

---

巻頭言	新しい力学理論の必要性 —健全度調査の調査結果をいかに利用するか—	東京工業大学教授 太田秀樹	1
小特集	構造物健全度調査技術の現状と展望		
	コンクリート構造物の劣化度調査技術の 現状と展望	魚本健人	2
	基礎構造の損傷調査技術	大塚雅裕	8
	トンネルの健全度調査技術	小西真治 小島芳之 津野 究 榎本秀明	14
	高速道路におけるのり面の健全度調査技術	緒方健治	20
	建築物の健全度調査技術	秋山友昭 加登勇司	26

# 新しい力学理論の必要性

## —健全度調査の調査結果をいかに利用するか—

東京工業大学教授 太田 秀 樹

話を具体的にするため、架空の例をあげてみよう。あるところに、ひとつのダムを作りたい。調査や設計を終えて、予算を要求する。要求額は、仮りに、500億円だったとしよう。予算が足りないから、半額の250億でやってくれ。こう言われたとしても、担当の技術者は「それはできません」とはっきり断るであろう。500億必要なダムを、どのように工夫しても250億でつくることができないからである。何故不可能なのだと問われたとしても、「設計してみればわかることですが、所期の機能と所期の安全性をもたせるためには、これこれの理由で250億ではできません」と答えられる。設計のための理論体系がしっかりしているから、勝手にそれを都合よく変更したりできるものではない。

それでは、ダムが古くなって、かなりくたびれてきている場合に、話をかえてみよう。漏水がひどいとか、安定性に不安があるとかいった場合である。調査をして、その結果、修復に20億円必要だといった見積りを出したとしよう。予算がきついで、「今年じゃなくて、来年ではダメか」とか、「20億はちょっと無理なので、10億で何とかならないか」などと聞かれたとしよう。この場合、「今すぐ壊れるわけでもなさそうなので、来年まで待ちましょう」とか「それじゃ、修理の規模を減らして、10億でやりましょう」とか答えることになりかねない。なぜなら、拒絶する根拠がうすいからである。

新規の着工なら、断固たる技術的見解を主張することができる。しかし、修復となると、確固たる見解を示すことができない。なぜ、こんな違いがでてくるのか。それは設計のための理論体系は持っているが、構造物の現状を正確に示すための力学理論を持っていないからである。

前の例でいえば、「それじゃ、あと何年すればこのダムは壊れるのか」とか、「何故20億必要なのか。それを示す力学的な根拠を示せ」とか言われると、的確に答えられない。

これが、私達のいつわらざる現状である。「設計の理論は持っているけれど、修復の理論は持っていないじゃないか。それなら、技術屋さんに相談せずに、我々事務系だけで問題を処理してゆくよ。技術が必要なら、その都度、専門家をやとうからね」と言われかねない現状である。

こんなかたちで、技術系職員が予算決定に果たす役割が減ってゆくことを、私は心配している。これから世の中に出て、大いに活躍しようと考えている若い学生さん達の将来が心配だからである。

設計とは、一種の予測である。こんな風にダムをつくれれば、危険かどうか。ヘンなことが起きないかどうか。こういう予測をしながら、ギリギリ経済的なものをつくってゆく。これが設計である。将来のことは、しかし、全部が全部わかるわけではないから、予測できない部分は安全側に見積る。これが設計の思想である。わからない部分は、ムリをせず余裕を見て対応する。これが設計という仕事の根底に流れている考え方である。だから、でき上がったダムの安全率が1.2だとか1.5だとか言っても、それは少なくともそれ以上です、という意味であるにすぎない。つまり、本当の安全率がいくらなのかは、実のところわからない。

古くなったダムが、だんだん安全性を失ってきている。こういう場合というものは、現実にあるであろう。しかし「現在、どれくらい危ないのか」、「いつまで壊れないで持つのか」といった質問には、答えられないのである。設計理論が悪いのではなく、設計理論とは本来そういうものなのである。

修復・維持補修・健全度判定。こういった業務をするには、設計理論とは別の、全く新しい力学体系が必要である。諸賢の、特に若い方々の活躍の場は、こんなところにもある。

# コンクリート構造物の劣化度調査技術の現状と展望

うおもと たけと\*  
魚本 健人

## 1. はしがき

長年にわたり「鋼構造物に比べコンクリート構造物は劣化しにくいもので、コンクリート構造物はメンテナンス・フリーである」と信じられてきた。しかし、1999年に発生した山陽新幹線のトンネルコンクリート剝落事故<sup>2)</sup>、高架橋からのコンクリート片の剝落<sup>3)</sup>など、また時を同じくして発刊された「コンクリートが危ない」(小林一輔著)<sup>4)</sup>が契機となって一般社会でも「コンクリート構造物であっても劣化が生じる」ことが認識されるようになった。実際には剝落したトンネルのライニングコンクリートやかぶりコンクリートは構造物の構造耐力を損なうほどのものではなかったが、社会に対するインパクトは著しく大きかったことは周知のとおりである。また、ライニングコンクリートは無筋コンクリートであり、橋梁上部工などに使用されている鉄筋コンクリートまたはプレストレスコンクリートとは全く異なった構造であるが、建設技術者にも「コンクリート構造物であっても劣化が生じる」ことを考慮した設計・施工・維持管理を行うことの重要性が、理解されるようになったということができよう。

以上のことから、「地質と調査」の読者の専門ではないかもしれないが何らかの参考になると考え、本文ではどのようにコンクリート構造物が維持管理されているか、またどのようにすればよいか考えているかを説明する。

## 2. 劣化問題に関する我が国の現状と将来予測

### 2.1 現在までの建設の状況と今後

現在までに我が国は大量のコンクリート構造物を建設した。我が国から外国に輸出しているセメント量は相対的に少ないため、図1に示した我が国のセメント生産量の変遷を見ても推定することができる。1974年まではほぼリニアにセメント製造量が増大していることや、その後多少の変動はあるもののその伸びは緩やかになり、最近ではどちらかというと緩やかになり最近ではどちらかというあまり増大していないことなどを見て取ることができる。このセ

メント生産量を基にして1m<sup>3</sup>当たり300kgのセメントが使用されたと仮定して製造されたコンクリート量を推定すると、図2に示すように高度成長期であった昭和40年(1965年)までに生産されたコンクリートは、1998年までのおよそ1/3程度にしかない。すなわち現存しているコンクリート構造物の2/3は昭和40年以降に建設されたものであるということができる。

今後の状況を予測すると、図3に示したように建設後50年を経過した橋梁の数と橋梁全体の数は2000年以降も増大すると予想されている。特に2020年以降では、今後の新

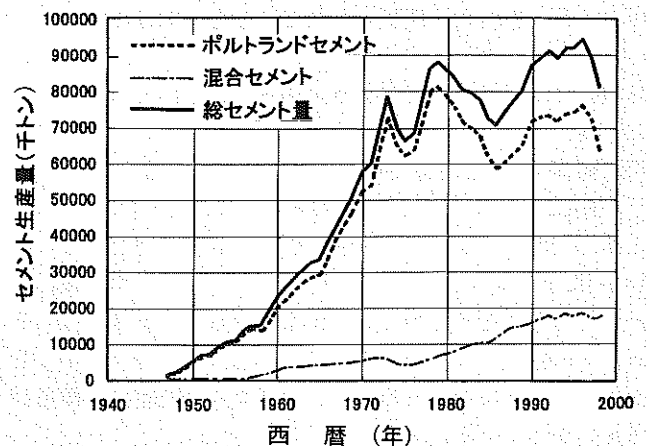


図1 我が国のセメント生産量の変遷(セメント協会資料より作成)

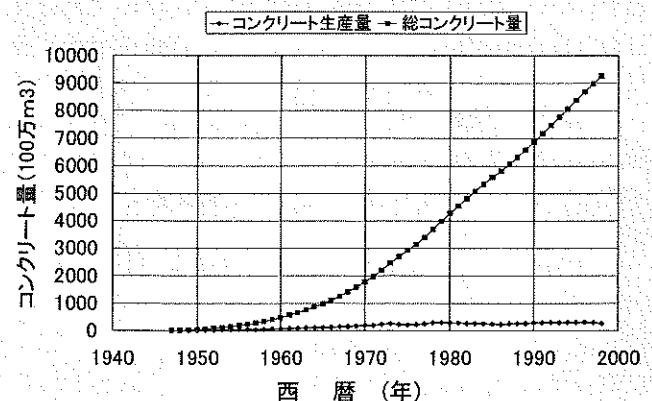


図2 我が国のコンクリート生産量の推定値(単年度および総生産量)

\* 東京大学生産技術研究所 都市基盤安全工学国際研究センター センター長・教授

規建設の伸びにもよるが現在までと同程度の伸びであると仮定すると、建設後50年を経過する橋梁の割合が50%を超える可能性がある。もし建設の伸びが減少する場合には、より大きな割合になることはいうまでもない。

一方、建設省、運輸省、農水省等で組織された「耐久性検討委員会」で発表された資料<sup>3)</sup>によると、図4に示すように建設後年数が経過すると補修されている橋梁数の割合はほぼ直線的に増大し、50年で約40%の橋梁が補修されていることがわかる。これらのことから明らかなように、今後は多くの構造物を維持管理しなければならないが、補修を要する構造物の数も急激に増大していくということができよう。

我が国の年齢分布を見ると、図5に示したように第2次

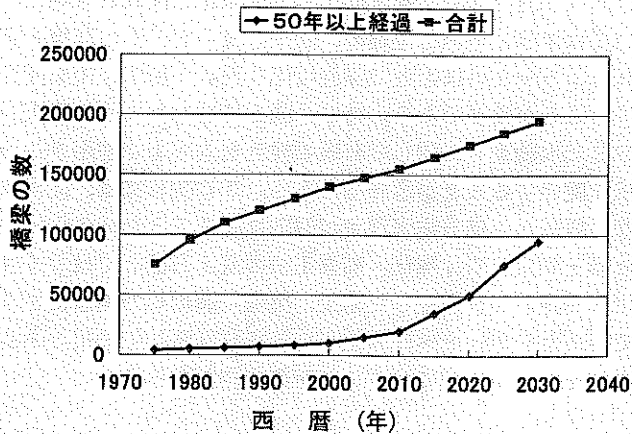


図3 全橋梁数と50年以上経過した橋梁数の予測

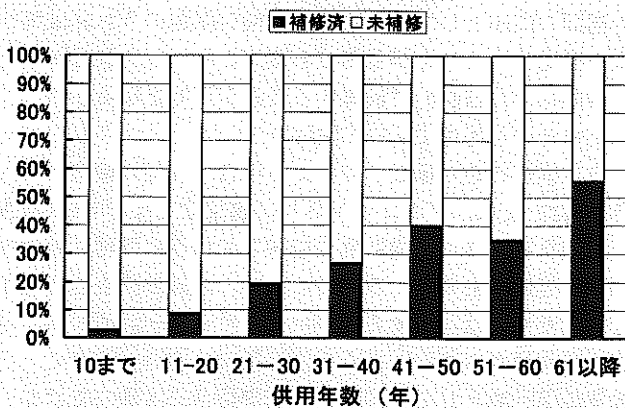


図4 補修した橋梁数割合と供用年数との関係

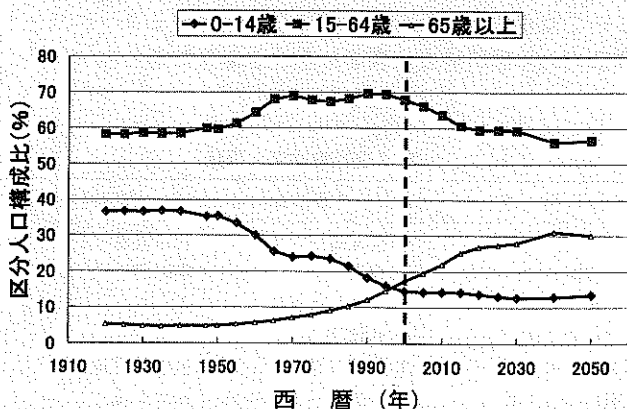


図5 我が国の年齢別人口割合の変遷（日本の統計2002より作成）

世界大戦後大きく変化していることが理解できる。すなわち、0歳から14歳までの人口が著しく減少しており、逆に65歳以上の人口が増大している。現在では65歳以上の人口のほうが14歳以下の人口割合を上回っており、14歳以下の人口は1940年頃のほぼ半数になっている。このことから、今後の我が国は少子高齢化がさらに進み、建設分野等の技術者も減少していくものと予想される。

以上のことから、今後は現在より多くのコンクリート構造物を、より少ない技術者で、あまり費用をかけずに維持管理することが重要となり、適切な診断ならびに適切な対処が不可欠になると考えられる。このため、21世紀は新規に建設すること以上に既存のコンクリート構造物を維持管理することが重要な仕事になるが、特に各種検査（一次検査、二次検査など）を客観的に実施するとともに、各種検査結果に基づいた劣化診断が技術者にとって非常に重要な仕事となる。

## 2.2 コンクリート構造物の維持管理と検査・診断

現在実施されているコンクリート構造物の維持管理システムは、管理者等によって異なっているが、一般には図6に示したような方法が採用されている。すなわち、定期的な目視調査等の一次検査が行われ、その結果に基づきさらに詳細な二次検査を行うか否かを定める。二次検査では打音検査等も含めた非破壊検査なども併用されるが、その結果補修や補強を施すほうが良いかどうかを判定しなければならない。さらに、補修・補強を施すのであればどのような補修・補強とすべきかを選定することが求められる。これらのことからわかるように、判断が必要なのは一次検査および二次検査後、その構造物に対してどのような措置をとるかを定めるところである。

「診断」という言葉は広辞苑によると「医師が患者を診察して病状を判断すること。転じて、物事の欠陥の有無を調べて判断すること。」と記述されている。すなわち、上記の維持管理システムの中で「コンクリートの各種検査に基づき欠陥の有無を調べて、どうすべきかを判断する」ことは「コンクリートを診断する」と等しい。この判断はかなり重要で、医師の場合と同様に、検査の方法やその限界を熟知し、構造物の有している欠陥・劣化状況を勘

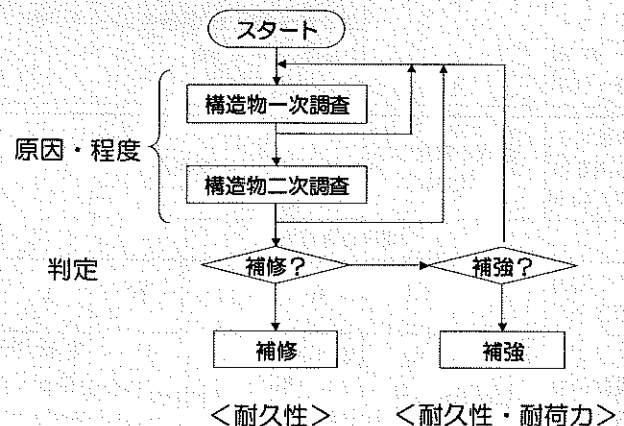


図6 一般的なコンクリート構造物の維持管理システム

案して決めることになるが、この判断が誤まっているとさらなる劣化を引き起こし、「第三者障害」や「事故」を起こすことになる。しかし、この診断を行う技術者は、「医師」とは異なり従来特別な資格を有しているとはみなされず、各検査員がそれぞれの機関が有しているマニュアル（表1に示した例のように主に目視検査の結果で判断する手法が多い）で対処してきたのが現状である。このため、大きな事故などが発生した場合を除き、現場で行われた検査結果をより専門的な角度から検討されることはまれで、検査結果を見過ごすことも多いと考えられる。

このような現状を考慮して、今年から日本コンクリート工学協会ではじめて「コンクリート診断士」の資格制度は、ある意味では時代にマッチした制度である。これからはこの種の資格試験で維持管理技術者の技術レベルのアップと社会的な地位の向上を図ることが重要であろう。

今まで述べたことから明らかなように、21世紀には今までのような設備投資は期待できないので、劣化した既存構造物を撤去して新規構造物を建設する可能性は少ない。このため、これからの構造物のメンテナンスは次のことを考慮する必要がある。

- ① 新規構造物はもとより、既存構造物の場合もその使用を中止せずにより長期間（たとえば建設後100年以上）使用できるようにメンテナンスしなくてはならない。
- ② メンテナンスに要するコンクリート技術者の養成が重要であるが、少子高齢化の時代を考えると、少数

の技術者でも対応可能な効率の良い機械化・システム化が必要となる。

- ③ 公共投資などの予算が限られていることから、コンクリート技術者以外に対するメンテナンスの重要性を認識してもらうとともに、経済性を重視した劣化度の評価・判定および補修・補強工法の選定を行う手法の研究・開発が急務である。

これらの問題はいずれも一朝一夕には解決できないが、①に関してはメンテナンスのための計画、設計、施工技術の完備が重要である。今までにもすでに種々の研究等が実施されているが、土木学会が2001年に発刊した「コンクリート標準示方書（維持管理編）」<sup>9)</sup>に見られるような構造物のメンテナンス方法も一つの方法であろう。詳細については5.で説明する。②に関しては、機械化の図れるものについては早急に機械化を進め、効率の良いデータの収集・整理とより少ない技術者で実施可能な設計・施工技術を開発することが重要である。特に、図6で述べた「一次調査」や「二次調査」に関して非破壊検査を効率よく利用する方法を開発することが急務であろう。③に関しては、従来少ない経験から構造物管理者が個別に定めてきた「劣化度の評価・判定」や「補修・補強工法の選定方法」ではなく評価・判定および選定した結果、実際に適用した場合にどうであったかをデータベース化して、より経済的で効果のある手法を明らかにしていくことが第一歩であろう。

#### 4. 非破壊検査の自動化

当面の問題として、②に関する検討課題のうち非破壊検査を自動化することが急務である。これが行えればかなり客観的にかつ自動的に検査することが可能となる。そこで、以下にその可能性について説明する。

土木構造物を対象として考える場合、一般に構造物は大きく（たとえば、ダム、トンネル、橋梁など）、非破壊検査を実施する場合にも構造物に接触して行うには種々の大掛かりな設備を必要とする。このため、非破壊検査の自動化を図るためには計測するたびにセンサーを一回ずつ取り付けなければならないという手法は扱いにくい。そこで、自動化の第一歩として、詳細な検査を行う二次調査ではなく広範囲に実施する一次調査について、非接触でコンクリート構造物の自動計測を行うことができるいくつかの手法について概説する。なお、一般に行われているコンクリート構造物の非破壊検査は表2に示すとおりである<sup>9)</sup>。

表1 劣化度判定の例

劣化度項目	0	I	II	III	IV	V
鉄筋の腐食	なし	コンクリート表面に点錆が見られる	一部に錆汁が見られる	錆汁多し	浮き錆多し	浮き錆著しい
ひび割れ	なし	一部にひび割れが見られる	ひび割れやや多し	ひび割れ多しひび割れの幅数mm以上	ひび割れ幅数mm以上のひび割れ多数	—
かぶりコンクリートの剝離・剝落	なし	なし	一部に浮きが見られる	一部に剝離・剝落が見られる	剝離・剝落多し	剝離・剝落が著しい
点検による調査の要否判定	調査の要なし（点検継続）		要調査			

補修の要否の判定

劣化度項目	0	I	II	III	IV	V
補修の要否判定	補修の要なし		補修の要なし（都合により補修）	要補修		要補修（都合により補強）

表2 非破壊検査の種類

強度	外観検査	内部検査
シュミットハンマー	目視検査	超音波法
超音波法	写真撮影	電磁誘導法
プルアウト法	デジタルカメラ	AE法
プルオフ法	赤外線法	打音法
ブレイクオフ法	レーザー法	放射線透過法
組合せ法等	マルチスペクトル法	レーダ法
		自然電位法

### (1) デジタルカメラなど

デジタルカメラは普通のカメラと同様に対象物の外観を調べることができる。デジタルカメラでの撮影は、①最近のカメラはカラーでも画素数が多くなり精度が良くなったこと、②撮影後、すぐにその画像で良いかどうかの判定が行えること、③コンピュータを利用して画像端部の歪みを修正しやすいこと、④いくつかの画像を重ね合わせることができること、⑤記録として残すにはフィルムよりも扱いやすいことなどの利点があげられる。また、画像処理を行えばコンクリート表面のジャンカ等ばかりでなく0.2mm以上の幅のひび割れであればその位置を正確に出すことができる(図7参照)。なお、この手法は表面の情報しか入手することができない。

この方法は連続的な撮影を行うことはできないが、一定間隔で計測ができる。また、移動しながら連続的に撮影するのであればハイビジョンカメラなども考えることができる。

### (2) レーザー法

レーザー法は指向性の高いレーザー光を照射し、その反射波を検知することで物体表面にあるひび割れ等の情報を検出することができる。その利点として、①連続的に細かいピッチでスキャンさせて計測することによりコンクリート表面のひび割れ分布や各種欠陥を調べることができること、②デジタルカメラで必要とされるような光源やサーモグラフィで必要とされる加熱装置などがなくても測定できることなどが上げられる。しかし、表面の汚れ等の影響を受けるとともに色の变化などはわからない。

この方法は計測速度にあわせて連続的な画像を得ることができ、計測条件の影響を受けにくいという利点がかわれ、日照の当たらないコンクリート床版(図8参照)やトンネ



図7 デジタルカメラによる画像とひび割れ分布<sup>6)</sup>



図8 レーザーを利用したコンクリート表面計測(首都高速道路技術センター)

ルライニングのひび割れ分布計測等にも利用されている。

### (3) サーモグラフィ

赤外線センサーは物体から放出される赤外線をとらえることで、その物体の温度を知ることができるため、対象物の温度分布を求めることができる<sup>7)</sup>。その利点としては、①デジタルカメラやレーザー法は表面の情報だけであるが、やや内部の情報まで入手することができること、②剝離等が生じているコンクリートの場合、剝離部では太陽光線等が内部まで到達せず蓄積させるため著しく温度が高まるため、剝離箇所を二次元的に求めることができること(図9参照)、③デジタルカメラやレーザー法で得られた結果と重ね合わせが行えることなどがあげられる<sup>6)</sup>(図10参照)。しかし、表面の汚れや計測時の日照条件などによる影響を加味する必要があり、そうでない場合にはコンクリート表面を加熱する等の方法を併用することが必要になる。

この方法は静止画像ばかりでなく連続的な画像をも得ることができるが、精度を上げるためにはより高い画素数の機器を必要とする。すでにこの手法は建物の表層部モルタルの剝離やタイルの剝離等の検出等に利用されている。

### (4) レーダ法

レーダ法はマイクロ波を利用した計測方法で、電磁波を

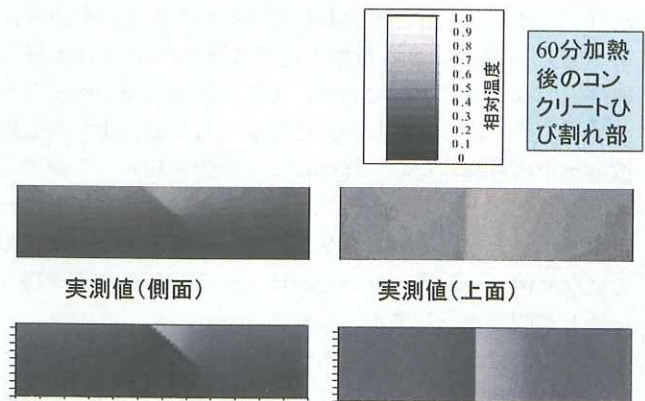


図9 コンクリートひび割れ部の赤外線画像と解析値<sup>11)</sup>

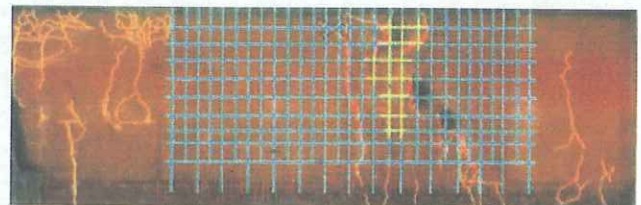


図10 デジタルカメラ、レーダ、赤外線の複合計測結果<sup>6)</sup>

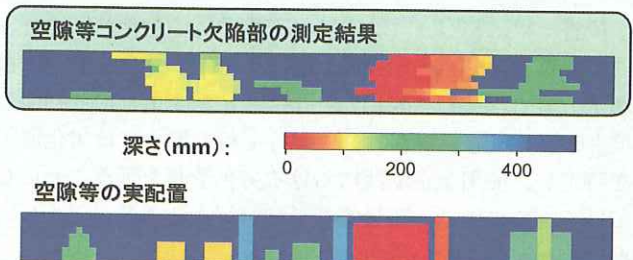


図11 レーダによるコンクリート版中の空隙・欠陥検査結果<sup>12)</sup>

測定対象物に照射し、その反射波を検出することで内部に存在する物体、空隙等を検出する。その利点は、① 上記(1)から(3)まではコンクリート表面の情報に限定されるが、この方法はコンクリート内部の情報を得ることができること、② 使用する周波数にもよるがトンネルライニング背面の空洞なども知ることができることなどが上げられる。しかし、コンクリートの誘電率等によって影響を受けることや、より深い地点の情報を得ようとすると周波数を下げる必要があるため測定精度が低下することなどが問題となる。また、電波法による問題も存在する。

この方法は連続的な計測をすることができるが、現在市販されている機器ではコンクリート表面からあまり離すと誤差が大きくなるなどの問題と、計測結果の表示が一般の土木技術者にはわかりにくいという問題がある。朴らが開発したような<sup>8)</sup> 計測結果の復元化手法などが広く使用されるようになると一般の建設技術者にも理解されやすくなる。なお、この手法は、すでに一部ではトンネルライニングの厚さおよび背面空洞の検出等(図11参照)の自動化に利用されている。

### (5) 打音法

打音法は、昔から多くの分野で利用されてきた方法で、原理はハンマー等で叩いた応答音(マイクロホン等で採取)から内部に存在する空隙等を検出する方法である。この方法は全く非接触で計測するわけではないが、その利点は、① 一定の打撃力による打撃を行うことができれば応答音の振幅の変化等で空隙の有無、劣化の程度等を調べることができること、② 周波数の変化を調べることにより共振周波数が求められるため、経年による変化を知ることができることなどが上げられる<sup>9)</sup>。しかし、ハンマーで叩く方を一定にすることが難しいことや、全面をくまなく計測するのではなく何cm離れた一定のピッチで計測せざるを得ないことが問題点としてあげられる。

この方法は、すでに建物のタイル剥離箇所の検査等にも利用され、検査用ロボットによる自動化も行われている。コンクリートの浮き、剥離等の検出にも自動化の試みが行われている。

以上述べたように、すでに自動的に非破壊検査を行うことのできる手法は種々あるが、今までなかなか利用されてこなかったのが現状である。21世紀にはこのような技術開発を強力に進めることができれば、構造物のメンテナンスの問題も容易に対処できるようになると考えられる。

## 5. 今後の劣化診断とメンテナンス

検査結果に基づきコンクリート構造物の劣化診断を行うことになるが、土木学会の「2001年制定 コンクリート標準示方書(維持管理編)」では図12に示すように「初期点検」を必ず実施すること、「判定」を行う場合には劣化原因を特定し、使用予定期間における劣化予測を行うことにしている。この場合、定量的な予測が行えることが望ましいが、それが行えない場合には「グレーディング」で判定することにしている。

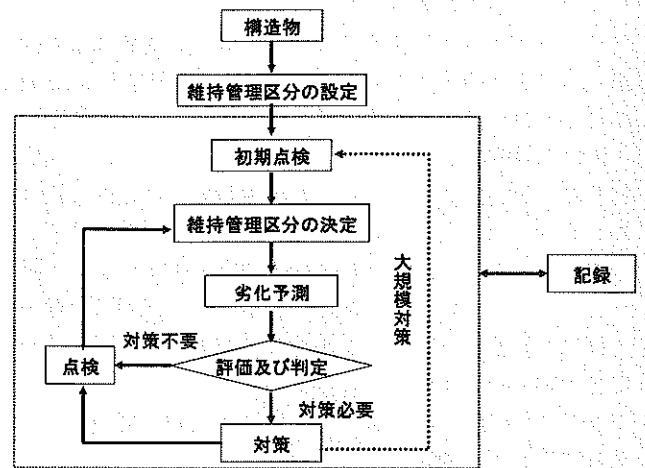


図12 維持管理フロー (RC示方書)<sup>5)</sup>

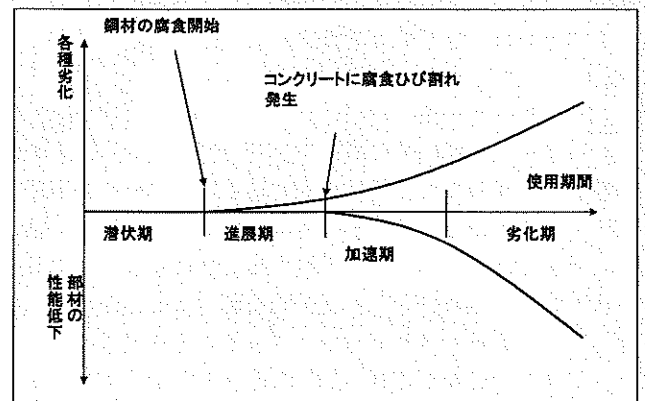


図13 グレーディングによる推定方法 (RC示方書)<sup>6)</sup>

表3 構造物のグレードと標準的な性能低下(中性化)<sup>6)</sup>

構造物の外観上のグレード	安全性能	使用性能	第三者影響度 美観・景観
状態Ⅰ-1 潜伏期	—	—	—
状態Ⅰ-2 進展期	—	—	—
状態Ⅱ-1 加速期初期	—	—	美観の低下 ・ひび割れ ・錆汁
状態Ⅱ-2 加速期後期	—	剛性低下(変形の増大・振動の発生)	・鋼材の露出 第三者への影響
状態Ⅲ 劣化期	耐荷力・じん性の低下 ・鋼材断面積の減少 ・浮き・剥離によるコンクリート断面の減少	・鋼材断面積の減少 ・鋼材とコンクリートの付着力の低下 ・浮き・剥離によるコンクリート断面の減少	・剥離 ・剥落

表4 構造物のグレードと標準的な性能低下(塩害)<sup>6)</sup>

構造物の外観上のグレード	劣化の状態
状態Ⅰ-1 潜伏期	外観上の変状が見られない、腐食発生限界塩化物イオン濃度以下
状態Ⅰ-2 進展期	外観上の変状が見られない、腐食発生限界塩化物イオン濃度以上、腐食が開始
状態Ⅱ-1 加速期前期	腐食ひび割れが発生、錆汁が見られる
状態Ⅱ-2 加速期後期	腐食ひび割れが多数発生、錆汁が見られる、部分的な剥離・剥落が見られる、腐食量の増大
状態Ⅲ 劣化期	腐食ひび割れが多数発生、ひび割れ幅が大きい、錆汁が見られる、剥離・剥落が見られる、変位・たわみが大きい

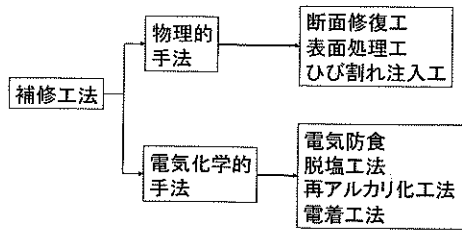


図14 補修工法の分類 (RC示方書)<sup>9)</sup>

疲労荷重等による劣化の場合にはある程度定量的に予測することができるが、その他の原因では現在のところまだ難しいため「グレーディング」で対処せざるを得ない。中性化と塩害の場合のグレーディングの例を図13、表3および表4に示す。これらの図表から明らかのようにやや定量化されてはいるものの客観的な判定は難しい。これらの定量的な予測手法の確立が急務である。

一方、補修・補強に関しては現在使用されている手法が多様であり、個々の評価を行ってからでないどのような場合にどのような方法を採用すればよいか明確にならない。現在、補修工法については図14に示したように分類されているが、図15に示す断面修復工や表面被覆工だけでも使用材料が千差万別であり、種々の研究者等が比較検討を行っているところである。実構造物に適用するためにはこれらの中から最も適した方法を採用する必要があるが、そのためにもこれらの研究結果が待たれている。この場合、注意すべき点は、①補修・補強後の劣化進行の予測と計測方法の確立、②再補修・再補強の容易さ、③補修・補強かかる費用、などである。

## 6. まとめ

コンクリート構造物の維持管理についてはまだまだ未解明な点が多く、今後の研究がはなはだ重要である。この種の問題については学会、官庁、産業界が一体となって早急に整備することが肝要であり、我が国のこれからの命運を決するものであるということもできよう。最後に、本文ではわかりにくい専門用語も使用したかもしれないが、専門

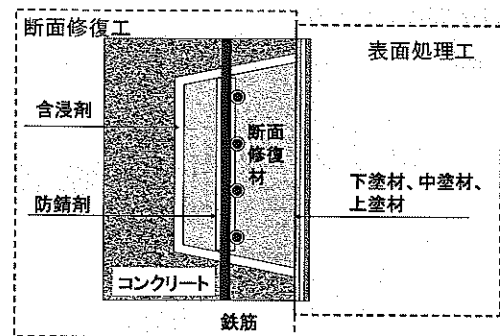


図15 断面修復工と表面処理工

は異なってもコンクリートの分野ではどのようなことが行われているかが少しでも「地質と調査」の読者に何らかの参考になれば幸いである。

## 参考文献

- 1) 小林一輔：コンクリートが危ない，岩波新書，1999.6.
- 2) トンネル安全問題検討会報告書—事故の原因推定と今後の保守管理のあり方—，2000.2.28.
- 3) 土木コンクリート構造物耐久性検討委員会の提言，建設省・運輸省・農林水産省，2000.3.
- 4) 魚本・加藤・広野：コンクリート構造物の非破壊検査，森北出版，1990.
- 5) 土木学会：コンクリート標準示方書（2001年制定）「維持管理編」，土木学会，2001.
- 6) 友清・魚本：実橋床版における各種非破壊試験の適用に関する研究，生産研究，1999.
- 7) 魚本：赤外線センサーのコンクリート工事・構造物への適用，生産研究，44巻，11号，1992.11.
- 8) 朴・魚本：多重偏波方式のレーダによるコンクリート背面空隙の体積推定，土木学会論文集，No. 592/V-39，pp.13-24，1998.5.
- 9) 伊東・魚本：ひび割れを有する鉄筋コンクリート梁の打撃音，土木学会論文集，No. 564/V-35，pp.169-176，1997.5.
- 10) 魚本：コンクリート剥落とメンテナンス，生産研究，7・8号，2001.7.
- 11) 高羅・魚本：温度解析に基づいたサーモグラフィー法によるコンクリート中のひび割れ検査方法に関する基礎的研究，生産研究，11・12号，2001.11.
- 12) 宮本・魚本：ホーン型レーダーによるコンクリート構造物の欠陥探査方法に関する基礎研究，生産研究，11・12号，2001.11.



# 基礎構造の損傷調査技術

おおつか まさひろ\*  
大塚 雅裕\*

## 1. はじめに

我が国の道路構造物は高度経済成長期に整備されたものが多く、これらの老朽化が今後急激に進行することが予想される。これらを再構築するためには多額の費用が必要となるが、我が国の社会は高齢化、少子化が進行しつつあり、今後の社会資本整備のための投資力の低下が懸念されている。このような状況を打破するためには、適時・適切に既設構造物の損傷調査を行い、損傷を早期の段階に発見し、補修・補強することによりできるだけ長時間有効活用することが重要である。しかし、橋梁基礎の場合、基礎本体が地中にあるため、地上構造物とは比べものにならないほど損傷調査、補修・補強が困難である。また、古い橋梁などでは設計図書等が散逸しているため、耐震性能等を評価できない場合がある。このような問題を解決するために、旧建設省土木研究所(現独立行政法人土木研究所)、阪神高速道路公団、(財)土木研究センターおよび民間12社が基礎の形状および損傷の調査手法を開発することを目的とした共同研究<sup>1),2)</sup>を行い、ここで開発された数種の技術は現在実用化されている。

ここでは、この研究により開発された四つの損傷調査手法について、手法の概要および損傷の評価

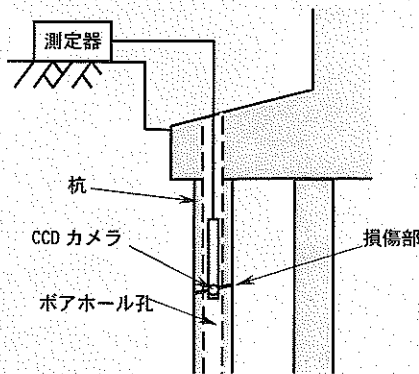


図1 ポアホールカメラを用いた調査法

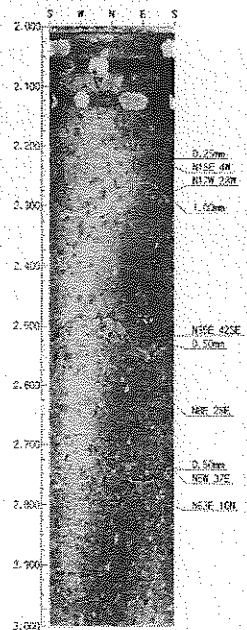


写真1 ひび割れ幅の判定

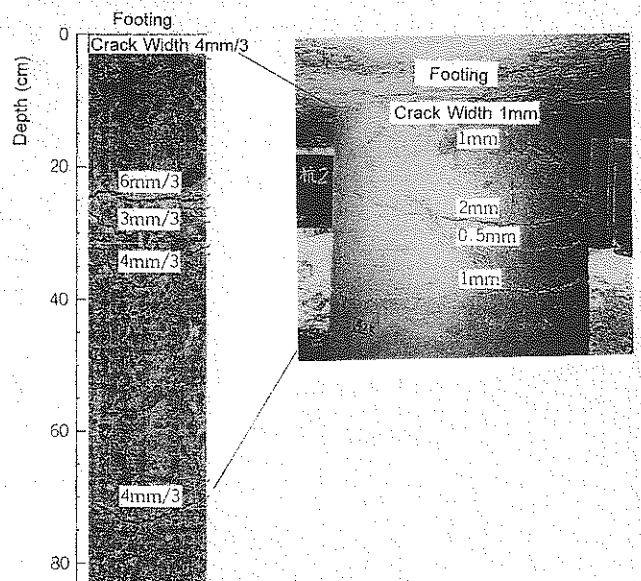
方法、調査の実施例、これらの手法の適用性や基礎構造物の調査手順などを紹介するとともに、基礎構造物の損傷調査技術や橋梁維持管理における現状の課題について述べる。

## 2. 調査手法の概要

### 2.1 ポアホールカメラを用いた損傷調査

ポアホールカメラを用いた損傷調査は、図1に示すように調査の対象とする構造物を削孔し、CCDカメラ等を挿入して構造物の損傷を内部から直接観察する調査法である。損傷位置やクラック幅など、損傷状況を直接測定器のモニターで確認できるため、損傷調査手法としては信頼性が高い。現場調査時にモニターで直接確認できることから、調査時にある程度の損傷度判定が可能である。また、削孔時に採取したコアと孔壁の撮影結果を比較することによりひび割れの状況を評価することも可能である。

杭基礎を対象に本手法により調査した結果<sup>2)</sup>を写真1に示す。写真は、孔壁の様子を360°展開した画像である。写真に示すように、6カ所のクラックが確認でき、0.25 mm



(a) Bore Hole Television System (b) Excavating

写真2 調査精度の低下

\* 独立行政法人 土木研究所 構造物基礎研究グループ基礎チーム

以上のひび割れ幅の判定が可能である。

本調査法の留意点として、削孔時に使用する水の濁りによる画像鮮明度の低下、削孔時のクラック角部の欠け落ち・コンクリート片のクラックへの詰まりによるひび割れ幅判定精度の低下がある。写真2は、水平に近いクラックの場合、削孔時の角部の欠け落ちが生じやすく、杭を実際に掘り起こして杭周面で確認されたひび割れ幅に比べ、大きなひび割れ幅の判定がなされた例である。

## 2.2 インテグリティ試験による損傷調査

インテグリティ試験は、杭施工時の品質管理のために開発され、杭長などの構造諸元の調査に用いるものであるが、地震などで被災した既設杭の損傷調査にも適用できる。杭頭やフーチング上面をハンマで打撃し、基礎中を伝播する弾性波の損傷位置や断面変化位置からの反射波を、打撃位置近傍に設置したセンサー（加速度計）で計測し、それらの位置を判定する手法である（図2）。

図3に、杭頭を打撃した場合の反射波形の例を示す。等断面の健全な杭の場合、打撃による弾性波は杭先端まで伝わり、そこで反射し杭頭まで戻ってくるが、損傷が生じている場合には、損傷部で波の一部が戻ってくるため、健全な場合より早く反射波が観測される。

表1に、杭体の健全性の判定例を示す。ここで、速度比とは、反射波の速度を打撃による入力波の速度で正規化した値であり、入力波と杭先端や杭体のクラックからの反射波では同符号（同じ向き）となる。（a）の場合、杭先端

での反射が明瞭であり、先端反射が浅く下向き大きなピークが見られないことから、健全性が高いと判定できる。（b）の場合には、杭先端で浅く下向き小さなピークが現われ、また、杭先端の反射位置が確認されることから、部分的なクラックが生じているものと判定される。（c）の場合、杭先端で浅く下向きピークが現われ、それ以後で反射が繰り返されることから、全断面にわたるクラックが発生しているものと判定される。

本調査手法の適用例として、健全なケーソン基礎およびこれと形状が類似の地震により損傷を受けたケーソン基礎を対象とした調査結果<sup>9)</sup>を図4に示す。（a）の場合、波形の

表1 杭体の健全性の判定例

a		先端反射が明瞭であり、先端で浅く下向き大きなピークが見られない。 判定： 健全性が高い
b		先端反射が認められ、先端で浅く下向き小さなピークが見られる。 判定： 部分的なクラックが生じている疑いがある
c		先端反射が認められず、推定されるクラック位置で深は、繰り返して反射となっている。 判定： 全断面におよぶクラックが生じている疑いがある

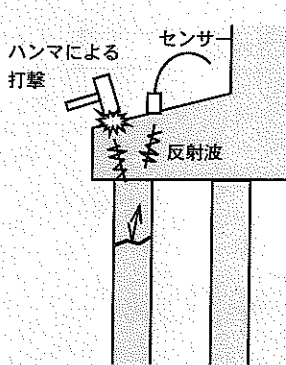


図2 インテグリティ試験

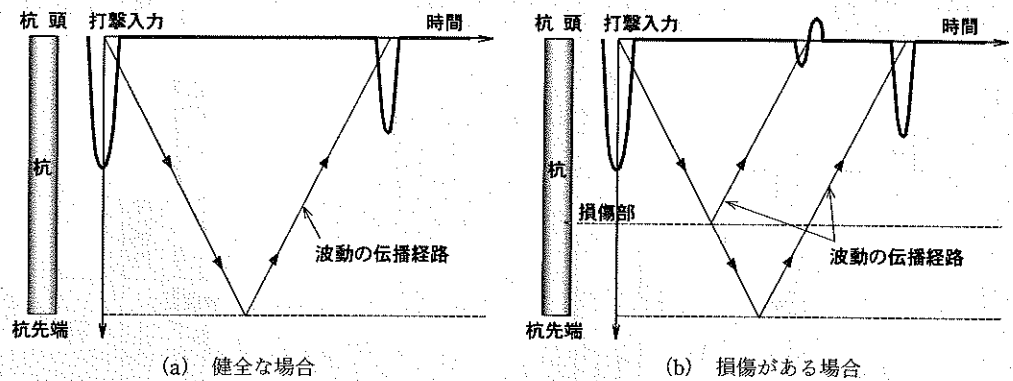
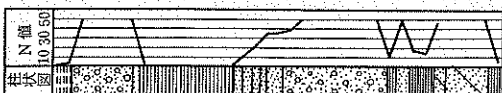
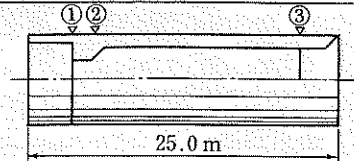
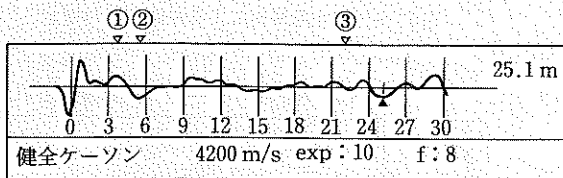
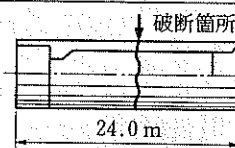
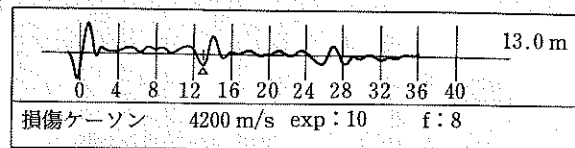


図3 反射波形の例



(a) 健全な場合



(b) 全断面にわたる損傷がある場合

図4 インテグリティ試験による損傷調査例

変化が断面変化位置および先端位置と一致しており、健全であると判定された。一方、(b)の場合、断面変化のない頂版から13mの位置で反射波が見られ、26mでも繰り返しの反射波が確認できることから、13mところで全断面にわたり破断しているものと判定された。

### 2.3 アコースティック・エミッション法を用いた損傷調査

アコースティック・エミッション (AE) とは、個体が変形あるいは破壊する際にそれまで蓄えられていたひずみエネルギーが解放され、その一部が弾性波として放射される現象である。構造物内の欠陥にずれが生じる場合や欠陥が進行する場合などに励起され、損傷位置を震源とする微弱な地震動ともいえる。本調査法は、図5に示すように、基礎構造物本体内あるいは周辺に設けた観測孔にセンサーを挿入し、フーチングや上部構造を起振するなどして励起されたAEを観測することにより損傷位置を推定するものである。

損傷位置 (AE波の発生箇所) は、複数のセンサーで観測される波の到達時間差、センサーの間隔およびAE波の伝播速度から特定できる。

また、AE波の特性を評価するためのパラメータ (AEパラメータ) として、リングダウンカウント数、AE波の最大振幅値、エネルギー、立上り時間、継続時間などがあり (図6)、これらのパラメータの発生履歴、頻度、相関、パターンなどを詳細に解析することで、ある程度の欠陥の発生条件や進展特性を調べることができる。リングダウンカウン

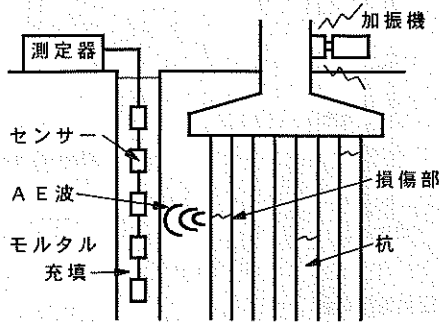


図5 AE法を用いた損傷調査

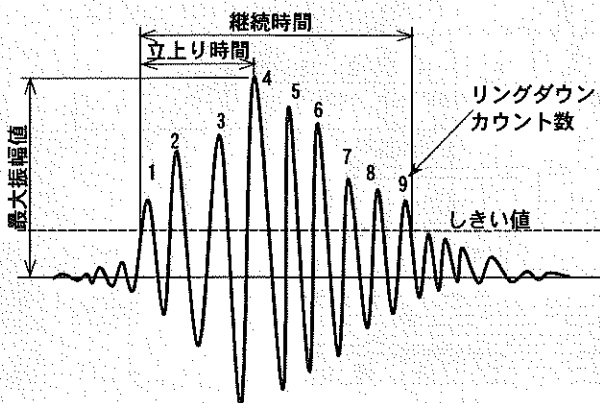


図6 AEパラメータ

ト数は、一つのAEの事象 (イベント) における特定のレベル (しきい値) を超えたAE波の振動回数であり、カウント数の大小は破壊規模の大きさに関係する。エネルギーは、AE波の包絡線波形の面積や最大振幅値の2乗などとされる。立上り時間とは、AE波がしきい値を超えて以降、最大振幅となるまでの時間であり、継続時間とは、AE波の振幅がしきい値を超えている状態の時間である。

これらの情報に基づき、図7に示すようなAE発生源の分布を図化することで、大まかな基礎の損傷箇所を推定できる。図中のAE源の直径をカウント数やエネルギーの大きさなどで表現すれば、载荷した荷重レベルとAE発生源位置およびその大きさの判断が可能となる。

さらに詳細な損傷位置の検討を行う場合には、図8に示すような、イベント数、AEパラメータ、あるいはAEパラメータをイベント数で除した平均AEパラメータについて、深度に対するヒストグラムとして図化することで、AE発生源が集中する深度を損傷位置と推定することができる。

ここで、道路橋への適用ではないが、本調査法を適用した事例を示す。図9は、高層建築基礎の概要である。図10は計測結果であり、杭頭付近および杭頭より3.5~4.5mに杭の損傷が判定された。この2カ所の損傷範囲の推定は、他の数本の杭において実施されたインテグリティ試験および杭頭付近の損傷の目視観定の結果、地盤調査結果など

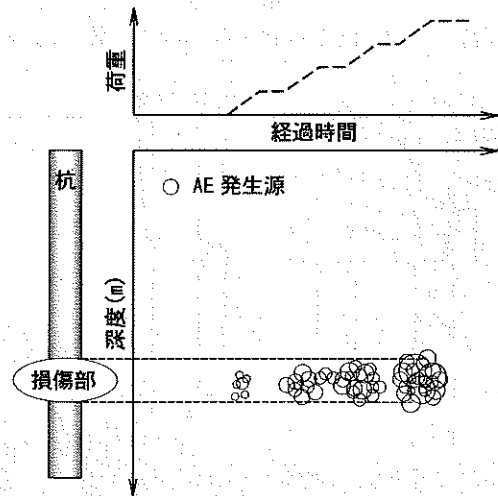


図7 AE発生源分布による損傷位置の推定

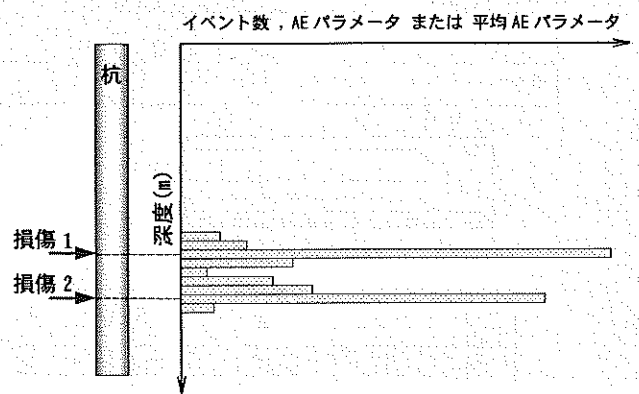


図8 ヒストグラムによる損傷位置の推定

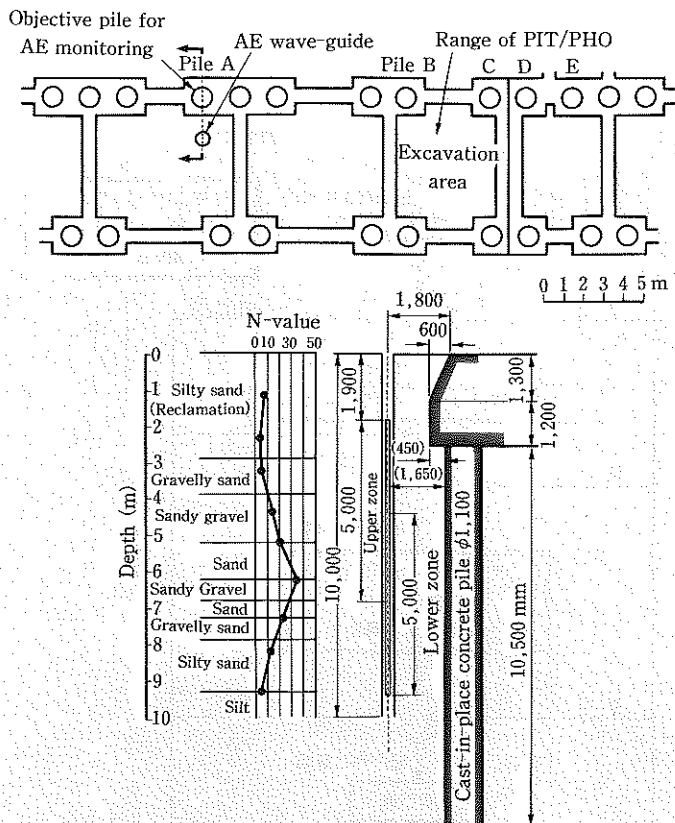


図9 高層建築基礎の概要

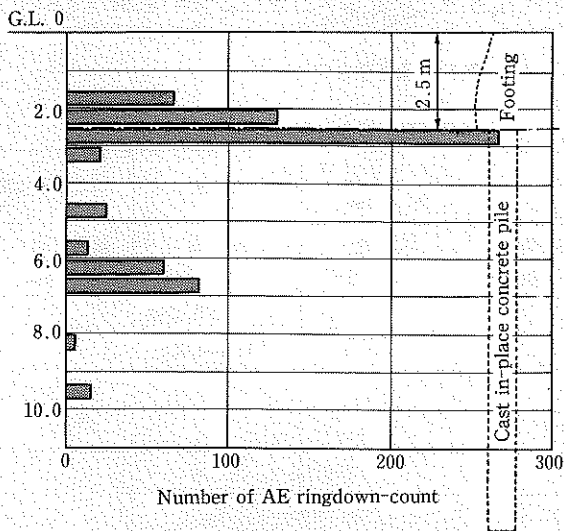


図10 AE計測結果

から判断して信頼性が高いものとされている。

#### 2.4 衝撃振動試験による損傷調査

衝撃振動試験は、橋脚等の構造物がもつ固有振動数を目安として健全性を調査する現位置試験である。固有振動数は、構造物自身の死荷重、上部構造からの上乗荷重、構造物および地盤の剛性等により決定されるものであり、固有振動数が基礎構造物の健全性を評価する目安になりうると考えられる。損傷が生じると剛性が低下し、固有振動数が減少することから、健全時の固有振動数または標準的な値と比較することにより損傷発生の可能性の判断ができる。しかし、損傷の特定までは難しい。試験の具体的な方法は、橋脚を重錘により打撃し、速度計または加速度計で計測さ

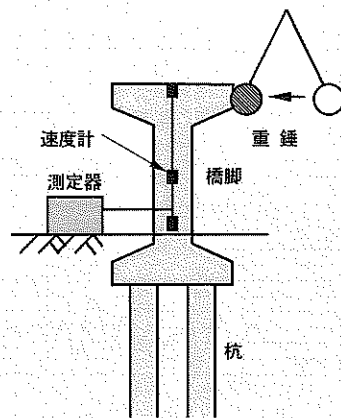


図11 衝撃振動試験

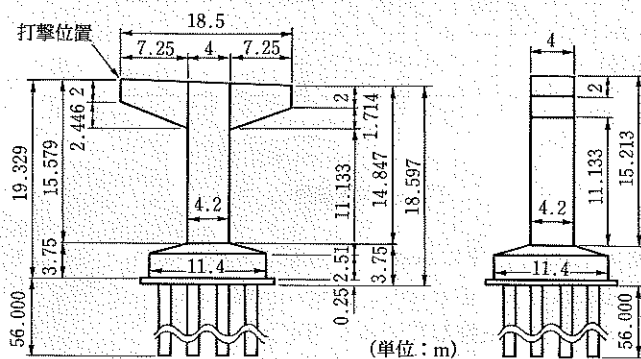


図12 調査対象構造物

れた波形から求められる振動応答により基礎構造の健全性を評価するものである(図11)。

基礎の健全度評価は、鉄道橋では、基礎種類別に実施した衝撃振動試験の多数の実測データに基づき作成された固有振動数の標準値算定式があり、これにより算定される健全な状態における固有振動数の値と、衝撃振動試験の結果得られた実測固有振動数を比較することにより健全度の評価を行っている<sup>9)</sup>。道路橋では、鉄道と同様な算定式を作成できるだけのデータが蓄積されていないため、固有値解析により実測された固有振動数および振動モードを再現できる地盤ばね定数、躯体の剛性を設定し、これらが設計時に想定した地盤ばね定数および躯体の剛性を上回れば当該基礎が健全であると考えている。

衝撃振動試験の実施例として、図12に示す高速道路橋の橋脚の試験例<sup>2)</sup>を示す。

本調査法では、実測された速度あるいは加速度波形から、当該構造物の固有振動数を適切に判定することが重要となる。ここでは、応答波形の微小振幅を明確にし、ノイズ成分を除去するために、打撃試験を10回実施し、それぞれの応答波形の重ね合わせを行った。図13にその加速度波形およびフーリエスペクトルを示す。(b)の振幅スペクトルでは、1.7 Hz、2.9 Hz、4.3 Hzに明瞭な卓越が確認できるが、(c)の位相スペクトルの理論値(加速度の収録を行っていることから90°あるいは270°となる)を考慮して4.3 Hzが対象橋脚の固有振動数と判断された。解析モデルの部材剛性および地盤ばね定数を変化させながら固有値解析を実施し、この振動モードを再現できる部材剛性や地盤ばね定数と、設計時に想定したものとを比較したところ、部材剛

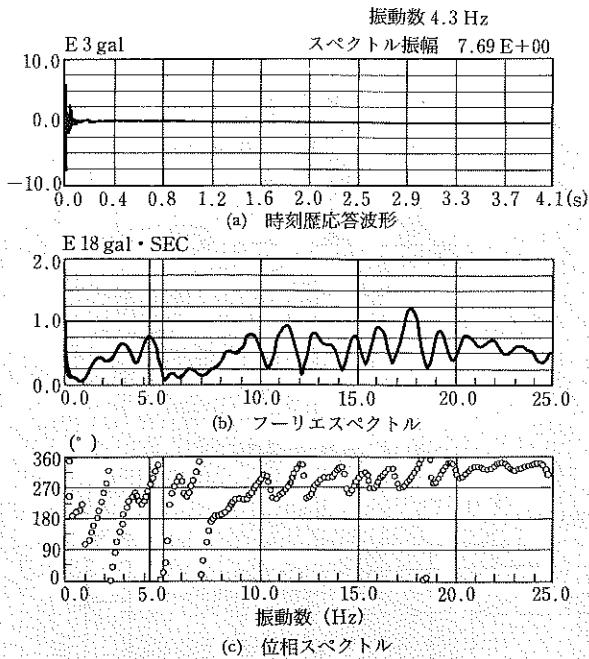


図13 試験結果

性は1.6倍、水平ばねは2.5倍、鉛直・回転ばねは9.0倍となり、健全な状態で上部構造を支持していると判定された。

### 3. 各調査法の適用条件と調査フロー

基礎構造の損傷を間接的に調査する四つの方法を示したが、各調査法の適用性等についてとりまとめたものを表2に示す。調査法により適用できる条件等が異なるため、調査の対象とする構造や調査環境、必要とするデータなどを考慮して適切な手法を選定する必要がある。

損傷調査の手順として、図14に杭基礎の損傷調査フローの一例を示す。調査は、地上部の構造または周辺地盤に変状が見られる橋梁を対象とし、現地の状況、調査法の簡便性、費用、精度などを勘案して実施する。現地における損傷調査は、試掘できる範囲に応じて目視確認、フーチング上面からのインテグリティ試験または衝撃振動試験を実施し、健全性に疑いがある杭を抽出することから始まる。その後、ポアホールカメラやAE法による調査などにより、損傷度の大きいと思われる杭を絞り込み、最終的には、再利用の可否を確認するために必要に応じて載荷試験等を実施する。これらの調査や載荷試験の結果を踏まえて補修や補強の要否を判定し、判定結果に基づき補修・補強を実施する。

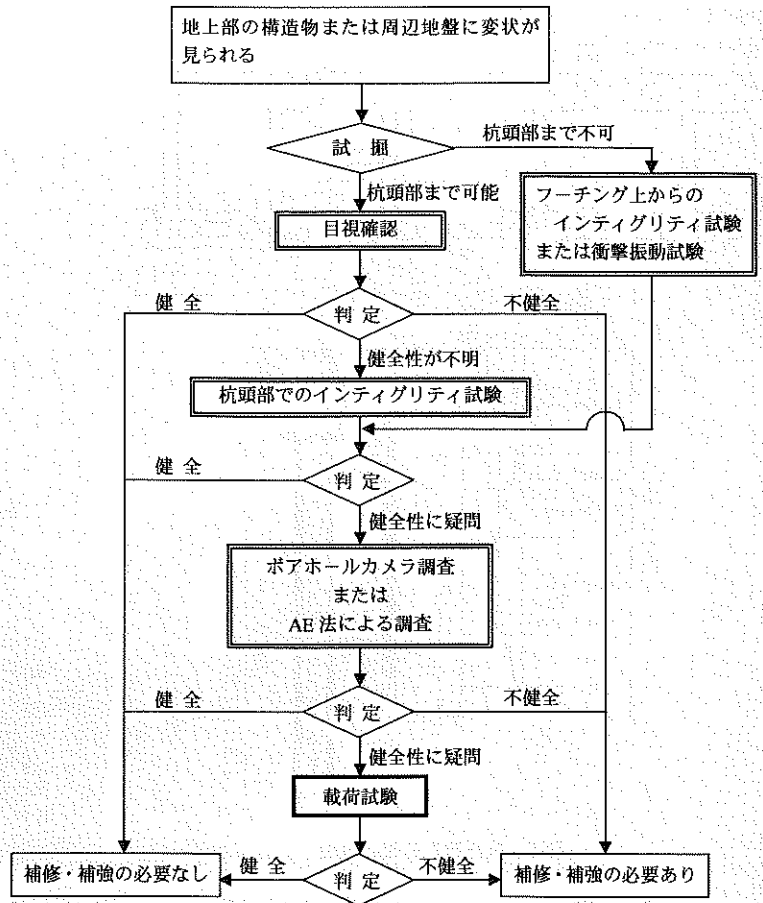


図14 損傷調査フローの一例

表2 損傷調査手法の適用性

調査法	ポアホールカメラ	インテグリティ試験	AE法	衝撃振動試験
適用条件				
調査対象構造物	杭基礎 ケーソン基礎	杭基礎 ケーソン基礎	杭基礎 ケーソン基礎	基礎を含めた 下部工
調査深度	任意	60m程度まで	任意(荷重伝達 可能な深度)	任意
調査項目	損傷位置	○	○	基礎全体の 健全性
	損傷程度	○	△	
損傷が複数ある場合	○	△	○	○
非破壊検査が可能	×	○*	△	○
ボーリングの有無	有	無*	有	無
フーチングの影響	無	有	無	無
簡便性	試験方法	△	△	○
	結果の評価	○	○	△
特記事項	削孔時、クラック部に角欠けが生じる場合がある	*: フーチング部を削孔し、杭頭部で試験する場合もある	載荷が必要	固有値解析のデータが必要

また、これら損傷調査等の実施に先立ち、現地調査を実施し、変位や傾斜などの実態を把握することおよび、橋梁台帳や設計図書等の資料により基礎形式や構造諸元、地盤条件などを調査しておくことも重要である。

#### 4. 今後の課題

紹介した損傷調査手法を開発した共同研究は、平成7年の兵庫県南部地震を機に、効率的な調査技術および健全度評価手法の確立を目指して実施されたもので、マニュアル(案)<sup>3)</sup>が作成され、実用化された。しかし、さまざまな事例に適用するためには、多くの調査データの収集・分析が不可欠である。衝撃振動試験の場合には、前述のとおり、鉄道橋に比べ道路橋への適用事例が少なく、多数の道路橋を対象に健全性を適切に評価するためにはまだデータが不足している。今後、損傷調査の実施例を増して早期に調査データを蓄積するとともに、結果の評価方法や調査手法の改良を加えていく必要があると考える。

また、現状の橋梁の維持管理体系においては、多数の橋梁ストックの健全度を客観的かつ適正に評価する技術が確立しているとは言えず、橋梁管理者ごとの判断に依存するところが大きい。ここで紹介した手法も、橋梁管理者の判

断で実施されているのが実状である。これらの調査技術を今後の維持管理体系に組み込むとともに、これらの調査手法による結果から客観的に構造物の健全度を評価し、合理的に補修・補強を行えるシステムの構築を早急に行っていくかなければならない。

#### 参考文献

- 1) 建設省土木研究所：橋梁基礎構造の調査方法の開発に関する共同研究報告書(その1), 共同研究報告書第217号, 平成10年9月.
- 2) 建設省土木研究所：橋梁基礎構造の調査方法の開発に関する共同研究報告書(その2), 共同研究報告書第229号, 平成11年6月.
- 3) 建設省土木研究所：橋梁基礎構造物の形状および損傷調査マニュアル(案), 共同研究報告書第236号, 平成11年12月.
- 4) 森伸一郎・塩谷智基・岩城圭介・境野典夫・秋山映雄：AEを利用したコンクリート杭破損調査法の高層建物基礎への適用と検証, 日本建築学会1996年度大会学術講演梗概集, pp. 639-640, 1996. 9.
- 5) 財団法人鉄道総合技術研究所：衝撃振動試験マニュアル, 平成6年3月.

# トンネルの健全度調査技術

にし じん じ こと じま よし ゆき  
 小 西 真 小 島 よし 之  
 津 野 治\* えの もと ひで あき\*\*  
 究\* 榎 本 秀 明\*\*

## 1. はじめに

国土の大半を山岳部が占める我が国ではたくさんのトンネルが建設されてきた。鉄道においては、約4800カ所、およそ3300kmのトンネル(2002年現在)が、大量輸送のための社会資本として有効に利用されている。また道路トンネルについては、2001年現在で約8500カ所強、供用総延長が約2700kmにおよんでいる。この他、電気事業者が保有する水路トンネルは1997年3月で約4700km、下水道のトンネルにおいては東京都区部のみで総延長約15000kmにおよぶ。急激な人口増加や高度経済成長が当面見込めない今、これら多くの既設トンネルを効率的に維持管理することが求められている。

トンネルは本来、100年を超える耐用年数をもつきわめて寿命の長い構造物である。ところが中には、使用開始後早い時期にひび割れなどの変状が生じ、対策を余儀なくされるケースもある。その原因としては、地圧等の外力の作用や覆工材料の劣化、施工中にやむを得ず生じたひび割れや背面の空洞、覆工巻厚の不足などがある。このような変状の生じたトンネルでも、早めに検査を行いながら手を加えてゆくことにより、長期間にわたり安全に使用することができる。

トンネルの健全度調査技術の研究開発は以前から行われてきたが、3年前に発生したトンネル覆工剥落事故以来、急速に整備と開発が進められた感がある。ここでは、最近の鉄道トンネルの調査体系と新しい調査技術について述べることにする。

## 2. 検査体系

覆工の検査から対策の考え方は、道路・鉄道において本質的には変わるものではないと思われる。そのため、ここでは鉄道トンネルの例を紹介する。

道路における「定期点検」に相当するものを、鉄道では一般に「全般検査」と称しており、2年以内に1回の頻度で全トンネルを対象に行われる。この全般検査は、平成11年

度に相次いで発生した鉄道トンネル覆工の剥落事故の教訓から、現在、図1のような検査体系により実施されている。図に示す「初回全般検査」「特別全般検査」においては、至近距離からの目視による覆工表面の検査と、その結果に基づいて行う打音検査などの内部の状態を把握するための検査が必要であり、検査結果は変状展開図に記録することが求められている。

図2は、鉄道トンネルにおける検査手順である。図に示すように、外力・劣化・漏水等による機能障害に対する検査とともに、剥落に対する検査を行う。この剥落に対する検査・対策の手順は次のとおりである。

- ① 全体の目視検査を行ったうえで必要な箇所の打音検査を行う。
- ② 打音検査で「濁音」が生じる場合は、可能な範囲で叩き落とす。
- ③ 剥落に対する判定( $\alpha$ (要対策),  $\beta$ (要注意),  $\gamma$ (問題なし)の三つに区分されている)を行い、 $\alpha$ に判定されたものについて剥落対策工を施す。

このように、鉄道トンネルでは、剥落が生じ得る部位を全般検査で漏れなく抽出し、全般検査の結果から速やかに措置を施すことが求められている。ただし、地圧などの外力や材料劣化による剥落が問題となっている場合は、さら

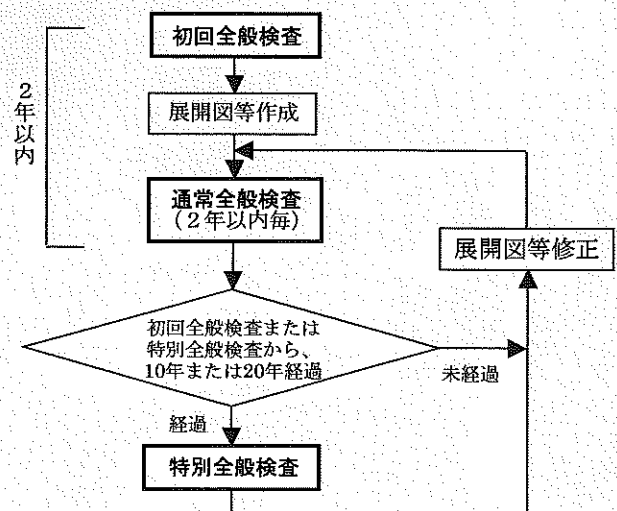


図1 鉄道トンネルにおける全般検査体系の

\* (財)鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 トンネル担当  
 \*\* 同 防災技術研究部 地質担当

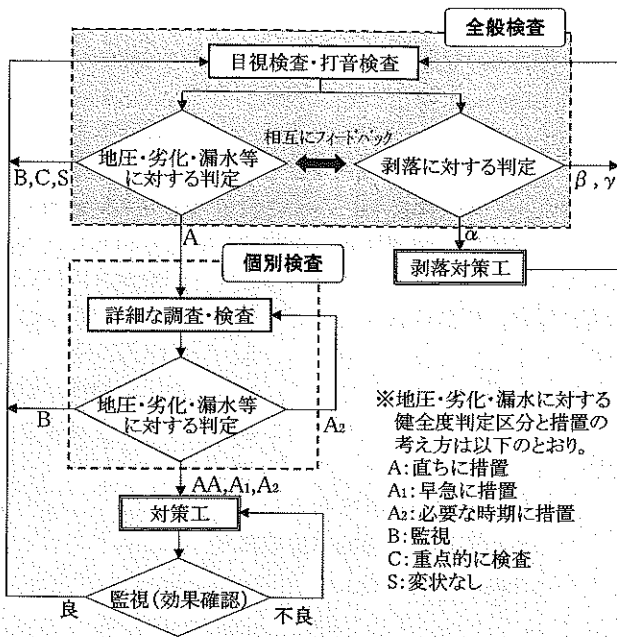


図2 検査の手順<sup>2)</sup>

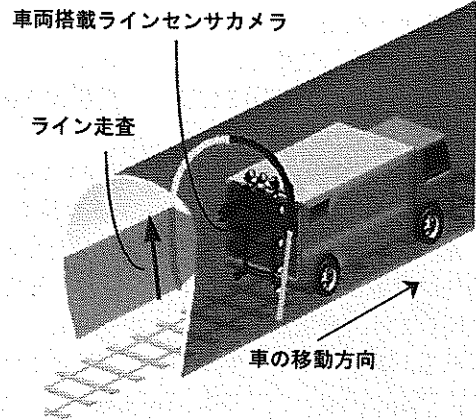


図3 連続走査画像によるトンネル壁面撮影

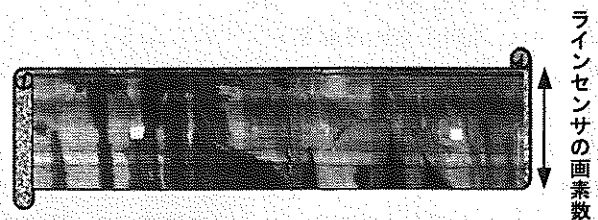


図4 連続走査画像の画像形式 (幅は原理的には無限大)

表1 覆工表面を撮影・記録するシステム (鉄道事業者の場合)\* [文献2]に加筆

手法	概要	主な仕様	適用実績
ラインセンサカメラ (連続走査画像)	走行しながら壁面を走査して画像を得、連続走査画像から展開図を作成	JR 東海 撮影可能最高速度 15 km/h (単線), 27 km/h (複線, 片側) 幅 1 mm のクラック検出	・1999 年度～稼働 ・在来線
		JR 北海道 撮影可能最高速度 10 km/h 幅 1 mm のクラック検出	・1999 年度～稼働
スリットカメラ	走行速度とフィルムの送り速度を同調したカメラにより連続壁面写真を得る	30～40 km/h 幅 1 mm 以下の解像度	JR 西日本 ・1999 年度に新幹線全線にて実施
レーザー	レーザービームで全周をスキャンし画像処理を施して連続壁面画像を得、展開図を作成	JR 東日本 撮影速度 4～7 km/h 以下 幅 0.5 mm のクラック検出	・2000 年度～稼働 ・新幹線・在来線 (箱形トンネルでの実績あり)
		JR 西日本 撮影速度 2.8～17 km/h 幅 0.5 mm のクラック検出	・2001 年度～稼働 ・新幹線・在来線
赤外線カメラ 可視カメラ	走行時ヒーターで強制加熱し、赤外線放射量を赤外線カメラで撮影し、画像処理後、剝離を検出。可視カメラ (CCD) によりクラック、漏水等を検出し、展開図を自動作成	撮影速度 2 km/h 深さ 5 mm の剝離、幅 1 mm のクラック、等を検出	営団 ・1999 年度～稼働 (箱形トンネルでの実績あり)
パノラマカメラ	パノラマカメラによりトンネル輪切り方向に撮影したものを画像処理により繋ぎ合せ、連続壁面展開図を作成	1 晩で 1 km 撮影 幅 0.2～0.3 mm のクラックも検出可能	近鉄 ・1991 年度～稼働

に詳細な調査・計測 (「個別検査」といわれている) を行い、トンネル全体の補強や劣化防止等を考慮した措置を必要により施すことになる。

### 3. 調査技術

ここでは鉄道の分野ですでに実用化されたものおよび現

に実用化に向けて開発が進められている各種調査技術に関して紹介する。なお、ここに紹介する調査技術は道路トンネルにおいても適用されているものおよび適用可能なものである。

#### 3.1 画像撮影

従来の目視観察とスケッチを行う方法にかわり、あるい



はこれを補完する技術として、近年、覆工表面の鮮明な映像を連続的に撮影する技術や、その撮影画像に対して画像処理を行うことで変状展開図を作成したり変状の自動抽出を行う技術が、確立されつつある。

表1<sup>9)</sup>は、鉄道事業者において実用化されている覆工表面を撮影・記録するシステムの例である。表に示すように、レーザー光、CCDカメラ、ラインセンサカメラなど、さまざまな手法が採用されている。なお、レーザー光を利用する手法に関しては、発電用水路トンネルや道路トンネルにおいて、鉄道トンネルよりも早く開発・実用化された。

これらの手法の中で、ここでは、JR東海とJR北海道において実用化されている1次元ラインセンサカメラを中心とした連続走査画像撮影システムについて概説する。

図3<sup>9)</sup>に、連続走査画像撮影システムによるトンネル壁面撮影の様子を示す。本システムの主な特徴の一つは、図4<sup>9)</sup>に示すようにトンネル延長方向に切れ目のない鮮明な画像が連続して得られるという点である。ただし断面方向は複数台のカメラで分割して撮影するので、一枚の展開画像とするために画像の重ね合わせ手法を開発した。具体的

には、トンネル壁面を撮影することで生じる幾何学的な歪みを補正し、映像間の相対的な位置ずれを検出・補正し、さらに重複して映っているダブリを除去している。なお、この撮影システムの開発に加え、変状展開図作成ツールの開発、ひび割れを抽出する画像処理アルゴリズムの開発・実用化も行われている。システムの基盤となる画像撮影装置は、鉄道総研が旧運輸省の補助金を受けて開発したものであり、トンネル覆工変状検知装置（トンネラス）は東海旅客鉄道㈱、川鉄情報システム㈱と共同で開発したものである。

これらの手法については、それぞれ一定の実用性を有しているが、さらに高度化を図るため、以下のような改良が課題となっている。

- ・ひび割れ検出の精度の向上
- ・ひび割れの進行性の抽出法の開発
- ・測定速度の一層の向上

### 3.2 打音および弾性波調査

ここでは、種々の方法で覆工コンクリート内に励起された20 kHz程度までの比較的low周波の弾性波またはそれに伴って発生する音波を用いた調査法に関して述べる。

#### (1) 鉄道総研式打音法<sup>9)</sup>

鉄道総研で開発している検査手法で、打撃によって発生する覆工コンクリートの振動を音としてとらえ、空洞や離離の有無、覆工の厚さに関して評価する手法である。

写真1が打撃装置および打撃音の収録装置および評価装置である。打撃装置は質量約80gで先端が球形の打撃部をゴムの張力で覆工面に衝突させる機構で、ほぼ一定の打撃が可能である。打撃音の収録部はマイクにフードを取付けた構造で、このフードを覆工面に押し当てて壁面の振動を音として収録する。

この手法では、打撃音の分析にウェーブレット変換を用いており、波形の任意の時間における各周波数成分の大きさ（振幅）を出力する。この値を、図5のように縦軸が周

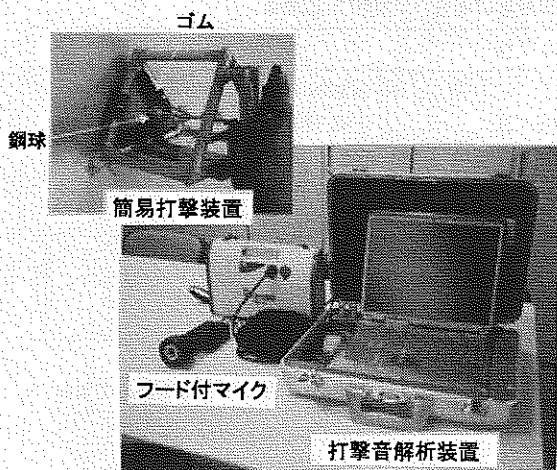


写真1 鉄道総研式打音検査装置

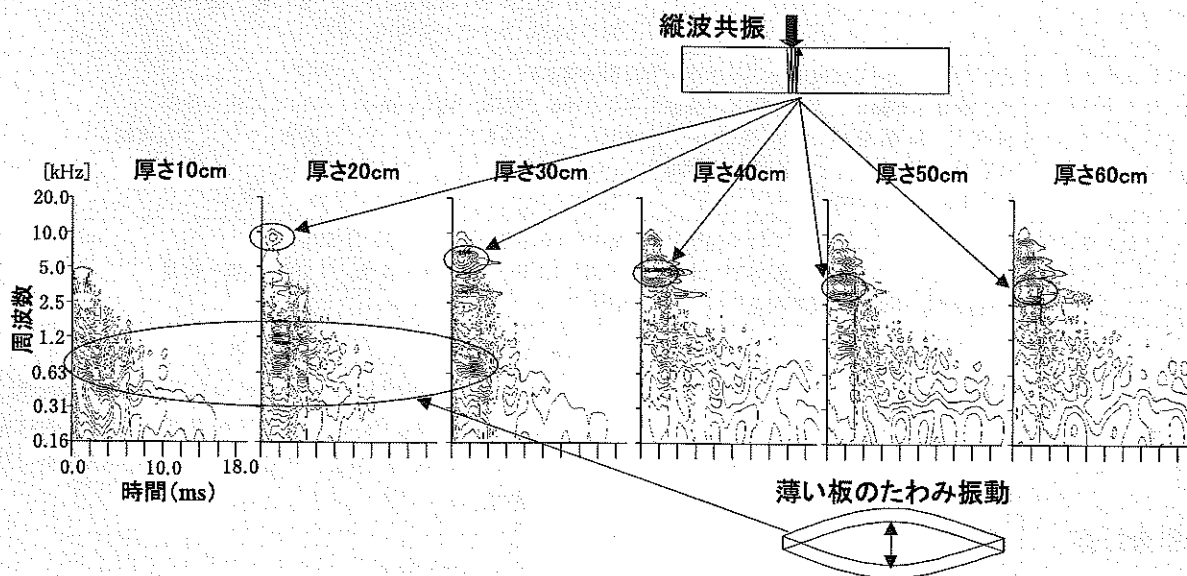


図5 10~60 cm 覆工模型における打撃音分析結果



写真2 測定状況

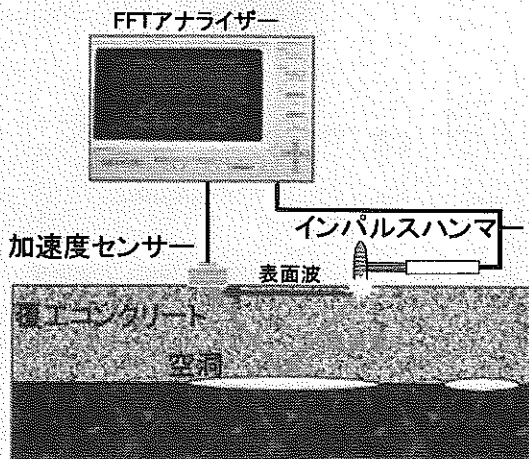


図6 測定原理と装置構成

波数、横軸が時間のグラフ上に等高線として表示したものを  
を用いる。

空洞などの欠陥部では打撃によって発生する振動が健全部より大きくなることを利用して欠陥を評価する。具体的には上記のウェーブレット変換で得られる振幅を用い、危険度1、危険度2、健全の3ランクに判別する。また、健全部では図5に示すように厚さごとに異なった帯域に現われる弾性波の縦波共振現象による卓越域を利用して覆工厚を評価する。

現在、現場実験等による評価基準の確認と平行して実用化に向けて小型化、軽量化の作業を進めている。

なお、本手法は旧運輸省の補助金を受けて開発した成果を反映したものである。

### (2) トンネル覆工非破壊検査装置<sup>5)</sup>

JR 東日本において開発された検査手法で、打撃によって

発生する 5 kHz 以下の弾性波の伝播時間や速度などから、覆工厚さや圧縮強度、空洞厚さを評価する手法である。この手法は、写真2、図6に示すようにインパルスハンマによる打撃で発生した弾性波を圧電式加速度センサでとらえ、FFTアナライザで解析する。覆工厚さはコンクリート背面からの反射波をとらえて求める伝播時間と表面波の伝播時間から求める弾性波速度の二つの値から算出する。圧縮強度は、密度および弾性波速度と一定の相関をもつことから相関式を作成しており、この式から算出する。また、背面空洞の厚さは空洞部分からの反射波の波高と相関があることから相関式を作成しており、この式から算出する。

JR 東日本では、これまでのハンマによる覆工内部の欠陥調査を代替できるトンネル覆工検査車を開発中であるが、この調査結果からトンネル構造体としての応力状態を詳細に把握する必要がある場合に、この調査技術を適用し、構造計算に必要なパラメータを得ることとしている。

### (3) トンネル覆工内部探査装置<sup>6)</sup>

JR 西日本において実用化が進められている検査手法で、1 kHz~10 kHz の弾性波を掃引させながら構造物表面を加振させ、構造物の応答を計測、解析することにより覆工内部のクラック・ジャンカ等の状態を診断するものである。

本手法は変状の状況により応答の性状が異なるため、受信子より得られる応答波形が異なることを利用している。変状の有無の判定は、式(1)に示すFFT処理された周波数応答値の二乗値(エネルギー相当値)を1000 Hz~1500 Hzの範囲で積分した  $L_{1500}$  と閾値との比較により行っている。図7に判定作業の流れを示す。

$$L_{1500} = \int_{1000}^{1500} (L_f)^2 df \quad (1)$$

$L_f$ : FFT 波形の周波数が  $f$  (Hz) の時のレベル値

図8は山陽新幹線トンネル内48カ所で得られた  $L_{1500}$  とその位置で削孔しコアの状態から判定した変状の有無との関係を示したヒストグラムである。図中の  $1.0 \times 10^{-5}$  以下はすべて「健全」となっていることから、この値を閾値としている。

この手法では変状の有無以外に変状の深さや、ジャンカとクラックとの判別も行うことができる。

写真3は診断システムによる測定状況で、JR 西日本では本システムは実用化レベルに達したと判断し、平成14年度より現場配備を行った。

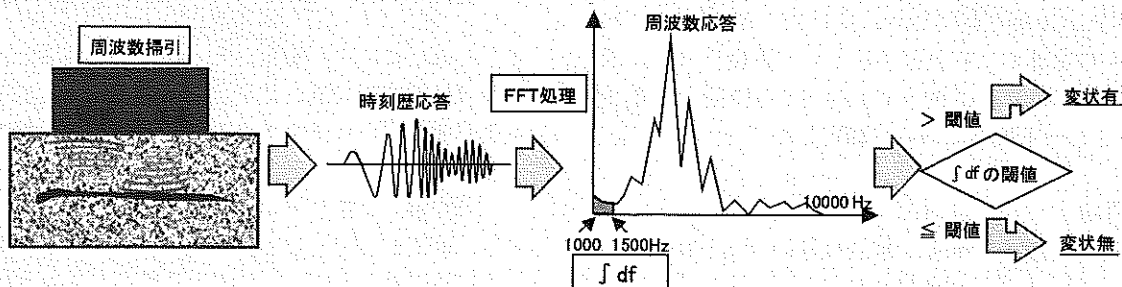


図7 変状の有無判定の流れ

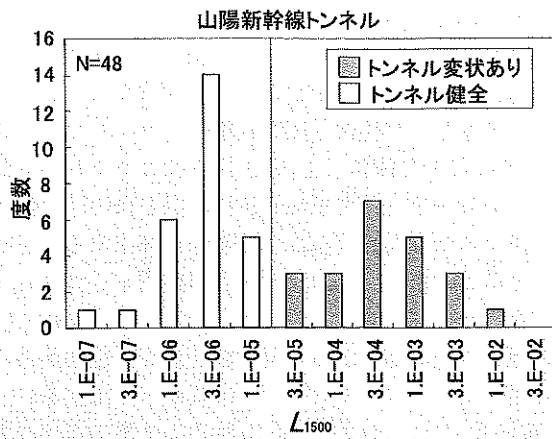


図8 変状の有無別の  $L_{1500}$  のヒストグラム



写真3 覆工内部探査装置による診断

### 3.3 電磁波法

鉄道分野において利用されている電磁波法（地下レーダー）は、一般的には目視や打音検査等で変状が発見され、さらに覆工内部の調査が必要となった際に使用される。手法自体はごく一般的な地下レーダー探査手法を用いているが、コンクリートを対象としていることからアンテナには数 100 MHz～数 GHz の周波数のものが使用されている。

図9は単線トンネル（在来工法で施工）の天端付近で断面方向に測定した事例で、支保工（H鋼）や矢板背面の空洞と想定される強い反射が確認された。さらに実際の調査目的以外に実験的に適用された事例として、シールドトンネルの二次覆工（RC構造）やレンガ覆工での例がある。二次覆工の場合はアンテナの大きさが鉄筋間隔より小さい場合に測定可能で、レンガ覆工の場合は乾燥状態でレンガ2～3層（20～30cm）裏の目地切れが確認できた。

また、これまでの2次元断面から3次元的にとらえられる手法も開発が進められており、適用深さがまだ20～30cmと浅いものの非常に有効な手法として期待される。図10は深さ10cmの位置に30×30×20cmの模擬空洞を設置したコンクリート模型において測定したデータである。

### 3.4 赤外線

剝離検知を目的とした新しい検査技術の一つとして、赤外線カメラを用いた手法があげられる。トンネル覆工内面は、ある狭い区間ごとではほぼ一様な温度分布になってい

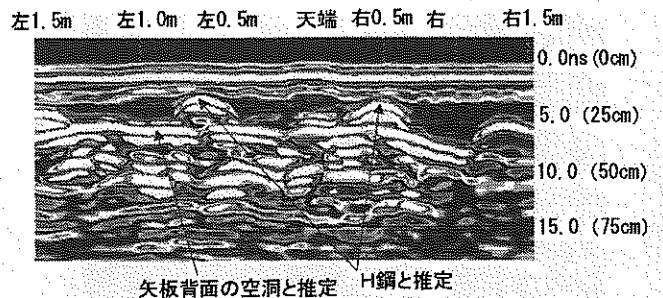


図9 単線トンネル（在来工法）における測定例

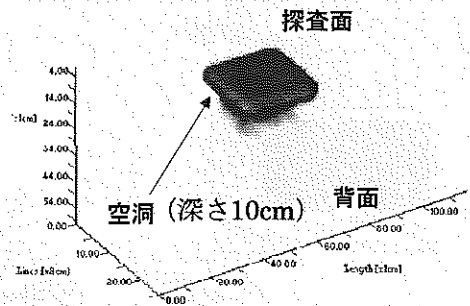


図10 30×30×20cmの模擬空洞を設置した測定例

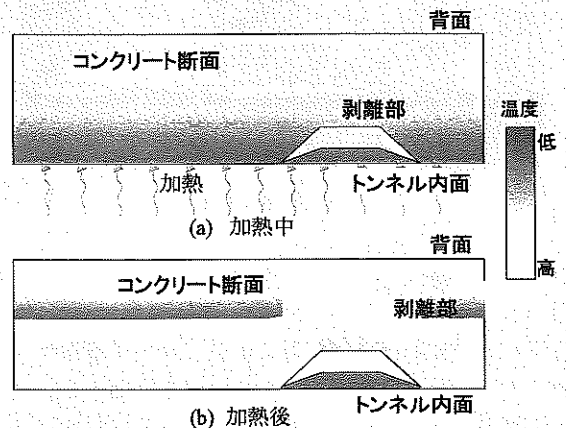


図11 赤外線を用いた剝離検知システムの概念

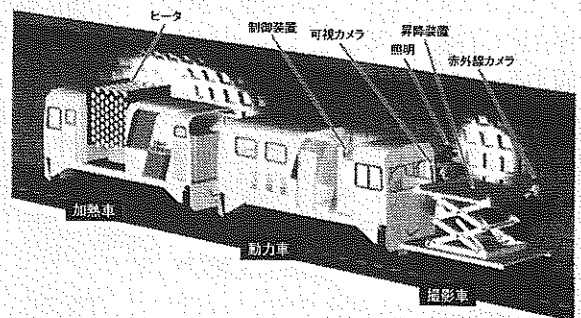


図12 赤外線を用いたトンネル壁面の剝離検知システム<sup>7)</sup>

る。これにヒーターを用いて一様に加熱すると、健全な部分では熱が背面に流れて覆工の温度がすぐに低下するが、剝離が生じている部分では、空気層によって熱が遮断されて温度が低下しにくい。この手法は、この温度差を赤外線カメラで検知することにより剝離の有無を判定するものであり、表面から見えない浮き等も検出できる（図11）。

営団地下鉄<sup>7)</sup>では、この技術を用いたトンネル検査システムを実用化している。ここでは、図12のように、ハロゲ

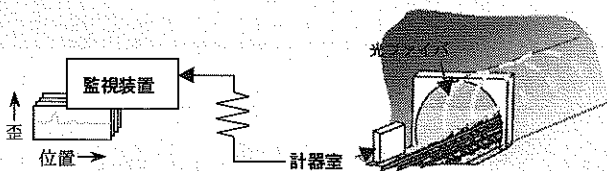


図13 光ファイバーを用いたトンネル変状監視システムの概念図

ランプを用いた加熱器、赤外線カメラ、可視カメラ(CCDカメラ)、照明器などを搭載した検査車を走行させ、得られた赤外線画像および可視画像を画像処理および画像合成することにより、自動的に変状展開図を作成している。

### 3.5 その他の検査技術

トンネル外の遠隔から、光ファイバーや導電塗料などを利用してトンネル覆工の動きを常時監視する方法も研究されている<sup>9)</sup>。前者は、光ファイバーをトンネル覆工に貼りつけ光の散乱によってひずみの発生位置と大きさを長距離に渡って計測するものである(図13)。トンネルのひずみ分布、ひび割れの発生あるいは補強・補修部分の剝離等がわかる。後者はトンネル覆工に導電塗料を帯状に塗布し、その両端で通電性をチェックするもので、ひび割れが生じると通電しなくなることを利用した検知方法である(図14)。安価にひび割れの発生とその時期を調べることができるが、場所の特定や変形の大きさまではわからない。現在、どちらの方法についても実用化に向けて実際のトンネル等で、確実性、耐久性、施工性等を検証しているところである。

## 4. おわりに

最近の鉄道トンネルの調査体系と新しい調査技術について述べてきた。

今後トンネルの維持管理はその量、重要性とも増大して

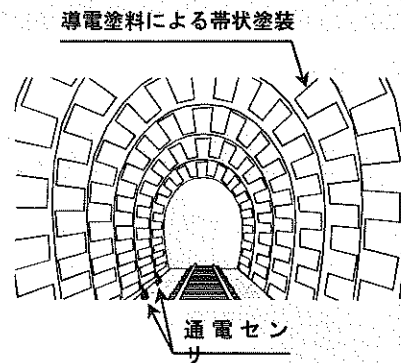


図14 導電塗料の塗布形状

いくことが予想されるが、それに対するリソースには限界がある。そこで、確実な調査と適切な手当てで、効率よくトンネルの安全な使用と長寿命化を図るため、検査、診断、補強、補修技術のさらなる発展が期待される。

### 参考文献

- 1) JTA 保守管理委員会：建設・保守管理へのフィードバック(1)変状事例からみた提案 連載講座、トンネルと地下、第29巻、5号、pp.69~78、1998.5.
- 2) (財)鉄道総合技術研究所：トンネル保守マニュアル(案)、2000.5.
- 3) 鶴飼正人：トンネル画像の自動重ね合わせと変状抽出画像処理、鉄道総研報告、Vol.15、No.1、pp.41~46、2001.1.
- 4) 榎本秀明・稲川敏春：トンネル覆工を対象とした打音検査手法の開発、鉄道総研報告、Vol.15、No.12、pp.39~44、2001.12.
- 5) 森島啓行：弾性波を使用したトンネル覆工非破壊検査技術の開発、日本鉄道施設協会誌、pp.46~48、1995.11.
- 6) 山田裕一：トンネル覆工内部探査装置、材料学会「コンクリート構造物の診断技術」講習会、pp.37~42、2001.10.
- 7) 石坂利一：赤外線画像によるトンネル検査システムの開発、日本鉄道施設協会誌、pp.16~18、1998.2.
- 8) 稲川敏春・岡田岳彰・六車崇司：トンネルの新しい検査技術、鉄道総合技術研究所、RRR、Vol.58、No.11、pp.26~29、2001.1.

# 高速道路におけるのり面の健全度調査技術

緒方 健治\*

## 1. はじめに

高速道路ののり面崩壊は、道路を利用する人はもとより、道路本体や周辺地域や社会経済に多大な影響をもたらす。しかし、のり面崩壊発生の予知はきわめて困難であることから、崩壊を未然に防止し被害を最小限にするためには、のり面の点検を効率的に行うとともに、現況ののり面の健全度を評価することにより崩壊危険箇所を特定し、危険箇所には監視を継続したり対策工を行ったりしていくことが必要である。

一方、切土のり面の性状は地形・地質・地下水状況などによって大きく異なるため、画一的な評価法や単純な計測だけで健全度を判定することは難しく、各機関において対象構造物に応じたさまざまな取り組みや研究が行われている。

ここでは、高速道路における切土のり面の健全度評価手法の現状について述べるとともに、最近開発されてきている新しいのり面監視技術について紹介する。また、のり面の管理を行ううえで重要となる、落石の危険度判定技術とグラウンドアンカーの健全度評価手法もあわせて紹介する。

## 2. 切土のり面の健全度評価手法

### 2.1 点検による健全度評価

高速道路における点検管理は、交通および第三者に支障を及ぼさないよう、道路の状況を的確に把握し、常時良好な状態に維持するために行うものである。また、点検は、のり面崩壊の原因となる損傷と、進行性のある損傷などを早期に発見・評価し、計画的な維持補修を行うための基礎的な資料を得るものである。

点検は、① 初期点検、② 日常点検、③ 定期点検、④ 詳細点検、⑤ 臨時点検の5つに区分される。

#### ① 初期点検

初期点検は、のり面の完成後の初期状況を把握するために道路供用開始前に近接目視および打音により行う点検で

ある。点検時には、あわせてのり面の建設時の変状や災害および補修履歴などの記録も収集整理する。

#### ② 日常点検

日常点検には、本線内点検と本線外点検の2種類がある。

##### (a) 本線内点検

本線内点検は、主に車上目視、車上感覚により、道路本線内から視認または体感できる範囲内の点検を行うものであるが、のり面に変状が認められた場合等には、必要に応じて降車し、近接目視あるいは遠望目視により点検を行っている。点検頻度は交通量に応じて異なっており、交通量が多い箇所(40,000台/日程度以上)では毎日行っている。

##### (b) 本線外点検

本線外点検は、一般道路から主に車上目視により、高速道路と一般道路等との交差・並行箇所等について第三者被害を防止する観点から行うものであり、必要に応じて降車し、近接目視あるいは遠望目視により点検を行っている。2~4回程度/年の頻度である。

#### ③ 定期点検

定期点検は、管理区間全体ののり面状況を近接目視あるいは遠望目視により全般的に把握し、今後の点検計画立案のための資料を得ることを目的としている。1年に1回の点検である。

#### ④ 詳細点検

詳細点検は、個々ののり面の状況を細部にわたって近接目視および打音により行う点検である。あわせて、点検結果等のデータをもとに補修計画の立案も行っている。

のり面においては、供用初期の段階での災害が多く発生していることから、第一回目の詳細点検は供用後2年以内に行い、その後は点検結果の損傷状況に応じて最大5年間隔で実施することとしている。

#### ⑤ 臨時点検

臨時点検は、日常点検では対応が困難な場合や、異常気象時など必要のつど行う点検である。

のり面においては、表1に示すような損傷・変状に着目して点検し、表2に示す判定区分でのり面の健全度を評価している。判定区分AAは緊急補修が必要な場合である。判定区分AとBは、どちらも損傷・変状がある場合である

\* 日本道路公団試験研究所 道路研究部土工研究室長

表1 点検箇所 (盛土のり面も含む)<sup>1)</sup>

点検箇所	点検部位	着目すべき損傷・変状の種類
一般のり面	—	崩落、亀裂・はらみ出し・陥没、肌落・ガリー侵食、小段などの堆積土、湧水、樹木の倒れ、植生の枯損、浮石・転石、親水植物の繁茂やのり面の軟弱化、レベルバンク部や暫定二車線の未舗装部の軟弱化
特殊のり面	コンクリートブロック枠・現場打ちコンクリート枠	ひび割れ・剝離、ゆるみ・はらみ出し・陥没、排水・湧水
	モルタル吹付け・コンクリート吹付け	ひび割れ・剝離、せり出し・はらみ出し・目地のずれ、空洞、排水・湧水
	コンクリート張り	ひび割れ・剝離、せり出し・はらみ出し・目地のずれ、排水・湧水
	落石防護網・落石防護柵	本体の損傷、付属物の損傷、腐食、基礎部の損傷、網背面などの堆積土
メーソンリー	コンクリートブロック積・石積・コンクリートブロック張り・石張り	ひび割れ・ゆるみ・はらみ、沈下・移動・倒れ、目地の異常、洗掘、排水・湧水
	蛇かご・ふとんかご	鉄線の切断・破損・腐食、変形
	コンクリートブロック井桁	ひび割れ・剝離、ゆるみ・はらみ出し
コンクリート擁壁	鉄筋コンクリート擁壁	ひび割れ・角落ち、剝離、鉄筋の露出・腐食、沈下・移動・倒れ、目地の異常、洗掘、排水・湧水
	無筋コンクリート擁壁	ひび割れ・角落ち、沈下・移動・倒れ、目地の異常、洗掘、排水・湧水
軽量盛土・補強土壁	—	ひび割れ・ゆるみ・はらみ、沈下・移動・倒れ、目地の異常、洗掘、排水・湧水
切土のり面	—	のり面後背地等の環境状況の変化
のり面排水施設	のり面排水溝・小段排水溝・のり面排水溝・縦溝・集水ます	本体の損傷、接続部不良、ごみ・土砂などの堆積、雑草による通水阻害

表2 判定区分<sup>1)</sup>

判定区分	一般的状況
機能面に対する判定	AA 損傷・変状が著しく、機能面から見て緊急補修が必要である場合
	A 損傷・変状があり、機能低下が見られ補修が必要であるが、緊急補修を要しない場合。または、調査が必要な場合
	B 損傷・変状はあるが機能低下が見られず、損傷の進行状態を継続的に観察する必要がある場合。
	OK 損傷・変状がないか、もしくは軽微な場合。
第三者等被害に対する判定	E 安全な交通または第三者に対し支障となる恐れがあり、緊急補修の必要のある場合

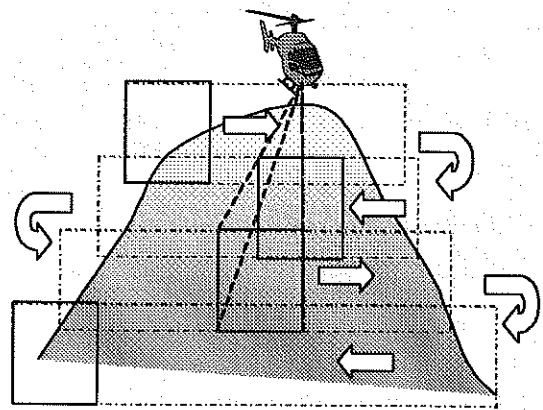


図1 航空撮影による点検のイメージ

が、緊急ではないが補修が必要な場合はA、当面は補修の必要がなく進行状態を観察すればよい場合はBと判定される。判定区分OKは、損傷がないかもしくは軽微で、補修も観察も必要ない場合の判定区分であるが、点検もれの防止や点検実施の記録を残すために設定されている。判定区分Eは、機能面に対する損傷の大小に関係なく、安全な交通または第三者に対し支障のある恐れがあり緊急補修の必要のある場合の判定区分である。

なお、これらの判定の標準(どのような損傷・変状のときにAAまたはAまたはBと判断するか)については、参考文献1)に記述されているので参考にされたい。

ところで、前述したように、のり面点検は主に点検員による車上目視や近接目視で実施されている。しかし、目視点検は変状箇所の状況を詳細に把握できるが、長大のり面においては多大な時間を要するばかりでなく、用地外を含む全体的な変状の把握が難しいという問題点がある。

これらのことを解決する新しい手法として、図1のようにヘリコプターからの航空撮影画像を用いて従来の目視点検の支援を行うことが検討されている。すでに現地において実験が行われ、以下のような結果が得られている<sup>2)</sup>。今後、航空撮影点検の実施時期、頻度、実施方法等、点検体系の中での位置づけを明確化していくことによって、活用が広がると思われる。

① コンクリート吹付けのり面や擁壁のひび割れは、開口幅1cm程度以上のものが判別可能である。

② コンクリート吹付けのり面における表面剝離は、おおむね1m×1m以上のものが判別可能である。

③ 後背地の状況や隣接地の開発や土地利用の変化などが確認できる。

④ 詳細点検で判定したAA区分およびA区分(表2参照)は100%抽出できる。

⑤ 所要時間は、現地作業がのり面1箇所当たり10分程度で、室内での判読作業が1時間程度であり、作業の効率化ができる。

## 2.2 崩壊要因の点数付けによるのり面健全度評価

点検による評価では、のり面内の部分的な箇所しか判定できない場合が多いのに対して、のり面全体の健全度を判

表3 融雪期ののり面の安定度調査表<sup>9)</sup>

項目	要因
地形	のり面と後背地 崖錘地形・崩壊跡地・地すべり地形 集水地形(集水型斜面) 台地または台地状地形
	後背地の変状 亀裂、段差 凹地、湧水 湿地(耐湿地性植物の繁茂)
土地・地質・構造	崩壊性の土質 新第三紀以降の未固結の土質(*) 上記と類似する土質(新第三紀以前)
	崩壊性の岩質 割れ目や弱層の密度が高い 浸食に弱い軟岩 風化が早い岩質・その他(蛇紋岩等)
	崩壊性の構造 流れ盤(層理面、節理面、弱線等) 構造線(断層や破砕帯等)、向斜軸付近 不透水性基盤上の土砂
のり面の状況	変状 (肌落ち・小落石・ガリ浸食・洗掘・パイピング孔・陥没・はらみ出し・根曲がり・倒木・亀裂・その他) 湧水状況(耐湿地性植物の分布) 表面の被覆状況
のり面形状	高さ、勾配
隣接のり面	隣接するのり面等の変状 (落石・崩壊・亀裂・はらみ出し・その他の変状)
供用年数	供用開始から現在までの年数

\* 瀬棚層、洞爺軽石流堆積物、長流枝内層などの下記に示すもの  
・火砕流堆積物、山砂、段丘堆積物等、主として砂質土からなる土質  
・シルト質砂、砂質シルト、シルト質粘性土等、細粒分の多い土質  
・未固結の崩壊土、落石・崩壊が多発しやすい当該地域特有の土質

定し、危険のり面を特定する方法としては、当該のり面が崩壊要因を所有しているかについて要因ごとに点数づけを行い、その合計点で全体の危険度を判定することが行われている。

その代表的なものが、道路防災点検で用いられている安定度調査表<sup>9)</sup>である。この調査表は、地形、土質・地質・構造、表層の状況、形状、変状の5項目(各項目ごとにそれぞれ崩壊要因が示されている)について評点を行い、最終的には対策工の状況や災害の履歴なども考慮にして、総合評価を行っている。

一方、道路防災総点検の調査表は全国の一般的な道路を対象としているため、現地状況や崩壊形態に応じて評価項目や評価の重みなどを修正し、のり面の判定に用いることも行われている。たとえば、北海道の高速道路では、特に融雪によるのり面災害の危険性を評価するための調査表が提案されている<sup>9)</sup>。これは、道路防災総点検の調査表の要因に対して、後背地の項目を追加したり、北海道に特有な地質を具体的に示すことによって、現地に即した判定ができるようになっている(表3参照)。

表4 変位・水位の計測機器

計測対象	計測項目	使用機器
地表面変動量	傾斜変動	地盤傾斜計
	土塊移動	地表伸縮計 ぬき板、移動杭、光波測量
地中変動	傾斜変動	設置型孔内傾斜計 挿入型孔内傾斜計
	土塊移動	地中伸縮計
		多層移動量計 パイプ歪計
水文観測	地下水位	地下水位計(接針式水位計、フロート式水位計、水圧式水位計)
	間隙水圧	間隙水圧計(カサグランデ型、圧気型、電気型)

表5 維持管理段階の管理基準値の例<sup>10)</sup>

計測機器	管理基準値の表記法	対応区分			
		点検・要注意 または 観測強化	対策の検討	警戒・応急 対策、通行止 めの検討	嚴重警戒・ 通行止
伸縮計	継続日数と その間の変 位速度	10mm以上 /30日	5~50mm /5日	10~100mm /1日	100mm以上 /1日
地中伸縮計					
光波測距儀					
孔内傾斜計	継続日数と その間のす べり面付近 の変位速度	1mm以上 /10日	5~50mm /5日	—	—
地盤傾斜計	継続日数と その間の累 積値	10~50秒 /10日	—	—	—

### 2.3 のり面の安定性評価モデル

のり面の安定性を評価し、崩壊位置や規模を事前に予測するための解析モデルとしては、数量化II類やファジイ理論やニューラルネットワークなどを用いた手法(たとえば、参考文献5)~7))が最近研究されている。

さらに、人工衛星データと地形・地質・土壌といった各種地理情報とを融合したモデルにより、道路区域外の広範囲な場所から崩壊危険箇所を推定する手法も提案されている<sup>8),9)</sup>。

### 3. のり面の監視技術

健全度評価によって危険と判定された箇所については、定期的な点検だけでなく、計器を用いて長期的な観測を行い、健全度を監視していくことが望ましい。計測を行う際には、予想される崩壊の素因、誘因、規模、範囲などを考慮したうえで効果的な機器の選定、配置、計測方法を決定する必要がある。

健全度を監視していくうえで計測すべき項目としては、変位量(地表、地中)と水位が主であり、表4に示すような観測機器によって計測が行われている。計測により健全

度を判定する際には、観測値に対する管理基準値が必要となるが、基準の例としては、地すべり地での1日当たりの変位量などが定められている(表5参照)<sup>10)</sup>。水位については、過去の最高水位や設計上想定した最高水位が基準として用いられているようである。

### 3.1 新しい調査技術

最近、センサ関連の新たな機器が開発され、のり面計測への応用が進められてきている。現在の時点で、すでに研

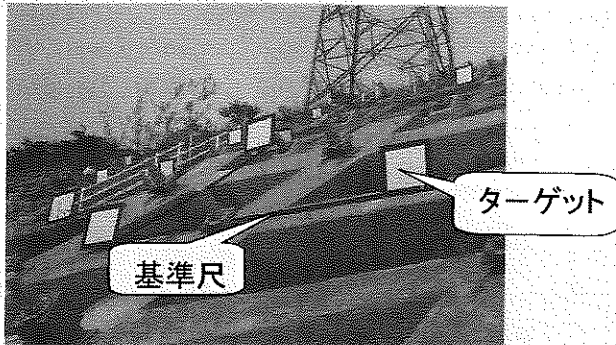


写真1 精密写真測量による変位計測状況

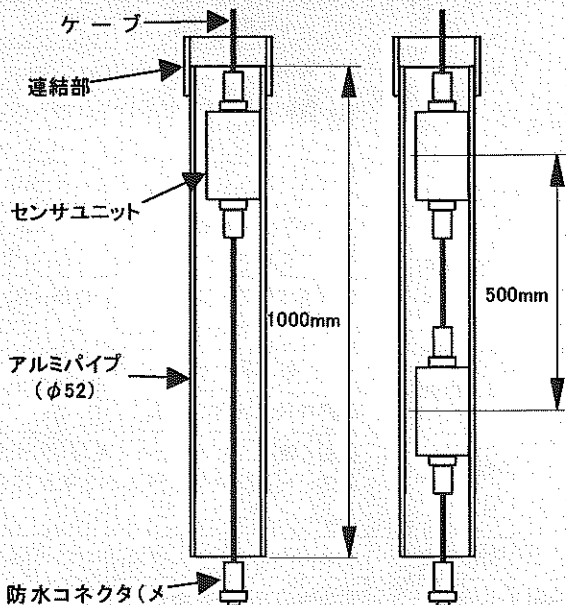


図2 加速度センサを用いた孔内傾斜計の概要

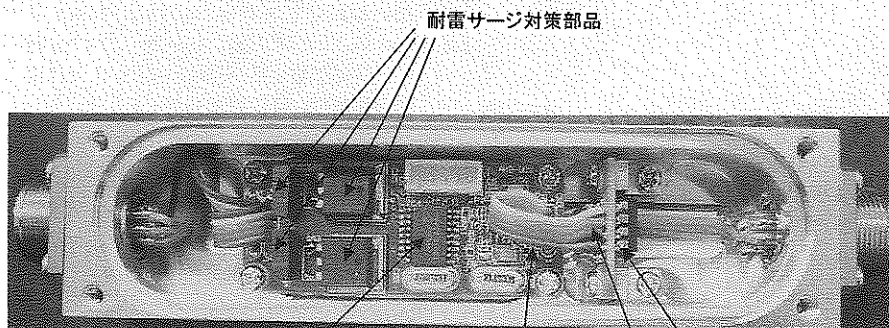


写真2 傾斜計センサユニット

究開発が行われていたり、今後有望だと思われる新しい機器としては、次のようなものがある。

#### 【地表面変動量の計測機器】

- ① GPS、② 光ファイバ、③ CCD画像解析、④ 精密写真測量、⑤ ノンプリズム型レーザ測距装置、⑥ 電磁波、⑦ マイクロ波

#### 【地中変位量・変位位置の計測機器】

- ① AEセンサ、② MS計測、③ 感圧ケーブル、④ 光ファイバ、⑤ 加速度センサ

#### 【土中水分変化・地下水位・含水量の計測】

- ① 誘電率計測器、② 光ファイバ

この中から、高速道路への適用を計画している精密写真測量と加速度センサを用いた傾斜計について、以下に紹介する。

### 3.2 精密写真測量によるのり面変状計測

現在、維持管理における日常点検は主に車上からの目視により行われており、のり面の変位を面的かつ定量的に確認することはできない。そのため、崩壊の兆候を発見することは非常に困難である。また、のり面に変位計測機器を多数設置し計測すると多大な費用を要する。そこで、精密写真測量によつてのり面の変位を面的に計測し、点検・管理の効率化を図ることを検討している。精密写真測量による計測では、対象斜面にターゲットおよび基準尺(長さ情報)を設置して、デジタルカメラを使用して数十枚の写真を撮影し、3次元座標の計算をすることによって変位量を把握できる。高精度で広範囲な計測ができ、かつ計測コストを抑えることが可能である。また、撮影位置を固定する必要がないことから取扱いが簡単である。すでに、トンネルや切土のり面において十分な精度があることが確認されており<sup>11)</sup>、高速道路においても大学に研究委託を行い、地すべり現場において計測を実施し点検業務への適用性を検証している(写真1)。今後実用化に向けたシステム構築を予定している。

### 3.3 加速度センサを用いた傾斜計

地すべり地や崩壊の危険性が大きい場所では、地中変位を計測し、斜面の動きを監視して崩壊の前兆をとらえることが重要である。地中変位の計測には、地中傾斜計が主に用いられているが、地中傾斜計には、プローブ(傾斜感知部)を手動で計測深度に合わせて計測する挿入型傾斜計とプローブを固定する設置型傾斜計がある。挿入型傾斜計は、手動で計測深度を合わせるため計測深度が微妙に異なり計測データに誤差が生じることや積雪量が多い場所では手動計測が困難になるといった問題が



あった。また、50 mm 程度の変形が生じるとプローブが挿入できなくなり計測が不能になるといった問題がある。一方、設置型傾斜計は挿入型傾斜計のような問題はないが、固定する計器のコストが高いため、経済性や耐久性を考慮すると多数の地点で計測を行うことが難しい状況であった。

しかし、近年におけるマイクロマシニング（半導体微細加工）技術の発達によって、超小型、低価格の加速度計（加速度センサ）が開発され、傾斜を経済的に自動計測できるようになったため、地中傾斜計への適用が可能となった。加速度センサは静電容量式を使用しており、 $0.02^\circ$  の分解能を有し、 $\pm 20^\circ$  の角度まで計測ができる。図 2 に加速度センサを用いた孔内傾斜計の概要図を、写真 2 にセンサユニットの様子を示す。センサ部は傾斜方向、斜面直角方向のセンサ 2 個と温度センサからなり、温度による補正ができ

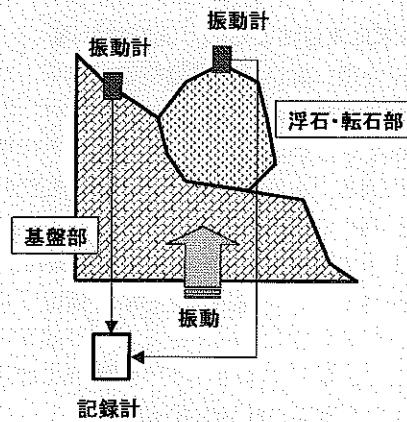


図 3 振動特性による落石危険度調査の概要

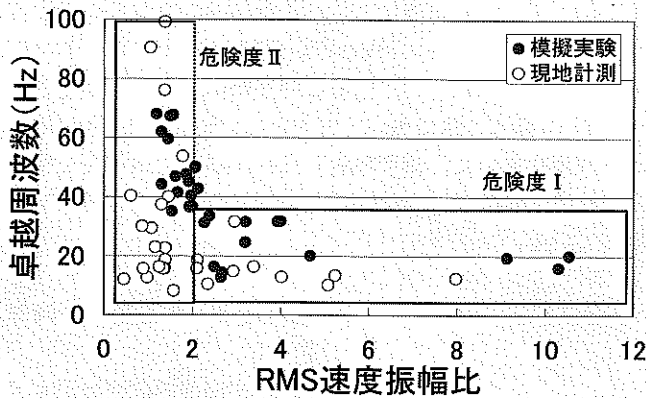


図 4 RMS 速度振幅比と卓越周波数<sup>(3)</sup>

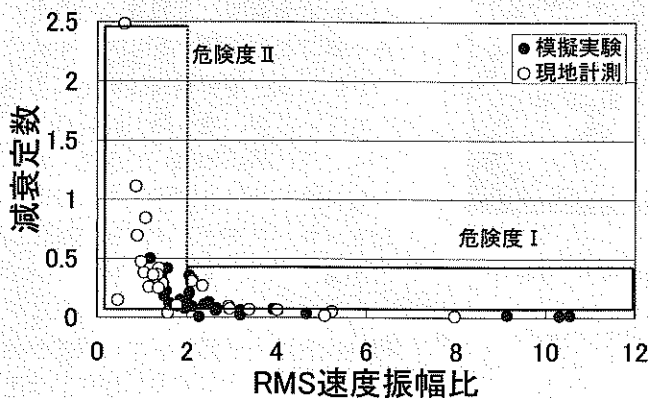


図 5 RMS 速度振幅比と減衰定数

る。地中傾斜計としての適応性については、高速道路の建設現場においてすでに確認されており<sup>(2)</sup>、また耐久性の面でも期待ができることから今後実務での計測に役立つものと思われる。

#### 4. 落石の危険度評価技術

従来の落石調査は、落石対策便覧等に基づき、主に地質専門家が中心となり、現地踏査、地形図・空中写真の地形判読、物理探査、調査ボーリング等によって、浮石や転石（以下「浮石部」という）の安定状態、石の形状、斜面の状態、路線の環境等の項目ごとに広範囲な点数式の評価を行

表 6 グラウンドアンカーの健全度評価区分

対象部材	調査項目	評価区分	
		記号	評価内容
定着具	錆, 腐食	I	著しい錆, 腐食がある。
		II	軽微な錆, 腐食がある。
	異物の混入 (くさび)	I	著しく異物が混入している。もしくはくさびのばらつき等がある。
		II	多少異物が混入している。
	くさびのすべり	I	引き抜けたり、定着具がはずれたりしている。
		II	引張材のすべりが認められる。
ナットセット状況	I	適切な角度で設置されていない。十分にかみ合っていない。	
	II	設置角度などの問題から、今後かみ合わせが悪くなる可能性がある。	
引張材	錆, 腐食	I	著しい錆, 腐食がある。
		II	軽微な錆, 腐食がある。
	破断・破損	I	破断・破損が認められる。もしくは破断・破損に発展する可能性のあるキズ等がある。
	切断方法	—	ガス, カッター, 工場加工などを明記
	余長	—	引張材の余長を計測し, 明記
	残存引張り力	I	残存引張り力がテンドンの許容引張り力ないし設計アンカー力に対し 120% より大きい, または 90% より小さく, かつ引張材余長に作業しろが見込めない, または再緊張作業中に降伏荷重を超えるもの。
I or II		残存引張り力がテンドンの許容引張り力ないし設計アンカー力に対し 120% より大きい, または 90% より小さいが, 引張材余長に作業しろが見込める, または再緊張作業中に降伏荷重を超えないもの。	
防 護 工・受 圧板	中性化	I	中性化深度が 10 mm 以上
		II	中性化深度が 10 mm 未満

評価区分 I：現状でまったく機能しない。もしくは著しい機能低下が認められ、対策・補修を行ってもその機能の復元が認められないもの。

II：機能回復は認められるが、対策・補修することによりその機能を復元でき、かつ、保持することができる。

い、総合的に危険度判定を行ってきた。このため従来の落石調査では、専ら地質専門家の経験的判断に依存することが多く、落石原因の複雑さと相まって、定量的な判断基準に基づく落石危険度判定法はまだ確立していないのが現状である。

そこで日本道路公団では、浮石部の振動特性に着目した落石危険度判定調査法の研究を進めてきた<sup>13)</sup>。この調査法は、近傍の道路交通振動等の雑振動、またはカケヤによる打撃等の強制振動を振動源として、不安定な浮石部の振動性状と、直近の岩盤または地盤（以下「基盤部」という）の振動性状との相対的な違いから、浮石部の落石危険度を判定しようとする方法である（図3参照）。不安定な浮石部は基盤部と比べ揺れやすく、揺れ幅も大きい。また、一度揺れ始めると揺れが収まりにくい性状がある。これらの性状から不安定さを判断するものである。

模擬実験データと現地で実際に計測したデータから、RMS速度振幅比（浮石部の振動記録と基盤部の振動記録のうち、振幅の大きさをRMS平均（自乗した平均の平方根）し、比率で評価した値）と卓越周波数と減衰定数を危険度の指標として用いることにより、浮石部の不安定さをある程度評価できることがわかった（図4、5参照）。

今後、データ数が増加するにしたがって、よりよい精度の判定ができるものと思われる。

## 5. グラウンドアンカーの健全度評価手法

グラウンドアンカーは、大きな緊張力を導入することによって斜面を安定させているため、腐食等によりテンドンが破断すれば重大な事故につながる可能性がある。そのため日常的に維持管理を行い、その機能を維持していくことが重要である。

しかしこれまでアンカーの検討は、設計や施工に重点がおかれ、維持管理段階でのアンカーに対する具体的な評価手法はほとんどなかったのが現状である。

日本道路公団では、アンカーの点検・管理の重要性を鑑み、表6に示すような健全度評価区分でグラウンドアンカーを管理する必要があると考えている。

グラウンドアンカーは、その構造のほとんどが地中にあるため、目視により点検が可能なのは、アンカー頭部の防護キャップ部分のみであり、定着具、引張材の腐食状況や緊張荷重などを十分に把握することはできない。そのため、点検により防護キャップ部分、近接構造物およびのり面などに何らかの異常・変状・損傷が確認された場合、点検より一歩進んだアンカーの健全度調査の実施を検討する必要がある。

アンカーの健全度調査は、アンカー頭部の防護工を除去して頭部定着体を詳細に観察・照査（腐食状況、セット状況、破断・破損、前回調査との比較など）し、さらに必要

に応じて緊張荷重を計測することとしている。

## 6. おわりに

のり面崩壊は、素因や誘因が複雑にからみあうことから、その発生原因を特定するには高い技術力を要する。未崩壊のり面の健全度を的確に判定することはそれにもまして難しいといえる。判定にあたっては現場技術者の経験や知識に拠る部分が大きいことから、今後現場技術者を支援するシステム（たとえばGIS）などの開発や人材育成制度の確立が重要になってくるとと思われる。

また、のり面についても今後、アカウンタビリティ（説明責任）の重要性が増してくるものと思われる。現在、国土交通省においては、「新道路技術五箇計画」のなかで岩盤・斜面崩壊のリスクマネジメント技術の開発を進めている<sup>14)</sup>。ここでは、ハザード評価技術の構築、斜面モニタリング技術の開発、リスクマネジメント技術の検討などが行われており、これらの成果が待たれるところである。

### 参考文献

- 1) 日本道路公団：道路構造物点検要領(案)，2001. 4.
- 2) 岡本 拓・濱田達也・本村 均：航空撮影を用いたのり面点検手法の検討，日本道路公団試験研究所報告，2001. 11.
- 3) 建設省道路局：平成8年度道路防災点検要領，(財)道路保全技術センター，1996.
- 4) (財)高速道路技術センター：融雪期ののり面防災に関する検討報告書，平成13年3月.
- 5) 大林成行・小島尚人：自然シラス斜面の地盤特性を考慮した崩壊危険箇所評価手法の一提案，土木学会論文集，No. 609/VI-41，pp. 123-136，1998. 12.
- 6) 西邦 正・古川浩平・中川浩二：ファジィ理論を用いたのり面崩壊要因および崩壊可能性の評価について，土木学会論文集，No. 445/III-18，pp. 109-118，1992. 3.
- 7) 菊池英明・古川浩平・奥園誠之・西岡 勲：n時間幅雨量を用いた切土のり面の豪雨時の崩壊予測精度に関する一考察，土木学会論文集，No. 644/VI-46，pp. 55-66，2000. 3.
- 8) 大林成行・小島尚人・田山 聡・竹本 将・伊代田尚志：斜面崩壊危険箇所評価におけるIKONOSデータの適用可能性について，日本リモートセンシング学会第29回学術講演会論文集，pp. 45-46，2000. 11.
- 9) 大林成行・小島尚人・松山裕幸・竹本 将・伊代田尚志：斜面崩壊危険箇所評価におけるASTERデータの適用性，日本リモートセンシング学会第30回学術講演会論文集，pp. 239-240，2001. 4.
- 10) 日本道路公団：土質地質調査要領，p. 189，平成4年4月.
- 11) 大西有三：デジタルカメラによる精密写真測量システムの開発，土木施工，vol. 42，No. 5，2001. 4.
- 12) 佐藤重樹男・緒方健治・松山裕幸・根津正弘：マイクロマシニング技術を利用した加速度センサーによる斜面の動態観測，土と基礎，vol. 50，No. 6，pp. 4-6，2002. 6.
- 13) 竹本 将・松山裕幸・緒方健治：振動特性を利用した落石の危険度調査手法の検討（模擬実験と現地計測の評価），日本道路公団試験研究所報告，vol. 38，pp. 9-15，2001. 11.
- 14) 三木博史：岩盤・斜面崩壊のリスクマネジメント技術の開発，土木学会誌，vol. 87-5，2002. 5.

# 建築物の健全度調査技術

あき やま とも あき か ど ゆう じ  
秋山 友昭\*・加登 勇司\*

## 1. はじめに

建築物は、構造種別で大きく分けると（鉄骨）鉄筋コンクリート造建築物、鉄骨造建築物、木造建築物に分けられる。

近年、コンクリート構造物の劣化が早期に発生する傾向が見られ、（鉄骨）鉄筋コンクリート造建築物の耐用年数に少なからず影響を与えている。ここでは、このような状況にある（鉄骨）鉄筋コンクリート造建築物の健全度調査に

表1 コンクリート構造物の調査項目とその手法<sup>6)</sup>

調査項目	調査手法
1. ひび割れ	
a) 長さ	・スケールなどによる測定
b) 幅	・クラックスケール、ルーペなどによる測定
c) 幅の変化	・ひずみゲージ、コンタクトゲージなどによる測定
d) 深さの変化	・はつり取りによる測定、超音波による測定、コア採取による調査
2. コンクリートの品質	
a) 中性化深さ	・フェノールフタレイン、pH計による測定
b) コンクリートの強度	・超音波伝播速度測定、コアによる圧縮強度試験、シュミットハンマーによる強度推定
c) 配合・化学分析	・コアによる配合・化学（塩分）分析
d) 反応性骨材	・ゲルおよび反応環の確認、コアによる膨張量の測定
3. 鉄筋の調査	
a) かぶり厚さ、鉄筋径	・はつり取りによる測定、鉄筋探査機による推定、放射線透過による推定
b) 鉄筋の腐食	・はつり取りによる測定、自然電極電位法による推定
c) 鉄筋の降伏強度	・切り取り鉄筋片の引張試験
4. 変状の調査	
a) たわみ	・オプティフォー、変位計などによる測定
b) 振動	・振動計、加速度計による固有振動数、減衰定数の測定
c) 応力	・計算書による応力照査 ・応力測定

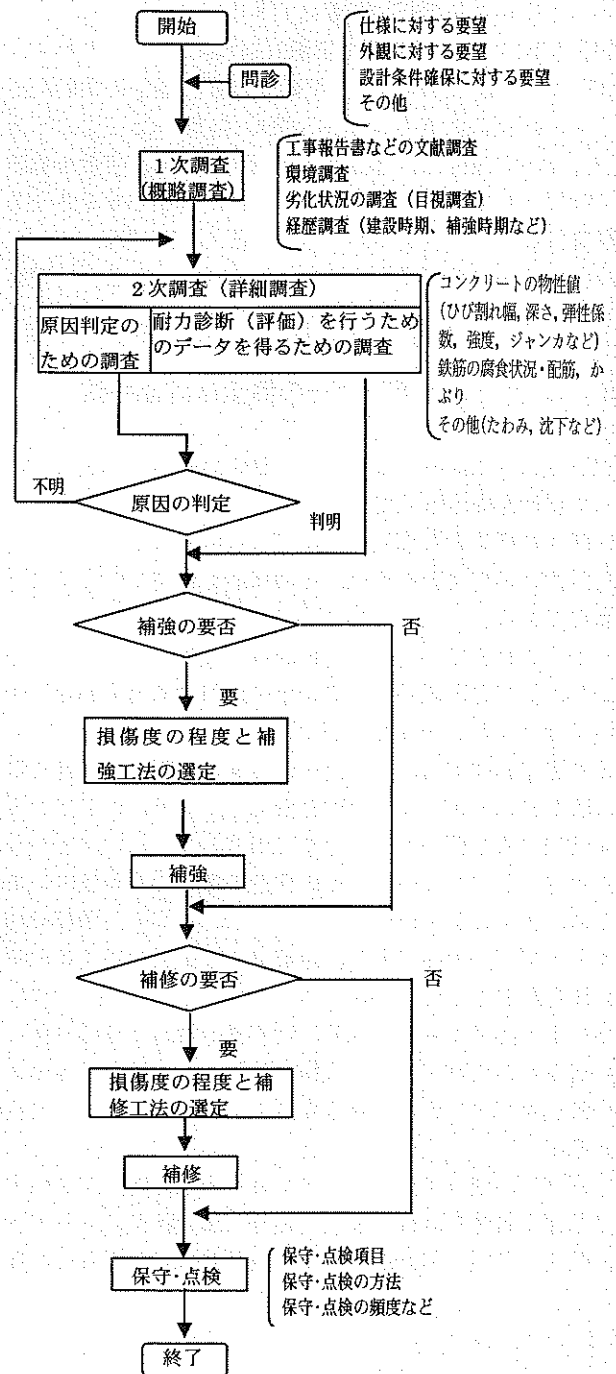


図1 RC 構造物の健全度調査フローチャート

\* (株)東京ソイルリサーチ 構造調査設計事業部

ついて紹介する。

## 2. 調査の概要

健全度調査とは、外観上に何の変状も生じていない時点で構造物にどのような欠陥が存在するかをチェックし、その結果に基づいて構造物の保全に関して、最も適切な処置を講じようとするものである。

コンクリート構造物において現在行われている健全度調査のフローチャートの例を図1に示す。

健全度調査では、一次調査（概略の損傷調査）による損傷程度の把握、それに応じた二次調査（詳細調査）の実施、およびその結果から原因の判定、補強・補修の要否の判定、補強・補修方法の選定を行う。コンクリート構造物の調査項目とその手法を表1に示す。

以下にこれらの調査方法を記す。

## 3. 調査

### 3.1 ひび割れ調査

#### (1) 非破壊調査

##### (a) 外観目視調査

外観目視調査は、劣化症状の有無および劣化現象の種類を調べ、劣化度を把握することを目的に行う。調査は、スケール、クラックスケール、ハンマー、双眼鏡、カメラ、照明器具などを用い、目視観察、打診により行う。

外観目視調査では、以下の項目について劣化症状の有無、発生箇所および程度を調査する。

- ① ひび割れ（パターン、幅）
- ② 仕上げ材のはらみ
- ③ 剝落・欠損（鉄筋の露出）
- ④ 表面の状態（錆汁、汚れ、エフロレッセンス、漏水跡等）
- ⑤ 表面の脆弱化

調査方法は主として直接目視によるが、状況に応じて双眼鏡、望遠鏡などによる間接目視を行う。また、クラックスケール、ルーベ、物差しなどを使った簡単なひび割れ長さ、幅の寸法測定も行う。

##### (b) 直接（間接）目視

調査者が直接調査壁面に1 m以内に接近することのできる場所を、肉眼で調査する方法である。この場合、ひび割れ等の調査にそつた事項を確認することが主であり、それぞれの劣化現象の確認と、必要な場合はルーベやクラックスケール等でひび割れの計測を行う。また、異常が確認された部分については、指触による観察も行う。ただし、調査者が、壁面などに接近できない場合（調査時に足場が設置されていない場合）は、光学機器（双眼鏡など）を用いた間接的な目視法を用いる。

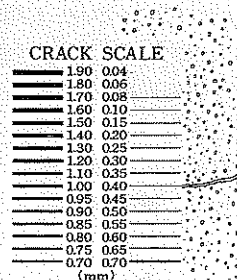


写真1 クラックスケール

光学機器を用いる場合は、ある程度離れた場所より調査するため、光学機器の性能並びに仰角などにより調査限界がある。

##### (c) デジタルカメラ

目視調査に代わる方法として、デジタルカメラで撮影したデジタル画像を用いてその劣化状態を判断する方法である。デジタルカメラで調査する場合、従来の目視調査による調査に対して望遠レンズを使つての望遠目視や劣化状態の数値化の点で有利であるが、間接目視法で述べたように、調査に限界がある。また、現時点では、コンクリート表面の汚れが少ない良好な状態で、ひび割れ幅が0.2 mm以上のものに限られている。

##### (d) 長期的挙動調査

ひび割れ幅の挙動を調べるためには、ひび割れ部分にひび割れを跨いでひずみゲージ、コンタクトゲージを取り付けて、長期的にひび割れ幅の測定を行う。

ただし、ひび割れ幅は、コンクリートの温度、湿度の影響を受けて変動するため、測定値の取り扱いには注意が必要である。

## (2) 微破壊調査

一般的な建築物は、モルタルなどの仕上げがあり、直接コンクリート躯体のひび割れを目視観察することができない。よつて、ここでの調査は、一部の仕上材を除去して、直接コンクリート面のひび割れ等の劣化を観察、測定することである。

## (3) 破壊調査

コンクリート表面に発生したひび割れ等の劣化がコンクリート躯体面にどの程度深く生じているかを調査するために、コンクリートの劣化部分をはつるかコア採取などを行い、劣化の深さ方向への影響を調べる。

### 3.2 コンクリート強度調査

#### (1) 非破壊調査

##### (a) 反発硬度法（シュミットハンマー法）

この方法は、コンクリート表面をシュミットハンマーにより打撃して、反発度を測定し、この反発度から圧縮強度を推定するものである。

シュミットハンマーには、普通コンクリート用（N型、NR型）、軽量コンクリート用（L型、LR型）などの種類がある。この方法は、比較的表面に近い部分のコンクリート強度推定を行うものであり、その強度は一般にコンクリート表面の影響を受けやすい。このため、その打撃点位置での強度を推定するには、密に測定点（20～25点程度）を設けて行うことが必要である。

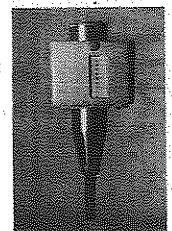


写真2 シュミットハンマー

##### (b) 超音波伝播速度法

超音波伝播速度法は、コンクリートの一端に接触させた測定端子から発信した超音波が、コンクリート中を透過し、

対向するもう一方の端子に達するまでの所要時間および両端子間の距離を測定して音速を求め、音速と圧縮強度との関係図表を用いて、圧縮強度を推定する方法である。この方法は、発受振子間の透過線上の平均的な強度を推定するものであり、局部的な欠陥が内在している場合には、実際のコンクリート強度よりも小さく評価される場合があるので留意する必要がある。

### (2) 微破壊調査

微破壊調査とは、コンクリートを局部的に破壊して、強度を推定する試験法である。

#### (a) 小径コアによる圧縮強度

小径コア(φ20~50 mm)をコンクリート躯体から採取して圧縮強度試験を行い、圧縮強度を推定する方法である。小径コアは、標準コア(径75~100 mm)に対して径が小さいため、骨材による影響が圧縮強度に大きく影響するため、標準コア(1本/1箇所)に対して3本/1箇所採取し、圧縮強度試験を実施する。

小径コアの切取り位置は、切取り作業により構造上の害を受けない部分とする。壁、柱では、特別な目的のない場合、原則としてコンクリートスラブ面より1 m程度の位置で行う。ただし、打ち継ぎの上下50 cmの範囲を避けることが望ましい。

小径コアの切取りは、湿式のコンクリートコアドリル(回転数600 r.p.m以上のコンクリート専用で携帯型)を用いて行う。その際、供試体の破損、粗骨材の緩みを防ぐため、コアビットに作用するトルクを小さくすることが重要である。切り取るコアの長さは、コンクリート表面より50 mmを除いて、直径の2倍の供試体が作製できることを目安とする。

#### (b) アンカーの引抜き試験

この方法は、埋め込まれたアンカーを引き抜き、その引抜き力からコンクリート圧縮強度を推定する方法である。調査方法は、調査箇所にメカニカルアンカー(直径14 mm)を深さ35 mm程度埋め込み、センターホール式の引張試験機により引張試験を行うものである。

### (3) 破壊調査

破壊調査とは、コンクリートを比較的大きく破壊して試料を採取し、コンクリート圧縮強度を調査する方法であり、標準コア(径φ75~100 mm)による圧縮強度がこれに当たる。コンクリート躯体から径75~100 mmのコンクリートコア(長さが最低でも径以上)を採取し、圧縮強度試験(圧縮強度試験を行うには、採取されたコアを整形して円柱形にする。この円柱形の高さとの比が最低でも1:1になる必要がある)を行うことにより、直接コンクリート圧縮強度を得る。

## 3.3 コンクリートの中性化調査

コンクリートは打設当初、強アルカリであるが炭酸ガスにより中性化(炭酸化)し、強アルカリにより保護されていたコンクリート中の鉄筋が錆びやすい環境になる。

### (1) 微破壊調査

#### (a) ドリル削孔粉を用いた中性化試験

この中性化試験は以下の方法により行う。

- ① モルタルあるいはタイルなどの仕上げを撤去した壁・柱・梁などのコンクリート側面に垂直にドリルを支持し、電気ドリルを回転させてゆっくりと削孔する。
- ② 削孔開始前に、試験紙(濾紙に卓上噴霧器等を用いてフェノールフタレイン溶液を吸収させて作製)を削孔によるコンクリート粉が落下する位置にセットする。
- ③ 試験紙は落下したコンクリート粉が1箇所集積しないようにゆっくりとずらし、落下したコンクリート粉が試験紙に触れて赤色に変色したとき、直ちに削孔を停止する。
- ④ ドリルの刃を孔から抜き取り、ノギスのデプスパーと本尺の先端を用いて孔の深さを測定し、それを中性化深さとする。

なお、試験箇所は、相互に5 cm程度離して3個とし、その平均値を中性化深さとする。

### (2) 破壊調査

#### (a) コンクリートコアによる中性化試験

コンクリートコアを構造躯体から採取して、採取したコアにフェノールフタレイン溶液を噴霧して中性化深さを測定する。アルカリ性(PH>10)であると赤色反応をするフェノールフタレイン溶液をコンクリートに噴霧し、赤色反応を示さない部分を中性化領域としてスケールで測定して、中性化深さを調査する。コンクリートコアについては、強度試験用に採取したコアで中性化試験を行うことも可能である。

#### (b) はつりによる中性化試験

コンクリート躯体を電動ピックなどではつり取り、はつり面にフェノールフタレイン溶液を噴霧して中性化試験を行う。はつり深さは、鉄筋と中性化深さの関係を見るため、鉄筋のかぶり厚さ(コンクリート表面から約5.0 cm程度)以上行うことが望ましい。

## 3.4 コンクリート塩分量調査

塩化物イオン量を対象にして試験する場合、関連事項として建物周囲の環境条件(特に海岸からの距離、風に関する情報)、方位、建造物の屋内か屋外か、仕上材の有無などを事前または塩化物イオン量試験実施の前後に調査する。

### (1) 微破壊調査

#### (a) ドリル削孔粉を用いたコンクリート中の塩分量調査

この調査は以下の方法により行う。

- ① モルタルあるいはタイルなどの仕上げを撤去したコンクリート躯体面に電動式振動ドリルを用いて、直径10 mm程度の孔(3箇所)を削孔し、その時に生じるコンクリート粉を受け皿により全量採取する。
- ② 採取した削孔粉を指触で粒を感じない程度まで乳鉢により粉碎し、試料とする。
- ③ コンクリート削孔粉試料を1.0 g、精製水を50.0 ml計り、これらを試験管に入れ、塩化物イオン抽出装

置で、50°Cに保って10分間、可溶性塩化物イオンを抽出する。

- ④ 試験管の上澄み溶液をビーカーに移し、塩化物量測定器で、水溶液の塩化物イオン濃度をコンクリート（フレッシュコンクリート）モードにて、測定する。

なお、この方法は、ドリルによりコンクリート粉末を採取するときに、粗骨材量が少なくなりやすく、やや過大な評価になる場合がある。

(2) 破壊調査

構造躯体よりコンクリート片をはつり取るか、あるいは径φ75mm以上のコンクリートコアを採取する。このように、採取されたコンクリートより鉄筋の近傍部分を塩分分析の試料にする。この試料を粉砕機を用いて標準ふるいの149μmを全通するように粉砕し、粉末試料にする。これを乾燥させた後、粉末に硝酸溶液を加え、加熱煮沸して全塩分を溶解した後、不溶分をろ過洗浄する。ろ液の全塩化物イオンを測定する。

3.5 鉄筋腐食調査

(1) 微破壊調査

(a) 自然電極電位法

コンクリート中における鋼材の腐食は、一般に電気化学反応によって生じており、鋼材は腐食状態に応じた電位分布を示す。自然電極電位法はコンクリート中の鋼材とコンクリート表面上の照合電極との電位差を測定し、非破壊的に鋼材の腐食状態を把握しようとするものである。

ASTMでは、電位E(単位は飽和硫酸銅電極基準での電圧(V))が測定されたその箇所での鋼材の腐食状態は次のように表わしている。

電位測定値 E (V vs CSE)	評価
$-0.20 < E$	90%以上の確率で腐食しない
$-0.35 < E \leq -0.20$	不確定
$E \leq -0.35$	90%以上の確率で腐食する

実建物での調査結果によると、ある程度のばらつきはあるものの、鉄筋腐食度の大きい場合には、とくに卑な(低い)電位が測定されることや、電位の急変部があることが確認されている。

(2) 破壊調査

(a) はつりによる露出鉄筋の直接目視観察

構造躯体であるコンクリートをはつり、鉄筋を「十」字形、「角」形、「L」字形に露出させる。露出した鉄筋を目視観察して、表7の腐食度評価基準に応じてグレード付けを行う。この際、鉄筋の径、かぶり厚さも測定しておく。

3.6 鉄筋のかぶり厚さ調査

(1) 非破壊調査

(a) 鉄筋探査機による方法

鉄筋探査機には、レーダ探査法と磁気探査法との2つの方式があり、いずれもコンクリート中に配置されている鉄

筋の位置と方向、鉄筋のかぶり厚さ測定および鉄筋径の推定が可能である。これらの測定原理としては、レーダ探査法はレーダ波を鉄筋まで伝播させ、その反射波を測定する方法であり、磁気探査法は磁気を送信し、受信器でこれを再びキャッチし、計器内のコイルに生じた電圧量を測定する方法である。

調査は、鉄筋のかぶり厚さ、鉄筋径を測定したい位置で鉄筋探査機を移動させて行う。測定限界は、おおむね深さ200mm程度である。コンクリート状態によっては、探査できる深さは小さくなる。また、コンクリート表面に仕上材があると、その仕上材を含めたかぶり厚さの測定となる。

(b) X線撮影

X線撮影は図2に示されるように、対象物の一方の側からX線用フィルムまたは蛍光物質を塗布した蛍光板を配置し、もう片方よりX線発生装置で放射線を照射して行われる。X線が物体を通過する際に、その物体に吸収される割合は透過する物質によって異なり、コンクリート構造物ではコンクリート中の鉄筋とコンクリートそのものだけを通過した放射線の強さに差ができる。この差がフィルム上では、濃度の差として現われる。ただし、測定厚さの限界は300mm程度である。

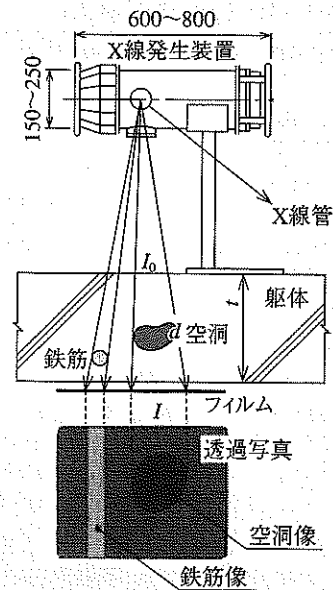


図2 X線撮影状況

X線撮影を行う場合は、他の試験と異なり、人的また物的な障害に対する安全管理が特別に必要な。また、撮影は電離放射線障害防止規則で規制されるエックス線作業主任者の有資格者の管理のもとに行わなければならない。

(2) 破壊調査

コンクリート躯体をはつり、鉄筋を「十」字形、「角」形、「L」字形に露出させる。露出した鉄筋についてコンクリート表面からその鉄筋表面までをスケールで測定する。

4. 評価

4.1 外観目視調査

この調査は主に1次調査として行われる。ここで得られ

表3 症状別劣化の区分

		劣化区分			
ひび割れ	鉄筋沿い	軸方向筋	無	有(鉄筋露出無)	有(鉄筋露出有)
		補助筋	無	有(鉄筋露出無)	有(鉄筋露出有)
	開口周辺		無	有(鉄筋露出無)	有(鉄筋露出有)
	網目状		無	有(鉄筋露出無)	有(鉄筋露出有)
	その他		無	有(鉄筋露出無)	有(鉄筋露出有)
浮き		無	有	有(無数)	
剥落	仕上材のみ		無	有	有(無数)
	コンクリート	鉄筋露出なし 鉄筋露出あり	無 無	有 有	有(無数) 有(無数)
表面の状態	さび汚れ		無	有	有(無数)
	エフロレッセンス		無	有	有(無数)
	ポップアウト		無	有	有(無数)
	表面脆弱化		無	有	有(無数)
	その他汚れ		無	有	有(無数)

表4 コンクリート強度の判定<sup>9)</sup>

劣化度区分	区分の基準
劣化度Ⅰ	設計基準強度を満足している。
劣化度Ⅱ	部分的に設計基準強度を満たしていない。 (強度の最小値が0.8~1.00 $F_c$ )
劣化度Ⅲ	設計基準強度を満たしていない。

表5 中性化深さの判定<sup>9)</sup>

測定値による区分	区分の基準	
	屋外・土に接する部分	屋内
劣化度Ⅰ	中性化が鉄筋の表面までまだ進行していない(かぶり厚さの平均値の0.5倍以下)	中性化が鉄筋の裏側までまだ進行していない(かぶり厚さの平均値の0.7倍以下)
劣化度Ⅱ	中性化が少数の鉄筋の表面まで進行している(かぶり厚さの平均値の0.5倍以上, かぶり厚さの平均値未満)	中性化が少数の鉄筋の裏側まで進行している(かぶり厚さの平均値の0.7倍以上, かぶり厚さの平均値に20mm加えた値未満)
劣化度Ⅲ	中性化が半数以上の鉄筋の表面まで進行している(かぶり厚さの平均値以上)	中性化が半数以上の鉄筋の裏側まで進行している(かぶり厚さの平均値に20mm加えた値以上)

表6 コンクリートの塩化物量の判定<sup>9)</sup>

劣化度区分	区分の基準
劣化度Ⅰ	フレッシュコンクリートの基準である0.6 kg/m <sup>3</sup> 未満である。現在の発錆の危険性はない。
劣化度Ⅱ	0.6 kg/m <sup>3</sup> 以上で、限界塩化物イオン量1.2 kg/m <sup>3</sup> 未満である。現在の時点では鉄筋の発錆の危険性はないが、飛来塩分による塩化物の増加および中性化に伴う塩化物の移動により、将来さびる心配があり、継続的な診断が必要である。
劣化度Ⅲ	限界塩化物イオン量1.2 kg/m <sup>3</sup> 以上である。

た結果は、表3の症状別劣化の区分に従い各面ごとの劣化症状としてまとめる。

#### 4.2 コンクリート強度

躯体コンクリートの設計基準強度( $F_c$ )を満足しているか否かを主な判断基準として評価を行う。なお、設計基準強度が不明な場合は、建設当時の一般的な設計基準強度を評価の目安とする。

#### 4.3 コンクリートの中性化

コンクリートの中性化深さは、鉄筋のかぶり厚さとの関係で評価を行う。劣化度は、表5に示す中性化深さの測定値による区分で評価する。

#### 4.4 コンクリートの塩化物量

躯体コンクリート中の塩化物イオン量が1.2 kg/m<sup>3</sup>未満であるか、それ以上かによって評価を行う。

#### 4.5 鉄筋の腐食

鉄筋腐食の評価は表7の評価基準により行う。

表7 鉄筋腐食度評価基準<sup>9)</sup>

劣化度区分	グレード	評価基準
劣化度Ⅰ	I	腐食がない状態、または表面にわずかなさびが生じている状態
	II	表面にさびが広がっている状態
劣化度Ⅱ	III	さびが広がって面さびとなり、部分的に浮きさびが生じている状態
	IV	浮きさびが広がって生じ、コンクリートにさびが付着し、断面積で20%以下の欠損が生じている箇所がある状態
劣化度Ⅲ	V	厚い層状のさびが広がって生じ、断面積で20%を超える著しい欠損を生じている箇所がある状態

#### 4.6 鉄筋のかぶり厚さ

かぶり厚さの不足は、単独の要因ではなくコンクリートの中性化や塩化物イオンの存在など、他の要因と組み合わせた複合的な劣化の要因となるため、必ず他の調査項目と合わせて評価を行う。

かぶり厚さの不足は、劣化として考えるのではなく建築物が初期の状態から保有している耐久性を左右する要因である。

#### 4.7 健全度の評価

##### (1) 評価方法

一般に構造物に生じる欠陥は種々の要因があり、その現象も複雑である。欠陥の原因を調査し、構造物の耐荷性、耐久性、変形性などの機能全般および美観性について検討し、補修の必要性を判定することが必要となる。

耐荷性の検討には、安全度をチェックすることが必要である。その方法は①ひび割れ幅をもとに、鉄筋の応力度を

算出する方法、②欠陥による欠損断面を考慮し、鉄筋、コンクリートの応力度を検討する方法、③コア採取によりコンクリートの強度をチェックする方法、④載荷試験によって耐荷力を測定する方法などである。

耐久性は、鉄筋の腐食の進行度が問題となるのでひび割れ幅、ひび割れ深さ、塩化物量が鉄筋の腐食やコンクリートの中性化に及ぼす影響の程度を検討する必要がある。

変形性は、ひび割れなどそれ自体の原因によるものと基礎などの不同沈下や水平移動などの原因によるものとがある。

### (2) 補修の要否の判定 (ひび割れに対する判定方法)

ひび割れがどの程度まで許容されるかについては、構造物の重要度、機能面などによって異なり、基準がまちまちであるが、補修の要・不要の判定を行うひび割れ幅の限度を表8に定めている。

ひび割れの発生が、コンクリートまたは鉄筋の断面積不足に起因している場合は、原則として補修しなければならない。また、応力的にコンクリートまたは鉄筋の断面積が満足している場合は、荷重の再検討を行い、少し様子を見て、補修の要否を決める。

表8 補修の要否に関するひび割れ幅の限度<sup>2)</sup>

区分	環境 その他の 要因	耐久性からみた場合			防水性から みた場合
		きびしい	中間	ゆるやか	—
(A) 補修を必要とするひび割れ幅 (mm)	大	0.4 以上	0.4 以上	0.6 以上	0.2 以上
	中	0.4 以上	0.6 以上	0.8 以上	0.2 以上
	小	0.6 以上	0.8 以上	1.0 以上	0.2 以上
(B) 補修を必要としないひび割れ幅 (mm)	大	0.1 以下	0.2 以下	0.2 以下	0.05 以下
	中	0.1 以下	0.2 以下	0.3 以下	0.05 以下
	小	0.2 以下	0.3 以下	0.3 以下	0.05 以下

注：1) その他の要因 (大、中、小) とは、コンクリート構造物の耐久性および防水性に及ぼす有害性の程度を示し、下記の要因の影響を総合して定める。ひび割れの深さ・パターン、かぶり厚さ、コンクリート表面被覆の有無、材料・配 (調) 合、打継ぎなど。  
2) 主として鉄筋の発生条件の観点からみた環境条件

### (3) コンクリート構造物の全般に対する判定

コンクリート構造物全般の健全度の判定区分としては、各調査結果に対する劣化の進行予測 (速度) を考慮しない

表9 劣化状況の評価<sup>3)</sup>

段階	状態	劣化の進行 速度が不明
健全期	劣化は進行しておらず、通常どおりの使用が可能	I
進展期	潜在的に劣化の恐れがあり、点検強化などの措置が必要	II
加速期	劣化が進行しており、早急な対策を講じることが望ましい	III
劣化期	劣化が顕在化し、構造安全性、日常安全性に問題がある、早急な対策が必要	

場合、調査結果の劣化度区分に応じて、表9により評価される。なお、進展期、加速期の判断を明確にすることは難しい。

補修・補強は、劣化期の場合には必要があり、進展期の場合には、それぞれの状況に応じて判断する必要がある。

## 5. おわりに

既存のRC構造物の健全度調査としては、構造物からコアを採取したり、一部はつり取ったりする局部破壊試験、破壊試験が劣化状況を直接確認できる最も有用な方法である。

しかし、この方法は試験後の修復が必要なことや、費用が高くなるなどのため、多くの箇所では実施することは難しい。一方非破壊検査は、図1のフローチャートに示したように、現状では、問診や1次調査に引き続き実施される2次調査において実施され、コンクリートや鉄筋の健全度評価の際の検討資料として用いられるが、それだけの調査で十分満足いく調査結果を与えているとはいえない。ただし、今後、健全度 (耐久性) 調査すべき建物数は増加することが、予想されることから、調査方法についても、非破壊あるいは微破壊による調査が、今後ますます増大するものと考えられる。

## 6. 健全度 (耐久性) 調査事例

### (1) 調査建物概要

鉄筋コンクリート造事務所ビル (〇〇県)  
海岸からの距離 4.5 km, 昭和 40 年竣工  
3階建て (桁行5スパン, はり間3スパン)  
外壁仕上げ (モルタル+リシン吹付け)

### (2) 1次調査

1次調査：建物資料 (工事報告書) 調査, 建物目視調査  
(a) 1次調査の結果：(調査票参照)

- ・建物資料調査の結果、設計基準強度 180 kgf/cm<sup>2</sup>, その他の材料諸元については不明である。
- ・目視調査の結果、柱、梁の一部に鉄筋に沿ったひび割れがあり (打診調査で浮きが生じていた), 外部の柱に鉄筋露出が確認された。内部の床スラブ下端に鉄筋露出が確認されたほか、腰壁、垂れ壁にひび割れが確認された。

### (3) 2次調査

(b) 2次調査の調査項目：

- ・経過年数、地域性から海砂使用の可能性、鉄筋に沿ったひび割れなどから、中性化深さの測定、塩分量測定、鉄筋の腐食調査、かぶり厚さ測定を行うこととした。
- ・地域条件、建物目視調査結果から他の調査項目については、問題なしとした。

調査方法としては、コンクリートコアを各階2本採取する。鉄筋に沿ったひび割れが見られた部分ではつりを行い、中性化深さ測定、塩分量測定試料の採取、鉄筋の腐食調査、かぶり厚さ測定を行う (塩分量測定は室内試験室で行う)。



