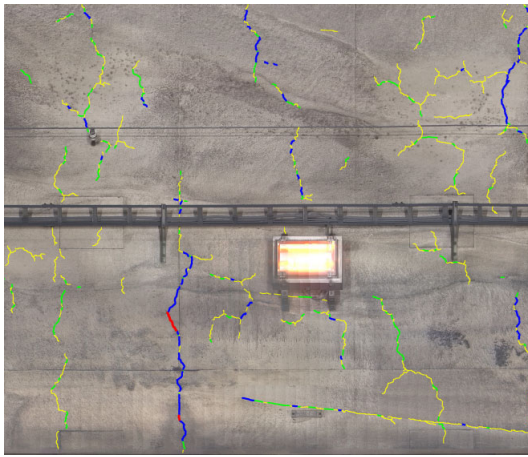


写真-4 検出したひびわれ

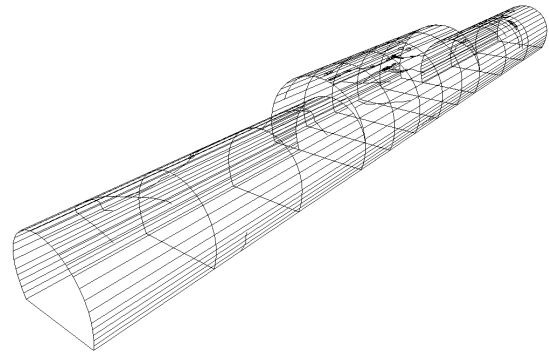


図-7 変状展開図の3D表示

変状によってはソフトウェアで自動抽出させることも可能であるが、判読が難しい場合もあり、現段階では最終的な判定は担当技術者に委ねている。なお変状の検出にあたっては、図-7のように、変状展開図を任意の視点から3D表示させる機能を持たせており、変状と構造物の関係を把握し、原因と重要性などを判断する上での支援としている。

(2) データ構造と履歴管理

本システムでは、一つのファイルで一つのトンネルを管理できるよう、単一のファイル内に複数の点検・調査及び補修等の記録の全てを保管し、同時に表示できるように設計している。これを実現するためのデータ構造として、図-8に示すように階層化したレイヤー構造を採用している。

それぞれの点検・調査や補修ごとに第一階層レイヤーを割り当て、これらのレイヤーはさらに複数の第二階層レイヤーから構成されている。第二階層レイヤーは、変状の種類ごとに凡例を適用させることで自動的に作成し、個別の変状はすべてこのレイヤー上のオブジェクトとして管理している。これにより、変状とオブジェクトは常に一対一の関係となるので、変状ごとに写真、コメント、詳細調査結果などの情報を属性として付与することで、きめ細かな管理が可能となる。

このような階層構造と、前述したゴーストオブジェクトを組み合わせることで、変状の拡大・伸展のみではなく、縮小、消失、補修後の再発生といった複雑な挙動変化の過程を、履歴として一元管理することが可能となり、本システムの大きな特徴の一つとなっている。

(3) 健全度評価

トンネルの点検・調査結果に基づく健全度の評価は、各事業者によって、主に外力、材質劣化、漏水などの項目に対する判定基準を基に、対策の緊急性などの優先度から判定区分するよう定義されている。道路トンネルにおける健全度の判定区分の一例を表-1に示している。

しかし、これらの判定基準や判定区分は、経験等に基づき総合的に判定する項目も多いため、定量的とはいえず、客観的に比較することが難しい。

過去の事例をデータベース化し、変状などの各項目に対して

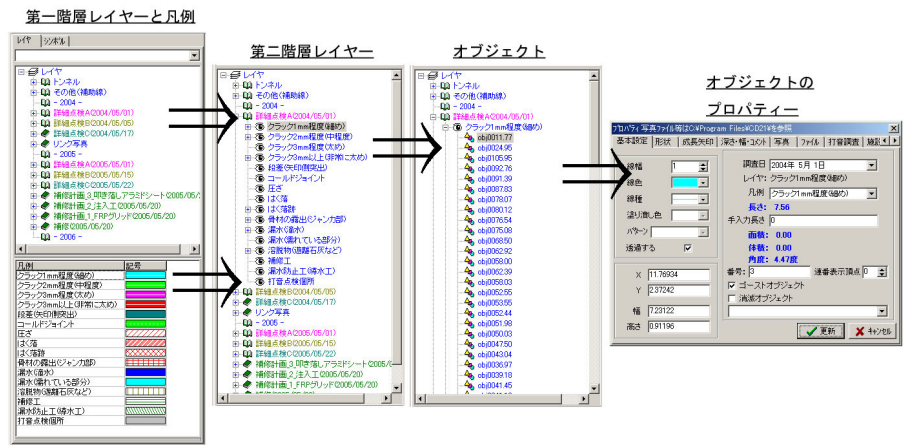


図-8 データの階層構造

表-1 健全度の判定区分の内容と要素³⁾

判定区分	判定の内容	判定の要素			対策の緊急度	
		通行者、車両の安全走行に及ぼす影響	構造物としての安全性に及ぼす影響	維持管理作業量に及ぼす影響		変状の程度
3A	変状が大きく、通行者・通行車両に対して危険があるため、直ちにんらかの対策を必要とするもの。	危険	重大	著しい	重大	直ちに対策を施す。
2A	変状があり、それらが進行して、早晚、通行者・通行車両に対して危険を与えるため、早急に対策を必要とするもの。	早晚脅かす。異常時に危険となる。	早晚重大となる。	大きい	進行中。機能低下も進行する。	早急に対策を施す。
A	変状があり、将来、通行者・通行車両に対して危険を与えるため、重点的に監視をし、計画的に対策を必要とするもの。	将来危険となる。	将来重大となる。	中程度	進行中。機能低下のおそれがある。	重点的に監視をし、計画的に対策を施す。
B	変状がないか、あっても軽微な変状で、現状では通行者・通行車両に対して影響はないが、監視を必要とするもの。	現状では影響がない。	同左	ほとんどない	軽微	監視をする。

統計処理に基づき重み付けした配点を設け、これを集計することで健全度を数値により客観的に評価するシステムの研究が各事業者などにより進められているが、実務レベルで一般に利用される段階には至っていない。

このような状況を踏まえて本システムでは、健全度評価を支援するため、任意ブロックごとの変状数と種別の分布グラフ、ひびわれの密度計算、ひびわれや打音調査結果などの分布図を作成する機能を持たせており、その事例を図-9、10に示している。

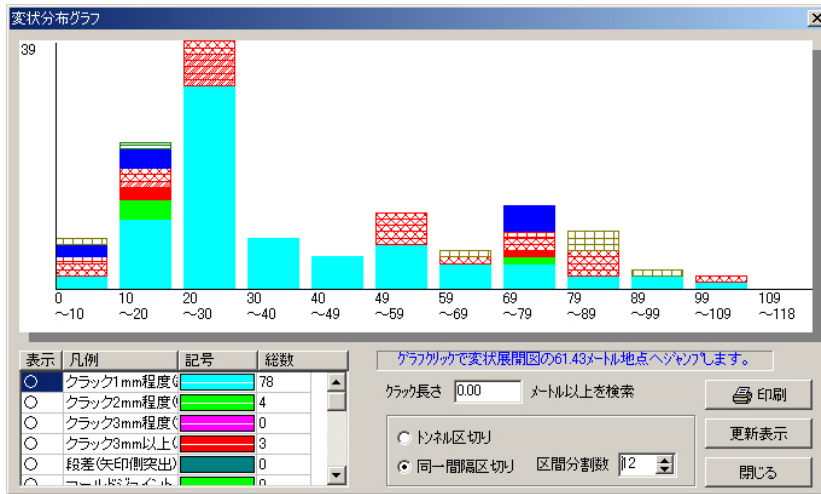


図-9 変状分布グラフ

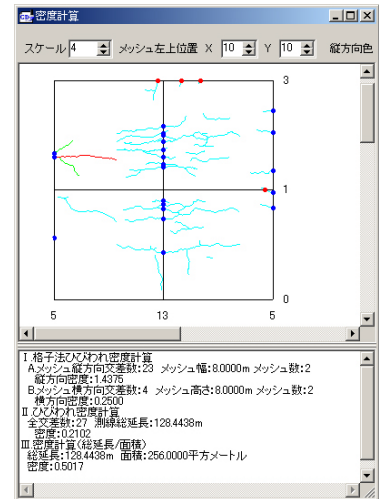


図-10 ひびわれ密度

これらの機能を用いると、点検・調査結果を基に、変状の種類・数や程度の分布を定量化して、ある程度客観的に比較することができるので、総合的に健全度を評価する際の支援になると考えている。

また、補修計画の策定において経済性を検討する支援として、任意ブロックの変状数量を自動的に集計する機能を併せて持たせている。

4. おわりに

本システムを導入することで、老朽化トンネルをはじめとする各種の地下構造物の効率的な維持管理を支援できるものと考えている。今後は、実際のトンネルを対象に、変状の点検・調査や補修計画の策定などに適用することで、システムの有効性を検証するとともに、機能と使い易さの向上に努める予定である。本来はトンネルを代表とする地下構造物を対象として開発したシステムであるが、その他の様々なコンクリート構造物への適用も可能であり、例えば橋梁上部工や法面構造物などへの適用を検討している。また、地質や支保構造などの設計・施工段階からの情報を取り込み、さらに数値化・体系化された健全度評価手法や劣化予測などの機能を導入することで、トンネル構造物のライフサイクル全般を通じた総合的なマネジメントシステムとして拡張可能であると考えており、次段階の重要な開発テーマとした。

参考文献

- 1) 例えば、社団法人日本コンクリート工学協会；コンクリート診断技術'02 基礎編，pp. 89, 2002. など
- 2) 堀内宏信・後藤和夫；デジタル画像を利用したひびわれの計測精度について，平成16年度土木学会東北支部技術研究発表会，pp. 782～783, 2005.
- 3) 社団法人日本道路協会；道路トンネル維持管理便覧，pp. 124～125, 1993.