

# 報告 RC 床版の損傷検出における非破壊試験の適用に関する基礎研究

吉沢 勝<sup>\*1</sup>・魚本 健人<sup>\*2</sup>

**要旨：** 現在まで非破壊試験に関する研究は各手法ごとに行われてきているが、同一供試体に対して各種非破壊試験を行った例は少なく、非破壊試験相互間の長所が明確にされていないために、適切な手法が適用されていないことが考えられる。そこで本研究では、コンクリート構造物の劣化機構から疲労を取り上げ、同一供試体を測定することにより、各種非破壊試験の特徴を明確とすることを目的とした実験を行った。その結果、それらの長所が明らかとなり、各種非破壊試験の適用上の資料を得ることができた。

**キーワード：** 非破壊試験、比較、鉄筋コンクリート床版、疲労、劣化診断

## 1. はじめに

近年、コンクリート構造物の維持管理の重要性の高まりとともに、非破壊試験の研究が盛んに行われてきている。現在、コンクリート構造物の点検は主にコンクリート表面の目視検査によって行われており、非破壊試験はその補助的な手段としてより有用なデータを取得することが期待されている[1]。コンクリート構造物に適用可能な非破壊試験としては、超音波法、アコースティックエミッション(AE)法、熱赤外線法等様々な手法が提案されており、構造物の劣化機構や点検の目的にあった適切な手法を選択、適用することが望まれている。しかしながら、今まで非破壊試験に関する研究は各手法ごとに行われてきており、同一供試体に対して各種非破壊試験を行った例は少なく[2]、非破壊試験相互間の長所が明確にされていないために、適切な手法が適用されていないことが考えられる。

そこで本研究では、コンクリート構造物の劣化機構から疲労を取り上げ、同一供試体を同一条件下において測定することにより、各種非破壊試験の特徴を明確とし、適用上の資料を得ることを目的とした。

## 2. 実験概要

実験には図-1に示すような道路橋床版を模擬した  $2,000(L) \times 1,500(W) \times 240(D)$ mm で中央部の床版厚が 200mm の鉄筋コンクリート床版(RC床版)供試体をもちいた。供試体作成には  $W/C=45.5\%$ ,  $s/a=42.1\%$ , 設計強度 30MPa のコンクリートを打設した。この供試体を用いて図-2に示すような二辺支持、四点支持の2種類の支持条件で表-1の様な二辺支持静的

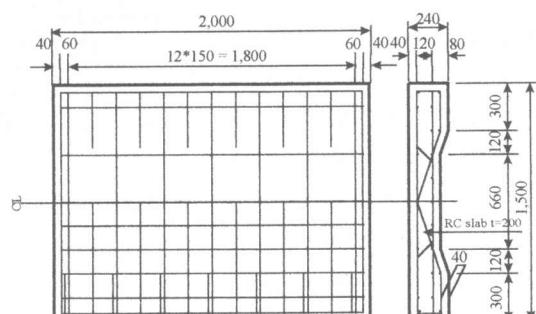


図-1 RC床版供試体

\*1 (財)首都高速道路技術センター 開発研究部開発研究課、(正会員)

\*2 東京大学教授 生産技術研究所第5部、工博 (正会員)

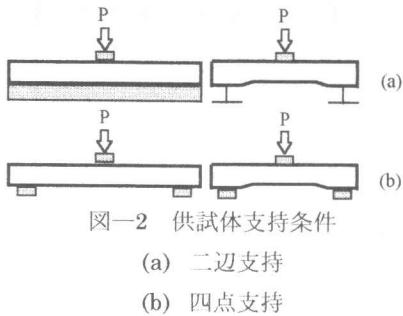


図-2 供試体支持条件  
(a) 二辺支持  
(b) 四点支持

表-1 載荷試験条件

	Case-1	Case-2	Case-3	Case-4
制御方法	荷重制御	荷重制御	荷重制御	荷重制御
静的・動的	静的	静的	動的	動的
載荷荷重(kN)	450	450	300	300
波形	—	—	Sin波	Sin波
載荷速度(Hz)	—	—	0.6	0.6
支持条件	二辺支持	四点支持	二辺支持	二辺支持
その他	—	—	—	湛水

450kN 載荷、四点支持静的 450kN 載荷、二辺支持動的 300kN 載荷、二辺支持動的 300kN 載荷(湛水)の4ケースについて実験を行った。載荷試験状況を写真-1に示す。

非破壊試験は表-2に示すような、疲労損傷の検出に対して有効もしくは参考となるデータが得られる非破壊試験[1]を一般的に用いられている測定方法を用いてそれぞれ行った。非破壊検査の測

定は、静的載荷においては荷重を 100kN 増加させごとに一旦除荷して測定を行い、動的載荷においては 50,000 サイクル終了ごとに荷重を除荷した状態で測定を行った。

### 3. 実験結果

#### 3. 1 二辺支持静的 450kN 載荷

450kN 載荷後のRC床版供試体下面のひび割れ発生状況を写真-2に示す。ひび割れは中心部から放射状に広がっており、せん断ひび割れによる損傷であることがわかる。この時の最大ひび割れ幅は 0.5mm であった。

450kN 載荷後のデジタルスチルカメラ(130 万画素)による撮影結果を写真-3に示す。写真-3は撮影データに画像処理を行った結果であり、この写真では 0.1mm 以上のひび割れが観察可能であった。また、照明の明るさや供試体とカメラとの距離等の条件を同一条件下において撮影した通常の写真と比較すると、デジタルスチルカメラの方が明瞭にひび割れを撮影できていることが明らかであった。

超音波伝播速度(表面法)、AEエネルギーおよび打音法の共振周波数の試験開始前の測定値を初期値として、各々の測定値の低下率を図-3に示す。いずれもひび割れの進展に伴って低下する傾向が明らかであるが、低下率が大きく劣化診断の容易な順に AEエネルギー、超音波伝播速度(表

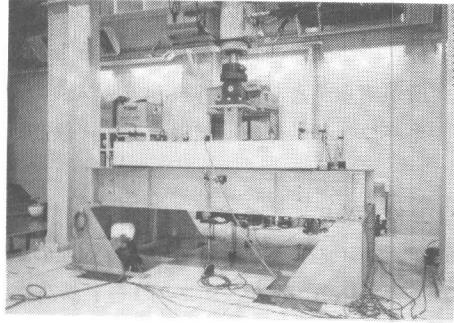


写真-1 載荷試験状況

表-2 疲労に適用される非破壊試験[1]

	疲労	Case-1	Case-2	Case-3	Case-4
目視、写真	◎	●	●	●	●
打音法	○	●	●	●	●
反発硬度法	○	—	—	—	—
赤外線法	○	●	●	●	●
超音波法	○	●	●	●	●
レーダー法	○	●	—	●	●
電磁誘導法	○	—	—	—	—
AE法	○	●	●	●	●
放射線法		●	●	—	●
応力測定法	○	—	—	—	—
変形測定法	◎	●	●	●	●

◎: 有効である

○: 参考となる有効なデータが得られる

無印: 参考になることもある

●: 實施した測定

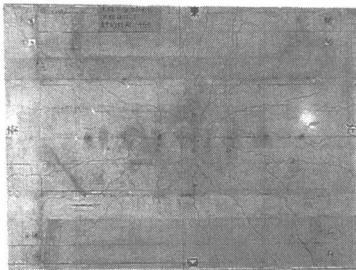


写真-2 ひび割れ発生状況（通常写真）  
(二辺支持 450kN 載荷後)

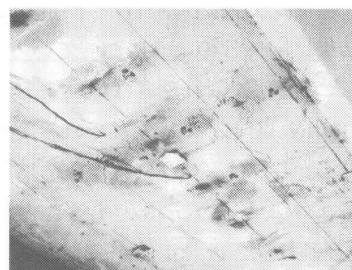


写真-3 デジタルスチルカメラ

面法)、打音法となっている。ただし測定方法としては、AEエネルギーの測定にはAEセンサーを取り付けての常時モニタリングが必要であり、超音波法は構造物にセンサーをグリス等を用いて密着させる必要があるが、打音法はセンサー等を密着させる必要はなく作業時間も超音波法と比べて短時間であるという利点を有している。

レーダー法による測定結果は、載荷前、載荷後に画像の変化はなく、鉄筋配置や部材厚に変化はなかった。

熱赤外線法の結果からも、ひび割れや内部欠陥の検出につながるような温度変化が見られなかつた。この理由として、ひび割れ幅が小さかったことや荷重が静的荷重であること等が考えられる。

また、載荷試験後の供試体に対してX線法により撮影を行ったが、ひび割れの撮影はできなかつた。この理由としては、ひび割れがせん断によるものであることや造影剤を使用しなかつたことによるものと考えられる。

### 3. 2 四点支持静的 450kN 載荷

450kN 載荷後のRC床版供試体下面のひび割れ発生状況を写真-4に示す。ひび割れは中央部から放射状に広がっており、せん断ひび割れによる損傷であることがわかる。また、中央部のひび割れでは角落ちが発生しており、3. 1と比べて損傷が大きいことがわかる。このときの最大ひび割れ幅は2.0mmであった。

超音波伝播速度（透過法）および打音法の初期値からの測定値の低下率を図-4に示す。

静的載荷における超音波伝播速度（表面法）と打音法との比較は3. 1において行ったため、ここでは超音波伝播速度（透過法）との比較を行う。両手法はいずれもひび割れの進展に伴って低下することが明らかであり、超音波伝播速度（透過法）と打音法とが同様の低下率を示すことが明らか

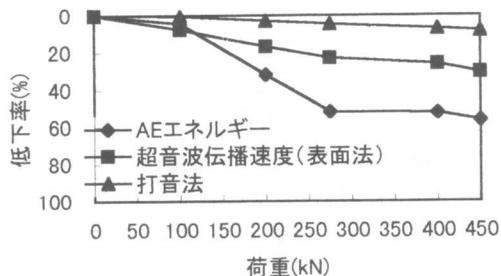


図-3 各種非破壊試験の低下率

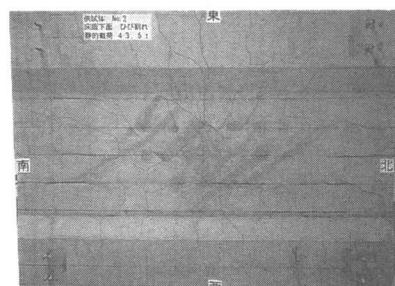


写真-4 ひび割れ発生状況（通常写真）  
(四点支持 450kN 載荷後)

となった。

また、超音波法（ひび割れ深さ測定）[3]の測定結果は図一5のようになっている。200kNまではひび割れ深さは増加するものの、200kN以降では減少しているように見られる。これは、ひび割れ本数の増加に伴ってエネルギーが分散化することにより、ひび割れ深さの測定値が減少しているものと考えることができる。

熱赤外線法の結果からは、3.1同様ひび割れや内部欠陥の検出につながるような温度変化はみられなかった。

### 3.3 二辺支持動的300kN載荷

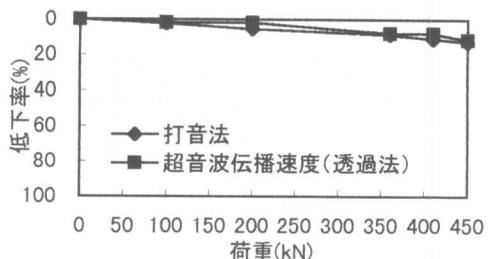
450,000サイクル終了後のRC床版供試体下面のひび割れ発生状況を写真一5に示す。中央部から放射状に広がるせん断ひび割れであり、数本のひび割れは断面内を貫通している。

超音波伝播速度（表面法）と打音法との測定結果の初期値からの低下率を図一6に示す。超音波伝播速度（表面法）は打音法と比べて低下率が大きくなっている。

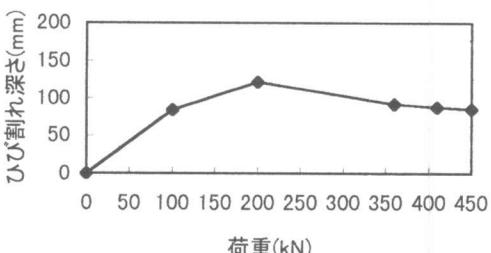
熱赤外線応力測定[4]の結果を図一7に示す。供試体下面中央部周辺に引張り応力が見られた。この現象はひび割れの発生位置と対応しており、赤外線法によるひび割れの測定が可能であることを示している。

### 3.4 二辺支持動的300kN載荷（湛水）

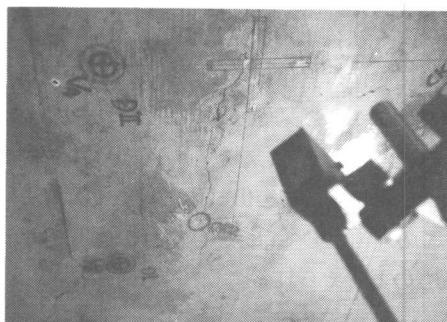
RC床版供試体上面に湛水したときの供試



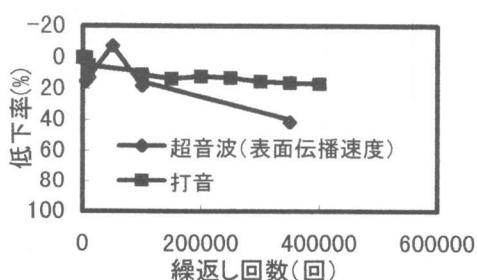
図一4 超音波伝播速度（透過法）  
および打音法の低下率



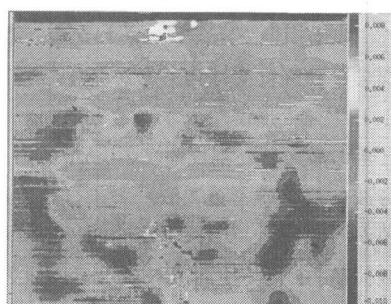
図一5 超音波（ひび割れ深さ測定）



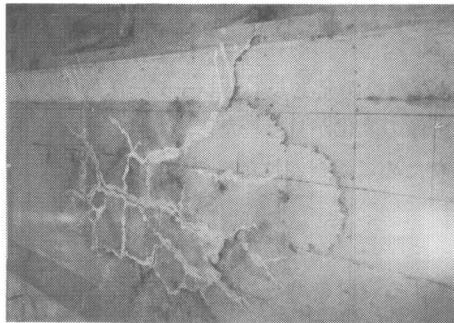
写真一5 ひび割れ発生状況（通常写真）  
(二辺支持 450,000 サイクル)



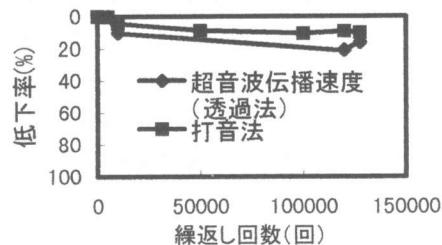
図一6 各種非破壊試験の低下率



図一7 赤外線応力測定



写真一六 供試体破壊性状（通常写真）



図一八 非破壊試験の低下率

体の破壊性状を写真一六に示す。破壊までの載荷サイクル数は、127,777 サイクルと通常の疲労試験を行った3. 3に比べて非常に早い破壊であった。ひび割れは、中央部から放射状に広がるせん断ひび割れであり、載荷初期の段階（50,000 サイクル）よりひび割れからの漏水が観察された。

超音波伝播速度（透過法）および打音法の測定結果の初期値からの低下率を図一八に示す。動的載荷における超音波伝播速度（表面法）と打音法との比較は3. 3において行ったため、ここでは超音波伝播速度（透過法）との比較を行う。超音波伝播速度（透過法）と打音法との間に多少の変化が出たが、両者にあまり差はない静的載荷（3. 2）を行った場合と同様の結果を得た。このことは、超音波および打音が湛水による供試体内への水分の侵入の影響を受けていないものと考えられる。

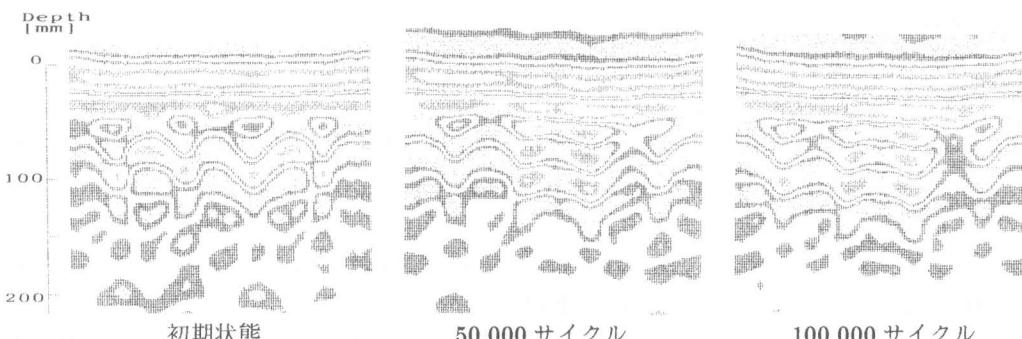


50,000 サイクル



100,000 サイクル

写真一七 赤外線画像



図一九 レーダー計測画像

熱赤外線法による観察結果を写真一7に示す。ひび割れの発生位置には上面からの水分が侵入しており、そのことが温度差を明確にしていると考えられる。

レーダー法による観察結果を図一9に示す。これまでひび割れが発生してもレーダー法の画像に変化が見られなかったのに対し、今回の観察結果からは画像の変化が見られた。これは、供試体上面からの水分がひび割れ部分に侵入して誘電率が変化したために観察されたものと考えられる。

#### 4. まとめ

各種非破壊試験法の特徴を明確にし、それらの適用に関する資料を得ることを目的として、コンクリート構造物の劣化機構から疲労を取り上げ、同一供試体を用いて各種非破壊試験の比較を行った。その結果つぎのような結果を得た。

- (1) ひびわれの検出には、デジタルスチルカメラを用いた撮影は、画像処理によってひびわれの検出が容易となるため、通常の写真と比較して有効であった。
- (2) 超音波伝播速度（表面法）と打音法の測定結果は、いずれもひび割れの進展とともに低下し、超音波伝播速度（表面法）の方が打音法よりも低下率が大きかった。
- (3) 超音波伝播速度（透過法）および打音法は同様の低下率を示すことが明らかとなった。また、測定結果は、水分の影響を受けず通常と同じ低下率となる。
- (4) ひび割れの増加によるエネルギーの分散化によって、ひび割れ深さの測定結果は減少する傾向を示した。よって、超音波法（ひびわれ深さ測定）による測定値が、ひびわれ深さと必ずしも一致していないことが考えられる。
- (5) 赤外線法、レーダー法は水分の影響によってひび割れの測定が容易となる。

#### 謝辞

本研究は（財）生産技術研究奨励会「コンクリート構造物の劣化診断に関する研究委員会」（委員長 魚本健人教授）における研究成果の一部であり、データを提供頂いた佐藤工業（株） 伊東良浩氏、日本X線検査（株） 加藤潔氏、（株）エヌエフ回路設計ブロック 神原京進氏、三協（株）佐藤登氏、コンステック（株） 中野米蔵氏、日本電子（株） 増喜彰久氏、（株）東横エルメス丸茂文夫氏、日本フィジカルアコースティクス（株） 湯山茂徳氏、コマツエレクトロニクス（株）吉村明彦氏、（株）ニコン 與本雅彦氏に感謝の意を表します。また、実験を行うにあたって多大なるご協力を頂きました東京大学生産技術研究所技術官 西村次男氏ならびに千葉工业大学土木工学科4年生 植村典生氏に深く感謝いたします。

#### 参考文献

- [1]土木学会：コンクリート構造物の維持管理指針（案）、コンクリートライブライアリ第81号、土木学会、1995.10.
- [2]Krause, M., et al. : Comparison of Pulse-Echo-Methods for Testing Concrete, International Symposium Non-Destructive Testing in Civil Engineering (NDT-CE) Volume 1, pp.281-295, 1995.9.
- [3]山口哲夫、丸茂文夫：コンクリートのひび割れ深さと厚さの測定法、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 12, No. 1, pp.353-358, 1990.
- [4]増喜彰久、森下侑一：赤外線応力測定技術とその応用、非破壊検査、第45巻11号、pp.798-805, 1996.11.