

# 鋼-コンクリート複合構造物の非破壊検査技術の開発と実機適用

## Development and Application of Non-Destructive Inspection for Steel-Concrete Composite Structures

柳 原 有 紗 技術開発本部生産技術センター生産基盤技術部  
畠 中 宏 明 技術開発本部生産技術センター生産基盤技術部 主査 博士(工学)  
田 上 稔 技術開発本部生産技術センター生産基盤技術部 部長 博士(工学)  
戸 田 勝 哉 株式会社 IHI インフラシステム 技術本部開発部 主査 博士(工学)  
中 村 善 彦 株式会社 IHI インフラシステム 営業本部橋梁企画部 部長

近年、橋梁製作において耐久性や経済性の観点から鋼-コンクリート複合構造（鋼-コンクリート合成床版、橋脚剛結部など）の採用が増加している。しかし、鋼板によってコンクリートの周囲が覆われる構造であるため、打設後にコンクリートの充填状況を目視で確認できないことが課題となっている。この課題に対し、通常の超音波探傷で使用される周波数よりも低い周波数の超音波を用いることで、コンクリートの充填部/未充填部を識別可能な検査・評価技術を開発し、実橋梁への適用を開始したので報告する。

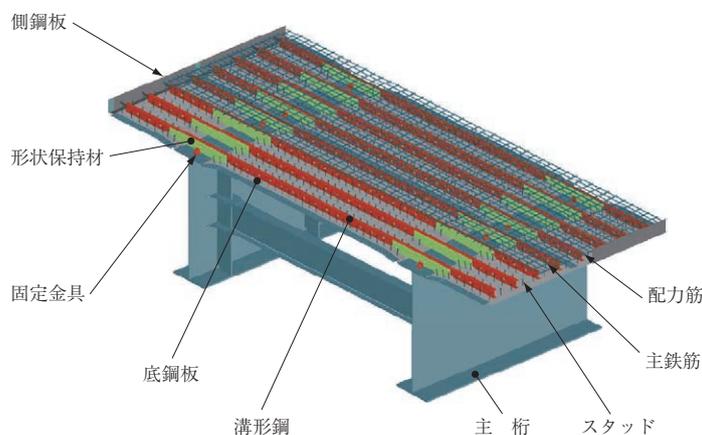
Steel-concrete composite structures, such as steel-concrete composite slabs and rigid connections between piers and beams, have been widely adopted in recent years due to their durability and economic efficiency. However, it is impossible to examine the boundary between steel plates and concrete visually after concrete casting because of the presence of steel plates surrounding the concrete. To solve this issue, a method to discriminate between filled and unfilled areas in concrete using low-frequency ultrasound has been developed and its application to actual bridges has commenced.

### 1. 緒 言

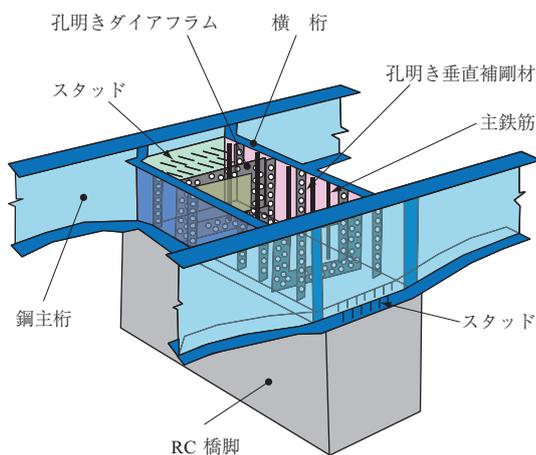
近年、橋梁製作において耐久性やコストなどの観点から鋼-コンクリート複合構造（鋼-コンクリート合成床版、橋脚剛結部など）の採用が増加している。鋼-コンクリート複合構造による耐久性向上の効果を十分に発揮させるためには、コンクリートが十分に充填される必要があるが、鋼板の存在によってコンクリートの充填状況を目視では確認できない。

第1図に示す鋼-コンクリート合成床版（以下、合成床版と呼ぶ）<sup>(1)</sup>の場合、施工時にコンクリートの未充填部（空隙、ジャンカなど）がある場合、供用中に雨水などが床版内へ浸入し、補強部材（リブ、タッド、チャンネルなど）や底鋼板の腐食による耐久性の低下が懸念されている。

また、第2図に示す RC ( Reinforced Concrete ) 橋脚と鋼桁の剛結部（以下、剛結部と呼ぶ）の場合、鋼板フランジ下面に空隙が溜まりやすい打設方向となることに加



第1図 鋼-コンクリート合成床版の概略図  
Fig. 1 Schematic view of the steel-concrete composite deck plate



第2図 RC橋脚と鋼桁の剛結部の概略図

Fig. 2 Schematic view of the rigid connections between a reinforced concrete pier and a steel beam

え、板厚が厚いため簡易的なたたき検査<sup>(2)</sup>、<sup>(3)</sup>による確認も困難である。

この課題に対し、超音波探傷試験に着目し、低周波数の超音波を用いることで鋼-コンクリート界面の未充填部を検出する技術を開発した。

本稿では、開発技術の概要と実橋梁合成床版への適用例について報告する。

## 2. 超音波による検査技術の概要

### 2.1 コンクリートの超音波探傷試験

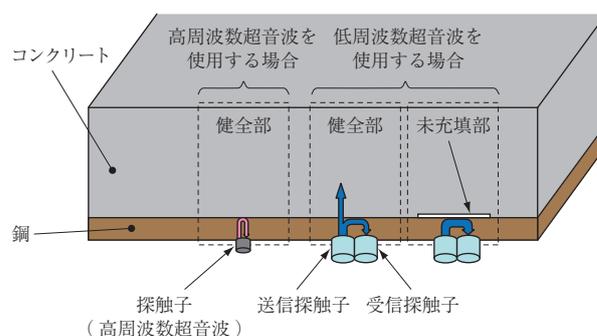
超音波探傷試験は材料内部を非破壊で検査可能な手法であることから、工業分野においては主に鋼溶接部の施工の良否や鋼材の品質を判断する検査手法として広く利用されている<sup>(4)</sup>。コンクリート構造物においては、音速、版厚、ひび割れ深さなどの測定や、強度の推定に用いられている。コンクリートはセメントペースト、骨材などから成る多孔質の複合材料であるため、通常の金属材料の検査で用いられる MHz オーダよりも低い、数十～数百 kHz 程度の超音波が一般に用いられる<sup>(5)</sup>。また、コンクリートの音響特性は各々の材料特性や材齢に依存するため、超音波による評価の際にこれらを考慮に入れる必要がある。

### 2.2 合成床版を対象とした検査・評価技術の開発

#### 2.2.1 開発技術の原理

合成床版の底鋼板には、一般に厚さ 6～9 mm の薄板が用いられる。薄板-コンクリート複合構造物において鋼板側から超音波を入射させる場合の概略を第3図に示す。

鋼-コンクリート界面の状況を底鋼板側から検査する場合、最初は鋼板の厚さよりも波長の短い、すなわち高周波数の超音波 (MHz オーダ) を使用して界面の分解能を向



第3図 薄板-コンクリート複合構造物における低周波数超音波の伝搬

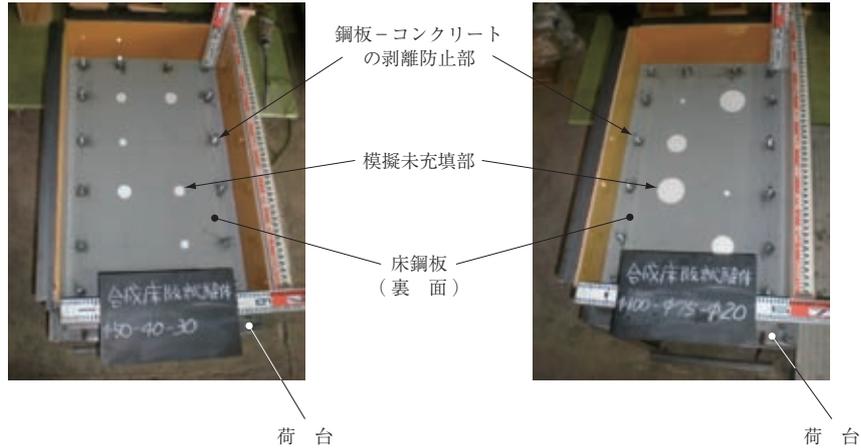
Fig. 3 Propagation of ultrasound in thin steel-concrete composite structures

上させることを考える。しかし、前述のように高周波数の超音波はコンクリート中へ透過しにくいいため、充填部と未充填部の差が小さい。したがって、今回の超音波試験においては、鋼板から超音波がコンクリート中へ透過するような、低周波数の超音波 (数十～数百 kHz) を使用する必要がある。低周波数の超音波を使用する場合、一探触子垂直法では薄鋼板裏面エコーが不感帯域内となるため、二探触子垂直法を採用することにした。薄板に低周波数の超音波を入射させると、鋼板内で超音波は多重反射、モード変換、干渉を繰り返しながら主にラム波 (板波) として伝搬する。このとき、充填部では音響インピーダンス (音速と密度の積) の違いによって一部の超音波がコンクリート中へ透過するため多重反射やラム波の伝搬が弱まるが、未充填部では鋼-コンクリート界面で全反射するため多くの反射エコーが観測される<sup>(6)</sup>。この差異によって、鋼-コンクリート界面のコンクリート未充填を検出することが可能になる。

#### 2.2.2 実証試験

本原理の実証に当たり、合成床版を模擬した試験体を製作した。打設前の試験体の概略を第4図に示す。鋼板は厚さ 8 mm、塗装仕様はコンクリート接触面を無機ジンクリッチプライマー、探傷面を C-5 (重防食塗装) とした。未充填部は大きさの異なる発泡スチロール (厚さ 5 mm) を用いて模擬し、硬化後の界面の剥離を防止するため、M8 頭付ボルトを用いて鋼板とコンクリートを一体化させた。模擬未充填部の導入位置を第5図に示す。コンクリートは呼び強度が 30、スランプが 10 cm、最大骨材径が 20 mm、セメントは普通ポルトランドセメントを用い、版厚 208 mm になるよう打設し、コンクリート硬化後に試験を実施した。また、超音波探傷試験に用いた探傷器および探触子を第6図に示す。超音波探触子には周波数 250 kHz、振動子直径 38 mm の縦波垂直探触子を用いた。

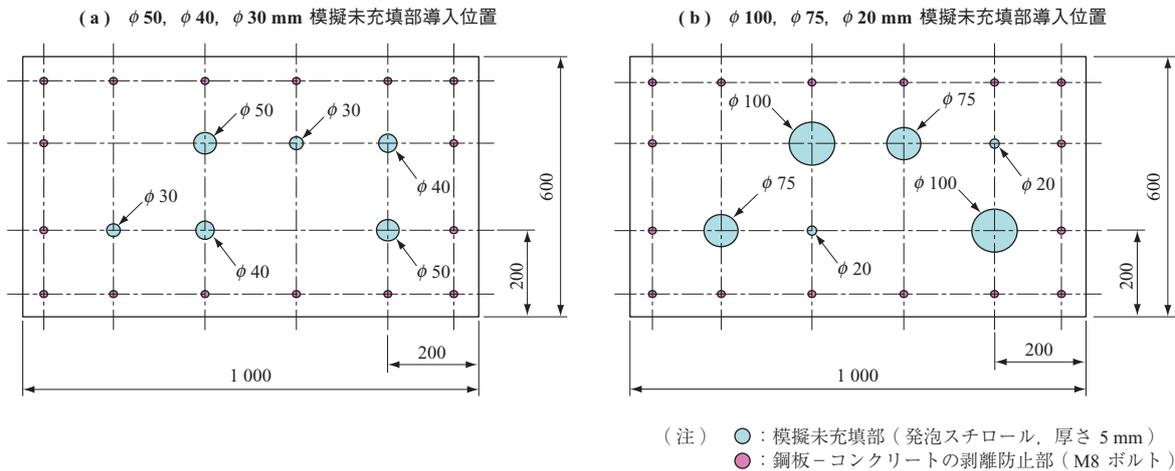
(a)  $\phi 50, \phi 40, \phi 30$  mm 模擬未充填部導入試験体  
 (b)  $\phi 100, \phi 75, \phi 20$  mm 模擬未充填部導入試験体



- (注) 1. 底鋼板厚さ : 8 mm  
 2. コンクリート接触面 : 無機ジンクリッチプライマー  
 3. 探傷面 : C-5 (重防食塗装)  
 4. 合成床版 : 鋼板+コンクリート

第 4 図 合成床版模擬試験体 (打設前)

Fig. 4 Specimens representing steel-concrete composite slabs (before concrete casting)



- (注) ● : 模擬未充填部 (発泡スチロール, 厚さ 5 mm)  
 ● : 鋼板-コンクリートの剥離防止部 (M8 ボルト)

第 5 図 試験体における模擬未充填部の導入位置 (単位 : mm)

Fig. 5 Configuration of artificial unfilled parts in specimens (unit : mm)



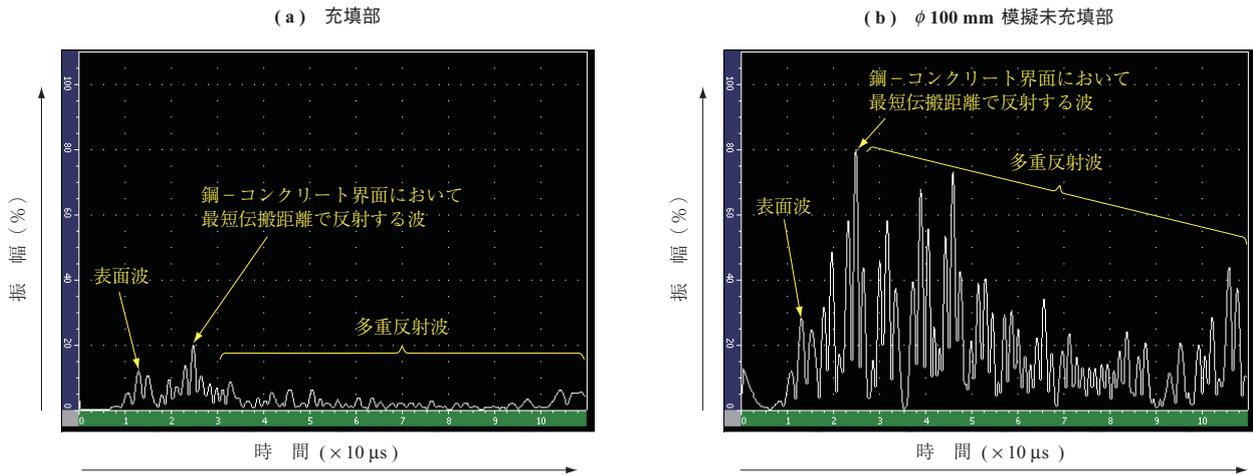
第 6 図 超音波探傷器および探触子  
 Fig. 6 Ultrasonic instrument and probes

超音波波形の例を第 7 図に、試験結果を第 8 図にそれぞれ示す。観測波形においてラム波の音速と探触子中心間距離によって求められるエコーに着目すると、未充填部の

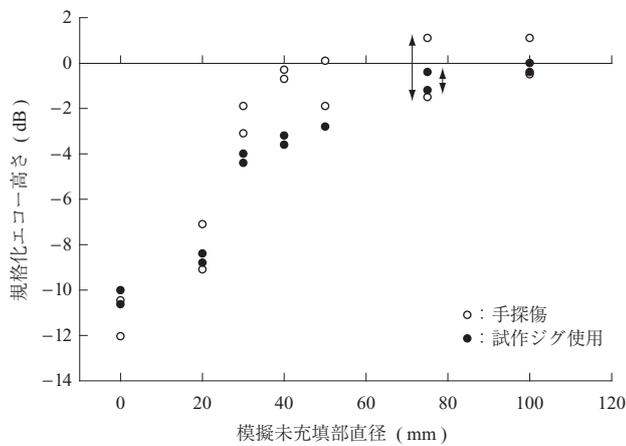
大きさとエコー高さとに相関があり、定量評価が可能になることを確認した。ただし、その変化は超音波探触子の周波数や振動子径に依存する。本試験条件においては、未充填部の大きさが  $\phi 75$  mm 相当以上では超音波ビームの面積よりも未充填部の面積が大きくなるため、エコー高さがほぼ一定となるが、それ未満の場合は、エコー高さから未充填部の大きさを識別することが可能である。

### 2.2.3 探傷補助ジグの製作

実橋梁では検査路などから上向き姿勢で底鋼板に超音波探触子を接触させて探傷を行うことになる。上向き姿勢での探傷は不安定になりやすいため、下向き姿勢での探傷に比べて測定の実験再現性が劣る傾向にあり、また、長時間の探



第 7 図 超音波波形の例  
Fig. 7 Example of ultrasound waveforms



第 8 図 合成床版模擬試験体におけるエコー高さと模擬未充填部との相関  
Fig. 8 Correlation between echo heights and artificial flaws in the specimens representing steel-concrete composite slabs



第 9 図 超音波探傷補助ジグ  
Fig. 9 Ultrasonic testing aid

傷は作業者の大きな負担になる。そこで第 9 図に示す探傷補助ジグを試作した。手探傷の測定結果を第 8 図の○印、試作ジグを使用した結果を第 8 図の●印でそれぞれ示す。試作ジグを使用することによって、探傷時の探触子の接触状態が安定するため、測定の実現性を向上させた。

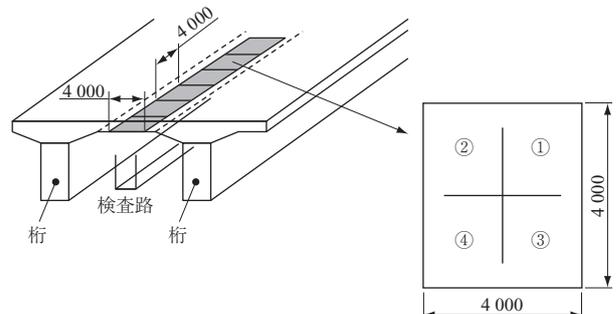
#### 2.2.4 実橋梁における検査の実施

通常の超音波探傷試験では、JIS などに規定されている標準試験片や対比試験片を用いて試験時の装置ゲインを定め、きずの検出性が技術者や測定日時などによらず同等であることを保証する。

合成床版の検査における対比試験片には、実橋梁の合成床版と同板厚・材質・同塗装仕様の鋼板を感度校正用試験片として用いることにした。感度校正用試験片によって得られる反射波の強度は、超音波ビームの広がりよりも十分に大きな未充填部を検出した場合に相当する。この強度

が探傷装置の表示器上で 80% になる感度を基準感度とし、各検査箇所について探傷を行うことにした。

実橋梁における検査箇所の概略を第 10 図に、検査の様子を第 11 図にそれぞれ示す。いずれの検査箇所においても、鋼-コンクリート界面からの反射波の強度は合否判定レベル -4 dB 以下であり、コンクリートが十分に充填さ



第 10 図 実橋梁における検査箇所の概略 (単位: mm)  
Fig. 10 Inspection area in the actual bridge (unit: mm)



第 11 図 実橋梁における検査の様子

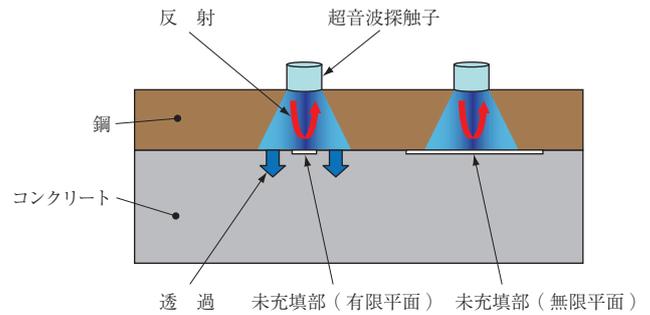
Fig. 11 Inspection under actual conditions from the bottom steel plate

れていることを確認した。

### 2.3 剛結部を対象とした検査・評価技術の検討

#### 2.3.1 開発技術の原理

剛結部に使用される鋼板の厚さは必要とされる強度によって異なるが、30～75 mm 程度の厚板を用いることが多い。超音波の伝搬距離が長くなると、検出対象のきず面積よりビーム面積が大きくなる。このような場合にはきずからの反射エコー高さはきずの面積に比例し、第 12 図に示すように伝搬距離を長くするほどきず（有限平面）エ

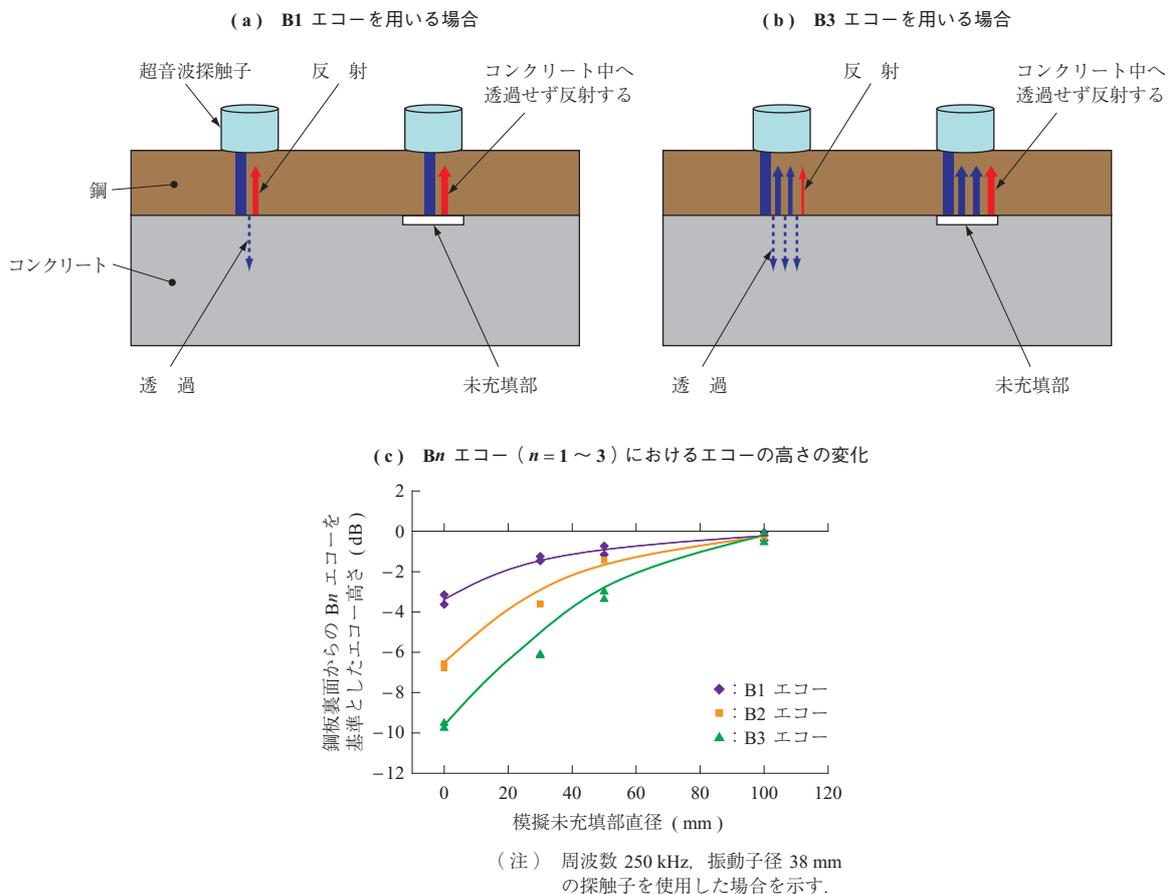


第 12 図 きず面積による超音波の反射への影響

Fig. 12 Difference between ultrasound reflections depending on flaw sizes

コーと裏面エコー（無限平面）との差が大きくなる。

充填部の鋼-コンクリート界面では音響インピーダンスの差から約 3 割の超音波がコンクリート中へ透過し、残りの約 7 割は反射する。第 13 図に、鋼-コンクリート界面における反射回数による超音波エコー高さへの影響を示す。反射する超音波のエコー高さは、界面での反射を繰り返すごとにその 3 割が透過するため徐々に弱くなる。したがって、鋼-コンクリート界面で数回反射した後の超音波エコーに着目することで、厚板を介する場合においてもコンクリートの充填状況を把握し得ることが期待できる。



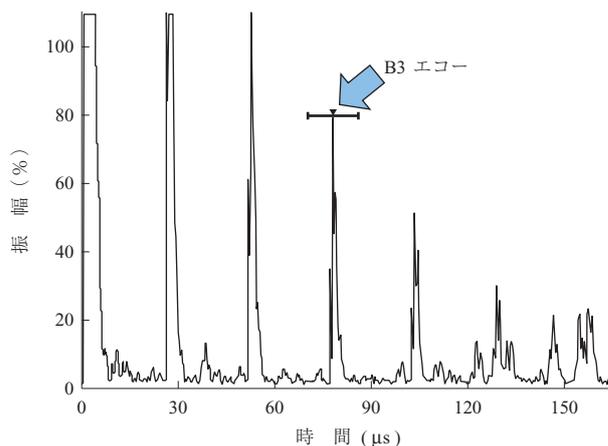
第 13 図 鋼-コンクリート界面における反射回数による超音波エコー高さへの影響

Fig. 13 Ultrasound echo height at the boundary between the steel plate and concrete affected by reflection times

### 2.3.2 実証試験

本原理の実証に当たり、剛結部を模擬した試験体を製作した。試験体の概略を第14図に示す。厚さ75mmの鋼板フランジを設け、高流動コンクリート（圧縮強度36MPa）と高流動モルタル圧入の二段打設を行った。打設方向は実構造物を考慮し鋼板を上置きにした場合と、鋼板フランジ下面に過度に気泡が溜まるのを防ぐため鋼板を下置きにした場合の2通りとし、いずれもコンクリート硬化後に試験を実施した。超音波探傷試験には第6図に示すものと同じ超音波探傷器を用い周波数500kHz、振動子直径25.4mmの超音波探触子を用いた。

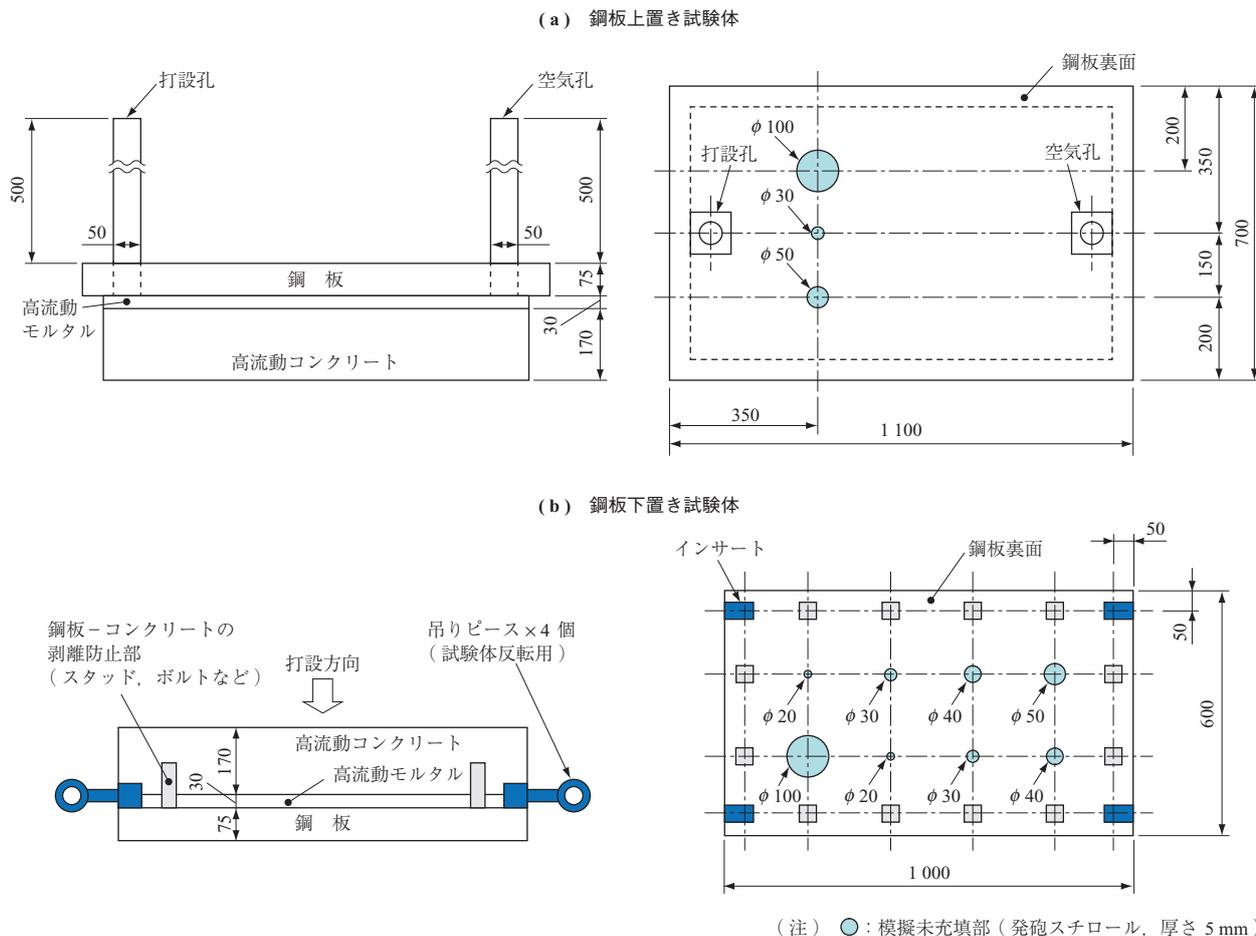
超音波波形の例を第15図に、試験結果を第16図にそれぞれ示す。装置ゲインを高くすると電気ノイズの影響が懸念されるため、鋼-コンクリート界面で3回反射した後の超音波エコー（B3エコー）で評価した。模擬未充填部の大きさとB3エコーのエコー高さとに相関があり、その程度は円形平面きずからのエコー高さと超音波の伝搬距離との関係を示すDGS（Distance-Gain-Size：距離-増幅-大きさ）線図を用いたモデル化<sup>(7)</sup>において、高流動モル



第15図 超音波波形の例  
Fig. 15 Example of ultrasound waveform

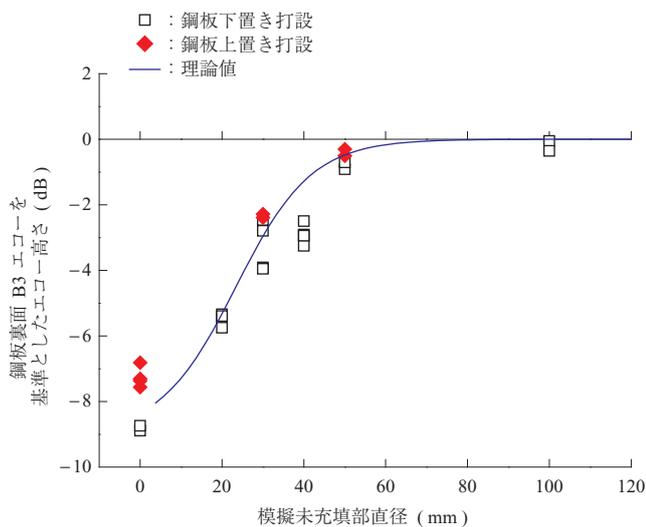
タル中の細骨材からの散乱<sup>(8)</sup>を考慮して得られた理論値と比較し、妥当であることを確認した。また、鋼板上置き打設の場合には鋼板裏面にコンクリート中の気泡が上昇して溜まるため、健全部、模擬未充填部ともに鋼板下置き打設の場合よりもエコー高さはやや高くなる傾向がみられた。

今後は各々の板厚や検出すべき未充填部の大きさに対す



第14図 RC橋脚と鋼桁の剛結部を模擬した試験体（単位：mm）

Fig. 14 Specimens representing rigid connections between a reinforced concrete pier and a steel beam (unit : mm)



(注) 理論値の計算には以下の値を用いた。  
 ・細骨材 : 密度 2.6 g/cm<sup>3</sup>, 弾性率 60 kN/mm<sup>2</sup>, 直径 1.2 mm, 混合率 0.43  
 ・セメントペースト : 密度 2.0 g/cm<sup>3</sup>, 弾性率 22.5 kN/mm<sup>2</sup>

第 16 図 RC 橋脚と鋼桁の剛結部の模擬試験体におけるエコー高さと模擬未充填部との相関  
 Fig. 16 Correlation between echo heights and artificial flaws in the specimens representing rigid connections between the RC pier and the steel beam

る探傷条件の最適化について検討を行っていく。

### 3. 結 言

本稿では、超音波による鋼-コンクリート複合構造物におけるコンクリート未充填部の検査・評価手法について技術概要および実橋梁への適用例を報告した。

- (1) 合成床版の検査・評価技術の開発
  - ・低周波数の縦波超音波を用いることで薄板-コンクリート界面のコンクリート未充填を検出する手法を開発した。
  - ・実証試験の条件においては  $\phi 75$  mm 以下の未充填部の大きさを識別可能であることを確認した。
  - ・探傷補助ジグの試作によって、測定の実現性を向上させた。
  - ・実橋梁で検査を実施し、コンクリートが十分に充填されていることを確認した。
- (2) 剛結部の検査・評価技術の開発
  - ・鋼-コンクリート界面の B3 エコーに着目することで厚板-コンクリート界面のコンクリート未充填を検出する手法を開発した。
  - ・骨材からの散乱を考慮した DGS 線図によるモデルを用いて求めた理論値と比較し、試験結果が妥当であることを確認した。

今後の課題として、材齢など実際のコンクリートの硬化性状を考慮した定量評価の高精度化が挙げられる。また、本技術はコンクリート充填施工時の充填度確認検査としての用途に限らず、供用後の鋼-コンクリート界面における剥離や空洞への滞水有無など、維持管理のための検査手法としても適用可能である。橋梁をはじめとしてさらなる本技術の適用範囲の拡大および適用実績を蓄積していく。

### 参 考 文 献

- (1) 鈴木 統, 渡邊裕一, 福井敦史, 宇野名右衛門, 小川潤一郎: チャンネルビーム合成床版の実用化に関する研究 石川島播磨技報 第 44 巻 第 2 号 2004 年 3 月 pp. 170 - 177
- (2) 迎邦 博, 藤田 学: 板たたき法によるコンクリート打設欠陥部探索方法の基礎的研究 住友建設技術研究所技報 18 号 1991 年 10 月 pp. 15 - 19
- (3) 戸田勝哉, 畠中宏明, 林 芳隆, 河野 豊, 池谷真也: 非破壊検査を中心としたコンクリートの劣化診断技術 石川島播磨技報 第 44 巻 第 2 号 2004 年 3 月 pp. 164 - 169
- (4) 中西保正, 柳原有紗, 山口雄一: やさしい橋の溶接技術 第 9 回 溶接から見た非破壊検査 橋梁と基礎 第 44 巻 第 11 号 2010 年 11 月 pp. 34 - 40
- (5) H. Hatanaka, Y. Kawano, N. Ido, M. Hato and M. Tagami: Ultrasonic testing with advanced signal processing for concrete structures Nondestructive Testing and Evaluation Vol. 20 No. 2 (2005. 6) pp. 115 - 124
- (6) 柳原有紗, 畠中宏明, 田上 稔, 戸田勝哉, 中村善彦: 超音波による鋼・コンクリート合成床版のコンクリート未充填検出技術の開発と実機への適用検討 土木学会第 7 回道路橋床版シンポジウム論文報告集 2012 年 6 月 pp. 155 - 160
- (7) 永井祐気, 柳原有紗, 畠中宏明, 戸田勝哉, 中村善彦: 超音波による厚鋼板-コンクリート複合構造物の非破壊検査技術の検討 シンポジウムコンクリート構造物の非破壊検査論文集 Vol. 4 2012 年 8 月 pp. 115 - 120
- (8) 日本学術振興会製鋼第 19 委員会: 超音波探傷法 (改訂新版) 1974 年 pp. 76 - 79