

論 文

広帯域超音波法を用いた新たなグラウト充填評価方法

[概要]

本研究はポストテンション方式 PC 部材のグラウト充填状態を評価する広帯域超音波法（WUT）に着目したものである。これまでの WUT では、反射波のピーク周波数を基に閾値評価しているが、グラウト充填判定が困難な場合もあり、精度向上できる新評価手法が求められていた。そこで本研究では、WUT の弾性波伝播特性を調べる基礎実験を行った。この基礎実験により、弾性波は直進的に伝播する指向性を有すること、探触子間を伝播する表面波の影響は小さいことが分かった。これらの伝播特性を考慮し WUT 探触子間隔から得られる反射波を分析したところ、充填・未充填シースから反射される弾性波（電圧値）が大きく異なることが分かった。そこで本研究では、PC 部材のシース上と基準断面から求めた平均電圧値の差分からグラウト充填状態を推定する方法を考案した。実大 PC 桁においてグラウト充填調査を行い、提案する評価法の妥当性を確認した。

著者所属 氏名

山口大学 大学院創成科学研究科
(株) エッチアンドビーシステム
(株) 日本ピーエス
(株) 日本ピーエス

吉 武 勇
木 下 尚 宜
迫 美 乃
福 島 邦 治

※本論文は学術論文であり、厳正な査読審査を経て掲載しております。

会誌「プレストレストコンクリート」への論文の投稿募集について

プレストレストコンクリート工学会 会誌編集委員会では、本会誌に掲載する論文を随時募集しています。投稿いただいた論文は、論文審査小委員会において審査、判定を行い、本会誌に掲載します。プレストレストコンクリートに関する独創性のある研究・技術成果を本会誌に掲載することで、プレストレストコンクリート工学と技術の発展に資することを目的としています。奮っての投稿をお願いします。

1. 投稿要項

- 1.1 論文は、プレストレストコンクリートおよびコンクリート構造に関する理論、実験、設計、計画などの独創的な研究、あるいは創意工夫に富んだ設計・施工の研究および技術成果を取りまとめたものであり、学術的かつ技術的に価値のあるものにかぎります。著者は、本会会員、非会員を問いません。
- 1.2 論文は、原則として未発表のものにかぎります。ただし、すでに発表した内容を含む場合であっても新たな知見が加味され再構成された論文は受け付けます。

2. 論文の審査

- 2.1 本工学会では「レフェリー制」を採っております。投稿論文の内容に応じ、査読者として外部の専門家3名を選び、その査読結果に基づいて、工学会論文審査小委員会が本誌に掲載する論文としてふさわしいかを判定し、著者に通知します。論文の評価は、「信頼性」、「有用性」、「新規性」、「完成度」の観点から行います。
- 2.2 論文審査小委員会は、査読に伴って見出された疑義や不明な事項について修正を求めることがあります。
- 2.3 修正論文が3カ月以内に提出されない場合、審査を打ち切る場合があります。
- 2.4 修正を行った論文に対し、再査読を行い、掲載可の判定が出た論文から、順次、会誌に掲載します。

3. 論文の投稿方法

論文は随時投稿を受け付けています。論文を投稿する際は、投稿論文のほかに、投稿申込用紙に必要事項をホームページからダウンロードして記入し、論文審査小委員会宛に以下の電子メールアドレスへ申込みください。

論文投稿メールアドレス：ronbun@jpci.or.jp

会誌編集委員会 論文審査小委員会

広帯域超音波法を用いた 新たなグラウト充填評価方法

吉武 勇*¹・木下 尚宜*²・迫 美乃*³・福島 邦治*⁴

The study focuses on the wide-range ultrasonic testing (WUT) which is often used for assessing grout-filling condition of duct embedded in post-tensioned prestressed concrete (PC) members. In the conventional WUT inspection, the grouting condition is determined by analyzing the peak frequency of elastic-waves reflected from the duct. It is occasionally hard at actual inspection to evaluate the grouting condition by the thresholding of the peak frequency. An additional evaluation method should be found to improve the accuracy of the WUT inspection based on the frequency analysis. Some fundamental tests were conducted to examine the propagation characteristics of elastic waves in the WUT system. The test results revealed that the elastic waves transmitted from the WUT sender have directivity propagation in the concrete and the influence of surface wave is negligible. Considering the characteristics, the study analyzed the reflected waves in the test of the minimum spacing of probes. It was found that the averaged voltage in reflection time was significantly different in filled / unfilled duct. The authors proposed a novel method evaluating the duct condition by comparing the averaged voltage. Experiments using actual PC girders confirmed the feasibility of the proposed evaluation method.

キーワード：Nondestructive testing, Grouting, Ultrasound, Reflected elastic-wave, Directivity

1. はじめに

ポストテンション方式プレストレストコンクリート（ポステン PC）橋梁の健全度において、グラウトの充填不良は重大な欠陥のひとつである¹⁾。PC 部材内に配置したシース内のグラウト充填状況を調べるためには、非破壊検査（NDT）技術の活用が不可欠であり、これまでに様々な NDT が開発され、実用化されている^{2~9)}。このなかでも、著者らの研究グループでは、比較的深いシースかぶり厚を有する PC 部材にも適用可能な広帯域超音波法（Wide-range Ultrasonic Testing：WUT）に着目し^{6, 10, 11)}、この WUT を用いたグラウト充填調査の精度向上を試みてきた^{12, 13)}。

この WUT による PC グラウト充填調査（WUT 調査）では、超音波帯域の弾性波を PC 部材に入射し、シースからの反射波を分析する反射法を用いている¹⁴⁾。具体的には、シース内に空隙（グラウト充填不良箇所）が含まれる場合、その反射波には比較的高い周波数成分を示す性質があることから、グラウト充填不良の有無を評価するものである。ここでグラウト充填・充填不良を判定するにあたり、まず受信子に計測された弾性波の時間応答を高速フーリエ変換（Fast Fourier Transform：FFT）することで周波数成分に変換する。そのなかで最も卓越した周波数成分（ピーク周波数）に着目し、ある閾値に対する大小関係で評価している。ここで閾値とする周波数が重要となるが、その閾値設定は PC 部材の諸条件によっても異なるものであり、必ずしも普遍的な閾値が確立しているものではない。そのためこれ

までに蓄積した多数の WUT 調査実績を基に、計測されたピーク周波数について技術者による工学的判断が行われてきた。WUT 調査を行った既往の研究⁶⁾によると、反射波の中に複数のピーク周波数が観測されたこと等により、充填・充填不良の判定ができなかった事例が 150 箇所（全 330 箇所中）に及んだことが報告されている。

WUT 調査による PC グラウト充填評価の信頼性向上を図るには、このような判定困難な場合に付加計測して対応できる新たな評価手法が求められる。そのためにも、反射波のピーク周波数のみに着目した閾値評価法によらない、WUT の超音波帯域の弾性波の伝播特性を考慮した評価方法の確立が不可欠と考えられる。

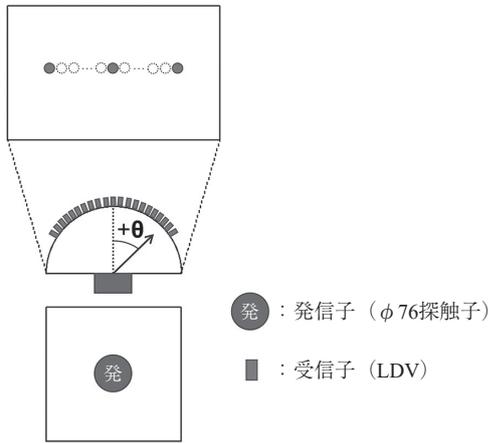
そこで本研究では、まず WUT の発信子から入射される弾性波のコンクリート中における伝播特性を調べるため、理想化した試験材料を準備して室内実験を行った。さらに同伝播特性を踏まえて、新たな評価手法を考案し、グラウト充填前後のポステン PC 橋の建設現場において、提案手法による WUT のグラウト充填評価を行った。これらの基礎的実験を踏まえ、人為的にグラウト充填不良箇所を設けた PC 桁において、提案手法の適用性について検証実験を行った。本研究は、WUT 調査による PC グラウト充填評価の精度向上を主目的とするものであり、反射波のピーク周波数の閾値評価法のみでは困難であった従来技術によるグラウト充填判定を補完できる新たな評価手法を提案するとともに、その妥当性・適用性について各種実験を通じて検証するものである。

*¹ Isamu YOSHITAKE：山口大学 大学院創成科学研究科 教授

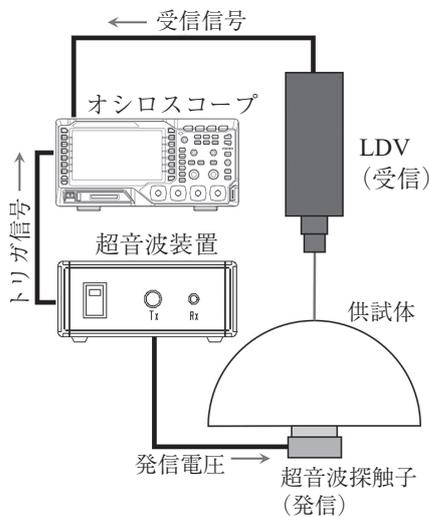
*² Takanori KINOSHITA：(株) エッチアンドピースシステム 技術グループ

*³ Yoshino SAKO：(株) 日本ピーエス 人財開発グループ

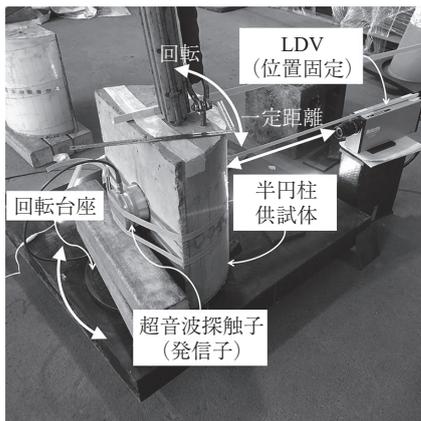
*⁴ Kuniharu FUKUSHIMA：(株) 日本ピーエス 九州支店 技術グループ



(a) 半円柱状のモルタル供試体の概要



(b) LDVを用いた計測システム



(c) 計測状況

図 - 1 半円柱試験体による弾性波の指向性の検証実験

2. WUT の特性に関する基礎実験

2.1 WUT における弾性波の指向性

WUT 調査では、発信子・受信子ともに $\phi 76 \text{ mm}$ と比較

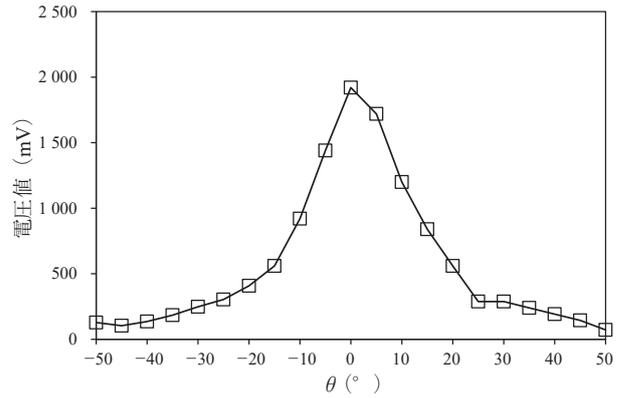


図 - 2 受信波の最大電圧値

的大径の探触子を用いる。適切に弾性波を送受信できるようにコンクリート表面に接触する面には、ケイ酸ナトリウム（水ガラス）を主成分とする接触媒質を塗布する¹²⁾。これまでの WUT 調査では、発信子から入射される弾性波およびシースからの反射波は、コンクリート中を同心円状に伝播すると考えられてきた。そのため、コンクリート表面上のシース配置線に沿って、シースかぶり厚さの2倍長の間隔で探触子（発信子・受信子）を配置すること、すなわち弾性波が探触子面から 45° 方向に伝播することで、最も顕著なピーク周波数が得られるものと考えられてきた¹³⁾。

この WUT 探触子を用いた弾性波の伝播特性を検証するため、著者らの研究グループでは、直角二等辺三角柱状のコンクリート試験体を用いて、伝播する弾性波の強さを調べた¹⁵⁾。なお WUT 調査において、受信子に伝播される弾性波は電圧値に変換されて記録媒体に収録されることに注意されたい。この三角柱を用いた基礎実験については既報¹⁵⁾で詳述しているため、主要な要点を以下にまとめて示す。

三角柱の斜辺中央に発信子を固定し、受信子を同短辺上で 50 mm ずつ移動させながら伝播する弾性波（電圧値）を計測した。その結果、最短距離となる 45° 方向の計測点で最大電圧値を示さず、指向角 $18 \sim 27^\circ$ となる計測点において最大電圧値を示した。一般に伝播距離に応じて弾性波は減衰するものであるが、この結果は WUT の発信子から入射される弾性波は、直進性をもって伝播する指向性が高いことを示唆したものである。

2.2 半円柱試験体を用いた弾性波の指向性の検証

三角柱の実験で得られた WUT 弾性波の直進的な伝播特性を確認・検証するため、新たに半径 $200 \text{ mm} \times$ 高さ 400 mm の半円柱試験体を準備した。この検証実験では、粗骨材による弾性波減衰の影響を低減するため、プレミックス材による水セメント比 (W/C) 36.0% のモルタルを使用した。直角二等辺三角柱状のコンクリート試験体では、発信子～受信子間の伝播距離を一定にできなかったが、図 - 1 (a) に示すように半円柱の平側面中央に WUT の発信子を固定し、半円側面の各点で弾性波を計測することで、一定の伝播距離 (200 mm) における弾性波の指向性を確認することができる。なお WUT 調査に用いる大径 ($\phi 76 \text{ mm}$)



(a) 探触子の配置 (切込み前後)

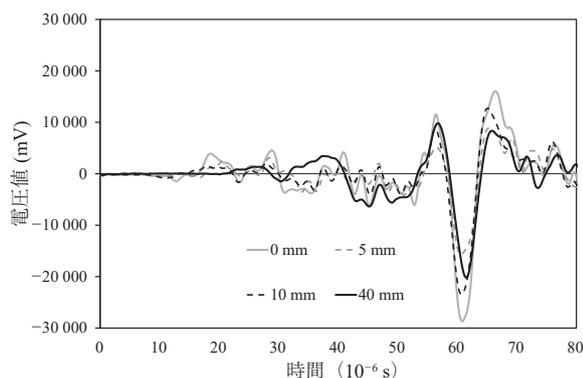
(b) 時系列波 ($d=0, 5, 10, 40$ mm)

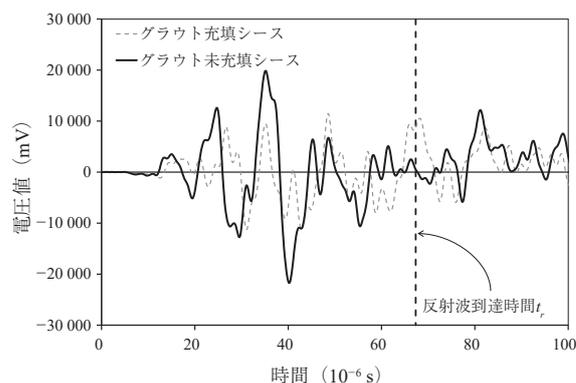
図 - 3 表面波の影響調査

の受信子を曲面となる半円側面に直接配置することはできないことから、図 - 1 (b) に示すレーザードップラー振動計 (Laser Doppler Velocimeter : LDV) を受信子の代替として用いた。

本研究では、指向角 5° 間隔で半円柱試験体を回転させながら、周波数帯域 $0.1 \sim 300$ kHz の LDV を照射し、指向角 $-50^\circ \sim +50^\circ$ の範囲に伝播する弾性波を観測した。この計測では、データ数を 1200 点、サンプリング周波数を 10 MHz、平均化回数 1024 回とするオシロスコープを用い、超音波発生装置からの発信電圧印加時にトリガ信号を取り出すことで発信波と同期させた。なお図 - 1 (c) に示すように、半円柱側面に対して LDV の照射が垂直かつ一定距離となるように、半円柱供試体を回転台座上に設置し、 5° ずつ回転させながら測定した。

受信波の最大電圧値を図 - 2 に示す。指向角 0° で電圧値が約 1.9 V (1920 mV) と最大値を示し、指向角が増減するにつれて急峻な勾配で電圧値が低下した。この観測結果は、WUT の発信子から入射される弾性波が、直進的に強く伝播する指向性を有することを裏付けるものである。

これまでの WUT 調査では、シースから反射される弾性波の時刻的応答 (時系列波) について FFT 解析を行い、そのピーク周波数の大小でグラウト充填評価を行ってきた。このとき、探触子の最適間隔はシースかぶりの 2 倍長とされてきたが、これは同心円状に弾性波が伝播する仮定に基づくものである。上記の基礎的実験により、WUT の弾性波は指向性をもって伝播することが明らかになったことから、シース線上に沿って WUT 探触子をできるだけ近接させて計測することで、従来より大きな弾性波応答 (時

図 - 4 時系列波の例 (探触子間隔 $a = 97$ mm)

系列波) が得られるものと考えられる。このような顕著な時系列波を分析することで、従来の WUT 調査では判別困難であったグラウト充填評価の一助になるものと期待できる。

2.3 探触子間を伝播する表面波の影響

WUT の発信子・受信子を最小中心間隔 97 mm (= 探触子の外径に相当) で配置する場合、シースからの反射波に加えて、探触子間のコンクリート表面を伝播する表面波 (Rayleigh 波) の影響を予め把握しておく必要がある。そこで、グラウト充填した $\phi 65$ mm の鋼製シースをかぶり厚 117.5 mm 位置に埋設したコンクリート版 (幅 850 mm \times 奥行 350 mm \times 厚さ 250 mm) を準備し、探触子間のコンクリート表面に切込みを入れながら、時系列波の計測を行った。ここで用いたコンクリートは、PC 部材にしばしば採用する $W/C = 36.0\%$ の配合 (50-15-20H) のものである。また表面波の影響を低減するため、既往の研究¹⁶⁾ を参考に切込み深さ d の最大値を 40 mm とした。

コンクリート表面の切込み (幅 5 mm) を設ける前後の WUT 探触子の配置状況を図 - 3 (a) に示す。また、切込み深さ $d = 0 \sim 40$ mm において計測された時系列波を図 - 3 (b) に示す。この結果に示すように、 50×10^{-6} sec 以内の電圧値は、シースからの反射波による電圧値 ($50 \sim 70 \times 10^{-6}$ sec) に比べて小さい。特に最初に到達する表面波応答と推定される 10×10^{-6} sec 以内で観測された最大電圧値 (絶対値) V_{max} は、切込み深さ $d = 0, 40$ mm において 462 mV ($d = 0$ mm), 45 mV ($d = 40$ mm) であった。これらの差分 $\Delta V_{max} = 417$ mV が表面波の最大値に相当するものと考えられるが、シース相当位置から得られる反射波の最大電圧値 28690 mV ($d = 0$ mm), 20188 mV ($d = 40$ mm) に対して、著しく小さいものであった。この結果より、WUT 探触子 (発信子・受信子) を近接配置して弾性波の計測を行った場合でも、表面波が及ぼす影響は事実上無視できるレベルにあるものと考えられる。

3. 新たなグラウト充填評価方法の提案

3.1 時系列データにおける平均電圧値の算定

従来の WUT 調査^{6, 10-13)} では、時系列波について FFT 解析を行い、その中で最も卓越した周波数帯域のスペクトル強度で除した「正規化スペクトル強度」が評価に用いられてきた。この方法では、シース内の空洞 (充填不良箇所)

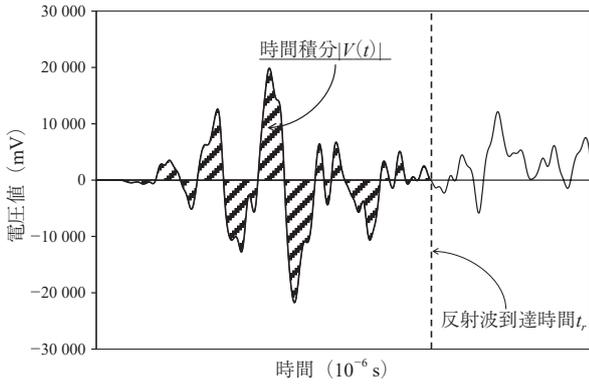


図 - 5 電圧値 V の時間積分例

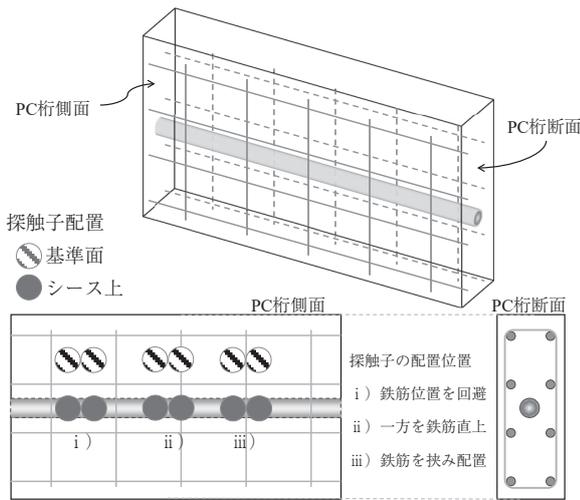


図 - 6 探触子を近接配置した計測方法

から大きく反射される弾性波の影響を必ずしも充分に反映できない。前章の基礎的実験より、WUTの超音波帯域にある弾性波は、①直進的に強く伝播する指向性を有する、②近接した探触子間を伝播する表面波の影響は小さい、といった特性を有していることが判明した。この特性をグラウト充填調査に活用するためには、発信子と受信子を近接配置することで、直進的な指向性をもって強く伝播する弾性波（電圧値）を計測・分析することが望ましいものと思われる。従来の「正規化スペクトル強度」のピーク周波数に対して閾値評価する方法に加え、伝播する弾性波の大きさも評価に取り入れることで、充填・充填不良を適切に推定できる可能性がある。

シースからの反射波を分析するにあたり、発信子から伝達される弾性波がPC桁部材内で反射して受信子に計測されるまでの過程において、PC桁の端面からの反射波を含まず、且つ確実にシースからの反射波を捉えることが望ましい。そこで本研究では、時系列波のうちPC部材表面からシース直径分の位置まで伝わる反射波の到達時間 t_r までに計測される電圧値の変化に着目して分析を行った。なお反射波到達時間 t_r は式(1)により求められる。

$$t_r = (2\sqrt{(a/2)^2 + (c_d + \varphi)^2}) / v \quad (1)$$

表 - 1 PC 橋現場実験の諸元

	A 橋	B 橋
橋梁形式	PC コンポ橋	単純ホロー桁橋
桁長	30.15 + 30.3 + 31.65 m	39.666 m
シース	鋼製	ポリエチレン製
外径 φ (内径 φ_i)	77 (70) mm	74 (65) mm
シース純かぶり c_d	75 mm	67.5 mm
コンクリート		
28 日圧縮強度	70.0 MPa	63.9 MPa
グラウト強度	51.0 MPa	43.3 MPa
弾性波伝播速度 v	4 780 m/sec	4 773 m/sec
計測周波数 (間隔)	10 MHz (10^{-7} s)	10 MHz (10^{-7} s)
探触子間隔 a	97, 150, 200, 500 mm	97 mm



図 - 7 A 橋における WUT 調査状況

ここに a : 探触子間隔 (中心間距離)

c_d : シースの純かぶり

φ : シースの直径

v : コンクリートの弾性波伝播速度

後述する A 橋の PC 桁において、発信子・受信子の探触子間隔 $a = 97$ mm と近接配置して計測した時系列波の一例を図 - 4 に示す。この結果に示すように、充填シースに比べて未充填シースを埋設したコンクリート部材における時系列波の電圧値の変化が著しいことが分かる。そこで本研究では、この時系列波の電圧値（絶対値） V をグラウト充填評価に活用するため、図 - 5 に示すように時系列波のうち反射波到達時間 t_r までの電圧値（絶対値） V を時間積分し、これを t_r で除した平均電圧値 V_{av} を評価に用いる方法を考えた。本研究における平均電圧値 V_{av} を式(2)に示す。この評価方法は、時系列波を FFT 解析して求めるピーク周波数とは異なった評価指標としてグラウト充填判定に活用できるものである。

$$V_{av} = \frac{1}{t_r} \cdot \int_0^{t_r} |V(t)| dt \quad (2)$$

ここに $V(t)$ は電圧値の時間変化を示す。

3.2 平均電圧値の差分によるグラウト充填評価法

時系列波（電圧値）の大きさ V は、シースかぶり厚さ・径の相違による弾性波の伝播経路長だけでなく、PC 部材

に埋設されたスターラップなどのせん断補強鉄筋，コンクリートの剛性・骨材種類など様々な因子によって変化するものである。そのため，式(2)で求まる平均電圧値 V_{av} の大きさは，これらの諸条件によっても異なることから，この平均電圧値 V_{av} の数値のみでグラウト充填評価を行うことは不適当なものと考えられる。

ここで PC 桁に配置したシース線に直交する線上（コンクリート表面）において，シース高さから充分離れた位置に探触子を近接配置して WUT 調査を行うと，シース反射波を含まない時系列波の応答が得られる。この時系列波には，コンクリートやスターラップ等の反射波が含まれるものであるが，その大きさはシース線上で同様に計測した反射波のうち，シース反射波を除いたものと概ね同等と仮定できる。そこで次の (I) ~ (IV) に示す方法でグラウト充填評価を試みた。

- (I) 図 - 6 に示すように対象とするシース線上において探触子を近接配置して時系列波を計測し，式(2)の平均電圧値 V_{av} を定める。
- (II) (I) の探触子を上方または下方に平行移動し，シース反射波の影響がない高さ（基準面）において，同様の計測を行い基準面の平均電圧値 V_{av0} を定める。ここでスターラップなどの鉄筋配置の影響を考慮し，図 - 6 に示すようにシース線上と同等の条件で計測する。
- (III) シース上と基準面における平均電圧値の差分 $V_{av} - V_{av0}$ （以下， ΔV_{av} ）を求める。これによりシース反射波以外の成分の影響を低減する。
- (IV) シース線に沿って一定の距離間隔で水平移動しながら (I) → (II) → (III) を繰返し，平均電圧値の差分 ΔV_{av} が急増する箇所がみられるとき，グラウト充填不良の可能性を疑う。

3.3 新グラウト充填評価法の現場実験

本研究で提案する平均電圧値の差分 ΔV_{av} を用いたグラウト充填評価法の妥当性を確認するため，建設中のポストテンション式 PC 橋の 2 橋（A 橋・B 橋）において，グラウト充填前およびグラウト硬化後に WUT 調査を行った。A 橋・B 橋の諸元を表 - 1 にまとめて示す。なお，表中の弾性波伝播速度 v は，PC 桁中の鉄筋・シース配置箇所を避けながら両側面に発信子・受信子を正対設置し，弾性波が伝播する時間と部材厚さから求めたものである。

A 橋は 3 径間連結 PC コンポ橋（桁長 30.15 + 30.3 + 31.65 m）であり，鋼製シース（ $\phi 77$ mm）を採用している。WUT 調査を行った断面におけるシースの純かぶり c_d は 75 mm と標準的なものである。また B 橋は単純ホロー桁橋（桁長 39.666 m）であり，ポリエチレン（PE）製シース（ $\phi 74$ mm）を採用している。

(1) A 橋

図 - 7 には A 橋における WUT 調査状況を例示する。予め電磁波レーダを用いて，鉄筋およびシース位置を PC 桁側面に罫書き，シース線上で探触子を近接配置（ $a = 97$ mm）して計測した。なお A 橋においては，既往の研究で推奨されたシース純かぶり c_d の 2 倍にあたる探

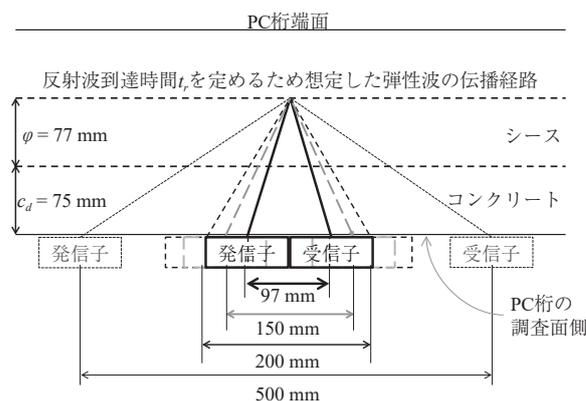


図 - 8 A 橋で実施した WUT 調査 ($a = 97 \sim 500$ mm)

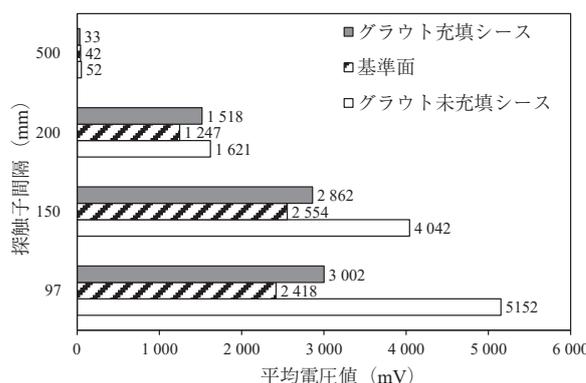


図 - 9 A 橋で計測した平均電圧値 ($a = 97 \sim 500$ mm)

触子間隔 $a = 150$ mm に加え，現在 WUT 調査の実務で採用されている探触子間隔 $a = 200$ mm， 500 mm でも同様に測定し比較を行った。A 橋で実施した探触子間隔 $a = 97 \cdot 150 \cdot 200 \cdot 500$ mm において弾性波の伝播経路の模式図を図 - 8 に示す。この経路長を弾性波伝播速度 v で除した値が反射波到達時間 t_r に相当する。本研究では PC 桁端面からの反射波を含めず，且つシース内の充填不良箇所からの反射波をできるだけ確実に捉えるため，図 - 8 に示したようにシース背面相当位置からの反射波到達時間 t_r までを解析対象とした（式(1)参照）。この反射波到達時間 t_r を式(2)に適用することで平均電圧値 V_{av} を求めた。すなわち $0 \sim t_r$ の時間範囲にはシース前面からの反射波等も含まれることから，充填不良箇所がある場合，比較的大きい平均電圧値 V_{av} を示すものと推察される。

先述の (I)・(II) の方法で求めたグラウト充填前（未充填）・基準面・グラウト硬化後（グラウト充填）における平均電圧値 V_{av} を図 - 9 に示す。A 橋では注入したグラウト量を調べながら，充填センサーを用いてシース内にグラウトが十分に充填されたことを確認している。WUT の弾性波は指向性を示して伝播するため，探触子間隔 a を抜げるほど，受信子に計測される電圧値は小さくなる。それに伴ってシース上と基準面における平均電圧値の差分 ΔV_{av} も小さくなり，グラウト充填評価が困難となる。一方，探触子を近接配置（ $a = 97$ mm）した場合，未充填シース位置における平均電圧値 V_{av} は 5152 mV を示し，基準面の平均電圧値 V_{av0} は 2418 mV に対して，およそ 2 倍の電



図 - 10 B橋における WUT 調査状況

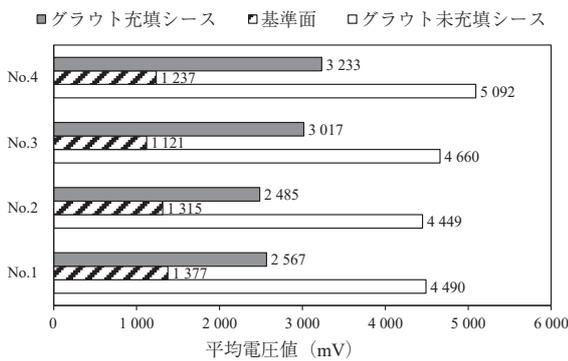


図 - 11 B橋で計測した平均電圧値 ($a = 97 \text{ mm}$)

圧値を示した。同一箇所において、グラウト硬化後に測定したところ、平均電圧値 V_{av} は $3\,002 \text{ mV}$ となり、基準面の平均電圧値 V_{av0} に近づいた。なお、シース上と基準面上の平均電圧値 V_{av} には、鉄筋や骨材分布によって異なる反射波の差異も含まれるが、シースからの反射波の影響が最も大きいものと考えられる。結果的に探触子を近接配置 ($a = 97 \text{ mm}$) した場合、シース上と基準面における平均電圧値の差分 ΔV_{av} は、グラウト未充填時において $2\,734 \text{ mV}$ ($= 5\,152 - 2\,418 \text{ mV}$)、同充填時において 584 mV ($= 3\,002 - 2\,418 \text{ mV}$) となり、明瞭な差異を確認できた。なお A 橋における実験では、計測するシース線位置を変えながら、それぞれ $5 \sim 10$ 回計測を行っているが、探触子を近接配置した時に最も明瞭な差分 ΔV_{av} が得られている。

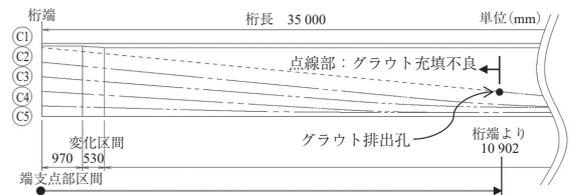
(2) B 橋

これまでの WUT 調査の研究では、鋼製シースを用いた PC 桁を主対象としてきた。近年では腐食防止の観点から PE 製シースを採用する事例が多い。そこで本研究で提案する WUT 調査の適用範囲を調べるため、 $\phi 74 \text{ mm}$ の PE 製シースを用いた B 橋においても、探触子間隔 $a = 97 \text{ mm}$ によるグラウト充填前後の計測を行った。

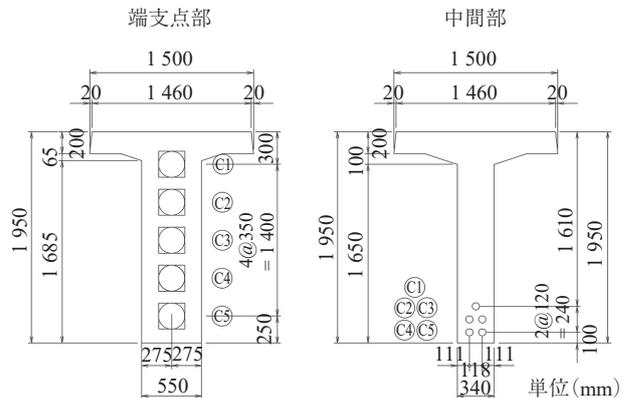
B 橋では、同一シース線上の計 4 点および各計測点近傍の基準面において、図 - 10 に示すようにそれぞれ探触子を近接して WUT 調査を行った。A 橋の WUT 調査と同様に、グラウト充填前 (未充填)・基準面・グラウト硬化後 (グラウト充填) の平均電圧値 V_{av} を求めた。なお B 橋においてもグラウト量を管理しながら、充填センサーを用いて、



(a) PC 桁の外観と WUT 調査状況



(b) 側面図



(c) 断面図

図 - 12 グラウト充填不良箇所を含む PC 桁

シース内に十分に充填されたことを確認している。計測結果を図 - 11 に示す。同一 PC 桁内においても、コンクリート・鉄筋・シースなど計測箇所によって若干異なるため、計測点 (No.1 ~ 4) によって、平均電圧値 V_{av} の値は異なっている。しかしながら、シース上と基準面における平均電圧値の差異をみると、グラウト充填時の差分 ΔV_{av} (No.1 ~ 4 の平均 $1\,563 \text{ mV}$) に比べ、同未充填時の差分 ΔV_{av} (同平均 $3\,410 \text{ mV}$) が明らかに大きい。このことより、指向性の高い弾性波伝播特性を活用した探触子の近接配置による WUT 調査において、シース上~基準面上で計測した平均電圧値の差分 ΔV_{av} を調べることで、既設 PC 桁のシース内のグラウト充填状況を推定できる可能性が窺えた。

4. グラウト充填不良を含む PC 桁を用いた検証

4.1 実験用 PC 桁

本研究で提案するグラウト充填調査法の妥当性を検証す

表 - 2 検証実験用 PC 桁の諸元

	PC-T 桁
桁長	34.94 m
ウェブ幅	桁端部 550 mm ~ 中間部 340 mm
鋼製シース径 ϕ	65 mm
シース純かぶり c_d	137.5 mm
コンクリート	設計基準強度：40 MPa
グラウト	設計基準強度：30 MPa
弾性波伝播速度 v	4749 m/sec
計測周波数 (間隔)	10 MHz (10^{-7} s)
探触子間隔 a	97 mm

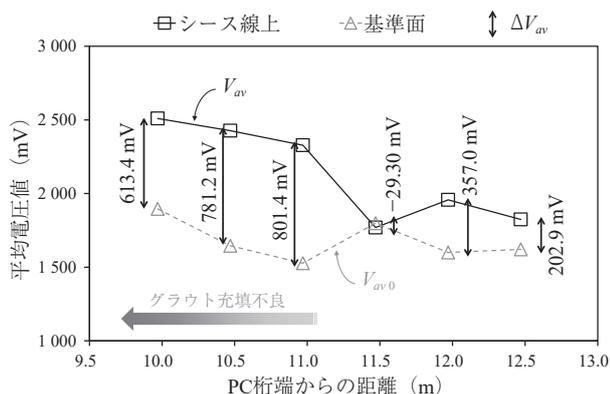


図 - 13 PC 桁における検証実験結果

るため、人為的にグラウト充填不良（局所的に未充填）を設けた実験用ポストテンション式 PC 桁において WUT 調査を行った。この検証実験に用いた PC 桁の外観、側面図、断面図を図 - 12 に示す。側面・断面図で示す C1 の PC 緊張材を入れたシースにおいて、グラウト充填不良箇所が設けられている。この検証実験用 PC 桁は、桁中央からグラウト注入されたものであり、桁端から 10 902 mm 位置において排出孔を設けることで、グラウト充填不良シースを作製している。この PC 桁のグラウト充填不良箇所は、ピーク周波数の閾値で評価した既往の WUT 調査においても確認されているが¹¹⁾、同シース内で比較的広範囲の充填不良箇所が判定できたレベルであり、グラウト充填・充填不良の境界位置まで調べることはできていない。

4.2 実験方法

本検証実験では、グラウト充填不良箇所（位置）をブラインドにした状態で、C1 のシース線に対して、前述の (I) ~ (IV) を実施し、シース上と基準面における平均電圧値の差分 ΔV_{av} の変化を求めた。この PC 桁を用いた検証実験の諸条件を表 - 2 に示す。ここで弾性波伝播速度 v は、前述の A 橋・B 橋と同様の手法で求めている。本実験では、桁端からおよそ 11.0 m 位置に充填用のグラウトホース孔があったことから、この周辺を中心に提案手法による WUT 調査を行った。なお前章までの基礎実験を踏まえ、発信子・受信子を近接配置する探触子間隔 $a = 97$ mm とした。

4.3 実験結果および考察

シース線と基準面における平均電圧値の変化、および両者の平均電圧値の差分 ΔV_{av} を図 - 13 に示す。この結果

に示すように、PC 桁端より 10.0 ~ 11.0 m 位置において、シース上で測定した平均電圧値 V_{av} が 2 328 ~ 2 509 mV を示し、基準面における平均電圧値 $V_{av0} = 1 526 ~ 1 896$ mV に対して著しく高くなっている。これを平均電圧値の差分 ΔV_{av} でみると、613.4 ~ 801.4 mV となり、同 11.5 ~ 12.5 m 位置において求めた -29.3 ~ 357.0 mV と比較すると差異が著しい。この結果より本計測を行った 10.0 ~ 11.0 m 位置におけるグラウト充填不良が疑われたことから、PC 桁製作時の設計製図と照合したところ、人為的に設けられたグラウト充填不良箇所（PC 桁端より 10 902 mm 以下）と概ね一致するものであった。

この PC 桁を用いた検証実験より、本研究で提案する平均電圧値の差分 ΔV_{av} を用いたグラウト充填評価法の妥当性が確認できた。この方法は、WUT 探触子をシース線に近接配置することで、指向性の高い弾性波伝播特性を活用するものであり、グラウト充填・充填不良を含むシースの局所的状態を推定することが可能となった。なお本提案法は、反射波から得られる電圧値を基に定量評価するものであり、シース純かぶりが大きくなると、それに伴って平均電圧値 V_{av} も小さくなる。そのため、基準とするコンクリート面から計測される平均電圧値 V_{av0} との差異が小さくなることから、この差異に対して閾値を設けることは不適當と思われる。実用上は、従来の周波数分析法においてグラウト充填判定ができなかった箇所を中心に、本提案法によって探触子位置を少しずつ変えながら計測し、平均電圧値の差異が急変する箇所（グラウト充填不良の可能性）を特定することとなる。本研究で行った実験条件（シース純かぶり $c_d = 67.5 \sim 137.5$ mm）は、一般的な PC 桁に採用されるシースかぶり厚さ程度であるが、今後はシース純かぶりの大きさなど本手法の適用範囲を明らかにしなければならないと考えている。また、本提案法を適用できない場合における代替法も検討しなければならない。例えばシースがウェブ高さ全域にわたって配置されるような PC 桁端部においては、基準面の計測が困難となる。この場合、複数のシース上で計測した平均電圧値の差異から、グラウト充填評価する方法も考えられよう。このように本提案法による計測・評価が困難となる様々なケースを想定した検討が必要と考えている。

5. おわりに

これまでの WUT 調査では、PC 部材のシース線において比較的広い探触子間隔で時系列波を計測し、その周波数成分のピークをもってグラウト充填評価が行われてきた。この従来法は、広範囲におよぶ PC 部材の中で、多数のシースからグラウト充填不良が疑われるシースの検出には有効であったが、グラウト充填判定が困難となる場合もあった。そこで本研究では、WUT 調査による PC グラウト充填評価の信頼性向上を図るため、周波数とは異なる特性に着目した新たな評価法を考案した。ここで提案する評価法は、WUT の弾性波伝播特性を有効活用するものであり、シースおよび基準面の反射波から求める平均電圧値の差分 ΔV_{av} を評価に取り入れたことに特徴がある。本提案

法の適用範囲を定量化するなど、今後の検討課題も挙げられるが、本研究の範囲内で得られた主な結論を以下に要約する。

- (1) WUTにおける超音波帯域の弾性波は、コンクリート中を直進的に強く伝播する指向性を有する。
- (2) 探触子間を伝播する表面波は、シースからの反射波に比べて著しく小さいことから、弾性波の大きさ(電圧値)を用いる評価法では無視できる。
- (3) (1)(2)より発信子・受信子を近接配置して計測することで、弾性波(電圧値)の大きさをグラウト充填評価に取り入れることができた。
- (4) PC部材中のシース上と基準面からそれぞれ求めた平均電圧値の差分 ΔV_m を基に、その変化量からグラウト充填不良箇所を特定することができた。
- (5) 提案する評価法は、鋼製・PE製シースによらず一般的ななかぶり厚さで製作したPC部材に適用できる。

謝辞：本研究を遂行するにあたり、株式会社エッチアンドピーシステムの原 幹夫氏・濱岡弘二博士、株式会社日本ピーエスの天谷公彦博士・中井太樹氏・山田浩司氏、山口大学大学院の切川雅斗氏に御協力頂いた。またPC桁の検証実験の実施にあたり、株式会社高速道路総合研究所の高原良太室長に御協力頂いた。ここに深甚の謝意を表す。

参考文献

- 1) 睦好宏史：PCグラウトの技術の変遷と今後の展望，プレストレストコンクリート，Vol.64，No.6，pp.10-13，2022.
- 2) Martin, J., Broughton, K. J., Giannopolous, A., Hardy, M. S. A. and Forde, M. C.: Ultrasonic tomography of grouted duct post-tensioned reinforced concrete bridge beams, NDT & E International, Vol.34, Issue 2, pp.107-113, 2001.
- 3) Ohtsu M., and Watanabe T.: Stack imaging of spectral amplitudes based on impact-echo for flaw detection, NDT & E International, Vol.35, Issue 3, pp.189-196, 2002.
- 4) 鎌田敏郎, 浅野雅則, 川嶋雅道, 内田慎哉, 六郷恵哲: 弾性波によるPCグラウト充填評価手法の実構造物への適用, 土木学会論文集 E2, Vol.62, No.3, pp.569-586, 2006.

- 5) An L., and Zheng Y., : Experimental study of grouting voids of post-tensioned prestressing concrete structure by x-ray penetration method, Journal of Highway and Transportation Research and Development, Vol.1 (25), No.142, pp.92-97, 2008.
- 6) 濱岡弘二, 青木圭一, 原 幹夫, 木下尚宜: 広帯域超音波法を用いたPCグラウトの充填調査, プレストレストコンクリート, Vol.56, No.6, pp.35-40, 2014.
- 7) プレストレストコンクリート工学会: 既設ポストテンション橋のPC鋼材の調査および補修・補強指針, 2016.
- 8) 内田雅一, 石田雅博, 北野勇一, 國富康志: 既設PC橋のグラウト充填状況について, プレストレストコンクリート, Vol.64, No.6, pp.14-17, 2022.
- 9) 山下健太郎: 衝撃弾性波法を用いたPCグラウト充填評価の高度化, プレストレストコンクリート, Vol.64, No.6, pp.62-67, 2022.
- 10) Fukushima K., Amaya K., Kinoshita T., and Yoshitake I.: Applicability of wide-range ultrasonic testing to non-destructive inspection of grout condition in prestressed concrete bridges, Proceedings of ISEC-9, 121, 2017.
- 11) Fukushima K., Amaya K., Kinoshita T., Hara M., Yamada K., and Yoshitake I.: Field Test of wide-range-ultrasonic testing (WUT) to detect incomplete grout in post-tensioned prestressed concrete bridges, Proceedings of the 5th fib Congress 2018, 37, 2018.
- 12) 福島邦治, 木下尚宜, 原 幹夫, 吉武 勇: 端面反射波の影響を考慮した広帯域超音波法(WUT)によるPCグラウト充填調査の精度向上, 土木学会論文集 E2, Vol.76, No.4, pp.283-292, 2020.
- 13) 福島邦治: 広帯域超音波法(WUT)を用いたPCグラウト充填調査の適用性と精度向上に関する研究, 山口大学大学院創成科学研究科博士論文, 2021.
- 14) 樺山好幸, 熊野賢二, 宮川豊章, 野村勝義, 今田和夫: 反射波法を用いた非破壊試験のコンクリート構造物空隙調査への適用性に関する研究, 土木学会論文集, No.665/VI-49, pp.31-44, 2000.
- 15) 木下尚宜, 迫 美乃, 福島邦治, 原 幹夫, 吉武 勇: 広帯域超音波法におけるコンクリート中を伝播する弾性波の特性に関する基礎的検討, 土木学会論文集, Vol.79, No.5, 22-00122, 2023.
- 16) 奥出信博: Rayleigh波の伝播特性を利用したコンクリートひび割れ補修材の充填評価に関する研究, 京都大学大学院博士論文, 2021.

[2023年4月1日受付]