

[討議・回答]

貝戸清之
阿部雅人 共著
藤野陽三
熊坂和宏

「局所的な振動特性に着目したコンクリート 構造物の空隙検出」への討議・回答

(土木学会論文集, No. 690/V-53, 2001年11月掲載)

▶ 討議者 (Discussion)

大津政康 (熊本大学)

Masayasu OHTSU

1. はじめに

本論文は、非破壊試験法の打音法について現状の技術としての定量性の欠如を問題として、非接触レーザードップラ速度計を用いた新たなシステムを開発・提案された有用な成果と高く評価できる。ただし、討議者と異なる概念での論理展開と検討内容の不十分さが認められる箇所について、今後の開発動向も踏まえてご意見を明瞭にするために討議をお願いする。

2. 振動と波動に関する打音法の位置付け

レーザードップラ速度計の能力に関して、「可聴領域よりも高い」、「ハミングによる高振動数」などの表現が認められる。しかし、そもそも本論文で計測されようとしているのは、波動現象であり、振動計測ではないと考えられる。波動と振動については、討議者の考え方は参考文献^{(1),(2)}にすでに公表しているので、ご参照されたい。本手法の原理は、波動伝播過程での表層部の共振現象の検出に基づくものと考えられる。

その意味で、「可聴域以上」ではなく「超音波領域の波動」と記されるべきと考える。また、ハンマー打撃では5 kHz程度までの周波数域しかなく、これを高周波数(振動数)と論述することは誤解を招くと思われる。さらに、「打音の音源がコンクリート表面振動」と記述されているが、これも実際は表面打撃によって弾性波が発生する現象があり、その反射波動の空気中への放射音波を聞く測定が打音法の原理とすべきである。

本研究の特徴は、コンクリート表面での波動の非接触計測と、定量的な評価のためのモード解析にあると考えられ、明確な概念での記述が望ましいと思われる。

3. 実験モデル供試体の問題点

トンネルライニングなどの実構造物での打音法の原理は、空隙部あるいは剥離部における表面層の板共振(振動)を検出することである。ところが、本論文で実験の対象とされている $f=10$ kHz までの周波数帯域では、コンクリート中の P 波伝播速度 v を 3720 m/s とすれば、

$$\text{波長 } \lambda = v/f \quad (1)$$

によれば最短波長成分でも $\lambda=372$ mm となり、実験のモデル供試体での最長長さ方向にほぼ一致する。ちなみに、表-2 のヤング率は誤記で 10° ではなく、 10^9 と思われる。後者の場合に表中の諸元を用いれば、縦波速度は 3720 m 程度となる。

衝撃によって発生すると考えられる波動の波長成分が、供試体の寸法より長いと言うことは、モデル供試体での共振周波数が系全体の共振現象とならざるを得ない。その場合に、モデル供試体自身の共振(卓越)周波数からの空隙および剥離部の同定と、実構造物での局所的な共振現象との対応にはかなり無理があると考えられる。したがって、図-6 のスペクトル分布は、ブロック供試体の共振周波数を示しているに他ならない。結果として、図-7 で示されているパワースペクトル密度の空間分布による欠陥評価は実構造物では有効かも知れないが、このモデルでは適用性に問題がある結果となったと考えられる。これにより、スペクトルエネルギー分布から空隙部の検出が困難であろうとの結論にはならないと思われる。

4. 振動モード解析について

平板の振動解析を行って、実験でのモード解析結果とを比較されている。この解析こそ実際の構造物表面での定量的な欠陥部の同定に有効であると考えられ

る。ただし、板の振動解析と3次元物体の共振現象は、変形モードの形状は一致するが共振周波数(固有振動数)は一致しないとの結論は、2次元と3次元の波動解析の差異からも自明なことと思われる。実構造物での無限体の表層剥離部のモデル化として本手法は有効であることより、是非、実在構造物かそれに近いモデルでの検証を期待する。

5. スピーカー入力について

スピーカーを用いる場合には、その上限周波数は20 kHz程度と考えられる。式(1)からは剥離部の寸法として20 cm程度以上の表層部を対象とするのが有効となる。これより図-15の結果は、ブロック全体の共振モードの中で、空隙部に限り共振モードが図-13と一致した例に過ぎないと考えられる。それよりも問題はスピーカーから放射される空気振動がコンクリートに波動を生じさせるに十分なエネルギーを有するかどうかである。ここでは、ブロック供試体の共振周波数付近での入力のみしか試験されていないため、かな

りな実証結果を待たないと、騒音の問題もあり有効性には疑念を持たざるを得ない。

6. おわりに

定量的な非破壊試験法の開発動向として、非常に先見性のある貴重な研究と拝見している。そのため、上記のように、討議者と異なる考え方と実験・解析について疑問点を論じさせていただいた。ご検討により、明瞭な概念と今後の開発に有用な回答をいただければ幸いである。

参考文献

- 1) Ohtsu, M.: On High-Frequency Seismic Motions of Reinforced Concrete Structures, 土木学会論文集, No. 544/V-32, 277-280, 1996.8.
- 2) 大津政康: 衝撃突き上げ装置によるRC橋脚模型の輪切り状ひび割れに関する実験的研究への討議, 土木学会論文集, No. 605/I-45, 295-300, 1998.10.

(2002.4.26 受付)

▶ 回答者 (Closure)

貝戸清之 (株)BMC

Kiyoyuki KAITO

1. はじめに

著者らの論文に対して貴重な討議を頂きまして、深く感謝致します。本論文は、土木構造物の日常点検で利用されている打音検査に対して、その判断に客観性を持たせ、かつ安全性の面から高所作業を取り除くことを目的として、非接触型センサーであるレーザー Doppler速度計の適用を検討したものである。ここでは、その初段階として極めてシンプルな供試体としてコンクリートブロックを用い、実験的に空隙部の検出を試みている。

さて、本論文に対する討議者の質疑に対する著者の回答は、項目ごとに以下に示すとおりである。

2. 質疑に対する回答

(1) 「振動と波動に関する打音法の位置付け」に対して

はじめに、論文中で用いた「高振動数」という言葉に関しては、著者が通常対象とする橋梁の固有振動数の領域が数 Hz からせいぜい 100 Hz までであるため

に、相対的な比較からこのように表現した。客観性を欠いた表現であり、事前に定義を明確にする必要があった。

つぎに、振動と波動に対して、基本的な考え方は討議者のご指摘通りであると考えている。ハンマー打撃によって生じた弾性波がコンクリート中を伝播し、それによって表面振動が生じるという原理である。さらに、参考文献1)においては、打音の発生機構にはいくつかの要因が絡んでいるが、その中でも弾性波の伝播によって発生する成分の影響が大きいとしている。したがって、論文中の「打音の音源がコンクリート表面の振動」は適切ではなく、「打音とコンクリート表面の振動の波形は相関が高い」と訂正する次第である。なお、引用した参考文献1)においても、前記のような記述はなく、実験的検証により後記の結論に到達しているということをご付記しておく。

(2) 「実験モデル供試体の問題点」に対して

固有振動数の同定は、ご指摘の通り、系全体の振動特性の把握を対象としている。たとえ、系全体の振動特性の同定を目的としても、構造系によって揺れやすい部材を含むのであれば、その部材の振動のみが卓越したモードが存在する。本研究で対象としているのは

このようなモードの検出である。実際に局所的なモード形の存在は、実験的に参考文献2)において鋼桁を対象に振動計測を実施した際に横桁振動のみのモード形を確認しているし、一方理論的にもFEMによって確認できている。空隙が存在しないとしたモデルでは説明できないそのようなモードを検出することで、全体系の振動特性から空隙部を割り出すことは可能であると考えている。実構造物への適用の際にも、構造物全体を計測対象として局所的な振動特性を検出するのではなく、ある程度計測範囲を絞り込み、その絞り込んだマイクロな範囲での全体系の振動特性を検出することを想定している。

しかし、実際の構造物を想定した場合には、こういったスペクトルのピークやエネルギー分布から空隙部を検出することは困難であるとの結論に達したのは次の理由による。著者らが参考文献3)で指摘した点を再述する。一辺固定支持した鋼板に対して、レーザードップラ速度計により計100点の振動計測を実施し、それぞれの速度スペクトルから振動数の卓越を確認することができたものに対して振動モード形を算出した。しかし、スペクトル上では明瞭なピークの卓越を確認することができた固有振動数であっても、モード形として図示すると全く規則性のない形状となることがあった。結局、電気的なノイズやレーザ特有の光学ノイズ等の影響が考えられたが、全てに対して原因を究明するには至らなかった。このような観点から、スペクトルから固有振動数を同定するだけでは不十分であり、モード形という視覚的な判断に頼ることが重要であるとの認識を得た。したがって、厳密に言えば、検出手法としてスペクトルのピーク抽出やエネルギー分布の有効性に問題があるのではなく、明確に構造物の固有振動数であると断定することに難しさがあるのである。

(3) 「振動モード解析について」に対して

平板の振動解析は、計測の妥当性を検証するために実施したものである。したがって、板として扱った解析では差異が存在することも承知しているが、計測結果と整合性が取れたことで目的としては十分ではないかと考える。また、実験結果と理論モデルとの検証は参考文献3)に詳細に行っているのので、参照していただきたい。ただし、実際の構造物を対象とした試験で

のモデル構築は興味深い課題である。

(4) 「スピーカー入力について」に対して

スピーカー入力は、レーザードップラ速度計による非接触計測を活かすために、入力も非接触で与えることを試みたものである。本研究では、供試体から20cm離れた位置から音圧レベル90dBの入力を与えた。実際の構造物の検査を想定すると、これだけの音圧を与えることができるかと言うと、非常に難しいと言える。これより小さな音圧でも試験を行ってみたが、今回の実験ではモード形の同定はうまくできなかった。現時点では、表面振動自体がレーザ計測の限界を下回る振動レベルであるのか、それとも信号処理手法を改善すれば同定できるのか把握できていない。今後はこの点を見極め、前者であれば走行車両による騒音を逆に音源とした手法を、後者であればより強い非接触入力を与えることが可能な手法、例えばレーザ一衝撃波を利用して改善を試みたい。

3. まとめ

本研究は、土木構造物に対する非接触計測の可能性をレーザードップラ速度計により実験的に模索したものである。しかし、研究は基礎的な実験による検証段階にあり、実構造物への適用に際してはまだ課題を多く含んでいる。今回の討議者の質疑は、そういった問題をご指摘頂いただけでなく、著者自身が今後の方向性を再確認する上で重要な助言となった。討議者の期待に応えるためにも、今後はより詳細を詰めて、実構造物への適用に近づけていく所存である。

参考文献

- 1) 伊東良浩：打音法によるコンクリート構造物の非破壊検査に関する研究，東京大学博士論文，1997。
- 2) 貝戸清之，阿部雅人，藤野陽三，木村均：レーザ一常時微動計測手法の構築と構造物の損傷検出への応用，土木学会論文集，No. 689/I-57, pp. 183-199, 2001.10。
- 3) 貝戸清之，阿部雅人，藤野陽三，依田秀則：実構造物の非接触スキニング振動計測システムの開発，土木学会論文集，No. 693/VI-53, pp. 173-186, 2001.12。

(2002.7.29 受付)