

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) 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
(Applicability and Accuracy Improvement for PC Grout Inspection Using Wide-Range Ultrasonic Testing (WUT))

氏 名 (Name)

福島 邦治

過去に建設されたポストテンション方式のプレストレストコンクリート (PC) 橋では、PC グラウトの重要性の認識の低さや、注入技術、注入機材の能力不足といった施工時の初期欠陥により、充填不良となっている例が散見された。PC グラウトの充填不良によって発生した損傷例として、英国では、1967年の Bickton Meadows 歩道橋で初めてグラウト充填不良が顕在化した。さらに、1985年の Ynys-y-gwas 橋の落橋によって、英国内ではグラウトを用いた PC 橋の建設禁止措置がとられるに至った。日本では、長野県木祖村の新菅橋や岐阜県の町道島田橋が PC 鋼材の破断が原因で落橋に至っている。その後、碓坪陸橋や須井川橋、新赤石橋、妙高大橋などで PC 鋼材の腐食・破断の事例が確認されている。

PC 鋼材の腐食はいずれも PC グラウトの充填不良に起因するものであり、道路管理者が PC グラウトの充填調査を行った全測定箇所のうち 27%で PC グラウトの充填不足が確認されたことが報告されている。特に PC 鋼棒では 38%と高い充填不良の確率を示しており、ポストテンション橋における将来的な PC 鋼材腐食リスクが高いことを表している。

本研究では、日本全国で用いられている PC 構造のうち、ポストテンション方式の PC グラウト調査に用いられている広帯域超音波法 (Wide-range Ultrasonic Testing: WUT) について、他の非破壊調査手法と異なる特徴を明らかにし、その適用範囲について示した。さらに WUT で使用する特殊機器について、その基礎特性を明らかにし、実際の橋梁を用いてグラウト充填調査の精度向上に寄与する計測方法について検討した。これらの研究に基づいてグラウト充填調査の調査精度を向上させるための手法を明らかにした。本論文は、これらの実験的研究をまとめたものであり、全6章から構成されている。各章の主な要旨と結論を以下に示す。

第1章では、本研究の背景について述べた。ポストテンション方式 PC 構造に必須の PC グラウトの変遷、PC 橋梁の構造形式と PC 鋼材の種別を示しながら、グラウト充填探査の必要性について述べた。本研究で主対象とした WUT のグラウト充填調査について説明するとともに、その精度向上を目的として実施した各種実験について概説しながら、本論文の構成を示した。

第2章では、ポストテンション方式の PC グラウト調査に用いられている X 線透過法、衝撃弾性波法、超音波法、その他の非破壊検査技術に関して既往の研究結果を明らかにし、現状の PC グラウト調査における課題について示した。

第3章では、WUT の特徴と WUT を用いたグラウト充填調査の手順と解析、PC グラウト充填調査の判定方法について明らかにした。WUT 同様、ポストテンション方式の主ケーブル調査に用いられ

(和文 2,000 字程度 / 英文 800 語程度)
(about 800 words)

る X 線透過法, 衝撃弾性波法についてそれぞれの手法の特徴を明らかにした。調査精度, 適用範囲, 調査コスト, 調査時間, 安全性の 5 つの項目について 3 手法の適用性を示した。非破壊調査手法を比較検証するため, 実物大の PC はり供試体を用いて上記 3 手法による PC グラウト充填調査実験を行った。その比較実験より, WUT は最もかぶり厚の大きな部材でも充填判定が可能であることを明らかにした。

第 4 章では, WUT による PC グラウトの検出精度が, 調査方法や計測条件によって影響を受ける可能性があるため, その基礎特性の調査を行った。WUT では探触子から発信される超音波帯域の弾性波を, 接触媒質を介してコンクリート内部に伝達するため, グラウト充填判定に用いる有効な反射波を得るのに必要な探触子の設置方法等について実験的に検討した。大型探触子の表面から発信される超音波の範囲を特定し, これに基づいた超音波伝搬経路を示すとともに, その再現性が高いことを実験的に明らかにした。供試体を用いた実験では, シースからの反射波と部材端部からの反射波の影響を明らかにし, 充填シースでは低周波帯域, 未充填シースでは高周波帯域の周波数ピークとなることを定量的に示した。供試体を用いてかぶり厚によって探触子間隔を変えることで周波数ピークも異なることを明らかにし, 最適な探触子間隔としてシースのかぶり厚の 2 倍を提案した。

第 5 章では, 実際の橋梁を対象として第 4 章までに得られた知見に基づいた手法を用いて PC グラウト充填調査を行い, 精度向上に寄与できることを明らかにした。施工中のプレキャスト T 桁橋で行った現場実験では, 充填・未充填シースに対する充填判定を行った。その結果, 第 4 章の供試体実験結果から得られたかぶり厚の 2 倍の探触子間隔が PC グラウト充填調査の精度向上に最も寄与することを確認した。供用中の橋梁と施工中の橋梁でグラウト充填調査実験を行い, かぶり厚が 250mm を超える部材でもグラウト充填調査が可能であることを明らかにした。シースかぶり厚が変化する場合でも, その平面角度変化を考慮した探触子間隔とすることで, PC グラウトを充填判定できることが窺えた。超音波伝搬速度を用いた実験では, かぶり厚によって周波数分布が異なることを明らかにし, PC グラウト充填判定で充填・未充填を判定する際の周波数帯域は, 部材厚に応じて設定することが望ましいことを提案した。

第 6 章では, 本研究で得られた知見をまとめるとともに, 今後の課題と展望を示した。

(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	福島 邦治
審査委員	主 査：吉武 勇
	副 査：進士 正人
	副 査：中村 秀明
	副 査：麻生 稔彦
	副 査：渡邊 学歩
論文題目	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
<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てきたポストテンション方式のプレストレストコンクリート (PC) 橋のなかには、グラウト注入技術や機材の能力不足に起因してグラウト充填不良となっている橋梁もみられる。このグラウト充填不良により、PC 鋼材はしばしば腐食が生じる。特に PC 鋼棒を用いたポストテンション PC 橋では、グラウト充填不良の割合も高いことから、将来的な鋼材腐食リスクが高い。そこで本研究は、PC グラウトの充填状況を調べる広帯域超音波法 (Wide-range Ultrasonic Testing: WUT) に着目し、そのグラウト充填調査の精度向上を図ったものである。本論文では、グラウト充填調査を行う従来の非破壊検査手法と比べながら WUT の特徴と適用範囲を明らかにしている。さらに WUT に使用する特殊な検査機器の基礎的特性を調べるため各種実験を行うとともに、実際の橋梁においてグラウト充填調査を行い、その精度向上を図る手法を提案している。</p> <p>本論文は 6 章構成となっており、それぞれの章の内容を以下に示す。</p> <p>第 1 章では、ポストテンション方式 PC 構造に用いる PC グラウトの変遷、PC 橋梁の構造形式と PC 鋼材の種別を示しながら、グラウト充填探査の必要性について述べている。そして WUT のグラウト充填調査を概説した上で、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、ポストテンション方式 PC 構造のグラウト充填調査に用いられている非破壊検査技術について既往の研究成果をまとめ、PC グラウト充填探査の現状の課題について整理している。</p> <p>第 3 章では、ポストテンション方式 PC 構造のグラウト充填調査に用いられる X 線透過法、衝撃弾性波法、WUT について、調査精度・適用範囲・調査コスト・調査時間・安全性の比較評価を行っている。さらに、実物大の PC はり供試体を用いて上記 3 手法による PC グラウト充填調査実験を行い、その中でも WUT はシースカぶり厚の大きい部材において適</p>	

(様式 9 号)

用できることを報告している。

第 4 章では、WUT による PC グラウトの検出精度が、調査方法や計測条件によって影響を受けるため、主に室内実験において WUT の基礎特性について検討している。大型探触子の表面から発信される超音波の範囲を定め、これに基づいた超音波伝搬経路を示すとともに、その再現性が高いことを実験的に明らかにしている。さらに、シーすからの反射波と部材端部からの反射波の相互影響を調べ、充填・未充填シーすからの反射波の特徴を明らかにしている。また、シーすかぶり厚によって探触子間隔を変えることで周波数ピークも異なることを報告し、シーすかぶり厚の 2 倍を最適な探触子間隔として提案している。

第 5 章では、基礎実験で得られた知見に基に、実 PC 橋においてグラウト充填調査を行い、提案手法による検出精度を調べている。プレキャスト T 桁橋の実験では、シーすかぶり厚の 2 倍の探触子間隔が PC グラウト充填調査に適していることを確認している。さらにシーすかぶり厚が変化する橋梁においても、その平面角度変化を考慮した探触子間隔とすることで、PC グラウトを充填判定できる可能性を示している。

第 6 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 73 名（オンライン）の聴講者があった。公聴会における主な質問内容は、主に WUT の適用範囲、コンクリート表面にひび割れがある場合の影響について、桁下からの探査の可能性について、充填割合の影響について、グラウト未硬化時点での充填判定の可能性について、検出衝撃の与え方の影響について、などであった。いずれの質問に対しても発表者からの的確な回答がなされた。

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) 福島 邦治, 木下 尚宣, 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 グラウト充填探査の精度向上, 土木学会論文集 E2 (材料・コンクリート構造), Vol.76, No.4, pp.283-292, 2020.
- 2) KUNIHARU FUKUSHIMA, KIMIHIKO AMAYA, TAKANORI KINOSHITA and ISAMU YOSHITAKE: APPLICABILITY OF WIDE-RANGE ULTRASONIC TESTING TO NON-DESTRUCTIVE INSPECTION OF GROUT CONDITION IN PRESTRESSED CONCRETE BRIDGES, *Proceedings of ISEC-9*, pp.1-6, 2017.
- 3) Kuniharu Fukushima, Kimihiko Amaya, Takanori Kinoshita, Mikio Hara, Koji Yamada and Isamu Yoshitake: 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*, pp.1-7, 2018.