

## 学 位 論 文 要 旨

(Summary of the Doctoral Dissertation)

学位論文題目 (Dissertation Title)	広帯域超音波法 (WUT) の弾性波伝播特性を考慮した PC グラウト充填調査の精度向上 (Accuracy Improvement for PC Grout Inspection Based on the Properties of Elastic-wave Propagation of Wide-Range Ultrasonic Testing (WUT))
氏 名 (Name)	木下 尚宜

わが国におけるプレストレストコンクリート (PC) 橋は高齢化が進んでおり, 2023 年時点で建設後 40 年経過した PC 橋の割合が約 36%を占める. また, 車両制限令の規制緩和による大型車両の交通量増加や, スパイクタイヤ禁止に伴う凍結防止剤の散布量増加など, PC 橋を取り巻く環境は年々厳しくなっている. こういった状況により, 重大な損傷につながるリスクを抱えている PC 橋が増えていくことが想定される. 過去に建設された PC 橋の一部では, ブリーディングが生じる PC グラウトを用いたことから, 材料, 機械や設計の未熟さなどに起因する PC グラウトの充填不良が散見されている. PC 橋は PC ケーブル破断が耐荷性能低下につながるため, 既設 PC 橋の維持管理において PC ケーブルを保護する PC グラウトの充填状況の調査が必要不可欠である. コンクリート部材内に配置されているシース内の PC グラウトの充填状況調査は, 削孔を伴う微破壊検査, もしくは非破壊検査に限られる. その中でも, 調査手法としては構造物の損傷がない非破壊によるものが望ましい. PC グラウト充填状況の主な非破壊検査手法は, X 線透過法, 衝撃弾性波法, インパクトエコー (Impact Echo: IE) 法や広帯域超音波法 (Wide-range Ultrasonic Testing: WUT) が挙げられる. これらの非破壊検査手法はそれぞれ一長一短があり, 一つの手法に限られないのが現状であるが, その中でも WUT は, これらの検査手法の中では最も適用範囲が広い. WUT の測定精度が向上できれば, PC 橋の維持管理に大きく貢献するものと考えられる. そこで, 本研究では WUT による PC グラウト充填状況調査の精度向上を主な目的とした.

本研究では, WUT 探触子から発せられ, コンクリート中を伝播する弾性波の挙動を明らかにすることで, より適切な探触子間隔を定め, 新たな判定手法を提案することで PC グラウト充填判定の精度向上を試みた. そして, 提案した判定手法を実構造物等で試験することにより, その妥当性の検証を試みた. 本論文は, これらの実験的研究をまとめたものであり, 全 5 章から構成されている. 各章の要旨を以下に示す.

第 1 章では, 本研究の背景として PC 橋の歴史と, それに関わる PC 橋の維持管理上の課題および着目点を整理し, 非破壊検査による PC グラウト充填調査の必要性を示した. そのうえで, 本研究の目的を明示した.

第 2 章では, 既往の文献調査より, 現在実施されている主な PC グラウト非破壊検査技術の特徴を整理するとともに, 関連する既往研究をレビューした.

第 3 章では, まず本研究で用いる計測システムについて説明するとともに, WUT 探触子から発せられる弾性波は 240kHz 以下で概ね平坦な周波数特性を有することを明らかにした. 次に直角二等辺三角形の断面を有する三角柱状の供試体を用いて, 最適な探触子間隔がシースかぶり深さの 2 倍とする先行研究の妥当性の検証を行った. その結果, WUT 発信波は同心円状ではなく, 直進性をもって

伝播することが窺えた。その後、半円柱状の供試体とレーザードップラー振動計を用いて入射弾性波の指向性を検討し、WUT 発信波が高い直進性を有することを示した。また、コンクリート供試体に切り込みを入れながら計測することで、シース反射波の伝播経路に関する検討ならびに表面波の影響に関する検討を実施した。その結果、反射角  $27^\circ$  以下の場合、シース縦波反射波の起生が確認された。シース縦波反射波は探触子の中心で反射する伝播経路（最短経路）をとることが示唆された。また、探触子を近接して配置した際、表面波の影響は無視できることを報告した。これらより、WUT 探触子を近接して配置し、シース縦波反射波を評価することの有効性を示した。

第 4 章では、第 3 章で判明した WUT の弾性波伝播特性に基づき、探触子を近接させた計測において、時系列波上でシース反射波到達時間までの平均電圧値を求め、シース直上とシースを外した基準断面との平均電圧値差による PC グラウト充填状況の新規判定手法を提案した。その判定手法の適用性を調べるため、PC グラウト充填および未充填の 2 体の供試体において検討したところ、PC グラウトの有無で平均電圧値差に明確な差異が生じた。また、建設中の PC 橋梁において、PC グラウト未充填時と PC グラウト充填後で計測し、新規判定手法を用いて検討した結果、PC グラウトの有無で平均電圧値差に明確な差異が得られ、提案手法の妥当性が窺えた。

さらに製作後 15 年以上経過した部分的な PC グラウト未充填区間を有するポストテンション方式 PC-T 桁の実物大供試体を用い、新規判定手法により PC グラウト未充填区間の検出を試みた。平均電圧値差の急峻な変化点を PC グラウト未充填区間の境界と判断し、設計図書と照合したところ概ね一致した。これより、新規判定手法の PC グラウト未充填区間の検出における有用性が示唆された。

第 5 章では、論文全体の結論を取りまとめ、今後の課題を述べた。

## 学 位 論 文 要 旨

(Summary of the Doctoral Dissertation)

学位論文題目 (Dissertation Title)	広帯域超音波法 (WUT) の弾性波伝播特性を考慮した PC グラウト充填調査の精度向上 (Accuracy Improvement for PC Grout Inspection Based on the Properties of Elastic-wave Propagation of Wide-Range Ultrasonic Testing (WUT))
氏 名 (Name)	KINOSHITA Takanori

Pre-stressed concrete (PC) bridges in Japan are progressively aging, and as of 2023, approximately 36% of PC bridges are at least 40 years old since their construction. Some previously constructed PC bridges exhibited poor filling of PC grout due to poor materials, machinery, and design. PC cable breakage in PC bridges results in decreased load-bearing performance, so it is essential to investigate the filling status of PC grout that protects PC cables for the maintenance and management of existing PC bridges. Surveys on the filling status of PC grout in the sheath placed inside concrete members are limited to micro destructive testing involving drilling or non-destructive testing. Among these, non-destructive methods that do not cause damage to structures are desirable for surveying. The main non-destructive testing methods for PC grout filling include X-ray transmission, impact elastic wave, impact echo (IE), and wide-range ultrasonic testing (WUT). Each of these non-destructive testing methods have their advantages and disadvantages, and it is not possible to select a single method as the best. Nevertheless, WUT has the widest range of application among these testing methods. Improving the measurement accuracy of WUT is expected to significantly contribute to the maintenance and management of PC bridges. Therefore, the main purpose of this study was to improve the accuracy of PC grout filling status surveys. I analyzed the behavior of elastic waves emitted from a WUT probe that propagated through concrete in order to determine a more appropriate probe spacing and propose a new evaluation method in an attempt to improve the accuracy of PC grout filling judgment. This paper is a summary of these experimental studies and comprises five sections. A summary of each section is provided below.

In Section 1, I summarize the history of PC bridges and stress the issues and points of focus regarding the maintenance and management of PC bridges. The necessity of surveying PC grout filling using non-destructive testing is demonstrated, and the purpose of this study is clarified.

In Section 2, I review previous studies and summarize the characteristics of the main non-destructive PC grout testing techniques currently in use.

In Section 3, I analyzed the elastic waves emitted from the WUT probe, revealing their approximately flat frequency characteristics below 240 kHz. Subsequently, a triangular prism-shaped specimen with a right isosceles triangle cross-section was employed to validate prior research. I found that the optimal probe spacing is twice the sheath covering depth. These results indicate that the waves emitted by the WUT do not propagate concentrically but in a

straight line. Following this, the directivity of the incident elastic waves was investigated using a semi-cylindrical specimen and a laser Doppler vibrometer, demonstrating the high straightness of the waves emitted by the WUT. Additionally, measurements were conducted by making cuts in the concrete specimen to examine the propagation path of sheath-reflected waves and the influence of surface waves. The results confirmed the occurrence of sheath longitudinal reflected waves when the reflection angle was less than  $27^\circ$ . It was also found that the influence of surface waves can be disregarded when the probes are placed close together. These results show the efficacy of placing WUT probes in close proximity and assessing sheath longitudinal reflected waves.

In Section 4, I describe how the elastic wave propagation characteristics of WUT established in Section 3 formed the basis for measurements with probes positioned close to each other. The objective was to obtain the average voltage across the time series wave until the arrival of the sheath-reflected wave. Subsequently, a novel method was introduced for assessing the PC grout filling status. This method relies on the average voltage difference between the area directly above the sheath and the reference cross-section with the sheath removed. Measurements were taken before and after filling a PC bridge under construction with PC grout, employing the new evaluation method to examine the structure. The results revealed a discernible difference in the average voltage values with and without PC grout, thereby validating the proposed method. Furthermore, a full-scale specimen of a post-tensioned PC-T girder, manufactured over 15 years ago and featuring a partially unfilled section with PC grout, was utilized to detect unfilled areas using the new evaluation method. The point at which a sharp change in the average voltage difference occurred was identified as the boundary of the unfilled PC grout section. Comparison with the design documents indicated general agreement, suggesting the practical utility of the new evaluation method in detecting unfilled PC grout sections.

In Section 5, the conclusions of the study are summarized, and future research is described.

(様式 9 号)

## 学位論文審査の結果及び最終試験の結果報告書

山口大学大学院創成科学研究科

氏 名	木下 尚宜
審 査 委 員	主 査：吉武 勇
	副 査：中村 秀明
	副 査：河村 圭
	副 査：中島 伸一郎
	副 査：山田 悠二
論 文 題 目	広帯域超音波法 (WUT) の弾性波伝播特性を考慮した PC グラウト充填調査の精度向上 (Accuracy Improvement for PC Grout Inspection Based on the Properties of Elastic-wave Propagation of Wide-Range Ultrasonic Testing (WUT))
<p>【論文審査の結果及び最終試験の結果】</p> <p>これまでに建設されたプレストレストコンクリート (PC) 橋の一部では、材料分離 (ブリージング) が生じやすい PC グラウトが用いられており、設計・設備の未熟さなどに起因した PC グラウトの充填不良が散見されている。PC グラウトの充填不良は、ケーブルの腐食を招き、その腐食が進行してケーブルが破断すると PC 橋の耐荷性能の低下、ひいては落橋にもつながるおそれがある。そのため既設 PC 橋の維持管理においてケーブルを保護する PC グラウトの充填状況の調査が必要不可欠である。本研究は、PC グラウト充填状況の非破壊検査手法として用いられる広帯域超音波法 (WUT) に着目し、その検査精度の向上を主な目的としている。</p> <p>本研究では、WUT 探触子から発せられ、コンクリート中を伝播する超音波帯域の弾性波の伝播特性を調べ、これまで同心円状に伝播すると考えられてきた弾性波がコンクリート中を直進的に伝播すること、コンクリート表面の伝播波は無視できるレベルにあることなどを明らかにしている。これらの結果に基づいて適切な探触子間隔を定めるとともに、その伝播特性に応じた新たな PC グラウト充填判定法を提案している。そして提案した判定手法を実構造物等で試験することにより、その妥当性の検証を行っている。本論文は、これらの実験的研究をまとめたものであり、全 5 章から構成されている。各章の要旨を以下に示す。</p> <p>第 1 章では、本研究の背景として PC 橋の歴史と、それに関わる PC 橋の維持管理上の課題および着目点を整理し、非破壊検査による PC グラウト充填調査の必要性を示している。そのうえで本研究の目的と本論文の構成を示している。</p> <p>第 2 章では、既往の文献調査より、現在実施されている主な PC グラウト非破壊検査技術</p>	

(様式 9 号)

を整理するとともに、関連する既往の研究をレビューしている。

第 3 章は、三角柱および半円柱状の試験体を用いて、WUT 探触子間隔がシースかぶり深さの 2 倍を最適とする先行研究の妥当性の検証を行ったものである。実験結果より、これまで同心円状に伝播すると考えられてきた弾性波がコンクリート中を直進的に強く伝播することを明らかにしている。さらに、PC シースを含むコンクリート試験体上に配置した発信子・受信子間のコンクリート表面に切り込みを入れながら計測することで、シースからの反射波の伝播経路ならびに表面波伝播の影響を調べている。これらの基礎実験により、WUT 探触子を近接配置し、シース縦波反射波からグラウト充填評価を行うことの有効性を示した。

第 4 章では、WUT 探触子を近接配置して計測される反射波（電圧値）の時間変化を基に平均電圧値を求め、シース直上と基準断面との平均電圧値差による PC グラウト充填状況の評価方法を提案している。建設中の PC 橋梁のグラウト充填前後において、平均電圧値差に明確な差異が得られたことから、提案した評価方法の妥当性を確かめている。さらに人為的に設けられた PC グラウト充填不良区間を含む T 桁の PC はり試験体を用いて検証実験を行い、平均電圧値差の急峻な変化点から PC グラウト充填不良境界の推定に成功している。

第 5 章では、本研究で得られた知見をまとめ、今後の課題と展望を示している。

公聴会には、学内外から 65 名（対面式 40 名、オンライン 25 名）の聴講者があった。公聴会における主な質問内容は、①シース内の空隙割合の推定方法について、②反射波における縦波・横波の判別方法について、③発信・受信を行う一探触子法の可能性について、④ WUT 計測におけるコンクリート表面状態の処理方法について、などであった。いずれの質問に対しても発表者からの確かな回答がなされた。

以上より本研究は独創性、信頼性、有効性、実用性ともに優れ、博士（工学）の論文に十分値するものと判断した。

論文内容及び審査会、公聴会での質問に対する応答などから、最終試験は合格とした。

なお、主要な関連論文の発表状況は下記のとおりである。（関連論文 計 3 編、参考論文 0 編）

- 1) 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.
- 2) 吉武 勇, 木下 尚宜, 迫 美乃, 福島 邦治: 広帯域超音波法を用いた新たなグラウト充填評価方法, プレストレストコンクリート, 第 65 巻, 第 5 号, pp.77-84, 2023.
- 3) 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発信波の指向性に関する検証実験, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, 第 23 巻, pp.235-238, 2023.