

報告 鋼コンクリート合成床版モデルを用いた各種非破壊試験法およびアスファルト舗装面から走査した欠陥検出性能

山野 達也^{*1}・鷹羽 新二^{*2}・鎌田 敏郎^{*3}・内田 慎哉^{*4}

要旨：本研究では、鋼コンクリート合成床版の施工時に生じる可能性がある内部欠陥を対象とし、人工欠陥が配置されたモデル試験体を用いて、各種の非破壊試験法により欠陥検出を試み、各手法での欠陥検出性能の比較を行った。また、超音波センサアレイによる非破壊試験を用いて、アスファルト舗装を有するコンクリート版の内部に欠陥を模擬した試験体を対象として、アスファルト舗装面からの欠陥検出を試みた。その結果、超音波センサアレイによる非破壊試験では、アスファルトの有無に関わらず、平面寸法で約 100mm 以上の欠陥が検出可能であることを明らかにした。

キーワード：鋼コンクリート合成床版, アスファルト舗装, 非破壊試験法, 欠陥検出性能

1. はじめに

非破壊試験法は、鋼コンクリート合成床版の健全性を把握するために不可欠な手法の一つであり、今後、各試験技術の向上が期待されている。コンクリート構造物に対する非破壊試験法には、目的や用途に応じて種々のものが存在するが、欠陥を埋設した試験体に対して複数の非破壊試験法を適用し、それらの結果を比較した報告は少ない。

そこで、本研究では、鋼コンクリート合成床版の施工時に生じる可能性がある内部欠陥を対象とし、人工欠陥が配置されたモデル試験体を用いて、各種の非破壊試験法により欠陥検出を試み、各手法での欠陥検出性能の比較を行った。また、上記試験結果から超音波センサアレイによる欠陥検出性能が高かった非破壊試験を用いて、アスファルト舗装を有するコンクリート版の内部に欠陥を配置した試験体を対象として、アスファルト舗装面からの欠陥検出を試みた。

2. 鋼コンクリート合成床版モデル試験体での欠陥検出性能

2.1 試験体概要

図 - 1 に内部に欠陥を設置した鋼コンクリート合成床版モデル試験体の概要を示す。本稿では、鋼製橋梁において、鋼桁とコンクリート床版で構成される合成・非合成（コンクリート）構造を単に、「鋼コンクリート合成床版」と称している。この床版モデル試験体は、鋼製 I 桁上（フランジ幅 550mm）にあらかじめ欠陥を配置した上で、版厚 400mm（2 段で鉄筋を配置）のコンクリート床版を製作したものである。本研究で対象とした欠陥は、

コンクリート内に想定される初期施工不良による空隙と豆板とした。図中に示すように空隙および豆板の寸法は、それぞれ 100×100×20mm, 100×100×40mm である。

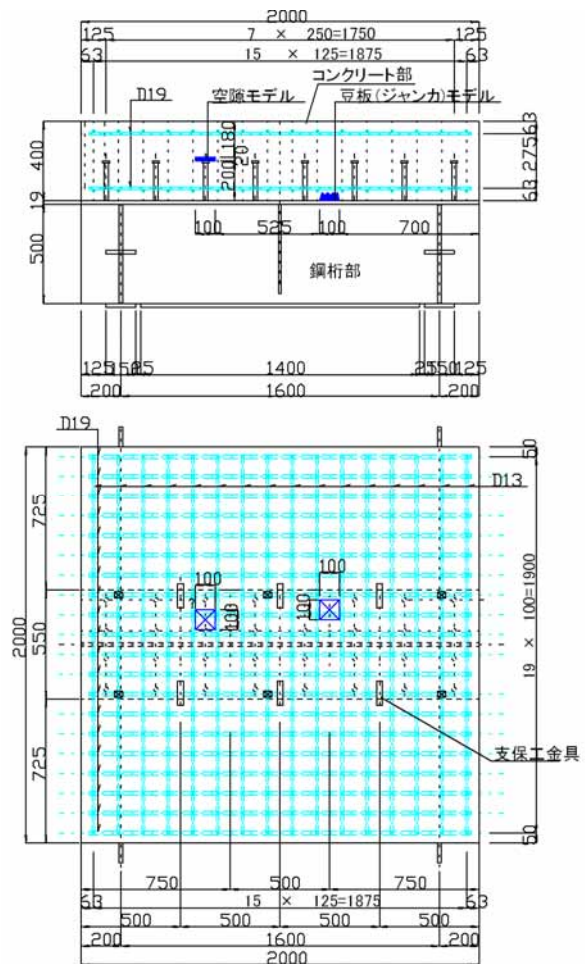


図 - 1 鋼コンクリート合成床版モデル試験体

*1 高田機工（株） 技術研究所開発課課長（正会員）

*2 高田機工（株） 技術研究所所長

*3 大阪大学大学院 工学研究科地球総合工学専攻教授 博士(工学)（正会員）

*4 大阪大学大学院 工学研究科地球総合工学専攻特任助教 博士(工学)（正会員）

2.2 適用した非破壊試験および計測概要

非破壊試験法の原理に着目すれば、ここで対象とする欠陥に対しては超音波法、電磁波レーダ法および放射線透過法が適用可能と考えられる。これらの試験法の範囲内で、現在製品化されている装置を選定し、非破壊試験を実施した。表 - 1 に適用した非破壊試験およびその装置をそれぞれ示す。各非破壊試験装置の技術的特徴および計測概要を以下にそれぞれ示す。

表 - 1 適用した非破壊試験とその装置の概要

試験種類	非破壊試験装置
超音波法	(1) 汎用超音波探傷装置
	(2) センサアレイ型超音波探傷装置
電磁波レーダ法	(3) 地中レーダ探査装置
放射線透過法	(4) X線透過装置 (IPフィルム読取装置使用)

(1) 汎用超音波探傷装置

この方法は、発振子からシリコングリセリンなどの接触媒質を介してコンクリート中に入射される弾性波を受振子で測定するものである。到達時間、波形、周波数、位相などの変化を測定装置により読みとり欠陥を検出する。写真 - 1 に汎用超音波探傷装置を、図 - 2 に探傷画面の一例を示す。本計測で使用した発振子および受振子は、広帯域型の垂直探触子（中心周波数：500kHz）である。接触媒質には、水溶性グリセリンペーストを使用した。探傷方法は、垂直探傷法とした。



写真 - 1 汎用超音波探傷装置

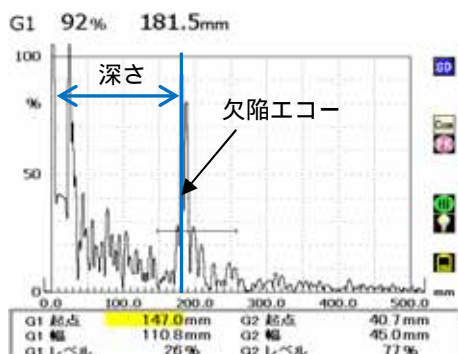


図 - 2 探傷画面の一例

(2) センサアレイ型超音波探傷装置

写真 - 2 にセンサアレイ型超音波探傷装置での測定状況を示す。写真 - 3 に本装置で使用する超音波アレイセンサを示す。超音波アレイセンサは、40個の針状センサを配置したセンサ群（4個×10列）から構成されている。各針状センサの使用周波数は15～250kHzである。図 - 3 にセンサアレイによる走査方法の概念図を示す。超音波アレイセンサでは、まず、1列目にある4個の針状センサから横波の弾性波を同時に入射し、これを2列目～10列目にある36個の針状センサでそれぞれ受信する。その後、2列目にある針状センサで横波を入射し、3列目～10列目にある針状センサでこれを受信する。同様の手順で、順次、発信と受信を繰り返して行き、9列目が発信、10列目が受信となった時点で走査を終了とする。なお、超音波アレイセンサでは、各針状センサとコンクリートとを従来の接触媒質を用いずに接触させた状態で、コンクリート表面側から弾性波の入射および受信を行うことが可能である。そのため、測定が迅速に行え、作業性も優れている。図 - 4 に各針状センサで受信した弾性波の反射エコーをトモグラフィ解析することにより求めた出力画像（コンター図）の一例を示す。この装置を使用すれば、内部の欠陥や鉄筋などの状況を立体的なイメージ画像としてリアルタイムに把握することが可能である。



写真 - 2 センサアレイ型超音波探傷装置での測定状況



写真 - 3 針状プローブを配置した超音波アレイセンサ

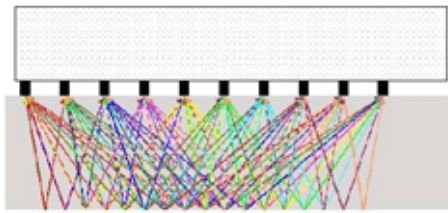


図 - 3 センサアレイによる走査方法の概念図

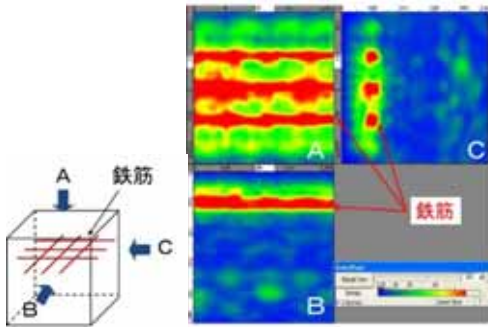


図 - 4 センサアレイ型超音波法による測定結果の一例

(3) 地中レーダ探査装置

送信アンテナからコンクリート内に向けて電磁波を放射し、その電磁波がコンクリートと電気的性質の異なる物質（鉄筋、配管、空洞など）から反射して戻ってくる際の伝達時間を計測する。この伝達時間から、反射物体までの距離（深さ）を算出することにより、空隙の有無および豆板までの距離などを推定する。写真 - 4 に地中レーダ探査装置による測定状況を、写真 - 5 に測定波形の一例を示す。本装置で使用した電磁波の周波数は、900MHz である。



写真 - 4 地中レーダ探査装置による測定状況

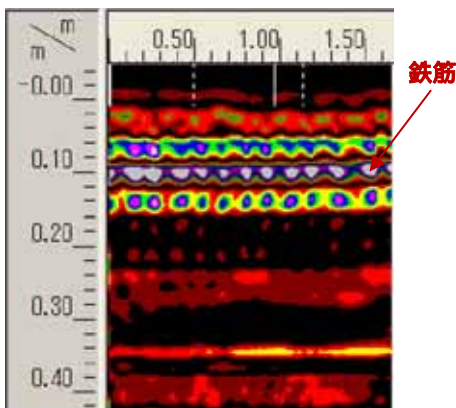


写真 - 5 測定波形の一例

(4) X線透過装置

対象物の一方から X 線を照射し、対向する裏面に X 線フィルムの代わりに輝尽性蛍光体を塗布した IP フィルムを配置することによって透過像を撮影する。鉄筋、空洞およびひび割れなどの変状は透過写真の濃淡で判断できる。原理は、従来の X 線透過法であるが、IP フィルム（解像度 100 μ m）とデジタル X 線画像処理装置を用いることにより、画像処理が可能である。そのため、フィルム現像作業を省くことができ、現場での判定が容易となる。写真 - 6 に X 線透過装置による測定状況を、写真 - 7 に画像出力結果の一例を示す。なお、本装置の仕様は、管電圧 300kV、管電流 5mA、焦点距離 950mm、焦点サイズ 2 \times 2mm、撮影時間 30 分、グリッド無しである。

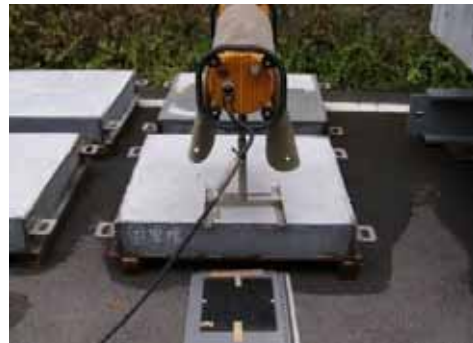


写真 - 6 X線透過装置による測定状況



写真 - 7 画像出力結果の一例

2.3 計測結果および考察

表 - 2 に、今回適用した非破壊試験装置による測定結果を併せて示す。それぞれの結果および考察は、以下に示す。

(1) 汎用超音波探傷装置

反射エコーの出現位置より空隙の存在が検出可能であるが、豆板についてはコンクリート表面からの深さ 400mm 程度の底面付近における反射エコーとの判別が困難であった。探傷の作業性については、探触子をコンクリート表面上で走査する際に粘性の高い接触媒質を用いるため、測定に要する時間が長くなった。

(2) センサアレイ型超音波探傷装置

この装置によれば、欠陥および鉄筋は、反射エコーの大きい赤色の部分として表示され、空隙および豆板の位置が把握できた。このことは、現場において、内部欠陥の状況を、立体的イメージとしてリアルタイムに把握できることを示す。本装置は、汎用超音波探傷装置とは異なり、試験体へプローブを押し当てる際の接触媒質を使

用しないため、測定が迅速に行え、作業性は優れている。また、表 - 3 に、この試験装置における測定結果の詳細を示す。アレイ走査により取得した弾性波伝播速度、エコー高さおよび3次元位置座標などの全データから、以下のことが明らかとなった。

表 - 2 鋼コンクリート合成床版モデル試験体における測定結果

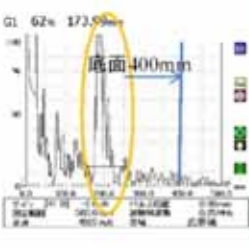
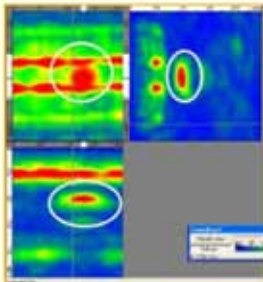
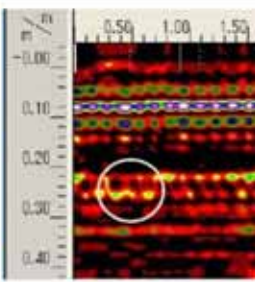
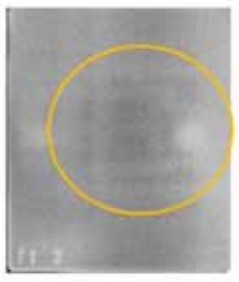
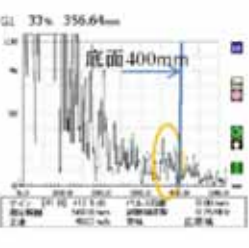
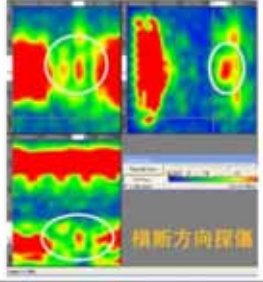
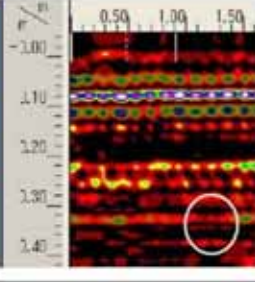

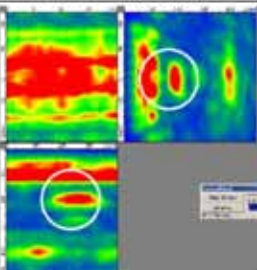
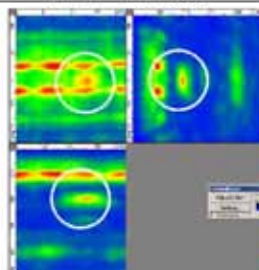
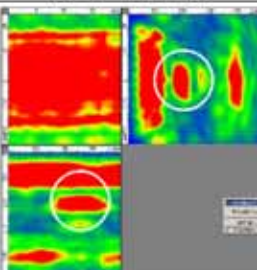
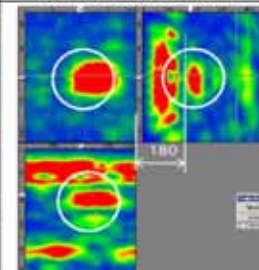
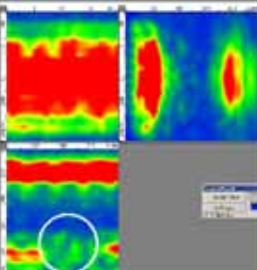
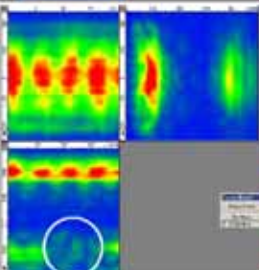
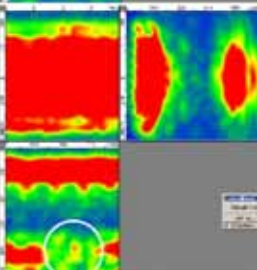
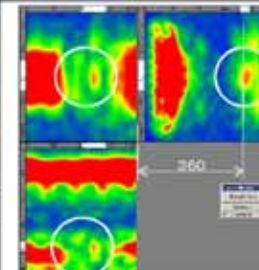
欠陥位置	(1)汎用超音波探傷装置	(2)センサアレイ型	(3)地中レーダ探査装置	(4)X線透過装置
空隙 (発泡プラスチック保温材) 厚さ:20mm 深さ:180mm	 検出可能	 検出可能	 検出困難	 検出可能
豆板 厚さ:約40mm 深さ:360mm	 版厚と豆板との判別が困難	 検出可能	 検出困難	 検出困難

表 - 3 センサアレイ型超音波装置による測定結果の詳細

欠陥位置	(1)エコー高さ:37dB	(2)エコー高さ:32dB	(3)エコー高さ:41dB	(4)エコー高さ:41dB (欠陥位置絞り込み設定)
空隙 (発泡プラスチック保温材) 厚さ:20mm 深さ:180mm				
豆板 厚さ:約40mm 深さ:360mm				

(I) 欠陥表示システムは、自動演算による最適エコー高さ(本試験体結果 37dB)をしきい値として抽出されたコンクリートの内部形状(鉄筋および空隙など)が反射エコーのコンター図として表示される。

(II)(I)では、鉄筋や鋼板境界部などが反射エコーの差異として表示されるが、空隙や豆板が表示されない場合がある。システム上でエコー高さの設定が適切でない場合は、エコー高さ(32dB あるいは 41dB)を任意に変えることによって、一定のエコー高さを持つ欠陥を表示させることが可能となる。

(III)表示した欠陥位置の中心に断面を絞り込むことにより、欠陥位置および寸法を正確に測定できる。

(3) 地中レーダ探査装置

表-2中の図からわかるように、反射波の状況から空隙あるいは豆板の位置を判断するのは難しい。鉄筋からのマイクロ波の反射の影響で、欠陥からの反射波を識別するのが困難となっている。

(4) X線透過装置

表-2中のX線透過像から、空隙の存在が判別できたが、豆板についてはその位置は明らかではない。本研究におけるX線の出力設定(使用管電圧 300kV)では、床版厚に対してX線の透過性能が不足していたことが原因と考えられる。



写真-8 アスファルト舗装を有する試験体(H2)

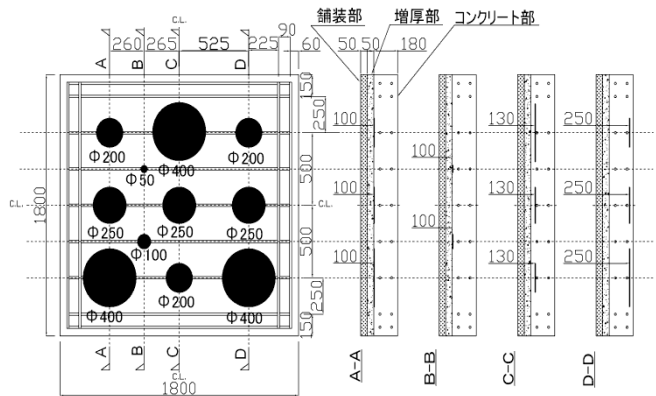


図-5 H2試験体での人工欠陥の配置状況

3. アスファルト舗装面からの欠陥検出性能

非破壊試験装置は、欠陥検出性能が高かったセンサアレイ型超音波探傷装置を用いた。この装置を用いて、アスファルト舗装を有するコンクリート版の内部に欠陥を模擬した試験体を対象として、アスファルト舗装面からの欠陥検出を行い、その検出性能の把握を試みた。

3.1 試験体概要

試験体は、コンクリート版の片面にアスファルト舗装を施した全厚 280mm(コンクリート部 180mm + 増厚部 50mm + 舗装部 50mm)の試験体(H2試験体と呼ぶ)である。また、比較のため、版厚 280mmのコンクリート版供試体(H1試験体と呼ぶ)も計測対象とした。写真-8にH2供試体の概要を示す。いずれの供試体においても、厚さ 6mm、直径 50、100、200、250 および 400mm の 5種類の円盤状の発泡スチロールを人工欠陥として埋め込んでいる。人工欠陥の埋め込み深さは、100、130 および 250mm の 3 ケース設定した。図-5にH2試験体での人工欠陥の配置状況を示す。なお、H1試験体における欠陥形状、平面的な配置位置および上面から欠陥までの深さは、H2試験体と同じである。

3.2 計測結果および考察

センサアレイ型超音波装置により欠陥検出を行う前に、各供試体での健全部において、コンクリート中を伝

播する横波の速度計測を行った。その結果、H1試験体が 2488m/s、H2試験体では 2193m/s となった。

(1) 欠陥 250mm の検出結果

表-4は、H1およびH2試験体における欠陥直径 250mmで、深さが 100、130 および 250mm の場合の測定結果をそれぞれ示す。表中の印内は、図面上の欠陥位置をそれぞれ示している。また、この画像は、自動演算により決定した最適エコー高さ(38.7dB)の場合のコンター図である。図より、アスファルト舗装の有無に関わらず、欠陥を検出できることが明らかとなった。しかも、欠陥の推定位置、形状および深さは、概ね一致していることもわかった。

(2) 欠陥 100mm の検出結果

表-5は各供試体で得られた結果を示す。表-5中の印は、表-4と同様に、図面で把握した欠陥の位置をそれぞれ示している。表中の最適エコー高さ 38.7dBでのコンター図に着目すると、いずれの供試体においても、欠陥を適確に検出しているとは言い難い。そこで、このコンター図に対して、まず、コンクリート表層部における弾性波およびコンクリート底版からの反射する弾性波をそれぞれ除去した。このようにして取得したコンター図から、欠陥の平面的な位置を特定した。続いて、特定した欠陥を対象に、供試体の深さ方向における位置の絞り込みを行なった。その画像を表-5に示す。

表 - 4 欠陥直径 250mm の測定結果

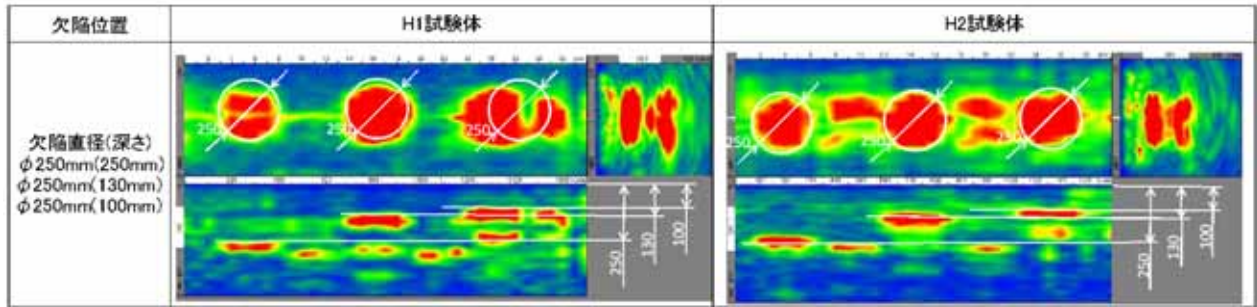
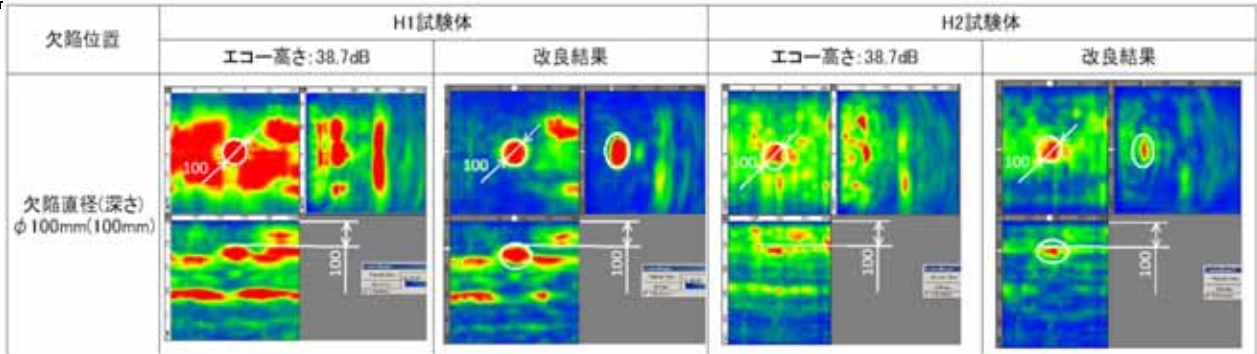


表 - 5 欠陥直径 100mm の測定結果と位置の絞り込み結果



H1 および H2 とともに、コンター図上で欠陥を容易に把握することが可能となり、しかも、欠陥の平面的な位置および深さは、図面上の値と概ね一致することが明らかとなった。

(3) その他の欠陥直径での検出結果

200mmおよび 400mmの欠陥については、表 - 4と同様に、検出することが可能であった。しかしながら、50mmの場合では、アスファルトの有無に関わらず、また、ノイズ除去や位置の絞り込みを実施しても、欠陥の大きさを把握することは困難であった。

4.まとめ

本研究で適用した非破壊試験装置の欠陥検出性能をまとめると、鋼コンクリート合成床版モデル試験体を対象とした場合、超音波探傷装置では欠陥位置および寸法を概ね把握できた。特に、センサアレイ型超音波探傷装置では、弾性波トモグラフィを活用することにより欠陥を立体的イメージとして把握することが可能であった。地中レーダ探査装置では、鉄筋からの反射波の影響が大

きく、欠陥形状の推定の障害となった。X線透過装置の場合は、床版厚が大きいと、形状や寸法を適確に把握することが容易ではないことが明らかとなった。結論として、センサアレイ型超音波探傷装置の欠陥検出性能が最も高く、実橋を想定したコンクリート床版に対する検出性能は、平面寸法で100mm×100mm程度以上と考えられる。

これに対して、アスファルト舗装を有するコンクリート版試験を対象に、センサアレイ型超音波装置を用いた非破壊試験を行った結果、アスファルト舗装の有無のかわからず、取得した画像から内部欠陥を概ね評価できることが明らかとなった。また、欠陥検出性能は、アスファルトが無い場合と同様、直径が 100mm 以上であることも明らかとなった。

謝辞

非破壊試験の実施にあたっては、東洋検査工業(株)の森本量也氏および日本マテック(株)の松島 勤氏にご協力を頂いた。ここに記して謝意を表する。