

コンクリート構造物の健全度判定に関する 2, 3 の計測手法

後 藤 祐 司*
榎 園 正 義**

まえがき

最近、コンクリート構造物のひびわれ、劣化、鉄筋の腐蝕といった損傷問題が大きな関心を集めており、コンクリート構造物の健全度判定のための非破壊試験方法の確立が、維持管理上も強く望まれるところである。これまでコンクリート構造物の非破壊検査のための試験研究は、数多く行われてきているが、シュミットハンマー法を始めコンクリート圧縮強度の推定に関する研究が多いようである。ひびわれ等の欠陥調査に関しては、尼崎、明石氏らの研究¹⁾等で超音波によるひびわれ深さの調査が行われてきている。また、電位差法によるコンクリート中の腐蝕程度の非破壊検査の研究等も行われている。

ここでは、著者らがいくつかのコンクリート構造物の実験の中で行ったコンクリート中の弾性波（超音波も含む）の伝播速度およびその波形などの測定によって欠陥部の評価等に有効であると思われた衝撃波法、超音波共振法およびアコースティックエミッション（A.E）の原理を応用した PC 鋼材の断線検知方法について紹介する。

1. 衝撃波法

コンクリート構造物の衝撃による弾性波の伝播速度を測定して健全度の評価を行おうという試みは古くから行われてきた。

衝撃波法の利点は、超音波法等と比較して長い距離（数 10 m）の測定が容易で大きなコンクリート構造物にも適用し得る点にある。この計測技術は主として、土木

の分野では、舗装版の調査²⁾、ひびわれ調査、トンネルの巻厚測定³⁾ および杭の根入れ深さの測定などに応用されている。

1.1 測定方法

衝撃波法は、コンクリート表面から衝撃機またはハンマーを使用し打撃することによって打撃点を中心に波動（周波数約 1 kHz～数百 kHz）を発生させ、伝播した波動を他方で受信し伝播速度および波形を観測する方法である。

この装置の構成は図-1 のようになっており、打撃によって発生した波動をトリガー用センサー（厚み振動子、50 kHz）で受信し電気信号に変換する。その受信信号を弾性波受信器で先鋭なパルス信号にし、波動のスタート信号とする。コンクリート中を伝播してきた波動は受信センサー（数百 Hz～数百 kHz）で受信し電気信号に変換する。また受信器で必要な周波数域の信号を選択し増幅する。得られた波形は単発現象であるため一たん波形記憶装置に残し、ブラウン管オシロスコープ等で波形を再生し、観測する。

測定方法には、図-2 に示すようにセンサーの置き場所の違いによる波動の伝播経路の違いによって、透過法、反射法、並列法による測定方法がある。

一般のコンクリート構造物ではその形状から透過法に

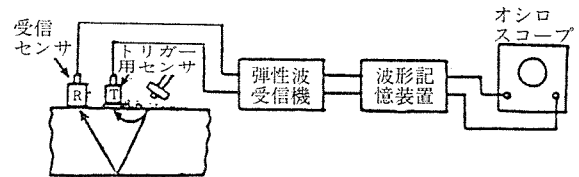


図-1 衝撃波法の構成

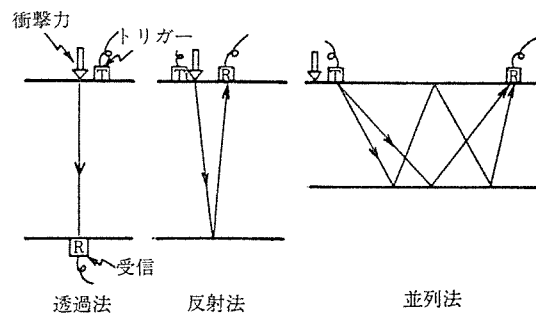
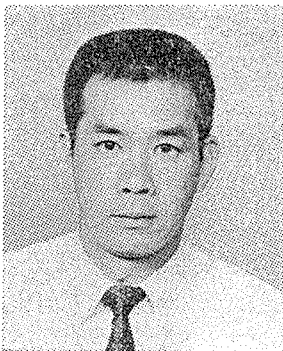
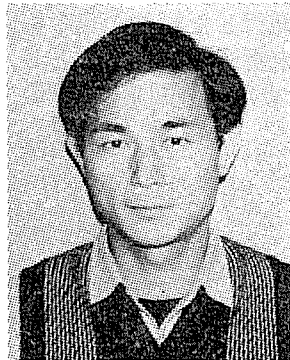


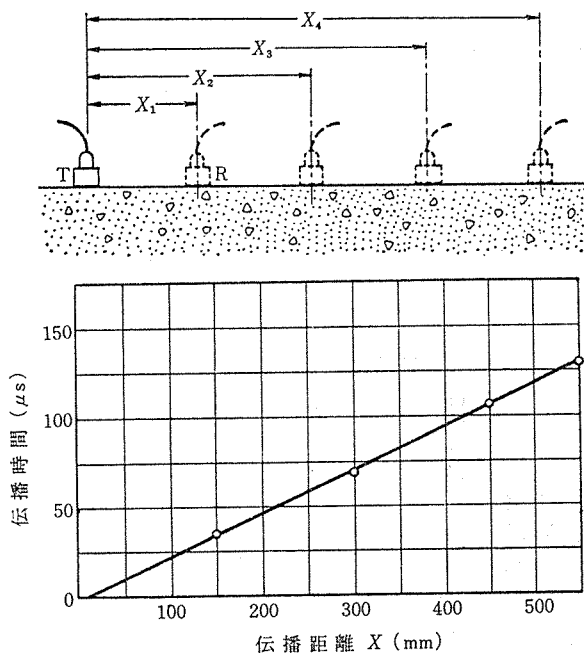
図-2 測定方法



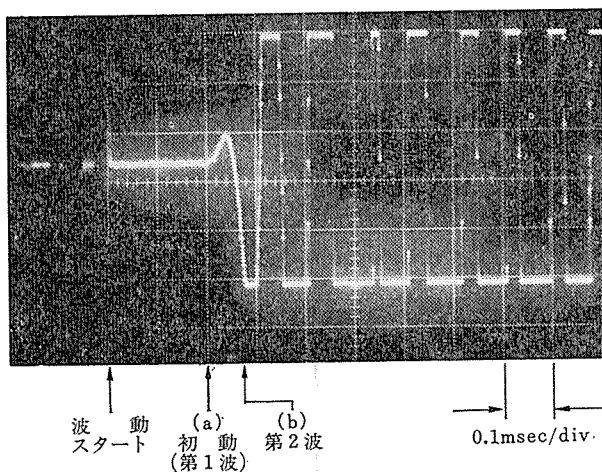
* Yuji GOTO
日本道路公団試験所
コンクリート試験室主任



** Masayoshi ENOKIZONO
(社)建設機械化研究所
試験部研究員



図—3 伝播速度の求め方 (走時曲線)



図—4 受信波形例

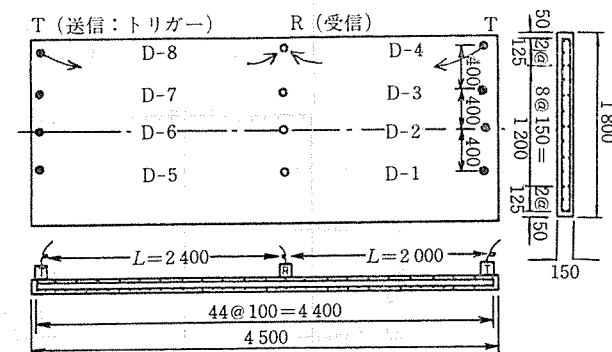
よる直接測定が困難な場合も多い。そこで一方向から測定する反射法または並列法を用いることが考えられる。

調査の目的によって、弾性波速度を求めたい場合と距離(厚さ、長さ等)を求めたい場合がある。弾性波速度測定の際はあらかじめセンサーの設置した距離を測って伝播時間から速度を求める。距離測定の場合は、反射法等で得られた受信波の伝播時間から距離を求める。その基準となる速度は測定するコンクリート構造物の一部で測定した値を使用することになる。

並列法を用いてコンクリート内部を何回も弾性波を反射させ連続的に内部欠陥等の調査を行う際は、図—3に示すような手法を用い、単位長さ毎に受信センサーを移動して所要時間を求めグラフに表わす(走時曲線)方法を用いることが考えられる。その際、測定対象によって周波数を変えて受信することも考えられる。

表—1 供試体 N.C 主要諸元

供試体	幅員	長さ	厚さ	主鉄筋	配力鉄筋
N.C	1.8 m (スパン 1.5 m)	4.5 m	15 cm	上側 D13 ctc 200 下側 D13 ctc 100	上側 D10 ctc 300 下側 D10 ctc 150



図—5 測定位置

記録された波形の見方の一例として、RC床版における並列法(L=90 cm)による観測例を図—4に示した。

ここで、第1波(初動: a)=0.2 msec(伝播速度 4500 m/sec)、第2波(b)=0.26 msec(3500 m/sec)であり、(a)は振幅が小さく速度が速いので鉄筋経由、(b)は振幅も大きく連続した多重反射の波動からコンクリート経由波動と判断できる。

1.2 適用例

(1) RC床版の健全度調査

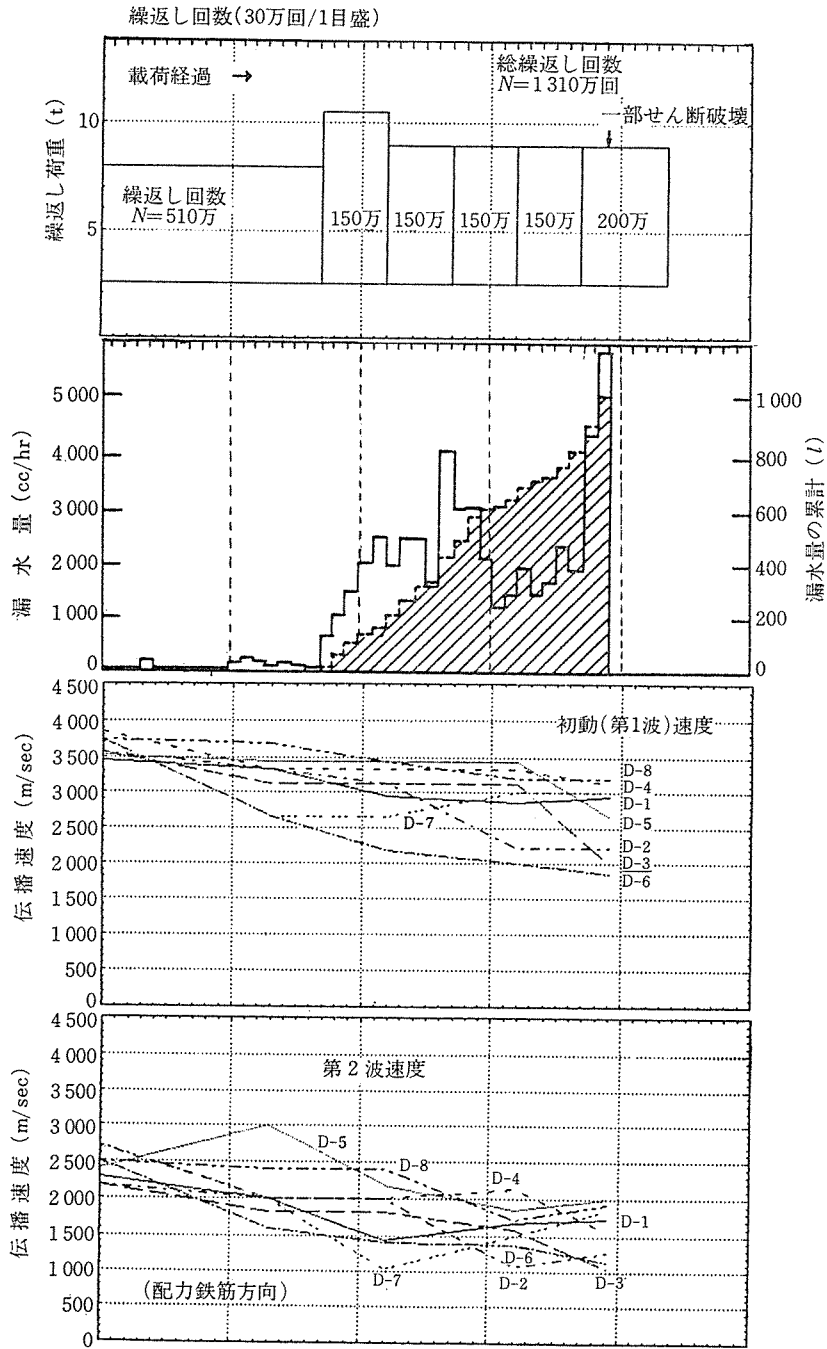
室内におけるRC床版の疲労試験の際に、RC床版の健全度調査を目的とした衝撃波法による測定を実施した例を紹介する⁴⁾。

使用したRC床版の主要諸元を表—1に示す。また、この床版は劣悪な乾燥条件下で製作され、脱型時(コンクリート打設より10日後)には主鉄筋方向に貫通したひびわれが数箇所確認されたものである。

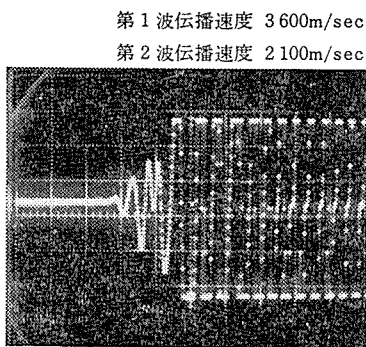
測定は図—5のように床版厚さの10倍以上の距離にセンサーをセットし、並列法によって行った。疲労試験(総繰返し回数1310万回)の進行段階に合わせて同位置で測定を行った。

試験前における伝播速度の測定結果は、床版のコンクリートが健全な所で第1波は4000 m/s、第2波は3600 m/s程度で、初期ひびわれを含んだ経路では第1波は平均3600 m/s、第2波は平均2400 m/s程度であった。

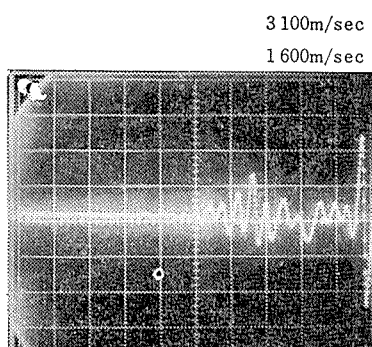
図—6は、RC床版の疲労試験における床版面を通しての漏水量に代表される床版劣化の程度と伝播速度の経時変化であるが、このように床版の損傷進行とともに伝播速度の低下が生じている。また床版が健全なときは多くの多重反射が連続して続くが、ひびわれの発生や損傷が進行すると受信波形が大幅に減少していくことが認め



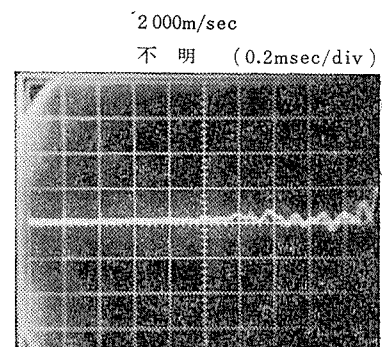
図—6 試験経過と伝播速度および漏水量



図—7 初期ひびわれ状態

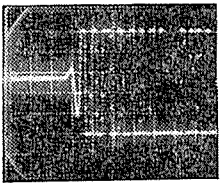
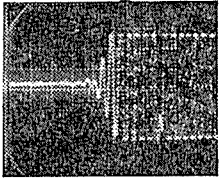
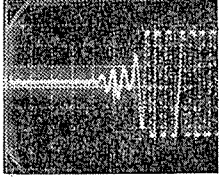
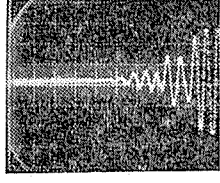
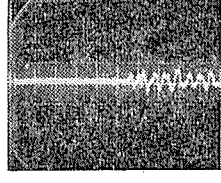


図—8 漏水, すりへりが増加した状態



図—9 せん断ひびわれが発生した状態

表—3 受信波形による健全度判定

品質評価				
優	良	やや良	不良	不可
				

表—2 伝播速度による健全度判定

第1波（初動）による判定		第2波による判定	
品質評価	伝播速度 (m/s)	品質評価	伝播速度 (m/s)
優	4000 以上	優	3000 以上
良	3500~4000	良	2500~3000
やや良	3000~3500	やや良	2000~2500
不良	2500~3000	不良	1500~2000
不可	2500 以下	不可	1500 以下

表—4 RC 梁供試体主要諸元

幅員 (cm)	高さ (cm)	長さ (m)	上段鉄筋	下段鉄筋
40	70	11	D16	D16, D13
使用コンクリート $\sigma_{ck}=240 \text{ kg/cm}^2$				

られた。例えば、測定位置 [D-3] の受信波形は、試験前の初期ひびわれの状態（図—7）、損傷が進行した状態（図—8）、せん断ひびわれが生じた状態（図—9）のような波形の変化が見られた。

並列法による測定結果より、RC 床版の健全状態から押抜きせん断破壊を生じるまでの伝播速度の変化より健全度の評価を試みると表—2 のように、同様に受信波形の変化から表—3 のような見方ができる。

ただしこれは本実験からの結果であり、今後実橋へ適用するには更に検討を要すると思われる。

(2) RC 梁の長さ測定

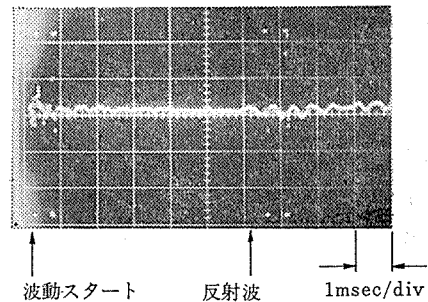
RC 梁 (11 m) を用い、衝撃波法による反射法によって比較的長距離の測定が可能かどうかを試みた。

対象とした RC 梁供試体の主要諸元を表—4 に示す。

RC 梁端部の片側断面から打撃と受信を行う方法で対面からの反射波を受信して、その往復の所要時間を求めた。反射波時間は図—10 に示すように 6.4 msec であった。反射法による測定状況を写真—1 に示す。また、RC 梁のコンクリートの伝播速度は 3500 m/s であった。

これらの結果より、RC 梁の長さは

$$\text{RC 梁の長さ} = \frac{\text{伝播速度 (m/sec)} \times \text{往復の所要時間 (sec)}}{2}$$



図—10 反射法による受信波形



写真—1 反射法測定状況

$$= (3500 \times 0.0064) \div 2 = 11.2 \text{ m}$$

これより、梁の全長は 11.2 m と推定され、ほぼ実際の長さに近い値が得られ伝播距離 22 m でも測定が可能であった。

1.3 まとめ

衝撃波法による測定は、一般に行われている簡易弾性波法と比べ安定した再現性のある測定結果を得ることができた。RC 床版および構造物の健全度の判定は伝播速度と受信した波形の両方から検討するのが望ましいと考えられる。

測定方法の特徴をまとめると次のようになる。

透過法：正確な伝播速度が測定できる方法であり、測定範囲も数十m程度と長い。

反射法：局所的なひびわれ調査や厚さ測定法として有

効と考えられる。

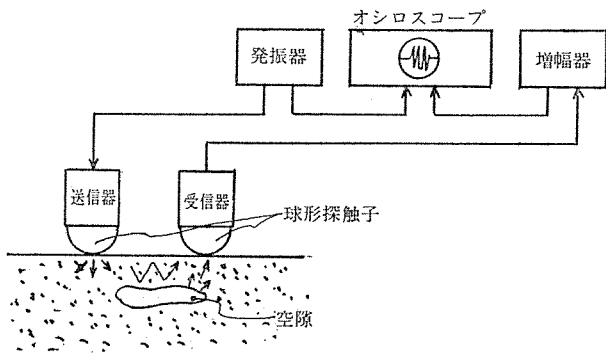
並列法：床版の健全度判定方法として、最適な周波数を選択し伝播距離を一定にして比較測定を行えば、最も実用的な測定方法と考えられる。また、走時法を併用すれば欠陥箇所の調査が可能となる。

コンクリート構造物は使用目的により形状、材質、支持法などさまざまであるため計測上の制約をうけることになり、実際の構造物で調査を行う場合は対象物に合った測定方法と着目する周波数の設定等に留意して行う必要がある。

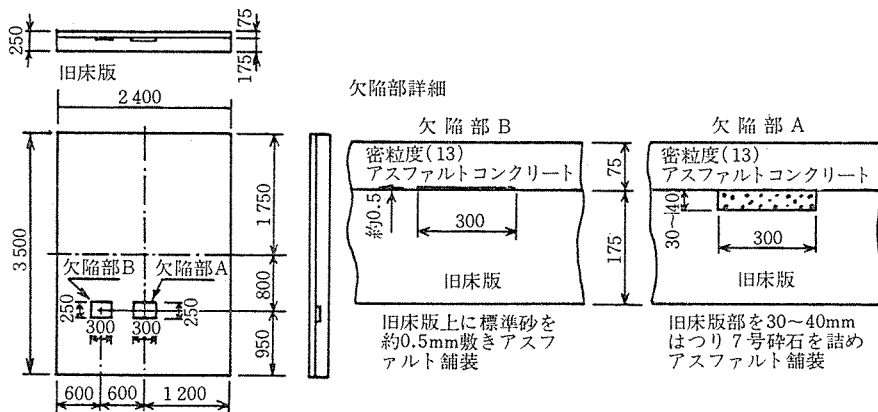
2. 超音波共振法（共振法）

従来、コンクリート構造物に介在する空隙や接着不良箇所を表面から検知することはきわめて困難で、このため打音法や超音波法など種々の確認方法が試みられているが、能率的で信頼できる方法がない。建築物等のタイル剥離検査に関しては実用機⁹⁾も登場してきているが、ここでは剥離（空隙）検知に共振法を適用した例について述べる。

一般に超音波による共振法というとき、コンクリートの動弾性係数の測定のごとく入力する周波数を変化させ固有振動数を求め、部材厚、その他の物性値を推定する方



図—11 共振法の構成



図—12 供試体 AS-1 諸元

法に使用されている方法をいう場合が多い。

ここでいう共振法とは、空隙や接着不良箇所における共振鳴現象を利用する方法で、低周波域に多数の振動数を有する波動を被測定固体内に送信して、空隙や接着不良箇所で作られる共振波の反射を感度よく検知できるように構成されている装置である。

2.1 測定方法

この装置の構成は図—11のようになっている。

送・受信センサーは、振動子（圧電変換素子）と球形探触子で構成されている。送信センサーは発振器からの電気信号により対象物に多数の振動数を有する振動を発生する。送信センサーの先端を球形探触子によりコンクリート等の表面に接触させて、コンクリート中に波動を入射する。受信センサーは対象物の振動を受信して電気信号に変換する。増幅器によって受信センサーからの信号を増幅し、ブラウン管オシロスコープで受信波形を観測する。

この方法では空隙部や剥離箇所で独特な共振波形が得られることにより検知が可能である。

2.2 適用例

(1) アスファルト舗装下面の欠陥部および剥離部調査

RC 床版上に 7.5 cm の密粒度のアスファルト舗装を施した供試体について共振法による床版の欠陥部調査、床版とアスファルト舗装の剥離状況を調査した。

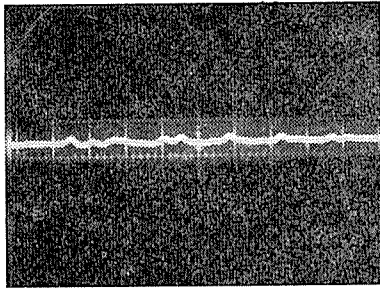
供試体上面には、欠陥部 A (25×30×深さ 3~4 cm) を作り 7号碎石を詰め、欠陥部 B (24×30 cm) には剥離状態を作るために標準砂を 0.5 mm 程度敷きならして、アスファルト舗装を行った。供試体の諸元を図—12に示す。

舗装上面から内部に向かって超音波波動を入射し、その付近に受信センサーをセットして測定を行った。共振法による測定状況を写真—2に示す。

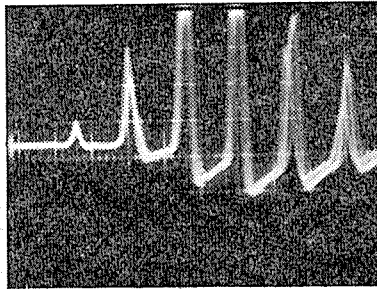
測定結果は図—13~15に示すように特徴的な共振波形が得られた。付着良好部ではほぼ受信波形がなく（図—13）、欠陥部Aおよび欠陥部B（剥離部）では図—14、15のような波形が得られ欠陥の検知ができた。

(2) 増厚床版の剥離診断

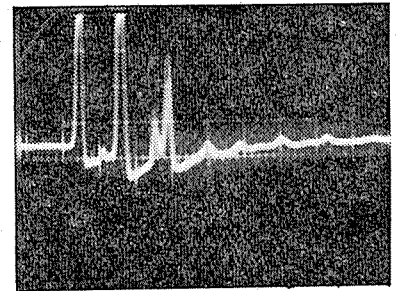
RC 床版の補強工法の1つとして床版上面増厚工法（コンクリートによる一種のオーバーレイ）があるが⁹⁾、この工法の場合は旧床版と増厚部との一体性



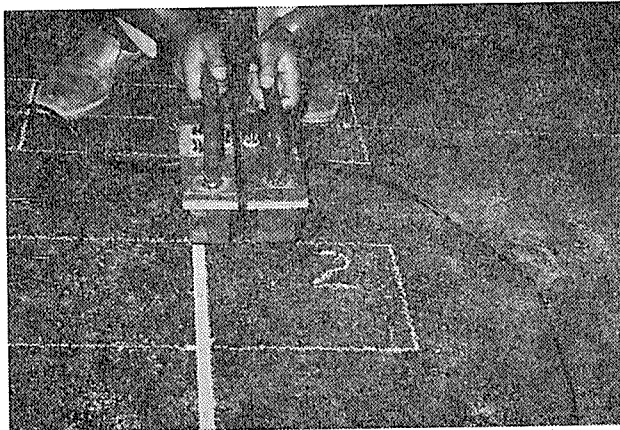
図—13 付着良好部



図—14 欠陥部 A



図—15 欠陥部 B



写真—2 共振法による測定状況

表—5 供試体 V.S, G.S の諸元

	供試体 V.S	供試体 G.S
形状・寸法 (m)	 増厚部 0.08×1.8×4.5	 増厚部 0.08×3.8×5.5
付着強度 (kg/cm ²)	最小～最大 15.5～27.2 (平均24.2)	最小～最大 0～17.0 (平均3.4)

が重要なポイントとなる。

コンクリート打設後において、増厚部が確実に旧床版部に密着しているかどうか表面から判断することは困難であり、このため打音法などに頼らざるを得ないのが実情である。

このようなことから旧床版と増厚部（スチールファイバー入りジェットセメントコンクリート、8cm）との一体性の確認のため、共振法による調査を実施した。

使用した供試体 V.S は良好な湿潤状態で増厚施工し、供試体 G.S は乾燥状態で締固め不十分な状態で増厚施工した床版で、それぞれの旧床版と増厚部の付着強度はコアカッターでまわりを縁切りしたものを直接引き抜く試験により求められている。供試体の諸元と付着強度を表—5 に示した。

供試体 V.S は増厚部全面にて 図—13 と類似の健全な波形が受信されており、供試体 G.S では特に床版端部付近で 図—15 と類似のやや剥離の波が多く受信されていて、引抜き試験の結果と合っている。

また、両供試体の中央付近には旧床版の増厚部の付着を事前にきってある箇所があり、ここでは 図—14 と類似した剥離を示す波形が得られている。

以上のようにコンクリート 8cm 増厚の剥離状態の検査が上記方法で可能であることがわかった。

2.3 ま と め

超音波共振法を従来の超音波（反射，走時法）探査法と比較すると、

- ① 表面処理がほとんど必要ない（接触媒質，ワセリン等がいらない）。
- ② ある程度の部材厚に適用できる。
- ③ 表面凹凸の影響を問題としない。
- ④ 受信波形の大きさで剥離判定が可能

等の利点がある。

また、上記の増厚床版の剥離検査以外にも鋼板接着工法を模した供試体で樹脂の接着状態の良否やコンクリート内部の空隙検知において同様な結果を得ている。

3. PC 鋼材の断線検知方法

ここでは PC 桁中の PC 鋼より線の疲労による断線検知をアコースティックエミッションを応用した方法を試みたりしたのでその概要を述べる。

3.1 測定方法

原理は、素線の断線時にコンクリート部材内に発生する弾性波動（超音波域）を利用して、PC 鋼線の断線検知と発生した弾性波動の到達時間の差からどの位置の PC 鋼線が切れたのかの標定を行う方法である。したがって測定手法としては AE 法に準じたものである。

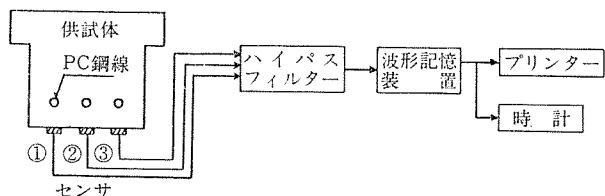
対象とした供試体は PC 桁（ポストテンション単純 T 桁）で供試体の主要諸元を表—6 に示す。

断線検知の測定方法は次のとおりである。

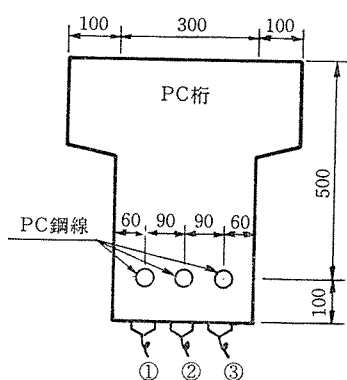
断線に伴って部材内に発生した波動は受信センサーによって電気信号に変換され、繰返し载荷等によるノイズ

表—6 PC 桁供試体の主要諸元

幅員 (cm)	高さ (cm)	長さ (m)	鉄筋	PC 鋼材	シース	使用コンクリート
50 (30)	60	5.4	D13 (D10)	SWPR 7 A 12.4 mm 7本より	φ26	桁部 $\sigma_T=600 \text{ kg/cm}^2$ (グラウト $\sigma_{28}=200$ 以上)



図—16 断線検知装置の構成



図—17 取り付け位置

を除去するためのハイパスフィルタを経由して波形記憶装置に送られる。送られて来た信号が定められた電圧を超えると一たん記憶して内蔵プリンターにより数 msec の波形の記録を行う方法とした。この装置の構成を図—16 に示す。

受信センサーは振動子、コネクター、金属ケースにより構成され、振動子（圧電型変換素子）は PC 桁のコンクリート表面に直接接着した。

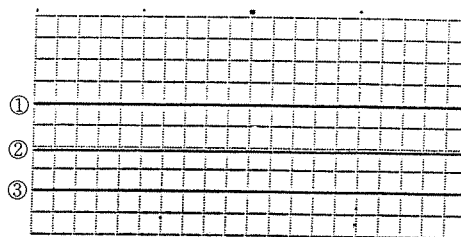
取り付け位置は 図—17 に示すように PC 桁下面より鋼線の位置 [①,②,③] とし、断線により波動が発生すると断線した位置の受信センサーに最も早く受信できるようにした。

ノイズは主に繰返し载荷により部材内に発生する波動であり、受信器の出力から観測した結果、試験周波数による基本波形に整数倍の高次周波が乗っているためハイパスフィルタで除去した。

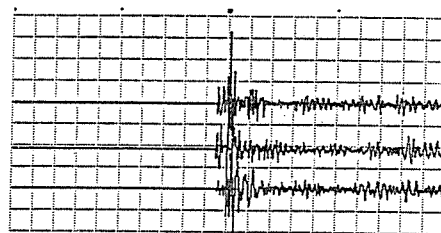
3.2 断線検知結果

本装置による疲労試験時の記録波形の一例を 図—18 に示す。(a) は PC 桁に異常がない定常時の波形で、(b) はコンクリートの微小割れや亀裂の発生などによって生じた波形、(c) は PC 鋼線の素線断線によって

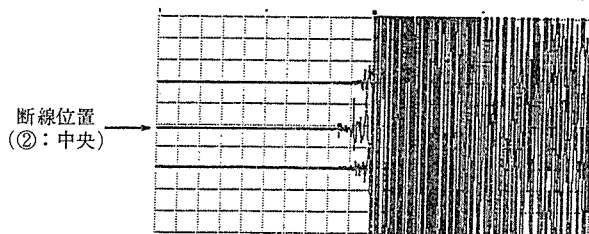
(a) 疲労試験時の定常波形



(b) 疲労試験によるコンクリートの微小割れや亀裂の発生などによって生じた波形



(c) 疲労試験中に PC 鋼線の素線断線により発生した波形



図—18 記録波形の例

表—7 PC 鋼線の疲労破断位置と破断数

PC 鋼材位置 供試体例	①	②	③	疲労破断数
D	●●● ●●● 2 (1)	●●● ●●● ●●● 7 (7)	●●● ●●● ●●● 9 (8)	9 (8)
E	●●● ●●● ●●● 8 (8)	●●● ●●● ●●● 1 (1)	●●● ●●● ●●● 7 (7)	8 (8)

()内は断線情報による疲労破断位置と破断数
●印は断線位置

発生した波形で、この場合の記録波形は振幅が大きく、反射波の持続時間が長い特徴的な波形として記録される。また、波動の初動時間の差から断線位置の標定が可能となる。ただし、連発的な PC 鋼線の破断現象の場合は、今回使用した簡易形の波形記憶装置では波形記録時のデッドタイム（新しいデータが取り込めない時間）が数十秒程度あることなどがあり、初断線以後で断線検知ができない場合も生じる。この方法により観測された断線数と PC 鋼線の位置は 表—7 に示すように試験終了後目視によるものとほぼ一致し、この方法の有効性が認められた。

表—8 ひびわれ発生荷重

供試体例	目視によるひびわれ発生荷重 (ton) 0.01~0.02 mm 程度	波動発生荷重 (ton)
A	15.6	12.9, 14.8, 16.6, ………
B	15.0	14.2, 14.96, ……………
C	15.5	15.14, 15.88, 16.51, ……

その他のモニター例として、PC 桁の静的載荷試験時にコンクリート内部に発生する微少な波動を受信した荷重と目視によるひびわれ発生荷重を表—8に示す。目視による観察よりも低い荷重でひびわれの情報が得られている。

3.3 ま と め

以上、振動子を直接接着することにより構成が簡単な方法でPC 鋼材の初断線を確実に検知することができた。この測定方法の特徴をまとめると次のようになる。

- ・前置のプリアンプ、主増幅器、波形処理装置を必要としないため、装置の構成が簡単となった（ケーブル長さ 50 m 使用）。
- ・記録波形から断線とその位置が判定可能。
- ・動作状態にセットすれば初断から全断線まで自動で断線状況をモニターできる。

あ と が き

弾性波動を利用した試験は従来から試みられているが、今回の RC 床版への適用例のように特に超音波成分に着目し、健全状態から破壊過程までを追跡して適用した例は極めて少なく興味深い事例といえる。共振法は実験的に接合部の剝離や内部空隙の有無の検知が可能であるという段階で、今後共振波形状と付着の程度、空隙の

大きさとの関係を明らかにしていくとともに、評価・判定方法を含めた計測システム作りの研究が必要である。また、断線検知方法の信頼性については PC 桁の疲労試験を通じて十分に確認されており、材料試験や安全管理のための監視方法として利用できると考えられる。

コンクリート構造物の非破壊試験法の確立は、既存構造物の健全度あるいは損傷度評価といった問題と関係して今後ますます重要になると考えられるが、現在供用中のコンクリート構造物に対する非破壊試験はある特定の条件下における相対的な評価であるため、構造物に応じた健全度の評価基準の作成とともに鉄筋コンクリート自体の音響的特性についての研究が期待される。

最後に、本稿に関する事項が研究途上の問題も多く含まれており、御意見、御批判等お寄せいただければ幸いです。

参 考 文 献

- 1) 尼崎, 明石 : 超音波法によりコンクリート部材のひびわれ深さ測定方法に関する研究, 第3回コンクリート工学年次講演論文集, 1981, pp. 141~144
- 2) 明石, 渡辺 : 舗装用コンクリートの非破壊試験, セメント・コンクリート, 107 (昭31)
- 3) 秋鹿為之 : 衝撃弾性法による構造体コンクリートの非破壊検査方法, 第4回コンクリート工学年次講演会論文集, 1982, pp. 21~24
- 4) 後藤 : 鋼橋 RC 床版の破損機構に関する一考察, 橋梁と基礎, Vol. 17, No. 8
- 5) 小林佳弘 : 超音波による外壁タイルの剝離診断, セメント・コンクリート, No. 424, 1982年6月
- 6) 後藤, 高橋 : 新しい床版補強方法について—増厚工法—, 日本道路公団技術情報, 第71号, 1984年1月
- 7) 後藤, 猪熊 : ひびわれを有する PC 桁中の PC 鋼材の疲労特性について, プレストレストコンクリート, Vol. 26, No. 6, 1984

◀刊行物案内▶

穴あき PC 板設計施工指針・同解説

体 裁 : B 5 判 128 頁 ビニール製の表紙で現場持ち歩きに便利
 定 価 : 1800 円 (会員特価 : 1600 円) 送 料 : 450 円
 内 容 : 1. 総則 2. 材料および許容応力度 3. 部材の設計 4. 構造設計
 5. 接合部の設計 6. 施工 (含取付・補修等)

お申込みは代金を添えて, (社) プレストレストコンクリート技術協会へ