

# 非破壊試験による鋼・コンクリート合成構造の 欠陥評価法に関する研究

長瀧重義<sup>1</sup>・鎌田敏郎<sup>2</sup>・矢崎剛吉<sup>3</sup>・黒坂 基<sup>3</sup>・岩波光保<sup>3</sup>

<sup>1</sup>フェロー会員 東京工業大学教授 工学部土木工学科 (〒152目黒区大岡山 2-12-1)

<sup>2</sup>正会員 東京工業大学助手 工学部土木工学科 ( 同 上 )

<sup>3</sup>学生会員 東京工業大学大学院修士課程 理工学研究科土木工学専攻 ( 同 上 )

本研究では、非破壊試験による鋼・コンクリート合成構造の欠陥評価法について検討を行った。この欠陥評価においては、定期検査および常時モニタリングを想定し、それぞれについて内部コンクリートのひび割れおよび鋼・コンクリート間の剥離の評価を行うための手法を検討した。その結果、定期検査においては、衝撃弾性波法およびX線法を用いることによって、鋼管内部のコンクリートのひび割れを検知することができた。また鋼とコンクリート間の剥離については、その領域と剥離厚さの程度を、赤外線法により測定した鋼管の表面温度分布から評価することができた。さらにAE法を用いることによって、常時モニタリングにおける欠陥評価が可能であることが明らかとなった。

**Key Words :** *nondestructive testing, steel-concrete composite structure, crack, delamination, impacted echo, X-ray, infrared thermography, acoustic emission*

## 1. はじめに

鋼・コンクリート合成構造<sup>1)</sup>は、耐荷性能が高く、高靱性であるがゆえに極めて耐震性にも優れた構造形式として、近年特に注目を浴びるようになってきた。しかも鋼・コンクリート合成構造は、鋼およびコンクリートのそれぞれの長所を生かし短所を補いあう設計理念によって、鉄筋コンクリート構造と比較した場合、設計荷重に対して格段に部材断面を小さくすることが可能であり、構造物の景観性の向上、空間の有効利用あるいは施工の迅速化といった要求に答えることのできる、今後広く活用が期待される構造形態であると言うこともできる。

そこでこのような可能性を実現することを目的として、鋼・コンクリート合成構造の設計方法、力学的性質および耐久性のそれぞれについて、現在盛んに研究が行われている。しかしながら鋼・コンクリート合成構造は、鋼とコンクリートの付着部分の形態の相違、部材接合部の形態の相違などによってそれぞれ力学特性が変わるため、もっぱら個別の部材の力学的挙動を明らかにするための研究<sup>2)</sup>が大半であるのが現状である。それゆえ現時点においては、部材の施工時あるいは施工後に生じる欠陥を評価するための研究は殆ど行われておらず、合成構造に所

要の性能を発揮させるためには、欠陥の生じていないことを確認するための手法の早急な確立が望まれている。しかも鋼・コンクリート合成構造には、鋼によってコンクリート部分が完全に被覆されているものもあり、この場合、内部のコンクリートの状態、あるいは鋼とコンクリートの付着の状況を目視によって検査することは不可能であり、適切な非破壊試験法の開発が必要であると考えられる。

したがって本研究では、鋼・コンクリート合成構造のうち、コンクリート表面のすべてが鋼板により被覆された外殻鋼管コンクリートを対象として、構造物の定期検査および常時モニタリングにおいて、非破壊的に欠陥を評価する手法の検討を行った。この欠陥評価における検討項目としては、内部コンクリートのひび割れ、鋼とコンクリート間の剥離をとりあげることにした。そしてこれらの結果を踏まえて、各評価対象に適した非破壊試験法の種類について検討を行い、各手法の適用性を把握することを目的とした。

## 2. 定期検査におけるコンクリート部分のひび割れ評価法についての検討

本研究においては、鋼・コンクリート合成構造の単純化した形態を考えるため、外殻鋼管コンクリートを用いた。図-1に用いた供試体概要を示す。鋼板の厚さは4.5mm、用いたコンクリートの配合はW/C = 40%、s/a = 41%である。この梁においてコンクリート部分にひび割れを発生させるため、曲げ載荷を施した。曲げ載荷の荷重レベルについては、梁底面の鋼管部分が降伏した荷重を100%として、その25%、50%、75%、100%の検討ケースを用意した。

このコンクリート部分のひび割れ評価においては、従来の超音波による手法<sup>3)</sup>が考えられる。そこで本研究においても、まずこの超音波法の検討を行ったが、内部コンクリート中へ入射すべき超音波を鋼板とコンクリートの境界面の存在により十分に透過させることができず、伝搬時間を測定することはできなかった。これにより、一般にコンクリートに用いられている超音波法は、本実験において評価対象とした箇所への適用は困難であることが明らかとなった。そこで本研究では、衝撃弾性波法およびX線法により内部コンクリートのひび割れを評価することを試みた。また、以上の手法の妥当性を確認するため、実際に鋼管の一部を切り取り、内部コンクリートのひび割れ発生状況を観察した。

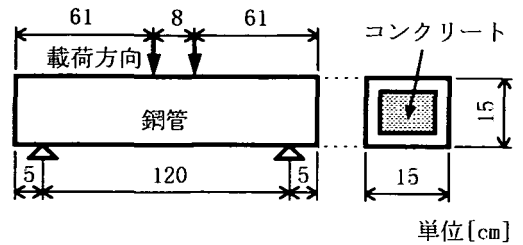


図-1 供試体概要および載荷方向

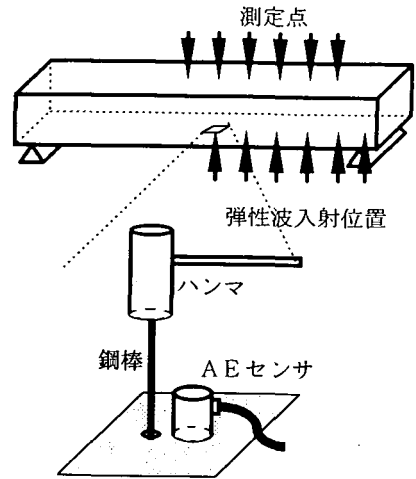


図-2 弾性波の入射方法

### (1) 実験概要

#### a) 衝撃弾性波法による評価

本手法では、コンクリートのひび割れ位置を評価するために、コンクリート中を伝搬する弾性波を検出する必要がある。鋼・コンクリート合成構造では弾性波の伝搬経路として鋼とコンクリートの2つのケースが考えられ、また鋼管を伝わる弾性波の方がコンクリートを伝わる弾性波より速いため、鋼管から直接弾性波を入射すると鋼管を伝搬する弾性波が卓越し、コンクリート中を伝わる弾性波を検出することができない。よって弾性波を入射する位置に、直径5mmの穴を開け、コンクリートに直接弾性波を入射した。弾性波は図-2に示すように、この穴からあらかじめ直径2mmの鋼製の棒の先端をコンクリート表面にあてておき、その棒をハンマにより打撃することによって入射した。このとき図-3に示すように、梁の底面(引張側、図中A側)と上面(圧縮側、図中B側)にAEセンサを配置し、弾性波を検出した。

弾性波はAのセンサから1cm離れた位置から入射し、AとBの2つのセンサにより検出した。この

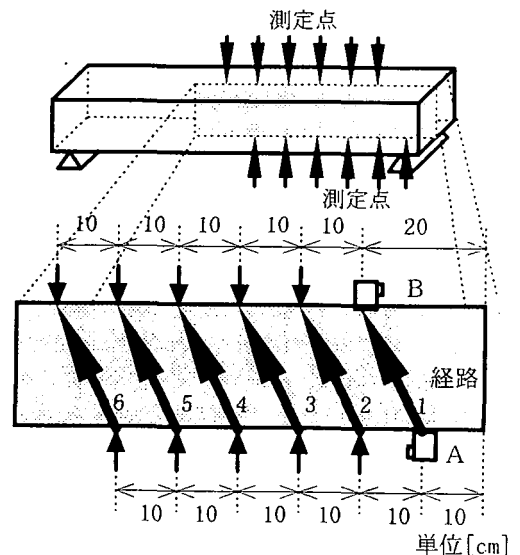


図-3 弾性波伝搬時間の測定

測定の後、記録された波形の波頭の到達時間を読みとることにより、AとBのセンサでの波形の伝搬時間差を求めた。この波頭の到達時間の読みとりにあたっては、AおよびBのそれぞれのセンサで受信される波形振幅のレベルをほぼ均等にするため、弾性波の入射位置近傍に設置したセンサAのゲインを30dB、しきい値を58dB、また受信センサBのゲインを35dB、しきい値を53dBに設定した。そして、この時間差によりひび割れ位置の推定を行った。

測定値の評価に際し、ばらつきの影響を考慮して10回の測定から上下4つのデータを取り除き、残り6つのデータの平均値を算定した。

測定は図-3示すように、6経路により行った。

### b) X線法による評価

一般に、X線透過像によれば、コンクリート中のひび割れ等の存在による透過線量の変化を、画像の濃淡により評価することができる。この場合、評価の対象に応じてX線の透過能を適切に調整することが重要となる。そこで本研究においては、X線管の管電圧300kVおよび照射距離85cmで一定のもとで、照射時間を5、10、20分と変化させることにより、X線の透過能を調整した。また使用したフィルムは工業用X線フィルム#100である。サイズは25.4cm×30.5cmである。グリッドは厚さ2mmのものを1枚用い、フィルムの上に設置した。なお撮影は、ひびわれの位置、大きさが判断できるように梁の側面で行った。この撮影に用いた装置は日本フィリップス(株)の工業用ポータブル型X線装置PS300である。

### c) 内部コンクリートの目視観察による評価

荷重レベルが25、50、75、100%の梁において、内部コンクリートのひび割れ発生状況を目視により観察した。このひび割れ観察は、図-4に示す鋼管の側面の一部をグラインダーで切り取った後に行った。

## (2) 結果および考察

### a) 衝撃弾性波法による評価結果

荷重レベル100%の梁における測定結果を表-1に示す。弾性波の伝搬時間のばらつきは経路によって異なるが、比較的健全であると推測される梁の端部側の経路では小さく、ほぼ5( $\mu$ s)の範囲内にある。しかし経路が梁の中央に近くなるにつれて、そのばらつきが大きくなる。これはひび割れの存在により、弾性波が入射位置から最短経路を伝搬しなかったことによるものと考えられる。つまり、コンクリート中を伝搬する弾性波には無数の伝搬経路が考えられ、例えばエネルギーの大きい弾性波の場合

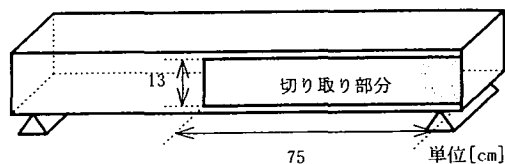


図-4 目視観察を行った箇所

表-1 経路ごとの弾性波伝搬時間差

経路1	経路2	経路3	経路4	経路5	経路6
70	70	75	72	80	80
74	68	70	75	80	80
70	75	73	73	82	80
73	75	73	68	85	85
70	70	70	75	75	78
72	75	65	65	80	88
平均	71.5	72.2	71.0	80.3	81.8

単位 [ $\mu$ sec]

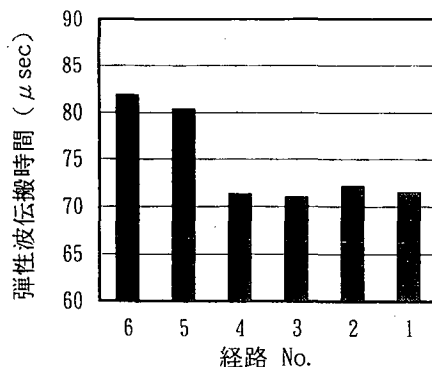


図-5 経路ごとの平均弾性波伝搬時間差

はひび割れの閉合している場所を通過し、受信される。しかしエネルギーの小さい弾性波はひび割れの閉合部を通過するときに減衰し、波頭が読みとれなくなり、ひび割れ先端を迂回する弾性波を検出することになる。

次に、各経路における平均の伝搬時間を図-5に示す。経路1~経路4ではこの時間に変化が見られないが、梁の中央部付近ではこれより大きくなっている。これより経路1~経路4の範囲では、ひび割れが発生しておらず、経路5の付近からひび割れが発生していることが推測される。

なおこの手法は先に述べたように、あくまでも各伝搬時間の差からコンクリートのひび割れ位置を推定するものである。よって、測定前に同一条件で測定した健全な箇所の伝搬時間のデータがあれば、より正確な評価をすることができるものと考えられる。



荷重レベル 25%



荷重レベル 75%



荷重レベル 50%



荷重レベル 100%

写真-1 X線撮影結果

### b) X線法による評価結果

本実験の範囲内においては、照射時間を5分および20分とした場合には、透過像によるひび割れの判読は不可能であった。これに対して、照射時間を10分とした場合は、ひび割れ発生部分において画像の濃淡が明瞭に生じた。写真-1に、照射時間10分の場合のX線透過像の撮影結果を示す。これによれば、荷重レベルが25%、50%、75%の梁ではコンクリート部分のひび割れを確認できなかった。これに対して荷重レベル100%の梁では、ひび割れの存在が認められた。

### c) 内部コンクリートの目視観察

写真-2に、各荷重レベルにおける内部コンクリートの目視観察の結果を示す。荷重レベル25%および50%の場合のひび割れの高さは、約5cmであり、また荷重レベル75%のひび割れの高さは約10cmである。すなわちひび割れは、荷重レベル50%までは進展しないが、荷重レベル75%ではそれがさらに進展し、新たなひび割れ面が形成されるものと考えられる。

次に、荷重レベル100%の場合の目視観察の結果と衝撃弾性波法による結果を比較する。経路1～経路4上にひび割れは認められず、経路5と経路6上にひび割れが存在している。これは衝撃弾性波法による結果と良い対応を示している。これより、荷重レベル100%の梁においては、衝撃弾性波法を用いることによりひび割れの位置を評価できるものと考えられる。

さらにX線法による結果との比較を行う。これに



中心 10 20 30 40 50 60 単位 [cm]

荷重レベル 25%



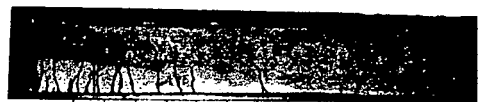
中心 10 20 30 40 50 60 単位 [cm]

荷重レベル 50%



60 50 40 30 20 10 中心 単位 [cm]

荷重レベル 75%



中心 10 20 30 40 50 60 単位 [cm]

荷重レベル 100%

写真-2 目視観察結果

よれば、目視検査により確認したひび割れ幅が0.2mm以下のものについては、透過像からは評価することができなかった。これは、これらのひび割れが、本実験条件のもとでは、現状のX線発生装置の検出能力の限界を越える範囲にあるためと考えられる。これに対してひびひび割れ幅が0.2～0.3mm以上のものについては、透過像において明瞭な濃淡が得られることがわかった。ただし、この程度のひび割れ幅でも、ひび割れが表面近傍のみ存在する場合については評価できなかった。したがってより詳細にひび割れを評価する場合には、さらに造影剤等の使用を考えることが必要になるものと考えられる。

### 3. 定期検査における鋼・コンクリート間の剥離の評価法についての検討

本章では、外殻鋼管コンクリート梁の曲げ載荷後に、鋼とコンクリート間の剥離程度を評価する手法の検討を行った。実験においては、赤外線法により曲げ載荷の荷重レベルが異なる外殻鋼管コンクリート梁の表面の温度分布を測定し、剥離程度を推定するための手法の検討を行った。

#### (1) 実験概要

本研究では、コンクリートに適用可能な赤外線法についての既往の研究成果<sup>4)</sup>を踏まえて、鋼・コンクリート合成構造の特性を考慮して、以下のような要件を満たす測定条件の設定を行った。すなわち、①瞬時に鋼に温度変化を与える。②面的に一樣な温度変化を与える。③できる限り大きな温度差を与える。④鋼にのみ温度変化を与える。

本実験においては、図-1に示す梁供試体を用いた。また赤外線の測定は同一の梁において載荷前、25%載荷後、50%載荷後、75%載荷後および100%載荷後に行った。そして、載荷荷重の増加にともなう剥離程度の進展を、鋼管表面の温度分布を用いて評価することとした。なお、温度分布の測定に用いた装置は、(株)日本アビオニクス社のサーマルビデオシステムTVS2300Mk II STである。

梁の冷却には、液体窒素を使用した。本実験ではまず厚さ9mm、幅25cm、長さ130cmのベニア板にタオルを巻きつけ、このタオルに液体窒素を染み込ませた。そして、この冷却板を鋼管表面に接触圧がほぼ均等となるように押し当てることにより冷却した。また冷却時間は10秒とした。

また、実際の剥離厚さを確認するために、図-6

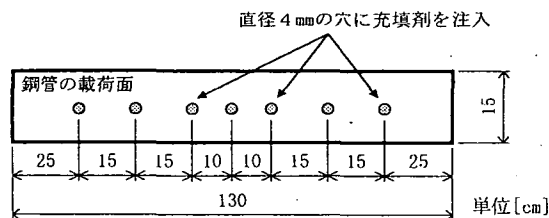


図-6 充填材注入位置

に示すように荷重レベル100%の梁の上面に直径4mmの穴を開け、そこからエポキシ系充填材を鋼管とコンクリートの剥離部分に注入し、充填材が硬化するのを待って上面の鋼管を切り取り、ノギスおよびマイクロスコープにより充填材の厚みを計測し、剥離厚さを確認した。

#### (2) 結果および考察

図-7に、鋼板表面の温度分布を荷重レベルごとに示す。なおこれらは冷却開始後30秒の時点の結果である。これによれば荷重レベル25、50、75%の各ケースでは、中心部の温度が周囲と比較して低くなっており、梁の中心部から剥離が進展しているものと推測される。しかし、表面温度の値自体には3つのケース間で大きな差は見られない。これは、鋼板が弾性域にあるため、鋼とコンクリートの剥離厚さが除荷後にほぼ同一になったことによると考えられる。また荷重レベル100%の梁では、梁の中心を挟んで中心から左右に約10cmの範囲に大きな温度低下が認められる。この部分は、図-8に示すような鋼管上面の座屈部分であると考えられる。この座屈のため、他の部分より剥離厚さが大きくなり、したがって熱の移動が起こりにくく温度の低下が大きくなったものと考えられる。これについては、赤外線測定後に剥離部分に注入した充填材の厚さを計測することにより確認を行った。鋼管内部の充填材の付着状況を写真-3に示す。これによれば、温度低下が著しい梁の中央部分の充填材の厚さは3mm程度であり、温度低下を示した領域の輪郭近傍の厚さは、0.1mm程度であった。また荷重レベル間で比較すると、荷重レベル100%のものは他の4つのケースよりも温度低下が大きくなっている。これは荷重レベル100%の場合は完全に梁が塑性変形するまで載荷したため、梁の全長にわたって剥離厚さが大きくなったことによるものと考えられる。これらより本実験において発生した程度の剥離厚さの違いは、赤外線法による表面温度分布を用いて評価できる可能性があることが明らかとなった。また本手法によ

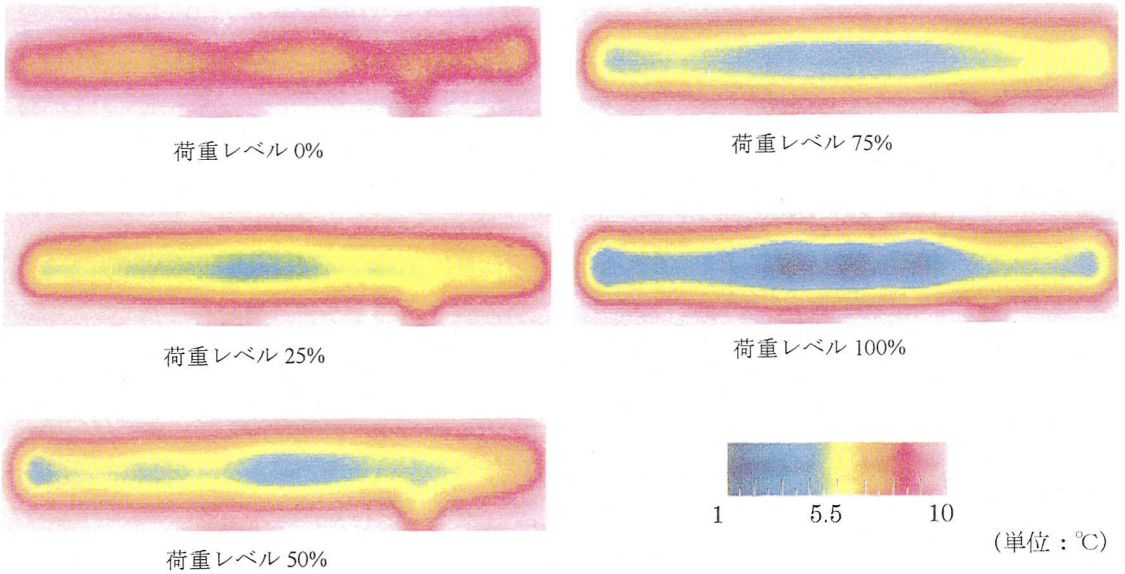


図-7 鋼管表面温度分布

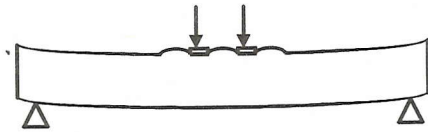
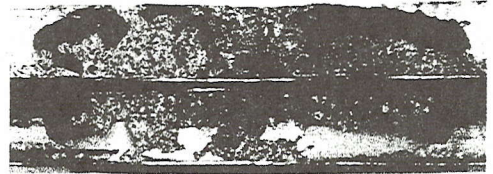


図-8 鋼管座屈状況

コンクリート表面



鋼管裏側

写真-3 充填材付着状況

り評価できる剥離の最小厚さは、0.1mm程度であるものと考えられる。

またこの手法による測定結果に影響を与える要因としては、環境条件(外気温度)、冷却時間、冷却方法、鋼板の厚さなどが考えられる。これらについては今後さらに、測定条件の検討が必要となると考えられる。

#### 4. 常時モニタリングにおける部材の欠陥評価に対するAE法の適用

本章では鋼・コンクリート合成構造における常時モニタリングを想定し、コンクリート中に発生する「ひび割れ」および鋼とコンクリートの間において発生する「剥離」のAE法による評価法の検討を行った。AE法はセンサ貼付などの簡単な準備さえ行えば、それ以降の計測は自動的に、かつ広範囲にわたって行うことができるという長所を有しているため、このような常時モニタリングに用いる手法とし

て最適であるものと考えられる。実験では、まずモデル化供試体によるAE計測を行い、鋼とコンクリート間において発生する「剥離」および「ずれ」によるAEの発生特性を把握した。そして、この検討結果を踏まえて、外殻鋼管コンクリート梁の曲げ载荷中にAE計測を行った場合に発生するAEについて、鋼とコンクリート間の「剥離」あるいは「ずれ」によるAE、コンクリート中で発生する「ひび割れ」によるAEとに識別することを試みた。なお「ずれ」とは、鋼とコンクリートの境界層で既に剥離している部分が機械的にすべることを指す。

##### (1) 実験概要

###### a) 供試体概要およびセンサ配置

実験ではまず、鋼とコンクリートの境界層における「剥離」および「ずれ」により発生するAE特性

を把握するため、それぞれに対するモデル化試験を行った（本研究ではこれ以降、「剥離」によるAE特性を把握するためのモデル化試験を「剥離」モデル化試験、「ずれ」によるAE特性を把握するためのモデル化試験を「ずれ」モデル化試験と呼ぶこととする）。次に外殻鋼管コンクリート梁の曲げ試験を行い、モデル化試験の結果を踏まえて、検出されるAEの発生特性をAEの波形パラメータにより評価した。

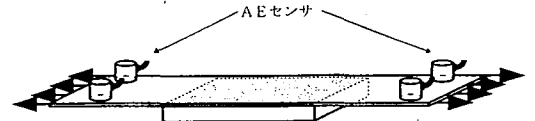


図-9 「剥離」モデル化供試体

#### b) 「剥離」モデル化試験

本試験で用いた供試体の概要を図-9に示す。この供試体は鋼板にモルタルを打継ぎ、鋼とモルタルを付着させることにより作製した。用いたモルタルの配合は  $W/C = 40\%$ 、 $S/C = 2.0$  である。また鋼とモルタル間の付着を強固にするため、鋼板表面のモルタルを打継ぐ部分をグラインダーにより研磨し、適度な粗度を与えた。そして鋼板の両端に引張力を加えることにより、鋼とモルタル間の付着破壊（剥離）を発生させ、その際に発生するAEについて計測を行った。なお鋼板端部のチャック部より発生するノイズについては位置標定結果をもとに削除した。

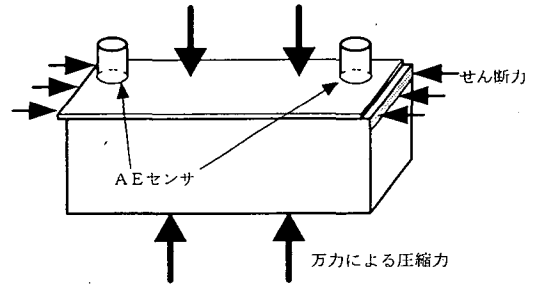


図-10 「ずれ」モデル化供試体

#### c) 「ずれ」モデル化試験

本試験で用いた供試体の概要を図-10に示す。この供試体はコンクリート上面に鋼板を載せ、万力により圧縮力を加えることにより、それらを一体化してある。したがって、鋼板とコンクリートの間には、上記b)のような付着力は存在せず、機械的な噛み合わせのみが働いている。そして、図-10に示すように、鋼板およびコンクリート（図中、灰色部分）にせん断力を加えることにより、鋼板とコンクリートの間に「ずれ」を生じさせた。なお鋼板と万力の間、コンクリートと万力の間、鋼板と載荷板の間、およびコンクリートと載荷板の間の摩擦に起因するノイズを除去するため、それらに間に0.1mm厚のテフロンシートを挟み込んだ。

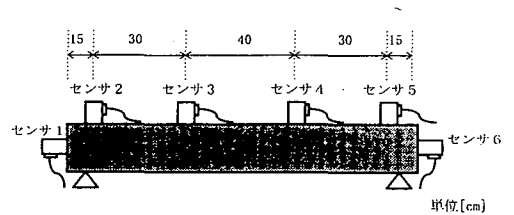


図-11 センサ配置位置

#### d) 外殻鋼管コンクリート梁の曲げ試験

本試験で用いた供試体の概要および荷重方法を図-1に示す。このようにして、鋼管上面が塑性域に達し座屈するまで曲げ荷重を行い、その際に発生するAEについて計測を行った。またこの荷重レベルを100%とした場合に、荷重レベル25%および50%まで荷重を行った場合のAEについても計測を行った。AEセンサの配置位置を図-11に示す。図中、センサ1および6はコンクリート表面に、またセンサ2～5は鋼管表面に貼付してある。

#### e) AE計測

AE計測は日本フィジカル・アコースティクス社のシステムを用いて行った。本システムにおいては、

AEセンサ（150kHz共振型）により検出されたAEは、プリアンプにおいて100kHzハイパスフィルターにかけた後、AE解析装置本体（LOCAN320）において解析・記録される。また計測条件については、増幅率をプリアンプ40dB、メインアンプ30dBの合計70dB、しきい値を50dBに設定した。

## (2) 結果および考察

### a) モデル化試験における「剥離」および「ずれ」の評価

「剥離」モデル化試験において発生したAEについて、そのRisettime（立ち上がり時間：あるAE波形が最初にしきい値を越えてから最大振幅値に達するまでの時間）の頻度分布および累積頻度分布を求めた結果を図-12に示す。この場合の累積頻度80%に対応するRisettimeは50（ $\mu s$ ）である。次

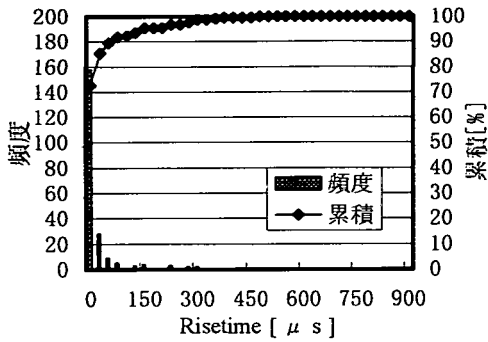


図-1 2 「剥離」モデル化試験における Risetime の頻度分布および累積頻度分布

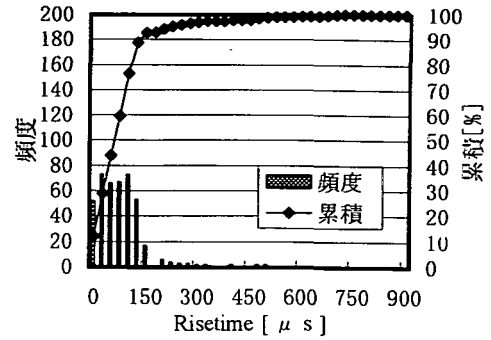


図-1 3 「ずれ」モデル化試験における Risetime の頻度分布および累積頻度分布

に同様に、「ずれ」モデル化試験の場合の Risetime の頻度分布および累積頻度分布を図-1 3 に示す。この場合の累積頻度 80% に対応する Risetime は 125 ( $\mu s$ ) である。以上より、「剥離」や「ずれ」により発生する A E の Risetime は比較的短いものが多いことがわかる。

#### b) 曲げ試験におけるひび割れ発生位置および規模の評価

図-1 4 に、外殻鋼管コンクリート梁の曲げ試験における A E 発生数の経時変化を示す。この図において載荷時間が 50, 65 および 335(s) の際に、他と比較して多数の A E が発生しているのがわかる。これらの A E は、曲げひび割れの発生に起因したものと推測される。なおこれらの時間に対応する載荷荷重の値は 33, 40 および 195(kN) である。

また発生したひび割れの規模を評価するため、本研究では、検出された A E 波形を包絡線近似した場合の面積として定義される A E エネルギー値を用いることとする。この A E エネルギー値は既往の研究より、相対的ではあるがひび割れの発生規模が推定できる<sup>9)</sup>ことが知られている。そこで上記の A E について、センサ 2 とセンサ 5 の到達時間差を用いて一次元位置標定を行い、その A E エネルギー値を求めた。この際、本来であれば A E エネルギー値を用いてひび割れの発生規模を評価するような場合には、A E の発生源からセンサまでの距離減衰を考慮する必要があるが、本研究では位置標定により推定される A E の発生位置に最も近いセンサによって受信された A E の A E エネルギー値を用いることにより、距離減衰の影響を無視している。

図-1 5 ~ 1 6 に、25% および 50% まで載荷を行った梁において発生する A E について、位置標定結果と A E エネルギー値と載荷時間の関係を、先の

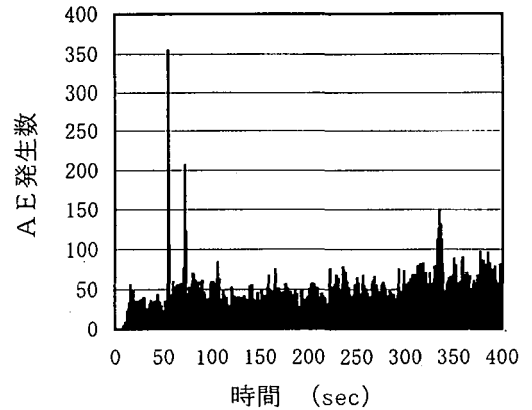


図-1 4 A E 発生数の経時変化 (荷重レベル 100%)

ひび割れの目視観察結果とあわせて示す。図中、X position とは、センサ 2 からの距離 (mm) であり、500 および 1000 がそれぞれ梁スパン中央およびセンサ 5 に相当する。荷重レベル 25% の梁の場合、目視観察の結果から、X position = 500, 650 の付近にひび割れが存在していることがわかる。また A E の位置標定結果からも、載荷初期に、X position = 500, 650 の付近に、極めて大規模な A E が発生していることがわかる。このことから、A E の位置標定を行った場合の A E エネルギー値を用いることによりひび割れ発生位置をかなりの精度で推定できることが明らかとなった。さらに X position = 500 の付近では、その後連続的に 40 秒間にわたって比較的規模の大きい A E が発生し、また X position = 650 の付近では、載荷時間 120 ~ 165(s) の間にも再び比較的規模の大きい A E が発生していることもわかる。



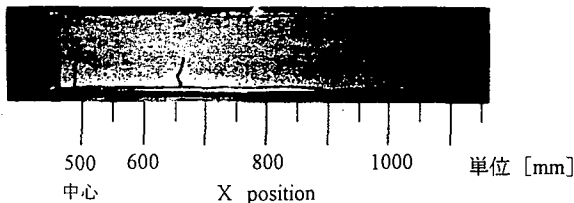
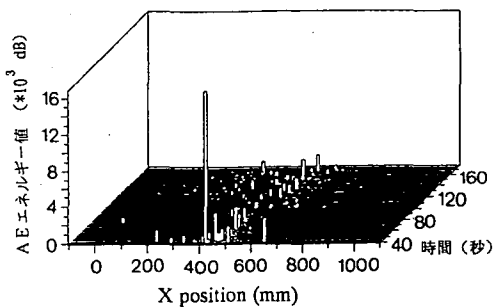


図-15 AEの位置標定およびAEエネルギー値の経時変化(荷重レベル: 25%)

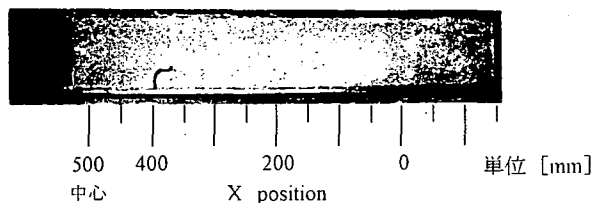
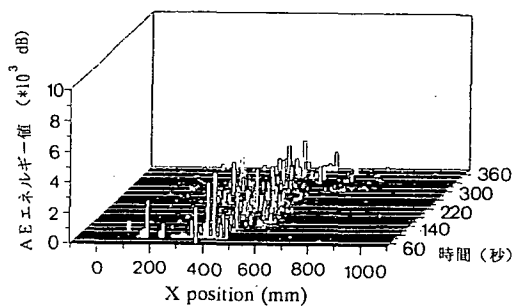


図-16 AEの位置標定およびAEエネルギー値の経時変化(荷重レベル: 50%)

これらは、ひび割れの進展によるものと考えられ、AEの位置標定を行った場合のAEエネルギー値は梁の破壊過程の評価にも適用可能であることが明らかとなった。一方、荷重レベル50%の梁の場合についても同様に、目視観察の結果より、X position = 400の付近にひび割れが存在しており、またAEの位置標定結果においても同一箇所にAEエネルギー値の大きいAEの発生が確認できる。

したがって、このような位置標定およびAEエネルギー値を組み合わせて用いることにより、鋼・コンクリート合成構造において発生するコンクリートのひび割れの位置およびその規模を評価できる可能性があることが明らかとなった。

### c) 曲げ試験におけるAEの発生要因の識別

先のモデル化試験の結果により、Risetimeの頻度分布および累積頻度分布を用いることにより、「剝離」によるAEおよび「ずれ」によるAEを識別できる可能性があることが明らかとなった。さらに、上記の位置標定およびAEエネルギー値による評価の結果、ひび割れ発生に起因すると推測されるAEについて、そのRisetimeの頻度分布および累積頻度分布を求めた結果を図-17に示す。この場合の累積頻度80%に対応するRisetimeは400(μs)である。このような手法を用いることにより、発生したAEを「集合」としてとらえた場合にその支配的な発生要因(ひび割れ、「剝離」、あるいは「ずれ」)を評価できる可能性があるものと考えられる。

そこで、外殻鋼管コンクリート梁の曲げ載荷中に

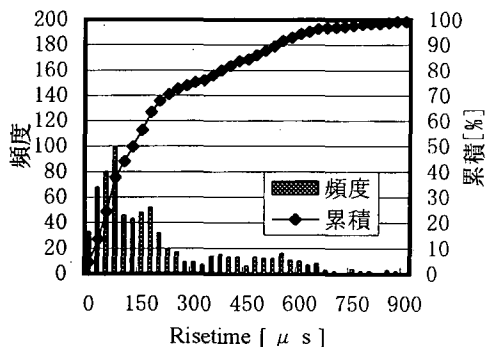


図-17 ひび割れ発生によるAEのRisetimeの頻度分布および累積頻度分布

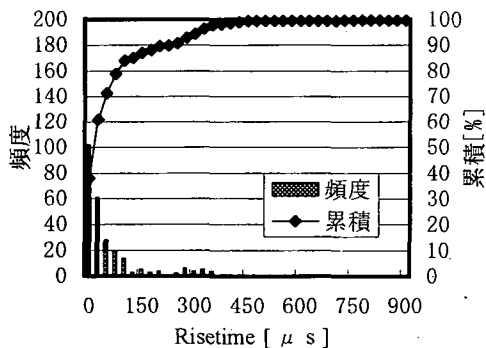


図-18 曲げ試験時に計測されたAEのRisetimeの頻度分布および累積頻度分布

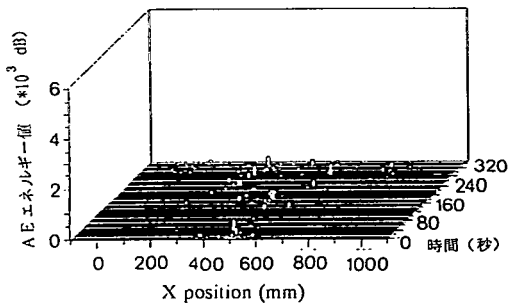


図-19 除荷時に発生したAEの位置標定およびAEエネルギー値の経時変化

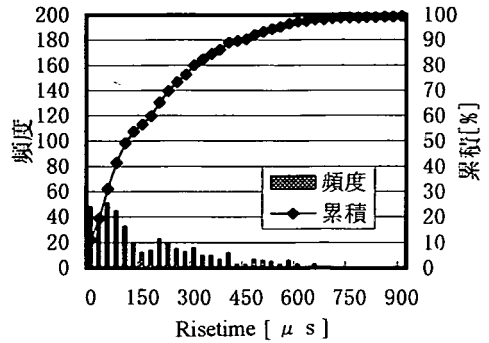


図-20 除荷時に発生したAEのRisetimeの頻度分布および累積頻度分布

検出されたAEについて、同様にRisetimeの頻度分布および累積頻度分布を求めた。対象としたAEは、荷重レベル100%の梁において発生したAEのうちで、載荷時間が0～240(s)の間にセンサ3とセンサ4の間に位置標定されたものである。その結果を図-18に示す。この場合の累積頻度80%に対応するRisetimeは325(μs)である。これより、曲げ載荷中に発生したAEのRisetime頻度分布は、「剥離」あるいは「ずれ」に起因するAEのものとひび割れに起因するAEのものとの間に位置していることがわかる。したがって、曲げ載荷中に発生したAEには、鋼とコンクリートの境界面の「剥離」および「ずれ」に起因するAEとひび割れ発生に起因するAEの両者が混在していたことがわかる。

さらに外殻鋼管コンクリート梁の載荷試験終了後の除荷時においては、新たなひび割れの発生および鋼とコンクリートの間の「剥離」の発生は考えにくく、その際に発生するAEは鋼とコンクリートの間の「ずれ」に起因するものが支配的であるものと考えられる。このことを実証するため、まず除荷時に新たなひび割れが発生していないことを確認することを目的として、除荷時において発生したAEについて、その位置標定、AEエネルギーおよび載荷時間の関係を求めた。その結果を図-19に示す。これより、AEエネルギー値が大きいものは存在せず、局所的に集中してAEが発生しているような箇所も認められない。したがって、ひび割れ発生に起因するAEは存在していないことが確認された。そこで除荷時に発生したAEのうち、センサ3とセンサ4の間に位置標定されたものについて、Risetimeの頻度分布および累積頻度分布を求めた結果を図-20に示す。この場合の累積頻度80%に対応するRisetimeは100(μs)である。これより、この場

合の頻度分布は、「剥離」モデル化試験のものより、「ずれ」モデル化試験のものに近いことがわかる。したがって、除荷時に発生するAEは鋼とコンクリートの間の「ずれ」に起因するAEが支配的であることが明らかとなった。

以上の結果より、AE波形のRisetimeの頻度分布および累積頻度分布を用いることにより、その発生要因を推定できることが明らかとなった。しかし前述のように、本手法は個々のAEについての発生要因を特定するものではなく、ある個数以上のAEを1つの「集合」としてとらえた場合の支配的な発生要因を推定するものである。したがって、本手法を実構造物の欠陥評価に用いる際には、この「集合」としてとらえたAEデータに対してパターン認識を行い、確率論的な考え方を導入する必要があるものと考えられる。

なお本研究では、モデル化試験におけるAEセンサ間隔と外殻鋼管コンクリート梁におけるAEセンサ間隔をほぼ同一としているため、伝搬距離による補正を考慮しなかったが、実構造物を対象とするときには、位置標定の結果を用いて伝搬距離による補正を行う必要があるものと考えられる。

## 5. 結論

鋼・コンクリート合成構造の欠陥評価には、それぞれの評価対象に応じた手法の選定が必要となる。そこで本研究の範囲内においては、以下のことが明らかになった。

- 1) 衝撃弾性波法により、鋼・コンクリート合成構造におけるコンクリートのひび割れ位置をおおよそ推定することができる。

- 2) 鋼・コンクリート合成構造におけるコンクリートのひび割れ評価にX線法を用いた場合、その幅が0.2mm以上のひび割れについては評価することができる。
- 3) 鋼・コンクリート合成構造における鋼とコンクリートの間の剥離厚さの違いを赤外線法により測定される鋼の表面温度の変化に着目することにより評価することができる。
- 4) AE法により、鋼・コンクリート合成構造において発生するコンクリートのひび割れの位置、規模および発生荷重、さらにはその進展状況を推定することができる。
- 5) 鋼・コンクリート合成構造において発生するAEについて、Risetimeの頻度分布および累積頻度分布を求めることにより、その支配的な発生要因を鋼とコンクリート間の剥離あるいは「ずれ」、コンクリート中のひび割れ発生とに識別することができる。

#### 参考文献

- 1) 土木学会：鋼・コンクリート合成構造の設計ガイドライン、構造工学シリーズ3、1989。
- 2) 例えば、横田弘、清宮理：鋼・コンクリートハイブリッドはりの力学特性に関する研究、土木学会論文集 No.451/V-17, pp.149-158, 1992。
- 3) 例えば、British Standards Institution Recommendations for Non-destructive Methods of Test for Concrete - The Measurement of the Velocity of Ultrasonic Pulse in Concrete, BS 4408, Part 5, 1974。
- 4) 例えば、柳内睦人、魚本健人：熱赤外線計測技術によるコンクリート構造物内空隙・鉄筋の判読に関する基礎的研究、土木学会論文集、No.442/V-16, pp.91-100, 1992。
- 5) Toshiro KAMADA, Shigeyoshi NAGATAKI, Nobuaki OTSUKI: Evaluation of Delamination at Interface Between Old Concrete and Repair Material by Non-destructive Testing Methods, *Proceedings of Second CANMET/ACI International Symposium on Advances in Concrete Technology*, pp.469-479, 1995。

(1996. 4. 1 受付)

## A STUDY ON NONDESTRUCTIVE EVALUATION METHODS OF FLAWS IN STEEL-CONCRETE COMPOSITE STRUCTURES

Shigeyoshi NAGATAKI, Toshiro KAMADA, Gokichi YAZAKI,  
Motoi KUROSAKA and Mitsuyasu IWANAMI

In this paper, nondestructive evaluation methods of flaws in steel-concrete composite structures were investigated. From the experimental results, it was clarified that cracks in concrete in a part of concrete filled steel tube beam could be detected by using the propagating time of the impacted echo. Moreover, cracks of more than 0.2mm width could be confirmed by X-ray photographs. Next, delaminations at the interface between concrete surface and steel tube could be detected by the thermal distribution on the steel surface measured with infrared thermography. Finally, it was confirmed that AE method was effective to evaluate flaws in steel-concrete composite structures at real time monitoring.