

委員会報告 (和文)
COMMITTEE
REPORT

【委員会報告】

土木構造・材料の定量的非破壊評価へのアプローチ

APPROACHES TO THE QUANTITATIVE NON-DESTRUCTIVE EVALUATION
OF STRUCTURES AND MATERIALS IN CIVIL ENGINEERING

構造工学委員会非破壊評価小委員会

Committee on Non-Destructive Evaluation of Structural Materials

はじめに

土木構造物の力学的健全度あるいは余寿命を非破壊評価 (NDE: Non-Destructive Evaluation) の手法を用いて診断することは、公共性を担う土木工学の重要な使命のひとつであると考えられる。土木構造物を人体に例えるならば、非破壊評価は医者が行う診察に対応し、構造物の安全な維持にとって不可欠なことである。現在、超音波、AE、電磁場、X線などをはじめとして、材料内部の欠陥を検出するための種々の手法が開発されているが、これらの手法は必ずしも土木構造物の構造特性や用いられる材料の力学特性に応じた手法として確立されていないと考えられる。特に、コンクリートや岩石など欠陥を多く含む不均一な材料の非破壊評価に関しては、これからの研究にまたなければならない部分が少なくない。さらに、近年研究が進められている破壊力学を有効に応用するためにも、欠陥の種類、位置、大きさ、角度など、欠陥に関する情報を可能な限り詳細に把握することが要求されている。このような目標を達成するにあたっては、まず、材料の非破壊評価に関する理論的背景を明らかにし、定量化に向けた基礎を築くことが重要であると考えられる。

以上の認識のもとに、本報告は土木構造材料の定量的な非破壊評価を行うために、現状の把握と将来への展望を提示することを目的としている。まず、1. においては、非破壊評価手法の概要について述べるとともに、鋼構造、コンクリート構造、地盤・岩盤構造について非破壊評価の現状を示す。次に、2. においては構造材料の定量的な非破壊評価において、特に超音波法とAE法の基本となる波動理論に関連した事項、および非破壊評価に用いられる種々の解析法に焦点を絞り、説明を加える。さらに、3. においては将来定量的非破壊評価を土木構造材料へ有効に適用するにあたっての課題について示す。

本報告書は必ずしも土木工学における非破壊評価について、その全体像を明らかにしたものとはなっていないが、現状を概観するとともに、若干の理論的側面についてもふれた。これらが、将来の非破壊評価への指針の一

つとして役立てば幸いである。

1. 非破壊評価の現状とニーズ

現在土木工学の分野で実施されている非破壊評価は定量的なものがほとんどであるが、将来は、これを定量的な非破壊評価 (QNDE: Quantitative Non-Destructive Evaluation) として方法論を確立する必要がある。土木工学の分野におけるQNDEの必要性を例示すれば、図-1のようにまとめることができよう。

土木構造材料の非破壊評価のために現在利用されている非破壊検査手法は多岐にわたっており、適用分野により検査の対象、目的、要求、実施段階などが異なっている。ここでは、各種の非破壊検査法についてまとめた後、鋼構造、コンクリート構造、地盤・岩盤と適用分野別に、非破壊評価の現状について述べ、定量的な非破壊評価に向けた課題について触れる。

(1) 各種非破壊検査法

a) 光学的方法

① 目視検査

最も基本的な検査方法である。最近では、アクセスの悪い箇所の目視検査にはボアスコープ、ファイバースコープなど医療用に開発された微小間隙に有効な検査機器も使用されるようになってきている。

② カメラ

構造物表面の欠陥を光学的に検出するには普通のカメラ、ビデオカメラ、CCDカメラなどが用いられる。CCDカメラとは、被写体を光学レンズを通して感光部にあるCCD (Charged Coupled Device) センサーで光電変換し、画像情報をデジタル信号として出力するものである。

③ 浸透探傷

表面に開口している欠陥の検出に用いられる方法である。表面の汚れを除き (予備洗浄)、浸透性の良い液体を染み込ませ (浸透)、表面の液体をとり除き (洗浄)、吸湿性の強い膜を作り浸透液を吸い出す (現象)、という4段階で探傷が行われる。

b) 電気・磁気法

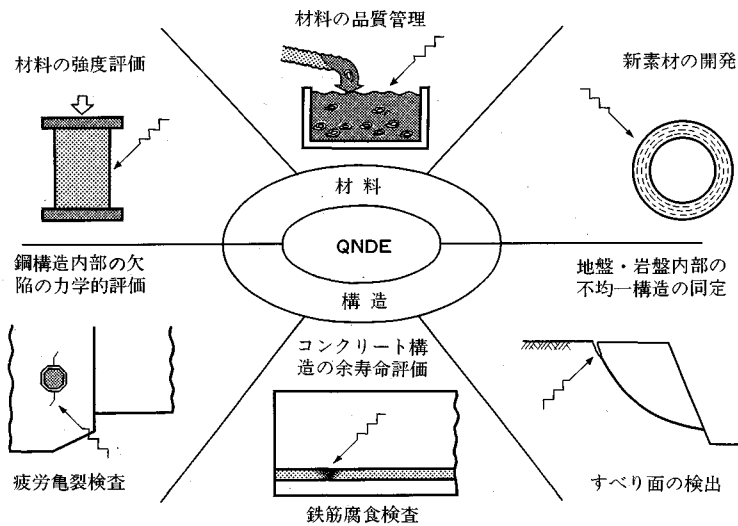


図-1 土木工学におけるQNDEの必要性

電気・磁気を用いた非破壊検査法は、金属材料の導電性で磁性体でもあるという性質を利用するものである。

① 渦流探傷

交流を流したコイルを導電性の試験体に近づけると、試験体内に渦電流が流れる。鋼構造物では、表面欠陥あるいは表面近傍に内部欠陥が存在すると渦電流が乱され欠陥が検出される。また、鉄筋コンクリートの場合、内部鉄筋の存在により渦電流の流れが乱されるため、インピーダンスが変化する。この現象を利用して鉄筋コンクリート中の鉄筋の配筋、かぶり、径などの測定機器が開発されている。

② 磁粉探傷

磁化された物体の表面付近に磁場に直角方向の欠陥があると、磁束が物体外に漏洩する。漏洩磁場の付近に磁性粉末をもってくと磁化し吸収され漏洩磁場の形の磁粉模様を得られる。この性質を利用して、鋼構造物の製品検査や維持管理における疲労亀裂の検査が行われている。

③ 自然電位および分極抵抗

自然電位と分極抵抗はいずれもコンクリート中の鉄筋腐食をコンクリート表面から非破壊的に検査する手法であり、電極の一端を埋設鉄筋に接続し、他端の電極との電位あるいは抵抗を計測する。このとき鋼材の腐食は、電気化学的反応によって生じる現象であり、鋼材は腐食状態に応じた電位分布を示す。

一方、腐食反応中には、腐食電流が流れるが、その大きさは分極抵抗に逆比例することが知られている。したがって、分極抵抗が計測されると、その時点での腐食反応速度にあたる情報を得ることができる。

c) 弾性波法

弾性体に何らかの外力を動的に与えれば、必ず弾性波が発生する。すべての構造材料は、一義的には弾性体と考えてよいので、固体に擾乱が加えられると弾性波が伝播することになる。このうち、周波数が可聴音域(20 kHz以下)にある場合には、打音法という用語が用いられる。一方、20 kHz以上の超音波領域の周波数帯域まで計測対象とする場合には、超音波という用語が用いられている。

① 打音

部材の表面をハンマーなどで打撃し、その反響波を耳、マイクロフォン、振動ピックアップなどで検出し、健全な部分での反響との比較により欠陥部を検出する方法である。判定法としては、可聴音の直接判定から、反響波の最大振幅、エネルギー、スペクトルなどを使用するものまで目的に応じて提案されている。

② 超音波

超音波検査は基本的に伝播時間あるいは伝播速度を計測するものである。通常、鋼材に対しては1~10 MHz、コンクリートに対しては40~100 kHzの周波数帯域の超音波が用いられる。通常、周波数が高いほど波長が短いため、欠陥の検出精度は増すが、材料の基本組織の大きさと波長が同程度となると、超音波が散乱して透過性が低下するなどの現象が表われる。

超音波検査は以下のように大別することができる。

① 透過法

被検材の両端面に向い合わせて超音波送・受波器を置き、透過してくる超音波の強度を測る方法である。送・受波器を向い合わせたまま移動して、受波器の出力を比較すれば内部の異常が検出される(図-2)。

② 反射法

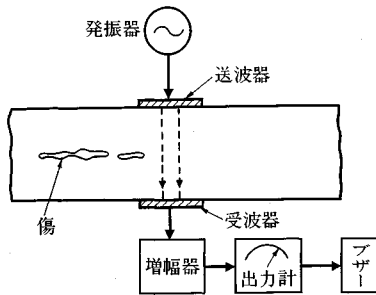


図-2 透過法

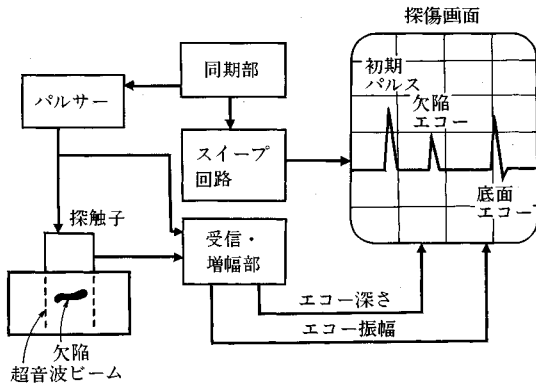


図-3 垂直探傷法

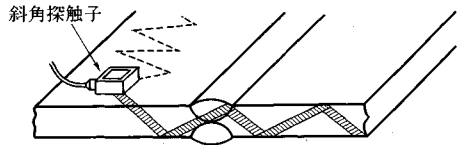


図-4 斜角探傷法

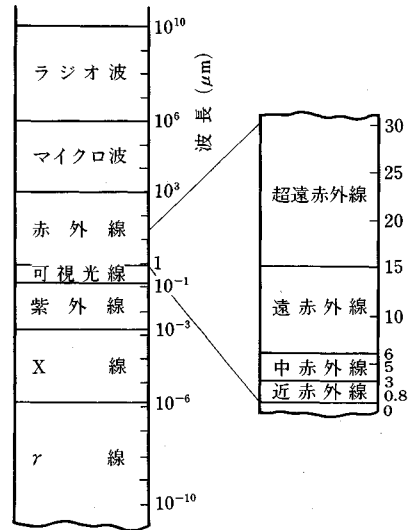


図-5 電磁波の波長による分類

a. 垂直探傷法

接触媒質（油など）を塗った被検材の一端面から垂直方向に超音波を送り、他端面または中間の傷からの反射波の状況をブラウン管上で観察するものである（図-3）。

b. 斜角探傷法

斜角探触子を使って板中に斜めに超音波を入れ、その直接反射あるいは多重反射の情報から板中の傷や溶接部の欠陥を検出する方法である。また、上記の垂直法では、超音波が届かないような箇所の検査にも使われる（図-4）。

c. 表面探傷法

金属の表面に沿って伝播する表面波を使って表面から発生しているクラック、表面に近い位置にある傷を検出する方法である。被検材の表面の仕上げが悪いと検出精度は低下する。

③ 共振法

入力する超音波の半波長の整数倍が板厚に等しくなると共振を生じることを利用し、超音波の波長を連続的に変え、共振時の周波数と板中の音速とから板厚を求める方法である。

④ アコースティック・エミッション

弾性波法は、外的に擾乱を与え、その際に発生する弾性波を利用するものであるが、外的に与えなくとも弾性

波は発生する。これは、地震と同じように材料内で破壊が発生した場合である。微小破壊あるいはひび割れなどが発生すると、これに伴ってひずみエネルギーが解放される。このとき発生する弾性波は、地震波に対応するものであり、構造材料ではアコースティック・エミッション（AE）として検出される。したがって、内部破壊の進行中の情報が得られる非破壊検査法として注目されている。

d) 電磁波法

電磁波は、図-5に示すように波長の短いものから、γ線、X線、紫外線、可視光線、赤外線、マイクロ波、ラジオ波と分類される。このうち、非破壊検査法としては、透過放射線画像を撮影するX線法、表層部の温度分布を測定する赤外線サーモグラフィ法およびマイクロ波を用いたレーダー法などが実用化されている。

① X線

X線を利用する方法は、波長の短い電磁波が固体中を透過する性質に基づいたものである。X線の透過の度合は物質の種類、厚さ、密度などにより変化する。したがって、透過X線の強度変化から欠陥の状態、厚さ変化、介在物の分布状況、内部構造などを視覚的に知ることができる。なおX線による検査は電離放射線障害防止規則の適用を受けるので、現場での安全性に細心の注意が必要である。

② 赤外線

物体の表面温度を非接触で測定するには、表面からの放射エネルギーを赤外線センサーで検出すればよいことが知られている。この原理を用いた非破壊検査がサーモグラフィ法である。これは、気象、宇宙、医療関係など多岐にわたって利用されているが、構造物への応用ではタイルなどの剥離部の検出に用いられている。

剥離部を始めとする表面付近の空隙は空気層を形成しているため、熱の不導体となり、健全な部位に比べて表面温度を高くする傾向にある。従って、サーモグラフィ画像により温度分布を知ることができれば、剥離などの欠陥部を決定することができる。ただし、現状では、太陽の日射量および気象変化など測定の際に温度差に考慮すべき要因が多く、経験に頼る部分が少なくないと言われている。

③ レーダー

レーダー法は、魚探知器など同様の原理で、物体中にマイクロ波をアンテナから発射し、異物あるいは欠陥空洞などからの反射波を検出するものである。埋設物の探査、内部空洞の検出、コンクリート巻厚検査、コンクリート中の鉄筋位置判定、剥離部の検出などに適用できる手法として期待されている。ただし、現状では測定可能な深さに限界があり、透過能力の向上には出力を大きくする必要があるが、その場合には電波法への抵触が問題とされている。

(2) 鋼構造物

橋、高架構造、タンクなどの鋼構造物の非破壊検査の現状は次のとおりである。

a) 鋼板、製品

通常の構造用鋼材、耐ラメ材とも通常は非破壊検査は行われていない。ただし、ユーザーから空洞や割れなどの内部欠陥の検査を要求されることがあり、その場合は超音波探傷が行われる。鋼管のうち、スパイラル管、UO管など溶接形成された製品は、溶接部の欠陥の有無を非破壊的に検査している。通常、超音波およびX線透視の単独または併用による。また、超音波はオンラインとマニュアル、X線も写真撮影とCRTディスプレイによる2つの手法を用いている。

b) 製作時

製作時の非破壊検査は主として溶接部に対して実施される。主要部材の板継ぎ溶接部は放射線透過試験により検査される。その際、検査箇所、検査率などは溶接欠陥の発生特性を十分把握したうえで決めなければならない。特に溶接冷間割れは溶接終了後、発生するまである程度の時間を要するため、検査の時期も重要である。X線は撮影時、作業者に対する防護が必要となり、また撮影後のフィルム現像時間が必要などの問題がある。このため、最近では超音波探傷も適用される傾向がある。特に現

場溶接部ではかなり使われるようになってきた。また即時に判断できることから、もし欠陥があったときの補修の手戻りがなく、工場内の溶接に対しても使用が検討されつつある。このとき、X線と超音波の欠陥の検出特性の差、溶接割れが遅れて発生することなどについて、十分な配慮が必要である。超音波探傷による隅肉溶接止端部から発生する疲労亀裂深さの検出限界に関する研究¹⁾によれば、探傷器・探触子などにより若干の変動はあるが、端部エコー法による検出限界深さは2.5mm(推定精度は±1mm)、コーナーエコー法による検出限界は1mmであるとされている。

本州四国連絡橋瀬戸大橋のトラス弦材角溶接部の検査には、従来のAスコープ像のほか、Bスコープ、Cスコープ像の画像化(図-6)を含めた自動超音波探傷システムが使われた²⁾。これは、ルート部に発生するブローホールが弦材の疲労強度に大きな影響を及ぼすこと、X線では検査がきわめて困難なことなどによる。表面欠陥は目視および浸透探傷が主である。

c) メンテナンス検査

メンテナンス検査では、表面亀裂の発見を目的とした目視検査が中心である。この場合、どの位置にどのような亀裂が発生するのかの情報が最も重要であり、もしそのような知識のある検査者であれば、10~20倍のルーペを用いることにより、かなり小さい亀裂まで発見することができる。現場でしばしば用いられる浸透探傷は疲労亀裂の検出精度は非常に悪い。亀裂の存否のみの検査であれば渦流探傷も適用できる。もし目視で不十分の場合は磁粉探傷を用いる方が良い。表面亀裂の深さを非破壊的に測定することは非常に難しい。ある程度の深さになれば超音波の端部エコー法により測定ができる。

内部欠陥についてはほとんど検査されていないのが現状である。位置が特定されればX線と超音波で検査できるが、欠陥の形状、寸法の精度の高い検出は困難である。メンテナンス検査で、もし欠陥が検出された場合、それが疲労亀裂か、あるいは施工時の欠陥がそのまま残っているのかの判定は、現在の非破壊検査技術ではきわめて困難である。

(3) コンクリート構造物

コンクリート工学の分野では、非破壊評価といえば、従来は強度推定のための手法と考えられてきた。しかし、診断へのニーズの高まりとともに、強度以外のコンクリートの特性を検査する手法が望まれるようになってきた。それらを分類して示すと図-7のようになる。非破壊検査の個々の手法については(1)で述べたが、強度試験についてはふれていないため、ここで簡単に説明する。圧縮強度を推定するための局部破壊試験には、コア抜き試験、貫入試験、引き抜き試験などがある。いずれもコンクリート構造物からコンクリート塊を取り出すもので

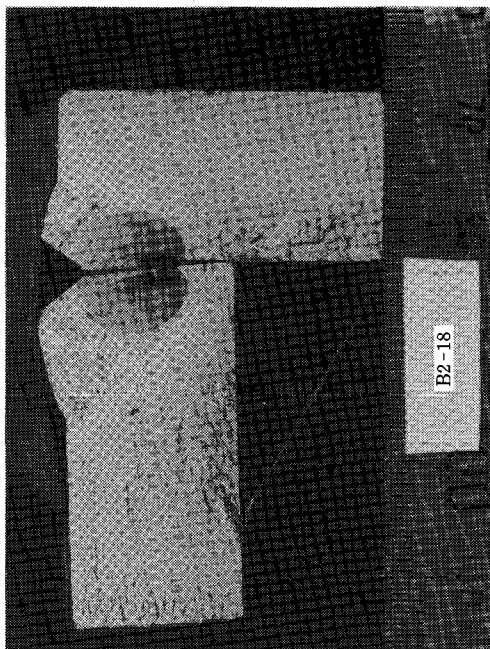
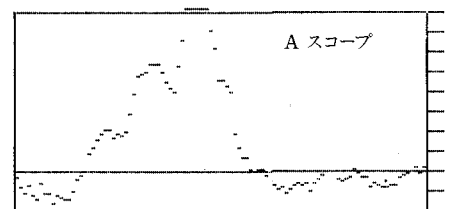
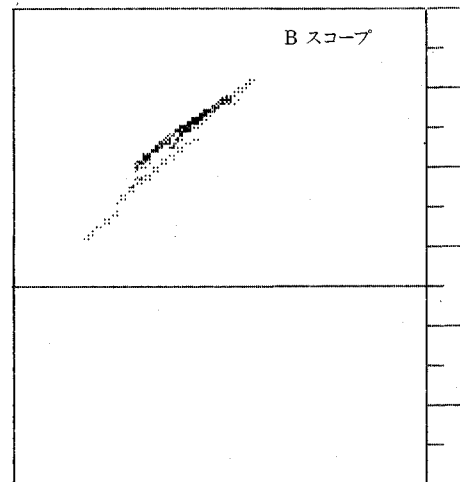
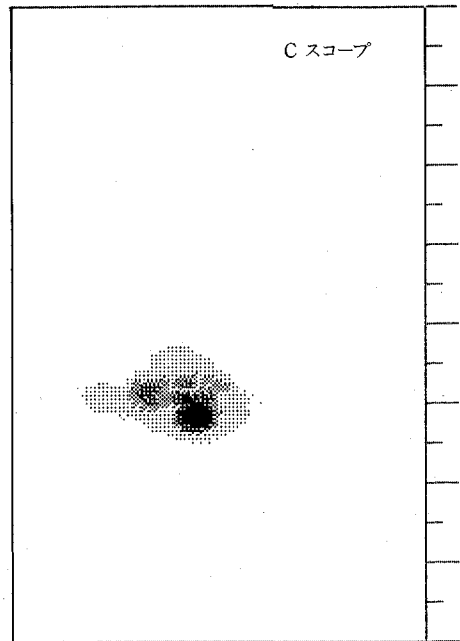
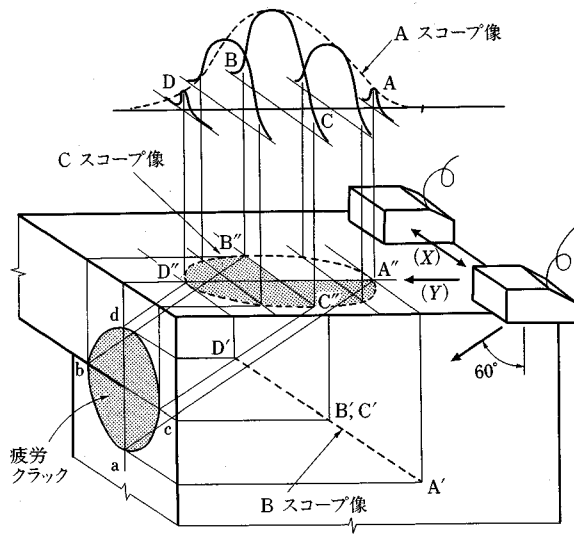


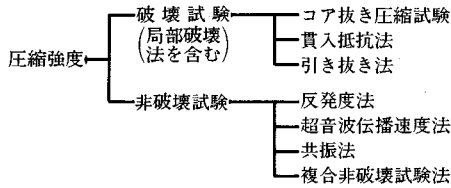
図-6 超音波探傷の画像化

ある。コア抜き試験は実際に圧縮試験を実施するが、他の試験法ではそのときの抵抗力より強度を推定することになっている。

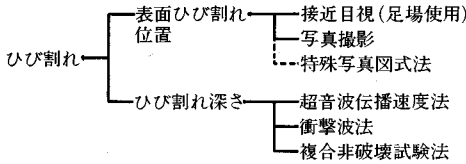
強度推定のための非破壊検査として最もよく用いられるのは、シュミットハンマーを用いる反発度法である。

これは、表面の反発硬度と強度の相関から圧縮強度を推定する。一方、超音波および共振法は、物理的にはヤング率（弾性係数）を計測するものであり、ヤング率と強度との相関から強度を推定している。このように、局部破壊の方法と異なり、非破壊検査法により強度を推定す

(1) 圧縮強度の推定



(2) コンクリートひび割れ調査



(3) コンクリート内部欠陥

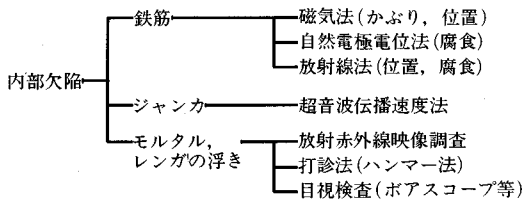


図-7 コンクリートの非破壊検査の例

る手法は、強度と相関性があると考えられる強度以外の物理量から強度を推定するため、推定精度に問題があるとされることが多く、これを克服するために複合法が提案されている^{3),4)}。

a) 施工時に適用されている非破壊評価法

アメリカコンクリート工学協会の建築コード ACI 318-83 では、コンクリート型枠の脱型時期の判定に、圧縮試験結果に代えて非破壊検査法など他の方法を用いてもよいことが示されている。これが、実際にコンクリート構造の分野でコードでの使用が認められている唯一のものと考えられる。

研究レベルでは、施工時にコンクリートの温度応力により発生するひび割れを AE 法で検出し、施工管理に役立てようとする研究もみられる⁵⁾。

b) メンテナンス検査

検査の基本としては、目視的な手法による外観調査が実際に行われている。そのマニュアルについては、各機関により決められているが、鉄筋コンクリート構造物に関しては建設省の指針⁶⁾がすでに出版されている。この場合に取り決められている検査項目は、ひび割れ、漏水、表面劣化、凍害、大たわみの5項目である。

最近では、アクセスの悪い箇所の目視検査にはボアスコープ、ファイバースコープなどの医療用に開発された微小間隙に有効な検査機器も使用されるようになっていく。さらに、構造物表面の欠陥を光学的に検出するには

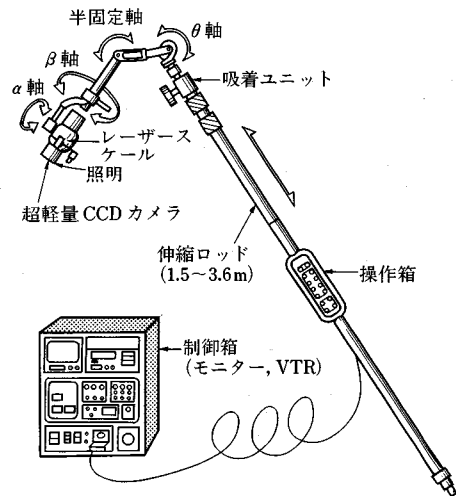


図-8 CCDカメラによるひび割れ検出装置

ビデオカメラ、CCDカメラなどが用いられる。単に、普通カメラでも検出は可能であり、コンクリートの場合には1ショットの被写体サイズを50cm×50cm程度とすれば、0.1mm幅のひび割れは検出可能とされている⁷⁾。橋梁のひび割れ検査のために、図-8に示すような直視できない箇所での撮影のためのCCDカメラ装置も開発されている⁸⁾。また、自動画像処理の手法についても開発が進められており⁹⁾、幅0.05mm以上のコンクリートのひび割れは十分に検出できるとされている。

電気・磁気を用いた非破壊検査法は、コンクリート中の鉄筋位置あるいは腐食の判定に利用されている。渦流探傷を原理に用いた鉄筋コンクリート中の鉄筋の配筋、かぶり、径などの測定装置が市販されている¹⁰⁾。自然電位法を用いた鉄筋の腐食判定に関するASTMの規格¹¹⁾では、電位E(飽和硫酸銅電極での電圧V)により、測定箇所での鋼材の腐食状態を次のように定めている。

$$-0.20 V < E \quad : 90\% \text{以上の確率で腐食なし。}$$

$$-0.35 V < E < -0.20 V : \text{不確定}$$

$$E < -0.35 V : 90\% \text{以上の確率で腐食。}$$

しかし、最近の研究では、自然電位の値は、コンクリートおよび鉄筋の状態に大きく依存するため、上記のASTM基準を安易に適用することは正しくないとされている。

コンクリート中のひび割れの検出には、弾性波法がよく用いられている。その中で打音法は、健全な部分での反響との比較により欠陥部を検出する簡単な方法として知られており、可聴音の直接判定から反響波の最大振幅、エネルギー、スペクトルなどを使用するものなど¹²⁾が目的に応じて提案されている。図-9にはコンクリートでのひび割れ深さの測定例を示す。図中のいずれの方法においても超音波の伝播時間あるいは到達時間を測定し、

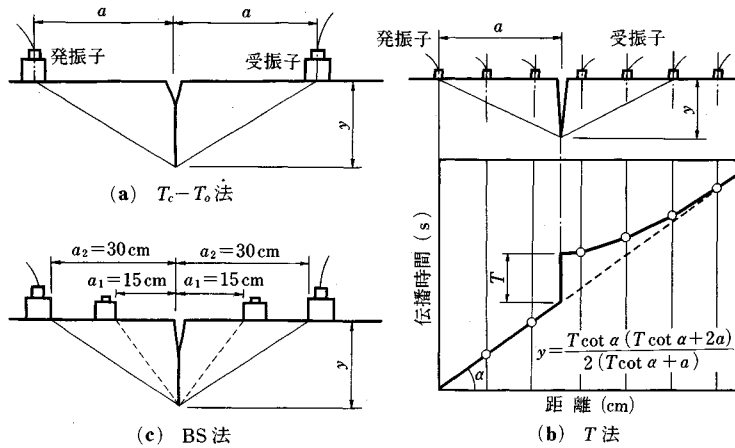


図-9 コンクリートでの超音波法によるひび割れ深さ測定

ひび割れの位置あるいは深さを推定する。AE法は、内部破壊の進行中の情報が得られる非破壊検査法として注目されている¹³⁾。最近の研究成果では、多点でのAE波動の検出・分析により、ひび割れの発生位置、ひび割れの種類、ひび割れの方向まで決定できている。

電磁波のうち、コンクリート構造物の非破壊検査に主に利用されているのは、X線、マイクロ波、赤外線である。X線はコンクリート構造物内の欠陥や介在物の分布状況の把握などのために活用されている¹⁴⁾。X線の透過能力は発生位置のパワーと直接に関係しており、現在までに開発されている可搬式のものでは、コンクリートでは600mm程度が限界厚さとされている。マイクロ波を利用したレーダー法は、内部空洞の検出、コンクリート巻厚検査、コンクリート中の鉄筋位置判定、剝離部の検出などに適用できる手法として期待されている¹⁵⁾。また、赤外線はタイルなどの剝離部の検出に利用されている¹⁶⁾。

c) コンクリート構造における非破壊評価に対するニーズ

メンテナンスフリーの神話が崩壊した現在、コンクリート構造物の維持・管理への要求は、増加することはあっても減少することはないといわれている。このメンテナンスに際して基本となる検査として、非破壊検査へのニーズが年々急増しつつある。このため、種々の検査結果に関する報告がなされているが、近年問題となってきたことは、コンクリート自身の劣化の程度と構造部材の耐力の関係である。ひび割れ深さ、はく離、空隙など欠陥に関する情報の信頼性を向上させることは当然のことであるが、強度・ヤング率などの低下が全体の耐力にどのように反映されるのか、そして、将来のライフスパンにどのように関連するのかが大きな問題となっている。

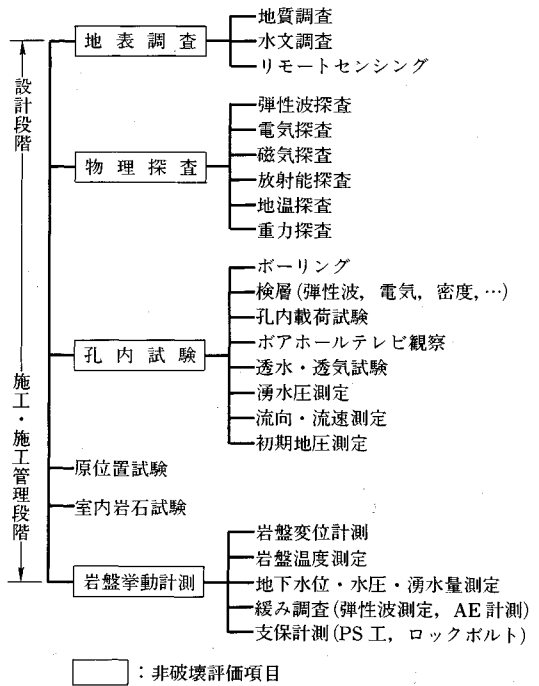


図-10 岩盤分野における調査・試験・計測

この問題を解決するために非破壊評価に求められていることは、欠陥および劣化に関する情報の定量化であり、それをを用いた確定論的な診断法の確立であると考えられる。

(4) 地盤・岩盤構造物

地盤・岩盤における非破壊評価の対象となる主な構造物は、道路、斜面、ダム基礎地盤および地下空洞（トンネル、揚水式地下発電所空洞、原油備蓄空洞）等であり、実際の非破壊評価は、調査・試験・計測という形で、上記の構造物の設計段階ならびに施工・施工管理段階の2つの段階で実施されることが多い。図-10に、通常よ

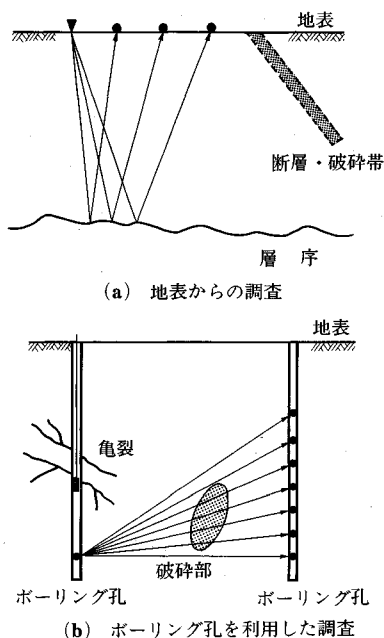


図-11 地盤・岩盤分野における非破壊評価の概念

く実施される調査・試験・計測を示す。このうち、地表調査、物理探査、孔内試験、岩盤挙動計測の各項が非破壊評価項目である。本項ではこれらの非破壊評価の現状と将来的に予測される技術的要請の概要について述べる。

a) 非破壊評価の現状

本分野における非破壊評価手法は、測定に利用する手段によって弾性波、重力等の物理的特性を用いる場合と、比抵抗、電位、電磁波等の電磁気的特性を用いる場合に分類できる。また、測定対象となる地盤・岩盤に対する測定手法の違いとして、アクティブな方法とパッシブな方法という分類も可能である。

これらの特性を利用した非破壊評価のうち、構造物を設計する段階で実施される非破壊評価の目的は、構造物の違いによらず、地盤・岩盤の構造や物性値（力学的、水理的）の把握である。特に実施されることが多いものとしては、弾性波¹⁷⁾、電磁波¹⁸⁾や比抵抗を用いた地盤・地盤中に存在する不連続面（亀裂、破碎帯、断層等）の検知が挙げられる。図-11に地盤・岩盤分野において、断層、破碎帯あるいは破碎部の検知のために実施されている非破壊評価の概念を示す。図中の矢印は弾性波や電磁波などの伝播経路である。

一方、構造物を施工管理する段階においては、以下に示すように構造物ごとに非破壊評価の目的が異なり、これに応じて用いられる手段も多岐にわたっている。

① 盛土

盛土の締固め状況の把握を目的として、弾性波な

表-1 岩盤構造物ごとの非破壊評価の目的

構造物	設計段階	施工管理段階	維持管理段階
岩盤斜面		・斜面のすべり予知	同 左
ダム基礎岩盤		・グラウト効果の確認(止水性)	・周辺岩盤からの漏水予知 ・湛水池内の地すべり予知
地下空洞	トンネル	・岩盤中の亀裂・破碎帯・断層の分布状況の把握	・空洞周辺岩盤中の緩み分布状況の把握
	地下発電所空洞		・空洞周辺岩盤中の緩み分布状況の把握 ・覆工背面水圧の分布状況の把握
	岩盤タック		・空洞周辺岩盤中の緩み分布状況の把握 ・周辺岩盤中の地下水位分布の把握
道路	・岩盤中の空洞の分布状況の把握	同 左	路面の沈下の状況の把握

どを用いた非破壊評価が実施されている。

② 道路

施工の妨げとなる路面下の埋設管等の障害物や空洞の検知¹⁹⁾を目的として、電磁波、比抵抗および重力等を用いた非破壊評価が行われている。

③ 斜面

斜面の力学的安定性を確保するために重要な地すべり検知を目的として、アコースティック・エミッション(AE)²⁰⁾、弾性波および比抵抗等を用いた非破壊評価が実施されている。

④ ダム基礎岩盤

基礎岩盤の力学的・水理的安定性を確保するために必要なグラウトの効果確認を目的として、透水係数、弾性波および比抵抗等を用いた非破壊評価が行われている。

⑤ 地下空洞(トンネル、地下発電所、原油備蓄空洞)

掘削中、掘削後の地下空洞の力学的安定性を確保するうえで重要な、空洞周辺の地盤・岩盤に発生する緩み域の分布状況を把握するために、弾性波²¹⁾やAE^{22),23)}を利用した非破壊評価が実施されている。

また、これらの緩み域や弱層部等を補強するためのグラウトにおいても、上記の④ダム基礎岩盤のケースと同様な非破壊評価が実施されている。

表-1は岩盤構造物ごとに、設計、施工管理、維持管理と段階を分類して、非破壊評価を必要とする状況を整理したものである。

b) 地盤・岩盤構造での非破壊評価に対するニーズ

地盤・岩盤を対象とした構造物には、将来的に、建設深度の増大、構造の複雑化ならびに環境上の制約の増大

が予想される。このことから、設計の合理化ならびに施工品質の向上を図るうえで、調査・試験・計測における非破壊の手法の果たす役割は大きいと考えられる。具体的には、構造物の設計段階ならびに施工・施工管理段階ごとに、以下に示すような具体的なニーズが挙げられる。

① 設計段階

先に述べた地盤・岩盤中の不連続面（亀裂、破碎帯、断層）の存在位置の検知については、これらの調査結果が主に設計における地盤のモデル化に利用されることから、以下に示す項目について、より定量的な把握が望まれる。

- ① 不連続面の存在位置
- ② 存在する不連続面の規模（幅、長さなど）
- ② 施工・施工管理段階
 - ① 盛土の締め効果の確認
盛土施工時の締めめ状況を確認するうえで、盛土の物理的・力学的特性をより具体的に把握することが必要である。
 - ② 道路面下の障害物・空洞の検知
路面下に存在する障害物・空洞のより正確な位置（平面、深度）、およびその規模の把握が必要である。
 - ③ 斜面の力学的安定性の監視
地すべりが生ずる可能性がある範囲（水平、深度方向）の特定、ならびに補強工の実施の要否を判定するための具体的な規準の設定が望まれる。
 - ④ ダム基礎岩盤におけるグラウト効果の確認
グラウト注入範囲の正確な把握、ならびにグラウトによる岩盤の力学的・水理的物性の具体的な改良度の把握が必要である。
 - ⑤ 地下空洞周辺地盤・岩盤中の緩み検知
地下空洞掘削に伴って周辺地盤・岩盤中に発生する緩み域の正確な分布範囲、ならびに緩み域の力学的・水理的物性の具体的な把握が必要とされるよう。

以上のように、地盤・岩盤分野における非破壊評価では、測定・計測結果を設計・施工により直接的かつ有効に反映させるために、結果の評価がより定量的に記述されていること、および評価に用いる規準が設計・施工との明確な関連に基づいて設定されていることの2点が特に重要な検討課題となろう。

2. 非破壊評価のための波動解析

構造材料中に存在する欠陥を検出し、この欠陥の種類、位置、大きさ、形状、角度など、欠陥の特性に関する定量的情報を得ようとする試みの一つに超音波法とAE法がある。また、超音波法により構造材料内の局所領域に多数分布する微小欠陥を材料特性の局所的な変化とみな

し、局所材料特性の変化と波動場を定量的に関係付けようとする試みも始まっている。

超音波を固体中に送信したとき、固体中および表面で超音波は弾性波として伝播する。この弾性波が欠陥との相互作用を経て再び受信され、この受信波形が欠陥の諸特性を反映していることから、受信波形を吟味することにより欠陥特性を推定しようとするのが、超音波法の要点である。ここで重要な段階は、弾性波と欠陥の相互作用過程の解明であり、これが可能となって初めて受信波形から欠陥特性の定量的推定が可能となる。今まで行われてきたいわゆる超音波による非破壊検査においては、水中を伝わる“超音波”の解析をもとにして欠陥の検出に力点を置いた機器設計が行われてきた。欠陥の諸特性を詳細に把握するために、これから進めなければならない課題の一つは固体内の欠陥性状と散乱波形の間に存在する因果関係の解明である。最近特に波動解析技術が進歩したために、弾性波動論的にこの過程を明らかにし、欠陥の定量化に役立てようとする試みが進行しつつある。ここでは波動解析技術に焦点を当て、この動きの一部を要約する。

(1) 基礎的な事項

構造材料に含まれる欠陥を超音波を用いて検出し、欠陥性状を明らかにしようとする場合、入射超音波の欠陥による散乱場を計測することになる。この場合、欠陥は一樣な母材に含まれる空洞、クラックないしは材料特性の不均一部分としてモデル化されよう。また、通常の波動振幅を考慮するならば、母材は線形弾性体と考えて十分であろう。したがって超音波を用いた非破壊評価法は、空洞、クラック、介在物等による弾性波の散乱問題として定式化される。一方、AEの場合は物体内部の破壊に伴って発生した弾性波を物体表面で観測することになり、弾性波の放射問題として定式化される。これらの問題を記述する動弾性学の初期値境界値問題は次のように定式化される²⁴⁾。与えられた領域 D および時間 $(0, T)$ において方程式

$$(C_{ijkl}(x)u_{k,l}(x,t))_{,j} + \rho(x)f_i(x,t) = \rho(x)\ddot{u}_i(x,t) \dots \dots \dots (1)$$

を、初期条件 $(u_i - u_i^t)|_{t=0} = 0, (\dot{u}_i - \dot{u}_i^t)|_{t=0} = 0$ 、と領域 D の境界 $\partial D = \partial D_1 + \partial D_2$ における境界条件

$$u_i(x,t) = u_i^o(x,t) \quad (x \in \partial D_1),$$

$$t_i(x,t) = C_{ijkl}(x)n_j(x)u_{k,l}(x,t) = t_i^o(x,t) \quad (x \in \partial D_2),$$

および D が無限領域の場合は放射条件：固定された t と十分大きい $|x|$ に対して $u_i(x,t) = u_i^t(x,t)$ の下で解く。ここに $u_i, u_i^t, u_i^o, t_i^o, C_{ijkl}, \rho, f_i, \dots$ はそれぞれ

れ変位, 入射波, 与えられた境界変位および表面力, 弾性定数, 密度, 物体力および時間微分を表わす. 式(1)を時間 t を含んだまま解く方法を時間域の解析, u_i の時間に関する Fourier 変換 \hat{u}_i を未知数とする解析を周波数域の解析とよぶ. 周波数域の解析は $e^{-i\omega t}$ 型の時間調和問題と考えてもよい. ここに ω は円振動数, ないしは Fourier パラメーターである.

いま, 材料特性や欠陥形状がわかっているものとする. このとき上記初期値境界値問題を解くことを順問題解析とよぶ. 非破壊評価においては材料特性や欠陥形状が未知であるのが普通であるが, 予想される不均一部や欠陥形状に対する順問題解析を多数行つて解の振幅, 位相特性に関する知識を蓄積し, これをもとに欠陥を同定しようとする試みが多数行われている²⁵⁾. 簡単のため, 均質等方な場合の周波数域の解析を考えると, 上記の動弾性問題の解 \hat{u}_i は積分表示

$$\begin{aligned} \hat{u}_i(x) = & \hat{u}_i^j(x) + \int_{\partial D} \Gamma_{ij}(x-y) \hat{t}_j(y) dS \\ & - \int_{\partial D} \Gamma_{iu}(x-y) \hat{u}_i(y) dS \\ & + \int_D \Gamma_{ij}(x-y) \rho \hat{f}_j(y) dV \dots \dots \dots (2) \end{aligned}$$

を有することが知られている²⁶⁾. ここに \hat{t}_i は表面力, $\Gamma_{ij}(x)$ は基本解とよばれ, 点 y に大きさ 1 の集中荷重が作用したときの点 x での変位を表わし, $\Gamma_{iu}(x-y) := C_{ijkl} n_k(y) \partial_{m_l} \Gamma_{ij}(x-y)$ は二重層核とよばれている. 三次元問題においては Γ_{ij} は

$$\begin{aligned} \Gamma_{ij}(x) = & \frac{1}{4\pi} \left[\frac{e^{ik_T|x|}}{|x|} \delta_{ij} \right. \\ & \left. + \frac{1}{k_T^2} \partial_i \partial_j \left(\frac{e^{ik_T|x|}}{|x|} - \frac{e^{ik_L|x|}}{|x|} \right) \right] \dots \dots \dots (3) \end{aligned}$$

と求められている²⁶⁾. ここに, $k_T = \omega \sqrt{\rho/\mu}$, $k_L = \omega \sqrt{\rho/(\lambda+2\mu)}$ はおのおの横波, 縦波の波数であり, (λ, μ) は Lamé 定数である.

特に欠陥寸法に比べて欠陥から遠くないところの解を近距離場といい, その計算には式(2)が使われる.

一方, 実際の欠陥は考える構造部材の寸法に比べて十分小さいのが普通であり, 欠陥からの散乱波動は遠方場(原点からの距離 R による解の漸近展開の第 1 項)として扱ってもよいことが多い. 式(2)より, 散乱波の遠方場は座標原点からみて単位ベクトル N_i の方向では次のようになることが容易にわかる.

$$\begin{aligned} \hat{u}_i - \hat{u}_i^j \sim & \frac{1}{4\pi\mu} \left[\frac{\mu}{\lambda+2\mu} N_i \frac{e^{ik_L R}}{R} \right. \\ & \times \left\{ \int_D e^{-ik_L N_i N_j} N_j \rho \hat{f}_j(y) dV \right. \\ & \left. \left. + \int_{\partial D} e^{-ik_L N_i N_j} (N_j \hat{t}_j(y) + ik_L (n_j(y) \right. \right. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \left. + 2\mu N_k n_k(y) N_j) \hat{u}_j(y) \right\} \\ & + (\delta_{ij} - N_i N_j) \frac{e^{ik_T R}}{R} \left\{ \int_D e^{ik_T N_i N_j} \rho \hat{f}_j(y) dV \right. \\ & \left. + \int_{\partial D} e^{-ik_T N_i N_j} (\hat{t}_j(y) + ik_T \mu (N_k n_k(y) \hat{u}_i(y) \right. \\ & \left. + n_j(y) N_k \hat{u}_k(y)) dS \right\} \dots \dots \dots (4) \end{aligned}$$

ここに物体力は有限の範囲にのみ作用するものとした. 右辺の 1 つ目の { } 内は縦波成分を, 残りは横波成分を表わす.

一方, 材料特性や欠陥形状が未知の場合, 実験結果を用いてこれらを逆に推定する数学的問題の研究が近年盛んに行われており, これらを総称して逆問題とよぶ. 例えば入射波と対応する遠方場を与え, 欠陥形状を求める問題などがこれに当たるが, 本来非破壊評価はすべて逆問題として定式化されるべき性格を有している. 厳密に解ける逆問題は, 人体に用いられる X 線トモグラフィのような例外を除けばきわめてまれである. 今日用いられている数値解法には順問題の解表示に何らかの近似を用いて積分変換の問題に帰着させるもの^{27), 28)}, 実験結果と解表示の差を最小化するもの²⁹⁾⁻³¹⁾等がある.

(2) 非破壊評価のための波動解析法

弾性波の散乱問題に対する解析法には様々なものがある. ここでいう解析法とは, いわゆる散乱順問題に対する解析法であって, 非破壊評価本来の逆問題に対するものではない. しかし, 波動散乱解析はしばしば非破壊評価に対して基礎的で有益な情報を与える. 最近では, 波動解析結果をエキスパートシステムやニューラルネットワークなどの非破壊評価システムにおける知識ベースとして積極的に利用しようという動きもある. このように非破壊評価における波動散乱解析の重要性は次第に高まっているといえよう.

波動問題の解析法は大きく分けて時間域と周波数域の 2 つのアプローチがある. ここでは主に周波数域における数値解析法と近似解析法について, そのいくつかを紹介する.

a) 数値解析法

波動問題に対する厳密解(級数解)は, 無限弾性体中の円形, 楕円形, 球形などごく限られた形状の欠陥に対してしか求められていない³²⁾. しかし, 実際の構造物には様々な形状の欠陥が予想され, また, 表面や界面近くにある欠陥に対してはそれらの境界面を考慮した解析が必要になってくる. したがって, 実用上の非破壊評価を考えた場合, 波動解析は広範な問題を取り扱うことができる数値解析法によらざるを得ない.

非破壊評価では通常, 欠陥の大きさに比べてかなり離れた点において散乱波を検出する. したがって, その波動解析では遠方 ($r/a \gg 1$, r : 欠陥と検出点の距離, a

：欠陥の代表長)における散乱波を評価する必要がある。このことを考慮に入れると、差分法や有限要素法などの領域型の数値解析法よりも境界要素法に代表される境界型の解法の方が非破壊評価における波動解析法として適していることが理解できる。すなわち、領域型解法では遠方散乱波を評価するために解析対象領域を非常に大きく取らなければならない。一方、境界要素法では、次の2段階のプロセスを経て遠方散乱波が求められる。まず、式(2)より得られる境界積分方程式を離散化して、欠陥境界上の変位、表面力を求める。その後、求められた変位、表面力を散乱波の積分表現(2)に代入して任意の点の散乱波を計算するか、式(4)を用いて遠方における散乱波を計算することになる。境界要素法に関しては多数の文献があるので詳細な説明は省略する。なお、 $r/a \gg 1$ なる遠方において、散乱波は式(4)にみられるように縦波(P波)成分と横波(SV, SH波)成分に分離することができる。

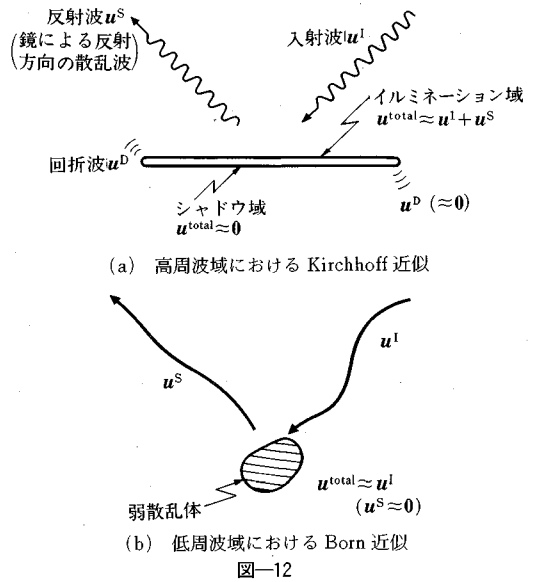
もちろん、上述の境界要素法に関する記述は、材料が均質等方線形である場合にのみ適用されるもので、一般的な非均質材料に対しては、もはや境界型解析法を導出することはできない。そのような場合には遠方も含めた領域型解析を行わざるを得ない。

b) 高周波域における近似解析法

前述の数値解析法は理論上どのような周波数域に対しても適用可能である。しかし、 $ka \gg 1$ (k :入射波の波数, a :欠陥の代表長)なる高周波域においては入射波の波長($\lambda = 2\pi/k$)が短くなり、それに伴う変形状態を正確に表現するためには非常に多くの要素が必要となる。このことは必然的に計算時間と計算容量の増加につながる。

幸いにして、高周波域においてはいくつかの近似法が提案されている。その1つがKirchhoff近似³³⁾(physical elastodynamicsともいう)である。例として、平面クラックによる波動の散乱を考えよう。クラックは向かい合う2つの面からなるが、一方の面には入射波が入射し、他方には入射しない。もし、クラック先端からの回折波を無視すれば入射波が入射する面での変位は、入射波とそこでの反射波の和に等しくなり、もう一方の面での変位はゼロとなる。便宜的に、変位を光に置き換え、光が差す側と影になる側を思い浮かべるとよい。このような近似法をKirchhoff近似という(図-12(a)参照)。十分に高い周波数域において回折波はクラック先端にのみ集中するので、クラック先端を除けばKirchhoff近似は成立する。そこで、Kirchhoff近似によって求められたクラック開口変位を散乱波の積分表現(式(2)あるいは式(4))に代入すれば、数値解析法のように方程式を解くことなく散乱波を評価することができる。

もう一つの近似法は波線理論³⁴⁾である。波線理論は求



めるべき点を通るすべての波線の振幅や位相を各波線ごとに個別に計算し、それらを総和して散乱波を構成する。高周波域における波動の反射、屈折は境界面での局所的な条件によってのみ決定されるので、各波線に対する解析は比較的簡単に行うことができる。また、波線理論を用いれば、クラック先端などからの回折波を考慮することができる。ただし、波線理論による解は、空間内のあらゆる点に対して必ずしも一様な精度をもっていないことに注意すべきである。入射波が遮られる Shadow zone の境界、反射波の領域の境界、また、caustics と呼ばれる境界においては波線理論の解の精度は著しく低下する。

c) 低周波域における近似解析法

低周波域においてもいくつかの近似法がある。一つは Born 近似³⁴⁾である。 $ka \ll 1$ の場合、入射波の波長は欠陥の大きさに比べて非常に長くなる。このとき、欠陥が弱散乱体(散乱効果の少ない散乱体)であるならば、入射波は欠陥による散乱の影響をほとんど受けることなく進行するであろう。Born 近似はこのような仮定のもとで欠陥近傍の全波動場を入射波動場によって近似するものである(図-12(b)参照)。したがって、Born 近似に基づく遠方散乱場は式(4)における積分内の全波動成分を入射波成分に置き換えることによって計算される。なお、Born 近似は IBA (Inverse Born Approximation) とよばれる逆問題の解析にも用いられている³⁵⁾

低周波域におけるもう一つの近似法は準静的近似法である。基礎式(1)の慣性項 $\rho \ddot{u}$ は周波数域では $-\rho \omega^2 \hat{u}$ と表わされることから、 $\omega \ll 1$ なる低周波域においては慣性項の影響は小さく動的解は静的解によって近似できるであろう。このような近似を用いれば、遠方に

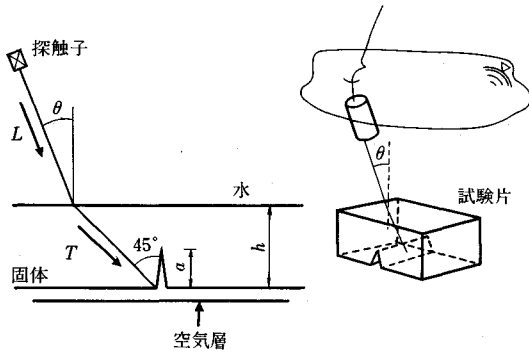


図-13 表面クラックと入射横波 (T)

おける散乱波は式 (4) における欠陥境界上の全変位場を対応する静的解に置き換えることによって評価することができる。

d) いくつかのコメント

今までに紹介したいくつかの近似法を用いれば、数値解析法に比べて非常に簡単に遠方散乱場を計算することができる。しかし、これらの近似法を有効に用いるためには、それぞれの近似法がどの程度の周波数域においてどれほどの精度をもっているかを明らかにしなければならない。低、高周波域では近似法を用い、中周波数域においては数値解析法(境界要素法)を用いようとする試み³⁶⁾がなされているが、適用範囲に関する明確な基準はいまだ確立されていない。

非破壊評価における波動解析は周波数域、時間域の両方において進められている。線形問題を扱っている限りにおいては両者は等価である。しかし、波動を検出する変換子などの更正が周波数域においてなされること、周波数域における解析法が時間域のそれに比べて簡単であることなどの理由から、これまで周波数域での解析が数多く行われてきた。しかし、クラックの閉口・進展や欠陥界面での離・損傷現象などの非線形挙動を解析する場合には、時間域における波動解析が不可欠である。

(3) 波動解析の非破壊評価への応用

これまで非破壊評価に利用されてきた波動解析の特徴は、高周波および低周波近似法にある。すなわち、欠陥の代表長に比べて非常に短い波長あるいは長い波長の波動の性質に着目した波動解析である。非破壊評価の定量化を目指して、最近、特に注目されてきたのが波動論に基づく数値解析法である。これは個体中を伝播する波動と欠陥との相互作用(散乱)効果が最も大きい中間周波数域の解析に威力を発揮する。この動きは最近始まったところで、いまだ完全に定量的結果を得るには至っていないが、これまで非破壊評価に応用された波動の数値解析のいくつかを紹介する。

a) 部材表面クラックの深さの推定

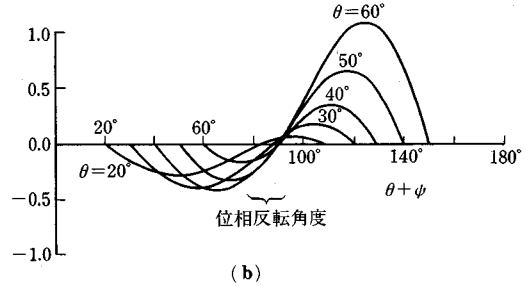
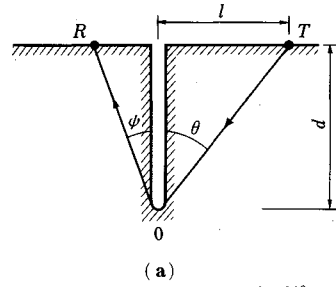
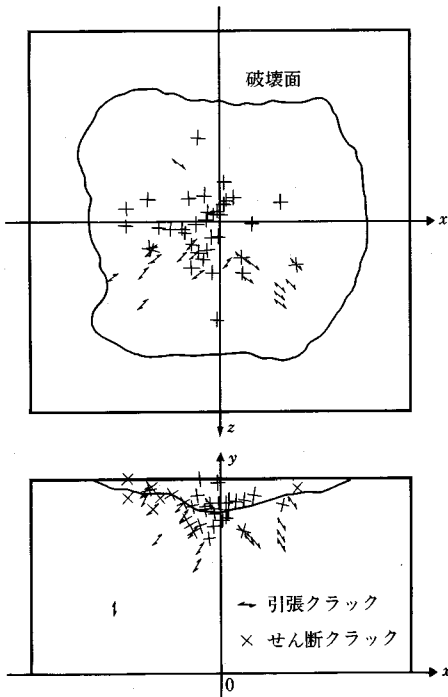


図-14 (a) 波線経路, (b) 送・受探触子の角度 (θ, ϕ) と位相の関係 (ポアソン比 $\nu=0.25$)

積分表示式 (2) の非破壊評価への応用として、部材の裏面に存在する表面クラックの深さの推定³⁷⁾がある。これは、固体表面のクラックによる弾性波の散乱波動解析と実験による参照信号を組み合わせることで解析と実験による知識ベースを作成し、ニューラルネットワークをトレーニングし、ある深さのクラックからの信号を実験により得たとき、このトレーニングを経たネットワークによりクラックの深さを推定しようとするものである。ここでは、水中で超音波(縦波(L))を発信し、トランスデューサーの角度 θ を、水中を伝播する縦波が部材内ではクラック面に対し 45° で入射する横波(T)にモード変換するように設定する(図-13)。この入射波がクラックとの相互作用を経て後方に散乱した波動を、発信と同一のトランスデューサーで受信し、受信された後方散乱波形からクラックの深さを推定しようとするものである。このとき重要な点は、いかなる波動を部材内に送信し、またネットワークの学習のためにいかなる知識ベースを採用したかという点にある。これにより現実の実験あるいは計測が規定されることになる。この点に関し、さらに基礎的なデータの積み重ねと、より現実在即した知識ベースの整備が望まれる。

波線理論の応用として、コンクリート表面に存在する表面クラックの深さの推定³⁸⁾がある。これは、クラックを挟んでコンクリート表面に置いた送信側(T)と受信側(R)探触子をクラックから少しずつ離れたとき、送信波形の位相と受信波形の位相が反転する現象を利用したものであり、計測波形における位相情報の信頼性に立脚している。この現象はクラック先端からの回折波の波



図—15 AEによるクラックの発生位置、破壊モード（引張、せん断）および方向の同定

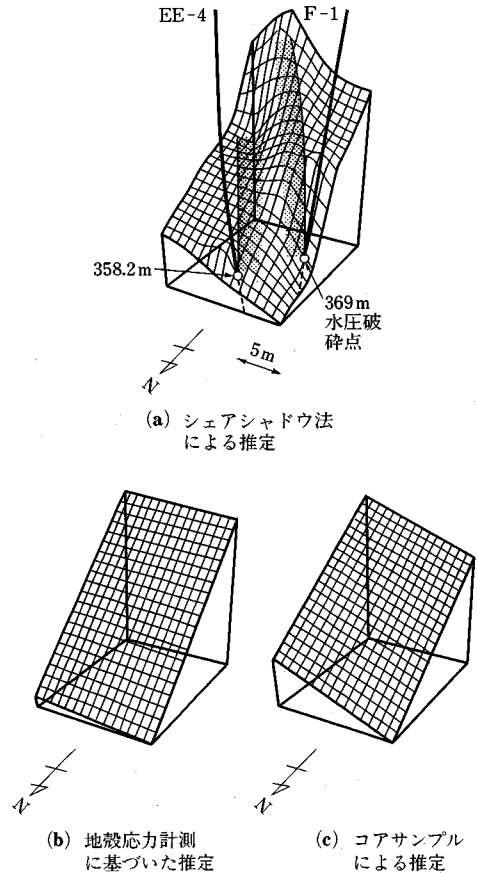
線経路についてのみ成立し（図—14），受信波形の初動の位相に着目した方法といえる。図において，位相が反転する角度が90°付近に存在するが，両探触子の角度（ θ, ϕ ）とクラックの深さ d には幾何学的な関係が存在することから，クラックの深さを推定することが可能となる。

b) 破壊源のメカニズムの同定

式（2）の右辺第1項の入射波の項を除き，時間域の基本解を用いれば，式（2）はAEによる破壊源のメカニズムを推定するための基本関係式となる。この積分表現を応用して，コンクリートの引き抜き試験における破壊源の位置とメカニズムの同定を試みた結果³⁹⁾を図—15に示す。図の上側が平面図，下側が側面図であり，比較のため最終破断面を実線で示してある。AEの波形解析から推定されたクラックの発生位置と破壊モード（引張，せん断）は図に示すとおりであり，割れの方法は図中2つの方向のうちのどちらかという意味において決まる。クラックの発生位置，モード，方向を総合すれば，破断面の表面付近の端部を除き，ほぼ最終破断面が推定されていることがわかる。

c) 岩盤内地下亀裂の推定

横波が水中を伝播しない性質を利用して，岩盤内の亀裂の位置，大きさ，方向を推定した例⁴⁰⁾を図—16に示す。ここでは流体を含む固体内の波動伝播の一現象が利用さ



図—16 人工地下亀裂の推定（図中（a）のEE-4とF-1は人工井戸，○印に付した数字は地下深度）

れている。地下水位以深に存在する岩盤内の人工亀裂に人工井戸からエアガンにより入力波動を発生させる。別の人工井戸で加速度波形の3成分を記録し，この加速度成分を縦波成分と横波成分に分離する。人工亀裂部分を水と考えれば，この部分は横波成分を遮断し，記録された横波成分にシェアシャドウ（横波成分の減少部分）が形成される。この方法による地下亀裂の推定結果が図の（a）であり，比較のため地殻応力計測に基づいた推定が（b），コアサンプル採取による推定結果が（c）に示されている。

d) 逆解析による欠陥の推定

波動問題の解の積分表示（2）をクラック問題に対する積分表示に変換し，固体境界で与えられたデータから固体内部に存在するクラックの位置，大きさ，角度を推定した例⁴¹⁾を図—17に示す。初期探査用クラック，真の楕円クラックの位置と，固体表面およびクラック面のメッシュ分割を示したのが上側の図である。下側の図（a），（b）は逆解析による真のクラックへの収束過程を図示したものであり，（a）が初期クラックとして円形クラック

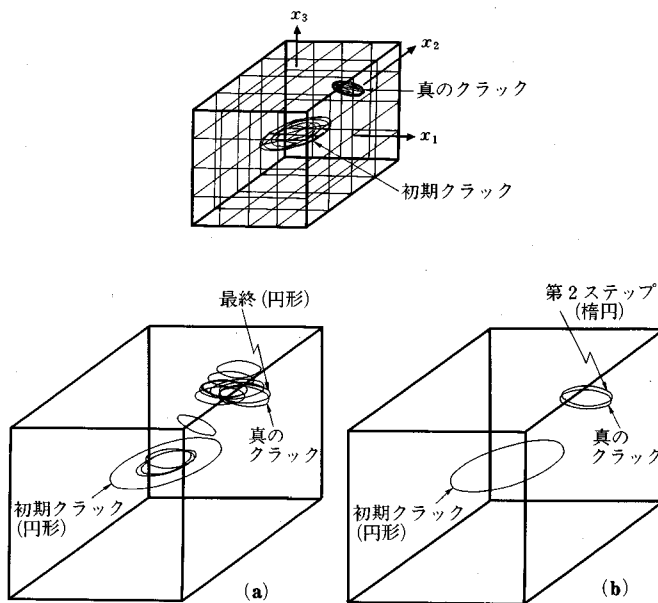


図-17 初期クラック、真のクラック位置およびメッシュ分割
(上図)と真の楕円クラックへの収束過程(下図)：(a)
円形クラック仮定による方法、(b) 初期円形、第2ス
テップより楕円クラック仮定による工法

クを仮定した場合、(b)が初期は円形、第2ステップから楕円クラックを仮定した場合である。いずれの場合にも、真のクラックへの収束はかなり速いといえる。

3. 非破壊評価の将来と定量的非破壊評価

(1) 欠陥の定量化とは

欠陥の定量化とは何か、またなぜ定量化が必要とされるのかについて考えるため、1.(1)で述べた現行の一つの代表的な超音波探傷法について考える。図-3はパルス・エコー法による探傷の典型的なブロックダイアグラムと探傷画面である。部材表面のトランスデューサーから超音波を発信し、同じトランスデューサーで欠陥からの反射波を受信する。画面の横軸に時間、縦軸に反射波の振幅を表示する。反射波の到達時間から欠陥の位置を、振幅値から欠陥の大きさを推定しようとするものである。トランスデューサーの走査法にはいくつかの方法があり、一点計測をAスコープ、直線走査をBスコープ、平面走査をCスコープとよんでいる。図-3はAスコープ画面である。いずれにせよ、この種の方法では、発信した超音波パルスの欠陥への到達時間とエコー振幅のみを基本とする。このため、欠陥からのエコーが検出できるかどうか、すなわち、欠陥の検出、を主眼とした手法であることがわかる。ここでは、エコーを鮮明にするため、送信パルス幅(周波数)、パルス数、信号処理技術などの改良が課題となる。

一方、①欠陥の種類、すなわち、クラック状か、ボイ

ド状か、あるいはインクルージョンなのかの識別、②欠陥の正確な位置、大きさ、形状、角度などに関する情報、また、クラックであるとすれば、③きれいに開口したクラックなのか、また、ある部分は閉じたクラックなのか、④単一欠陥なのか、複数欠陥なのか、複数欠陥であるとすれば、⑤どのような分布状態にあるのか、など、欠陥の特性に関する定量的情報が要求されてきたのが現状である。定量化とは、これら欠陥の諸特性の定量化を意味する。この定量化を達成するためには、欠陥からのエコーの到達時間と振幅だけによるのは合理的でないし、不十分であろう。

この要求は、60年代に飛躍的に発展した破壊力学の成果⁴²⁾による。破壊力学の成果を有効に利用するためには、クラックの位置、大きさ、形状、角度などに関する正確な情報を必要とする。破壊力学は、これらの情報をもとにした構造設計の、また構造物の保守あるいは寿命推定のための定量的な道具とみることができる。この定量的な道具は欠陥の特性に関する定量的な情報を必要とする。定量的欠陥特性が与えられたとき、破壊力学は、いま存在する欠陥は部材を破壊に至らしめる危険な欠陥なのか、今のところ存在していても不都合のない欠陥なのかという工学的判断の道具となる。もう一つの側面は、セラミックスなどに代表される新素材の開発と信頼性保証の問題である。この場合、通常の構造物材料に比べ数段小さい数十 μm オーダーの微小欠陥の定量化が要求される⁴³⁾。

定量化とは単に小さな欠陥の検出(存/否)を意味していない。鋼材内に存在する数mmのクラック,あるいは地盤・岩盤内であれば数十m級のクラックであっても,このクラックの位置,大きさ,形状,角度などに関する正確な情報を得ることを意味する。鋼材のみならず,コンクリートや地盤・岩盤など土木構造材料全体を考えれば,微小欠陥とともに,よりスケールの大きい欠陥の諸特性の定量化が望まれているといえる。コンクリートや地盤・岩盤などにみられるような,多数の欠陥の存在を考えると,欠陥とよぶよりも,むしろ,材料内のローカルな材料特性の変化とみた方が自然な場合も多く,以下の(5)に述べるように欠陥のみならず材料特性の定量化が必要とされているともいえる。

(2) 評価とは

探傷器に代表される機器を用いた非破壊試験あるいは非破壊検査を非破壊評価とよぶ動きが1970年代に出た動機は,上記定量化と密接に関係しており切り離すことができない。これは,一つに破壊力学の成果を積極的に有効利用するためには,典型的な探傷器が与えてくれる情報は非定量的に過ぎたことによる⁴¹⁾。いま,欠陥特性に関する定量的情報が得られれば,破壊力学をもとに,より信頼性ある工学的判断を下すことが可能となる。この判断プロセスの信頼性を向上させるために必要とされる事項を要約すると次のようになる⁴⁵⁾。

① 計測技術の定量化

- a. 定量的計測のための科学技術
- b. コンピュータ解析のための物理・数学モデルの開発と検証
- c. 計測結果の処理技術

② 判断プロセスの知能化

- a. 定量的情報の物理的解釈
- b. その工学的判断

計測技術と判断に関する上記項目は互いに密接に関係しており,いずれが欠けても正しい最終判断は難しい。たとえば,計測技術の定量化が進み,破壊力学的判断に基づき,ある構造部材の余寿命予測がより正確に行われるようになれば,その構造システム全体の信頼性は増し,ひいては経済性も増大する。

現在,定量的非破壊評価とよぶとき,2つの流れを指しているのが現状である。一つは,欠陥の諸特性の定量的な非破壊評価を,もう一つは,上記工学的判断をも含めた評価過程である。いずれにせよ,欠陥の諸特性に関する定量的評価が可能となることが,現時点における最重要課題の一つである。

定量的評価を必要とする過程という観点からみると,①素材プロセス,②施工プロセス,③供用プロセスの3つが考えられる。土木工学的に鋼材では②と③の過程が破壊力学と関係して重要であろう。また,コンクリ

ート,セラミックスや複合材では材料評価のための過程①も重要となる。地盤・岩盤では設計・施工のための過程①,②の評価が基本であろうが,地すべりのモニタリングの場合など過程③もこれから重要となろう。これら土木構造材料全体を考えたとき,より小さいスケールとともに,より大きいスケールでの土木構造材料の評価が今必要とされているといえる。

(3) 定量的非破壊評価のための現況

土木構造材料に対する非破壊評価をより定量化するための道具として,最近急速に進展しているものに次の3点が挙げられる。これにより,定量化のための状況が現在整いつつあるといえる。

① 計測機器

高速かつ大容量のデータ処理機器が小型かつ安価となっている。ここでいう計測機器とは従来探傷器とよばれているものを必ずしも意味しない。欠陥情報を含むある物理量を記憶・変換できる機器である。この記憶・変換処理の問題と記憶・変換処理された物理情報をどのように判断するかという問題は別問題である。もちろん,土木工学的には後者の判断の問題がより重要である。

② 解析技術

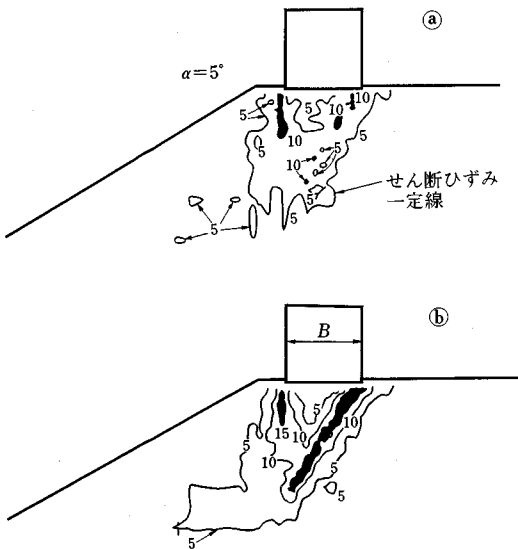
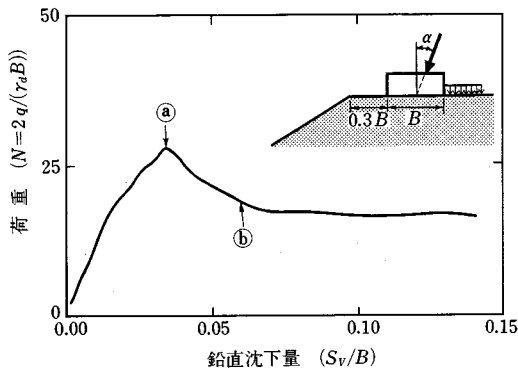
上記欠陥からの物理情報を解釈し,判断を下すために手助けとなる解析技術が近年大きく進歩している。2.で述べた超音波分野における波動解析技術の進歩はその一例である。差分法,有限要素法,境界要素法など数値解析法の非破壊評価の定量化への貢献が今後十分期待できる。これは,数値解析のための理論的背景の整備を前提として,現時点ではパソコン,ワークステーション,およびスーパーコンピュータの役割分担と連携をもとにした計算機環境のバックアップが期待できることによる。また,破壊力学と非破壊評価との関係を考慮した定量化解析技術も今後考え得る。

③ 欠陥を含む材料の力学

破壊力学,マイクロメカニクス,損傷力学など欠陥を有する材料の力学が進展しつつあり,欠陥がもたらす材料の性能低下・向上予測に関する研究が進められている。これら欠陥を有する材料の力学と非破壊評価は密接に関係しており,材料の性能評価の定量化のための状況も整いつつある。

(4) 定量的非破壊評価のメリット

定量的非破壊評価の潜在的ニーズは多くの土木分野に存在し,期待されるメリットも様々なものが考えられる。その一例として,地盤の支持力・斜面の破壊の問題が挙げられる。浅い基礎や斜面においては,すべり面の形成によって破壊に至るが,すべり面は終局状態において形成されるのではなく,荷重の小さい段階から変形が局所



図一八 砂斜面におけるせん断ひずみの局所化

化し、すべり面が形成され、荷重の増加とともにすべり面が進展することにより、最終的な破壊に至る。図一八は砂斜面のひずみ分布の測定結果であるが、最大荷重においてはすべり面は十分に発達しておらず、ピーク後に荷重の低下を伴ってすべり面が進展することが分かる⁴⁶⁾。もし、地盤内部におけるひずみ分布や変形の局所化、あるいは間隙水の状態が測定・評価できるようになれば、非破壊評価はこのような問題に大きなメリットをもたらすものと考えられる。

定量的非破壊評価とは、それに基づいて行う工学的判断の信頼性向上を目指すものであるが、地震警報の発令といった場合と同様に、たとえば構造物の補修・改修の実施等の工学的判断を行ううえで、非破壊評価の精度・信頼性の向上は計り知れないメリットをもたらすことが期待できる。

(5) 現実の構造材料と定量的非破壊評価

定量的非破壊評価を現実にも効果的なものとするために

は、土木材料の特性をより厳密に把握することが望まれる。

構造物全体の挙動を対象とする場合、ある程度巨視的なレベルで土木構造材料の性質を扱うことで十分であるとされている。しかしながら、材料内部の局所的な欠陥を対象とする非破壊評価では、微視的なレベルでの材料特性を抑える必要がある。現在の非破壊評価では材料の均一性・等方性・線形性が仮定されている場合が多いが、土木構造材料はこれらを満足しているとは限らない。実際、骨材とモルタルから成るコンクリートの不均一性、鋼材内の波の伝播に関する音響異方性、また地盤・岩盤材料の不均一性、異方性、非線形性などは、今後、土木構造材料の非破壊評価の定量化のために解決すべき問題である。なお、ここでいう微視的レベルとは土木材料ごとに、また同じ構造材料であっても対象とする欠陥ごとの代表欠陥寸法をもとにしたスケールでみた微視的レベルであり、実際のスケールは構造材料ごとにまた対象とする欠陥により異なる。

非破壊評価の目標は、広い意味での構造材料の性能の評価である。この評価の正しさは検査の結果から欠陥の存否とその特徴を判定することの正確さと、欠陥があるとされた材料はどの程度性能が低下しているかを推定することの正確さに依存する。一般には欠陥とみなされるものの存在が、材料のある性質に対しては性能の向上に貢献する場合もあり得る。したがって、定量的評価を高精度で行うためには、欠陥の特性評価と材料としての性能評価のバランスを合理的に取る必要があるであろう。

おわりに

本報告において概観したように、土木工学の分野における非破壊評価(NDE)はすでに様々な土木構造・材料について種々の目的、段階で実施されている。しかし、今後より有効な応用を目指すならば、定量的非破壊評価(QNDE)として実施する必要がある、特に2.において取り上げたような理論の展開とともに、特に不均一体の非破壊評価に適した機器の開発が必要である。また、評価(Evaluation)という語に象徴されるように、力学的または工学的な判断が重要である。このように、非破壊評価はハード、ソフト両面からのアプローチが必要となるが、今後QNDEに関する多様な独創的研究に期待したい。

本報告は後掲メンバーよりなる非破壊評価小委員会における討議に基づいて取りまとめたものである。執筆は、1.を三木、大津、戸井田、2.を西村、廣瀬、北原、3.を北原、堀井、堀が分担し、岸野、山辺とともに調整作業のうえ脱稿した。また、適用例や図面の一部については、東北大学工学部 新妻弘明先生と東京大学生産技術研究所 龍岡文夫先生にご協力を頂いた。ここに深甚の

謝意を表します。なお、本研究は平成2年度文部省科学研究費総合研究(A)「土木構造物の定量的非破壊評価方法に関する基礎的研究」(研究代表者:東北大学 岸野佑次, 課題番号:02302058)の補助を受けたものであることを付記する。

委員長:岸野佑次(東北大), 幹事長:北原道弘(東海大), 委員:尼崎省二, 長谷部宣男, 東原紘道, 廣瀬壮一, 堀 宗朗, 堀井秀之, 福井卓雄, 池田清宏, 加藤清志, 加藤直樹, 川上英二, 川崎五郎, 北村泰寿, 京谷孝史, 松岡健一, 三上 隆, 三木千寿, 宮崎早苗, 新関茂, 西尾伸也, 西村直志, 小畑 誠, 大島俊之, 大津政康, 大塚久哲, 大即信明, 奥井義昭, 奥村幹也, 佐藤誠, 橘 吉宏, 戸井田克, 渥美博行, 角田 忍, 魚本健人, 山辺 正, 山田健太郎, 山口宏樹, 米山弘志。

参 考 文 献

- 1) 三木千寿・深沢 誠・加藤昌彦・大睦久雄:表面疲労亀裂検出に対する各種非破壊試験の適用性, 土木学会論文集, 第386号/I-8, pp.329~337, 1987.
- 2) Sakamoto, K., Fukazawa, M., Hamano, M. and Tajima, J.: Estimation of fatigue crack growth by ultrasonic imaging method, Proc. of JSCE, Structural Eng. / Earthquake Eng., Vol.2, No.2, pp.209~219, 1985.
- 3) 谷川恭雄・小坂義夫:コンクリートの非破壊試験法に関する研究の動向, コンクリート工学, Vol.18, No.1, pp.38~50, 1980.
- 4) 明石外世樹・尼崎省二:コンクリートの非破壊試験の現状と趨勢, コンクリート工学, Vol.23, No.12, pp.11~20, 1985.
- 5) 石橋哲夫・木村定雄・弘中義昭・足立一郎:コンクリート構造物の施工時に発生するひびわれのAE計測, 土木構造・材料論文集, 第5号, pp.87~94, 1990.
- 6) 建設省監修:鉄筋コンクリート建築物の劣化診断技術指針・同解説, 技報堂出版, 1986.
- 7) 杉 正・山田有一・秋山吉弘:コンクリート構造物のひびわれによる健全度評価について, コンクリート構造物の耐久性診断に関するシンポジウム論文集, pp.151~156, 1988.
- 8) 後藤 勇・後藤浩平・江草 拓・和田宏一・真鍋幸男:構造物視覚点検装置の開発, 土木学会第43回年次講演概要集I, pp.520~521, 1988.
- 9) 笠井靖浩・木村應志・土居原健・織田和夫:コンクリートのひびわれ測定システムの開発, 土木学会第45回年次講演概要集V, pp.374~375, 1990.
- 10) 和美広喜・小田喜信・林 憲秋:鉄筋位置, 径, かぶり, コンクリート工学, Vol.27, No.3, pp.43~47, 1989.
- 11) ASTM C 876-77: Half Cell Potentials of Reinforcing Steel in Concrete, 1977.
- 12) 小林一輔編集:コンクリート構造物の非破壊検査, 森北出版, 1990.
- 13) 大津政康:アコースティック・エミッションの特性と理論, 森北出版, 1988.
- 14) 鶴岡司郎・加藤 潔:X線透過撮影法によるコンクリート構造物内の埋設物位置解析方法, 建築の技術・施工, No.11, pp.43~50, 1984.
- 15) Canter, T.R.: Review of penetrating radar as applied to nondestructive evaluation of concrete, In Situ / Nondestructive Testing of Concrete, ACI SP-82, pp.581~602, 1984.
- 16) 稲葉 茂:外壁改修工事の施工状況とひびわれの解析, 防水ジャーナル, 6月号, pp.89~94, 1987.
- 17) 青木謙治・広野 進・戸井田克・上野弘道:サイスミック・トモグラフィの岩盤調査への適用について, 第20回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.26~30, 1988.
- 18) 向上拓美・北村孝海・塩崎 功・登内正治:岩盤レーダーに関する室内および現地実験について, 第21回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.186~190, 1989.
- 19) 朽網 新・満村春櫻・田中秀和:25 tf/minに及ぶ多量湧水と闘う 九州縦貫自動車道肥後トンネル, トンネルと地下, 第18巻, 7号, pp.45~52, 1987.
- 20) 川上 純・山口伊佐夫・川邊 洋・西尾邦彦・芝野博文:地滑り実験時のAE計測, 第21回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.171~175, 1989.
- 21) 野口俊郎・三宅清士・西脇芳文:大規模地下発電所の設計と空洞周辺岩盤挙動計測, 土と基礎, Vol.29, No.1, pp.29~36, 1981.
- 22) 石田 毅・北野晃一・木下直人・若林成樹:AEと弾性波速度測定による花こう岩ブロックの熱破壊挙動の観測, 第20回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.66~70, 1988.
- 23) 青木謙治・戸井田克・腰塚憲一:AE計測による岩盤空洞掘削時の安定性監視技術について, 第8回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, pp.133~138, 1990.
- 24) Eringen, C.A. and Suhubi, E.S.: Elastodynamics, Vol. II: Linear Theory, Academic Press, New York, 1975.
- 25) たとえば, Kitahara, M. and Nakagawa, K.: BEM application to phase shift analysis, Boundary Elements XII (Eds. Tanaka, M. et al.), Vol.1, pp.581~592, Comp. Mech. Publications, Southampton, 1990.
- 26) Kupradze, V.D.(Ed.): Three Dimensional Problems of the Mathematical Theory of Elasticity and Thermoelasticity, North-Holland, Amsterdam, 1979.
- 27) Special Issue on Inverse Problems, Wave Motion, Vol.11, No.2, 1989.
- 28) Hirose, S.: A study on direct and inverse scattering problems of elastic waves, 京都大学学位論文, 1987.
- 29) Engl, H.W. and Groetsch, C.W.: Inverse and Ill Posed Problems, Academic Press, Boston, 1987.
- 30) Tanaka, M. et al.(Eds.): Boundary Elements XII, Vol.2, Section 6: Inverse Problems, pp.401~446, Comp. Mech. Publications, Southampton, 1990.
- 31) Nishimura, N. and Kobayashi, S.: Further applications of regularized integral equations in crack problems, Proc. 2nd IABEM Symp., 1990.
- 32) Pao, Y.-H. and Mow, C. C.: Diffraction of Elastic Waves and Dynamic Stress Concentrations, Crane and Russak, New York, 1973.
- 33) Achenbach, J.D., Gantesen, A. K. and McMaken, H.: Ray Methods for Waves in Elastic Solids, Pitman, Boston,

- 1982.
- 34) Gubernatis, J.E. *et al.* : The Born approximation in the theory of the scattering of elastic waves by flaws, *J. Appl. Phys.*, Vol.48, pp.2812~2819, 1977.
- 35) Rose, J.H. : Elastic wave inverse scattering in nondestructive evaluation, *PAGEOPH*, Vol.131, pp.715~739, 1989.
- 36) Schafbuch, P.J., Thompson, R.B. and Rizzo, F.J. : Scattering by open elliptical cracks at intermediate frequency, *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, Vol.10, 1991.
- 37) 北原道弘・野竹正義・小木哲朗・Achenbach, J.D. : 部材裏面クラックの一検出法, *構造工学論文集*, Vol. 37A, pp.465~477, 1991.
- 38) Nakano, M. : A practical method to measure the depth of cracks in concrete structures by using diffracted P waves, *Elastic Wave Propagation* (Eds. McCarthy, M.F. and Hayes, M.A.), Elsevier Science Pub., pp.465~470, 1989.
- 39) Ohtsu, M., Shigeishi, M. and Iwase, H. : AE observation in the pull-out process of shallow hook anchors, *Proc. of JSCE*, No.408 / V-11, pp.177~186, 1989.
- 40) 斎藤玄敏・新妻弘明 : 東八幡平人工地下き裂の三軸シェアシャドウ法による評価, *物理探査学会第80回学術講演論文集*, 論文 No. 38, 1989.
- 41) 西村直志・山本 巧・小林昭一 : 積分方程式法によるクラック形状決定問題の解法について, *境界要素法論文集*, 第7巻, pp.213~218, 1990.
- 42) 委員会報告 : 土木工学における破壊力学の適用性, *土木学会論文集*, 第380号 / I-7, pp.13~26, 1987.
- 43) 岸 輝雄・志波光晴 : ミクロの傷を追う, 丸善, 1989.
- 44) Thompson, D.O. and Thompson, R.B. : Quantitative ultrasonics, *Phil. Trans. R. Soc. Lond.*, Vol.292A, pp.233~250, 1979.
- 45) Heyman, J.S. (酒井啓司訳) : NDE (非破壊評価) になぜ科学が必要か?, *超音波 TECHNO*, 11月号, pp.47~49, 1989.
- 46) 黄景川 (Ching-Chuan Huang) : Failure Mechanism and Stability Analysis of Reinforced Sandy Slope, 博士論文, 東京大学, 1990.

(1991.2.28・受付)