

車社会の安全を支える超音波センシング技術

木村友則*
井幡光詞**

Ultrasonic Sensing Technologies Supporting Safety Motorization

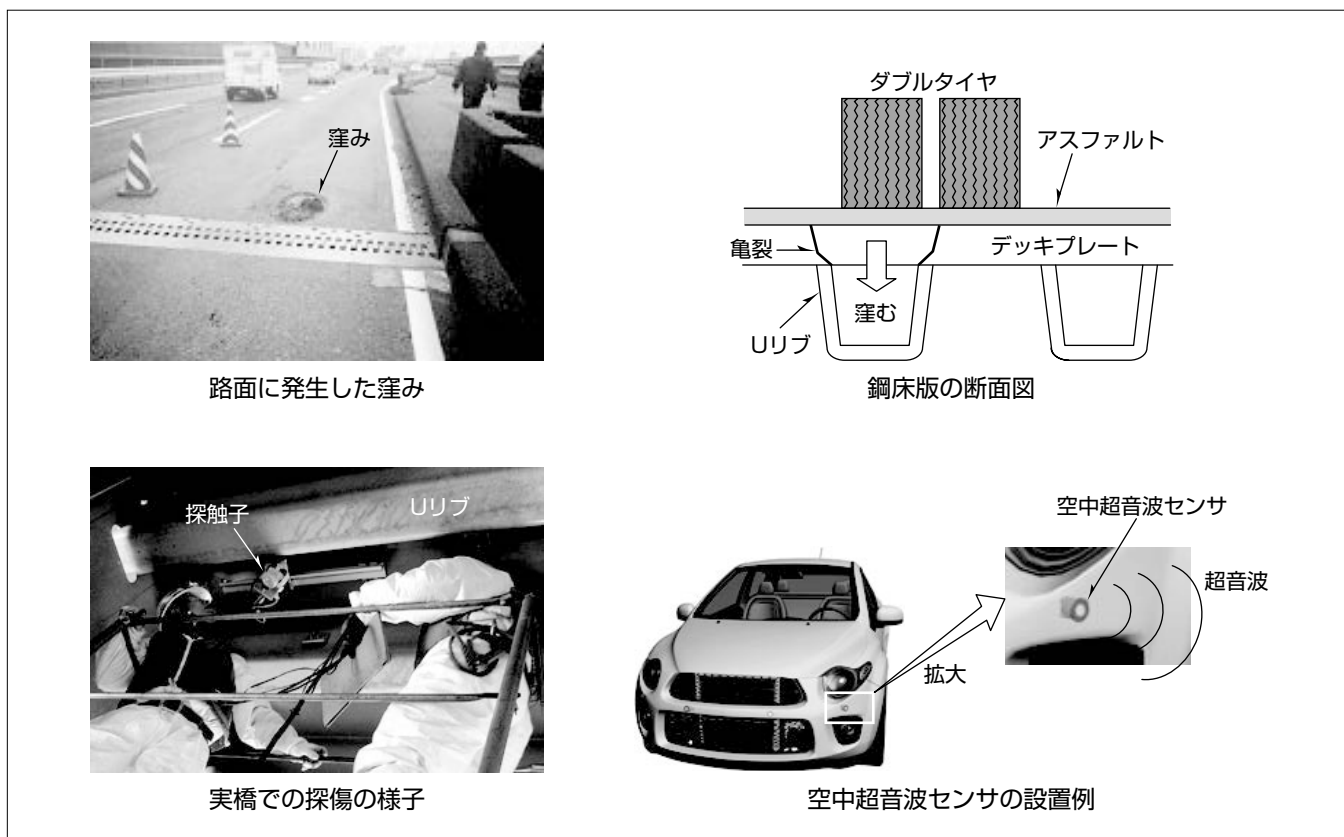
Tomonori Kimura, Koji Iбата

要旨

現代の車社会にとって、安全に運転するためのインフラ整備が欠かせない。特に高度成長期に建設された各種構造物の老朽化が進んでおり、社会問題となっている。老朽化した構造物を放置しておくとも人命に係わる重大事故を引き起こす可能性があり、安全な社会の実現にはこれら構造物の維持管理が不可欠である。すなわち、検査を行って問題があれば補修を行う必要がある。検査方法としては、超音波を用いた非破壊検査(超音波探傷)が有効である。老朽化したインフラの例として、道路橋の鋼床版がある。鋼床版に発生した亀裂が貫通すると路面の窪(くぼ)みの原因となり、運転に支障をきたすので問題となっている。本稿では、

今回開発した鋼床版亀裂の超音波探傷技術について述べる。従来技術では探触子(超音波のセンサ)を設置する面で感度補正を行うことができなかったが、新たに開発した探傷技術では感度補正を可能にしたので、経年変化に対応した探傷が可能となった。

また、車を安全に運転するには、インフラの整備だけでなく、車両周辺の安全を確保することも重要である。このため、自動駐車支援、死角監視や衝突回避等のシステムが拡大しており、車両周辺のセンシング技術向上が求められている。本稿では、車両周辺のセンシングに用いられる空中超音波センサの開発状況についても併せて述べる。



鋼床版の超音波探傷技術と空中超音波センサ

左上の写真は、実際の路面に発生した窪みである。この窪みを発生させる原因は鋼床版デッキプレートを貫通した亀裂であり、この様子を右上の図に示している。左下の写真は、新たに開発した臨界屈折角探傷法で実橋の鋼床版を探傷している様子である。また右下の写真は、車両周辺のセンシングに用いられる空中超音波センサを車に設置した例を示している。

1. ま え が き

近年、高度成長期に建設された各種構造物の老朽化が進んでおり、社会問題となっている。老朽化した構造物を放置しておくとう人命に係わる重大事故を引き起こす可能性があるため、安全な社会の実現にはこれら構造物の維持管理が不可欠である。交通量の多い道路橋では、鋼床版のデッキプレートを貫通する亀裂が報告されている⁽¹⁾。この亀裂は目視検査ができない部位に発生し、また打音検査も有効でないため、デッキプレート下側からの超音波探傷が行われる。この際、塗装や表面状態によってエコーの受信感度が大きく変化する。本稿では、これらがエコーに及ぼす影響を除去する探傷方法について示し、実橋で行った探傷試験結果と亀裂の実測値との比較について述べる。

また、車両周辺の安全確保にも超音波センシング技術が用いられている。本稿では、検知距離の拡大を目的とし、感度を向上させた空中超音波センサについても併せて述べる。

2. 臨界屈折角探傷法

2.1 鋼床版デッキプレートの貫通亀裂

図1は、路面に発生した窪みである。窪みの深さはそれ程ではないが、この窪みに車のタイヤが嵌(は)まると運転に支障をきたし、事故の誘因となる。窪みが発生する原因は、道路の構造にある。図2は、鋼床版の断面図である。鋼床版はデッキプレートとUリブで構成されており、これらは溶接されている。Uリブ上を車が通行すると溶接部に大きな荷重がかかり、デッキプレート内に亀裂が発生する。年月を重ねるとこの亀裂が進展し、最終的にはデッキプレートを貫通する。この場合、路面のアスファルトを支えられずに、窪みが生じる。

路面に窪みが生じる前に補修工事を行うことが重要であり、そのためにはデッキプレートを貫通する前に亀裂を検出する必要がある。この亀裂は目視では確認できない場所に発生し、また打音検査でも確認できない。そこで、この亀裂を検出可能な超音波探傷技術を開発した。

探触子(超音波のセンサ)を設置する場所は、図2に示す



図1. 路面に発生した窪み

ようにデッキプレートの裏面に限られる。またアスファルトが載っている面は平滑とは限らないので、この面で超音波ビームを反射させて探傷することは難しい。そこで、デッキプレートの面にはほぼ平行な超音波ビーム(横波)を伝搬させて亀裂に直接照射する臨界屈折角探傷法を開発した。図2の拡大図の部分、探傷の様子を示している。

2.2 擬似表面SV波を用いた感度補正方法

構造物の検査は、数年間隔で定期的に行われる。数年の間に塗装面が劣化すると、探触子からデッキプレートへの超音波の伝搬挙動が、前回の検査時と異なってしまう。また、前回と同じ探触子や探傷装置を用いることが難しい場合もある。このように、従来は前回までと同じ条件で探傷を行うことが困難であった。今回開発した臨界屈折角探傷法は感度補正を行うことで、この課題の解決を試みた。

臨界屈折角探傷法は、図2に示したように超音波ビームを試験体に対してほぼ平行に伝搬させる探傷法である。この探傷法に用いる探触子を2個対向させて設置すると、擬似表面SV(Shear Vertical)波が受信されることが報告されている⁽²⁾。図3には、擬似表面SV波が受信される様子を示している。

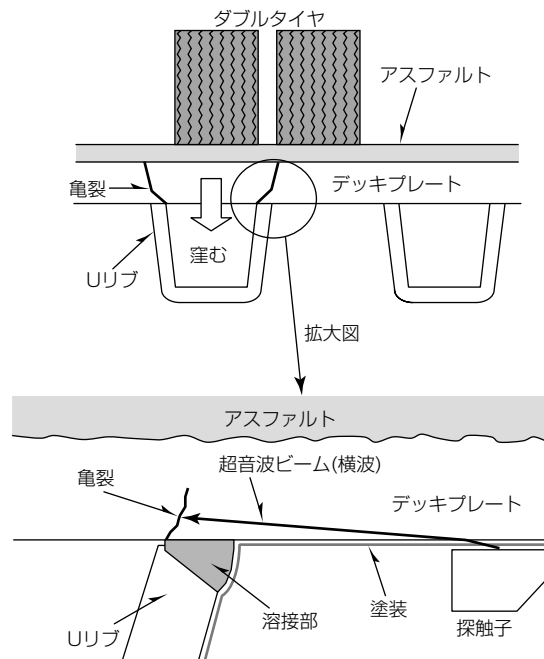
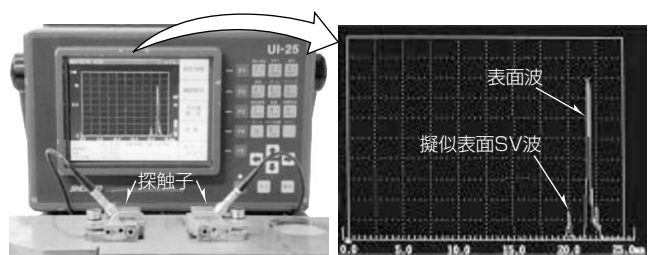


図2. 鋼床版の断面図と探傷の様子



(a) 臨界屈折角探触子を対向させた状態

(b) Aスコープ画像

図3. 擬似表面SV波の受信の様子

臨界屈折角探傷法では、擬似表面SV波の受信感度を用いて感度補正を行う。図4に補正方法の概念図を示す。まず表面が滑らかな感度校正用試験片で擬似表面SV波を受信し、この感度を記録しておく。次に、探触子間隔を固定して実橋の鋼床版デッキプレートで同様に擬似表面SV波を受信し、この感度を記録する。両者の感度差は塗装の表面状態だけとなるので、この感度差を補正值として用いれば、塗装の表面状態に応じた感度補正が可能となる。なお、校正用試験片と実橋鋼床版のデッキプレートでは音速が異なる場合があるので、実際には屈折角を微調整して補正值を求める⁽³⁾。

2.3 亀裂深さとエコー高さとの関係

亀裂深さとエコー高さとの関係を求めるため、人工的に亀裂を入れた試験片で実験を行った。図5に実験結果を示す。横軸が実際の亀裂深さで、縦軸は相対エコー高さである。図中の黒丸印が実験データである。深さが0~9.5mmの亀裂を対象として実験を行った。図に示すように亀裂深さ4mm以下ではエコー高さは単調な増加傾向にあるが、

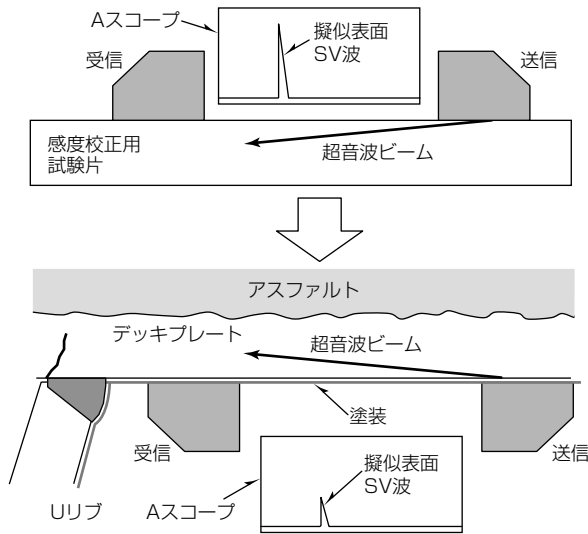


図4. 擬似表面SV波による感度補正方法

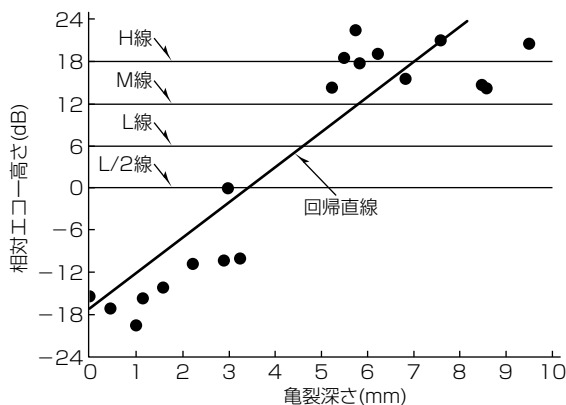


図5. 人工亀裂の深さとエコー高さとの関係

4 mmを超えると飽和状態となる。これは亀裂の深い位置に超音波ビームが照射されないためと考えられる。

2.4 実橋に発生した亀裂の探傷

実橋に発生した亀裂に対し、臨界屈折角探傷法を適用して亀裂を評価した。図6に、実橋鋼床版での適用状況を示す。鋼床版の下に足場を設け、作業員2名による探傷を行った。なおこの現場における感度補正值は、8 dBであった。

図5に示した回帰直線を用い、実橋での探傷におけるエコー高さから亀裂の深さを推定した。また検査部位を切り出して実際の亀裂深さを測定し、エコー高さから推定した亀裂深さと比較した。結果を図7に示す。図中、黒丸印がエコーから推定した亀裂深さで、実線が実測値である。また図の横軸は基準点(横リブ)からの位置を示している。図に示すように、両端部では亀裂が浅いので、両者はほぼ一致している。亀裂が深い場合、図5に示したようにエコー高さが飽和するため、両者に差異が生じる。しかし両端部を評価することによって、中間部では大きな亀裂があると類推できる。このように、実橋で臨界屈折角探傷法の妥当性が検証された。

なお臨界屈折角探傷法は、(独)土木研究所、菱電湘南エレクトロニクス(株)及び当社による共同研究で開発したものである。



図6. 実橋鋼床版での適用状況

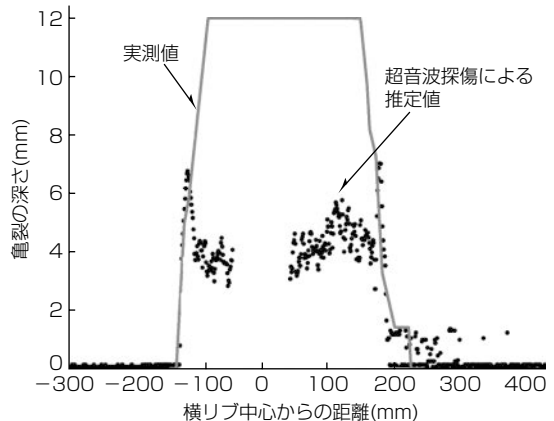


図7. 亀裂深さの実測値とエコーから推定した値の比較

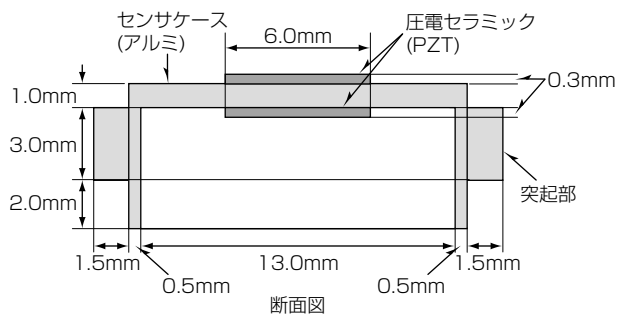


図 8. バイモルフ構造を利用した空中超音波センサ

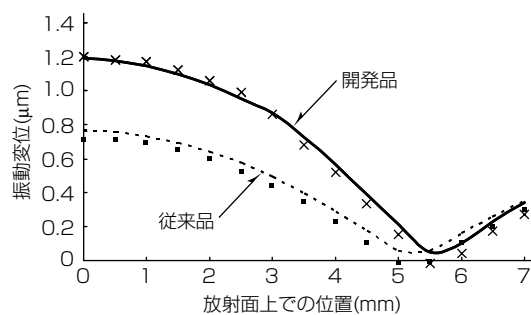


図 9. 放射面での振動変位分布

3. 空中超音波センサ

空中超音波センサは、比較的簡易な装置構成で物体の検知システム、人の位置や動きの計測システム等が実現でき、広く応用されている。物体の検知装置としては、車両周辺の障害物検知に利用されている。現在利用されている装置では、車両近傍の障害物検知を目的としているため、検知距離は1～2m程度であるが、装置の高性能化に伴い、検知距離の拡大が望まれている。一般に、空中超音波センサは低感度であるため検知距離が2m程度となってしまう。検知距離を拡大するためには、送受信感度を改善すればよく、その方法の一つとして、音響整合層を利用する方法がある⁽⁴⁾。これは、センサと空気との間に適切な音響特性を持つ層を挿入することによって、音響的な不整合を低減し、感度を向上させるものであるが、耐環境性に課題がある。一方、感度を向上させる別の方法として、センサの構造を工夫することによって、センサ放射面の振動変位を増大させる方法が考えられる。従来の空中超音波センサは、センサケース底面の片側に圧電セラミックを接着したユニモルフ構造を利用したものが多く、そこで、センサケース底面の両側に圧電セラミックを接着したバイモルフ構造を利用することによって、センサ放射面の振動変位増大を検討した⁽⁵⁾⁽⁶⁾。

バイモルフ構造を利用した空中超音波センサの構成を図8に示す。有底筒状ケースの底面の両側に圧電セラミックを接着し、バイモルフ構造を形成している。圧電セラミックは直径6mm、厚さ0.3mmの円盤状のPZT(チタン酸ジルコン酸鉛)で、ケースは内径13mm、外径14mm、深さ5mmのアルミ製の円筒、底面の厚さは1mmである。また、超音波の不要放射の原因となるケース側面での振動を抑圧するために、側面に突起部を設けている。

図8に示したセンサの放射面での振動変位分布をレーザードップラ振動変位計で測定した。比較のためケースの底面の片側だけに圧電セラミックを接着した従来構造センサについても、同様に振動変位分布を測定した。図9に測定結果を示す。図中、横軸は放射面の中心を原点とした放射面上の位置を示し、縦軸は放射面に垂直な方向の振動変位を示している。また、有限要素法によって求めた計算結果を

点線で示している。図に示すように、放射面上の振動変位は、従来構造より増大していることが分かる。

これらの結果から、バイモルフ構造を利用することによって、放射面の振動変位を増大させることができ、センサ感度の向上が期待できる。

4. むすび

鋼床版デッキプレートの亀裂探傷技術として、臨界屈折角探傷法について述べた。この技術が、老朽化した道路橋の健全性診断に活用されることを期待する。また、検知距離拡大を目的とし、感度向上を図った空中超音波センサの開発についても述べた。

実橋鋼床版の探傷にあたり、阪神高速道路株から現場提供と実測データを提供をしていただいた。ここに深謝の意を表する。

参考文献

- (1) 村越 潤, ほか: 鋼床版の疲労損傷と補修・補強技術に関する検討, (社)土木学会, 鋼構造と橋に関するシンポジウム論文報告集, 第10回, -鋼床版の疲労損傷とその対策-, 19~37 (2007)
- (2) 木村友則, ほか: 試験体表面に沿って伝搬するSV波による端面エコーに関する検討, (社)日本非破壊検査協会超音波分科会, 第14回超音波による非破壊評価シンポジウム講演論文集, 39~44 (2007)
- (3) 村越 潤, ほか: 臨界屈折角近傍に調整した超音波斜角探触子による鋼床版デッキ進展き裂の探傷法の検討, 土木学会論文集A1, 68, No.2, 453~464 (2012)
- (4) 井嶋光詞, ほか: 発泡材を用いた音響整合層による空中超音波センサの検知距離拡大の検討, 電子情報通信学会技術研究報告US, 111, No.158, 75~78 (2011)
- (5) 井嶋光詞, ほか: バイモルフ構造を利用した空中超音波センサ, 第41回EMシンポジウム講演論文集, 73~76 (2012)
- (6) Ibata, K., et al.: An Air-Coupled Ultrasonic Sensor Applying a Bimorph Structure, IEEE IUS2012, P5F-3 (2012)