

車載型電磁波レーダによる道路橋 RC 床版内部の 劣化損傷識別に関する判定手法の構築

神戸市公立大学法人神戸市立工業高等専門学校
都市工学科 教授 伊原 茂

1. 研究背景

現在、道路橋では5年に1回の定期点検が義務化されている中、交通荷重を支える RC 床版の点検においては、RC 床版下面側からの接近目視点検が一般的である。一方、RC 床版上面側からの点検は、交通規制を伴うことから、広範囲にわたる点検は極めて困難であり、RC 床版上面側の内部劣化損傷状況の把握が十分できていないのが現状である。その結果、近年、車両走行性に影響を与える可能性のある舗装損傷箇所において RC 内部の水平ひび割れ（写真-1）や RC 床版上面の土砂化（写真-2）が多く報告されている。1960 年代以降の高度経済成長期に建設された都市高速道路等の道路橋 RC 床版は、厚さが 200mm を下回るものが多く、RC 床版下面側に縦桁、全面鋼板等による補強が実施されてきたが、現在、更新（造り替え）の時期を迎えている。しかし、莫大な費用と時間を要するため、更新は容易に実施することはできない。このような状況下において、RC 床版の長寿命化を図るためには、的確な点検・診断技術が急務な課題である。



写真-1 RC床版内部の水平ひび割れ



写真-2 RC床版上面の土砂化

2. 研究目的

本研究では、写真-3 に示すような電磁波レーダを搭載した車両を用いて、交通規制を行うことなく車道を走行することにより、RC 床版上面側内部に発生する水平ひび割れと土砂化を識別判定できる手法を構築することを目的とする。具体的には、水平ひび割れ、土砂化に関して、模擬損傷を入れた供試体を作製し、電磁波レーダを用いて反射波形の違いに着目して分析評価し、損傷を識別判定できる分析手法を構築することをめざす。



写真-3 電磁波レーダを搭載した計測車両

3. 研究内容

3. 1 実験方法

昭和 39 年道路橋示方書で設計された RC 床版は、現行設計と比較して床版厚が薄く 180mm 以下が多いため、実橋を踏まえ、舗装厚 80mm（基層 40mm＋表層 40mm）の下に RC 床版の上半分を模擬した 90mm 部分を対象として、内部損傷を模擬した供試体を作製し、電磁波レーダを用いて識別できるかどうか

か実験で検証する。本研究では、車載型電磁波レーダとして地中レーダの適用を考えており、その計測原理は、図-1 に示すとおりである。送信された電磁波は、誘電率、導電率等の電気的特性の異なる物質の境界で反射波を生じる性質を利用して、その反射波を解析することにより物質内部の探査を行うものである。アンテナ部から送信される電磁波（送信波）が物質中を伝搬し、比誘電率の異なる物質の境界で反射が生じるため、その反射波をアンテナ部で受信して、送信してから受信されるまでの時間差で反射が生じた深さを求めることができる。また、地中レーダを搭載した計測車両を用いる代わりに、車載型と同性能の写真-4 および表-1 に示す手押し型電磁波レーダを用いることとした。また、比較検証のため、鉄筋探査等の構造物点検で使用される写真-5 および表-2 に示すハンディ型電磁波レーダを用いて計測し、測定機器による損傷検知能力の違いについて検証する。

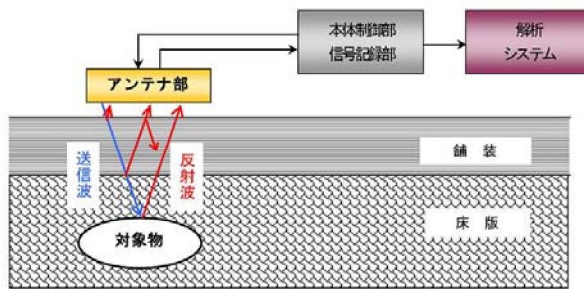


図-1 電磁波レーダの計測原理



写真-4 手押し型電磁波レーダ

表-3 実験ケース

ケース	表面乾燥状態		ケース	湿潤状態	
1	健全		9	健全	
2	水平ひび割れ	空隙0.5mm	10	水平ひび割れ	空隙0.5mm
3	水平ひび割れ	空隙1.0mm	11	水平ひび割れ	空隙1.0mm
4	水平ひび割れ	空隙2.0mm	12	水平ひび割れ	空隙2.0mm
5	水平ひび割れ	空隙3.0mm	13	水平ひび割れ	空隙3.0mm
6	水平ひび割れ	空隙15mm	14	水平ひび割れ	空隙4.0mm
7	土砂化	粗骨材（乾燥）	15	水平ひび割れ	空隙4.5mm
8	土砂化	細骨材+粗骨材（乾燥）	16	水平ひび割れ	空隙7.5mm
			17	水平ひび割れ	空隙10mm
			18	土砂化	粗骨材（乾燥）
			19	土砂化	粗骨材（湿潤）
			20	土砂化	細骨材+粗骨材（乾燥）
			21	土砂化	細骨材+粗骨材（湿潤）

3. 2 供試体概要

図-2～図-9 に供試体概要図を示す。図-3～図-5, 図-7, 図-9 は、計測方向に対して直角方向の断面図である。なお、供試体の平面寸法は、供試体端部における反射波の影響および信号の安定性を踏まえ、端部から 200mm 程度を影響範囲と考え、幅 900mm, 計測方向に 1200mm とした。実験ケースは、表-3 に示すとおりである。RC 床版の水分状態については、表面乾燥と湿潤に分けて上側鉄筋に沿って発生する水平ひび割れの高さを変えたり、かぶり部分（30mm）の土砂化の材料構成を変えたりして供試体を作製した。

供試体の断面構成としては、数多くのケースを比較的容易に実施できるように、平面寸法 300mm×300mm, 厚さ 40mm の舗装体（表層と基層ともに密粒 13mm）, 厚さ 30mm と 60mm のコンクリート平板（強度：27N/mm²）は、接着させずに積み重ねて設置した。また、水平ひび割れを模擬するために、空隙 15mm の場合を除いて、平面寸法 50mm×50mm, 比誘電率が約 2 のポリカーボネード製の板を厚さ 60mm のコンクリート平板上の各ブロックの四隅に設置して高さを調整し、空隙 15mm の場合は、発泡ス

表-1 手押し型電磁波レーダの仕様

項目	仕様	
調査速度	5km/h	
データ取得間隔	1cm～	
探査幅	路面下空洞	1.0m
	舗装・橋梁	0.9m
探査深度	約 1.0m	



写真-5 ハンディ型電磁波レーダ

表-2 ハンディ型電磁波レーダの仕様

項目	仕様
レーダ周波数	2.7GHz
探査深度	約 60cm

チロールを使用した。土砂化は、粗骨材だけの場合と細骨材と粗骨材を質量比 3 : 2 でブレンドした場合の 2 ケースとした。粗骨材は、厚さ 30mm のコンクリート平板をハンマーで砕いて 1 辺が 30mm 程度のもを選別し、細骨材は市販の約 4mm~9mm 混合の砕石を使用した。湿潤状態の設定については、防水シートを用いて厚さ 60mm のコンクリート平板の半分である 30mm まで水張り状態をつくり、1 週間その状態を継続した。コンクリート平板の表面乾燥および湿潤状態に関しては、写真-6 に示す床版防水工用に開発された電気抵抗式水分計（含水率 6%以下）を用いて、コンクリート平板のカウント値を測定し、図-10 に示す関係に基づいて確認した。写真-7~写真-12 に現場供試体設置状況および計測状況を示す。

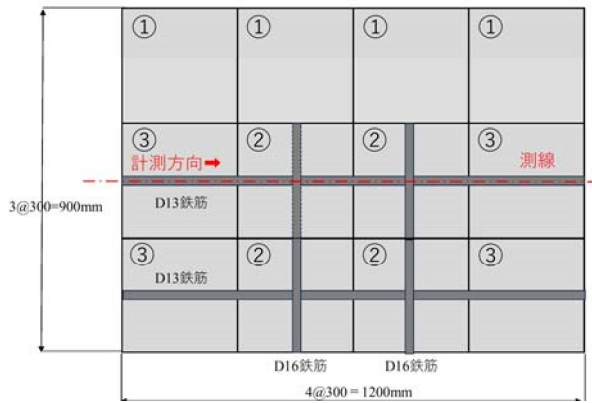


図-2 供試体平面図（ケース 1~6）



写真-6 電気抵抗式水分計¹⁾

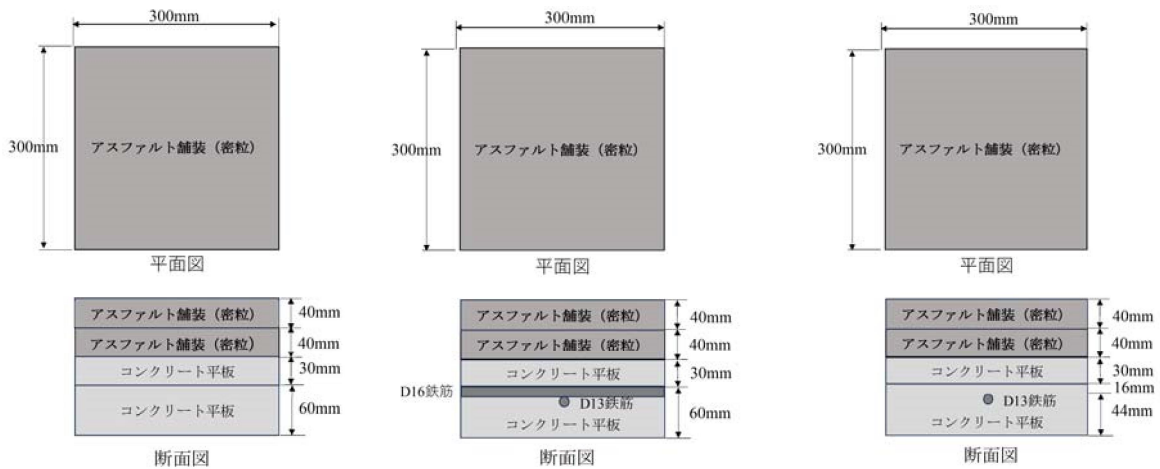


図-3 鉄筋なし (Type①)

図-4 2方向鉄筋あり (Type ②)

図-5 配力鉄筋あり (Type ③)

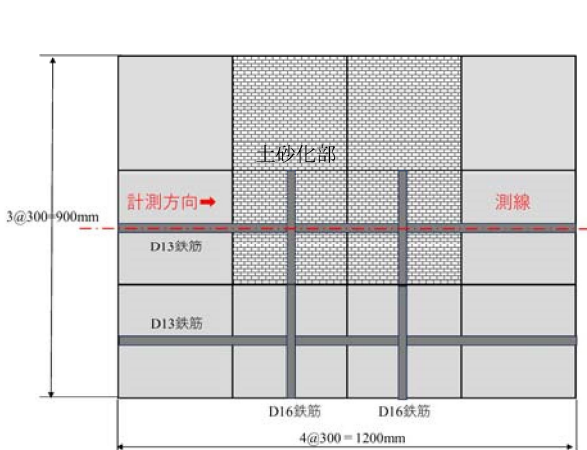


図-6 土砂化供試体平面図（ケース 7, 8, 18~21）

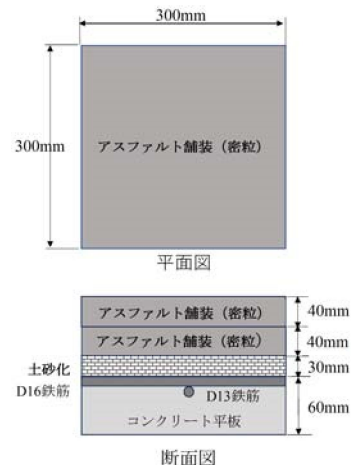


図-7 土砂化断面図



写真-7 コンクリート平板の設置状況

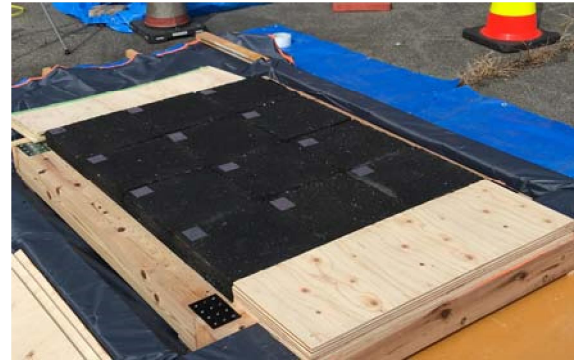


写真-8 舗装体の設置状況

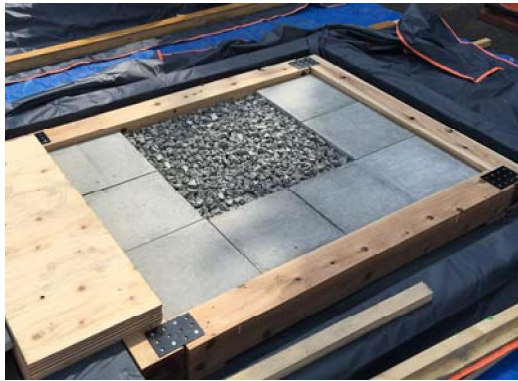


写真-9 土砂化（粗骨材のみ）作製状況

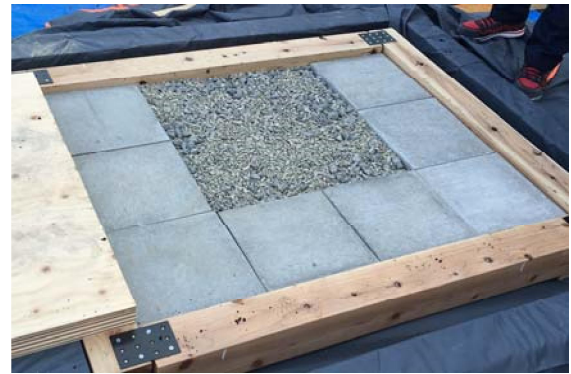


写真-10 土砂化（細骨材+粗骨材）作製状況



写真-11 手押し型電磁波レーダの計測状況



写真-12 ハンディ型電磁波レーダの計測状況

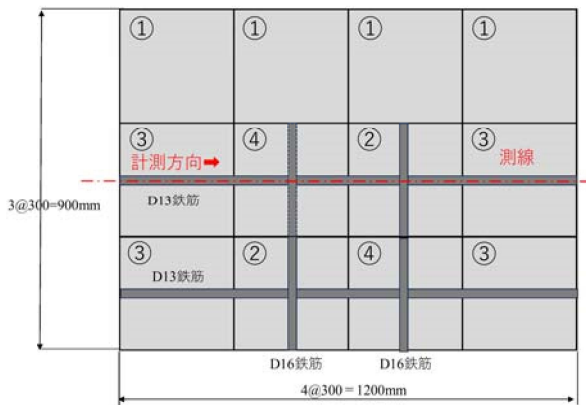


図-8 供試体平面図（ケース 9～17）

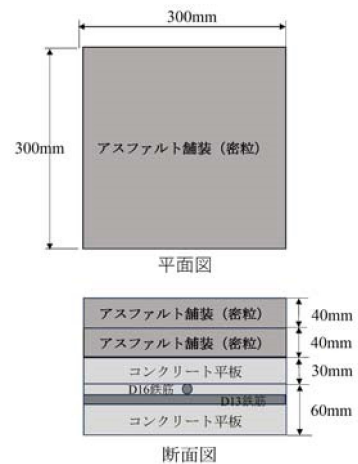


図-9 2方向鉄筋あり（Type ④）

4. 計測結果および考察

4. 1 ハンディ型電磁波レーダの計測結果および考察

図-11 は、ハンディ型電磁波レーダによる測定画像の一例である。反射波形は+側が白色、-側が黒色とし、波形の大きさに応じて色付けされる。比誘電率が低い鉄筋は白色、比誘電率が低い空気層は黒色で表示される。図-12～図-21 に実験ケースの中で代表的な主鉄筋位置における深度方向の反射波形と測線下における画像を示す。なお、コンクリートの比誘電率は 5 とした。舗装部分 (80mm) とコンクリート板の境界は、反射波形が大きく変化している位置であり、明確に特定することができた。主鉄筋の検知は可能であるが、その下に位置する配力鉄筋については、反射波形が見られず、検知することはできなかった。水平ひび割れは、空隙 2mm の場合において検知が可能であることが判明した。それよりも小さい 0.5mm, 1.0mm の場合、反射波形および画像に変化が見られないことから識別は困難であると考えられる。次に、土砂化については、反射波形および画像が他のケースと比べて著しく異なる状況が見られた。粗骨材のみの場合と粗骨材および細骨材をブレンドした場合の違いは見られなかった。また、模擬した土砂化はかぶり厚さ 30mm の範囲であるが、土砂化の深さまでは検知ができなかった。どのケースにおいても、表面乾燥と湿潤では目立った違いは見られなかった。

コンクリート表面の水分状態	カウント値の目安									
① 絶乾状態	10	55								
② 乾燥状態		60	132							
③ 表面乾燥状態		137		230						
④ 湿潤状態			285	306	520					
⑤ 濡水状態					521				744	
		100	200	300	400	500	600	700		
	電気抵抗式水分計 (カウント値)									

図-10 コンクリート水分状態とカウント値の関係¹⁾

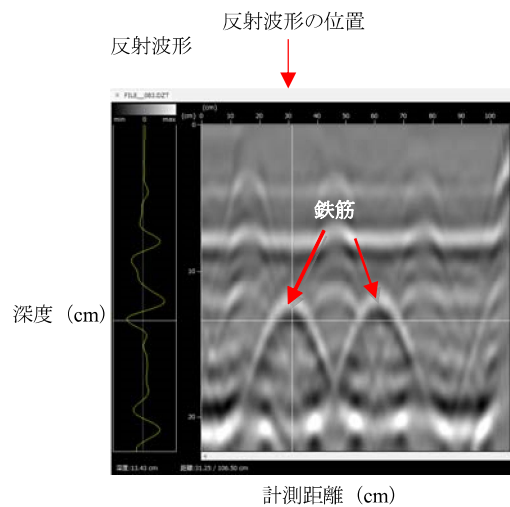


図-11 ハンディ型電磁波レーダの測定画面

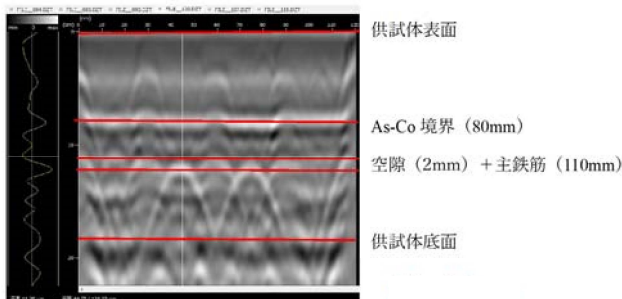


図-12 水平ひび割れ (表面乾燥, 空隙 2mm)

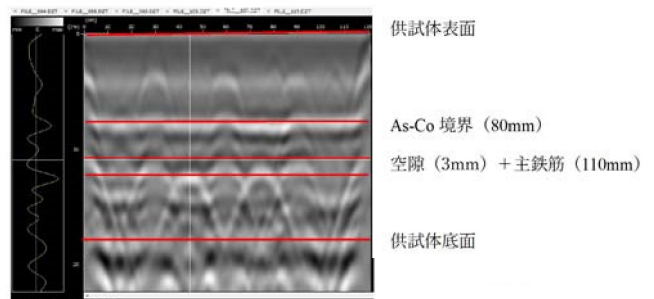


図-13 水平ひび割れ (表面乾燥, 空隙 3mm)

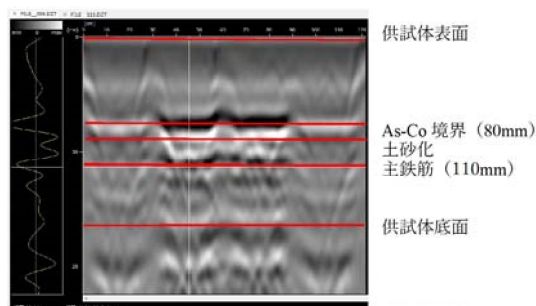


図-14 土砂化 (表面乾燥, 粗骨材 (乾燥))

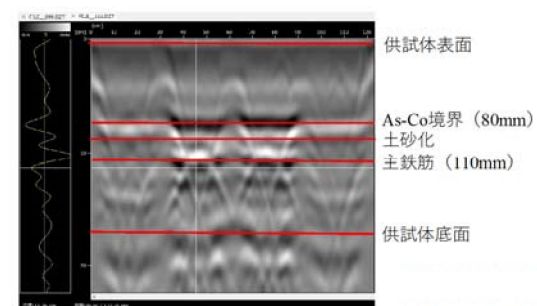


図-15 土砂化 (表面乾燥, 粗骨材 + 細骨材 (乾燥))

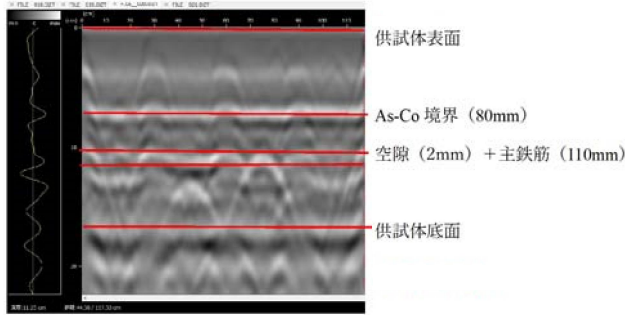


図-16 水平ひび割れ（湿潤，空隙 2mm）

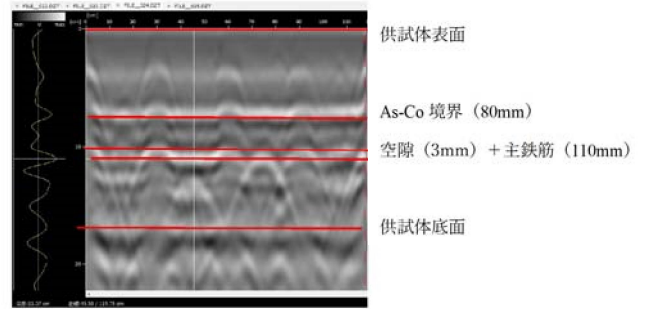


図-17 水平ひび割れ（湿潤，空隙 3mm）

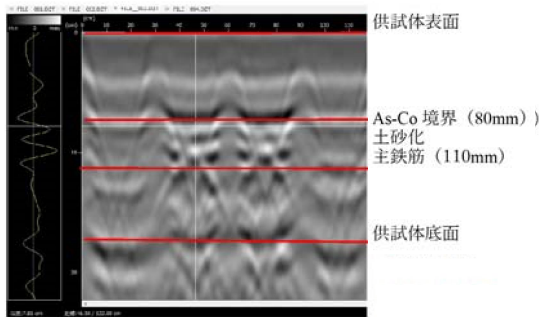


図-18 土砂化（湿潤，粗骨材+細骨材（乾燥））

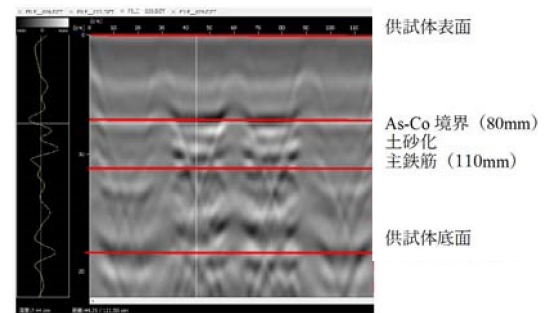


図-19 土砂化（湿潤，粗骨材+細骨材（湿潤））

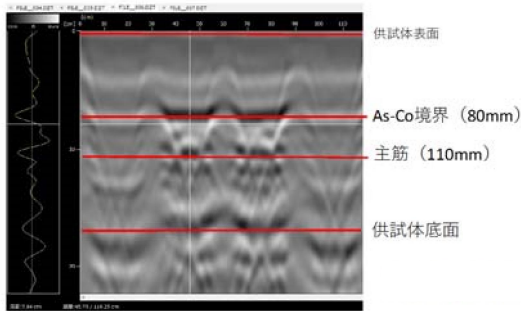


図-20 土砂化（湿潤，粗骨材（乾燥））

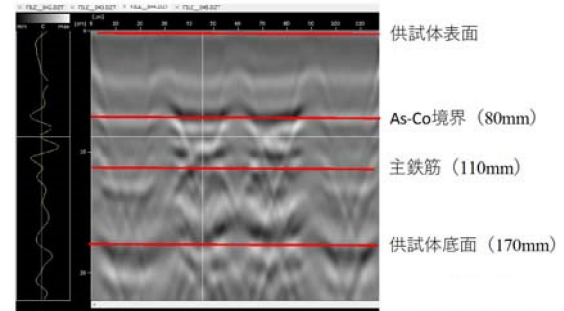


図-21 土砂化（湿潤，粗骨材（湿潤））

4. 2 手押し型電磁波レーダの計測結果および考察

図-22 は，手押し型電磁波レーダによる測定画像の一例である．反射波形は+側が黒色，-側が白色とし，波形の大きさに応じて色付けされる．図-23～図-30 に実験ケースの中で代表的な主鉄筋位置における深度方向の反射波形と測線の沿った画像を示す．なお，コンクリートの比誘電率は7とした．舗装部分（80mm）とコンクリート板の境界は，反射波形が大きく変化している位置であり，明確に特定することができた．主鉄筋の検知は可能であるが，その下に位置する配力鉄筋については，主鉄筋で反射するため，検知することはできなかった．表面乾燥状態の場合，水平ひび割れが模擬する空隙 0.5mm，1.0mm，2.0mm では，空隙ゼロの場合と比べ

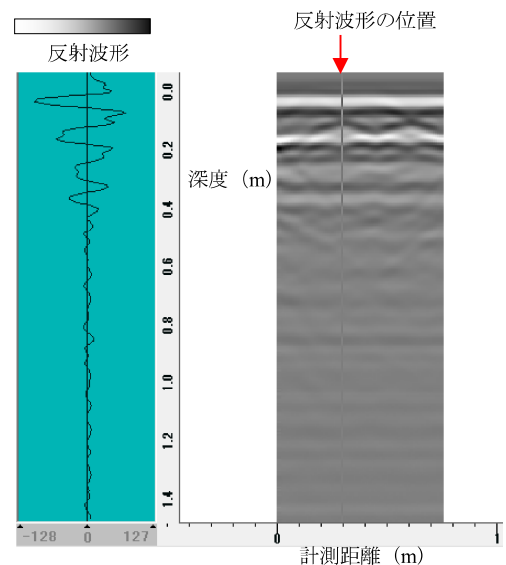


図-22 手押し型電磁波レーダの測定画像

て、違いが見られなかった。空隙 3mm のときに反射波形に微弱な変化が見られたが、空隙の影響によるものか否かについて特定することはできなかった。また、土砂化については、反射波形が他のケースと比べて著しく乱れており、画像に関しても異なる状況が見られた。粗骨材のみの場合と粗骨材と細骨材をブレンドした場合の違いは見られなかった。しかし、かぶり厚さ 30mm 部分の土砂化に対して、土砂化の

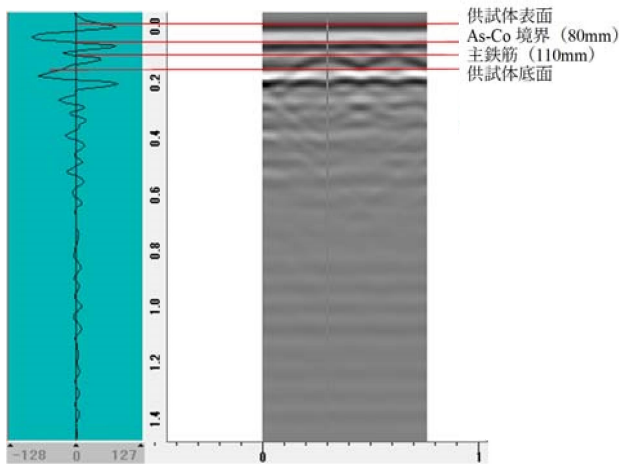


図-23 健全 (表面乾燥)

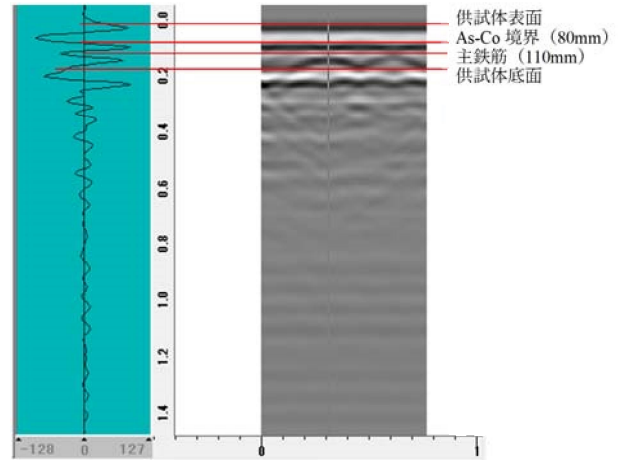


図-24 水平ひび割れ (表面乾燥, 空隙 3mm)

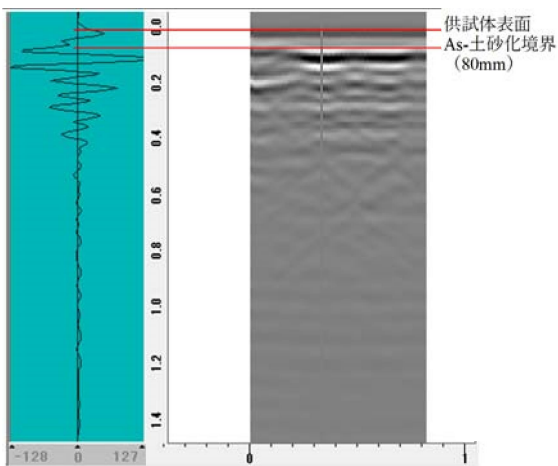


図-25 土砂化 (表面乾燥, 粗骨材のみ)

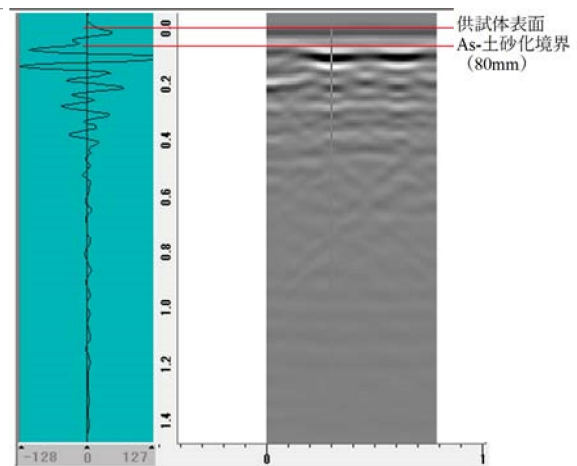


図-26 土砂化 (表面乾燥, 粗骨材+細骨材)

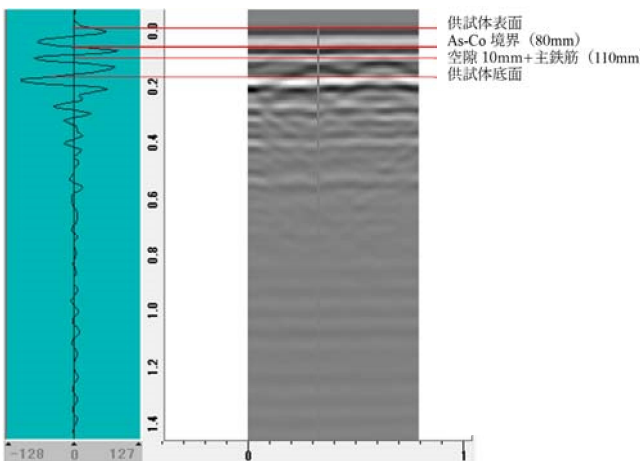


図-27 水平ひび割れ (湿潤, 空隙 10mm)

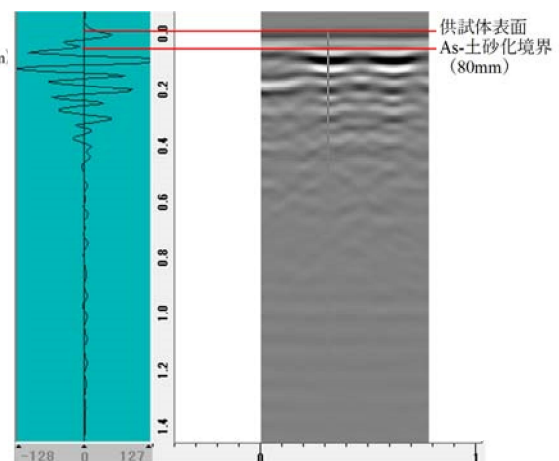


図-28 土砂化 (湿潤, 粗骨材 (湿潤))

深さについては検知することができなかった。一方、湿潤状態の場合、空隙 10mm においてひび割れ検知が可能であることが判明した。それよりも小さい空隙では、反射波形および画像に変化が見られないことから識別は困難であると考えられる。どのケースにおいても表面乾燥と湿潤では、目立った違いは見られなかった。

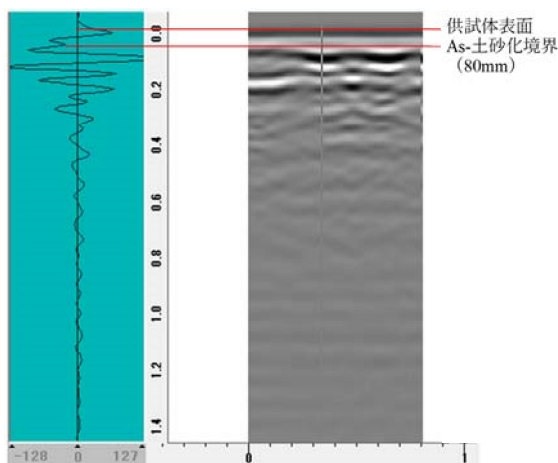


図-29 土砂化(湿潤, 粗骨材+細骨材(乾燥))

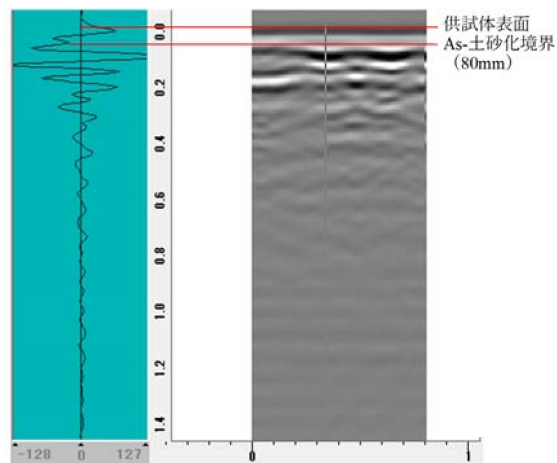


図-30 土砂化(湿潤, 粗骨材+細骨材(湿潤))

5. まとめ

上記に示す供試体を用いた計測結果による知見は、以下のとおりである。水平ひび割れに関しては、ハンディ型電磁波レーダでは、空隙 2mm 程度であれば検知可能、一方で、手押し型電磁波レーダでは、空隙 10mm 程度であれば、湿潤状態において検知可能と考えられる。また、土砂化の有無について、ハンディ型および手押し型の電磁波レーダともに検知できることが判明したが、土砂化の深さに関して特定することはできなかった。なお、コンクリート平板の水分状態として、表面乾燥と湿潤で目立った差は見られなかった。

以上より、本実験結果だけでは、RC 床版内部の損傷識別手法を構築することは困難であり、更なる詳細検討が必要であると考えられる。滞水と水平ひび割れの関係、土砂化に関しては、その有無だけではない。道路管理者にとって、土砂化深さが比較的浅い段階における RC 床版の内部損傷の発見は、舗装を維持管理する上でも重要であることから、土砂化深さを変えて引き続き検証する必要がある。今後、これらを踏まえ、新たな供試体を作製し、更なる識別検知の可能性について、詳細研究を進めていきたいと考えている。

謝辞：本研究は、令和 5 年度一般社団法人近畿建設協会および一般財団法人日工記念事業団の研究助成の援助を受けて、阪神高速技術株式会社およびジオ・サーチ株式会社の協力により実施した。関係各位に感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 谷倉泉, 榎園正義, 後藤昭彦: 床版防水工における水分計の適用性に関する研究, 構造工学論文集, 土木学会, Vol.59A, pp.1112-1123, 2013.3