

コンクリート構造物と非破壊検査

JR東日本研究開発センター テクニカルセンター 森島啓行 尾高達男



当社の営業キロは、約7,500km、新幹線で約1,050km、在来線で約6,470km、毎日、約1,600万人のお客様に利用されています。土木構造物については、在来線で営業キロの6%が高架橋などで、8%がトンネル、新幹線で高架橋などが58%、トンネルで36%となっており、大部分がコンクリート構造物となっています。本稿では、鉄道建設におけるコンクリート技術の歴史の変遷を振り返りながら、これまで導入した非破壊検査技術と開発中の非破壊検査技術を中心に、今後のコンクリート構造物検査の切り札とも言うべき、非破壊検査技術の現状と課題について報告します。

1 鉄道建設におけるコンクリート技術

コンクリートの起源は、はるか昔、古代ギリシャ、ローマ時代に遡ります。当時、火山灰、石灰岩の粉末を混合し、水道橋などの石組積構造物の接着剤として使用していました。18世紀中頃にイギリスのジョン・スミートンが石灰岩の粉末に粘土を混合すると水硬性セメントになることを発見しました。その後、19世紀に同じく、イギリスのジョセフ・アスプディンがポルトランドセメントとして始めて、特許をとりました。ポルトランドという名はポルトランド諸島で産出する石によく似ていることから命名されたものです。

日本では、明治初期に初めて輸入されましたが、設計施工技術が未成熟で、レンガトンネル(図1)、レンガ橋、石積の橋台や橋脚の接着剤等に使われたのが始まりでした。鉄道開業時、レンガ構造物が中心でしたが、コンクリート設計、施工技術の進歩と共に、各地でコンクリート構造物が建設されるようになりました。



図1：東海道線清水戸トンネル(1887年建設)
鉄道営業線で最古のレンガトンネル(左側)

現存するものを中心に挙げると、1913年に品川、八ツ山で初めて、鉄筋コンクリートの土留め擁壁が建設されました。ついで、1915年に内房線鋸山トンネルで初めて、



図2：内房線山生(やもめ)橋りょう

現場打コンクリート覆工トンネルが施工されました。橋りょうでは、1919年に東京・お茶の水間で鉄筋コンクリートのアーチ高架橋が、1920年に内房線山生(やもめ)橋りょうで鉄筋コンクリートのT形桁橋がそれぞれ、初めて建設されました。これらの構造物は約90年経た現在もなお、健全な状態で鉄道営業に使用されています。

この他、PCコンクリート(プレストレストコンクリート)のI形桁橋が昭和29年に初めて、当時の信楽線第一大戸川橋りょうで施工されました。その後、戦後の高度経済成長に伴う交通基盤設備の整備や新幹線の建設などにより、大規模な高架橋、長大トンネルなどのコンクリート構造物が大量に建設され、現在に至っています。

2 コンクリートの特徴と劣化現象

コンクリートは、(図2)のように砂利(粗骨材)、砂(細骨材)、セメント、水の主要な材料の他に気泡連行剤のような少量の混和剤を混合攪拌してつくります。この砂利、砂などのできる隙間の大きさに応じて骨材で相互に隙間を埋め、残る小さな隙間をセメントと砂と水でできたモルタルで充填し硬化することで骨材間のバインダー(結合剤)の役割を果たし、コンクリート全体で強度を発揮します。

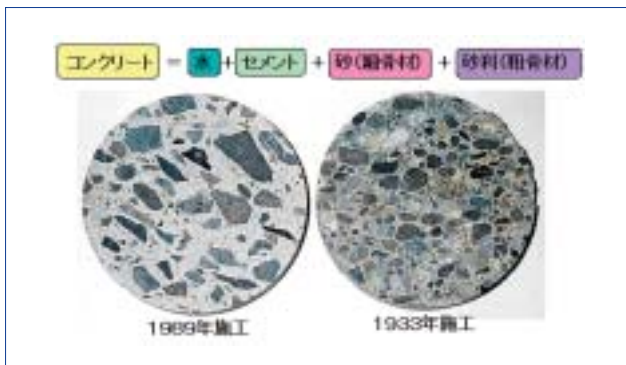


図3：コンクリートのマトリクス構造

このようなコンクリートは、圧縮力に対する強度は大きいですが、引張力に対する強度は圧縮に対する応力の1/5から1/10程度になってしまいます。そこで、考えられたのが鉄筋コンクリート構造です。これは、構造物を設計する場合、圧縮側に力が働く部分はコンクリートが応力を分担し、引張側に力が働く部分には、鉄筋をコンクリート中に配置して、鉄筋が引張応力を分担する構造とするものです。この鉄筋の代わりに高張力鋼（PC鋼線）を使用し、部材断面に予め圧縮力を導入し、荷重載荷時に部材断面全体に引張応力が発生しないようにしたものがプレストレストコンクリート構造です。このように、鉄筋コンクリートやプレストレストコンクリート構造とすることでコンクリートの材料特性上の弱点を補完し、より大規模で複雑なコンクリート構造物が建設されるようになりました。

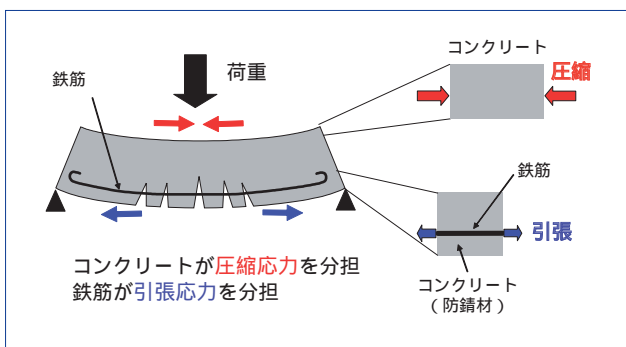


図4：鉄筋コンクリートの原理

3 コンクリートの劣化

コンクリート構造物の主要な劣化、変状に、中性化、塩害、凍害があります。これらは、すべて表面からコンクリートを劣化させるもので劣化が進展することで、内

部に配置されている鉄筋が発錆、腐食していきます。その際、鉄筋の体積が膨張する力でコンクリートにクラックを発生させて剥離、落下させることとなります。また、鉄筋の腐食が広範囲に進展することで耐荷性能が低下することにもなります。

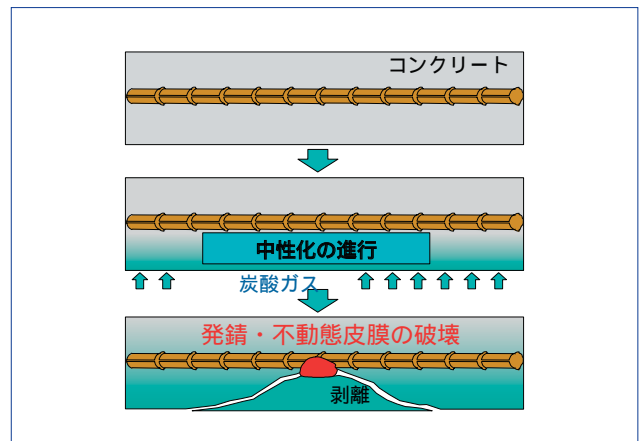


図5：中性化のメカニズム

中性化とは、コンクリートが本来もっているアルカリ性の性質が中性になってしまう現象です。コンクリートはアルカリ性であることで、内部の鉄（鉄筋、PC鋼線）を腐食から守る機能を果たしていますが、中性となることで、鉄を錆から保護している膜（不動態皮膜）が破壊され、錆が出やすくなります。この原因は空気中の二酸化炭素、雨水中の酸性化合物の影響で表面から徐々に中性に変化していくものです。

塩害とは、塩分によるコンクリートの害で、海浜に近い環境で海風、波浪により塩分がコンクリート表面に付着して発生する、飛来塩分に起因するものと、脱塩が不十分な海砂を使用することにより発生する、内部塩分に起因するものがあります。いずれの場合も雨水、湿分の浸入とともに塩分が浸透、拡散し、鉄筋を錆びさせるものです。

凍害は、コンクリート内部に残存する水分が寒気により凍結と融解を繰り返す、凍結による膨張圧で表面から徐々に砂利とモルタルの境界面を破壊するものです。この現象は、地域的に限定されるもので、年間での凍結と融解の繰り返し回数の多い個所に多く発生します。

以上のような劣化現象は、一つの原因だけで発生するのではなく、雨水の流下と湿分の浸透などの環境条件と施工管理上の問題個所などの条件が重なり、発生する場合が大部分です。

4 コンクリート構造物の検査

コンクリート構造物は、大別して、鉄筋コンクリート、プレストレストコンクリートと鉄筋等を使わないコンクリートだけの無筋コンクリートに分けられます。

鉄筋コンクリートは、コンクリート内部に配置してある鉄筋の腐食（発錆）が最も大きな問題となります。特に橋りょう、高架橋等ではその規模が大きくなるにつれて、鉄筋を多数、複雑に配置する必要があり、雨水が流下、浸透し易い部分では発錆し易い環境となっています。しかし、表面からは鉄筋発錆の状態及び進行が把握できず、表面にクラックが発生するか、錆汁が浸出していくような状態となり初めてわかる場合が大部分です。また、コンクリート表面の部分が鉄筋の発錆で剥離してくると、不意に落下する可能性が高くなることから、コンクリート表面の剥離落下の検査も重要な項目となっています。また、PCコンクリートの場合、その構造上コンクリート内部に常時圧縮応力が発生していることから強度の検査が重要です。

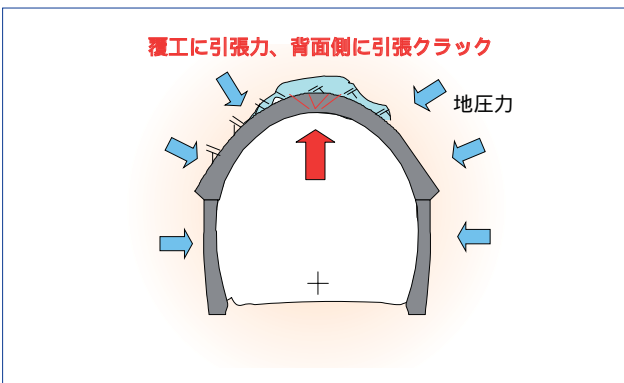


図6：トンネル覆工の力学的挙動

無筋コンクリートは、主としてトンネルの覆工に使用されています。覆工は掘削した地山からの岩石の落下、押し出しなどからトンネル内空部分を保護するためにある構造物で、馬蹄形もしくは円形に近い断面のチューブ状構造物です。これは、地山からの圧力を構造物全体に均等に受けることで安定する構造となっており、覆工断面方向に対して常に圧縮力が作用するよう設計されています。

しかし、施工時の問題から覆工厚さが均一でない場合やと地山の間で大規模な空洞がある場合に、覆工全体にわたり均等に圧縮力がかからず、局部的に引張力がかかり、クラックが発生することがあります。そこで、トン

ネル検査では、覆工の厚さ、強度、覆工と地山の空洞部分の検査が必要となってきます。また、トンネル内部を高速で列車が走行することから高架橋と同様にコンクリート片の剥離、落下の検査も重要な検査項目です。



図7：高架橋のだ音検査

5 検査の問題点

土木構造物は、半永久的な使用が前提であり、そのための構造物設計法、施工法、材料を採用しているため、通常の使用状態では大きな破損、損傷が発生し難いものとなっています。問題点としては、第一に、変状、損傷は長い期間をかけてすこしずつ進行する傾向があるため、変状進行の予測、通常使用に対する影響度合いの判定が難しいこと。第二に、大規模かつ複雑な形状の構造物が多く、遠隔個所からの目視検査が難しく、至近距離検査には高所足場や高所作業車が必要であり作業効率が悪いこと。第三に、線路内部からの検査は、列車運行終了後に、架線に流れる電気を停止させた限られた時間で実施せざるを得ないこと。



図8：コンクリート覆工ボーリング

また、トンネルの場合、内空側から覆工コンクリート内部や背面側の見えない部分を検査せざるを得ないため、ボーリングコアによる破壊検査等が必要となり、1箇所のデータをとるのに時間とコストがかかること。などの問題点があります。

6 非破壊検査導入の効果

非破壊検査は文字通り、検査対象構造物を破壊せずに検査できることから、破壊検査方式に比較して短時間に多くの検査データを得ることができます。大量の検査データをパソコンで解析できることにより、モデル解析による定量的評価に基づいた詳細な診断が可能であり、同時に効率的に構造物の保守管理ができるところに大きなメリットがあります。

例えば、高架橋の場合、至近距離から打音していたコンクリート表面の剥離検査に熱赤外線カメラを使用することにより、遠隔箇所から、短時間に広範囲の検査でき、高所作業車、足場等が不要となります。

また、トンネルの場合、弾性波等を使用した検査技術でコンクリート覆工厚さの分布、背面側地山の空洞分布、コンクリートの平均的強度を測定して、トンネル覆工構造体モデルの数値解析をすることで実際の挙動に近いコンクリートの応力、変位等が算出できます。このことにより、従来、経験則などを含めた定性的な診断となっていたトンネル検査が、構造物の変状実態に対して、論理的な根拠をもつ定量的評価からの検査診断をすることができます。

7 コンクリート構造物に対する非破壊検査技術

7.1 鉄筋腐食診断装置（自然電位法による鉄筋検査）

鉄筋コンクリート構造物の耐久性上の問題は発錆による鉄筋腐食です。コンクリート内部で鉄筋の腐食が進行し、錆で膨張した鉄筋がコンクリートを剥離させるレベルまで進んでいけば、目視、打音検査等で明らかとなりますが、剥離現象を起す前の段階での鉄筋腐食状況や範囲は良くわかりません。このような劣化現象は、数年程度以上の期間錆びやすい環境にあることで発生します。その場合、周辺も発錆の進行状態にあるか、錆びやすい環境にある可能性が高く、このまま放置すれば、錆による鉄筋コンクリートの劣化は時間とともに広がってゆく

こととなります。

この検査は目視検査では困難なため、従来、コンクリート表面を部分的にはつり出して検査していました。そこで、この検査を簡易に効率的に実施するために開発し、導入しました。

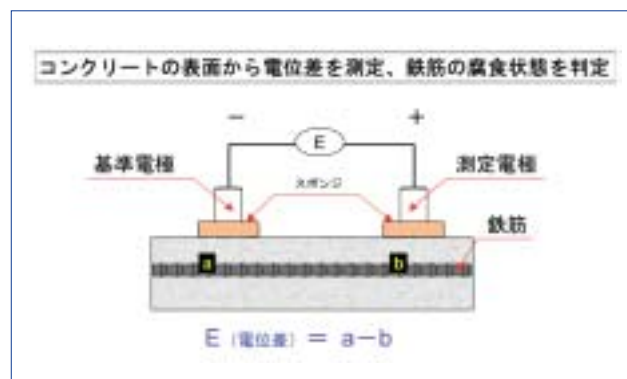


図9：鉄筋腐食診断装置の原理

原理は、鉄筋の腐食である酸化イオン化現象を特定する手段として、酸化イオン化に伴い発生する微弱電流をコンクリート部位毎の電位差を測定することで特定するものです。電位の計測には自然電位法を採用しました。基準電極と照合電極の2つの電極をコンクリート表面に設置し、2点間の電位差を測定することで、内部の鉄筋が腐食しているか、腐食しやすい環境にあるかを診断します。

この手法は、コンクリート内部の相対的な電位差を測定するもので、電位差の数値が直接鉄筋の錆びの進行程度を示しているものではありません。従って、一定以上の高い電位差が測定された箇所については、部分的に鉄筋の状態を確認する必要があります。鉄筋腐食診断装置を使用した検査の様態を（図6）に示します。



図10：鉄筋腐食診断装置

7.2 トンネル覆工表面撮影車 (レーザースキャニングによる覆工表面撮影)

トンネル検査の第一段階は、コンクリート覆工表面を目視で検査し、顕著なクラック等の変状と進行を確認し、覆工を平面状に開いた覆工変状展開図に記録することです。この検査は、トンネル内部を歩きながら、記録してゆくため、時間と労力のかかる作業で、しかも、クラックの幅、方向、長さなどのデータの多くは目測で記入していました。この検査を自動化するために、導入したのがトンネル覆工表面撮影車です。

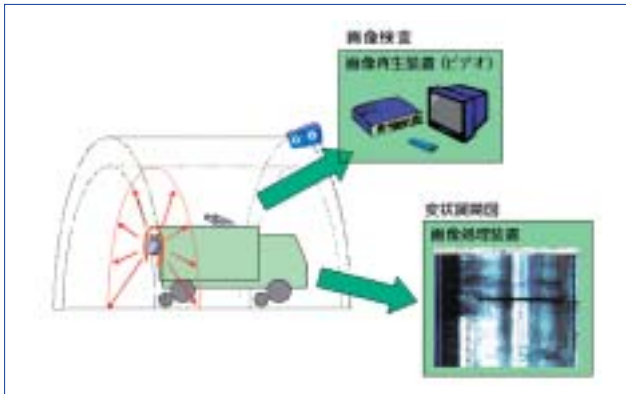


図11：トンネル覆工表面撮影車の機能

装置の構成は、撮影装置と画像処理装置、解析装置から構成されています。撮影装置は波長500nmのレーザー光を使用した、レーザースキャニングによる電子写真方式で、覆工表面の幅1mm以上のひび割れを撮影できます。車両は、8t車で軌道と道路の両方を走行できる軌陸タイプで、新幹線、在来線の両方に対応でき、時速3.5kmでの走行撮影が可能です。測定した検査データは、パソコンで処理することで覆工変状展開図の作成が可能です。2002年に2号機を導入しました。トンネル覆工表面撮影車の測定の模様を(図12)に示します。

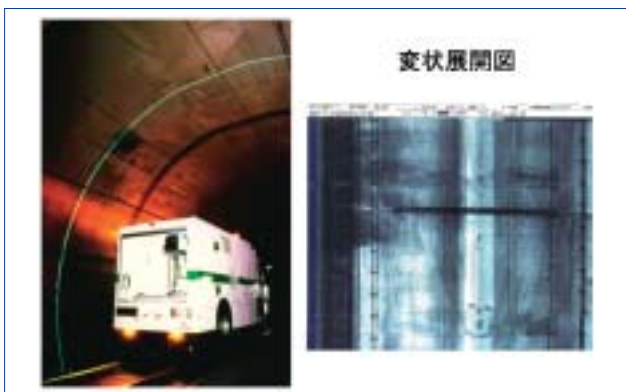


図12：トンネル覆工表面撮影車

7.3 トンネル覆工非破壊検査装置 (低周波域弾性波によるコンクリート検査)

1980年頃まで主流であった山岳トンネル工法の在来工法で施工したトンネルでは、コンクリート施工時に機器の故障などで連続してコンクリートを施工できず設計覆工厚さが確保できてない場合があります。このような部分的に覆工厚の少ない箇所と覆工背面に大きな空洞のある部分が重なると、その部分が弱点となり地山からの圧力により覆工コンクリートの弱点部へ応力が集中し、引張クラックが発生することがあります。この原因究明のため、詳細に覆工コンクリートの強度、厚さと背面側の空洞を測定する検査があります。

この検査は、該当部分をボーリングでコアを開けて調査するため、1箇所施工するのに約30分から40分かかり、1箇所開けてもポイントがずれた場合、再度、ボーリングを実施する必要がありました。

そこで、「覆工厚さ」、「コンクリート強度」、「覆工背面側の空洞」について、一定の精度で効率的に測定可能な装置を開発し、導入しました。

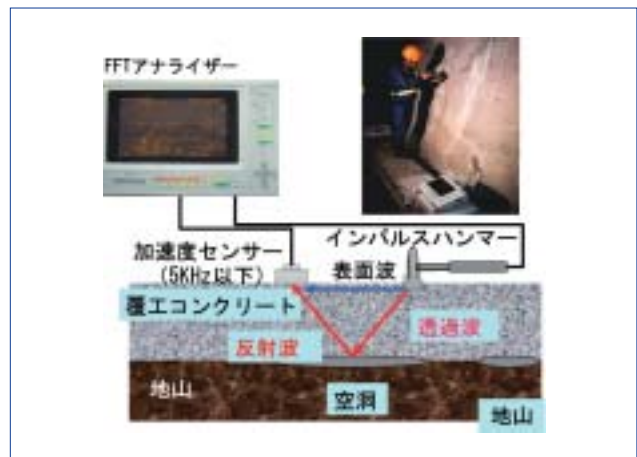


図13：トンネル覆工非破壊検査装置

原理は、ハンマー衝撃で発生する弾性波の表面波と覆工背面まで透過して戻る反射波の波形解析値と弾性波速度などのコンクリート物性値を使用した相関分析により算出するものです。弾性波の使用周波数は設計厚さが70cm以上にもなる覆工コンクリートを透過させるため5kHz以下の低周波帯域を使用しました。5kHz以下の低周波帯域の感度特性がフラットな加速度センサーを使用して、覆工コンクリートに入力した弾性波の表面での振動と表面2点間の弾性波伝播時間を測定し、表面伝播速度、背面からの反射時間、反射波形のレベル分析から算出するも

のです。(図13)使用周波数が非常に低いことから、検査データは、ほぼ、設置した加速度センサーを中心に覆工厚さを直径とする円柱状のコンクリート覆工の平均的な性状を示す数値となります。

このデータは、トンネル構造モデルの数値解析により、覆工に発生する応力、変位や、荷重状態推移に伴い、応力、変位がどのように進行するかなどについて把握できます。

コンクリートの物性が川砂利や砕石など骨材の違いや、コンクリート施工年代や施工法の違いからくる水分量の違いに影響されることから、コンクリートコアサンプリングでの測定値補正が必要となります。本装置を使用した検査の様子を(図13)に示します。

7.4 トンネル覆工検査車

(電磁波レーダによるコンクリート内部の欠陥検査)

1999年に発生した新幹線トンネルなどのコンクリート落下事故対策として、定期的に至近距離での目視検査とハンマー打音で覆工内部の欠陥を検査することとなりました。この検査は、検査者がコンクリート覆工に接近し、横、斜め上、直上と無理な姿勢でハンマーを連続して振る作業で肉体的負荷が大きく、非効率的な検査作業です。

また、打音検査後に改めて、検査記録をまとめて覆工変状展開図に記入、作成する必要があること。濁音の原因究明に再度、詳細な検査を要すること。などの問題点があります。そこで、ハンマー打音方式に代わるコンクリート覆工内部の欠陥検査装置の開発に着手しました。



図14：至近距離目視、打音検査

原理は、電磁波レーダ技術である、マルチパスリニアアレイレーダを使用しています。マルチパスリニアアレイレーダは送信16、受信16のアンテナを走査方向と直角に約1mの幅で2列に配置しています。覆工表面をレール方向に移動しながら、1cmごとに256通りの電波を送

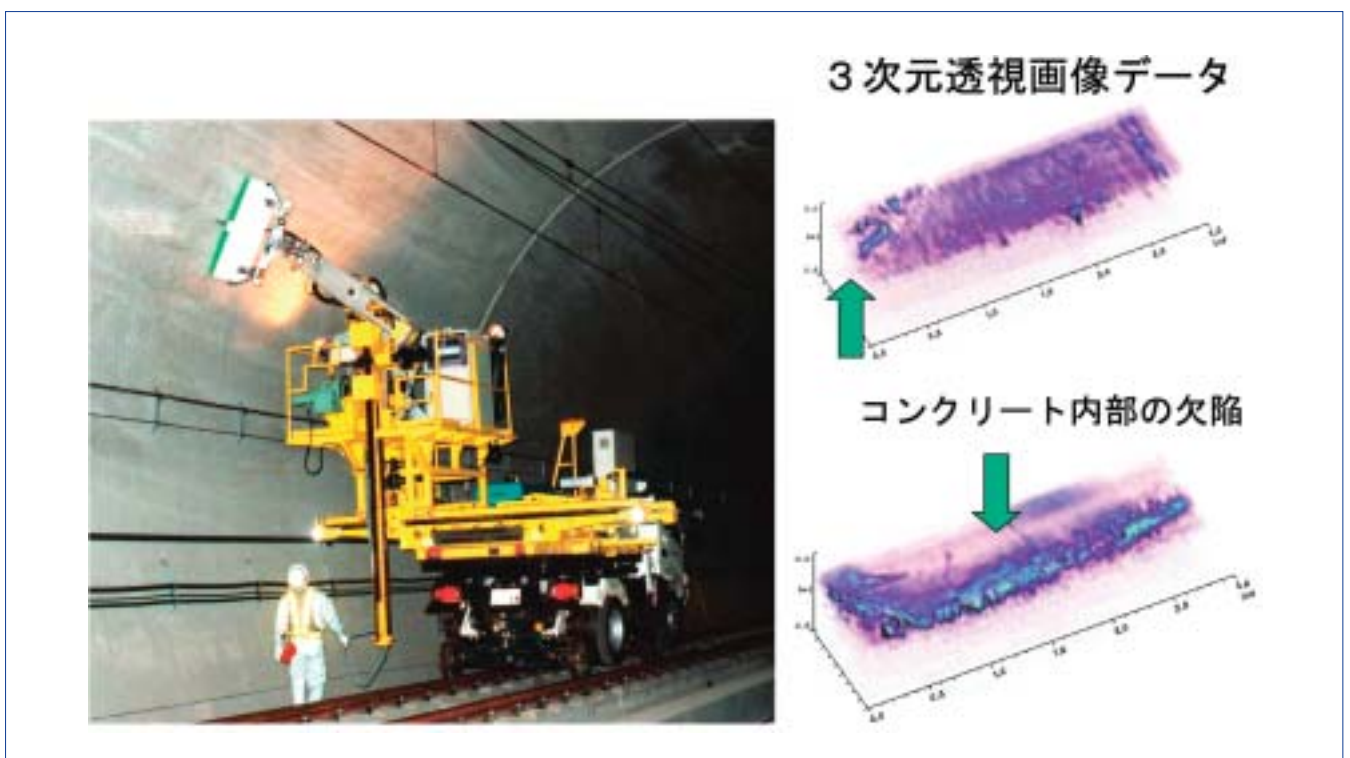


図15：トンネル覆工検査試作装置の試験

信して、覆工内部のコンクリートと電気的特性（空洞、クラック、鉄筋等の誘電率）の違う物質の境界から反射する電波を受信することで、1m幅の帯状に検査をし、欠陥の深さ方向の位置、広がり、形状を特定するものです。使用周波数は、コンクリート内部の小さな欠陥を捉えるため、100MHz～3.5GHz（中心周波数1.5GHz）を使用しています。従来のレーダが送信1、受信1のアンテナ構成であるのに対し、256のデータを一時に取得できることから、細かで複雑な形状の欠陥を捉えることができること。16対の送受信アンテナを使用することからS/N比に優れること。欠陥データを三次元表示できること。などの特徴があります。検査最大深さは40cm程度まで、クラック幅の検査性能は深さとその角度により変化しますが、浅い部分では、最小1mm以上のものを検知できます。

欠陥データの位置精度は、コンクリート内部の電磁波伝播速度と関連すること、コンクリートと異なる電気的特性の部分から反射するため、欠陥が空洞か、金属か、木片等の異物かなどの区別はできないことに注意する必要があります。

8 おわりに

鉄道のインフラ設備は、非常に古い構造物から新しい物まで、混在させて使用しています。また、高度経済成長期以降、急激に増え続けたコンクリート構造物の経年は、当然ながら一時期に建設された同数とその経年も同時に増加することになります。

一方、多くの人手にたよる目視、打音検査や経験的判断による検査体制は、労働人口の減少という社会情勢のなかで継続が難しくなります。

このような状況から、今後のメンテナンスは、いかに高い精度で効率よく検査するかが鍵となります。このための課題には、第一に、一歩進んだ非破壊検査技術をいかに効果的に、検査体系の中に組み入れることができるか第二に、新しい検査技術の特性を良く理解した効果的な使用方法が現場に定着するかがあります。

土木の分野で実用化されている非破壊検査技術は、少なく、性能、使用法も使う側の要望どおりとなっていないのが現状です。しかし、非破壊検査技術の開発と導入、定着にいたる努力は、今後とも、積極的にする必要があり、これらを通じて、鉄道の安全、安定輸送の実現に寄与することをめざしています。

参考文献

- 1) 尾坂芳夫、後藤幸正：「ネビルのコンクリートの特性」技報堂出版、P2（1979,11）
- 2) 森島啓行、角田知己他：「弾性波伝達関数法による鉄道トンネル検査手法の開発」土木学会第50回年次学術講演会概要集第6部P.654（1995,9）
- 3) 藍郷一博、伊藤謙一：「表面電位差を用いた鉄筋腐食診断装置について」鉄道技術連合シンポジウム論文集P.11（1999,12）
- 4) 鈴木延彰：「トンネル覆工表面撮影車の導入」日本鉄道施設協会誌P.41（2000,8）
- 5) 柳下尚道、森島啓行：「鉄道施設の設備診断と非破壊検査」,2002非破壊検査フォーラム概要集、産報出版P.24（2002,）