

博士論文

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)

2021 年 3 月

福島 邦治

Kuniharu FUKUSHIMA

山口大学大学院 創成科学研究科

目 次

目 次

学位論文要旨	i
Summary of the Doctoral Dissertation	iii
第1章 序論	
1.1 研究背景	1
1.2 PC グラウトの役割	6
1.3 本研究の目的	17
1.4 本研究の構成	19
第2章 既往の研究レビュー	
2.1 X線透過法	23
2.2 衝撃弾性波法	23
2.3 超音波法	25
2.4 その他の非破壊調査技術	27
第3章 WUT の特徴と適用性の検証	
3.1 WUT を用いたグラウト充填調査の原理	35
3.2 WUT の特徴	36
3.3 WUT と他の非破壊調査技術の適用性の比較	53
3.4 第 3 章のまとめ	75
第4章 WUT の特性に関する基礎実験	
4.1 実験目的	79
4.2 接触媒質の有用性に関する実験	80
4.3 探触子の特性と超音波発生範囲の特定に関する実験	82
4.4 探触子を押し当てる力に対する検証実験	87
4.5 発信された超音波の再現性実験	91
4.6 超音波の伝搬範囲実験	95
4.7 シースからの反射波と部材端部からの反射波の影響検証実験	102
4.8 探触子間隔の検証実験	121
4.9 第 4 章のまとめ	128

第5章 WUT によるグラウト充填調査の現場実験	
5.1 実験目的	131
5.2 新設プレキャストT桁への適用実験	131
5.3 かぶり厚の大きな実橋への適用実験	140
5.4 部材厚が周波数帯域に及ぼす影響	147
5.5 第5章のまとめ	151
第6章 結論	
6.1 本研究のまとめ	153
6.2 今後の課題と展望	155
本論文に関する著者の発表論文	157
謝辞	158

学位論文要旨

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

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により、グラウトの充填不足となっている例が散見された。PC グラウトの充填不足によって発生した損傷例として、1967 年の英国 Bickton Meadows 歩道橋でのセグメント目地における PC 鋼材腐食と破断による倒壊がある。さらに、1985 年の Ynys-y-gwas 橋の落橋により、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、暮坪陸橋や須井川橋、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 グラウトの充填不足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% と高い充填不足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「序論」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「既往の研究レビュー」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「WUTの特徴と適用性の検証」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。また、実験結果よりWUTの課題を明らかにした。

第4章「WUTの特性に関する基礎実験」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、シーす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、充填シーすでは低周波帯域、未充填シーす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すのかぶり厚の2倍を提案した。

第5章「WUTによるグラウト充填調査の現場実験」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・未充填シーす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のグラウト充填調査実験を行い、箱桁橋の支点部を想定したかぶり厚が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。シーす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「結論」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。

Summary of the Doctoral Dissertation

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

FUKUSHIMA Kuniharu

Complete grouting of tendon ducts is essential for the durability of post-tensioned prestressed concrete (PC) bridges. Voids in the ducts may induce failure of PC tendons, possibly causing a reduction in the load capacity and the collapse of the bridge.

The corrosion of a PC tendon is caused by incomplete PC grouting. It has been reported that 27% of the measured PC grouting points were inadequately filled with PC grout. Particularly, the probability of inadequate PC grout filling is high for PC bars (38%), indicating the high risk of future PC tendon corrosion in post-tensioned bridges.

Non-destructive tests (NDTs) with ultrasonic waves are often used to examine the grouting conditions in the tendon ducts of PC bridges. Wide range ultrasonic testing (WUT), an NDT technique, has the advantage of being applicable even to thick PC girders. WUT is often employed in box girders of a PC bridge because the grout inspection can be performed at the inner space of the girder without scaffolding.

This paper describes the applicability and characteristics of WUT, which is different from other non-destructive inspection methods. The primary characteristics of the special test equipment, which is not commercially available, used in the WUT, were clarified, and the measurement methods that contributed to the improvement of the grout inspection accuracy were studied using actual bridges. Based on these investigations, a method to improve the accuracy of grout inspection is presented.

This paper is a summary of these experimental studies.

This thesis consists of six chapters. The contents of each chapter are as follows:

Chapter 1 (Introduction) describes the background of this study: the evolution of PC grouting, the structural types of PC bridges, and the types of PC tendons. The need for grout inspection is demonstrated. The chapter also describes the grout inspection using WUT and outlines the various experiments conducted to improve the survey accuracy.

Chapter 2 (Literature Review) presents the results of earlier studies on the X-ray transmission method (XRT), impact-echo method (IE), ultrasonic testing method, and other non-destructive inspection techniques used for post-tensioned PC grouting.

Chapter 3 (Verification of WUT characteristics and applicability) describes the characteristics of WUT, the procedure of grout inspection using WUT, and the methods of analysis and determination. The characteristics of WUT, XRT, and IE for grout inspection are clarified, and the applicability of the three non-destructive methods is illustrated in five categories: inspection accuracy, applicable concrete depth, inspection cost, inspection period, and safety. The results of PC grout inspection tests conducted using a full-scale PC beam specimen to verify the three non-destructive methods indicate that WUT can detect complete filling even in members with the maximum cover thickness.

Chapter 4 (Basic experiments on WUT characteristics) describes our investigations into the fundamental properties of WUT. The accuracy of PC grout inspection by WUT may be affected by the inspection method and measurement conditions. The effects of the waves reflected from the duct and end face are clarified by experiments using a specimen. The low frequency peaks of the grout-filled ducts and the high-frequency peaks of the void ducts depend on the distance between the transducers, according to the cover thickness. The optimum transducer interval is proposed to be twice the concrete cover thickness.

Chapter 5 (Field tests of grout inspection using WUT) discusses the PC grout inspection conducted on an actual bridge using a method described in Chapter 4, and it clarifies that the method improves the inspection accuracy. The field tests conducted on a precast T-girder bridge under construction detect grout-filled ducts and void ducts in PC grouting. The results confirm that a transducer interval of twice the cover thickness primarily contributed to the accuracy of the PC grout inspection (see Chapter 4). In addition, grout inspections conducted on bridges in service and on those under construction confirm that grout inspections are possible for members with a cover thickness of 250 mm or more. The results indicate that PC grouting can be determined even when the thickness of the cover changes, by using a transducer interval that considers the angular change. Experiments using ultrasonic propagation velocity reveal that the frequency distribution differs depending on the cover thickness. It is proposed that the frequency band for determining filled or unfilled PC grout should be set according to the member thickness.

Chapter 6 (Summary) presents the remarkable conclusions of this study and presents future problems at the end of the thesis.

第 1 章

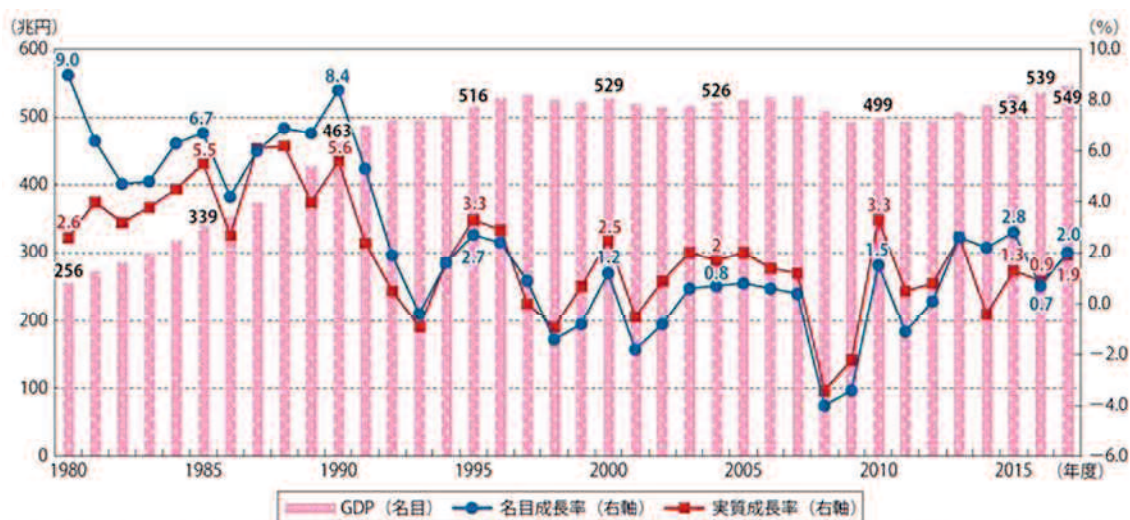
序 論

第1章 序論

1.1 研究背景

1.1.1 わが国のインフラの現状とそれを取り巻く環境

2019年、我が国は平成から令和へと新しい時代を迎えた。平成はバブル経済に始まり、経済は当初、高い成長率を誇った。その後、不良資産による銀行破綻などバブル経済の崩壊、リーマンショックなどの経済危機が発生して経済は長期間横ばいの状態が続いた。しかし、近年では、長年に渡る厳しい状況乗り越え、GDPが過去最高の549兆円になるなど、図-1.1に示すように経済は緩やかに回復している。



備考) 国内総生産は、1980年度から1993年度まで（前年度比は1981年度から1994年度まで）は「平成21年度国民経済計算（平成12年基準・93SNA）」、1994年度（前年度比は1995年度）以降は「平成30年10-12月期四半期別GDP速報（2次速報値）（平成23年基準・08SNA）」による。なお、1993年度以前の総額の数値については、異なる基準間の数値を接続するための処理を行っている。
資料) 内閣府「平成28年度年次経済財政報告、長期経済統計、国民経済計算（1/5）」及び内閣府「国民経済計算（GDP統計）」より国土交通省作成

図-1.1 我が国のGDPの推移¹⁾

この経済状態の中、人口は、2008年（平成20年）に1億2,808万人と最高記録を更新した後、減少傾向を示している。2018年時点では、1億2,644万人とピーク時に比べて164万人の減少となっている。この人口減少は今後も継続し、国立社会保障・人口問題研究所の将来予測によると、総人口は今から45年後の2065年には8,808万人まで減少することが予測されている。日本国内で労働に従事できる人口をあらわす生産年齢人口は1995年の8,726万人をピークに減少し、2018年には7,545万人、2065年には4,529万人まで減少するとされている。図-1.2に我が国の人口推移を示す。

我が国の建設投資は、平成4年（1992年）のバブル経済期の84兆円をピークに平成22年（2010年）には42兆円と半減したものの、2018年には53兆円と緩やかにではあるが、回復の兆しをみせている。建設就業者は平成9年（1997年）の685万人に対して、2018年にはピーク時の26.5%減の503万人となっている。建設就業者は高齢化を示しており、全産

業における55歳以上の割合は29.3%であるのに対して、建設業では33.9%と高い割合を示している。また、29歳以下の割合は全産業で16.4%であるのに対して、建設業では11.4%と若者の入職率が低いことを表している。

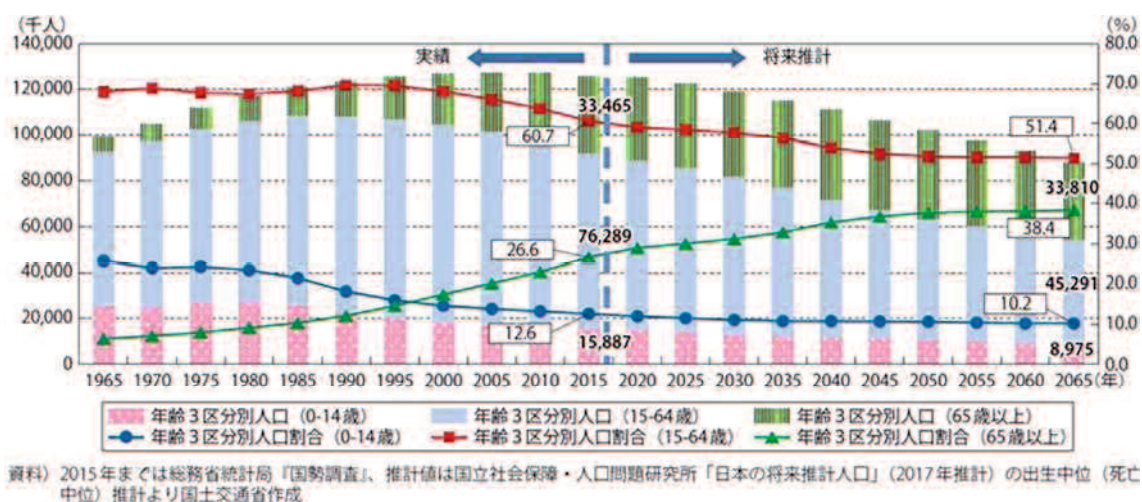


図-1.2 我が国の人口推移¹⁾

図-1.3 に建設業就業者の年齢割合を示す。また、図-1.4 に職業別の有効求人倍率の推移を示す。これらの資料から、建設産業は、国民の安全・安心を支えるインフラの整備と維持を担っているにも関わらず全産業に対して高齢者の割合が高く、次世代の担い手が少ないことを示している。

少子高齢化による生産人口減少とそれによる税収の減少、さらに建設産業の担い手不足は、我が国の生活レベルの指標となる様々なインフラを維持していくための大きな課題となっている。

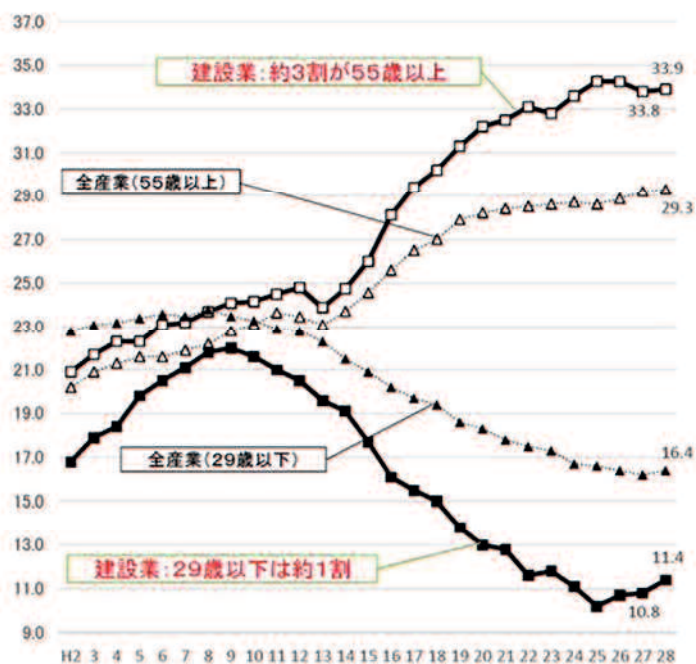
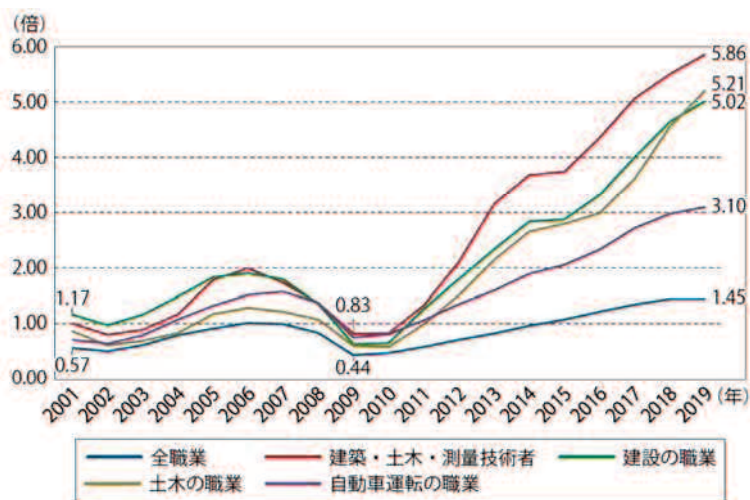


図-1.3 建設業就業者の年齢割合¹⁾



(注) パートタイムを含み、新規学卒者及び新規学卒者求人を除く常用に係る数字。
資料) 厚生労働省「一般職業紹介状況」より国土交通省作成

図-1.4 職業別の有効求人倍率¹⁾

1.1.2 プレストレストコンクリート

わが国のインフラではプレストレストコンクリート (Prestressed Concrete) 構造が橋梁, 容器, 建築, 防災施設などに多用されている. コンクリートの引張強度を補完するため, 内部に圧縮力を導入する考え方は 1886 年, アメリカの P.H.Jackson によって特許出願された. 当時は現在の PC 鋼材と異なり引張強度の小さい鉄筋を緊張材として用いていた. 導入された圧縮力は小さく, コンクリートの乾燥収縮やクリープの影響によって導入された圧縮力は減少し, 実用化に至っていなかったとされる. 1928 年にフランスの E.Freyssinet は降伏点の高い PC 鋼材と高強度コンクリートを組み合わせて有効に作用するプレストレスを確保することに成功し, プレストレストコンクリートの実用化が図られることとなる. 彼はその後, 1932 年に補強コンクリート製品の製造法として日本で特許出願し, 特許登録されている²⁾.

実用化されたプレストレストコンクリート技術によって, 日本初のプレテンション方式 PC 橋の長生橋が 1952 年に, 日本初のポストテンション方式 PC 道路橋である十郷橋(図-1.5)が 1953 年に建設された.



図-1.5 昭和 28 年 6 月に撮影された十郷橋³⁾

十郷橋は 2020 年現在も福井県坂井市で道路橋として使用されている. 70 年におよぶ供用にもかかわらず, 十郷橋の主桁は中性化の進行や塩化物イオンの浸透もほとんどみられず超音波伝搬速度の結果, さらには WUT を用いた PC グラウト充填調査でグラウト充填が確認されており, 高い品質を有していることが明らかとなっている³⁾.

現在, 国内にある橋長 15m 以上の橋梁 17 万橋のうち, プレストレストコンクリート技術を用いて製作された PC 橋の割合は 44%, 約 76,000 橋にのぼる. 17 万橋の橋梁の構造形式別

割合を図-1.6 に、国内の PC 道路橋の建設推移を図-1.7 に示す⁴⁾。その中でポストテンション式 PC 橋の総数は約 60000 橋におよんでいる⁵⁾。現在も各地で PC 橋の新設がされている一方、過去に建設された PC 橋では老朽化が進んでおり、それに追隨する劣化・損傷が数多く報告されている⁶⁾。国土交通省が発刊した道路橋定期点検要領では、5 年に 1 回の定期点検が義務付けられているが、橋梁が安全に供用されるには常時の点検とその正確な判断それに伴った的確な補修および補強が要求されている。

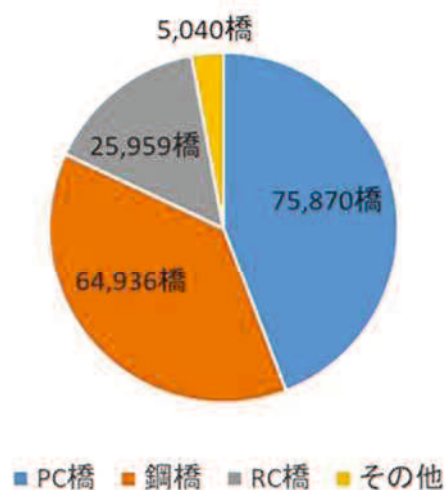


図-1.6 構造形式別の橋梁数割合⁴⁾

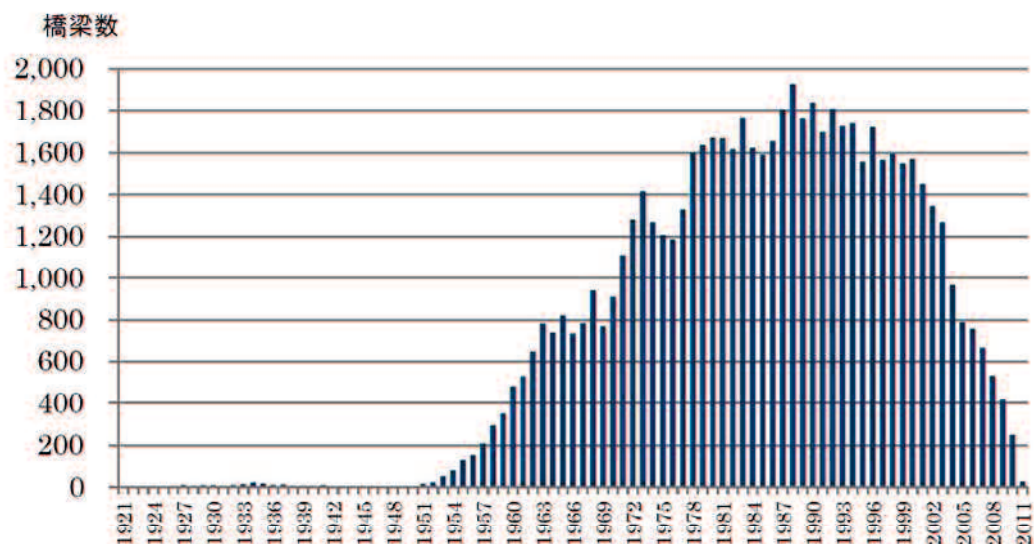


図-1.7 日本の PC 道路橋の建設推移⁷⁾

1.2 PC グラウトの役割

1.2.1 PC グラウトの機能について

ポストテンション橋のPCグラウトは、PC鋼材と主桁コンクリートの一体化を図り、かつ、PC鋼材を腐食劣化から保護する役割を持つ。ph13程度の強アルカリのグラウトによってPC鋼材の表面には不動態皮膜が維持され、腐食抵抗性が保たれる。現在では、様々なPC鋼材種別と、そのPC鋼材の径に適合するシースが用いられている。図-1.8に現在のPC鋼材の種別を示す。PC鋼材はその製造技術の進歩によって細径の単線から2層構造のより線、さらに3層構造の太径より線へと変遷を遂げてきた。

	種 類	サイズ mm	形 状
PC鋼より線	2本よりPC鋼より線	2.9×2本より	
	3本よりPC鋼より線	2.9×3本より	
	7本よりPC鋼より線	9.3~15.2	
	19本よりPC鋼より線	17.8~21.8	
	19本よりPC鋼より線	28.6	
PC鋼棒	丸 鋼 棒	23.0~36.0	
	ねむじPC鋼棒 "ゲビンデスタープ"	23.0~36.0	
プレグラウトPC鋼棒	丸 鋼 棒	32.0	
アンボンドPC鋼より線	7本よりPC鋼より線	12.4~15.2	
	19本よりPC鋼より線	17.8~21.8	
	19本よりPC鋼より線	28.6	
プレグラウトPC鋼より線	19本よりPC鋼より線	17.8~21.8	
	19本よりPC鋼より線	28.6, 29.0	
エボキシPC鋼より線 (ECFストランド)	7本よりPC鋼より線	9.3, 12.7, 15.2, 15.7, 17.8, 21.8	
ポリエチレン被覆エボキシPC鋼より線 (PE被覆ECFストランド)	7本よりPC鋼より線	12.7, 15.2, 15.7	

図-1.8 PC鋼材の種別⁸⁾

また、PC鋼材を収めるためのシースの変遷を図-1.9に示す⁹⁾。1953年（昭和28年）に完成した十郷橋では現在のいわゆるシースという“さや管”は存在せず、ゴムホースのような可撓性のある材料の中に芯材を入れ、コンクリート硬化後にそれを引き抜いてダクトを形成した³⁾。その後、1960年以降、鋼製の薄鉄板を「かshめて」製作するスパイラルシースが用いられるようになり、鋼製シースさらにはポリエチレンシースなどが実用化されて主に用いられている。

	1950年代	1960年代	1970年代	1980年代	1990年代	2000年代
PC 鋼棒						
		● 32mm		● 35mm	● 38mm	●
		● 38mm		● 39mm	● 45mm	●
PC 鋼線		● 32mm				● 廃止
		● 45mm				● 廃止
		● 45mm	● 50mm			● 廃止
PC 鋼より線		● 60mm	● 62mm	● 70mm		●
		● 60mm	● 62mm	● 70mm		●
			● 72mm	● 80mm	● 82mm	●

図-1.9 シースの変遷⁹⁾

PC グラウトはセメントと水および両者を均一にするためのグラウト混和剤が主成分である。JIS R 5201 (2015) では、セメントの比重が 3.15 と規定されており、セメントと水では 3 倍の比重差がある。比重差によって上部に浮いた水分（ブリーディング）は、のちに空隙となることから、日本初のポストテンション方式の道路橋である十郷橋では、粗骨材を粉末にしてグラウト材に混入させ、セメントと水の比重差を小さくしていたと推定されている³⁾。セメントと水を均一化するためのグラウトの混和剤には、1960 年代までは、ブリーディングの発生が大きかったため、遅延型のセメント分散剤と膨張性のあるアルミニウム粉末を使用していた。ただし、アルミニウムを使用すると膨張の際に水素ガスが発生し、PC 鋼材が水素脆化する恐れがあるため 1970 年から 1990 年ごろまでは、ブリーディング率の低いグラウト混和剤が主に使用されていた。1990 年以降はノンブリーディング型が標準となり、塩化物量も 0.3kg/m^3 以下のものが使用されている。図-1.10 にグラウト材料の変遷、図-1.11 にグラウト注入技術の変遷を示す⁹⁾。さらに年代別の技術指針などを含むグラウト技術の変遷を図-1.12、図-1.13 に示す⁹⁾。

PC グラウトは、所定の量のセメントと水およびグラウト混和剤を、グラウトミキサを用いて均一に練り混ぜて混合して作製する。グラウトを注入する主桁には、あらかじめグラウトホースを用いて勾配の低い側に注入口を、勾配の高い側に排出口、空気の溜まる位置に排気口を設けておく。練り混ぜたグラウト材は電動式のグラウトポンプを用いて注入口から注入を行い、排出口から均一なグラウト材が流出したことを確認してホースを閉塞して作業を終了する。図-1.14 に単純桁に対するグラウト注入例を、図-1.15 に標準的なグラウト注入システムを示す。

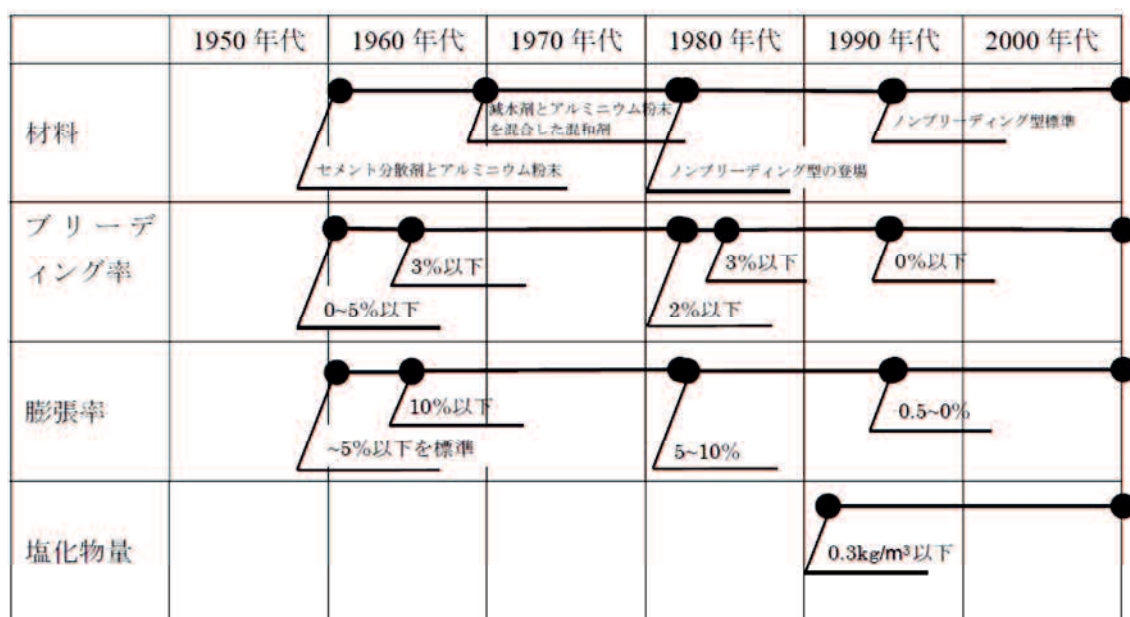


図-1.10 グラウト材料の変遷⁹⁾

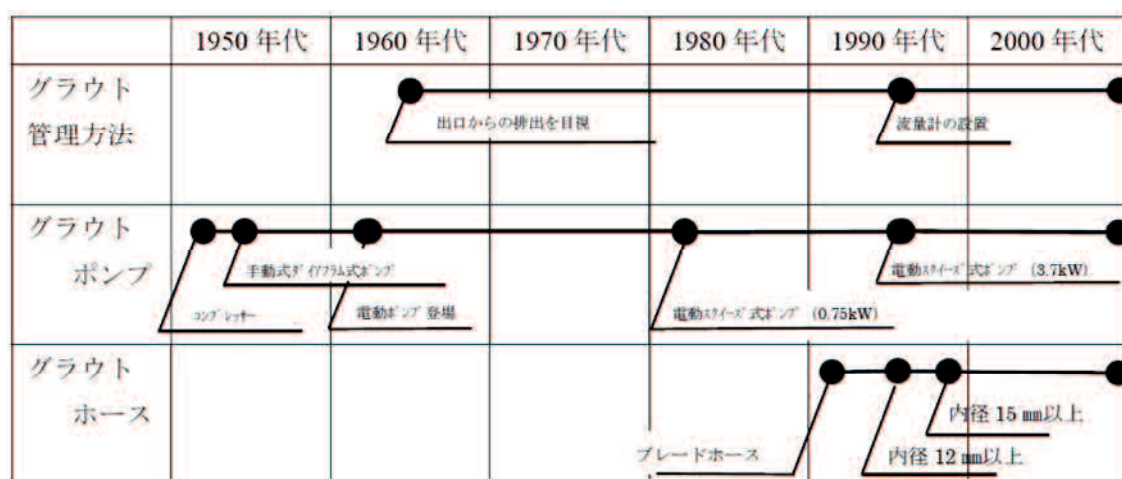


図-1.11 グラウトの注入技術の変遷⁹⁾

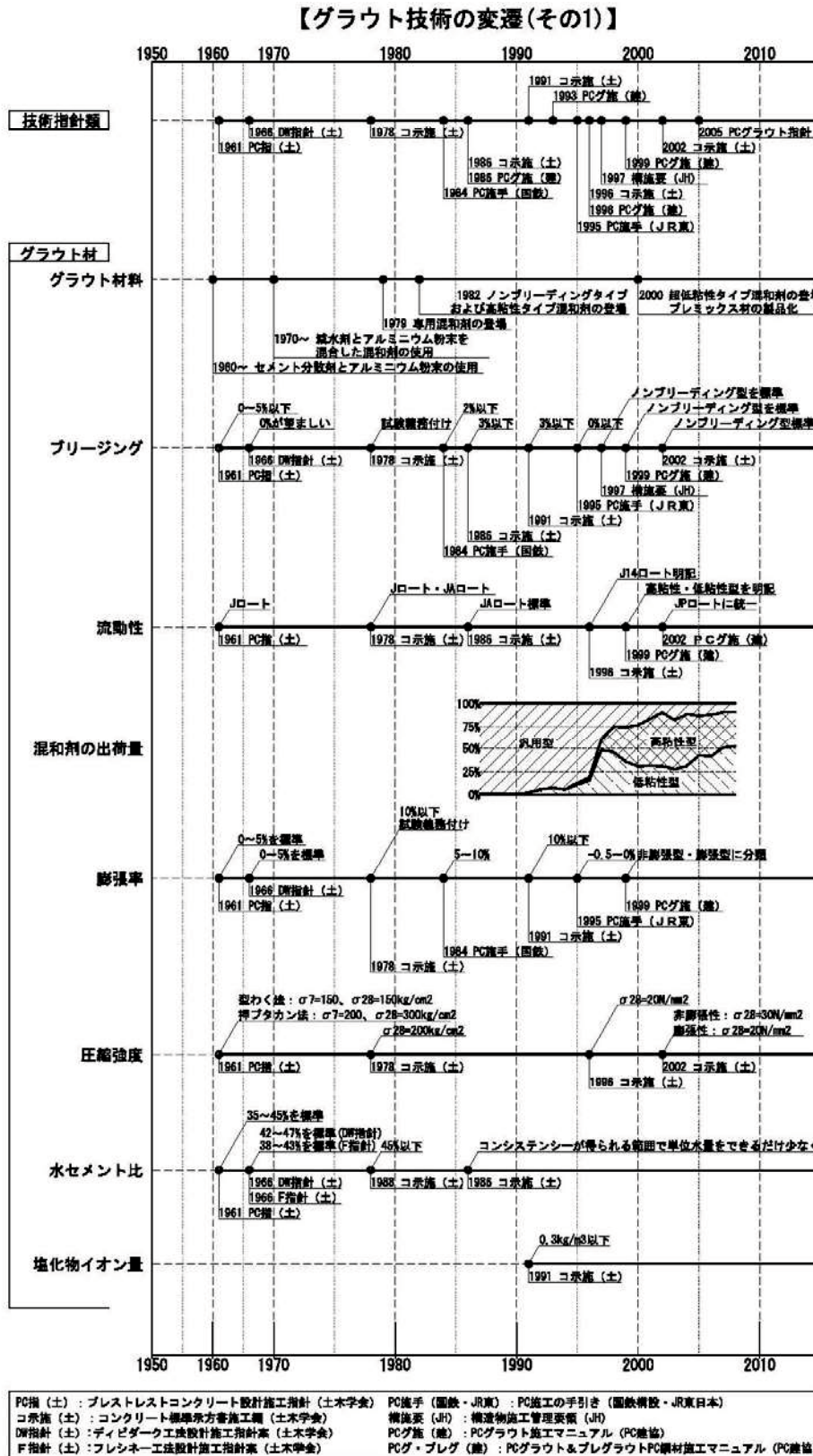


図-1.12 グラウト技術の変遷 (その1) ⁹⁾

【グラウト技術の変遷(その2)】

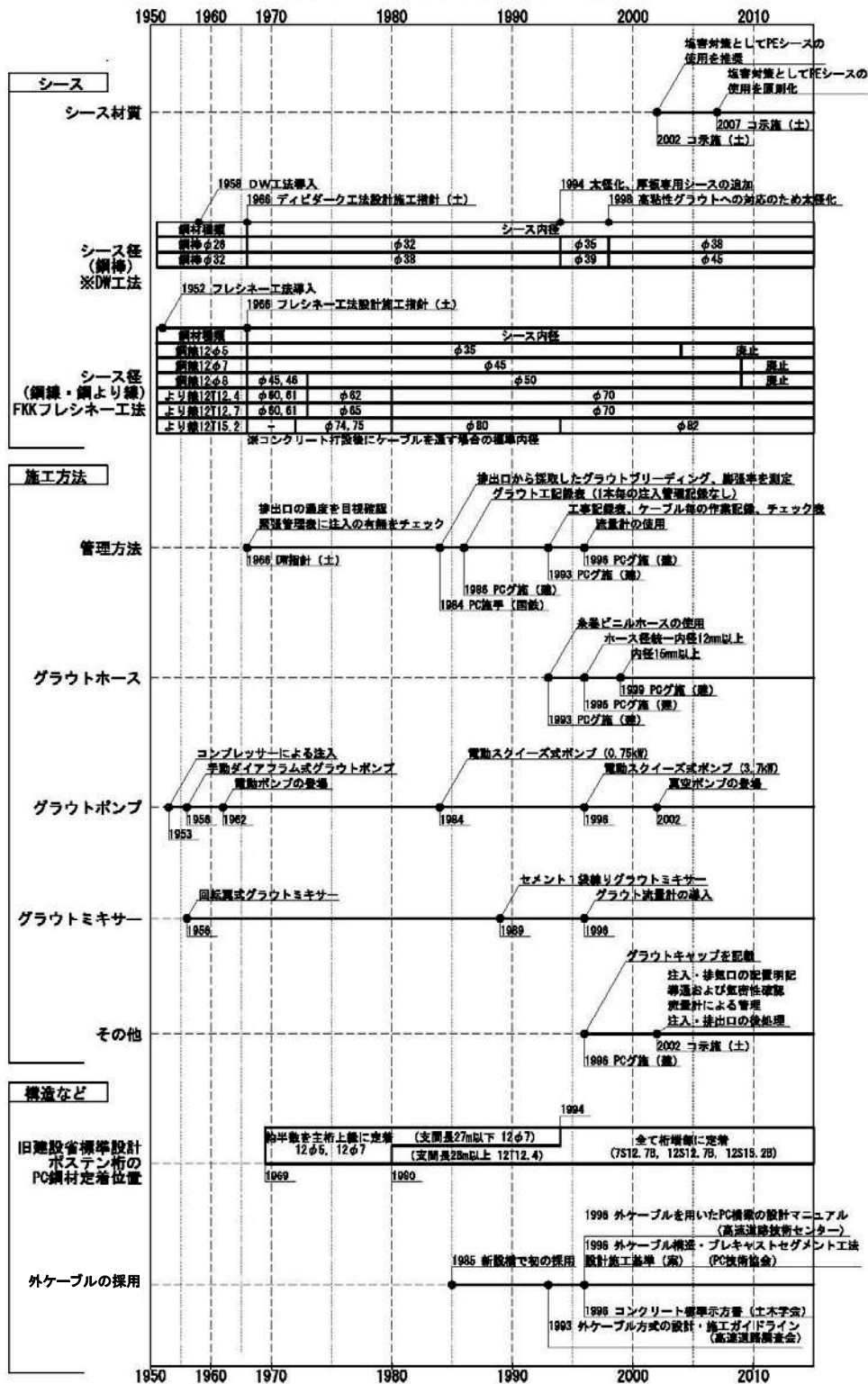


図-1.13 グラウト技術の変遷 (その2) ⁹⁾

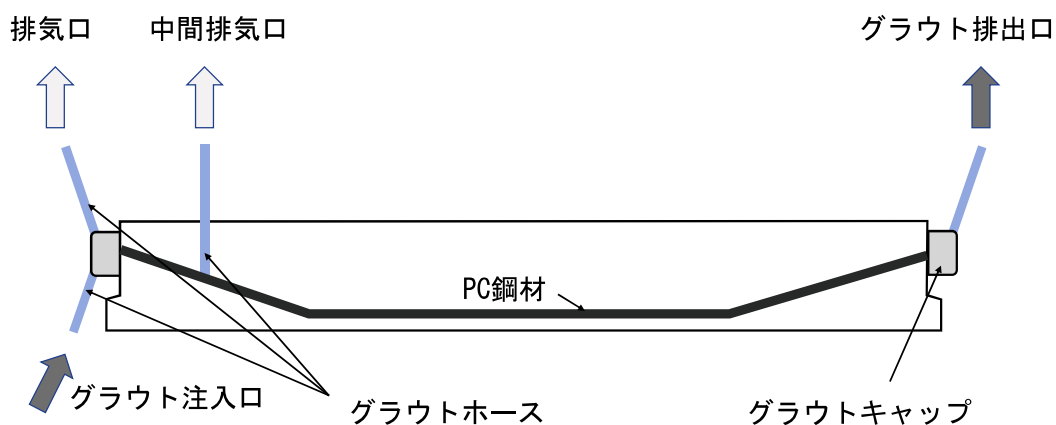


図-1.14 単純桁に対するグラウト注入例

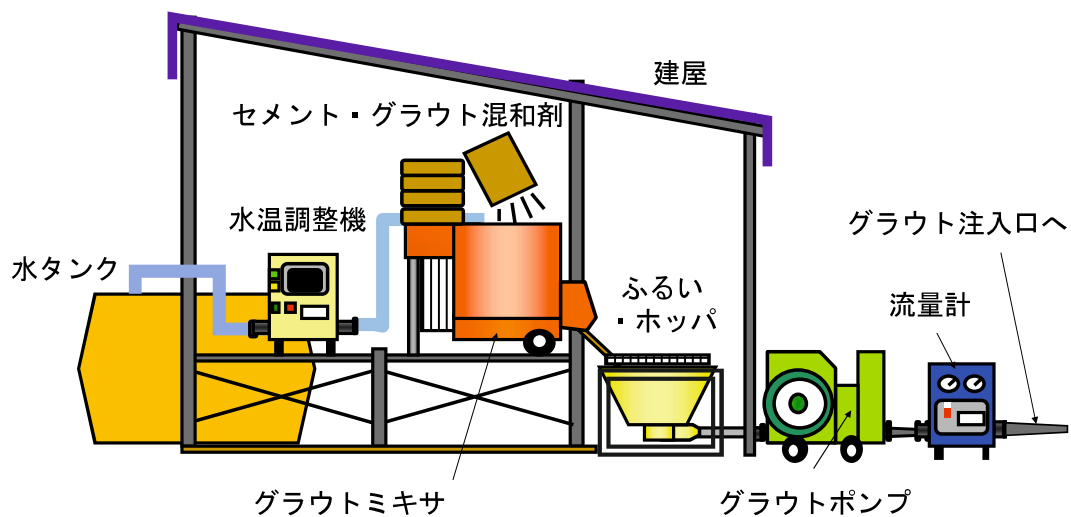


図-1.15 標準的なグラウト注入システム

PC グラウトの充填不足が確認された場合には、再注入を行う必要がある。グラウト充填不足による劣化損傷は橋梁毎に異なるため、再注入にあたっては柔軟な対応が必要となる。グラウト再注入による補修方法の指針としてプレストレストコンクリート建設業協会から手引きが発刊されている¹⁰⁾。

1.2.2 PC グラウトの充填不足について

過去に建設された 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から、PC グラウトの充填不足となっている例が散見された。PC グラウトの設計施工指針では¹¹⁾、グラウト充填不足の原因として 1) グラウト材の先流れによる空気の巻き込み、2) グラウトホースの閉塞、3) シース内部の閉塞、4) 注入機材のトラブルに伴うグラウト材の硬化、などが記載されている。

PC グラウトの充填不足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足が顕在化した¹²⁾。さらに、1985 年の Ynys-y-gwas 橋の落橋によって、イギリス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。Ynys-y-gwas 橋の落橋事例を図-1.16 に示す。

国内では、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、暮坪陸橋や須井川橋、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。新菅橋の落橋事例を図-1.17 に示す。



図-1.16 Ynys-y-Gwas 橋の落橋事例¹²⁾

図-1.17 新管橋の落橋¹³⁾

これらの事象を受け、我が国でも PC グラウトに対する研究が行われ、ブリーディング水がシース内に残存すると PC 鋼材に腐食リスクが発生することが明らかとなった。このためブリーディングの発生を抑制するグラウト混和剤が開発された。グラウト混和剤の変遷については 1.2.1 および図-1.10 で述べた通りである。

PC 鋼材の腐食はいずれも PC グラウトの充填不足に起因するものである。特に、1960 年以降 1989 年頃まで、新設の片持ち架設の箱桁橋では、直径 $\phi 32\text{mm}$ の PC 鋼棒と内径 38mm の鋼製シースの組み合わせが主に用いられており、内部の空隙はわずか 6mm の狭小部であった。PC 鋼材は、有効な偏心量の確保と安全な定着を行うため、角度と曲げ半径を有するため、緊張後には、復元力によって PC 鋼材はシースの片側に寄った状態となる。このため、PC 鋼材とシースの隙間はさらに小さくなり、PC グラウトの充填不足が生じる事象が顕在化した。

各道路管理者で実施された PC グラウトの充填調査は 2016 年時点現在で全 4,777 箇所であることが示されている⁷⁾。構造形式別のポストテンション方式 PC 橋の建設と開通状況を図-1.18 に示す。建設年次毎に使用された PC 鋼材種別のまとめを図-1.19 に示し、PC 鋼材種別毎の充填状況をまとめたものを図-1.20 に示す。全測定箇所のうち 27%の測点で PC グラウトの充填不足が確認されており、特に PC 鋼棒では 38%と高い確率を示しており、将来的な PC 鋼材腐食リスクが高いことを表している。

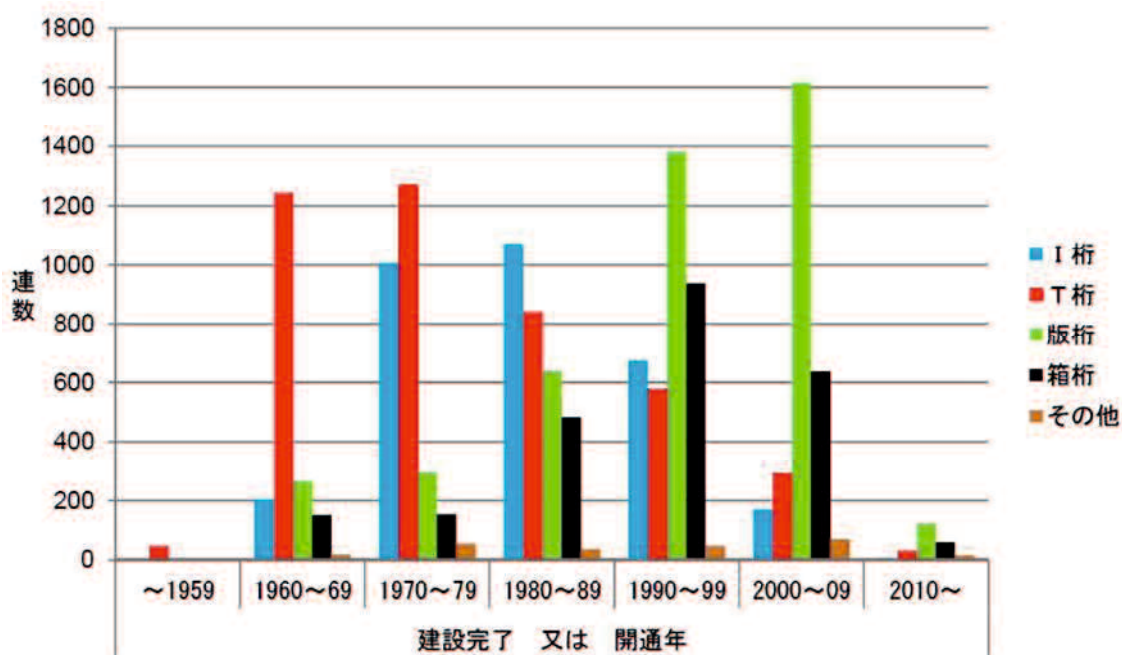


図-1.18 構造形式別のポストテンション方式 PC 橋の建設と開通状況⁹⁾

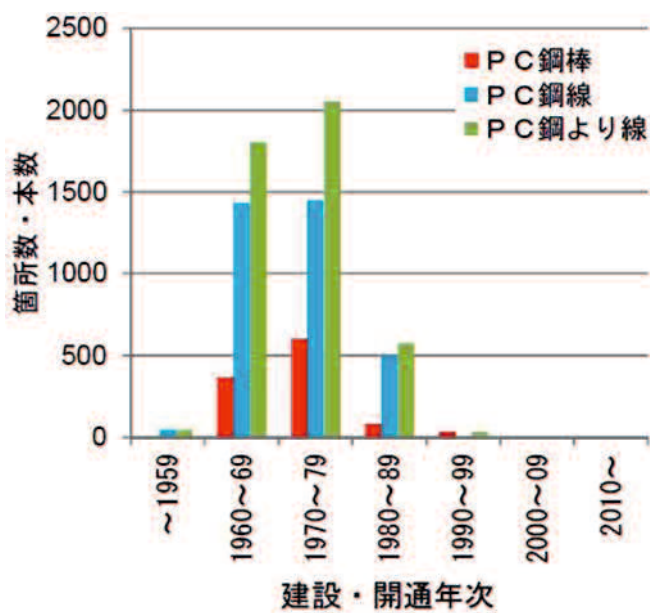
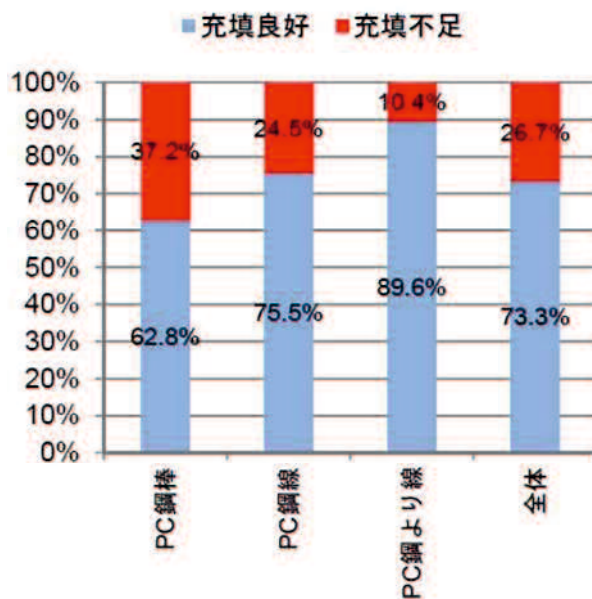


図-1.19 橋梁の建設年次と使用された PC 鋼材のまとめ⁹⁾

図-1.20 PC鋼材種別毎の充填状況⁹⁾

我が国の重要な物流インフラである高速道路ではPC橋が、橋梁全体の35%を占めている。高速道路会社の報告書によるとPCグラウトの充填が十分でないものが、調査箇所数全体の25%、PC鋼棒では35%あることが報告されており、既設橋におけるPC鋼材の腐食・破断が起こりうるということが明らかとなっている^{14),15)}。図-1.21に高速道路におけるPC鋼材種別ごとのPCグラウト充填状況を示す。

前段まで我が国におけるPC構造物のグラウト充填不足について資料を収集し、現状をまとめた。今後、PC構造物の耐久性に寄与するPCグラウトの良否を見分けるためには、その使用材料に起因する品質と、使用されるPC鋼材とシース径、さらに施工機器や技術指針など幅広い知識が求められる。まとめとして適用基準類の変遷や要素技術に基づいたPCグラウト充填不足発生リスクを図-1.22に示す。PCグラウトの不具合による鋼材損傷を防ぐためには、施工された年代ごとのリスクを把握して、PC構造物の調査・点検を行うことが重要となる。

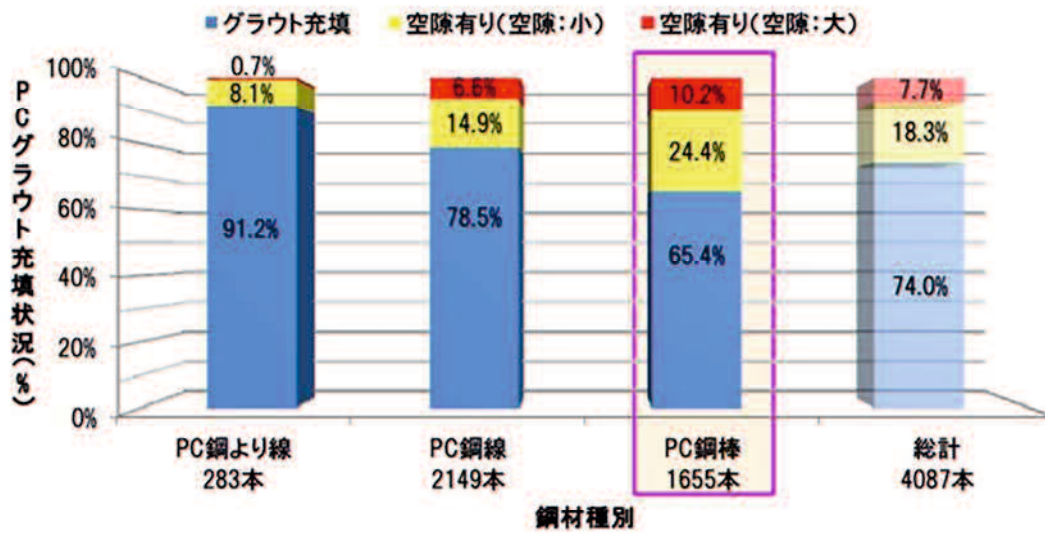


図-1.21 高速道路における PC 鋼材種別毎の充填状況¹⁵⁾

要因	PCグラウト充填不足発生リスク										背景	
	1971	1975	1980	1985	1990	1995	2000	2005	2010	2015		
充填不足	品質管理 (充填管理)	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	1986年 PCグラウト記録 1996年 流注計、講習会受講義務
	ブリーディングに起因する空隙	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	1996年 ノンブリーディング 2005年 鉛直管試験導入
	先流れ現象に起因する空隙	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	1996年 粘性型PCグラウトの記載 1999年 高粘性・低粘性型の使用
	シース後											
に起因する空隙	PC鋼線	■	■	■	■	■	■	■	■	■	1973年 60mm→65mm(12S12.7)	
	PC鋼より線	■	■	■	■	■	■	■	■	■	1980年 65mm→70mm(12S12.7)	
PC鋼棒	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	1994年 38mm→39.3mm(φ32mm) 1998年 39.3mm→45mm(φ32mm)	
施工機器に起因する空隙												
											1984年 電動スライダ'アップ'(0.75kW) 1996年 電動スライダ'アップ'(3.7kW)	

発生リスク
 ■ : 高 (対象とする要因に対して規定がない、もしくは対策に不備あり)
 ■ : 中 (要因対策が実施されているが、途中経過的な対策)
 ■ : 低 (要因対策が完了しており、PCグラウト充填不足が発生する可能性が低い)

図-1.22 適用基準類の変遷に基づく PC グラウト充填不足発生リスク¹⁶⁾

1.3 本研究の目的

ポストテンション方式のプレストストコンクリート (PC) 橋では、PC 鋼材の腐食を抑制するためシース内のグラウトは十分に充填されなければならない。既往の研究によれば、グラウト充填状況が良好であれば、定着部付近で PC 鋼材を切断しても PC グラウトの付着によって PC 鋼材が定着され、切断前と同等の耐荷力を示すことが明らかとなっている¹⁷⁾。

そこで、グラウトの充填性を担保するための PC グラウト充填調査が重要となってくる。

PC グラウト調査技術は、非破壊検査と微破壊検査の大きく 2 つに分類される。微破壊検査では内部鋼材を損傷から防止するため、ウォータージェット工法やコンクリートドリルを用いてシースまでの削孔が行われる。シースを開削した後、CCD カメラやファイバースコープを削孔した穴に挿入して PC グラウトの充填状況や PC 鋼材の腐食や破断を観察する。シースを開削するため、シース内部は外気と接触し、通気状態となる。外気と接触することでシース内部の PC 鋼材が腐食等の変状を促進する要因となるため、「既設ポストテンション橋の PC 鋼材調査および補修・補強指針」⁹⁾では、PC グラウト充填調査に非破壊検査を用いることが推奨されている。PC グラウト充填調査の結果は、今後の構造物の耐荷力に大きく影響を及ぼすため、充填を確認する精度よりも、充填不足を確認する精度が求められている。PC 鋼材の腐食劣化が進行する前に、充填不足を非破壊検査によって確認し、グラウト再注入工法などの予防保全的な補修がなされれば、構造物の長期耐久性が確保できる。

現在、非破壊検査で行われる PC グラウト充填調査として、打撃面と対象物間の多重反射による共振周波数から充填判定を行う衝撃弾性波法（以下インパクトエコー法）や、部材内部の状態によって透過量が異なる放射線（主に X 線）の撮影画像を基に充填判定する放射線透過法が実用化されている。さらに、これらの充填調査と異なる手法として超音波による非破壊調査も用いられている。広帯域超音波法 (Wide-range Ultrasonic Testing, 以下 WUT) は、2.5kHz~1000kHz と帯域の広い超音波を用いた PC グラウト充填調査手法である。現在、日本国内で実施されているポストテンション方式の主ケーブルの PC グラウト調査に用いられている調査方法を表-1.1 に示す⁹⁾。

表-1.1 PC グラウト調査方法一覧⁹⁾

調査項目	調査方法	評価内容
非破壊検査	放射線透過法	調査位置における PC グラウトの充填状況を推定する。
	打音振動法	直線配置 PC 鋼材における PC ケーブル 1 本ごとの PC グラウト充填状況を推定する。
	広帯域超音波法 インパクトエコー法	調査位置における PC グラウト充填状況を推定する。
微破壊検査	削孔調査	

WUT では、シーす直上のコンクリート表面に接触媒質を介して探触子を配置して PC グラウト調査を行う。調査時は、外径 $\phi 95\text{mm}$ 、内部に $\phi 76\text{mm}$ の大型圧電素子が用いられた探触子に電圧を印加し、その圧電素子を振動させることで超音波帯域の弾性波をコンクリート内部に発信している。発信された波は、シーすなどの対象物で反射して受信探触子で振動として収録される。振動を再び電圧値に変換した波形を周波数変換し、その得られた周波数のピーク帯域から PC グラウトの充填判定を行う。プレストレストコンクリートは、その構成材料として、セメント、細骨材、粗骨材、補強材としての鉄筋や PC 鋼材など様々な大きさの材料から成る複合材料である。WUT では大型の探触子を用いることで、出力が大きく、様々な大きさの材料によって散乱減衰が生じにくい広帯域の周波数を発信できるため、かぶり厚の深い位置での調査を可能としており、多くの PC 橋のグラウト充填調査に用いられている。しかしながら、既往の研究によれば PC グラウト充填判定の際に周波数のピークが複数存在し、判定に至らない場合があることが示されている¹⁸⁾。

そこで、本研究では WUT を用いた PC グラウト充填調査について、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検証を行った。WUT では大型の探触子を含む特殊機器でシステムが構成されるが、その基礎特性を明らかにするため、供試体と実橋梁を用いて実験的な検証を行った。さらに、実験結果から得られた知見に基づいて実際の橋梁を対象として PC グラウト充填調査の調査精度に寄与する計測方法についても検討を行った。

1.4 本研究の構成

本研究では、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超音波広帯域超音波法(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で用いる特殊機器について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解明したものであり、全6章の構成となっている。

「第1章 序論」では、本研究の背景を示し、プレストレストコンクリート構造のポストテンション方式に必須のPCグラウトについてその変遷をまとめている。各道路管理者が行ったグラウト調査資料結果から、グラウト充填不足リスクを示している。PCグラウト充填調査手法に対する適用性と精度向上について明らかにした本研究の目的と本論文の構成について記述している。

「第2章 既往の研究レビュー」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、課題の抽出を行っている。

「第3章 WUTの特徴と適用性の検証」では、WUTを用いたグラウト充填調査の原理と、調査の手法および解析手法についてまとめている。その後、ポストテンション方式の主ケーブルに対して適用されるX線透過法と衝撃弾性波法の特徴について言及している。最後に、X線透過法、衝撃弾性波法、WUTの3手法について、調査可能なかぶり厚や調査精度、調査のコストおよび安全性などの適用性を明らかにし、供試体を用いて3手法を同条件で比較し、検証を行っている。得られた結果からWUTの課題を明らかにしている。

「第4章 WUTの特性に関する基礎実験」では、超音波帯域の弾性波を発信する探触子や超音波をコンクリート内部に伝達するための接触媒質について、その基本特性を実験的に明らかにする。また、調査の再現性を検証するとともに、発信、受信の2つの探触子を用いた計測方法の調査限界範囲を特定している。さらに、充填調査に影響を及ぼす因子について検証実験を報告する。最後に、PCグラウトの充填と未充填を模した供試体を用いて、最適な探触子間隔を求めている。

「第5章 WUTによるグラウト充填調査の現場実験」では、一般的なかぶり厚のプレキャストセグメントT桁の新設橋を用いて、通常、WUTで用いるグラウト充填判定方法に代えて、周波数のピーク位置と周波数値によって充填判定を行う新たな方法を検証している。また、箱桁橋の支点部を想定した、かぶり厚が250mm以上ある橋梁に対してPCグラウトの充填判定の可能性について検討している。部材厚が大きな2つの橋梁を対象として収録した波形を周波数解析し、部材厚が周波数帯域に与える影響を明らかにしている。

「第6章 結論」では、第3章から第5章で得られた研究成果を総括し、本研究の結論を示す。また、研究から得られた結果をもとに今後の課題と展望を述べる。

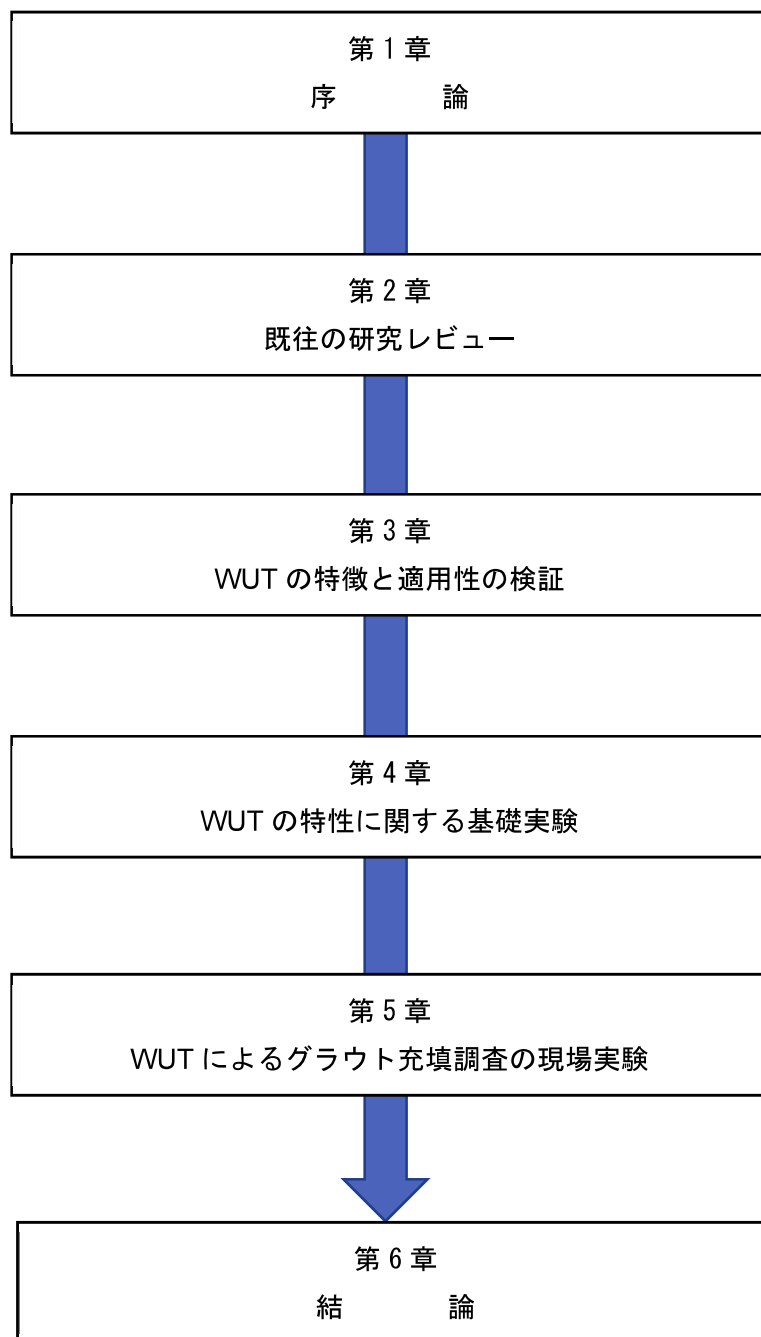


図-1.23 本論文の構成フロー

【参考文献】

- 1) 国土交通省：国土交通白書 2019，第 I 部 新しい時代に応える国土交通政策 第 1 章 平成の時代を振り返って 第 1 節 わが国の変化
(URL : <https://www.mlit.go.jp/hakusyo/mlit/h30/hakusho/r01/pdfindex.html>) 2020.10 現在, 2019.
- 2) 渡辺 明：技術展望 プレストレストコンクリートの歴史（道路構造物），土木学会論文集，No.451V-17，pp. 1-5，1992.
- 3) 天谷公彦，原 幹夫，吉田雅穂，阿部孝弘：我が国初のポストテンション方式 PC 道路橋 十郷橋の健全性調査報告，コンクリート工学，Vol.52，No.12，pp.1067-1074，2014.
- 4) 国土交通省：道路統計年報2018，道路現況の推移，(URL : <http://www.mlit.go.jp/road/ir/ir-data/tokei-nen/2018/nenpo02.html>) 2019.1現在, 2018.
- 5) 小林和夫，井上 普：プレストレストコンクリート工学，国民科学社，2006.
- 6) 宮下 孝，小林憲一，加藤久紀，島津美砂子：妙高大橋の PC ケーブル損傷に伴う外ケーブル補強と今後の維持管理について，平成 24 年度国土交通省北陸地方整備局事業研究発表会，2012.
- 7) 青木圭一：プレストレストコンクリート橋における PC 鋼材破断とその調査および性能評価に関する研究，埼玉大学大学院理工学研究科博士論文，2016.
- 8) 住友電気工業株式会社，住友電工の PC 鋼材（カタログ），(URL : <https://sei.co.jp/steel-wire/download/>) 2020.9 現在, 2020.
- 9) 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.
- 10) プレストレストコンクリート建設業協会：プレストレストコンクリート構造物の補修の手引き [PC グラウト再注入工法]，2020.
- 11) プレストレストコンクリート工学会：PC グラウトの設計施工指針 一改訂版一，

- 2012.
- 12) 道路構造物ジャーナルNET, 既設ポストテンション橋のPCグラウト問題への対応,
(URL : <https://www.kozobutsu-hozen-journal.net/interviews/detail.php?id=1070&page=1>)
2020.9現在, 2020.
 - 13) 日本道路協会 : 道路橋の保全・補強に関する施策について 資料, p.1, 2009.
 - 14) 青木圭一, 渡邊晋也, 三加 崇, 宮永憲一, 睦好宏史 : 供用後 40 年が経過した PC 桁
の性状から推定される PC 橋の性能評価, 土木学会論文集 E2, Vol.71, No.3, pp.283-
302, 2015.
 - 15) 東日本高速道路, 中日本高速道路, 西日本高速道路 : 高速道路資産の長期保全及び
更新のあり方に関する技術検討委員会報告書, pp.47, 2014, 1.22.
 - 16) 土木学会, 2018 年制定 コンクリート標準示方書【維持管理編】, 2018.
 - 17) 蒲 和也, 渡邊晋也, 吉川直志, 齊藤成彦 : PC ケーブルの破断が PC 桁の耐荷性状
に及ぼす影響, 構造工学論文集, Vol.66A, pp. 725-732, 2020.
 - 18) 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, pp.35-40, 2014.

第2章

既往の研究レビュー

第2章 既往の研究レビュー

現在に至るまで PC グラウト充填調査に関する技術は数多く報告されている。PC グラウト充填調査および調査に関係する既往の研究を以下に概説する。

2.1 X線透過法（放射線透過法）

諸隈ら¹⁾は、車載型デジタル X 線検査システムによって、PC グラウトの充填率 50%の供試体を使用して撮影実験を実施した。実験には、管電圧 300kVp の X 線装置を用いた。その結果、コンクリート表面より 130mm 内部にあるシース管のグラウト充填状況を目視確認できることを示した。また、濃度分布を解析することによって、グラウト充填度を定量的に評価できる可能性も示した。

竹内ら²⁾は、衝撃弾性波法と X 線透過法に着目し、種々の条件を変化させたグラウト充填度の異なる供試体を用いて適用精度を検証した。その結果、衝撃弾性波法では弾性波伝播速度を評価指標とすることでグラウト充填度を推定できることを示した。X 線透過法では、グラウトの充填部と未充填部を視覚的かつ正確に把握できることを確認した。

大島ら³⁾は、PC グラウト充填不足によって鋼材が破断した場合、再付着の位置に応じて桁の耐力が大きく変化するため、グラウト充填範囲を広域に検知することが重要であるとして 950 keV と 3.95 MeV の 2 種類の高出力 X 線源によるコンクリート橋検査技術について実験的検証を行った。一般的な X 線発生装置として使用可能な 950keV では、20 分の照射時間で 350mm 厚の T 桁下フランジ内部に設けられた 9mm と 13mm の鋼材径差を把握できることを示した。また、法的には放射線発生装置となる 3.95 MeV 機を国内で初めて PC 桁の内部調査に使用した。定格出力の 1/6 に低減して照射を行ったが、部材厚 400 mm の部材厚を 30 秒程の照射時間で撮影できることを示した。

竹内ら⁴⁾は、橋梁検査技術の合理化にむけ 950keV、3.95MeV の X 線源をもつ、可搬型の X 線検査システムを用いて厚さの異なるコンクリート構造物に対する X 線の応答を精査し、精度向上のための基礎的検討を行った。供試体を用いた実験により 950keV ではコンクリート厚さ 200mm～450mm、3.95MeV では 400mm～800mm の透過力を表現できる減衰式のパラメータを特定した。またフラットパネル検出器を用いた 20 秒以内の撮影で、950keV では 350mm、3.95MeV では 300mm～740mm のコンクリート厚さで適用可能なことを示した。

2.2 衝撃弾性波法

Jaeger ら⁵⁾は、インパクトエコーの理論的基礎と実用的なアプリケーションの開発を目的とし、削孔試験によるインパクトエコー法のキャリブレーションを行い、インパクトエコー法によってグラウトの完全充填、部分充填および未充填状態におけるシースの位置を正確に特定できることを示した。

縦山ら⁶⁾は、踏掛版下およびトンネル覆工背面の空隙調査手法の確立を目的として、衝撃弾性波と超音波パルス法を用いた検証を行った。その結果、空隙部が存在する場合は、超音波の固有振動数(40kHz)が卓越する結果を明らかにした。一方、踏掛版下の空隙を調査するため舗装上面から評価を行ったが、複数の伝播速度が異なる層間では、空隙を特定できないことを示した。

Ohtsuら⁷⁾は、インパクトエコー法に基づいたスペクトル振幅の視覚化技術を開発し、ポストテンション橋における空隙検出の適用性を検討した。その結果、空隙の存在をSIBIE分析によって視覚的に識別できることを示した。

鎌田ら⁸⁾は、コンクリート構造物の表層にある欠陥を対象として欠陥の大きさや表面からの深さと打音法により得られる特性値との関係を明らかにするため、2次元のFEM解析と供試体を用いた実験を行った。実験では、かぶり厚30mm~100mmに欠陥部を埋設した供試体を用いた。その結果、欠陥の直径が大きいくほど最大振幅値は大きくなり、周波数分布においては弾性波の反射に寄与する面積が大きくなること、供試体上面と欠陥を往復する波の成分が増加して高周波のピークがより強調されることを報告した。また、コンクリートの動弾性係数の違いが打音特性値に与える影響は小さいことを示した。

川嶋ら⁹⁾は、インパクトエコー法を用いて、様々な空隙の大きさと深さを対象として、供試体による実験的な検証を行った。実験には、シーソのかぶり厚を60mm~250mmと変化させた供試体を使用した。実験では、さらに、鋼球の打撃に付随して発生する表面波の影響と除去方法についても検討した。空隙の深さに応じた周波数を入力可能なインパクトを選定することが、評価において有効であることを明らかにした。また、表面波を除去することで、縦波共振現象を明瞭に捉えることができる可能性を示唆した。さらに周波数分析では、従来用いられている高速フーリエ変換に代えてマルチテーパ法を用いることで、検出困難な条件にある空隙に対しても、周波数ピークを卓越させることができることを明らかにした。

渡辺ら¹⁰⁾は、鉄筋の影響を検討するため、配筋パターンを変えた鉄筋コンクリート供試体を作製し、インパクトエコー法を用いた実験的検討を行った。その結果、鉄筋を1本配筋した供試体を用いて、鉄筋による共振周波数を検出し、評価することができた。また、供試体内部にかぶり厚20mm, 50mm, 150mmに空隙を設置した実験では、共振周波数は衝撃力の上限周波数と相関があることを明らかにした。格子状に鉄筋を配筋した鉄筋コンクリート供試体では、鉄筋が密配筋されている箇所では、内部空隙により生じる共振周波数を検出することが困難となり、鉄筋上での計測ではその影響がより顕著となる可能性が示された。

鎌田ら¹¹⁾は、弾性波によるPCグラウトの充填評価手法として、部材軸方向に弾性波を伝播させる場合と部材断面方向に弾性波を伝播させる場合の2ケースについて、既設の実構造物への適用性を検討した。その結果、実構造物においてもグラウトの充填度が増加するとともに、部材軸方向における弾性波の伝播速度が小さくなることを報告した。また、部材の断面方向に弾性波を伝播させた場合、インパクトエコー法では検出が困難な条件にある

空隙に対しても表面波を除去し、周波数分析にマルチテーパ法を適用することにより、空隙からの周波数ピークを識別させることが容易となることを報告した。

Ninel ら¹²⁾は、PC グラウトが未充填の PC はりにおいて、SIBIE 法を用いて未充填部のかぶり深さが充填判定に与える影響を調査した。その結果、未充填部において大きい反射が得られたことから、未充填部の直径に対するかぶり深さの比が 5 より大きい場合でも SIBIE 法によって未充填部を検出できることを示した。

大津ら¹³⁾は、インパクトエコー法に基づいてコンクリート内部欠陥の位置を断面部の画像化により検出する SIBIE 法をプレストレストコンクリート構造のグラウト未充填検出に適用した場合の問題点を検討し、改良された手法について実証的に検討した。検討には、かぶり厚 100mm と 105mm の供試体を用いた。グラウトが未充填の区間では、計測点をシース管径と同程度もしくはやや大きい距離でシース上部および下部から大きな反射が得られた。また、グラウトが部分的に充填されていた場合、シース管上部で強い反射が得られ、SIBIE 法によって部分的にグラウトが充填されている場合の探査可能性を明らかにした。

Schoefs ら¹⁴⁾は、シース管を含む鉄筋コンクリート擁壁を使用して非接触型のインパクトエコー法の適用試験を実施し、擁壁の剛性がインパクトエコー法の共鳴周波数に影響を及ぼすことを示した。また、異なる 7 つのグラウト条件に対して統計分析を行い、 α - δ 法がインパクトエコー法の検出能力を評価するための合理的な方法であることを示した。

Zou ら¹⁵⁾は、インパクトエコー (IE) 法を用いてボックスガードー橋の PC グラウト品質を非破壊試験で評価し、周波数スペクトルから得られる主周波数 (DFQ) に影響する変数を数値解析によって検討した。その結果、実験的および数値解析の双方において、IE 法では、シース管内の PC グラウト品質を非破壊的に評価できることを確認した。また、PC グラウトの強度が DFQ に大きく影響することを明らかにし、PC グラウトの材齢が 7 日以降で IE を適用することが望ましいことを示した。

2.3 超音波法

藤井・宮川¹⁶⁾は、コンクリート構造物を対象として用いられる非破壊検査手法について整理し、PC グラウトの非充填部の推定に用いられる方法について報告した。超音波法は、コンクリート内部での減衰が大きく低い周波数の超音波を用いるため指向性が悪く、反射法ではなく透過法を用いてグラウトの非充填部を推定した例を示した。計測には共振周波数 50kHz の発・受振子を用いた。その結果、非充填部では明らかにみかけの伝搬速度が低下し、推定が可能であることを示した。

吉田ら¹⁷⁾は、コンクリートの超音波伝搬試験を行うと同時に、その伝搬状況を解析的に視覚化することを目的とし、数値解析による検討を行った。解析では、周波数 200 kHz の場合、周波数が 28 kHz に比べて全体的に変位応答が小さく、実験では信号情報が欠落する可能性が高いこと、波は境界上あるいは境界に達した後に複雑な伝搬をすることを明らかにした。

原ら¹⁸⁾は、超音波を利用したコンクリート内部調査法により、広帯域超音波法(WUT)の判定精度を検討することを目的として2つの実験を行った。その結果、新設橋梁のPCグラウト注入作業中における計測で、完全にグラウトが充填されるとスペクトル強度がほぼ一定値に収束することから、WUTがPCグラウト充填確認に有用であることを示した。また、6本のケーブルを有したPCグラウト充填後の大型供試体を用いて、WUTのPCグラウト充填判定結果を実際の充填状況と照合した結果、WUTによってPCグラウト欠陥の有無を判断できるものであることを示した。

森濱ら¹⁹⁾は、新設の鉄筋コンクリート構造物の性能を確認するために、非破壊試験によって構造物を直接検査する方法として超音波法を用いた圧縮強度推定を行った。実験には擁壁形状のL型供試体を用い、材齢を1週~1年と変化させて計測を行った。実験では表面走査法により伝搬時間を測定することによってコンクリート内部の音速分布を推定し、内部音速から強度推定を行なった。その結果、内部音速は、材齢の進行に伴い増加し、壁状部材のように上下の強度差と同様に音速差も推定できるなど、強度特性と同様の傾向を有していることを明らかにした。

Krauseら²⁰⁾は、PCストランドを含む場合にシース管内のグラウトの欠陥が多くみられたことから、異なる界面での超音波の反射特性を把握するため、厚さ0.5mmから40mmの鋼板および空隙を有したポリエチレン板を用いて超音波イメージング法によって実験を行った。その結果、0.5mmおよび2mmの鋼板の背面にPC鋼より線が撮影されることを示し、シース管内の空隙における超音波反射率が、グラウトや鋼板ではなくPC鋼より線に依存していることを示した。

堀ら²¹⁾は、超音波法によるPCグラウトの充填状況調査の測定精度向上を目的として、供試体を用いたPCグラウト充填調査を実施した。実験には、シースかぶり厚70mmと170mmの角柱供試体を用いた。実験結果より、波形の分析方法の違いによって充填判定に用いる卓越周波数が異なり、判定結果に影響を与えることを明らかにした。また、判定結果に影響を与えるパラメータを削孔調査により適切に設定することで精度向上することを確認した。

中畑ら²²⁾は、健全なコンクリートを対象とし、超音波の伝搬速度(音速)と骨材の存在による多重散乱による周波数と減衰の影響調査を目的として数値モデルと供試体を用いた実験により検証した。数値モデルでは、3次元大規模波動解析として動弾性有限積分法(EFIT)に基づく数値シミュレーションを行った。セメント硬化体に水が含まれている場合、音速は増加するものの、W/Cの増加による変更量よりは、影響が小さいことを実験で明らかにした。また、骨材率を体積の10%、30%、50%と変化させた場合、骨材量が多いほど受信波の到達時間が早くなる(音速が早くなる)こと、骨材量が多いほど超音波が散乱し受信波形の振幅が小さくなることを数値シミュレーションと実験のいずれからも明らかにした。

濱岡ら²³⁾は、通常の超音波法と比べて幅広い周波数を使用するWUTを用いたPCグラウトの充填調査システムと実橋での調査結果データをまとめて報告した。WUTによる充填不足検出精度は、充填確認精度より低い結果となっており、これは、鉄筋などからの高周波成

分の反射波によるものと考えられることを示した。また、全判定数にしめる充填、未充填と判別できない判定が330箇所中、150箇所あったことを示した。これらの原因として、コンクリート表層部の劣化、探査位置と内部鉄筋との干渉などが考えられることを示唆した。さらに、WUTでは、計測時に接触媒質を塗布するため計測跡が残る場合があり、接触媒質の使用が不要となるドライ探触子の開発が望まれることを述べた。

大島ら²⁴⁾は、コンクリート構造物の表層にある欠陥を対象として欠陥の大きさや表面からの深さと打音法により得られる特性値との関係を明らかにするため、2次元のFEM解析と供試体を用いた実験を行った。その結果、欠陥の直径が大きいほど最大振幅値は大きくなり、周波数分布においては弾性波の反射に寄与する面積が大きくなること、供試体上面と欠陥を往復する波の成分が増加して高周波のピークがより強調されることを報告した。

大島ら²⁵⁾は、シース内の空隙が弾性波に与える影響を明確にするため、モルタルとコンクリート内部を透過し、シースを反射する弾性波の周波数特性について数値解析と実験により明らかにした。実験に用いた供試体にはグラウト充填と未充填を模擬し、探触子には中心周波数500kHzの直径40mmの探触子を用いて反射法で計測を行った。実験の結果、シース内に空隙が存在した場合、シース径に対応する波長の弾性波が反射されること、さらに、シース径よりも小さい波長は骨材による散乱減衰で検出されにくいことを示した。

2.4 その他の非破壊調査技術

岩波ら²⁶⁾は、コンクリート中の弾性波伝播挙動を明らかにするため、骨材、マトリックス部分の特性、マイクロクラックをパラメータとして、これらの不均一性が弾性波伝播速度と周波数特性に及ぼす影響を実験的、理論的に検討した。その結果、透過弾性波の周波数特性では、骨材最大寸法が大きくなるにつれて高周波帯域の減衰が顕著となる結果を明らかにした。また、コンクリート中のマイクロクラックや骨材界面性状は弾性波の伝播速度には影響が小さいものの、周波数特性を大きく変化させることを明らかにした。

野崎²⁷⁾は、超音波伝播速度法を非破壊試験へ適用するため、コンクリートの含水比、吸水率、内部クラックをパラメータとして実験的検証を行った。水セメント比の異なる2種類のΦ10×20cmの円柱供試体を水中養生し、飽水状態から乾燥過程における超音波伝播速度の変化状況を測定・検証した。測定の結果、コンクリート中の含水率1%の減少で超音波伝播速度が90m/s減少することを明らかにした。また、コンクリートの上下方向の内部粗密度の差に起因した吸水率による超音波伝播速度を検証するため、150×150×530cmの角型供試体で水中養生後から乾燥過程における測定を行った。測定の結果、吸水率1%に対して音速が130m/s減少する結果を示し、コンクリートの含水率および吸水率が超音波の伝播速度に影響を及ぼすことを明らかにした。

Martinら²⁸⁾は、1200mmの供試体および10mのはり供試体を用いてPCグラウト充填調査に用いる超音波断層撮影法の新技術の適用性検討を行い、得られた飛行時間型の断層撮影データがポストテンションPC橋のグラウトを調査するために非常に優れていることを

示した。

Iyer ら²⁹⁾は、ポストテンション橋の腐食および空隙検出などによる構造健全性検査を目的として、代表的なポストテンション供試体を対象に超音波 C スキャンイメージングを用いた実験を行った。その結果、撮影された画像よって腐食・空隙を検出および検証することができ、超音波 C スキャンイメージングによって他のポストテンション構造物においても適用できることを示した。

青木ら³⁰⁾は、PC 鋼材が破断した場合の安全性について、その性状を明らかにするため、供用後 40 年経過した PC 桁の材料特性、PC グラウト充填状況を調査するとともに、PC グラウト非破壊検査の適用性について検証した。実験にはシースカぶり厚 98mm の実物大供試体を使用した。非破壊検査の中でも、CR 法を併用した X 線透過法は最も信頼性が高いが部材の薄い区間に限定されること、WUT は探触子間隔 500 mm が必要なため、探査範囲が限定されること、インパクトエコー法は形状変化しない部分に探査範囲が限定されることを明らかにした。

木村ら³¹⁾は、38 年供用されたのち、塩害により損傷を受けて撤去されたポストテンション方式の T 桁を対象として PC 鋼材とグラウトの付着特性のみが寄与する耐荷性状について、載荷試験により検証を行った。PC 鋼材の破断によって付着のみでプレストレスがどの程度残存するかを把握するため、桁端の PC 鋼材定着部をワイヤーソーで桁ごと鉛直に切断し、残った支間中央部で載荷試験を実施した。その結果、グラウトの充填状況が良好であれば鋼材破断が生じても急激な耐力低下は生じず、PC 鋼材とコンクリートの付着が耐荷性能に寄与することを示した。

近藤ら³²⁾は、あらかじめ PC 鋼材全長の半分の領域に PC グラウトを注入した供試体を作製し、グラウト注入を行っていない箇所(PC 鋼材)に対して塩水散布を行った。その後、鋼材が腐食した後にグラウトを注入し、最大 2 年間の暴露試験を行った。その結果、グラウト-空隙部境界部の空隙側において、PC 鋼材の腐食の著しい進行を確認した。これによりシーす内でグラウト未充填が確認された場合、グラウトの空隙の境界部付近で状態確認することの重要性を示した。

服部ら³³⁾は、シーす内部のグラウト充填不足に基づき検出する手法において、観察孔によりシーすの振動を直接観察できる供試体を用いて弾性波の入力方法の違いがシーすの振動特性におよぼす影響について評価した。その結果、機械的入力方法と磁気的入力方法では、空隙の存在によって弾性波の透過および反射特性が異なることを明らかにした。機械的入力方法において、充填部では入力側のシーす表面から反対側シーす面に伝搬する波形エネルギーが大きく、未充填部では、波形エネルギーが小さいことを明らかにした。

Terzioglu ら³⁴⁾は、実物大の U 桁ポストテンション供試体に埋め込まれたシーす内の PC グラウト充填不足の位置とその程度を特定することを目的として、地中レーダー法(GPR)、インパクトエコー法(IE)、超音波エコー法(USE)、および超音波トモグラフィー法(UST)の 4 つの非破壊調査技術で評価を行った。GPR および UST では、ウェブ内の PC 鋼材の概

形を識別できたが、コンクリート内に埋め込まれたシース内の欠陥を見つけるのに効果的でないことを示した。一方、IE および USE では、ウェブ内のシースにおけるグラウト充填不足部分を識別するのに有意な結果が得られたことを示した。

Zhen ら³⁵⁾は、PZT 探触子を用いて時間反転法に基づく PC グラウト充填評価方法を提案した。シース上に PZT を直接的に配置し、シース表面を伝播する応力波を検出した。実験より、ポストテンションシース管における時間反転収束信号のピーク値の変化を観察することで、グラウト充填状況を評価できることを示した。

廣瀬ら³⁶⁾は、新しい非破壊調査技術の構築と普及を目的として PC 鋼材および PC グラウトの非破壊検査手法である、漏洩磁束法 (MFL)、SIBIE 法、広帯域超音波法 (WUT) による調査概要を報告した。MFL は、PC 鋼材が強磁性体であることを利用し、コンクリート表面から永久磁石を用いて PC 鋼材を磁化させたのち、磁束密度の分布波形から PC 鋼材破断箇所を診断する技術である。国内では、ポストテンション方式の T 桁、箱桁、I 桁などで調査実績がある。SIBIE 法では、3 径間のポストテンション T 桁橋での調査実績報告を行った。WUT 法では、標準の反射法に加えて透過法でのスペクトル分布の把握を試行している。さらに探触子とコンクリート表面間に塗布する接触媒質が不要となるドライ探触子での調査を試行中で、現在、かぶり厚 150mm までの探査が可能であることを報告した。

Terzioglu ら³⁷⁾は、ポストテンション方式の PC グラウト欠陥の状態評価のための様々な非破壊評価 (NDE) 技術の評価するため実験的研究を行った。非破壊評価技術を比較・検証するために、実物大のポストテンション桁を製作して実験を行った。供試体は、空隙、水の浸入、劣化したグラウトを含むいくつかのグラウト欠陥を模擬し、サウンディング試験、衝撃弾性波法、低周波超音波、地中レーダー、赤外線サーモグラフィ、電気容量トモグラフィなどの様々な NDE を用いて試験を行った。試験結果と実際の欠陥を比較検証したところ、各手法で PC グラウトの欠陥位置と空隙度を検出できたことを示した。

蒲ら³⁸⁾は、PC ケーブルが破断した PC 橋の耐荷性状を適切に評価するため PC グラウトの充填不足を再現した実物大 PC 桁試験体を用いて、PC ケーブル破断に伴う耐荷性状の変化について検討を行った。全区間で PC グラウトが良好に充填されている PC 桁は、定着部付近で全ケーブルを切断しても PC グラウトの付着によって PC ケーブルが定着され、切断前と同等の耐荷性状を保持することを明らかにした。定着部から 500mm 程度の区間で未充填があるものの、その他の区間は良好に充填されている PC 桁も、切断に伴う影響はみられず、切断前と同等の耐荷性状を保持することを示した。また、全区間において未充填の PC 桁は、切断束数に応じて曲げ剛性が低下することを明らかにした。

【参考文献】

- 1) 諸隈成幸, 有井一晃, 荒居祐基, 池田 茂: デジタル X 線検査システムによる構造物内部検査法に関する考察, 土木学会第 59 回年次学術講演会, VI-104, pp.207-208, 2004.
- 2) 竹内祐樹, 中村英佑, 渡辺博志, 木村嘉富: PC グラウトの充填度評価と再注入に関する基礎的研究, 第 18 回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, pp.365-370, 2009.
- 3) 大島義信, 宇佐美 惣, 石田雅博, 土橋克宏, 上坂 充: 可搬型高出力 X 線による PC 桁内部の可視化実験, 土木技術資料 57-9, pp.34-37, 2015.
- 4) 竹内大智, 小沢壱生, 矢野亮太, 三津屋夕貴, 土橋克広, 上坂 充, 田中泰司, 高橋佑弥, 草野譲一, 吉田英二, 大島義信, 石田雅博: コンクリート橋検査における可搬型高エネルギー X 線源の透過 X 線撮像能力の定量化, 土木学会論文集 E2, Vol.74, No.1, pp.66-79, 2018.
- 5) Jaeger B. J., Sansalone M. J. and Poston R. W.: Detecting voids in grouted tendon ducts of post-tensioned concrete structures using the Impact-Echo method, *ACI Structural Journal*, Vol. 93, Issue 4, pp.462-473, 1996.
- 6) 縦山好幸, 熊野賢二, 宮川豊章, 野村勝義, 今田和夫: 反射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.
- 7) Ohtsu M. and Watanabe T.: Stack imaging of spectral amplitudes based on impact-echo for flaw detection, *NDT & E International*, pp.189-196, 2002.
- 8) 鎌田敏郎, 浅野雅則, 国枝 稔, 六郷恵哲: コンクリート表層部欠陥の定量的非破壊検査への打音法の適用, 土木学会論文集, No.704/V-55, pp.65-79, 2002.
- 9) 川嶋雅道, 鎌田敏郎, 内藤翔太, 六郷恵哲: インパクトエコー法により検出可能なコンクリート中の空隙の大きさと深さについて, コンクリート工学年次論文集, Vol.27, No.1, pp. 1693-1698, 2005.

- 10) 渡辺 健, 橋本親典, 大津政康, 水口裕之: インパクトエコー法における鉄筋の影響に関する考察, コンクリート工学年次論文集, Vol.27, No.1, pp. 1699-1704, 2005.
- 11) 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.
- 12) Niel A., Mihara S. and Ohtsu M.: Imaging of ungrouted tendon ducts in prestressed concrete by improved SIBIE, *NDT & E International*, pp.258-264, 2007.
- 13) 大津政康, 中居陽子, 大久保太郎, 松山公年: 弾性波によるプレストレストコンクリートの未充填グラウト部検出法の改良, 土木学会論文集 E, Vol.65, No.2, pp.208-215, 2009.
- 14) Schoefs F., Abraham O. and Popovics J. S.: Quantitative evaluation of contactless impact echo for non-destructive assessment of void detection within tendon ducts, *Construction and Building Materials*, pp.885-892, 2012.
- 15) Zou C., Chen Z., Dong P., Chen C. and Cheng Y.: Experimental and numerical studies on nondestructive evaluation of grout quality in tendon ducts using Impact-Echo method, *ASCE Journal of Bridge Engineering*, Vol.21, Issue 2, 04015040, 2016.
- 16) 藤井 学, 宮川豊章: PC グラウト充填状況の非破壊探査法, 土木学会論文集, No.402/V-10, pp. 15-26, 1989.
- 17) 吉田秀典, 高橋恵介, 堺 孝司, 山下英俊: コンクリートの超音波伝播に関する数値解析的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.1, pp. 1917-1922, 2002.
- 18) 原 幹夫, 本間淳史, 青木圭一, 廣瀬正行: 広帯域超音波法を用いた PC グラウトの充填度測定, 第 12 回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, pp.61-64, 2003.
- 19) 森濱和正, 山口順一郎, 山口達夫, 奥 紀仁: 超音波法を用いたコンクリート内部の音速分布測定による圧縮強度推定方法の提案, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.1, pp. 1917-1922, 2004.

- 20) Krause M., Milmann B., Mielentz F., Streicher D., Redmer B., Mayer K., Langenberg K. J. and Schikert M.: Ultrasonic imaging methods for investigation of post-tensioned concrete structures: a study of interfaces at artificial grouting faults and its verification, *Journal of Nondestructive Evaluation*, Vol. 27, Issue 1-3, pp.67-82, 2008.
- 21) 堀 慎一, 後藤恵一, 渡辺 健, 谷村幸裕: 構造物への適用を想定した超音波法による PC グラウト充てん判定方法の提案, *コンクリート工学年次論文集*, Vol.35, No.1, pp.1831-1836, 2013.
- 22) 中畑和之, 矢野智之, 川村 郡, 斎藤隆泰, 廣瀬壮一: 骨材による多重散乱をコンクリート中の超音波の3次元伝搬シミュレーションと実験波形による検証, *土木学会論文集 A2*, Vol.70, No.2, pp.I_203-I_211, 2014.
- 23) 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, pp.35-40, 2014.
- 24) 大島義信, 宮川豊章: コンクリート透過弾性波の減衰と複雑性に関する基礎的研究, *土木学会論文集 A2*, Vol.72, No.2, pp.I_387-I_397, 2016.
- 25) 大島義信, 眞武俊輔, 楠本秀樹, 河野広隆: PC シースがコンクリート内部を透過する弾性波に与える影響, *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*, Vol.16, pp.119-124, 2016.
- 26) 岩波光保, 大即信明, 二羽淳一郎, 鎌田敏郎, 長瀧重義: コンクリート中における弾性波伝播挙動に関する基礎的研究, *土木学会論文集*, No.627/V-44, pp.223-238, 1999.
- 27) 野崎喜嗣: コンクリートの内部条件が超音波伝播に及ぼす影響, *日本建築学会構造系論文報告集*, No.425, pp. 9-17, 1991.
- 28) Martin J., Broughton K. J. and Giannopolous A., Hardy M. S. and Forde M.: Ultrasonic tomography of grouted duct post-tensioned reinforced concrete bridge beams, *NDT & E International*, pp.107-113, 2001.

- 29) Iyer S., Sinha S., and Schokker A.: Ultrasonic C-scan imaging of post-tensioned concrete bridge structures for detection of corrosion and voids, *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, Vol. 20, pp.79-94, 2005.
- 30) 青木圭一, 渡邊晋也, 三加 崇, 宮永憲一, 睦好宏史: 供用後 40 年が経過した PC 桁の性状から推定される PC 橋の性能評価, 土木学会論文集 E2, Vol.71, No.3, pp.283-302, 2015.
- 31) 木村嘉富, 石田雅博, 宇佐美惣, 花井 拓, 本間英貴, 吉田英二, 松沢政和: 塩害により損傷を受けたポストテンション PCT 桁の耐荷力評価, 構造工学論文集, Vol.62A, pp.837-849, 2016.
- 32) 近藤拓也, 村田一郎, 山本貴士, 湯淺康史, 宮川豊章: 暴露試験に基づく腐食 PC 鋼材へのグラウト再注入の防食効果, 材料, Vol.65, No.1, pp.97-103, 2016.
- 33) 服部晋一, 鎌田敏郎, 内田慎哉, 朝倉 響, 寺澤広基: 弾性波の入力方法と PC グラウト未充填部の検出能力との関係に関する基礎的研究, 土木学会論文集 E2, Vol.73, No.2, pp.239-250, 2017.
- 34) Terzioglu T., Karthik M. M., Hurlebaus S., Hueste M. B. D., Maack S., Woestmann J., Wiggenhouser H., Krause M, Miller P. K. and Olson L. D.: Nondestructive evaluation of grout defects in internal tendons of post-tensioned girders, *NDT & E International*, pp.23-35, 2018.
- 35) Zhen. T, Linsheng. H, Weihang. G, Gangbing. S and Hongnan. L: Grouting monitoring of post-tensioning tendon duct using PZT enabled time-reversal method, *Measurement*, pp.513-521, 2018.
- 36) 廣瀬 誠, 山田雅彦, 木下尚宜: PC 鋼材および PC グラウトの非破壊検査手法 (特集 PC 鋼材の維持管理技術), プレストレストコンクリート, Vol.60, No.6, pp.48-53, 2018.
- 37) Terzioglu T., Karthik M. M., Hurlebaus S., Hueste M. B. D.,: Nondestructive evaluation of external post-tensioning systems to detect grout defects, *ASCE Journal of Structural Engineering*, Vol. 145, Issue 1, 05018002, 2019.
- 38) 蒲 和也, 渡邊晋也, 吉川直志, 斉藤成彦: PC ケーブルの破断が PC 桁の耐荷性状に及ぼす影響, 構造工学論文集, Vol.66A, pp. 725-732, 2020.

第 3 章

WUT の特徴と適用性の検証

第3章 WUT の特徴と適用性の検証

3.1 WUT を用いたグラウト充填調査の原理

WUT は超音波を用いた PC グラウト充填探査手法である。超音波を用いる非破壊調査手法では、発信探触子と受信探触子の設置位置によって図-3.1 に示す、透過法と反射法の二手法に大別される¹⁾。

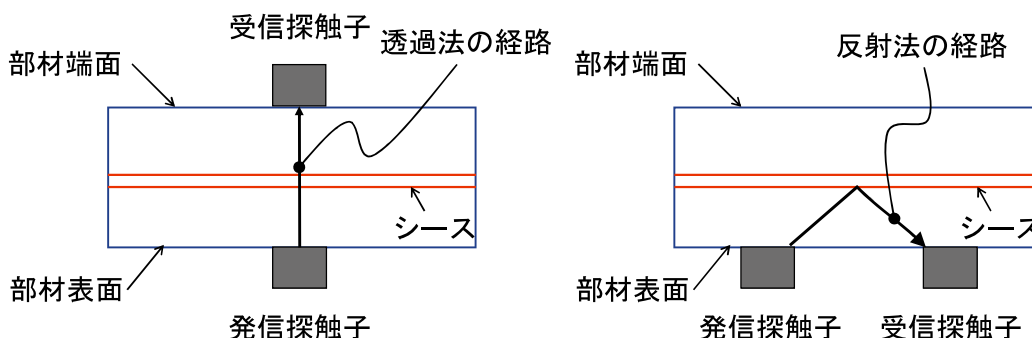


図-3.1 透過法と反射法の概念図

表-3.1 物質ごとの音響インピーダンス

音を伝える物質	密度 (kN/m ³)	音速 (m/s)	音響インピーダンス (kN/m ² ・s)	対コンクリート比	備考
空気	0.01	331	4.187	0.00004	
水	9.81	1452	14,239.256	0.13724	
鉄	77.08	5950	458,627.601	4.42032	
鋼製シース	75.51	5900	445,516.110	4.29395	
PEシース	8.83	2800	24,712.758	0.23819	
コンクリート	22.56	4600	103,754.357	1.00000	
接触媒質	14.35	2066	29,641.168	0.28569	
グラウト	21.57	3700	79,826.131	0.76938	

WUT を用いたグラウト充填調査は、反射法により充填判定を行うものである。このため部材の片側から調査可能で外部足場設備が不要となるため、PC 箱桁橋でしばしば用いられている。超音波の反射波は、物体の密度と音速の積で表される音響インピーダンスと相関があることが知られている²⁾。表-3.1 に物質ごとの音響インピーダンスの一覧を示す。コンクリートやグラウトの音響インピーダンスは $80 \times 10^3 \sim 100 \times 10^3$ kN/m²s 程度であるが、空気は 5×10^3 kN/m²s 以下と極めて小さく、インピーダンスの差が大きい物質の境界面では波の

反射率が大きくなる特性を用いて、WUT ではグラウトの未充填部を検出することができる³⁾。

3.2 WUT の特徴

WUT では、超音波発生装置と専用ソフトウェア（以下、解析ソフト）を含む計測・解析用パソコン、発信・受信探触子を用いる。超音波発生装置の仕様は、探傷周波数範囲 2.5~1000 kHz、探触子印加電圧 100 V、増幅度 20~60 dB である。WUT では、超音波発生装置の内部基板によって探触子内部に設けられた圧電素子を振動させて弾性波を発生させる仕組みとなっている。一般的な超音波法では、単一の中心周波数もしくは、狭い帯域の探触子を用いている。PC グラウト充填探査では、対象となるシースに加えてコンクリート内部の粗骨材や鉄筋など大きさの異なる材料でも波が反射するため、一般的な周波数の発信・受信探触子では明確な充填判定が困難となることがあった。

このため、WUT では、2.5~1000kHz の帯域の広い周波数の波を発信し、得られた受信波から対象物に応じた周波数帯域をフィルタリングし、周波数のピークを検証する手法を用いている。一般的な超音波法のスペクトル模式図を図-3.2 に、WUT のスペクトル模式図を図-3.3 に示す。

また、一般的な超音波法で使用する探触子の直径は 10~40mm 程度であるが、WUT で用いる探触子の直径は 76mm（外径 95mm）と大型となっている。大型の探触子を用いることでより大きな帯域の波の発信・受信を可能としている⁴⁾。

WUT を含む超音波法では、探触子の印加電圧によって一定の大きさの弾性波を発生させることができるため、鋼球による打撃によって弾性波を発生させる衝撃弾性波法に比べて、再現性が高いシステムといえる。

※探知対象に適した中心周波数をもつ探触子を使う必要がある

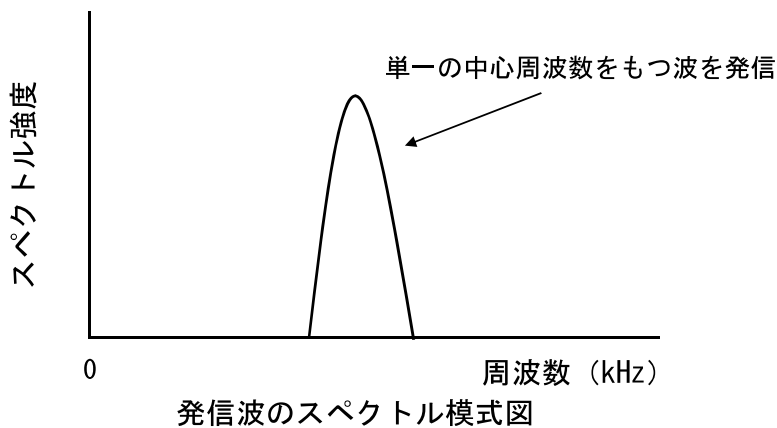


図-3.2 一般的な超音波法の発信波スペクトルの模式図

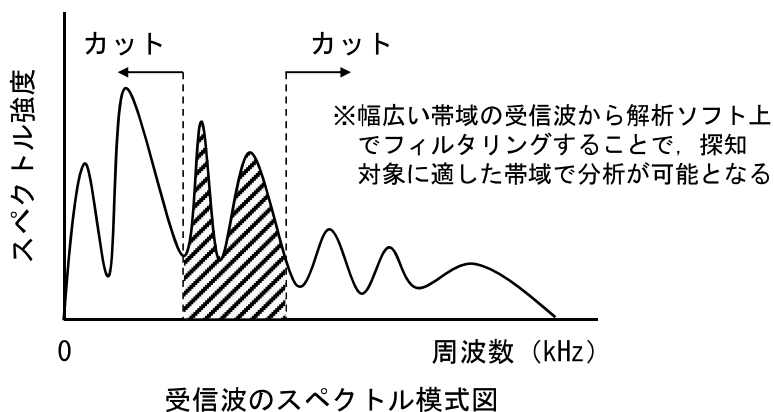
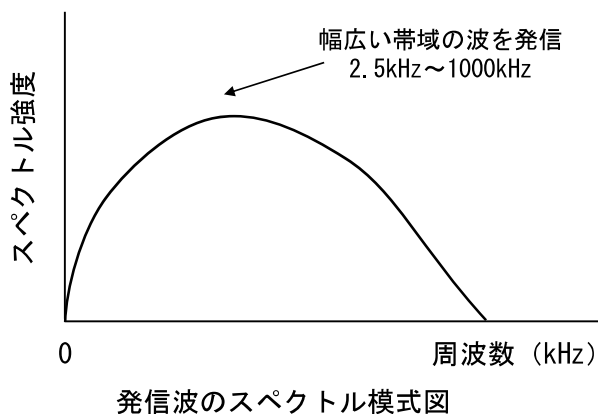


図-3.3 WUTのスペクトルの模式図

3.2.1 WUT に使用する機器の仕様

WUT の使用機器一式を図-3.4 に示し、詳細な仕様を表-3.2 にまとめて示す。

WUT では、パソコン内部にインストールされた解析ソフト（UCM2000）によって PC グラウト探査の制御を行う。このソフトは、

- I) 超音波帯域の弾性波を発生させるための印加電圧やサンプリング点数・周波数などの入力条件
- II) 探触子間隔やかぶり厚などのグラウト調査の計測条件
- III) 受信波の波形収録や収録波形の時間による切り出しと周波数変換などの解析・検証
- IV) 解析結果となる周波数スペクトルのデータ保存

といった主な4つの機能があり、いずれも汎用的なパソコンレベルで設定・操作することができ、現場においても利用できる特徴を有する。

コンクリート内部に弾性波を入力するための装置である発信・受信探触子の内部は、 $\phi 76$ mm の圧電素子、ダンパーから構成される。振動子となる $\phi 76$ mm の圧電素子は、セラミック製で厚みが 4 mm、中心周波数 500 kHz である。また、探触子内部で吸音材として用いるダンパーには、鋼製の鉄板内部に、タンゲステン、ウレタン、水を練り混ぜたものを圧縮成形したものを用いている。探触子の仕様一覧を表-3.3 に示す。

WUT で使用する探触子は、一般的な超音波法で用いられる探触子に比べて振動子寸法が大きいので、指向性が鋭く、シースカぶり厚が大きい部材でもグラウト充填調査が可能となる。探触子の外形寸法は直径 $\phi 95$ mm、厚さ 60 mm、探触子 1 個あたりの重量は 1.4 kg である。なお、計測毎に探触子の表面にシリカとケイ酸ナトリウムおよびグリセリンを主成分とする接触媒質を塗布する。接触媒質の化学成分を表-3.4 に示す。



図-3.4 WUT 装置

表-3.2 超音波発生装置の仕様

探傷周波数範囲	Min. 2.5 kHz – Max. 1.0×10^3 kHz
探触子の印加電圧	1 – 500 V
増幅度	20 – 60 dB
サンプリング数	4096 (Max. 16384)
サンプリング周波数	Min. 78 kHz – Max. 1.0×10^4 kHz
パワーサプライ	AC 100 V
本体外観寸法	200 mm × 230 mm × 72 mm
重量	2.8 kg

表-3.3 探触子の仕様

	WUT 探触子
圧電素子	セラミック (径 76 mm × 4 mm 厚)
中心周波数	495.64 kHz (490.85 - 500.32 kHz)
制振ダンパー	タングステン・ウレタン
外殻の材質	鋼
外形寸法	径 95 mm × 60 mm 厚
重量	各 1.4 kg

表-3.4 接触媒質の化学成分

シリカ	SiO ₂	52.2 mass %
酸化ナトリウム	Na ₂ O	9.89 mass %
水	H ₂ O	21.3 mass %
エチレングリコール	C ₂ H ₆ O ₂	2.99 mass %
グリセリン	C ₃ H ₈ O ₃	14.7 mass %
ジグリセリン	C ₆ H ₁₄ O ₅	29.9 mass %

3.2.2 WUT を用いたグラウト調査の手順

WUT を用いた PC 鋼材のグラウト調査は、以下の I～V に示す手順で行われる。グラウト調査のフローを図-3.5 に、調査手順を図-3.6、調査状況を図-3.7 に示す。

- I) 電磁波レーダを用いて埋設されたシースの位置をコンクリート表面にマーキングする。電磁波レーダの装置例と電磁波レーダの測定結果例をそれぞれ図-3.8、図-3.9 に示す。
- II) 中間隔壁など部材厚が計測可能な場所で、部材を挟み込むように受・発信探触子を設置し、透過する音速を計測する。計測の際には、探触子の表面にシリカとケイ酸ナトリウムおよびグリセリンを主成分とする接触媒質を塗布する。
- III) 探触子をシースのマーキング位置に圧着する。コンクリート表面を伝播する表面波とシースからの反射波の干渉を防止するため、かぶり厚が 150mm 以上の場合は探触子間隔 200mm、かぶり厚が 150mm 以下の場合は探触子間隔 500mm を標準としてグラウト充填調査を行う。
- IV) UCM2000 のソフトを起動し、発信探触子からパルス波を発信し、受信探触子で 4096 (2¹²) 点～16384 (2¹⁴) 点の反射波（時系列波）のデータ収録を行う。
- V) データ収録後、コンクリート表面に残った接触媒質をスクレーパーですくい取り、水を含ませたスポンジで拭き上げる。以降、シース直上で計測を合計 4 回繰り返して加算波ソフト上で解析を行って充填判定を行う。

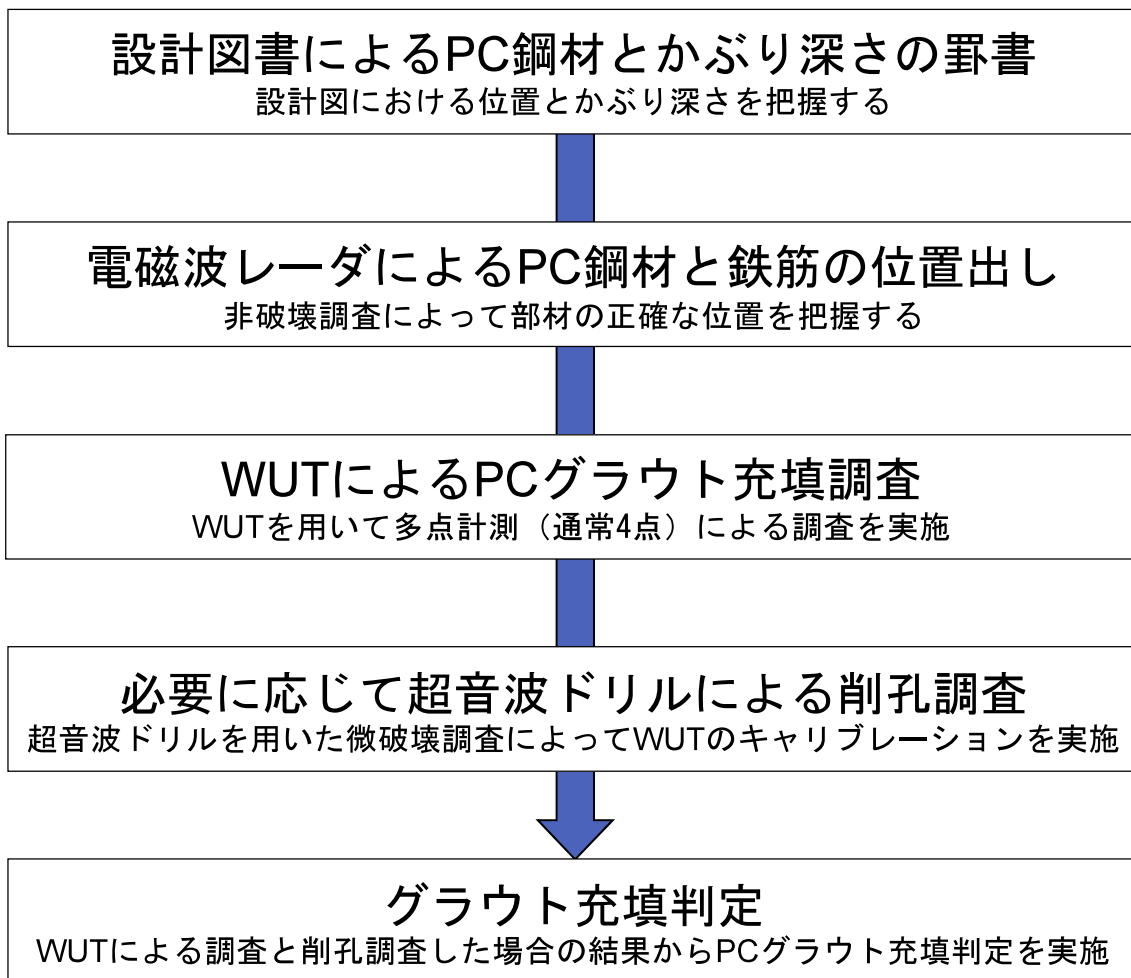


図-3.5 WUT を用いた PC グラウト調査のフロー

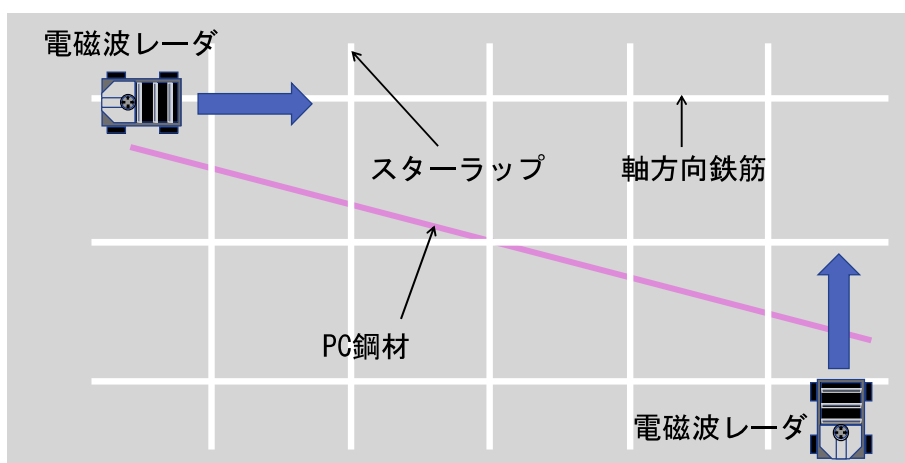


図-3.6 WUT を用いたグラウト調査手順の概要



図-3.7 WUT を用いたグラウト調査状況



図-3.8 電磁波レーダの例（ストラクチャスキャン）⁵⁾

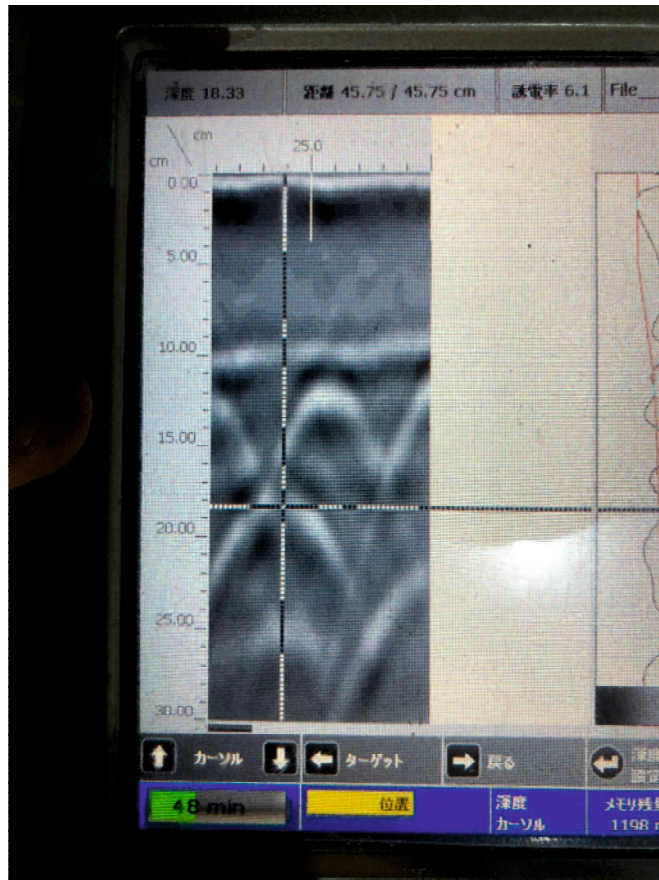


図-3.9 電磁波レーダ（ストラクチャスキャン）を使ったケーブル位置の測定結果例

3.2.3 多点計測による加算波の算出

一般的な超音波を用いた非破壊検査では単一周波数や帯域の狭い波を用いるため、コンクリート内部の粗骨材や鉄筋によって反射波が発生して明確な PC グラウトの充填判定が困難であった。これに対し、WUT を用いたグラウト調査では、2.5～1000 kHz の帯域の幅広い周波数を使用する。これは、波の低周波帯域では部材内部への透過性が増し、高周波帯域では分解能と指向性が増す性質を利用したものである。また、WUT では、コンクリート内部の粗骨材や軸鉄筋、スターラップ鉄筋などで反射した不要な波をできるだけ排除し、グラウト充填調査に必要なシースからの反射波のみを取り出すため、4 点の計測データを加算する多点計測法を用いる⁴⁾。多点計測では、調査対象のケーブル上で発信探触子と受信探触子をスライドさせ、異なった位置で 4 回の計測データを収録する。探触子はかぶり厚の等しいケーブル直上を移動するため、探触子とシースの相対位置は一定であるが、探触子と粗骨材や内部鉄筋の相対距離は測定箇所ごとに異なる。4 点で計測した反射波（時系列波）を加算した加算平均波を算出することで不要な波を低減でき、シースからの反射波のみを増幅できる。多点計測の概略図を図-3.10 に示す

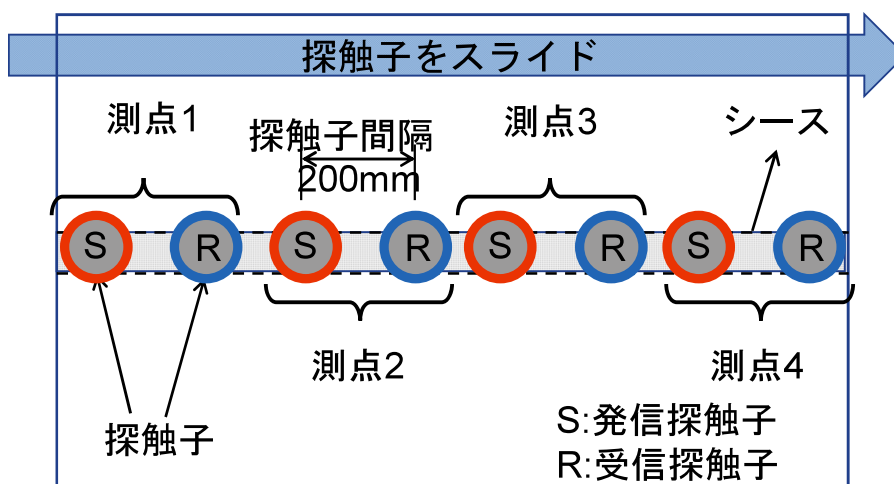


図-3.10 多点計測の概略図

3.2.4 UCM2000 を使用した一般的なグラウト調査の解析方法

UCM2000 を使用した一般的なグラウト充填調査時の具体的な解析手法を以下に列記する

4),6). グラウト充填調査の具体的な手順を図-3.11 に、解析のフローを図-3.12 に示す。

- I) 1~4 点目の受信波形を加算平均して加算平均波 $G(t)$ を求める。
- II) 加算平均波 $G(t)$ に対して高速フーリエ変換 (FFT) 処理を行い、周波数スペクトル $F(f)$ を求める。
- III) f_k を中心振動数とする Sin 関数 $A(f)$ を周波数スペクトル $F(f)$ に乗じて周波数スペクトル $FA(f)$ とする。 f_k には、探触子間隔 500mm の際には、標準分析として 60kHz、探触子間隔 200mm の際には、低周波分析として 30kHz を用いる。この処理により、シーす反射波と干渉を生じやすいコンクリート表面を伝わる周波数 20kHz 程度の表面波のスペクトル成分を低減し、充填判定に必要なシーすからの反射波のスペクトル成分を増幅する効果を得る。
- IV) 上記で得られた $FA(f)$ を再度、時系列波形 $GA(t)$ に変換し、充填判定に必要なシーすからの反射波成分を抽出するため台形窓関数 $TGC(th, ta)$ を用いた処理を行い、分析用の波形 $GB(t)$ を得る。窓関数にはさまざまな形状があるが、周波数の分解能とスペクトル分布をなだらかにするため台形の窓形状を採用している。台形窓関数の変数のうち、 ta は窓関数による抽出時間幅で 20~30 μs を標準としている。 th は窓関数による抽出開始時間で、充填判定に用いるシーす相当位置から、前述の ta に相当する 20~30 μs だけ早めた値とし、一般的にシーすのかぶり厚 $d_s \pm 2 \text{ cm}$ を計測範囲として設定している。なお、シーすからの反射波の到達時刻 t_{pd} は以下の式(3.1)で与えられる。

$$t_{pd} = 2 \times \sqrt{c_d^2 + (a - \phi / 2)^2} / V_l \quad (3.1)$$

ここに、 t_{pd} : シーす反射波の到達時間 (s), c_d : シーすのかぶり (m), a : 探触子間隔 (m), ϕ : 探触子内部の圧電素子の直径 (m), V_l : コンクリート中の超音波伝搬速度 (m/s) である。

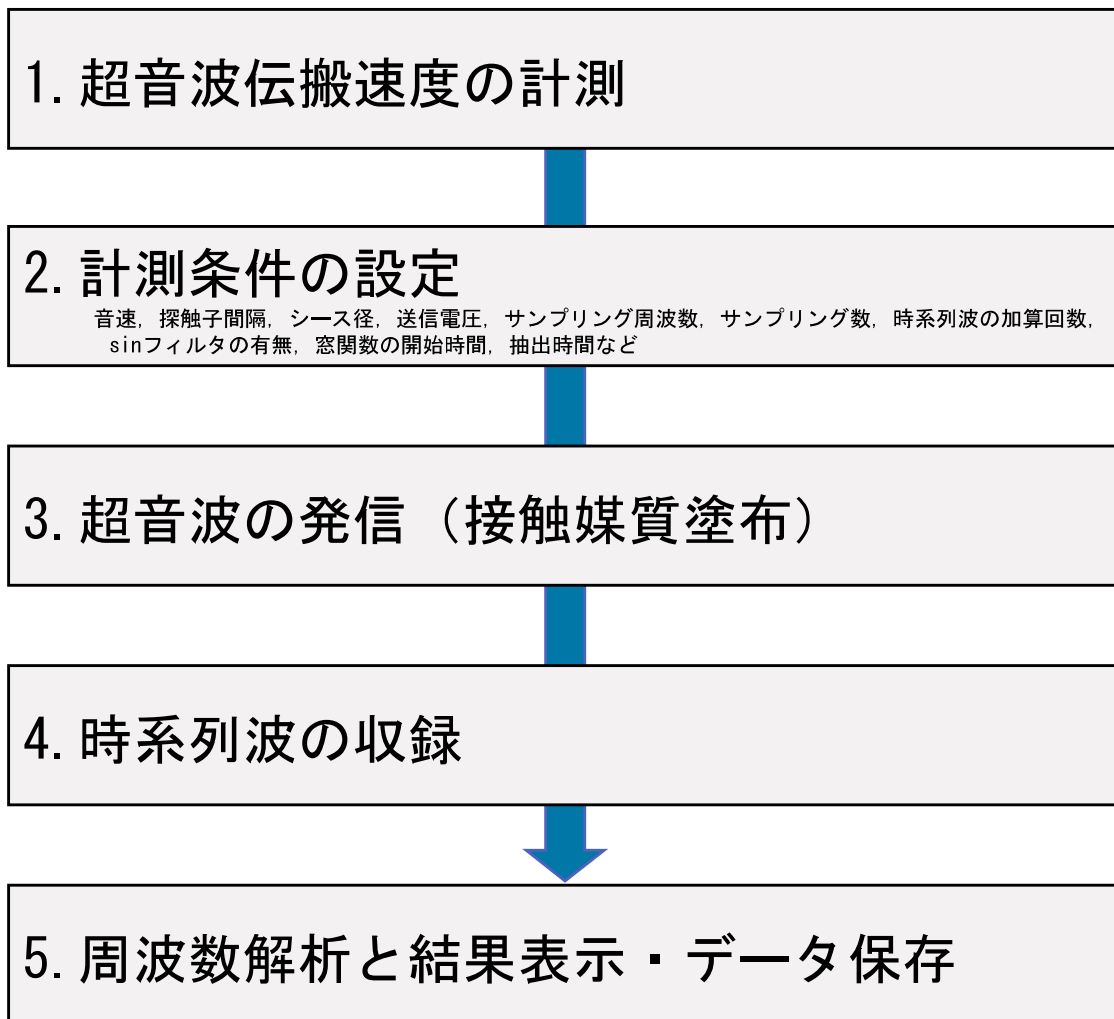


図-3.11 グラウト充填調査の具体的手順

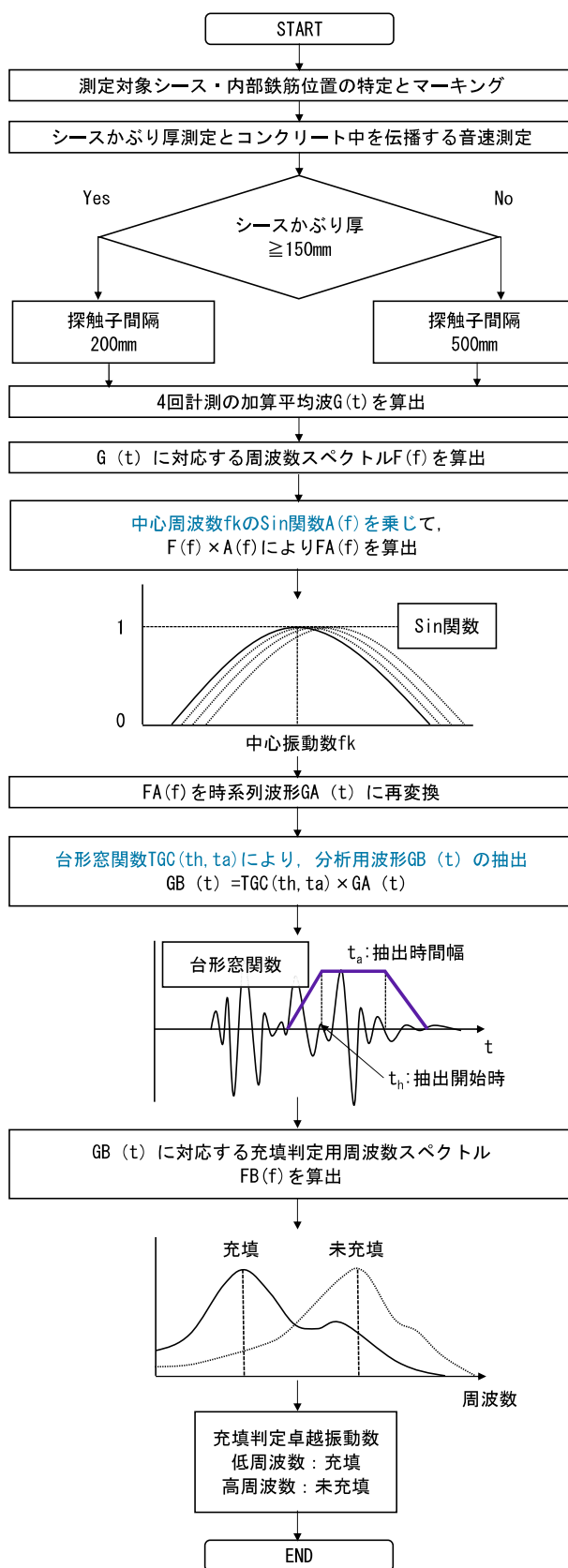


図-3.12 WUT を用いたグラウト充填調査の解析フロー⁶⁾

3.2.5 グラウト充填調査の判定方法

充填判定では、分析用時系列波形 $GB(t)$ を判定用周波数スペクトル $FB(f)$ に変換して周波数スペクトルの分布と周波数のピークで判定を行う^{4),6)}。窓関数による波形の抽出と充填判定方法の概要を図-3.13 に示す。既往の研究より、探触子間隔 500mm の標準分析では PC グラウトが充填されている場合は 10~20kHz 付近、未充填の場合は 70kHz 以上、探触子間隔 200mm の低周波分析では充填の場合が 10~20kHz 付近、未充填の場合が 40~50kHz 付近の周波数帯で卓越する振動数が確認されている。標準分析での充填判定例を図-3.14 に示す。

a) の未充填では、黄色線で示したシース相当位置（シースのかぶり深さに計測誤差を考慮した $\pm 20\text{mm}$ の範囲）から後方の区間に対して、左の立体画像、右の平面画像ともに 80kHz 付近の高周波でピークが連続している。一方、b) の充填では、シース相当位置から後方の区間に対して 20kHz 付近の低周波でピークが連続している。

一般的な WUT を用いた PC グラウト充填調査の充填判定では、1) 上記のシース位置とその後方の周波数の連続性と、2) 条件によって実施する微破壊による削孔調査結果、を合わせて判断を行っているが、周波数値とその連続性の判断については、判定を行う技術者の経験則によるところが大きい。

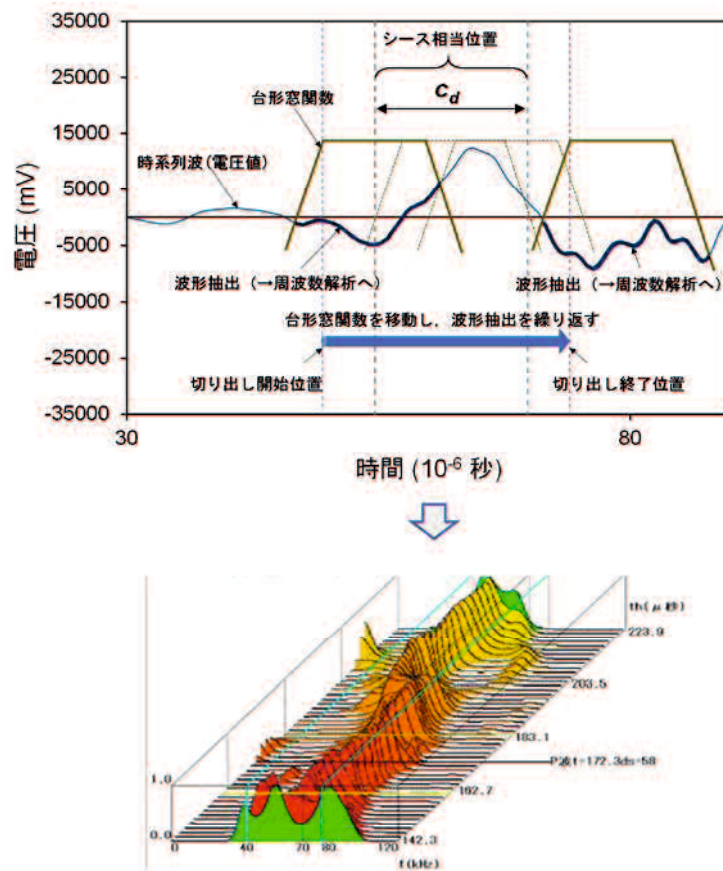
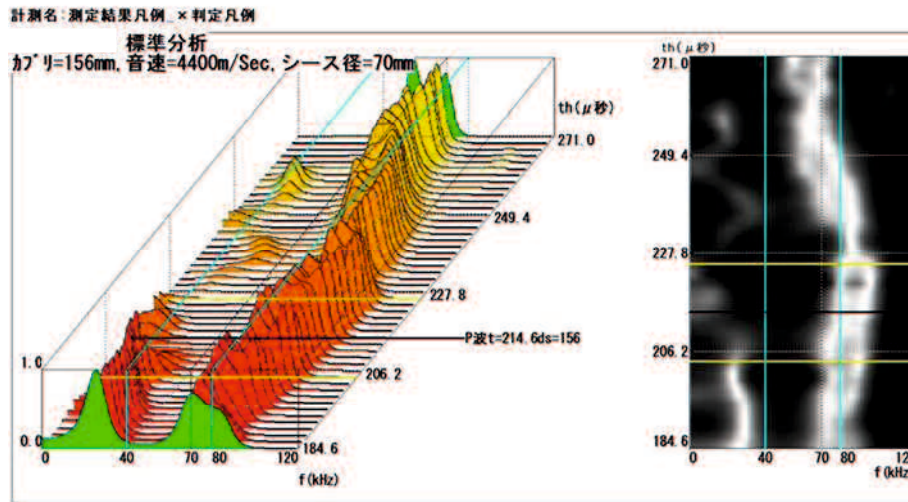
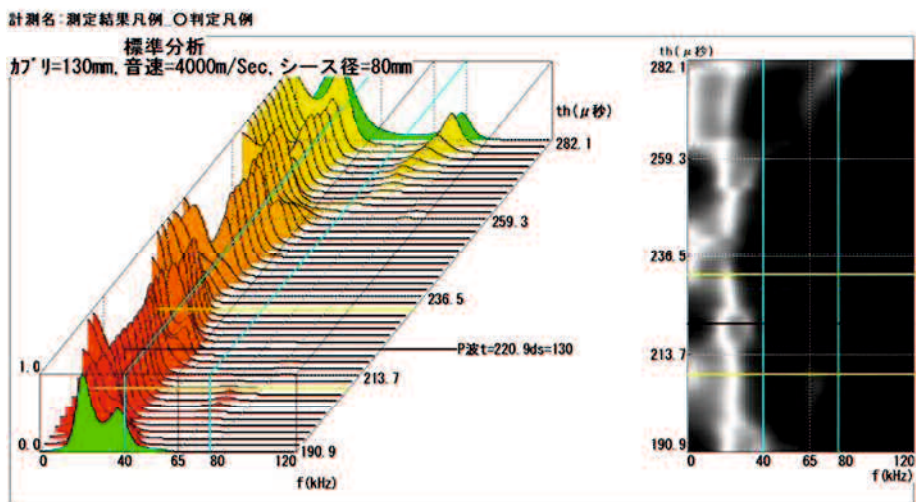


図-3.13 窓関数による波形の抽出と充填判定の概要



a) 未充填判定例



b) 充填判定例

図-3.14 標準分析でのグラウト充填判定例

3.3 WUT と他の非破壊調査技術の適用性の比較

ポストテンション橋の角変化を持つ主ケーブルに対して有効な非破壊調査技術として、WUT のほかに、放射線透過法、衝撃弾性波法などが実用化されている。WUT と比較検証を行うため、放射線透過法、衝撃弾性波法について以下に概説し、さらに適用性について検証を行った。

3.3.1 放射線透過法の特徴

WUT 同様、ポストテンション方式の主ケーブルのグラウト調査に用いられている放射線透過法について特徴を示す⁷⁾。

放射線透過法は、放射線が部材を透過する際に、指数関数的にその強さを失っていく作用を利用して空隙の大きさや位置、対象物と異なる材料を検出する方法である。撮影された画像は、放射線の透過量によって濃淡を示すため、その濃淡から内部の状態を確認する。一般的に放射線には、X 線が用いられる（以下、X 線を用いた放射線透過法を XRT とする）。XRT の発生装置の一例を図-3.15 に、撮影概念図を図-3.16 に示す。XRT を用いたグラウト充填調査では、調査対象部材に一定時間、X 線を照射し、その裏側に設置した感光材料を感光させて、その濃淡から PC グラウト充填および充填不足を判定する。

一般的な工業用 X 線発生装置で撮影可能なコンクリート厚は 500mm が上限とされている。X 線発生装置は、現場への搬入が可能なサイズとして一般的に管電圧 300Kv までの容量の機材が用いられる。装置は高さ約 60cm、重量は約 20kg である。画像の撮影には、部材を透過した X 線を直接工業用フィルムに撮影する方法と工業用フィルムの代わりにイメージングプレート（IP）と呼ばれる版やフラットパネルセンサなどを用いる 2 手法がある。調査可能な部材厚範囲は、対象となるコンクリートの部材厚が大きいほど照射時間が長くなり、点源からの投影のため測定誤差も大きくなる。一般的に X 線の照射時間は、部材厚が 200mm の場合は 5 分未満であるが、部材厚が 500mm のものでは、120 分程度が必要となる。なお、部材厚が大きいほど精度が低下するため、一般的な部材厚の対象は 300mm 程度までであることが多い。

XRT によって撮影された PC グラウト充填画像および PC グラウト未充填画像を図-3.17 に示す。X 線は物質を透過する性質を有しているが、PC 鋼材や PC グラウトなどの固体は X 線を透過しにくく、気体である空隙(PC グラウト未充填部)は X 線を透過しやすい。したがって、図-3.17 に示すように PC グラウトの未充填部は充填部と比較して黒く投影される。撮影された画像を直接目視確認できることが他のグラウト充填調査に用いられる非破壊検査手法と異なる XRT の特徴である。高出力の放射線を使用するため、XRT によって PC グラウト充填調査を実施する際には X 線作業主任者の配置が義務付けられ、放射線による被ばくを防止するため適切な離隔距離の設定と、対象橋梁が道路や鉄道などと交差する場合には、道路の通行止めや作業時間の制約が発生する。また、イメージングプレートを対象とする構造物表面の反対側に設置するため、足場が必須なことに留意する必要がある。



図-3.15 携帯型工業用 X 線発生装置の例⁸⁾

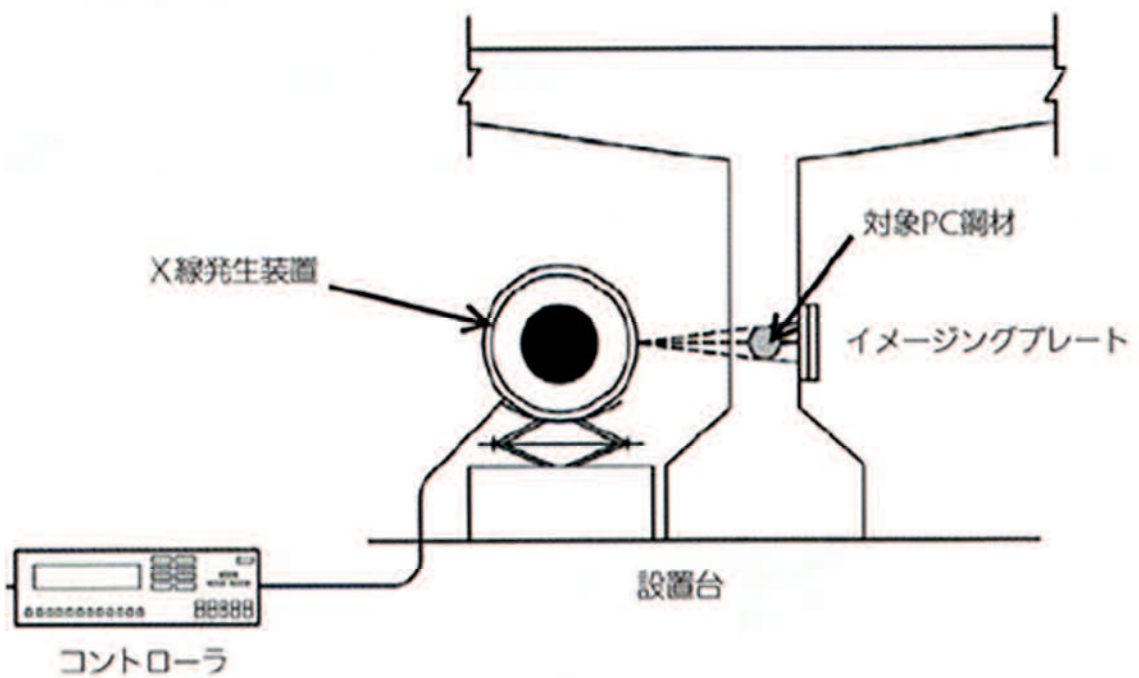
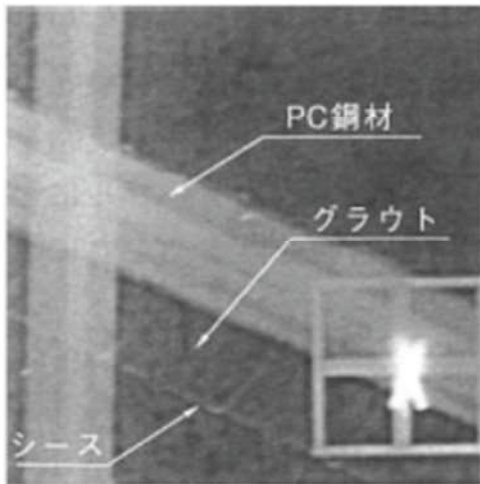
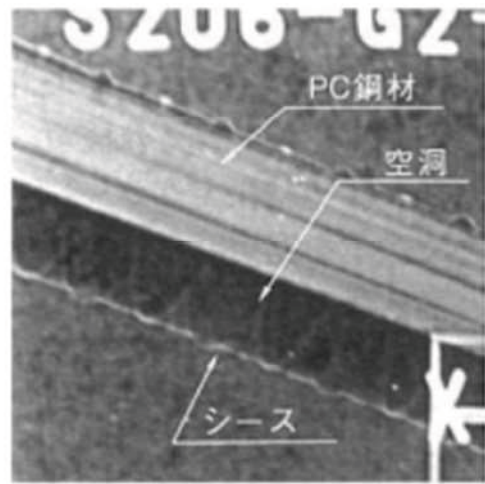


図-3.16 XRTの撮影概念図⁹⁾



a) 健全な場合



b) PC グラウトの充填不足がある場合

図-3.17 XRTの撮影事例⁷⁾

3.3.2 衝撃弾性波法の特徴

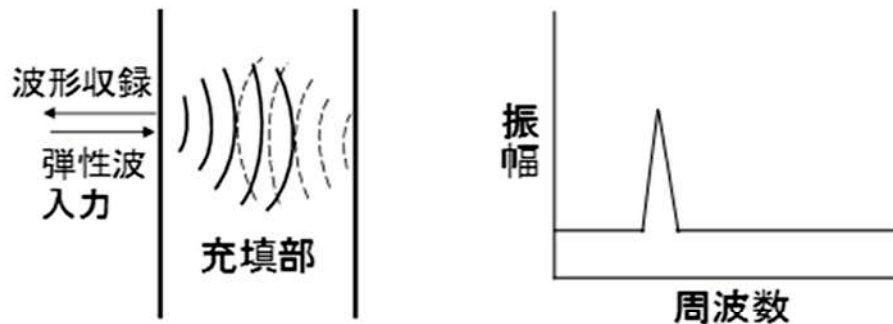
WUT や XRT と同様，ポストテンション方式の主ケーブルのグラウト調査に用いられている衝撃弾性波法について特徴を示す^{7),10)}。

衝撃弾性波法（インパクトエコー法，以下 IE とする）の使用機器を図-3.18 に例示する。機器は弾性波を入力する装置，弾性波を受信するための振動センサおよび受信した弾性波を収録・表示する計測装置から構築されている。IE とは，調査対象となるコンクリート表面から打撃などによって弾性波をコンクリート内部に入力し，共振現象によって発生する周波数をセンサおよび計測装置によって測定・解析をすることによって，PC グラウトの充填状況を調査する手法である。IE による PC グラウト充填調査の概略を図-3.19 に示す。調査対象のコンクリート表面を入力装置で打撃して弾性波を入力した場合，弾性波の縦波成分によってシース管内の空隙部で反射波が発生し，コンクリート表面とシース管内の空隙部を往復するような波（縦波共振現象）がみられる。図-3.19 に示すように，シース管内に空隙が存在する場合，コンクリート表面とシース近傍でエコーが生じるため，2つのピークが検出される。弾性波の入力点付近で得られた周波数スペクトルのピーク位置によって PC グラウトの充填状況を判定する。調査の適用範囲は，一般的に[空隙の大きさ]／[空隙の深さ]が 0.25 程度，つまり，シース径の 4 倍程度までの深さまでとされている¹¹⁾。鋼球によって発生する弾性波の周波数は，鋼球とコンクリート表面の打撃継続時間に関係しており，また，打撃する鋼球の大きさとコンクリートの表面状態によっても影響を受ける。

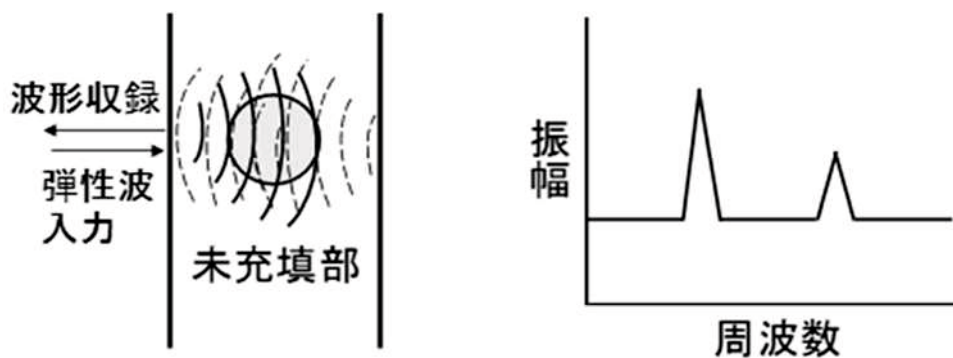


図-3.18 IE の使用機器例¹⁰⁾

このため測定するシースのかぶり厚に応じて鋼球の大きさを選定しなければならない。弾性波のエネルギー量が測定に影響を及ぼすため、かぶり厚が大きい場合は大きな鋼球を、かぶり厚が小さい場合は小さな鉄球を用いることで検出精度が向上するとされる。



a) 充填部



b) 未充填部

図-3.19 IE の PC グラウト充填調査概要図

3.3.3 WUT を用いたグラウト充填調査に関する事例収集

WUT の適用性検証のため、供用中の橋梁で実施した WUT を用いた PC グラウト調査業務成果のうち、かぶり厚さが 250mm 以上の箇所の調査結果を収集した。この調査結果は WUT を用いた非破壊によるグラウト調査の後、ドリルによる微破壊の削孔調査を行い、両者を比較した内容である。調査箇所は 28 カ所、かぶり厚さは 254mm～336mm であった。表-3.5 に示すように、28 カ所のうち 24 カ所で整合しており、整合率は 86%であった。

表-3.5 かぶり厚さ 250mm 以上の事例収集結果

かぶり厚さ: 254 mm – 336mm		実際のグラウトの充填状況	
		充填	充填不足
WUT 調査結果	充填	16 (84%)	3 (16%)
	充填不足	1 (11%)	8 (89%)

3.3.4 WUT と他の非破壊調査技術との適用性の比較

PC グラウト調査手法の適用性検証のため、XRT と IE, WUT を、a) 調査精度、b) 適用範囲、c) 調査コスト、d) 調査時間、e) 安全性の 5 つの観点から比較した。比較に用いた数値は、XRT と IE については、既往の文献と実橋のグラウト充填調査の調査結果を、WUT では実橋での調査結果のみを用いた。調査コストと調査時間については、①橋長 40m の 5 主桁単純 T 桁橋、②橋長 150m の 1 室 2 径間ラーメン箱桁橋、の 2 ケースをモデルとし、ウェブに配置された主ケーブル 40 箇所を調査したと仮定して数値化した。

a) 調査精度

調査精度の比較を表-3.6 に示す。3 手法の調査箇所数にばらつきがあったため、結果は百分率表示とした。WUT の充填に対する精度は、XRT と同様 100%であった。また、未充填に対する精度は、WUT と IE で同程度の結果となった。

表-3.6 調査精度の比較

		実際のグラウトの充填状況	
		充填	未充填
XRT	充填	100%	0%
	未充填	0%	100%
IE	充填	92%	8%
	未充填	22%	78%
WUT	充填	100%	0%
	未充填	27%	73%

b) 適用範囲

適用範囲の比較を図-3.20に示す。XRTは部材厚500mm、シースが部材厚中心に位置する場合はかぶり厚250mmまでの計測が可能である。また、IEは、一般的にかぶり厚200mmまでのグラウト調査が可能である。WUTでは3.3.3より、かぶり厚336mmまで調査結果が得られた。一般にWUTでは調査範囲限界が250mmまでとされているが、3.3.3より、それを超える範囲でも調査可能であることが窺える。

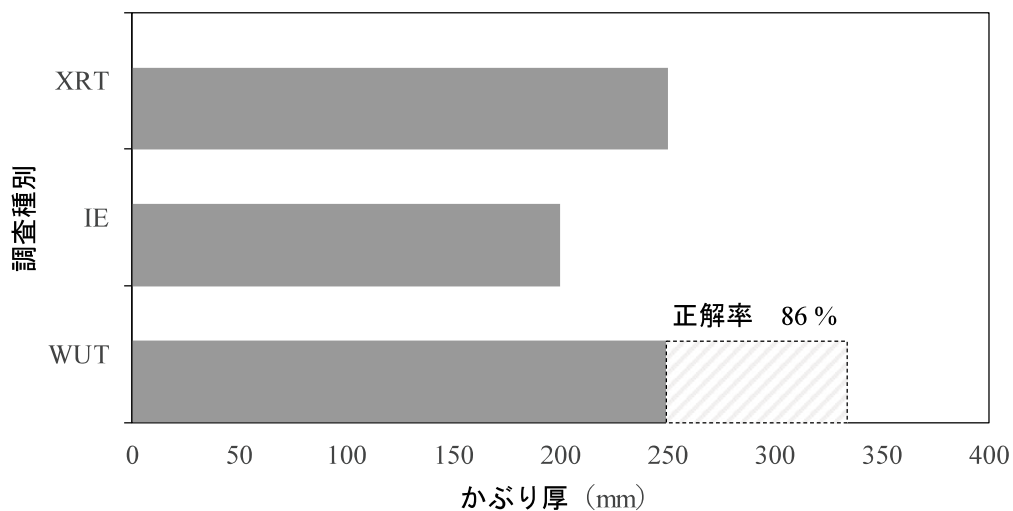


図-3.20 各非破壊検査手法の適用範囲比較

c) 調査コスト

T桁橋と箱桁橋における調査コストと部材厚の比較結果を、それぞれ図-3.21、図-3.22に示す。ここでは、T桁橋に必要な桁下足場および箱桁橋のXRTに必要な主桁側部足場の施工費用を考慮した。T桁橋では、部材厚400mmまでは、3手法とも変わらない結果となった。部材厚500mmでは、X線の1箇所撮影に2時間を要するため調査コストが比較的高くなった。同様に箱桁橋のXRTでは、足場費用が必要となるためコストが高くなる。WUTとIEは箱桁内部からのみの調査が可能のため、コスト面で有利である。

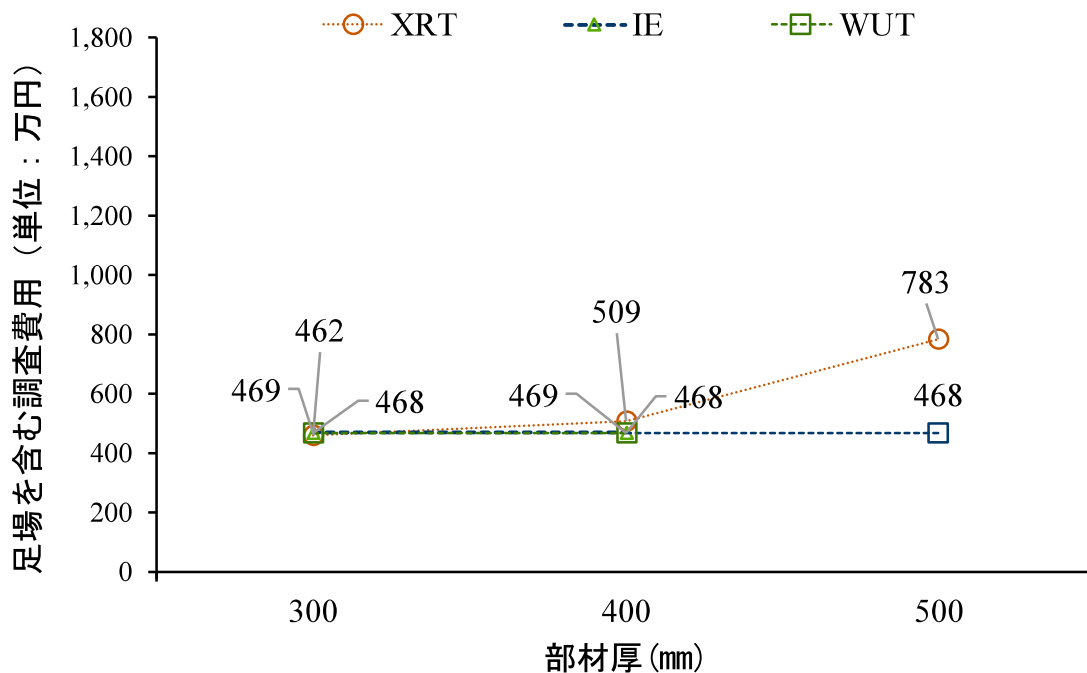


図-3.21 40箇所を調査した場合の単純T桁橋における調査費用の比較

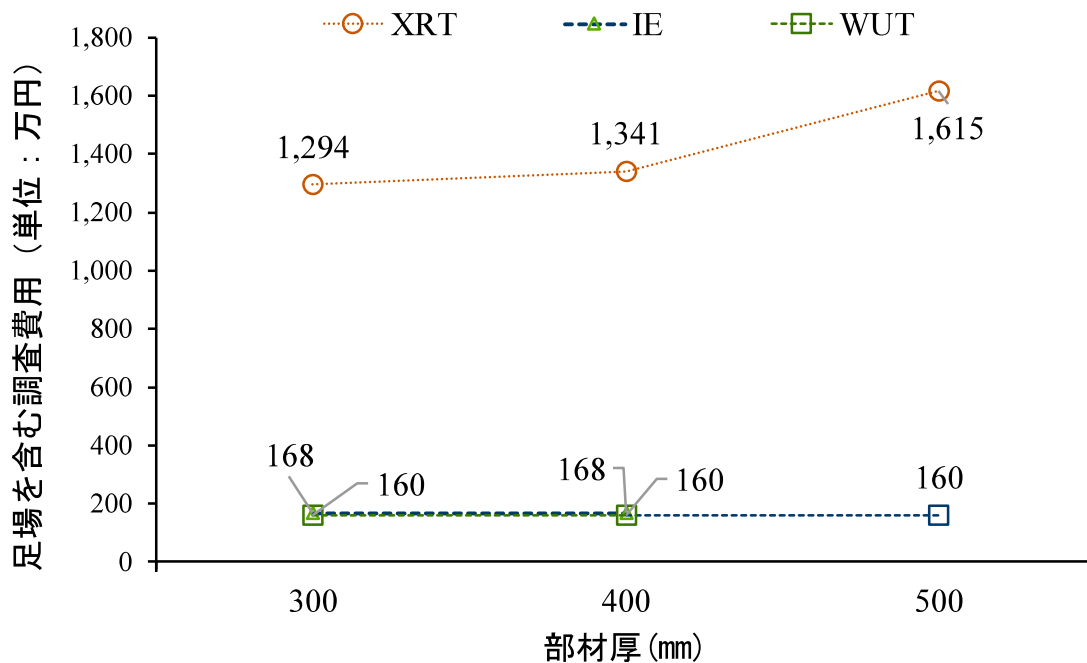


図-3.22 40箇所を調査した場合の2径間連続箱桁橋における調査費用の比較

d) 調査時間と e) 安全性

ここでは調査時間について比較を行った。コスト同様、調査の際に足場が必要な場合は、その組立・解体時間を考慮した。T桁橋と箱桁橋の結果を図-3.23、図-3.24に示す。一般的なIEとWUTを用いた調査業務では、機材の設置から計測、片付けまで含め1調査箇所当たり30分の計測時間を要する。この2つの調査方法は部材厚によらず一定の調査時間であることが特徴である。一方、XRTは部材厚に応じて5分未満から120分とフィルムの感光に時間を必要とする。3手法の調査時間については、コストと同様の傾向が得られた。安全性では、全体の調査日数を少なくすることで足場組み立て解体時のリスク低減も含めて可能な、WUTとIEで有利となる。一方、XRTは放射性物質を扱うため2手法に比べて安全性が劣る結果となった。

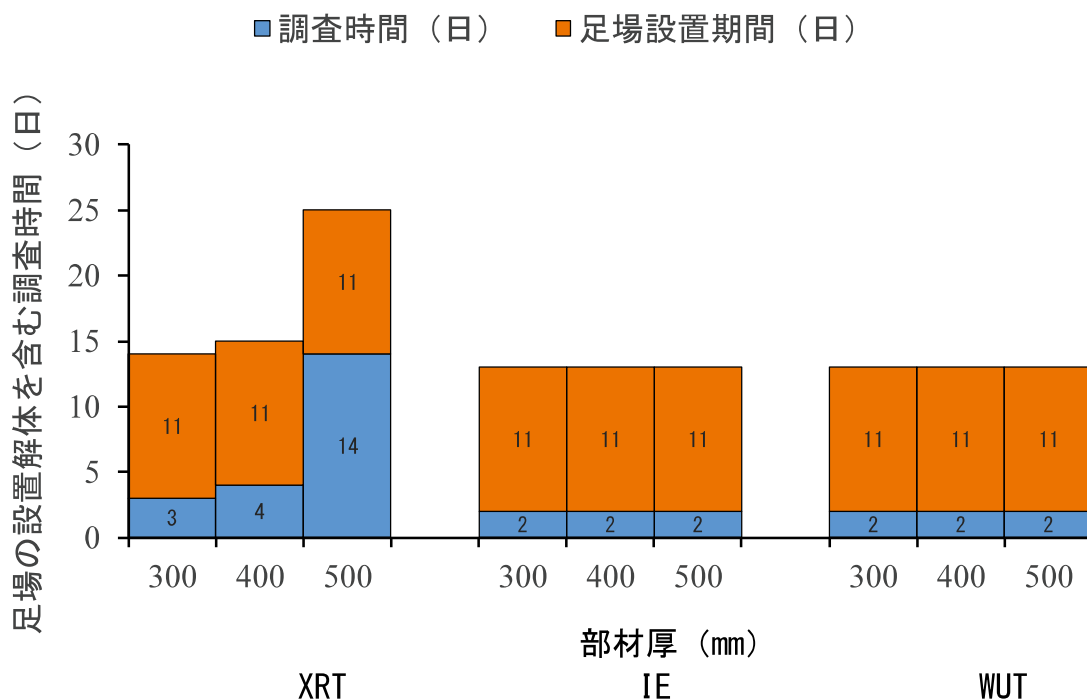


図-3.23 40箇所を調査した場合の単純T桁橋を対象とした調査時間

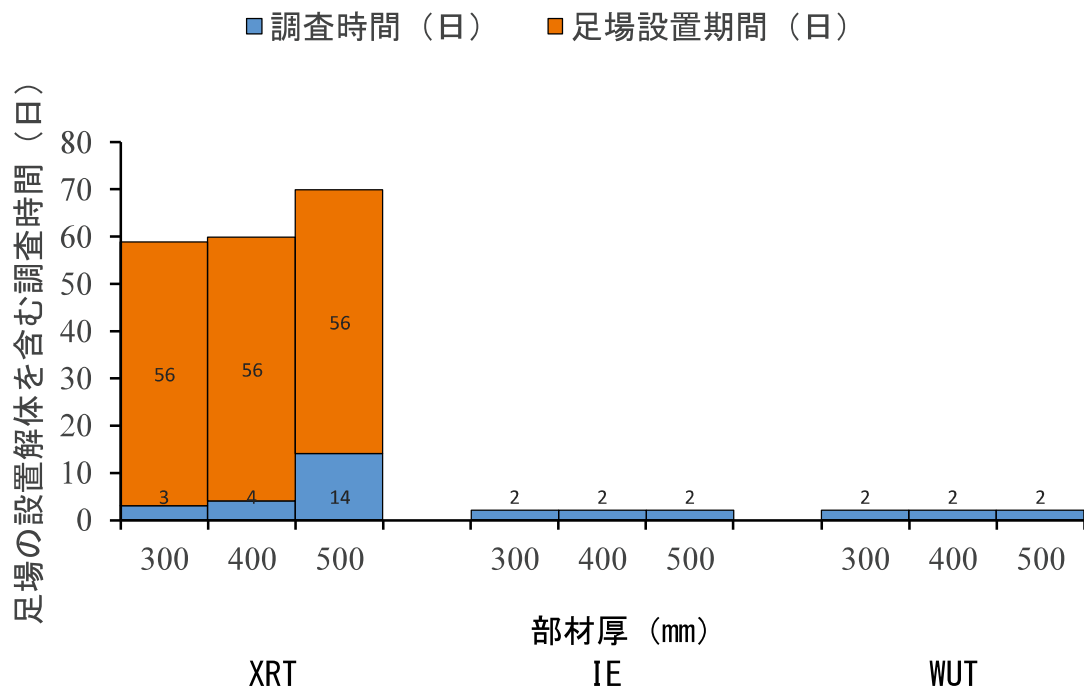


図-3.24 40箇所を調査した場合の2径間連続箱桁橋を対象とした調査時間

3.3.5 非破壊検査の比較検証実験

前項では、ケーススタディで 3 手法の適用性比較を行ったが、同一条件下で、XRT, IE, WUT の 3 手法を比較するため実験を行った。

実験には、図-3.25 に示す桁長 35m のポストテンション方式の実物大の T 桁供試体を使用した。端支点部の部材厚は 550mm, 中間部の部材厚は 340mm である。本供試体には、製作時にケーブル毎に異なるグラウト充填区間と未充填区間を設けてあり、C1, C3, および C4 ケーブルの一部区間が未充填, C2 および C5 ケーブルが充填を模擬したものである。本実験では、グラウトの充填状況が既知の区間の端支点部および中間部で、各非破壊調査技術による PC グラウト充填調査を行った。非破壊検査の実施前には、電磁波レーダを用いて各ケーブル位置を特定するとともにシースカぶり厚を測定した。

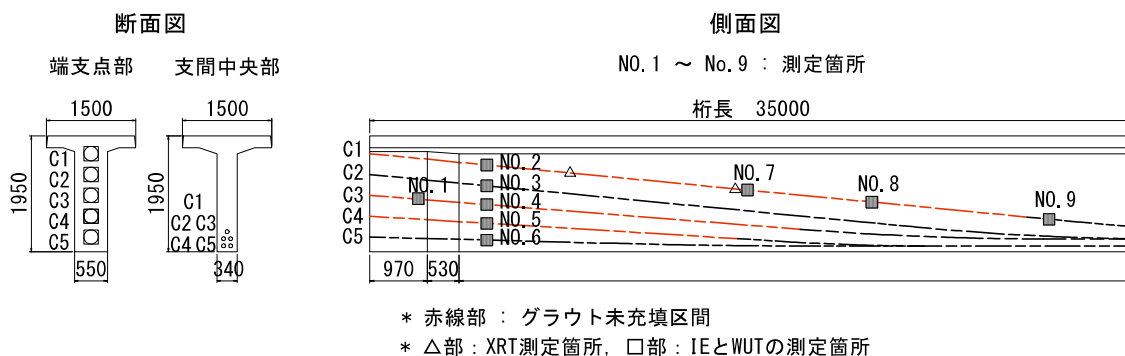


図-3.25 実験で用いた実物大の T 桁供試体

XRT には、図-3.26 に示すような携帯式工業用 X 線検査装置を用いた。撮影条件を管電圧 250kVp, 管電流 3mA, X 線照射範囲 (FFD600mm), 照射時間を 3 分とした。装置は高さ約 60cm, 重量約 20kg であった。XRT による PC グラウト充填調査の概況を図-3.27 に示す。X 線照射時には放射線被ばく防止のため離隔距離を 5m とし、検査装置の周囲を立ち入り禁止とした。検出媒体には医療用の X 線フィルムと増感紙を使用した。桁側面から約 1m 離れた位置に X 線装置をセットし、図-3.25 に示す 2 点で充填調査を実施した。X 線照射終了後、X 線フィルムの現像を暗室にて行った。



図-3.26 携帯式工業用 X 線検査装置



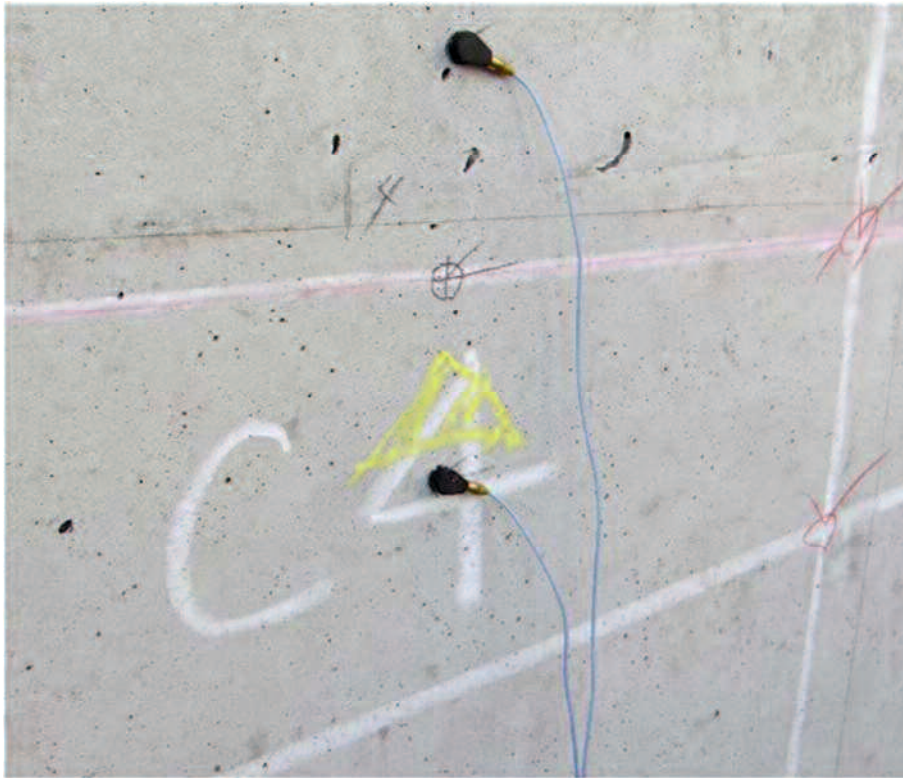
図-3.27 XRT による PC グラウト充填調査概況

IEの弾性波入力装置には、直径8mmの鋼球を使用した。振動センサには図-3.28に示すような加速度計を使用し、解析用パソコンに波形を記録した。実験を行った測点を図-3.25に示す。IEでは部材厚550mmの端支点部(No.1)で1点、部材厚340mmの主桁端部(No.2～No.6)と、グラウト未充填部(No.7, No.8)およびグラウト充填部(No.9)で8点、合計9点で充填調査を実施した。

IEによるPCグラウト充填調査状況を図-3.29に示す。対象測点を挟み込むように2つの加速度計を設置し、鋼球によって弾性波を入力した。なお、IEによる調査では、1箇所に対して5回計測を行った。IEによるPCグラウト充填判定は、SIBIE解析法¹²⁾に基づき行った。SIBIE解析法によるグラウト充填評価方法を図-3.29に示す。グラウトが未充填の場合、シーす相当位置に強い反射波が生じることがわかる。一方、グラウトが充填されている場合、シーす相当位置には強い反射波は生じず、弾性波を入力した反対の面に強い反射波が生じる。



図-3.28 加速度計



a) 加速度計の設置状況



b) 鋼球の設置状況

図-3.29 IEによるPCグラウト充填調査

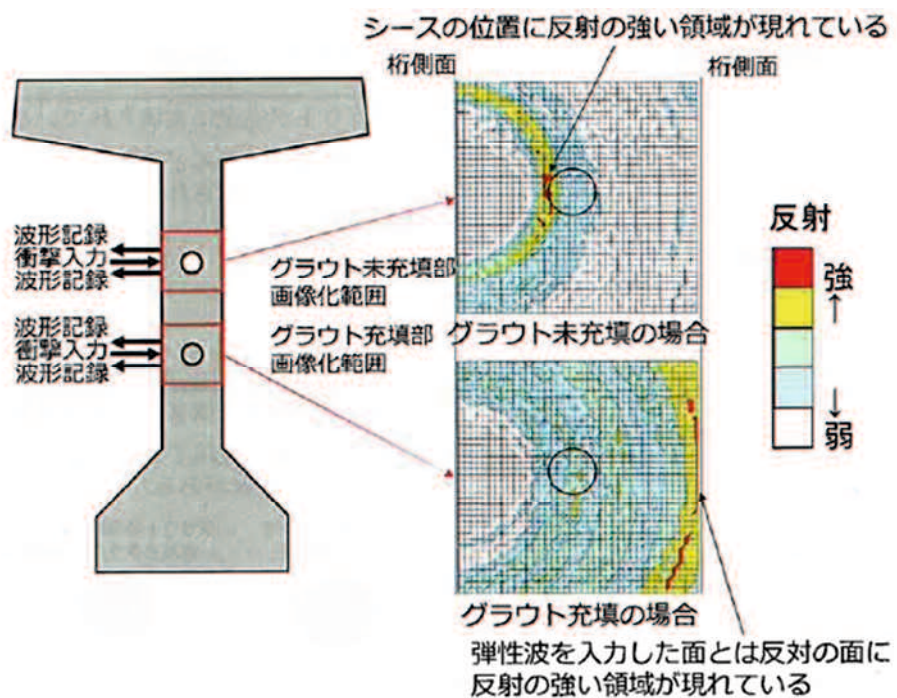


図-3.30 SIBIE 解析法による PC グラウト充填評価方法¹²⁾

WUTでは図-3.25に示す計9点の測点でPCグラウト充填調査を実施した。WUTはIEと同一測点で計測を行った。調査時は、一般的なグラウト調査業務と同様、供試体を挟み込んだ透過法を用いて超音波伝搬速度を測定した。WUTによるグラウト充填調査の状況を図-3.31に示す。測定シース相当位置のコンクリート表面上に接触媒体（シリカ系ジェル）を塗布した発信・受信探触子を設置し、その間隔を500mmと一定に保ちながら各測点に対して4点の計測を行った。各測点でのシース近傍からの反射波を解析ソフトウェア上で加算平均し、得られた波形を解析ソフト上で高速フーリエ変換し、3.2.5で述べた判定基準でグラウト充填判定を行った。



図-3.31 WUTによるPCグラウト充填調査状況

本実験における各非破壊調査手法の調査時間を図-3.32に示す。XRTで必要な1測点あたりの調査時間は、照射時間、機材の据え付け時間および現像時間を含めて約50分であった。IEとWUTでは充填判定精度向上のため、1測点につき4~5回の計測を行ったが、いずれも1測点の計測時間は約20分であった。

XRTによる充填調査の撮影シースイメージを図-3.33に示す。シースイメージの外形は確認できたものの、PCグラウトとPC鋼材は目視確認できなかった。XRTでは2点で調査を行ったが、本研究で使用したX線装置の規格では、部材厚が340mm、シースイメージかぶり140mmの条件では判定不能の結果であった。なお、グラウト充填判定するためには、既往の研究で用いられているようなCR法¹³⁾などの解析手法の併用が必要と考えられる。

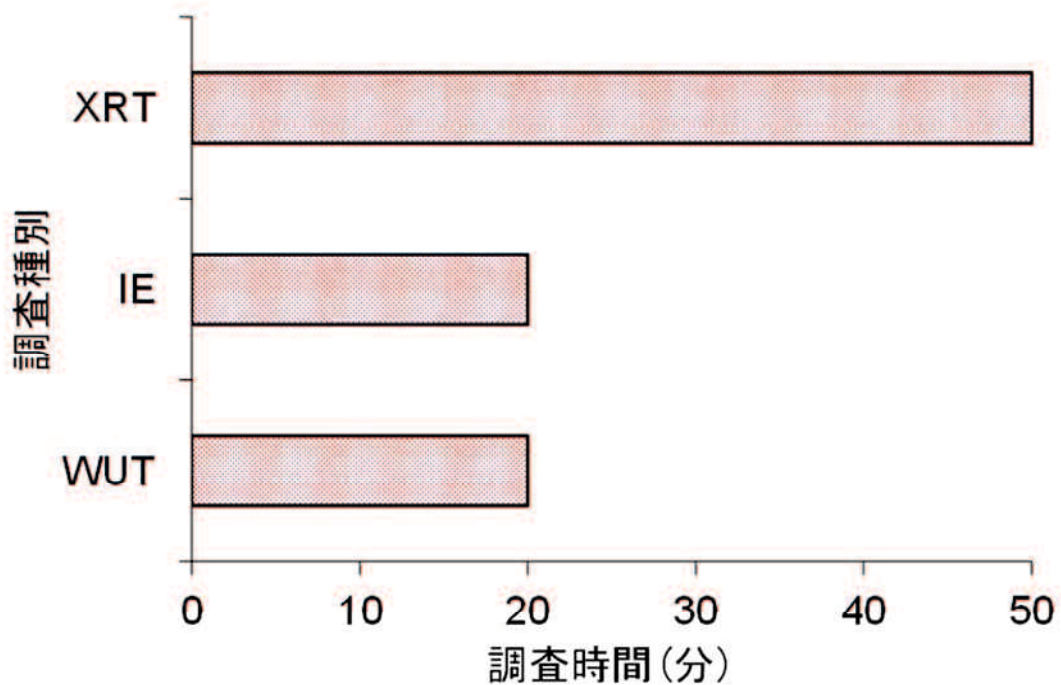


図-3.32 各非破壊調査技術の1測点あたりの調査時間

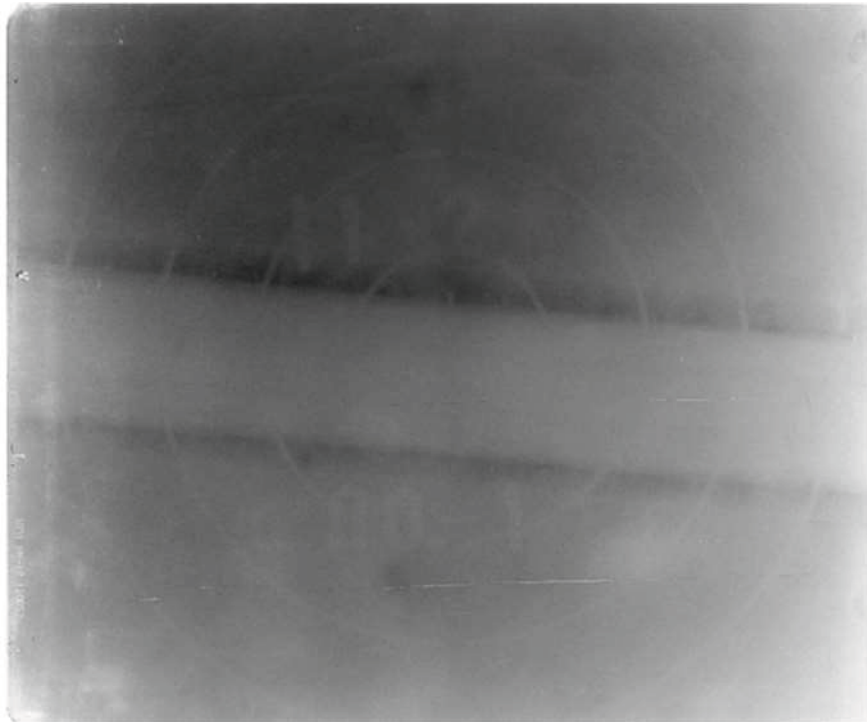


図-3.33 XRTによる撮影シースイメージ

IEの充填判定に用いた解析画像およびWUTの充填判定に用いた解析波形の一部を図-3.34および図-3.35に示す。IEでは、それぞれの測点において測定を行った5回の計測結果から総合的にPCグラウト充填評価を行った。IEおよびWUTによるPCグラウトの充填判定結果(No.1~No.9)を表-3.7に示す。これらの方法で充填と判定された箇所は、実際の充填状況とすべて一致したが、充填判定できなかった箇所(判定不能)は、IE・WUTでそれぞれ3点、4点あった。IEおよびWUTともに実際の充填状況と充填判定が一致しており、誤判定はみられなかった。本実験における実際の充填状況との一致率は、IEで67%(6/9)、WUTでは56%(5/9)であった。計9測点の比較を勘案すると、両調査手法の精度に有意な差異はないと判断される。

表-3.7 PCグラウト充填判定結果

NO	1	2	3	4	5	6	7	8	9
部材厚(mm)	550	340	340	340	340	340	340	340	340
充填状況	IG	IG	CG	IG	IG	CG	IG	IG	CG
IE	UD	IG	CG	UD	UD	CG	IG	IG	CG
WUT	IG	IG	CG	UD	IG	CG	UD	UD	UD

IG：未充填，CG：充填，UD：判定不能

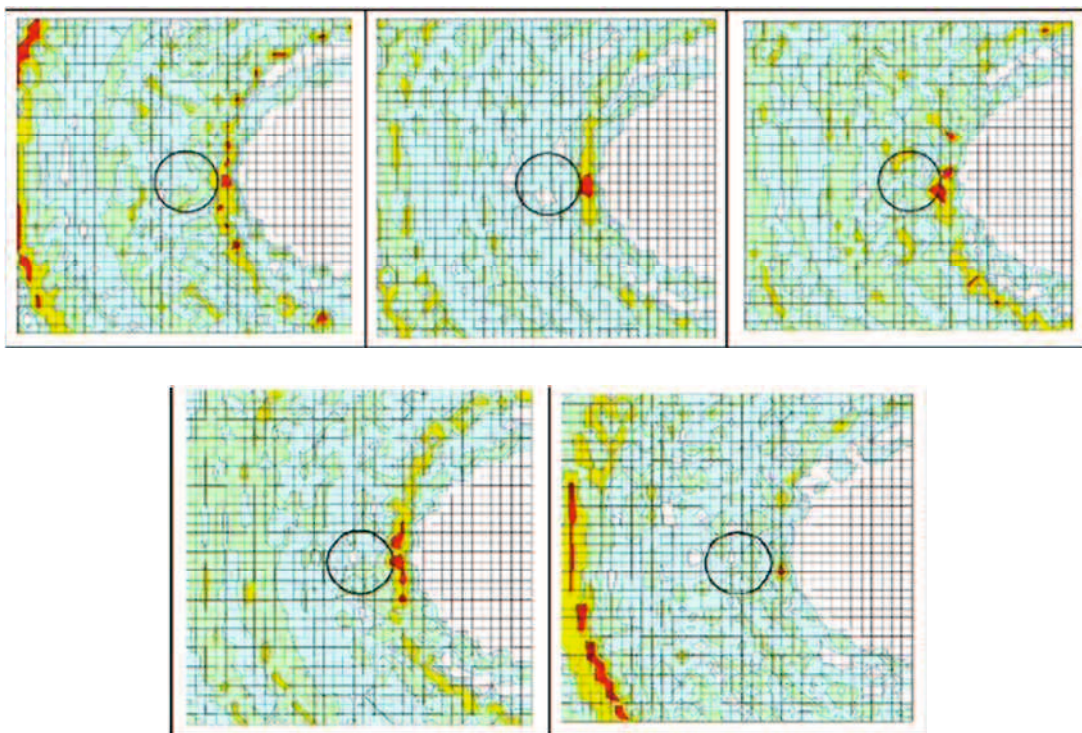


図-3.34 IEによるPCグラウト充填判定解析画像(No.2)

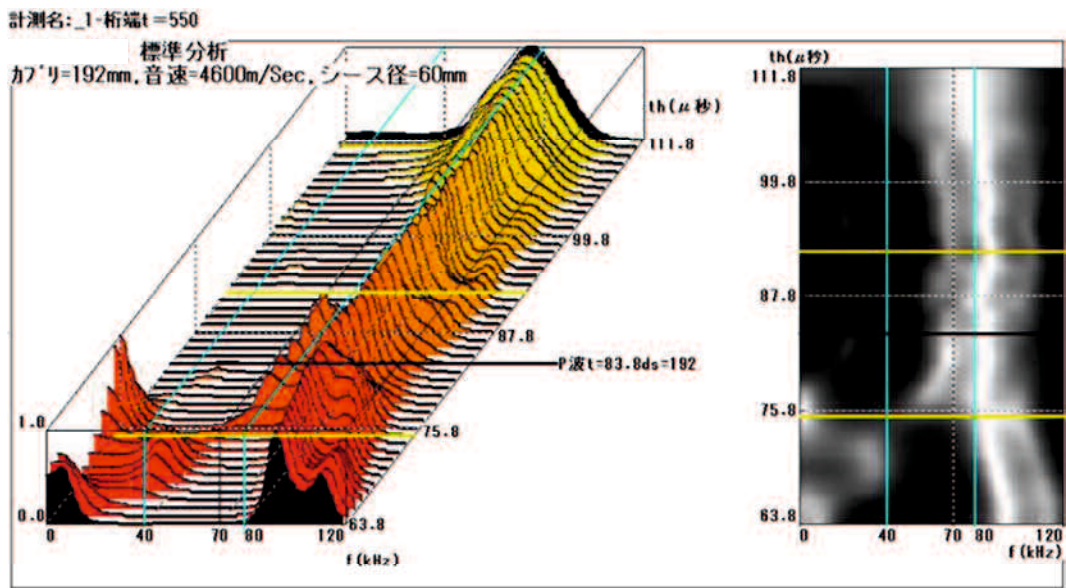


図-3.35 WUTによるPCグラウト充填判定解析波形 (No.1)

各非破壊調査手法の測定可能なシースカぶり厚を図-3.36に示す。XRTによるPCグラウト充填調査では、充填判定ができなかったため、判定不能とした。PCグラウト充填判定が可能なシースカぶりは、IEで134mm～143mm、WUTで134mm～192mmであった。WUTでは最も部材厚の大きい端支点部(No.1, 部材厚550mm)でも充填判定が可能であったことから、シースカぶり厚が比較的大きい場合において、WUTの適用性が高いことが明らかとなった。

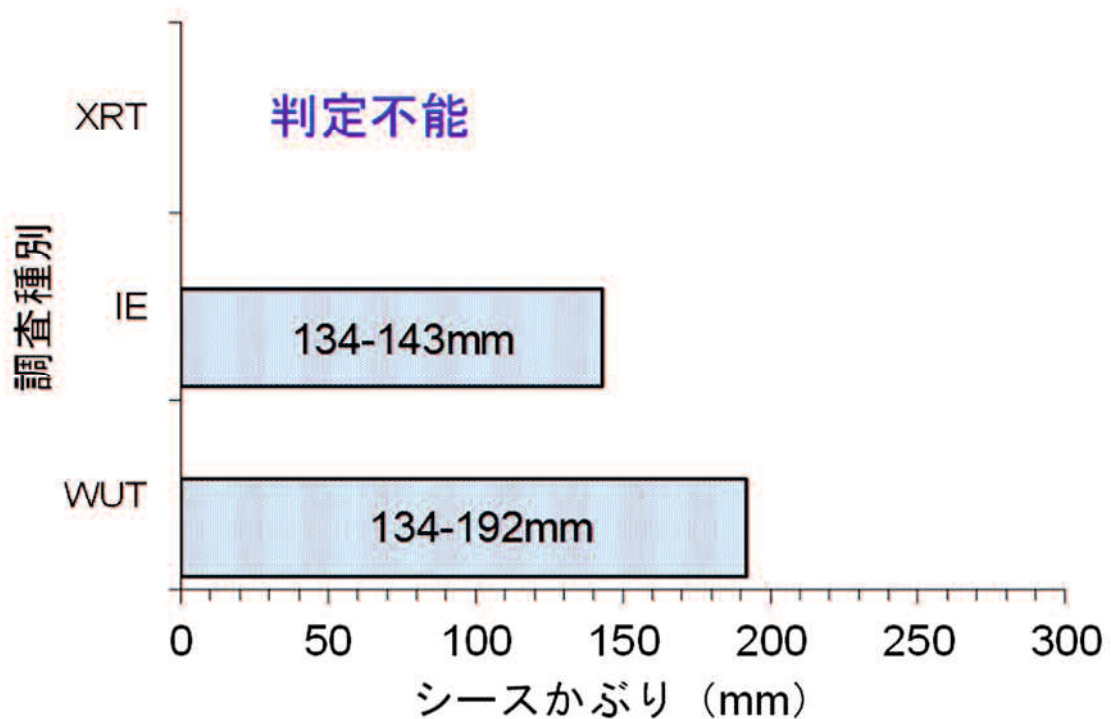


図-3.36 各非破壊調査技術の調査可能シースカぶり厚

3.3.6 比較実験結果から明らかとなったWUTの課題

供試体を用いた比較実験を行った結果、WUTによるグラウト充填調査の課題が明らかとなった。内容を以下に列記する。

- ・測定箇所9点中4点で、周波数ピークが低周波と高周波に分布し、充填判定不能の結果となった。
- ・1測点に対して4点で計測を行う多点計測を行った。探触子を移動させて計測を行うが、探触子位置と鉄筋が干渉する場合は、さらに探触子を移動させることとなる。計測範囲が広がりを持つため、計測箇所が特定できない場合がある。
- ・探触子間隔としてかぶり厚150mmを閾値として設定している。かぶり厚 $\geq 150\text{mm}$ で200mm、かぶり厚 $\leq 150\text{mm}$ で500mmをとっているが、決定根拠は充填調査の経験則に基づいたものである。
- ・図-3.11に示すように、周波数解析の際、1) sin関数によるフィルタリング、2) 窓関数による時系列波の切り出し、と2箇所の信号処理を行っている。信号処理は充填判定の精度向上に寄与していると考えられるものの、処理方法の妥当性についてオリジナルデータの検証が必要である。

WUTは供用中の橋梁のPCグラウト充填調査に用いられる実用化された技術であるが、上記の課題を解明するため、事項に示す本研究で提案する手法で検証を行う。

3.3.7 WUT を用いた一般的な PC グラウト充填調査と本研究で用いた手法の比較

前項で明らかになった課題に対応するため、WUT を用いた一般的な PC グラウト充填調査手法と本研究で用いた調査手法との比較を表-3.8 に示す。

通常の WUT を用いたグラウト調査の探触子間隔は、対象物からの反射波とコンクリート表面を伝搬する表面波との干渉を避けるため、かぶり深さ 150mm 以上の場合は探触子間隔 500mm、かぶり深さ 150mm 以下の場合は探触子間隔 200mm を標準としている。本研究では、この標準の探触子間隔 500mm と 200mm を基準として用いたうえで、新たにかぶり厚に応じた探触子間隔の提案を行っている。

WUT を用いたグラウト調査では、対象となるシース以外からの反射波を低減するため、4 点の計測結果を加算して平均波を算出する加算平均法を用いる。平均波の算出はシースからの反射波を増幅する効果があるものの、計測区間が幅を持つため対象区間が不明瞭となる場合があること、個々の計測結果が判別しづらくなる、以上 2 点が充填判定に影響を及ぼすと考えられる。このため本研究では、各計測結果を詳細に分析するため、加算平均波を算出せずに計測測点毎に検証を行った。

一般的な WUT のグラウト調査では、サンプリング周波数を 2.5MHz、サンプリング点数を 4096 点としている。本研究では、上記の標準的な計測条件に加えて、より詳細な計測を行うため、サンプリング周波数 10MHz、サンプリング点数 16384 点の新たな計測条件も検証した。

解析ソフトを用いた解析では、対象となるシース反射波の周波数を抽出するため、60kHz または 30kHz を中心周波数とする sin カーブ形状のフィルタによる周波数カットを用いている。また、得られた反射波の時系列波をシース相当位置で切り出す際には、打ち切り誤差を低減させるため台形窓関数を用いた処理を行っている。既往の研究では、sin フィルタの中心周波数、窓関数による抽出開始時間、窓関数の抽出時間幅の 3 つの要素の設定が精度向上に寄与することを明らかにしている。ただし、これら 2 つの処理方法は信号処理であり、用いる数値は実構造物によるデータの蓄積が必要であることを示している⁶⁾。このため、本研究では、これら 2 つの信号処理を排除した解析を行い、得られた対象物を含む反射波の周波数のみに限った検証を行った。

非破壊で行う PC グラウト充填調査で最も重要となる充填判定について、一般的な WUT を用いたグラウト調査では、周波数変換された画像を元にシース相当位置で探触子間隔 500mm、200mm とともに、10~20kHz 以下の低い周波数が連続していれば充填、探触子間隔 500mm で 70kHz、探触子間隔 200mm で 40~50kHz 以上の高い周波数が連続している場合は未充填とし、これらの周波数分布結果に加え、削孔調査結果も合わせて最終的な充填判定を行っている。画像による周波数判定は、計測技術者の経験に基づく技量が大きな要素を占めている。既往の研究では、既設の PC 橋 66 橋の主ケーブルを対象としたグラウト充填調査の結果、330 箇所のうち、150 箇所が充填判定に至らなかったことが示されている⁴⁾。この一因が計測技術者に頼った判定方法にあると考え、本研究では、得られた周波数スペクトル

をグラフ化し、スペクトル強度の最大ピークとその周波数値の 2 つのみを決定根拠として充填判定に用いた。スペクトル強度の最大ピーク位置が 45kHz 以下であれば充填，最大ピーク位置が 45kHz 以上であれば未充填とする測定者の経験則に頼らない「機械的」な充填判定を行った。

表-3.8 一般的な WUT グラウト充填調査と本研究手法の比較

		一般的なWUT	本研究
計測方法	探触子間隔	<ul style="list-style-type: none"> かぶり深さ$\geq 150\text{mm}$の場合 探触子間隔：200mm かぶり深さ$\leq 150\text{mm}$の場合 探触子間隔：500mm 	<ul style="list-style-type: none"> 探触子間隔：500mm（第3章） 探触子間隔：200mm（4.1～4.7） かぶり厚に応じた探触子間隔 （4.8～第5章）
	波形抽出方法	<ul style="list-style-type: none"> 多点計測による加算平均波を算出 	<ul style="list-style-type: none"> 計測毎の波形を使用
	計測条件	<ul style="list-style-type: none"> サンプリング周波数： 2.5MHz（0.4μs） サンプリング数：4096点 	<ul style="list-style-type: none"> サンプリング周波数： 2.5MHz（0.4μs），10MHz（0.1μs） サンプリング数：4096点，16384点
解析方法	解析の処理方法	<ul style="list-style-type: none"> 中心周波数f_k（60kHz or 30kHz） のsinフィルタによる周波数カット 台形窓関数を用いた時系列波の抽出 	<ul style="list-style-type: none"> sinフィルタ未処理 台形窓関数未使用
充填判定方法	充填判定方法	<ul style="list-style-type: none"> 画面表示のシース相当位置に低い周波数（探触子間隔500mm：10～20kHz，探触子間隔200mm：10～20kHz）の連続で充填判定 画面表示のシース相当位置に高い周波数（探触子間隔500mm：70kHz，探触子間隔200mm：40～50kHz）の連続で未充填判定 上記のWUTの結果と削孔調査結果を合わせて総合的に判定 	<ul style="list-style-type: none"> シース相当位置で抽出した時系列波を高速フーリエ変換したものをグラフ化して表示 グラフの周波数スペクトル強度のピークとその値が45kHz以下で充填，45kHz以上で未充填と機械的に判断

3.4 第3章のまとめ

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、判定方法について明らかにした。また、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るXRT、IEについてそれぞれの手法の特徴を明らかにした。さらに、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。以下に得られた知見を列記する。

- ・比較検証実験の結果、コンクリート部材厚が340mmおよびシースかぶりが140mm程度の場合、X線検査装置では充填判定できなかったが、IEとWUTでは充填調査が可能であった。
- ・比較検証実験の結果、同一箇所におけるPCグラウト充填調査では、実際の充填状況との一致率はIEで67% (6/9)、WUTでは56% (5/9)であった。充填調査に要した時間も双方の非破壊調査技術ともに20分であったことから、調査時間と精度に関しては両技術に有意な差異はみられなかった。
- ・比較検証実験の結果、コンクリート部材厚およびシースまでのかぶりが最も大きな端支分部 (部材厚550mm)において、IEでは充填判定が不能であったものの、WUTでは実際の充填状況と一致した。シースかぶり厚が比較的大きいグラウト充填判定において、WUTの適用性が高いことが明らかとなった。
- ・比較検証実験の結果より、1) 充填判定方法、2) 多点計測を用いた計測範囲、3) 探触子間隔、4) 信号処理を用いた解析手法、に関する課題を明らかにした。この課題に対して3.3.7に示す本研究手法を用い、検証することとした。

【参考文献】

- 1) 藤井 学, 宮川豊章: PC グラウト充填状況の非破壊探査法, 土木学会論文集, No.402/V-10, pp. 15-26, 1989.
- 2) 長岡洋介: 振動と波 5.1次元の波 § 5.3 波のエネルギーとインピーダンス, p.129, 裳華房, 2006.
- 3) 谷腰欣治, 谷村康行: トコトンやさしい 超音波の本, pp.120-121, 日刊工業新聞社, 2015.
- 4) 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, pp.35-40, 2014.
- 5) KEYTEC, ストラクチャスキャン SIR-EZ HR, (URL : https://www.keytec.co.jp/products/rader/sir-ez_hr/) 2019.1 現在, 2016.
- 6) 堀 慎一, 後藤恵一, 渡辺 健, 谷村幸裕: 構造物への適用を想定した超音波法による PC グラウト充てん判定方法の提案, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, pp.1831-1836, 2013.
- 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, p.23, 2016.
- 8) トーレック (株) 携帯型工業用 X 線発生装置 RIX-250MC-2, (URL : <https://toreck.co.jp/industrial/RIX-250MC0.html>) 2020.9 現在, 2020.
- 9) 首都高速道路技術センター: これならわかる道路橋の点検, 建設図書, 2015.
- 10) 国際建設技術研究所, インパクトエコー法, (URL : <http://www.kokusaise.co.jp/technology/technology02.html>) 2020.9現在, 2020.
- 11) 川嶋雅道, 鎌田敏郎, 内藤翔太, 六郷恵哲: インパクトエコー法により検出可能なコンクリート中の空隙の大きさと深さについて, コンクリート工学年次論文集, Vol.27, No.1, pp. 1693-1698, 2005.

- 12) Yamada M. and Ohtsu M.: Case studies on ungrouted tendon-duct in prestressed concrete models by SIBIE, *Construction and Building Materials*, pp.2376-2380, 2010.
- 13) 青木圭一, 渡邊晋也, 三加 崇, 宮永憲一, 睦好宏史: 供用後 40 年が経過した PC 桁の性状から推定される PC 橋の性能評価, *土木学会論文集 E2*, Vol.71, No.3, pp.283-302, 2015.

第 4 章

WUT の特性に関する基礎実験

第4章 WUTの特性に関する基礎実験

4.1 実験目的

現在、WUTは供用中のポストテンション橋のPCグラウト充填調査手法の一つとして用いられている。非破壊調査手法であるWUTを用いてPCグラウト調査を行う際、図-4.1に示すように高周波と低周波のいずれにも明確なピークがみられず充填判定に至らない場合がある。WUTによるPCグラウトの充填判定精度は、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、一連の調査の基礎特性の把握が重要となる。WUTを用いたグラウト充填調査では、サンプリング周波数やサンプリング点数、探触子間隔、時系列波の切り出し開始時間と切り出し範囲、周波数フィルタの有無などは解析ソフト上で選択可能であるが、周波数帯域の広い弾性波を発信する大型探触子については製品固有のものであり、機器の性能に依存している。実務上では有用性の高いWUTの調査手法であるが、この探触子の特性や発信される波形の詳細、PCグラウト充填調査の再現性や調査時に用いる接触子媒体の影響、超音波の伝播範囲といった基礎特性は明らかになっていない。そこで充填・未充填シースを模擬した供試体や実物大供試体さらに実橋梁を用いて、様々なWUTの基礎的特性を明らかにした。

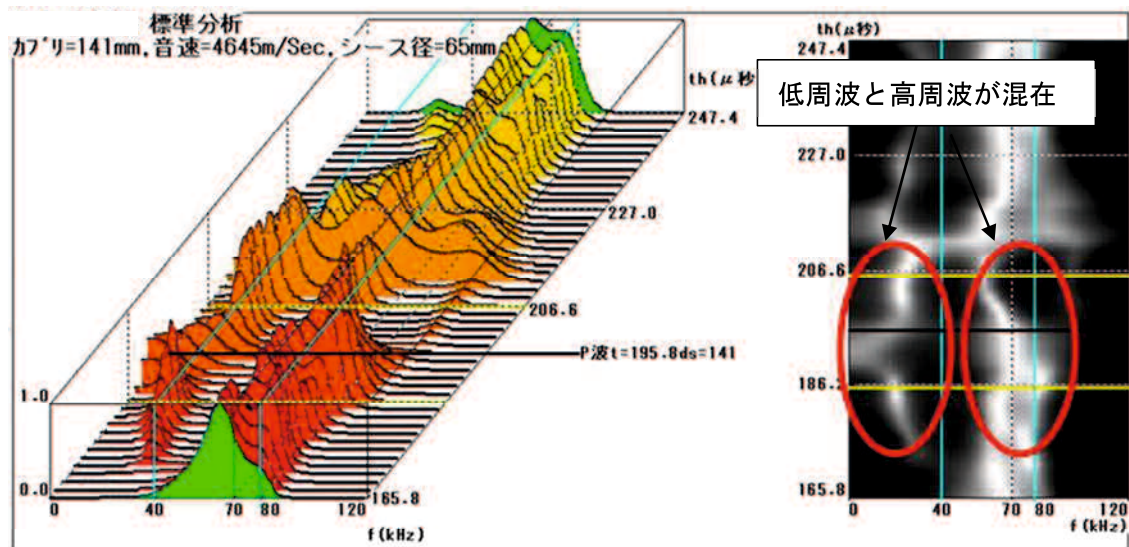


図-4.1 低周波と高周波が混在して充填判定に至らない場合の波形例

4.2 接触媒質の有用性に関する実験

WUTによるPCグラウトの充填調査を行う際には、調査対象となるコンクリートの表面不陸の除去と空気の混入を排除し、超音波の適切な発信を行う必要がある。調査時には発信探触子と受信探触子の表面に接触媒質として前文に例示しているようにシリカとケイ酸ナトリウムおよびグリセリンを主成分とする接触媒質（表-3.4 参照）を図-4.2のように塗布している。



図-4.2 接触媒質の塗布状況

本実験ではコンクリート表面と探触子との接触面の影響を調査するために、接触媒質を塗布しない場合（Dry）、接触媒質を水とした場合（Water）および接触媒質を塗布した場合（Gel）の3ケースで実験を行った。

コンクリート表面に発信・受信探触子をできるだけ強く押し当て、解析ソフト上で電圧値がみかけ上、最大となった点で波形のデータの収録を行い、3ケースで得られた電圧値の大きさを比較した。実験には図-3.25に示す実物大の供試体を使用した。探触子間隔は500mmとし、サンプリング周波数は2.5MHz、サンプリング数は4096点、探触子の印加電圧は500Vとした。それぞれのケースにおける電圧値を図-4.3に示す。DryおよびWaterの2ケースにおける電圧値は、Gelの電圧値と比較して小さくなった。これは、探触子とコンクリート表面に生じた空気の影響でコンクリート内部に超音波が伝達できていないことが一因と考えられる。WUTは反射法によってPCグラウトの充填判定を行うが、対象物から波が反射する場合は、表-3.1に示す音響インピーダンスに影響を受ける。接触媒質は水と比較して

粘性が高く、音響インピーダンスが水に対して2倍の大きさを持つ。本実験に用いた接触媒質はコンクリートの持つ音響インピーダンスの3割程度の大きさのため、今後、よりコンクリートに近い音響インピーダンスを持つ接触媒質を用いることで精度向上につながると考えられる。

WUTでは、得られた電圧値を解析ソフト上で高速フーリエ変換し、周波数成分によってPCグラウト充填判定を行っている。得られる電圧値が小さい場合、PCグラウトの充填評価時に充填部と未充填部の差異が明確化できない可能性がある。WUTでPCグラウト充填調査を実施する場合、接触媒質の使用は必須と考えられる。

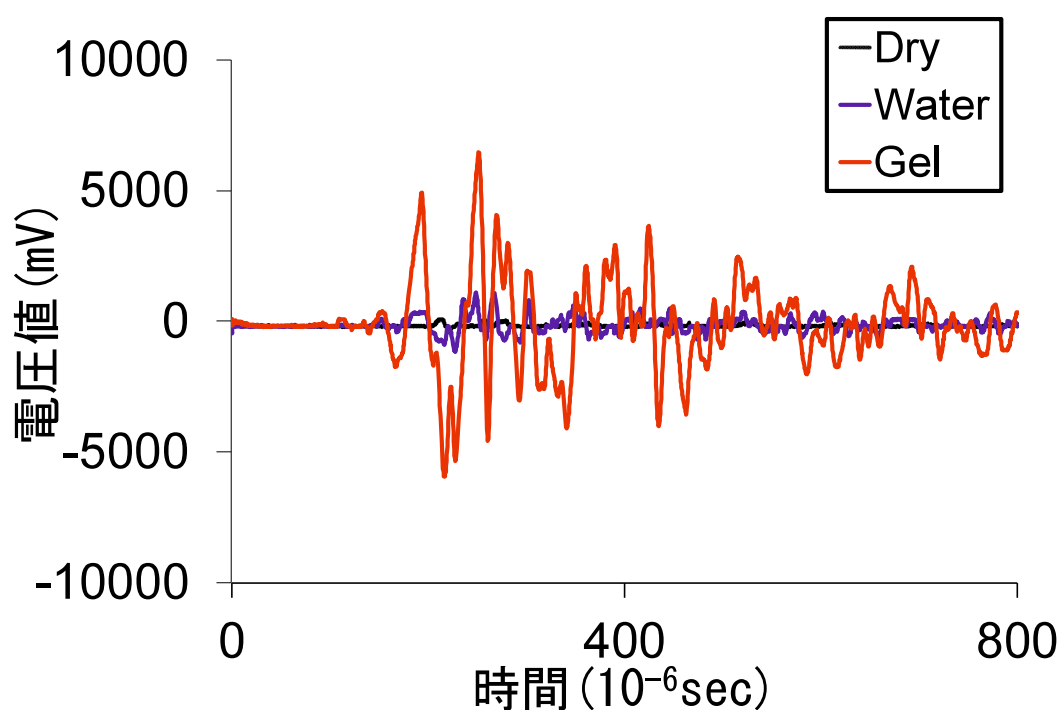


図-4.3 接触媒質による電圧値比較

4.3 探触子の特性と超音波発生範囲の特定に関する実験

発信・受信探触子の内部は、 $\phi 76$ mmの圧電素子、ダンパーから構成される。振動子となる $\phi 76$ mmの圧電素子は、セラミック製で厚みが4 mm、中心周波数500 kHzである。また、探触子内部で吸音材として用いるダンパーには、鋼製の鉄板内部に、タングステン、ウレタン、水を練り混ぜたものを圧縮成形して用いている。探触子の仕様一覧を表-4.1に示す。

表-4.1 探触子の仕様一覧

	WUT 探触子
圧電素子	セラミック (径 76 mm × 4 mm 厚)
中心周波数	495.64 kHz (490.85 – 500.32 kHz)
制振ダンパー	タングステン・ウレタン
外殻の材質	鋼
外形寸法	径 95 mm × 60 mm 厚
重量	各 1.4 kg

発信探触子からの入力波形を確認するため、接触媒質を介して発信探触子と受信探触子を重ね合わせて計測した。計測状況を図-4.4に示す。収録した時系列波形および高速フーリエ変換した周波数スペクトルの代表例をそれぞれ図-4.5と図-4.6に示す。探触子同士を重ね合わせて得られた周波数スペクトル強度は345 kHzを中心として、0~800 kHz区間でほぼ左右対称の形状を示した。



図-4.4 探触子同士を重ね合わせた計測状況

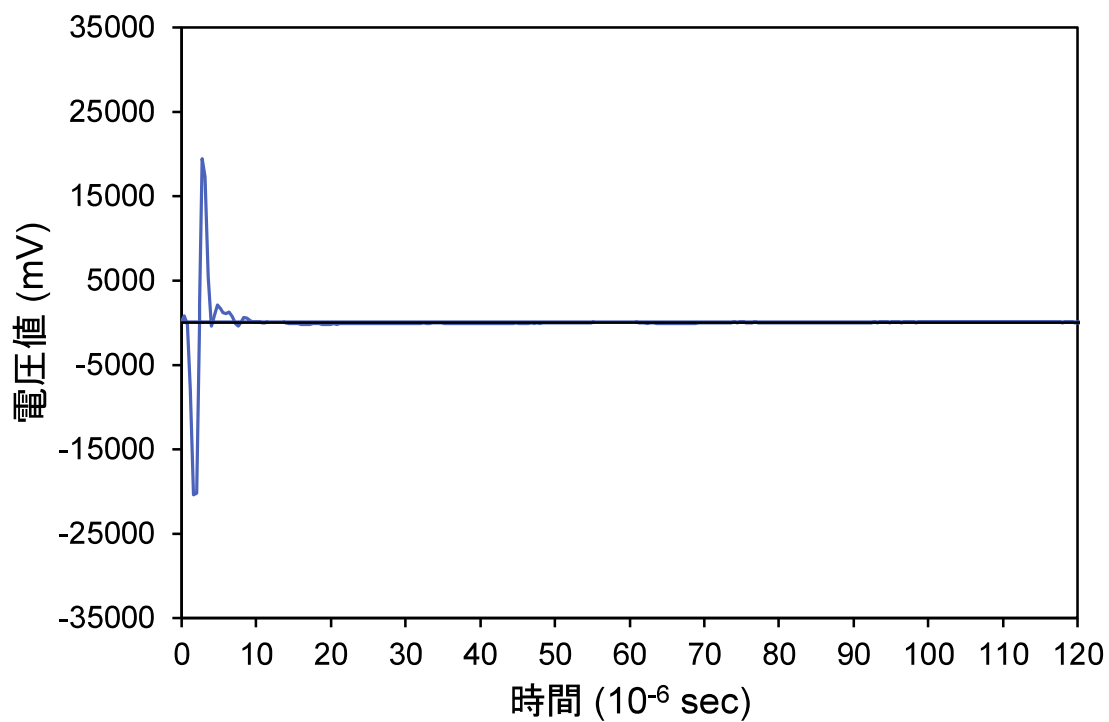


図-4.5 時系列波形の例

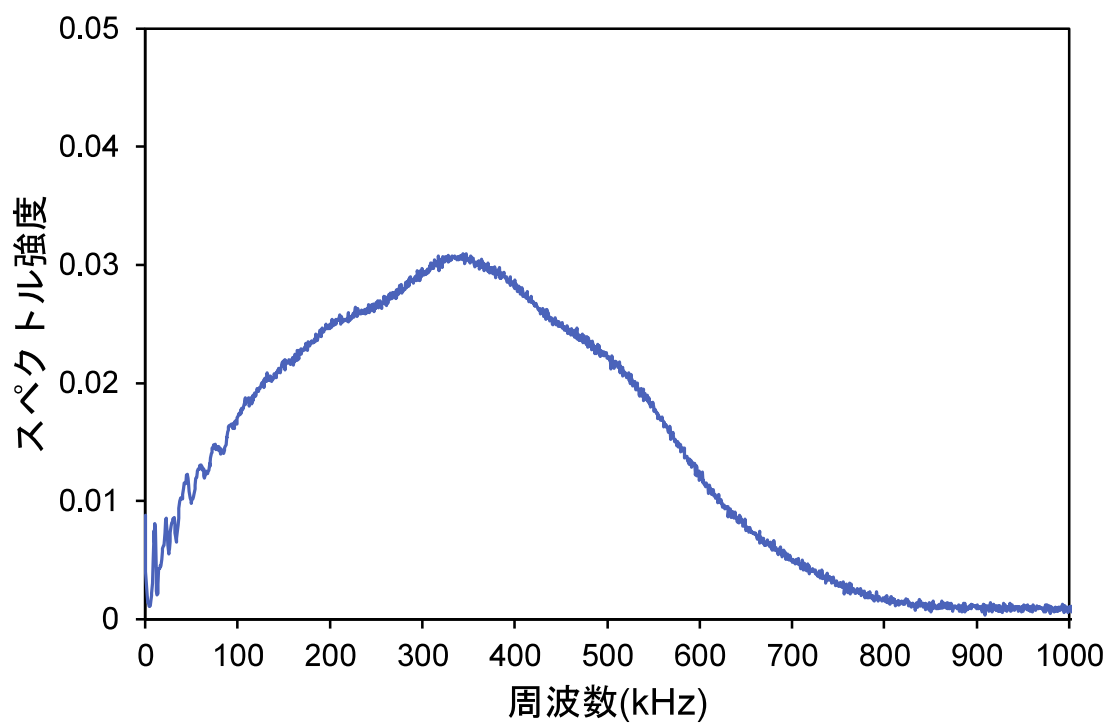


図-4.6 周波数スペクトルの例

次に、探触子表面からの発信範囲を明らかにするため、 $\phi 76\text{ mm}$ の探触子表面に $\phi 10\text{ mm}$ の探触子を押し当てながら移動させ、時系列波の電圧値の最大値を求めた。計測は、 $\phi 76\text{ mm}$ の探触子の計測面を上向きにし、その中心に接触媒質を塗布した $\phi 10\text{ mm}$ 探触子を設置し、波形を収録した後、 10 mm ずつ外側へ $\phi 10\text{ mm}$ 探触子を移動させて計測を行った。計測時の $\phi 76\text{ mm}$ 探触子のサンプリング周波数は 2.5 MHz 、サンプリング数は 4096 点、探触子の印加電圧は 60 V とした。計測の状況を図-4.7に示す。

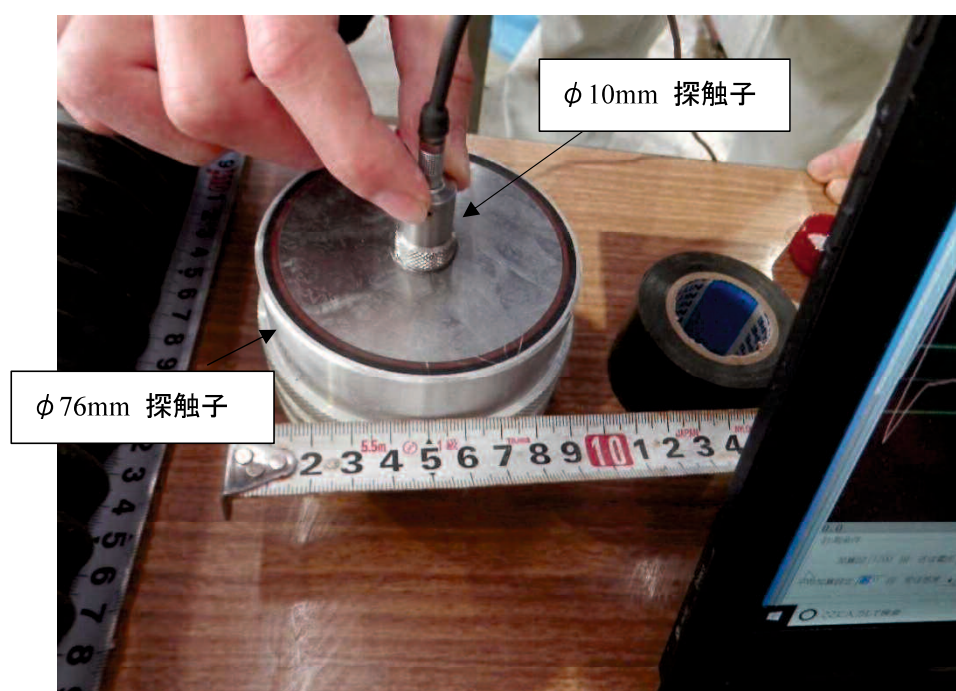


図-4.7 $\phi 76\text{ mm}$ 探触子の超音波発生範囲の検証実験

計測結果を図-4.8 に示す。中心の電圧値は 18620 mV，中心から 10 mm～30 mm までは、19000 mV 程度の安定した電圧値が得られた。圧電素子の設置範囲を超えた探触子中心から 40 mm では、電圧値が 16000 mV 程度と小さな値となった。以上の結果より、探触子から発信される超音波は圧電素子の設置範囲内でほぼ一定に発信されていることが明らかとなった。

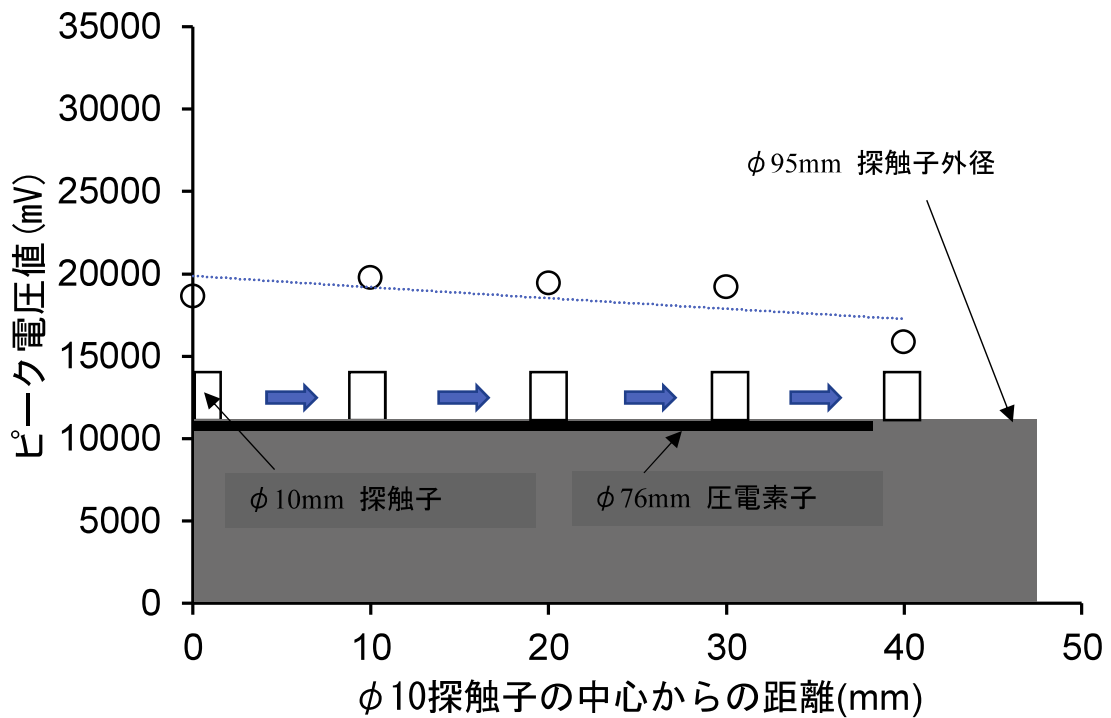


図-4.8 φ76 mm 探触子の超音波発生範囲の検証結果と探触子概要図の組み合わせ

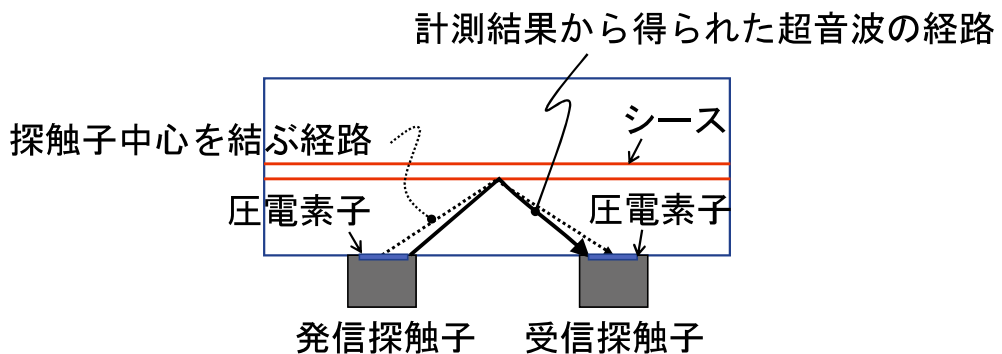


図-4.9 φ76 mm 探触子の超音波経路概念図

WUT では、IE と異なり、シースなどの計測対象物の反射波を切り出して抽出し、周波数解析を行う。反射波の切り出しは透過法によって得られた超音波伝搬速度を超音波伝搬経

路で除した値，すなわち時間を算出して行う．超音波の発生範囲を特定したこととで，反射波を切り出す時間は図-4.9 に示すように，探触子中心を結ぶ経路ではなく，発信子の圧電素子の端部と受信子の圧電素子の端部を結ぶ経路が適切であることが明らかとなった．

4.4 探触子を押し当てる力に対する検証実験

WUTでは外形寸法直径φ95 mm，厚さ60 mm，重量1.4 kgの大型探触子を発信・受信と2つ用いてPCグラウトの充填調査を行う．接触媒質を塗布した両探触子をコンクリート表面に押し当てて超音波を発信すると図-4.10に示す電圧値と時間からなる時系列波が得られる．

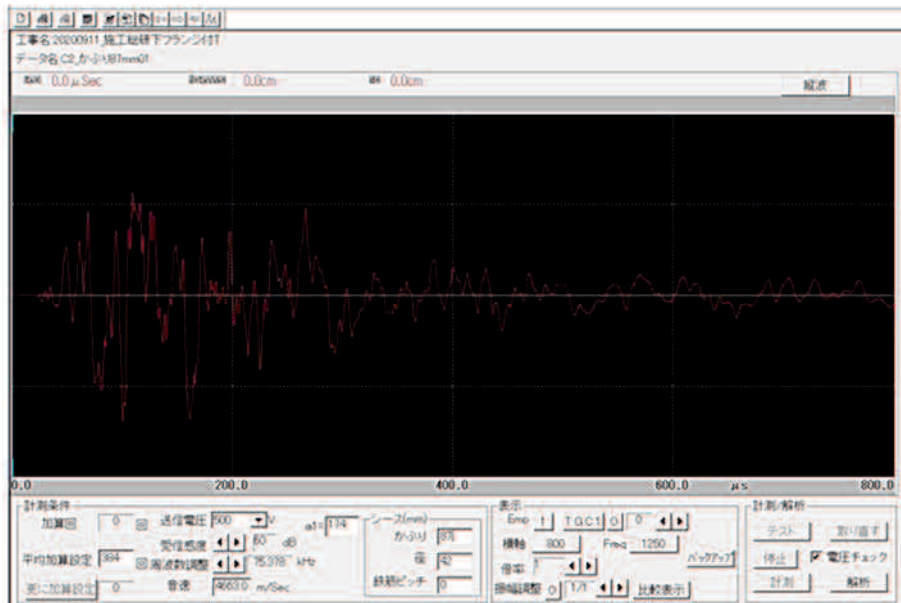


図-4.10 UCM2000 に表示された時系列波

探触子を押し当てる力が時系列波と周波数に与える影響について図-4.11に示す供試体を用いて実験を行った．供試体は外形がH1200 mm×W1500 mm×T340 mm，内部にはグラウトの充填と未充填を模擬した内径φ65 mmのシースと，D13 mmの軸方向鉄筋とスターラップを300 mmピッチで設置した．本実験では，図-4.12の概要図に示すように供試体を倒して平置きにし，下方のシースのグラウト未充填区間に探触子をセットした．探触子間隔は圧電素子の直径76 mmの2倍の152 mm，印加電圧は60 Vとした．探触子を押す力を模擬するため，実験では1枚850 gの鋼製プレートを用いて，両探触子の上面に鋼製プレート無し，鋼製プレート1枚（850 g），鋼製プレート5枚（4250 g）を載荷した．載荷の組み合わせ一覧を表-4.2に示す．

表-4.2 載荷の組み合わせ一覧

鋼製プレート無し	0 g
鋼製プレート 1 枚	850 g
鋼製プレート 5 枚	4250 g

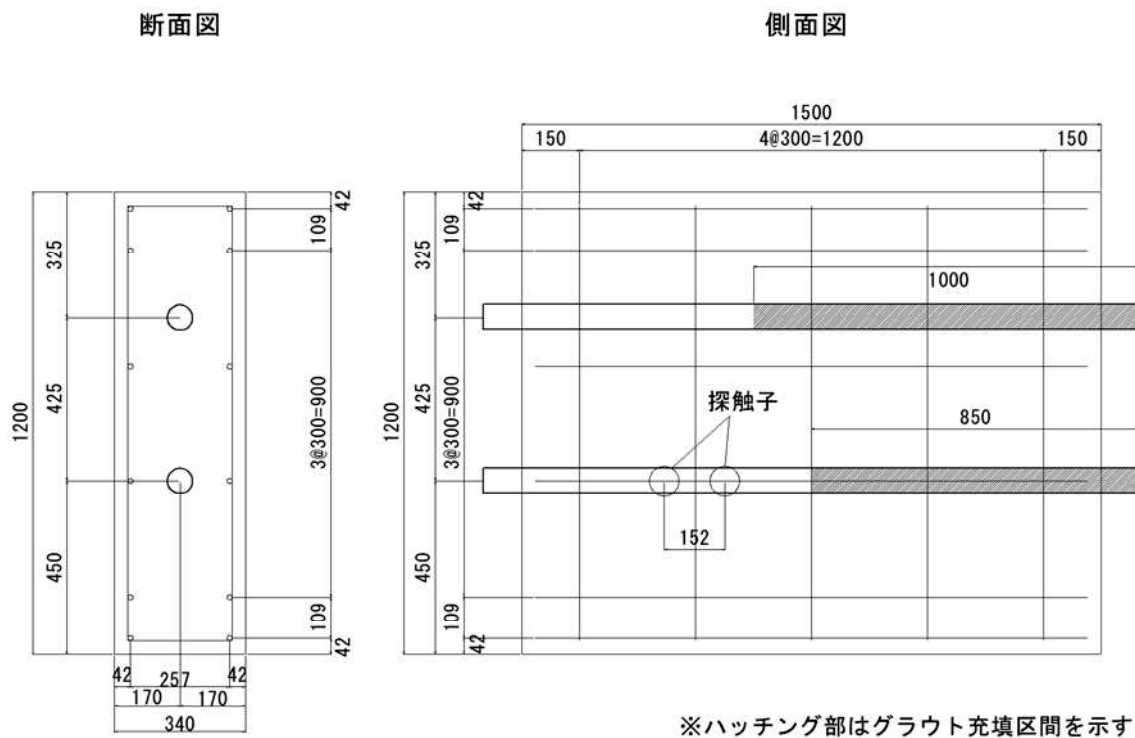


図-4.11 実験供試体

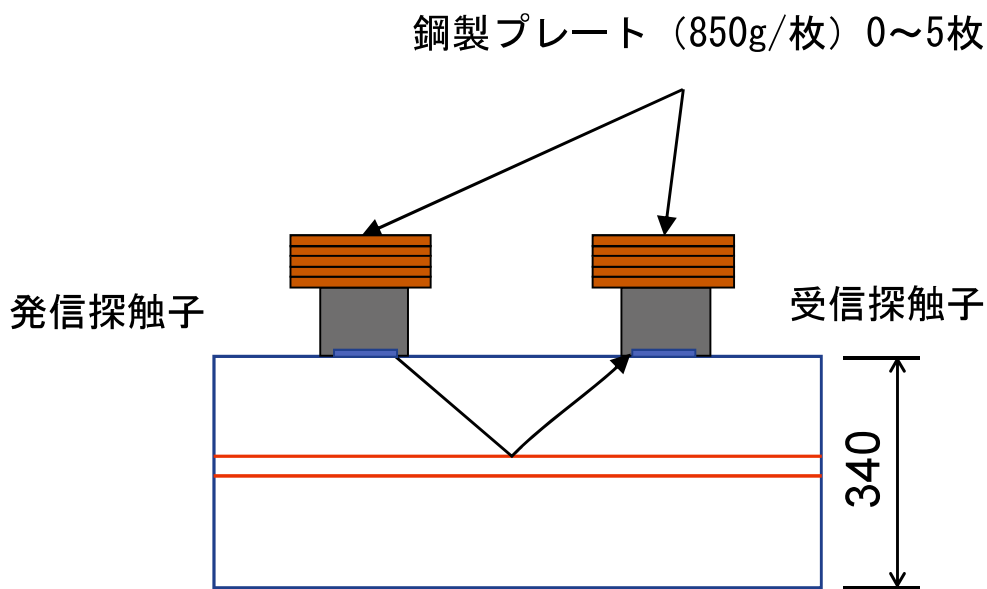


図-4.12 実験概要

鋼製プレートの載荷枚数毎に得られた電圧値の最大値と最小値を表-4.3 に示す。時系列波は、鋼製プレートの載荷重量に限らずほぼ同様な電圧値を示した。得られた各載荷条件毎の時系列波形を図-4.13 に、時系列波を高速フーリエ変換した結果を図-4.14 に示す。周波数の結果も、スペクトル強度、周波数ピークともにほぼ同様な値を示した。この結果より、グラウト充填調査を行う場合、探触子の自重である 1.4 kg 程度以上の力で押し当てて保持することで、充填判定に影響を及ぼさない調査ができることが明らかとなった。

表-4.3 得られた電圧値の一覧

	電圧値の最大値 (mV)	電圧値の最小値 (mV)
鋼製プレート無し	5076.71	-6583.14
鋼製プレート1枚	5169.14	-6623.71
鋼製プレート5枚	5662.86	-6851.29

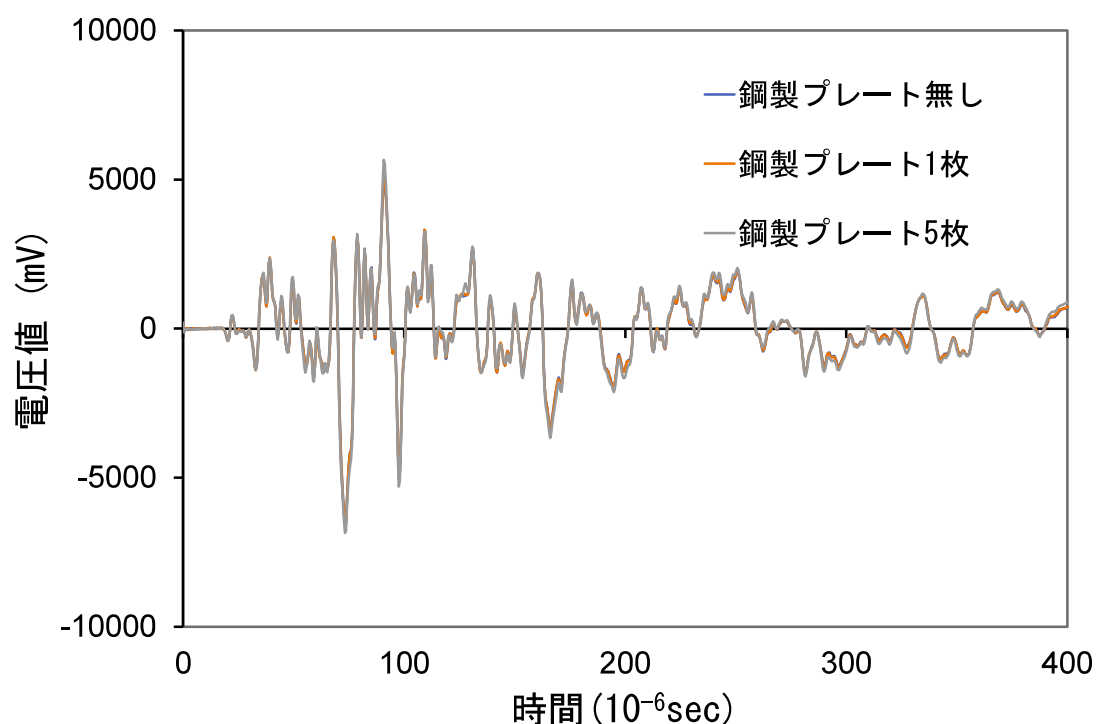


図-4.13 載荷条件毎の時系列波形

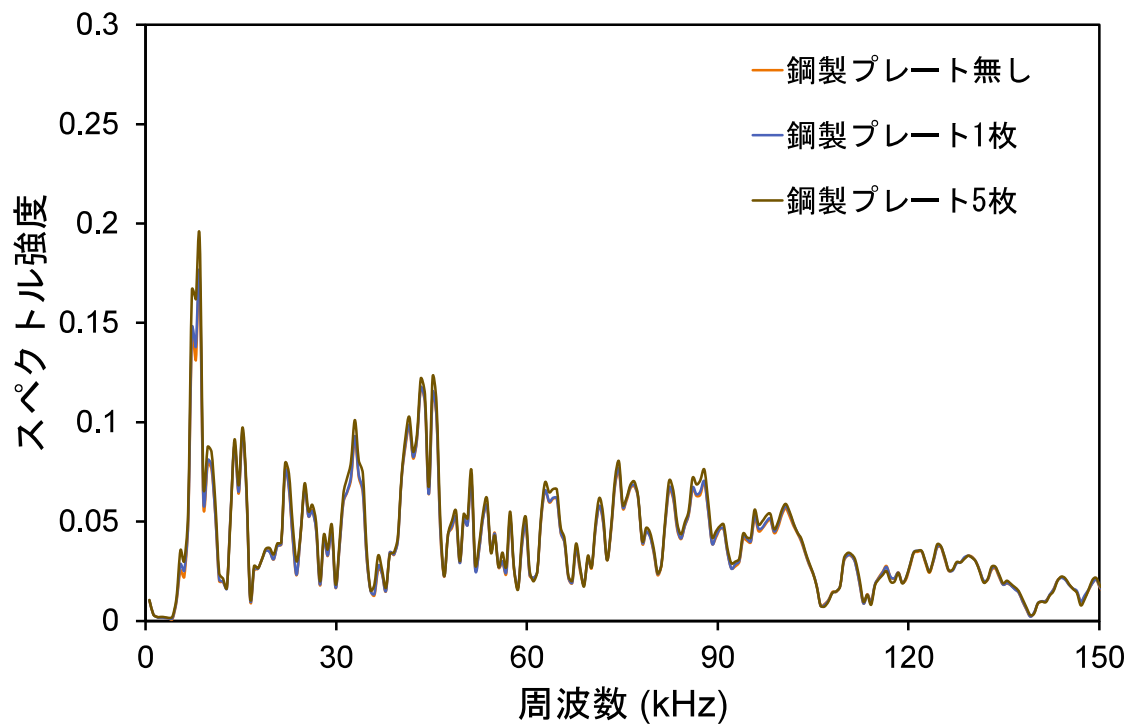


図-4.14 载荷条件毎の時系列波形の高速フーリエ変換結果

4.5 発信された超音波の再現性実験

従来の WUT による PC グラウト充填調査では、1 計測点に対して 1 回の計測で実施されてきた。このため、超音波が発信されて対象物で反射し、受信子によって電圧値を収録する一連の計測を、同点で計測した場合どのような結果が得られるか、の再現性が検証されていない。このため本実験では図-4.15 に示す実物大 T 桁供試体を用いて WUT による PC グラウト充填調査の再現性を検討した。供試体の断面図および側面図と PC ケーブル配置を図-4.16 に示す。内部に設置されたシース内径は 65 mm である。コンクリート部材厚が 340 mm である中間部の C1 ケーブルにおいて WUT による PC グラウト充填調査を行った。本供試体は 3.3.5 で用いたものと同一で、調査対象の PC グラウトは未充填区間であることが既知である。

既設 PC 構造物の中には、竣工時の設計図面が保存されていない場合や、他の部材との干渉や施工上の理由などからシース位置が設計図面通りに配置されていない可能性がある。このため、WUT を用いて PC グラウト充填調査を実施する際には電磁波レーダを用いて鉄筋およびシースの位置出しとシースかぶりの特定を行う。本実験でも、位置出しとかぶり厚特定を行ったのち、発信・受信探触子間隔を 500 mm とし、再現性の検討を行うため、同一点において 2 回計測を行った。

実験では、発信・受信探触子を C1 ケーブルに沿って移動させ、計 31 点の連続的な測定を実施した。

ある測定点における解析ソフト上で得られた周波数波形の例を図-4.17 に示す。1・2 回目ともに、シース相当位置において 70 kHz 程度の周波数が卓越する結果となった。定量的評価のため、1 回目の計測および 2 回目の計測で得られた時系列波形（電圧値）を各測点において累積積分し、比較を行った。得られた電圧値を式 (4.1) によって累積積分した結果の一例を図-4.18 に示す。

$$\int(Vt_n)dt = \frac{Vt_n+Vt_{n-1}}{2} \cdot (t_n - t_{n-1}) + \int(Vt_{n-1})dt \quad (4.1)$$

ここに、 V_m : 時間 m における電圧値、 V_{m-1} : 時間 $m-1$ における電圧値、 t_n : n 点までの到達時間 (10^{-6} sec)、 t_{n-1} : $n-1$ 点までの到達時間 (10^{-6} sec) を表す。

図-4.18 に示すように、2 回の測定結果の累積積分値が同様の傾向がみられ、測定を行った全ての点において同値の積分結果が得られた。このことより、WUT の測定による再現性は優れていることが確認された。



図-4.15 実験で用いた実物大のT桁供試体

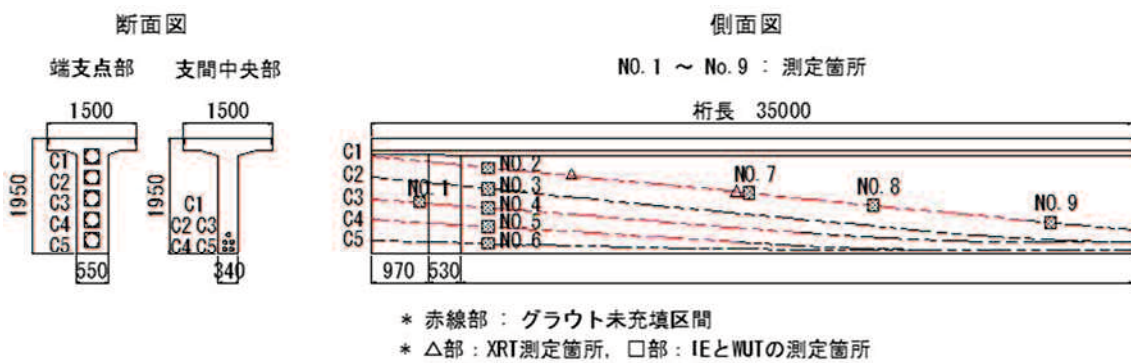
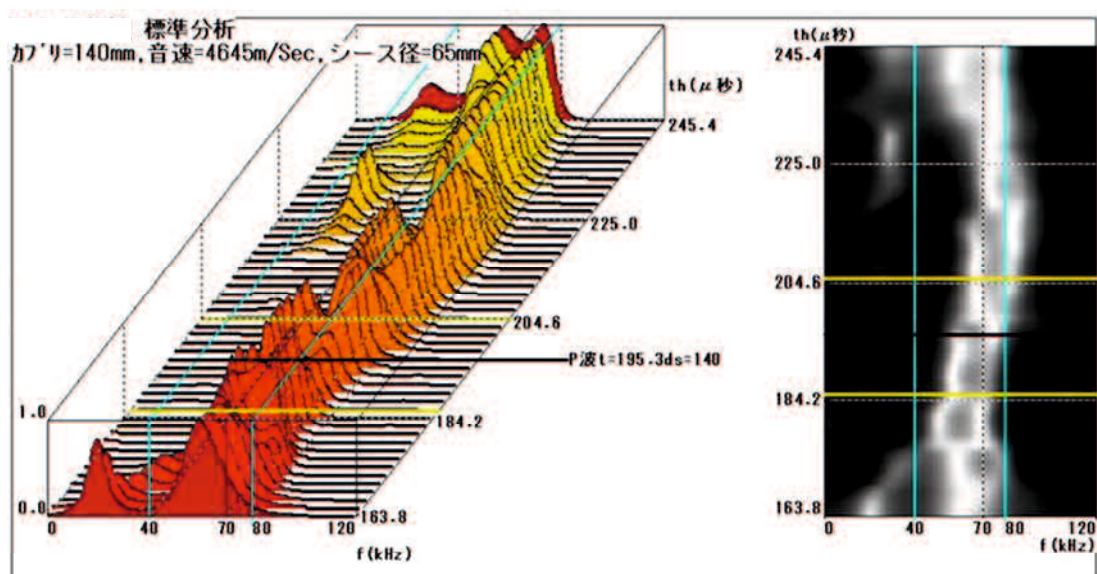
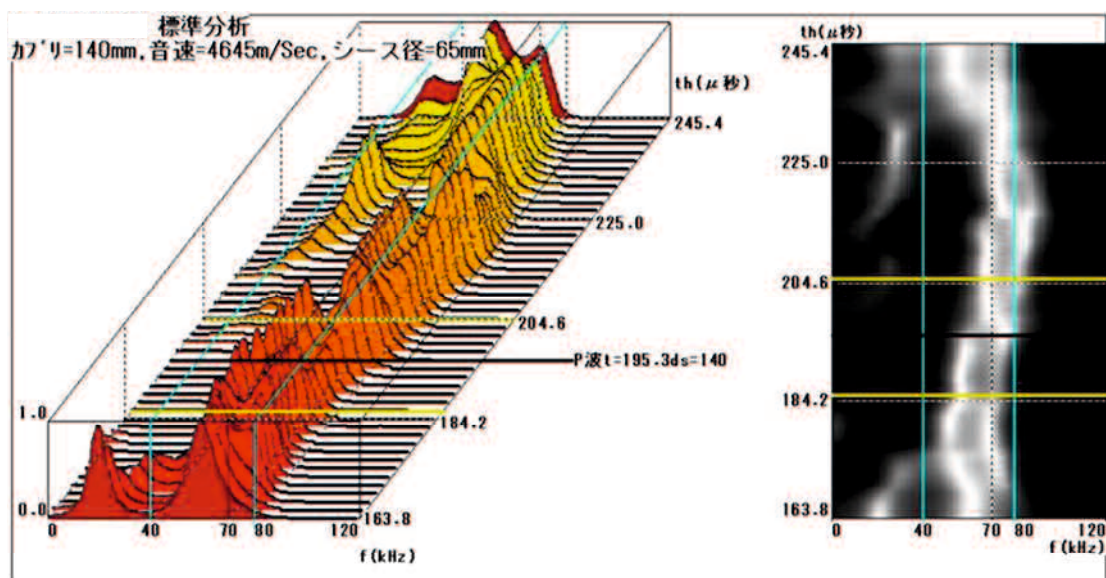


図-4.16 実験で用いた実物大のT桁供試体の断面図と側面図



(a) 1回目の周波数波形



(b) 2回目の周波数波形

図-4.17 同一点における周波数波形例

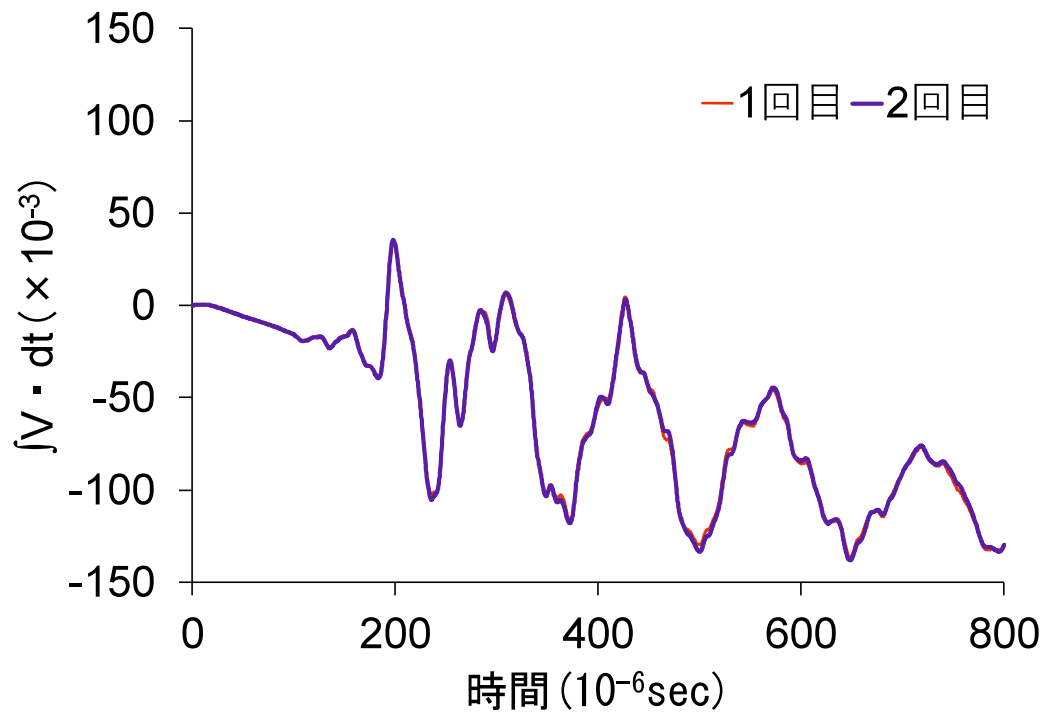


図-4.18 同点における累積積分結果例

4.6 超音波の伝搬範囲実験

WUTを用いたグラウト充填調査では、発信探触子と受信探触子の間隔を一定に保ちながら多点計測を行って加算波を算出する。しかし、この発信・受信探触子間隔が得られる電圧値の強度（大きさ）に与える影響は明かになっていない。そこで本実験では、探触子間隔を500, 1000, 1500, 2000, 3000, 4000 および 6500 mm としてそれぞれの探触子間隔で得られる電圧値を比較することで、WUTの超音波伝播範囲を検討した。

本実験は図-4.19に示す実橋梁で行った。実橋梁の断面図と側面図を図-4.20に示す。シースかぶりは135 mmである。受信・発信探触子を実験対象シース(C1ケーブル)直上に押し当て、本実験の最大間隔6500 mmから最小間隔500 mmまで受信・発信探触子間隔を狭めていき、それぞれの探触子間隔における電圧値を収録した。本実験の実験状況を図-4.21に示す。探触子間隔が大きい場合、発信探触子と受信探触子进行操作する者がそれぞれ一人ずつ必要となるため、時系列波形のばらつきが小さくなった時点での電圧値を収録した。



図-4.19 実験に用いた実橋梁

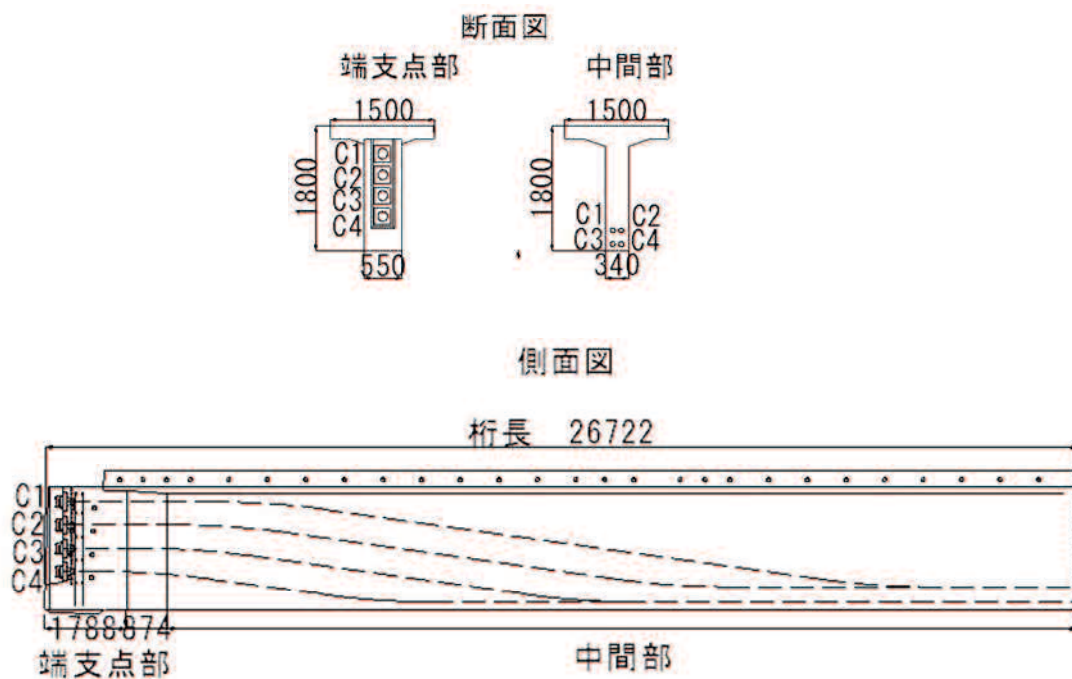
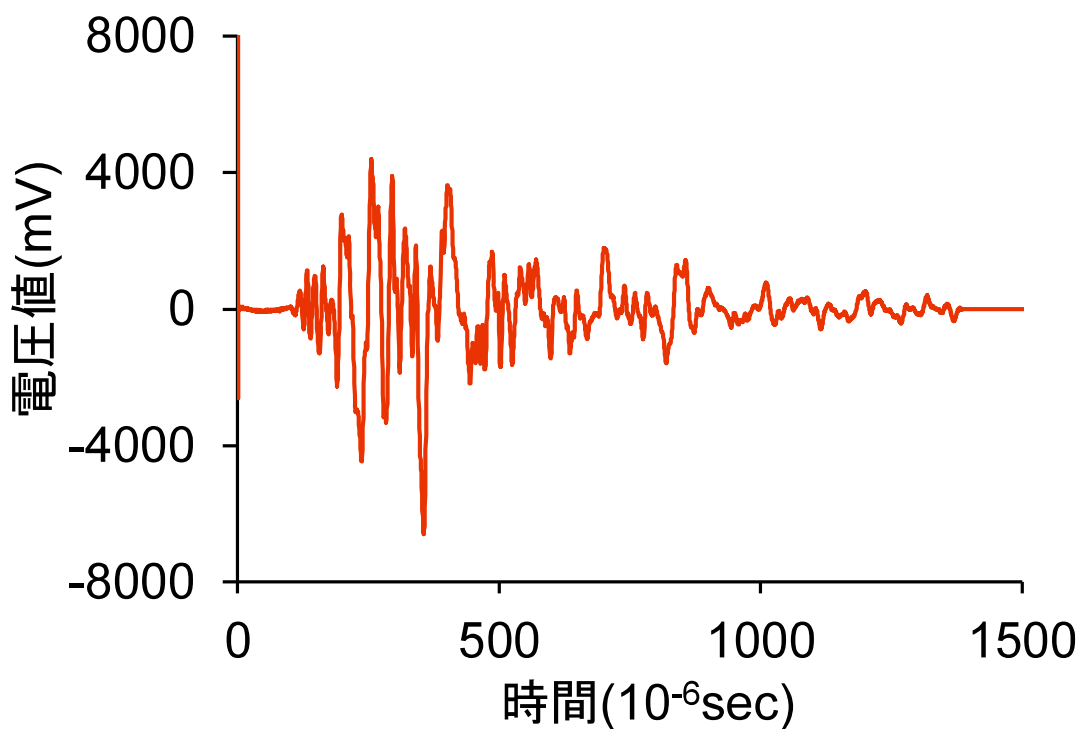


図-4.20 実橋梁の断面図および側面図

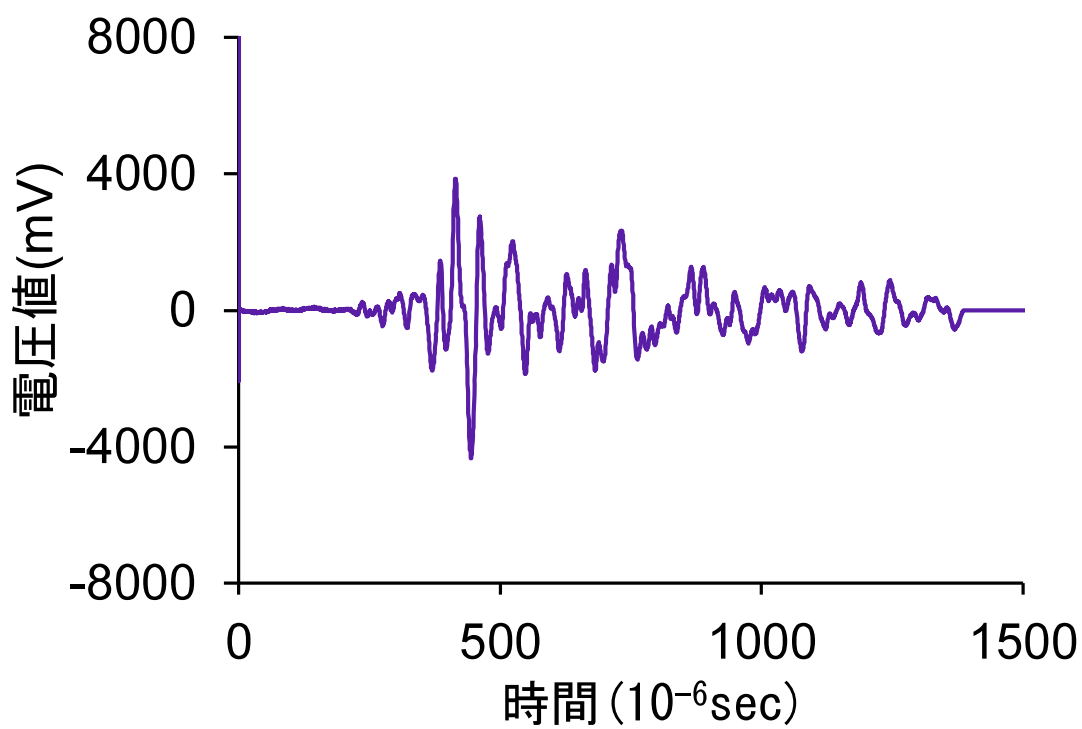


図-4.21 超音波伝搬範囲の実験状況

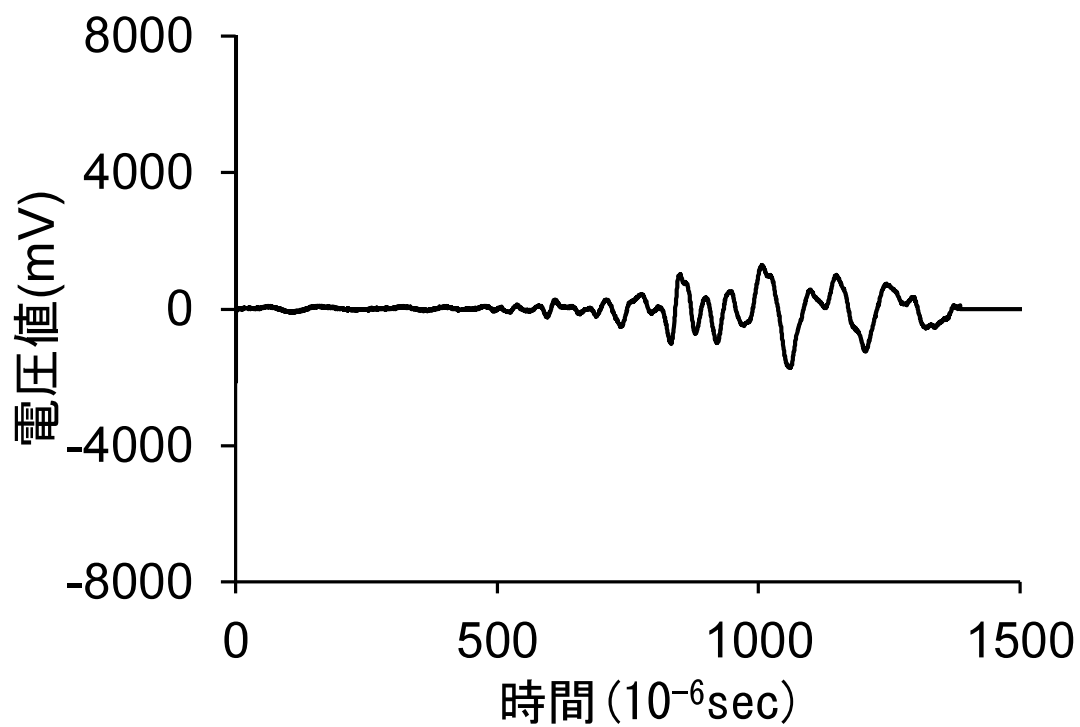
各探触子間隔における電圧値およびピーク電圧値をそれぞれ図-4.22 および図-4.23 に示す。なお、ピーク電圧値とは、得られた電圧値の中で最も大きい電圧値の絶対値である。探触子間隔が大きくなるにつれて、電圧値は小さくなることを確認した。本実験の範囲内で探触子間隔が最も大きい 6500 mm におけるピーク電圧値は 143.7 mV であり、探触子間隔が 500 mm におけるピーク電圧値は 6604.9 mV であった。WUT の探触子は、発信子と受信子が独立している 2 振動子探触子である。探触子間隔を拡げることで 1 回の測定で幅広く調査を行うことが可能である。しかしながら、前述のように得られた電圧値が小さい場合、充填部と未充填部の差異が明確化できないことから、WUT による PC グラウト充填調査では、シースかぶりに応じた適切な探触子間隔で調査を行うことが望ましいことがわかった。



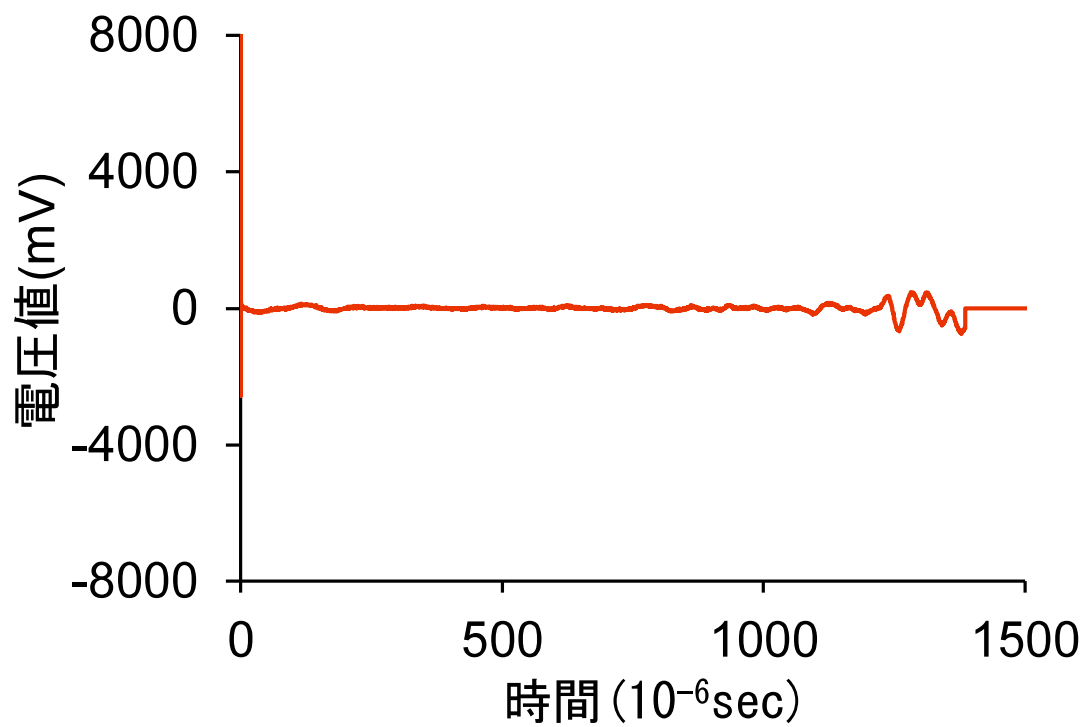
(a) 探触子間隔 : 500 mm



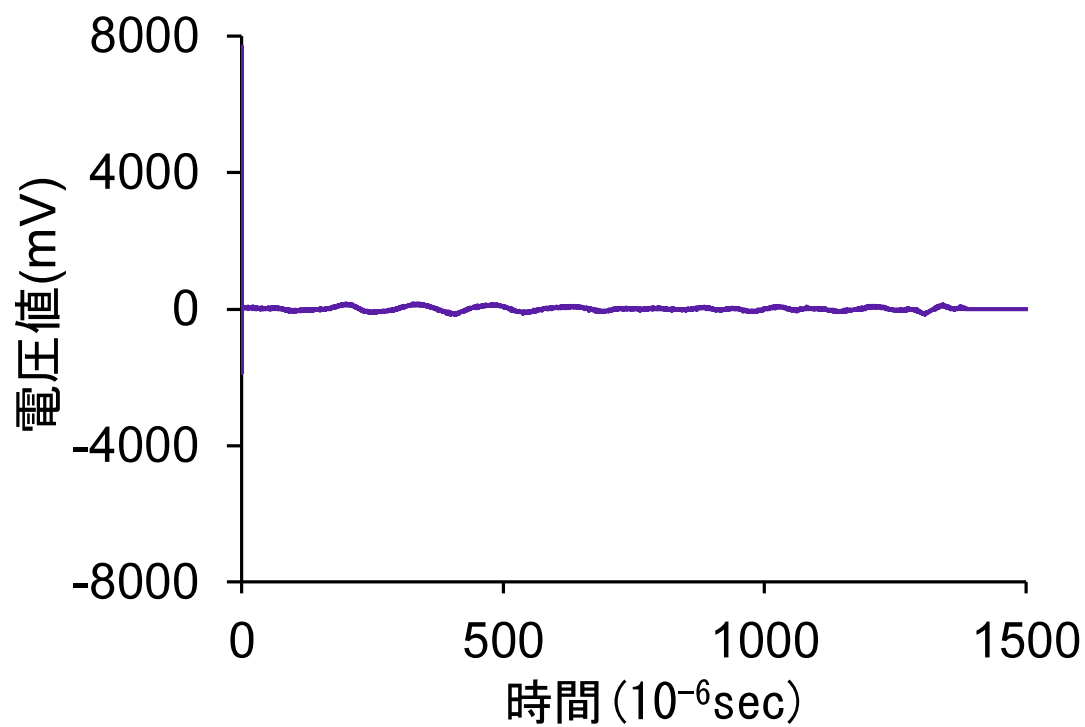
(b) 探触子間隔 : 1000 mm



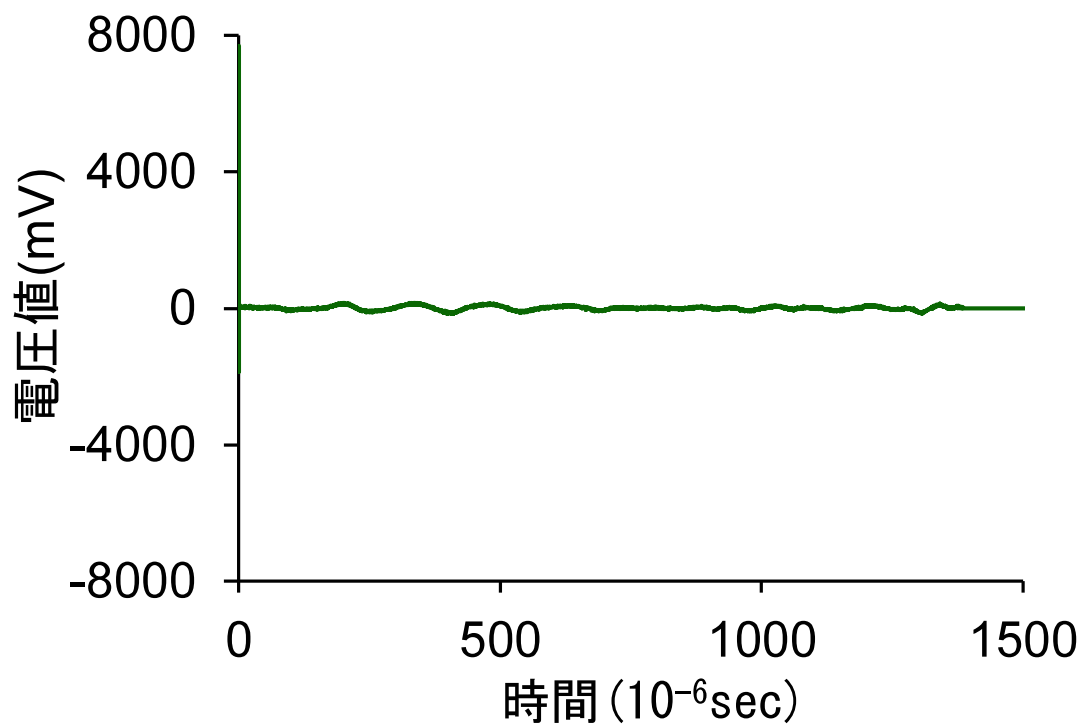
(c) 探触子間隔 : 2000 mm



(d) 探触子間隔 : 3000 mm



(e) 探触子間隔 : 4000 mm



(f) 探触子間隔 : 6500 mm

図-4.22 超音波伝搬範囲の実験状況

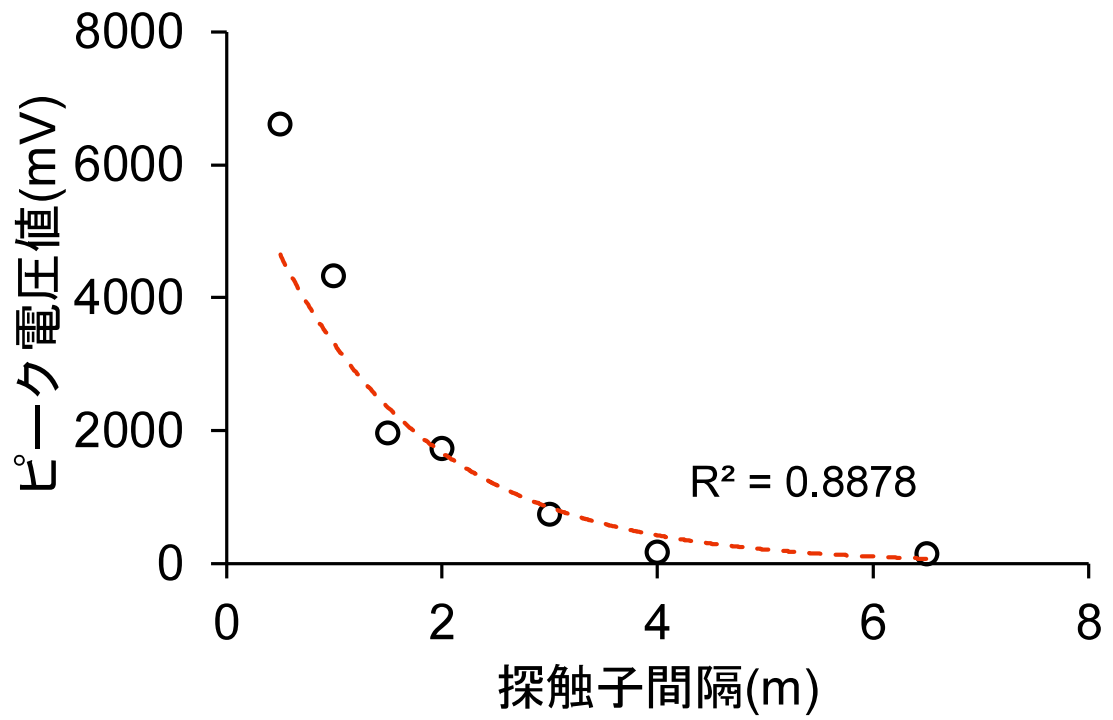


図-4.23 各探触子間隔におけるピーク電圧値

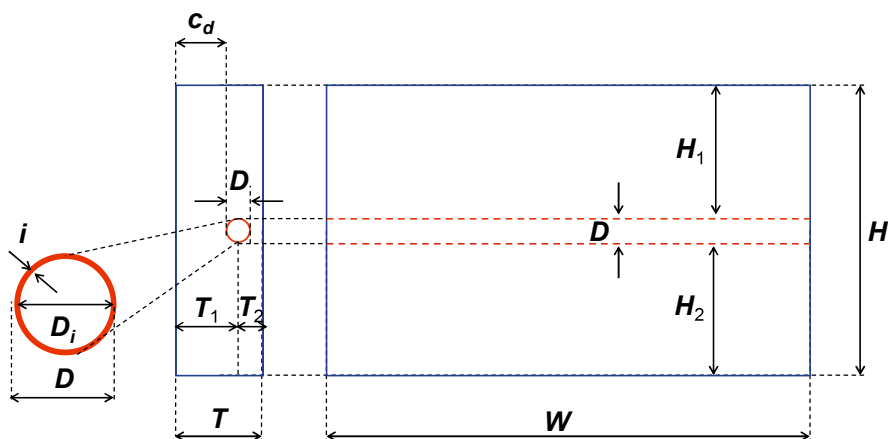


図-4.25 実験供試体の概略図

表-4.4 実験供試体の詳細

供試体	A	B	C	D
mm	T240NS	T240FS	T240	T135
W	1500	1500	1200	1200
H	900	900	600	600
$H_1(H_2)$	415(415)	415(415)	300(300)	300(300)
T	240	240	240	135
T_1	170	170	-	-
T_2	70	70	-	-
c_d	135	135	-	-
グラウト	無(0%)	有(100%)	-	-

表-4.5 コンクリートの配合条件

コンクリート	W/C	単位量 (kg/m ³)				
		HPC ^a	W	S	G	AD ^b
50-12-20H	0.36	420	151	731	1093	2.44

^a 早強ポルトランドセメント ; ^b 高性能 AE 減水剤



図-4.26 実験供試体および試験状況

4.7.2 計測方法

本実験では、先ず供試体A・Bにおいて、埋設されたシース位置をコンクリート表面にマーキングを行った。各供試体中央において、部材を挟み込むように発信・受信探触子を設置し、透過する音速（超音波伝搬速度）を計測した。

反射波を計測するにあたり、探触子をシース直上および供試体表面に圧着した。実務上では、シースかぶり厚に応じて探触子間隔を200 mm, 500 mmと設定されているが¹⁾、本実験では探触子間隔 a を200 mm一定とした。ここでシースからの反射波到達時刻 t_{pd} は式(4.2)より求めることができる。

$$t_{pd} = 2 \times \sqrt{c_d^2 + (a - \phi/2)^2} / V_l \quad (4.2)$$

ここに、 t_{pd} : シース反射波の到達時間 (s), c_d : シースのかぶり (m), a : 探触子間隔 (m), ϕ : 探触子内部の圧電素子の直径 (m), V_l : コンクリート中の超音波伝搬速度 (m/s)である。なお実際のPC橋のグラウト充填調査同様、電磁波レーダによるシース位置の探査誤差、音速の誤差を考慮してシースのかぶり厚 $d_s \pm 2$ cmを計測範囲として設定した。また、版厚からの反射波到達時刻 t_{pe} は、部材厚 T (m)として式(4.3)より求めた。なお上記同様に版厚 $T \pm 2$ cmを計測範囲とした。

$$t_{pe} = 2 \times \sqrt{T^2 + (a - \phi/2)^2} / V_l \quad (4.3)$$

計測・解析用パソコンで制御しながら、発信探触子からパルス波を発信し、受信探触子で4096点(=2¹²)の反射波(時系列波形)のデータを収録した。計測精度を高めるため、シースを含む供試体A・Bを用いた実験では、探触子間隔200 mmを保持したまま、シース直上で探触子位置をスライドさせ、合計8測点で計測を行った。

4.7.3 評価方法

本実験ではサンプリング周波数を2.5 MHzとし、印加電圧は収録波形が32764 mVの計測上限電圧値を超過しない150 Vおよび300 Vとした。WUTを用いたグラウト調査では、コンクリート内部の粗骨材や鉄筋などで反射した波を排除し、できるだけシース反射波のみを抽出するため、4点の計測データを加算する多点計測法を用いている²⁾。

WUTを用いた一般的なグラウト充填調査と本実験で行った充填調査方法の比較を図-4.27に示す。この多点計測では、調査対象のケーブル上で発信探触子と受信探触子をスライドさせながら、異なる位置で4回の計測データを収録する。かぶり厚の等しいケーブル直上で探触子を移動させるため、探触子とシースの相対位置は一定となるが、探触子と粗骨材および内部鉄筋の相対距離は測定箇所ごとに変化する。そのため、計測した波を加算して合成することで不要な反射波の影響を低減し、シース反射波のみを増幅する。

収録した時系列波形の合成波は、前述の解析ソフト上で高速フーリエ変換し周波数分析を行う。探触子200 mm間隔の計測において、シース内にグラウト充填の場合は30kHz程度の低周波帯のピークがみられるが、未充填の場合は低周波帯のピークに加え、より高い周波数帯でも明確なピークがみられることがわかっている¹⁾。

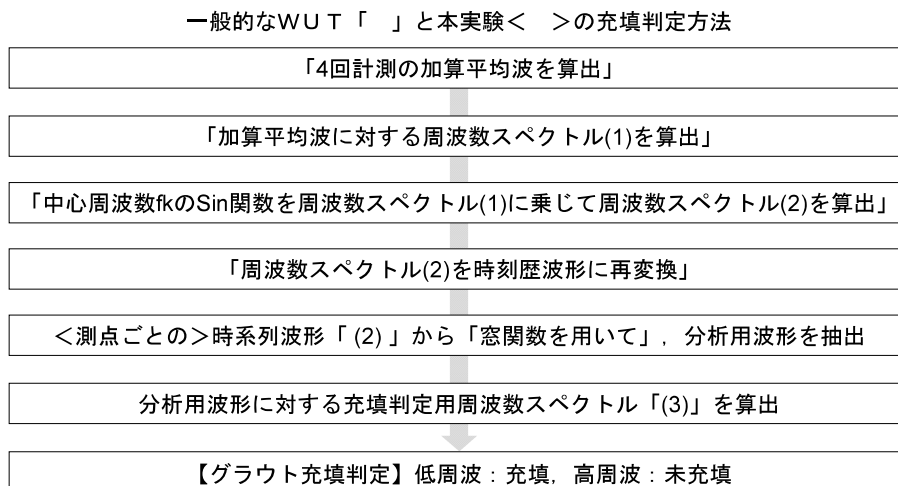


図-4.27 WUTによる充填判定方法の比較

上記はこれまで一般的に実施されてきたWUTの計測・分析方法であるが、本実験では個々の計測波の特徴を詳細に分析し、測定者による定性的な評価によらず、PCグラウトの充填判定を一定条件に基づいて機械的に行った。そのため、反射波の加算処理を行わず、計測毎に時系列波形の記録と周波数分析を行い、**図-4.28**に例示するように周波数スペクトルピークとその周波数値に着目して評価を試みた。既往の研究では、観測される時系列波を抽出するにあたり窓関数がしばしば用いられている¹⁾²⁾。そこで本実験では、あらかじめ窓関数なし・sin窓関数ありの二手法について、周波数分析結果を比較した。**図-4.29**に示すように、本研究で行った実験条件の範囲において、周波数ピークの差異は最大でも7kHz程度と比較的小さいものであった。この比較結果を踏まえて、用いる窓関数の種類による影響を排除するため窓関数を用いずに評価を行った。**図-4.30**に一般的なWUTのグラウト充填判定方法と本実験で行った充填判定方法の比較を示す。実験に際して各供試体を探触子で挟み込む透過法を用いてコンクリート中の超音波伝搬速度を計測した。計測結果を**表-4.6**に示す。以降に示す分析結果では、ここで得られた各供試体の超音波伝搬速度をそれぞれ用いている。

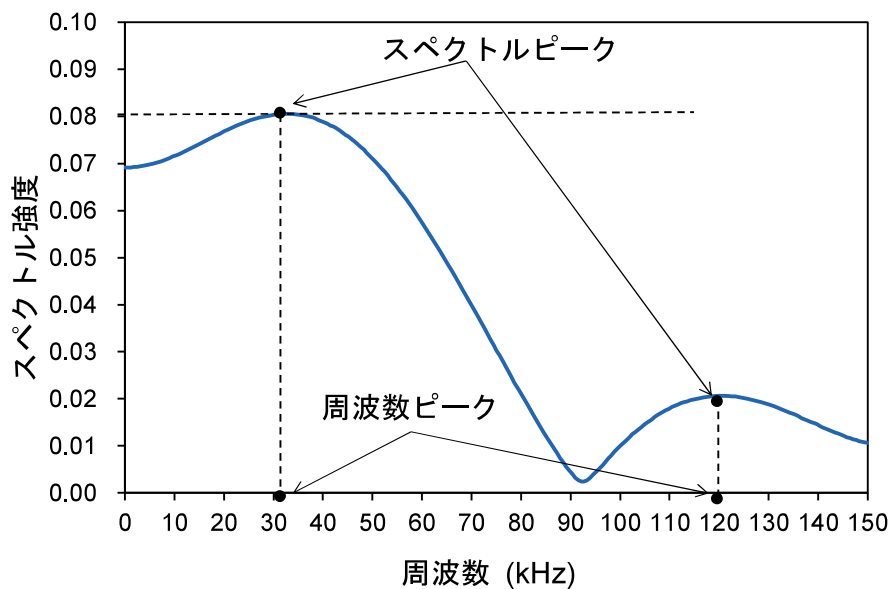


図-4.28 周波数スペクトルピークの例

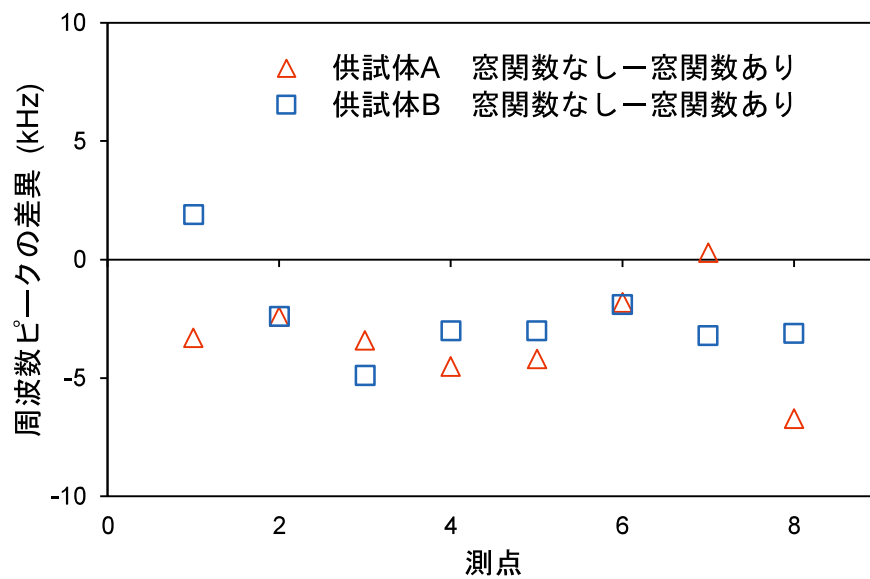
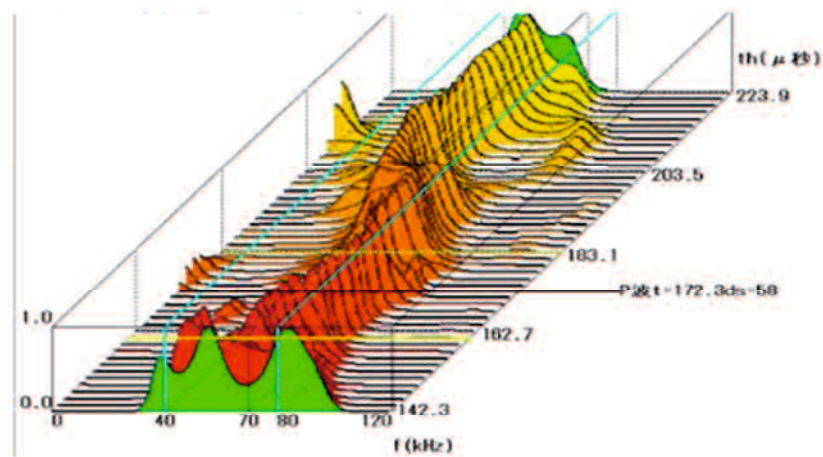
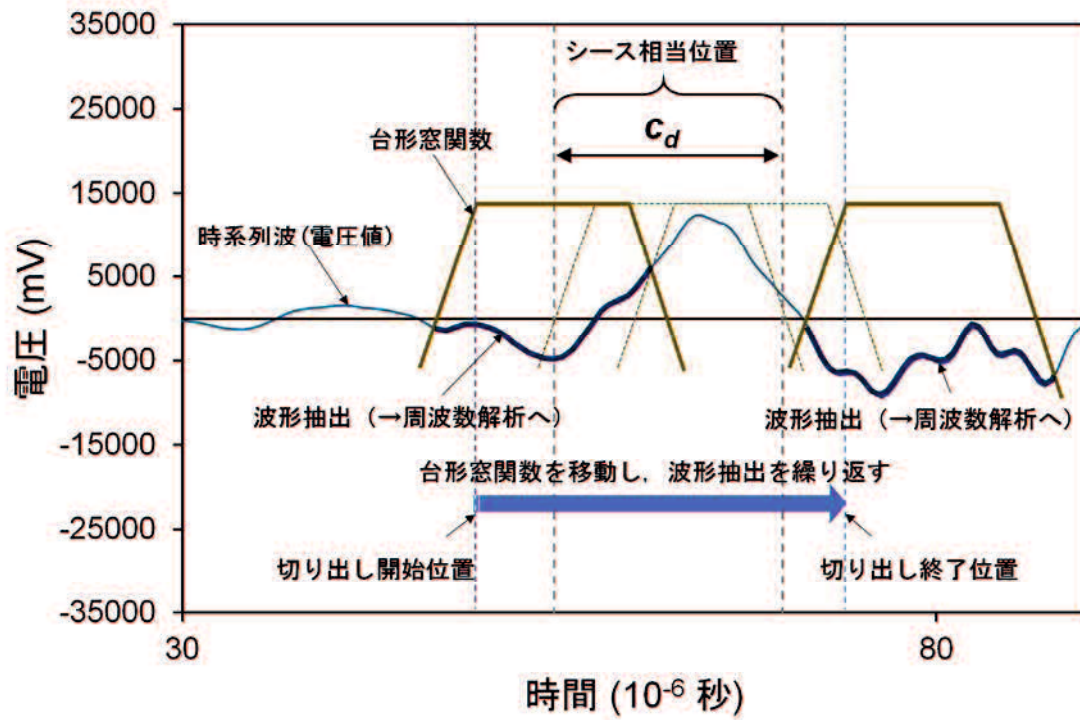
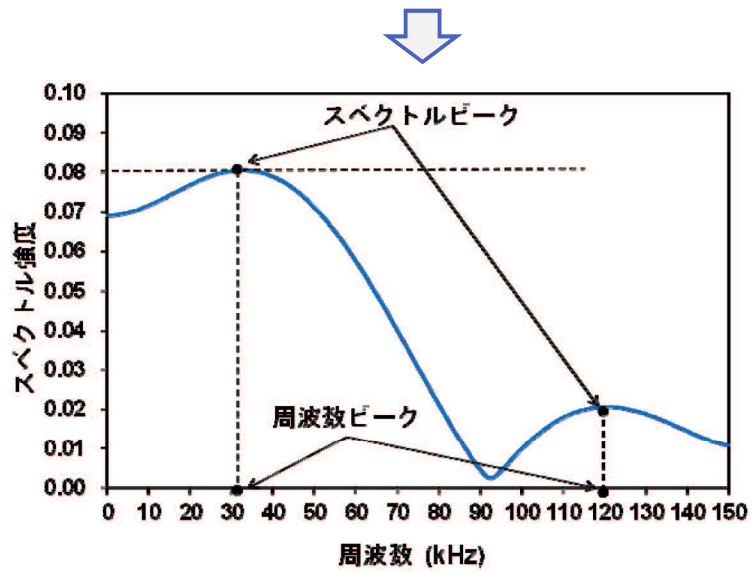
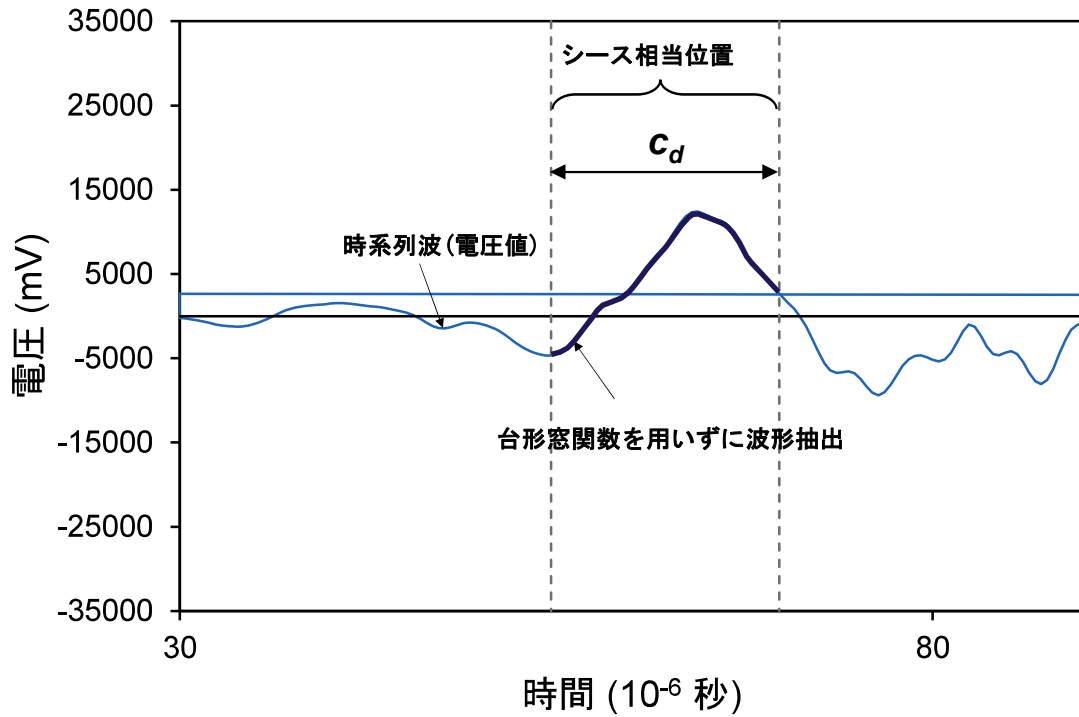


図-4.29 sin 窓関数の有無の影響



(a) 一般的な WUT の充填判定方法



(b) 本実験の充填判定方法

図-4.30 一般的なWUTの充填判定方法と本実験の充填判定方法の比較

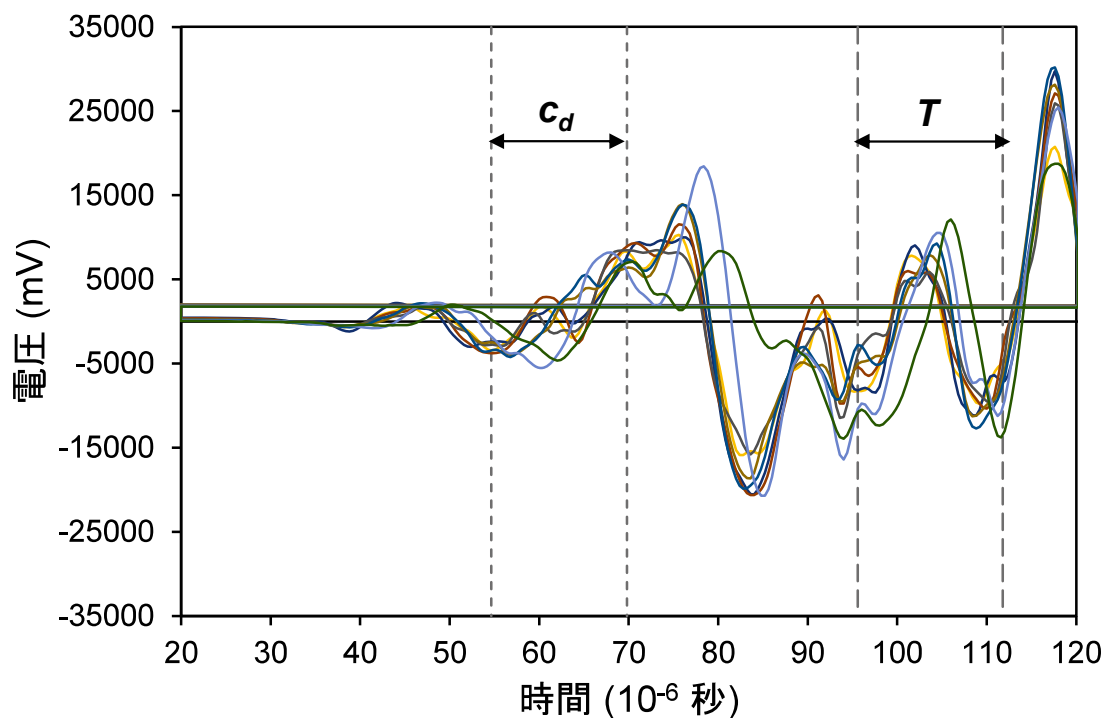
表-4.6 超音波伝搬速度 (V_l)

供試体		超音波伝搬速度 V_l (m/s)
A	T240NS	4782
B	T240FS	4740
C	T240	4768
D	T135	4623

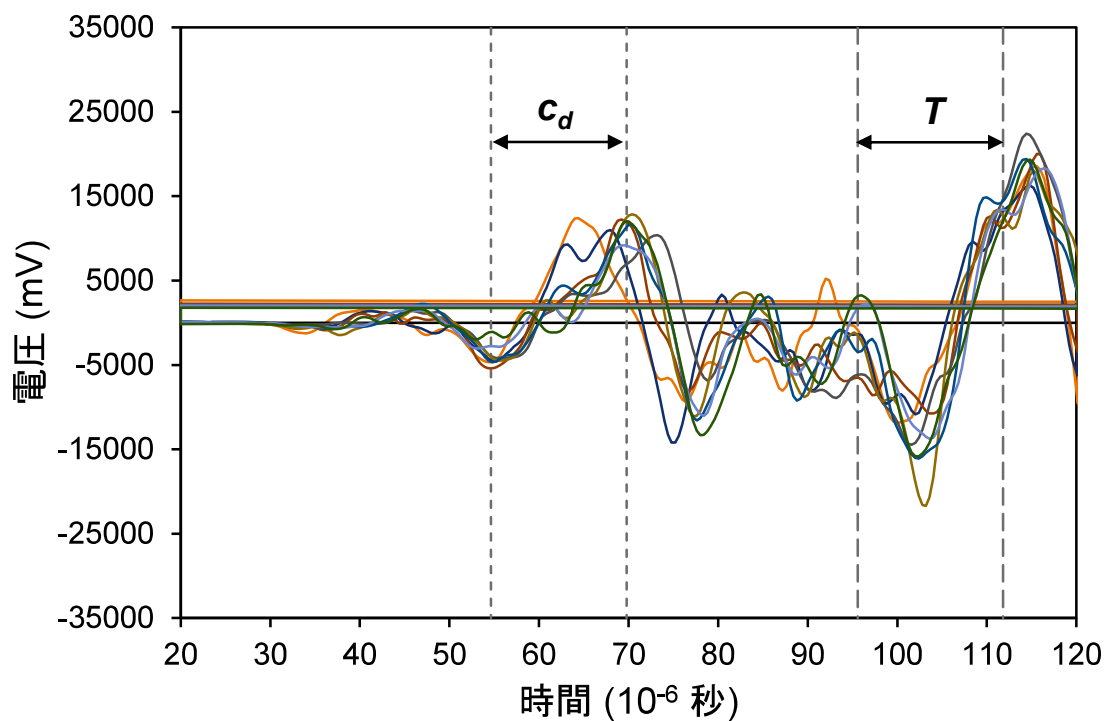
4.7.4 時系列波の結果

供試体 A・B・C・D に対して探触子間隔 200 mm の時系列反射波を収録した。シースを設置した供試体 A・B については送信電圧を 300 V としたが、シースを含まない供試体 C・D については波形収録時に電圧値が上限値 32764 mV を超過したため、送信電圧値を 150 V と半減させた。これは、シースが設置されていない供試体 C・D では、コンクリート内部での散乱減衰が小さく、シースを含む供試体 A・B より超音波が透過しやすいためと考えられる。

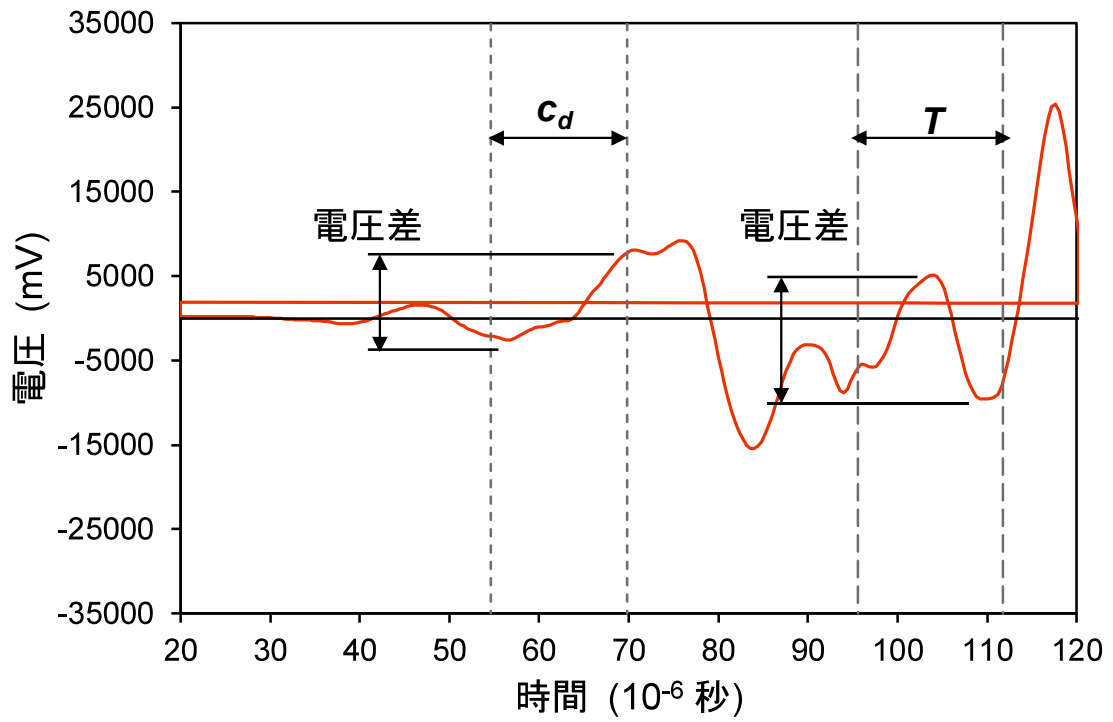
供試体 A・B で得られた時系列波形を図-4.31 に示す。図中の c_d はシース位置 ± 2 cm, T は部材厚 ± 2 cm 区間を示す。シース位置 c_d および部材厚 T の範囲の抽出には、図-4.32 に示す探触子と対象物との最短経路を用いた。グラフの (c) (d) に示す結果より、シース反射波のピーク (A : 10608 mV, B : 14472 mV) よりも端面反射波のピーク (A : 12942 mV, B : 25182 mV) の電圧差が大きいことがわかる。これは直径 70 mm 程度のシースに対して、部材端面は超音波の反射面が相対的に大きく、より大きな反射波が生じることを表している。なお、各対象の抽出範囲外でもピークはみられるが、これは最短経路以外の反射波の干渉作用によるものと考えられる。



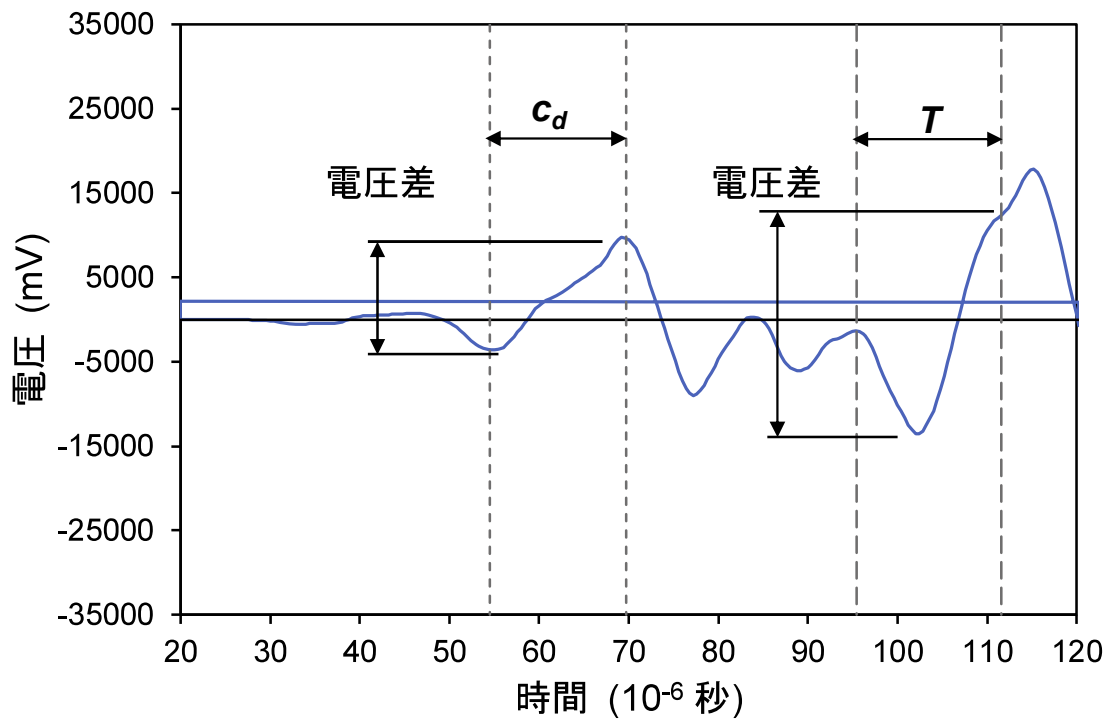
(c) 供試体 A の各測点毎の時系列波



(d) 供試体 B の各測点毎の時系列波



(e) 供試体 A の平均時系列波



(f) 供試体 B の平均時系列波

図-4.31 時系列波形

圧電素子の端部を結んだ超音波の最短経路

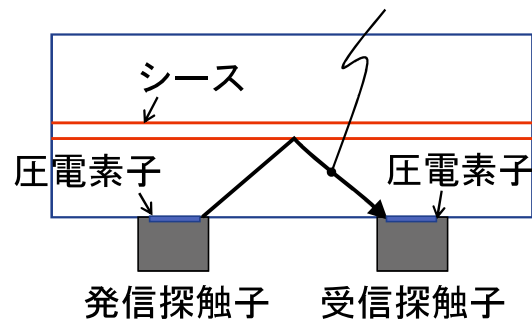


図-4.32 超音波の最短経路

4.7.5 反射波の周波数スペクトル結果

各供試体について探触子間隔 200 mm で得られた時系列波形を図-4.31 に示す。また表-4.7 にシース・部材厚の相当位置 $c_d \cdot T$ と各超音波伝搬速度を基に抽出した時間範囲を示す。抽出した時系列波は高速フーリエ変換して反射波スペクトル強度を求めた。以下に解析結果と考察をまとめて示す。

表-4.7 各対象の抽出時間

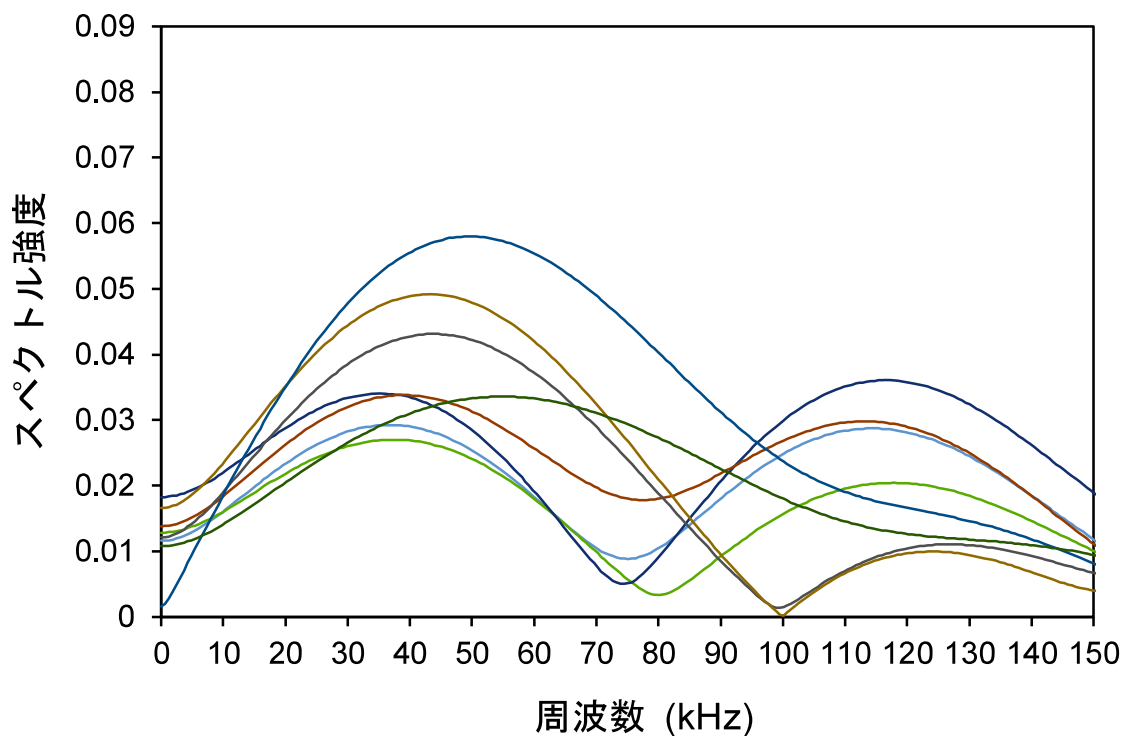
供試体	シース (10^{-6} 秒)	部材端面 (10^{-6} 秒)
A	54 ~ 70	95 ~ 112
B	55 ~ 71	96 ~ 113
C	-	95 ~ 113
D	-	56 ~ 73

a) シース反射波の周波数スペクトル

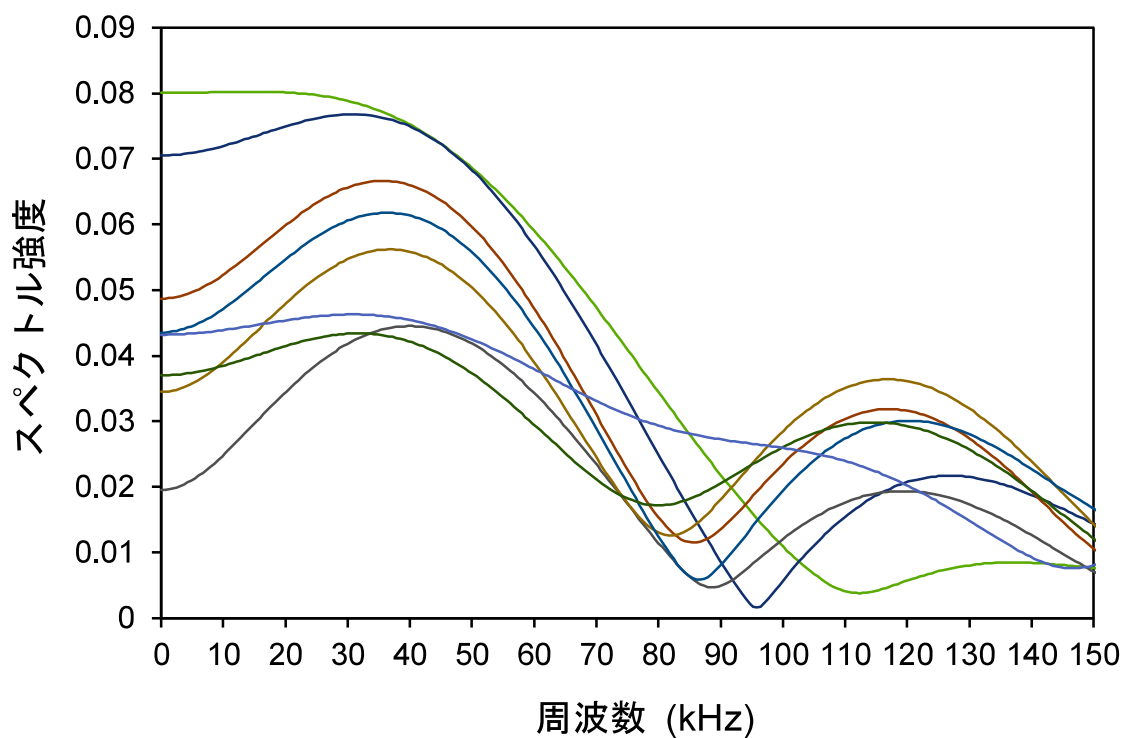
供試体 A・B の各々 8 点 (回) の計測によって得られたシース反射波による周波数スペクトル分布例を図-4.33 に示す。充填シースを設けた供試体 B では、平均 33 kHz (28~35 kHz) 程度の低周波帯域にピーク周波数がみられる反射波が得られた。

一方、未充填シースを設けた供試体 A では、供試体 B でみられたような卓越したピーク周波数が確認できず、ピーク周波数帯域の比較のみでグラウト充填・未充填を判定することは適当ではないと判断した。なお、供試体 B に比べて供試体 A の低周波帯域が減少した理由として、未充填シースの直径よりも小さな波長ではシースによる反射が生じるが、直径よりも大きな波長はシースを透過したことが考えられる³⁾。内径 $D_i = 65$ mm の未充填シースおよび超音波伝搬速度 $V_l = 4782$ m/s を有する供試体 A の場合、およそ 74 kHz ($= V_l / D_i$) 以下の周波数の超音波は空隙部で反射せず、シースを透過しやすいものと思われる。ここで、供試体 A・B について周波数スペクトルの大きさのばらつきを一定評価するため、各最大値で除すことで正規化を行った。正規化した周波数分布を図-4.34 に示す。この結果に示すように、いずれの場合でも、周波数 30~50 kHz の範囲内で最大値を示すものの、未充填シースを含む供試体 A では比較的高い周波数域 (100~120 kHz 程度) の顕著なピークがみられた。一方、充填シースを埋設した供試体 B では、そのような顕著な傾向はみられないものの、比較的高い周波数域でも若干のピークがみられた。

これらの結果に示すように、一定の傾向はみられるが、シース反射波の周波数ピークのみからグラウトの充填判定を行うことは必ずしも適当ではないものと思われる。そこで周波数スペクトルの分布状況を調べるため、実務においてグラウト充填判定に使用される周波

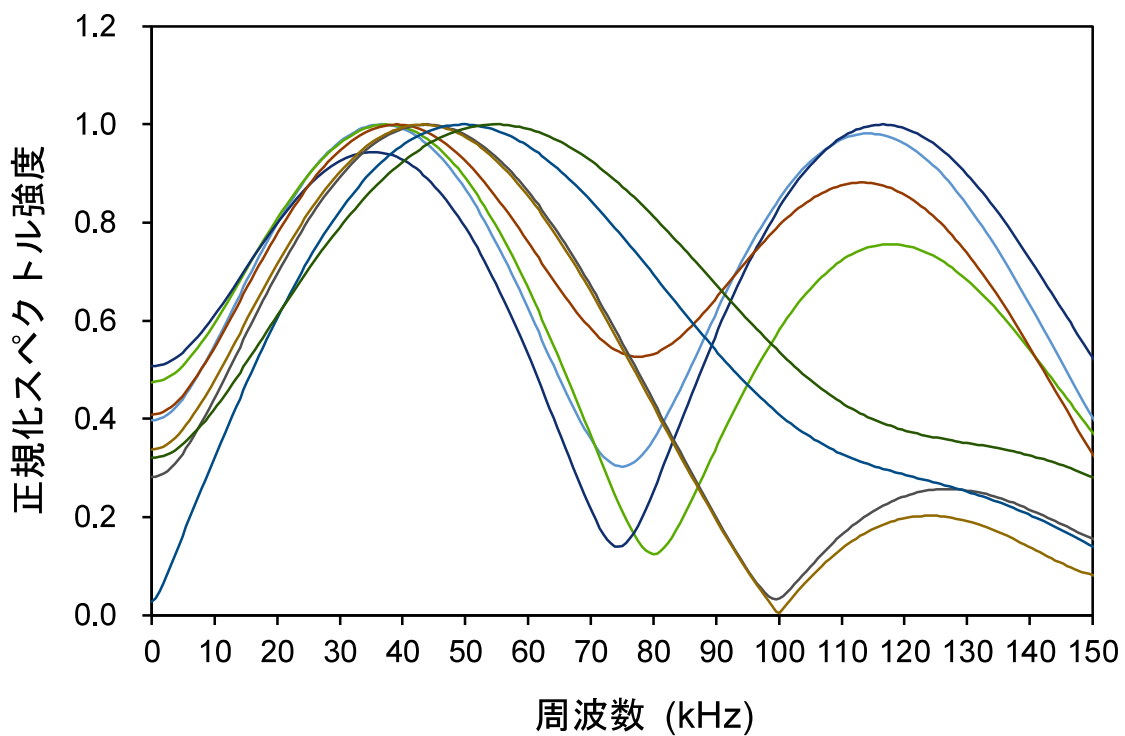


(a) 供試体 A

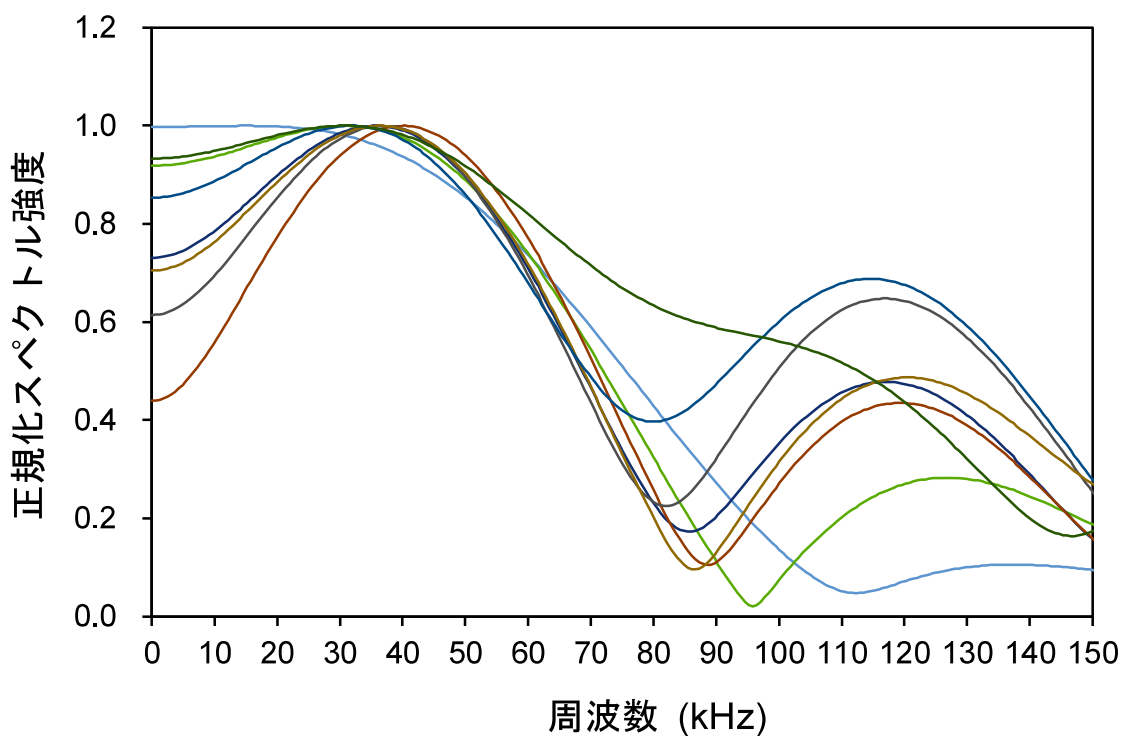


(b) 供試体 B

図-4.33 シース反射波の周波数スペクトル



(a) 供試体 A



(b) 供試体 B

図-4.34 シース反射波の正規化周波数スペクトル

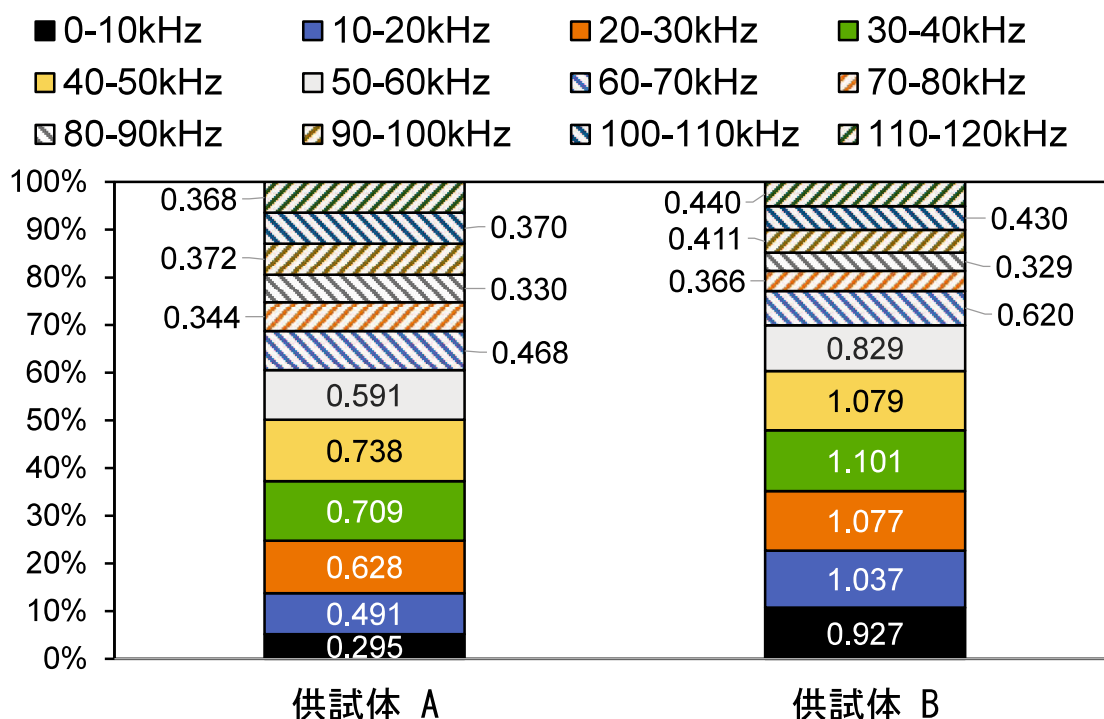


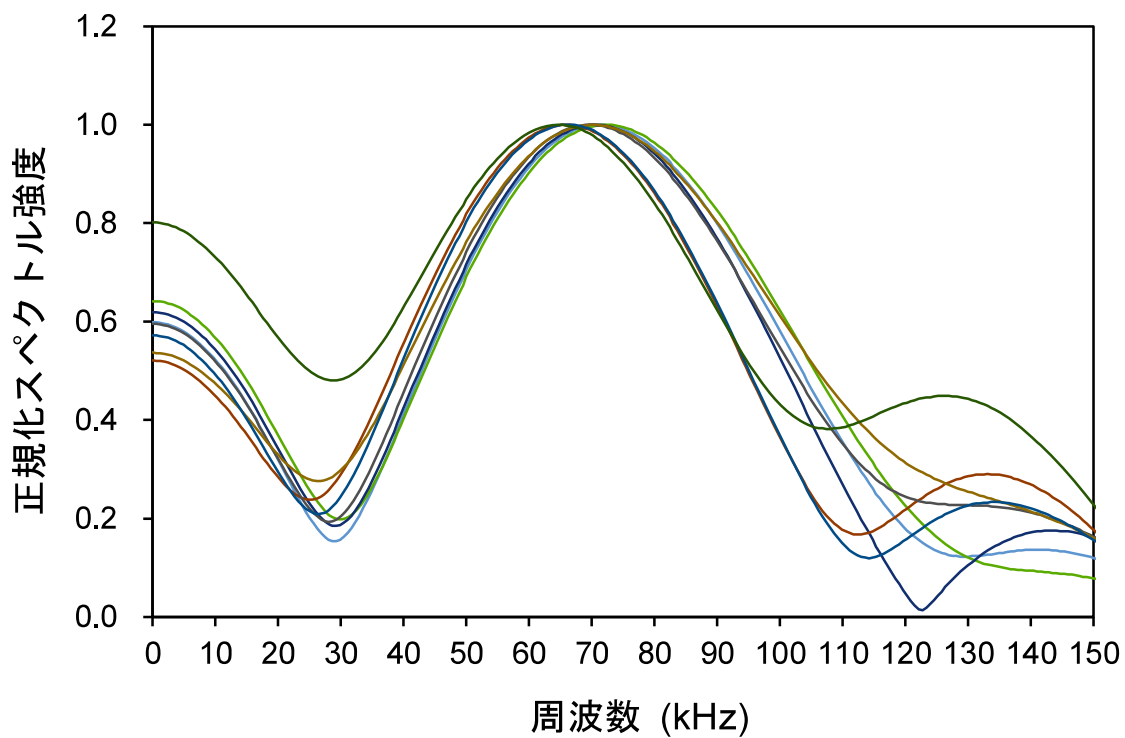
図-4.35 シース位置からの反射波の周波数分布

数帯域 0～120 kHz において、10 kHz ごとに占める割合を求めた。周波数スペクトルの分布を図-4.35 に示す。

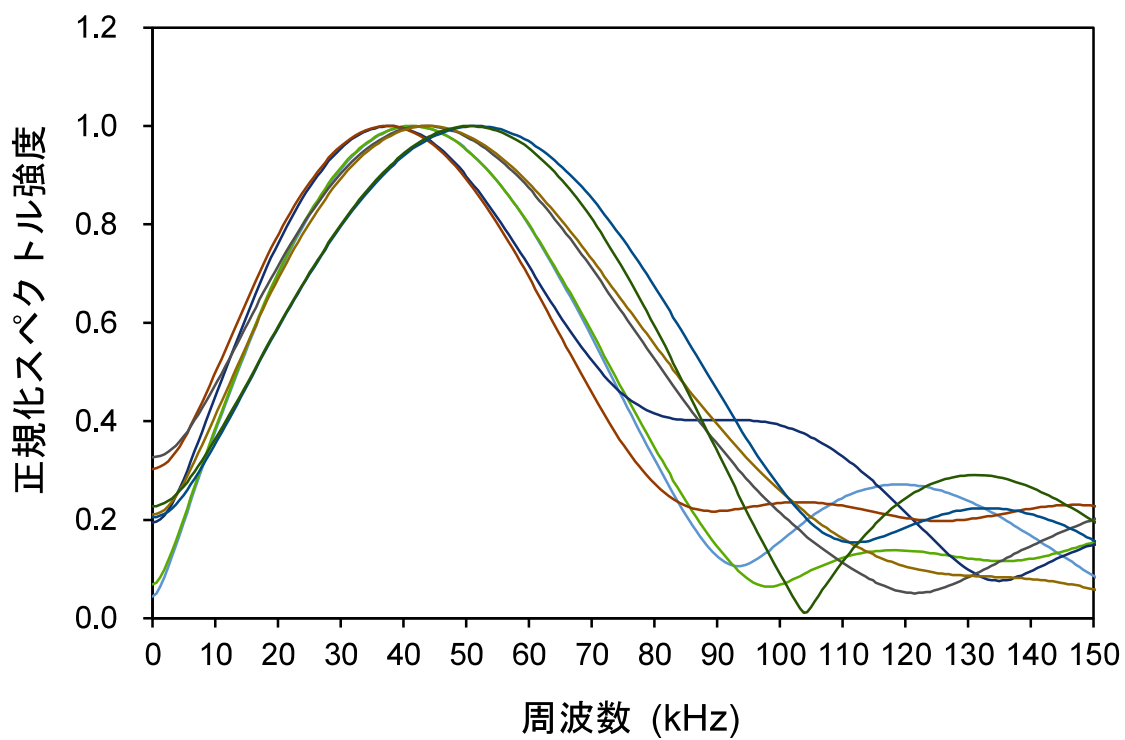
充填シースを埋設した供試体 B では、0～20 kHz の低周波成分が約 20%含まれているのに対して、未充填シースによる供試体 A では、その割合が約 10%と小さい。一方、60～120 kHz の高周波成分をみると、供試体 B で約 30%を占めるが、供試体 A ではその割合が 40%程度となっている。このことより、周波数ピークだけではなく、その周波数分布が占める割合も考慮に加えることで、グラウト充填判定の一助になるものと考えられる。

b) 端面反射波の周波数スペクトル

未充填・充填シースを埋設した供試体 A・B の版厚位置からの端面反射波を正規化した周波数スペクトル分布を図-4.36 に示す。これらの結果はシース反射波の分析と同様に、各 8 回計測した端面反射波を正規化したものである。充填シースを埋設した供試体 B では、平均 44 kHz (37～51 kHz) でピークが得られたが、未充填シースを埋設した供試体 A では、平均 69 kHz (65～72 kHz) 程度と比較的高い周波数帯域の反射波が多くみられた。前節で示したシース位置における周波数スペクトルと比べて、未充填シースを含む供試体 A の端面反射波の周波数スペクトルは、全体的に高周波域へシフトしていた。これは図-4.37 に示すように、版厚を往復する反射波に加えて、より短い時間で収録される未充填シースからの反射波の成分も加わるため、結果的に高周波成分が増加したものと考えられる。



(a) 供試体 A



(b) 供試体 B

図-4.36 端面反射波の正規化周波数スペクトル

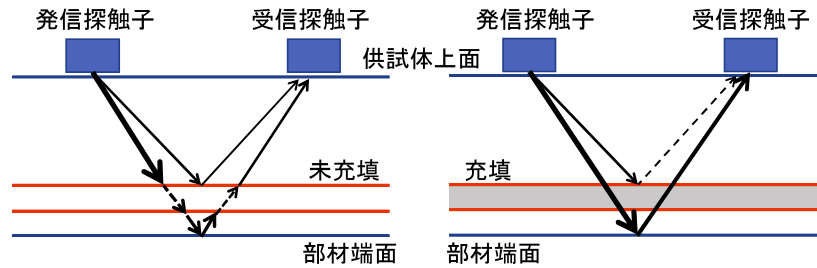


図-4.37 反射波の伝搬経路概念図

次に、全ての供試体 A・B・C・D の端面反射波による正規化した周波数スペクトルを図-4.38 に示す。コンクリート単身の供試体 C・D は、いずれもグラウト充填シースを含む供試体 B の平均値 44 kHz と同程度に、それぞれ 37 kHz・38 kHz 付近でピーク周波数がみられた。ここで多重反射した共振周波数を測定する場合、部材厚によって異なる結果が得られることが報告されている⁴⁾。本研究の供試体 C・D はそれぞれ版厚 240mm, 135mm であるが、図-4.24 b) に示す一往復する反射波では部材厚によらずほぼ同様な周波数を示す結果が得られた。これに対して、未充填シースが設置された供試体 A のピーク周波数は、前述のように高周波域へシフトし、平均 69 kHz でピークを示している。これらの結果より、充填シースを含むコンクリート部材では、シースを含まないコンクリート単身とほぼ同様の周波数分布を示し、シース内に未充填部が内在すると、その反射波にはより高周波成分が多くなる傾向があることがわかる。

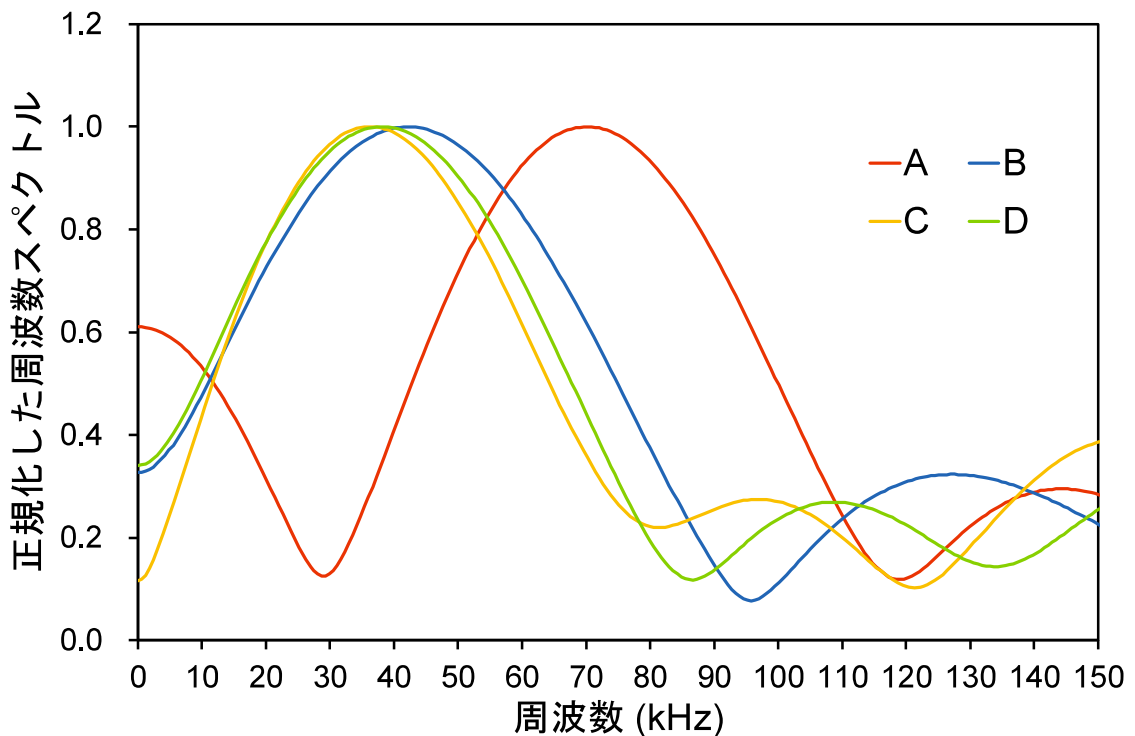


図-4.38 端面反射波の正規化周波数スペクトルの比較 (供試体 A・B・C・D)

4.7.6 シース・端面反射波の周波数スペクトル強度

供試体 A・B のシース反射波および端面反射波の周波数スペクトル強度を図-4.39 に示す。この結果に示すように、シース反射波の周波数スペクトル強度に比べ、端面反射波による周波数スペクトル強度が充填・未充填によらず明らかに大きく、特に各端面反射波のピークが顕著となった。さらに、シース反射波および端面反射波でピークを示した周波数帯域に着目すると、端面反射波の方が充填・未充填によらず高い傾向にある。

これは図-4.37 に示したように、版厚を往復する反射波に加えて、シースからの反射波の成分も加わるため⁴⁾、高周波成分が増加したものと考えられる。そのため、シース相当位置でグラウト充填判定を行い、その高周波数分布の割合をみる場合、端面反射の影響も十分に考慮しておく必要がある。従来、WUTによるグラウト充填調査では、シース相当位置に着目して充填判定を行っていたが、端面反射波はシース反射波に比べて、周波数ピークが明らかで周波数スペクトル強度も大きいため、これを評価に加えることで、グラウト充填判定の精度向上を図ることができるものと思われる。

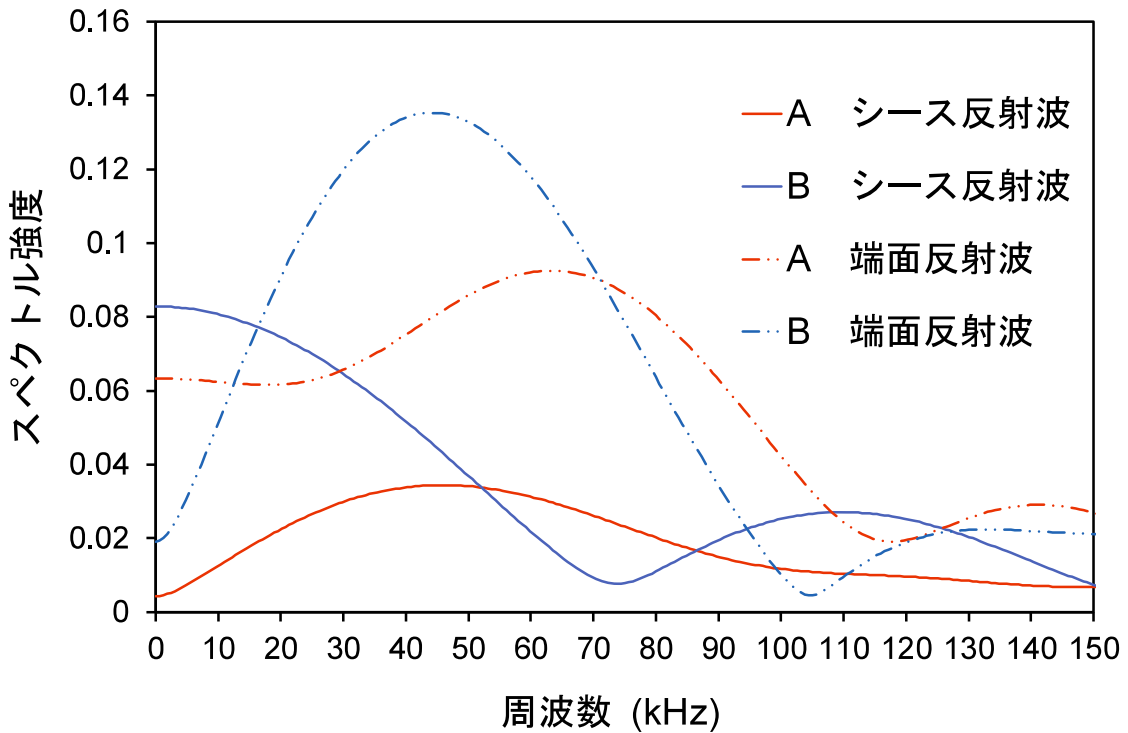


図-4.39 シース・端面反射波の周波数スペクトルの比較

4.8 探触子間隔の検証実験

WUTでは、対象物のかぶり厚が150 mm以上の場合は探触子間隔を200 mmに、かぶり厚が150 mm以下の場合は探触子間隔500 mmを標準としてグラウト充填調査を行う。ただし、この探触子間隔は今までのPCグラウト充填調査業務を行う中で経験則から決定されていた。4.7の実験結果より、対象物からの反射波はかぶり厚によって周波数が増減する可能性が示された。このため、4.7で使用したグラウトの充填と未充填が既知である供試体A, Bを用いてかぶり厚 (=D : 135 mm) に対して、探触子間隔を1D, 1.5D, 2D, 2.5D, 3Dと変化させて最適な探触子間隔の検証実験を行った。図-4.40に本実験の概要を示す。

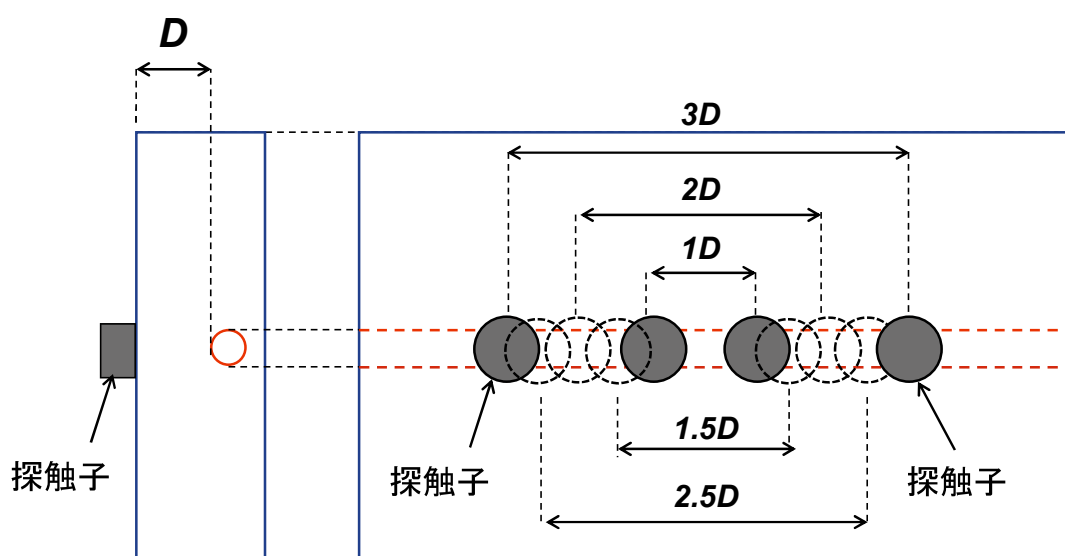


図-4.40 探触子間隔検証実験の概要図

4.8.1 計測方法

本実験では、図-4.40に示すように探触子間隔を1D, 1.5D, 2D, 2.5D, 3Dと変化させた。各探触子間隔で、2回の計測を行い、時系列波を収録した。一般的なWUTのグラウト調査業務では、サンプリング周波数2.5 MHz, サンプリング数4096点としている。本実験では、この条件に代えて詳細な結果を得るために、サンプリング周波数10 MHz, サンプリング数16384点としてシーすからの反射波ピークを求めた。

部材を挟み込んで収録した超音波伝搬速度を表-4.8に示す。

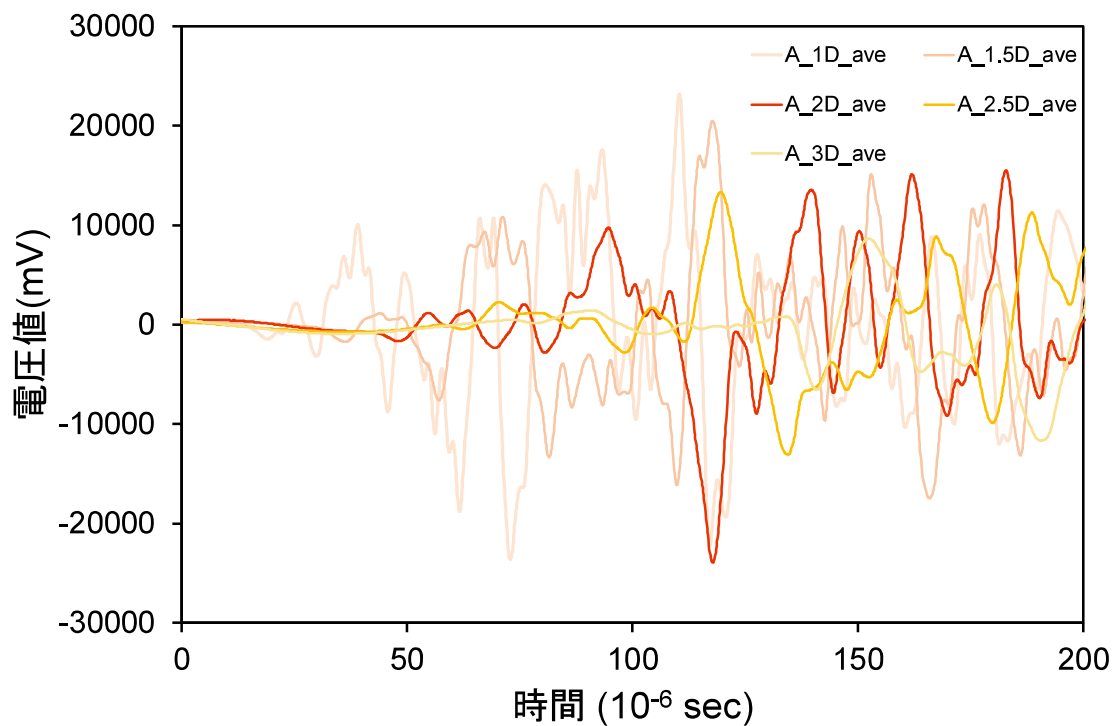
表-4.8 超音波伝搬速度 (V_l)

供試体		超音波伝搬速度 V_l (m/s)
A	T240NS	4782
B	T240FS	4740

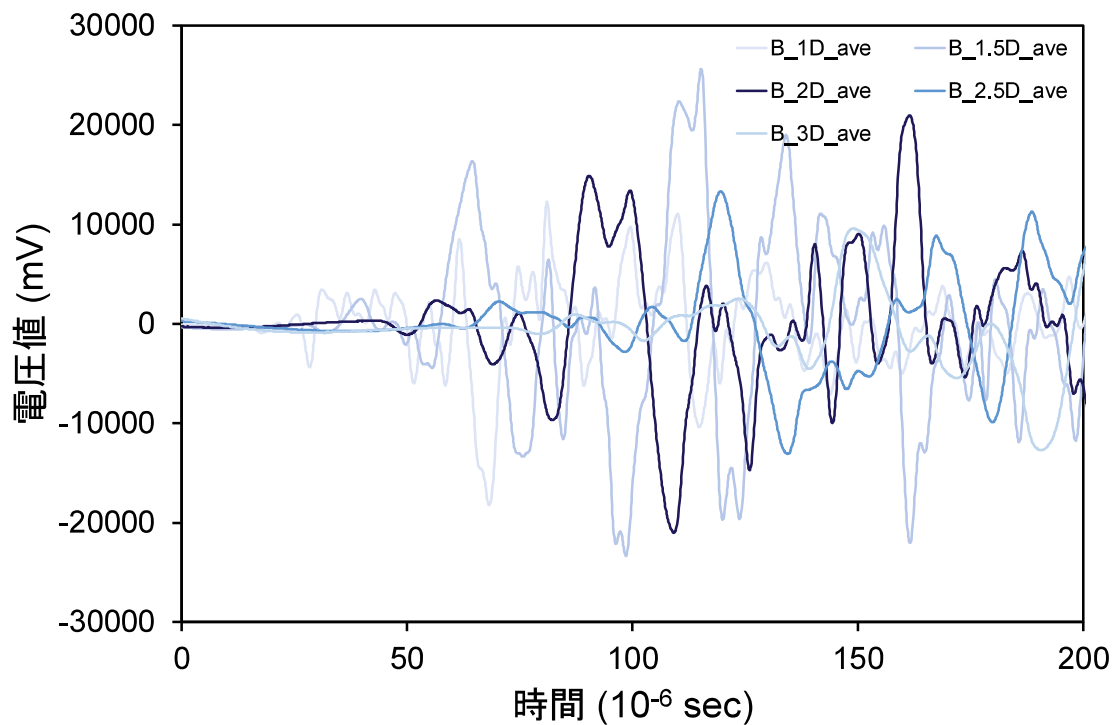
4.8.2 実験結果

本実験で得られた時系列波をシース相当位置で切り出して高速フーリエ変換を行った。

本実験でも、sin窓関数を用いずに時系列波の切り出しを行った。さらに多点計測による加算波を算出せず、測点ごとにスペクトル強度と周波数ピークによって充填判定を行った。各探触子間隔で得られた未充填供試体Aと充填供試体Bそれぞれの各2点の平均の時系列波を図-4.41に示す。また、その時系列波からシース反射位置で切り出し正規化した周波数解析結果を図-4.42に示す。なお、周波数解析結果には、2回行ったそれぞれの計測結果と平均化したものを示した。

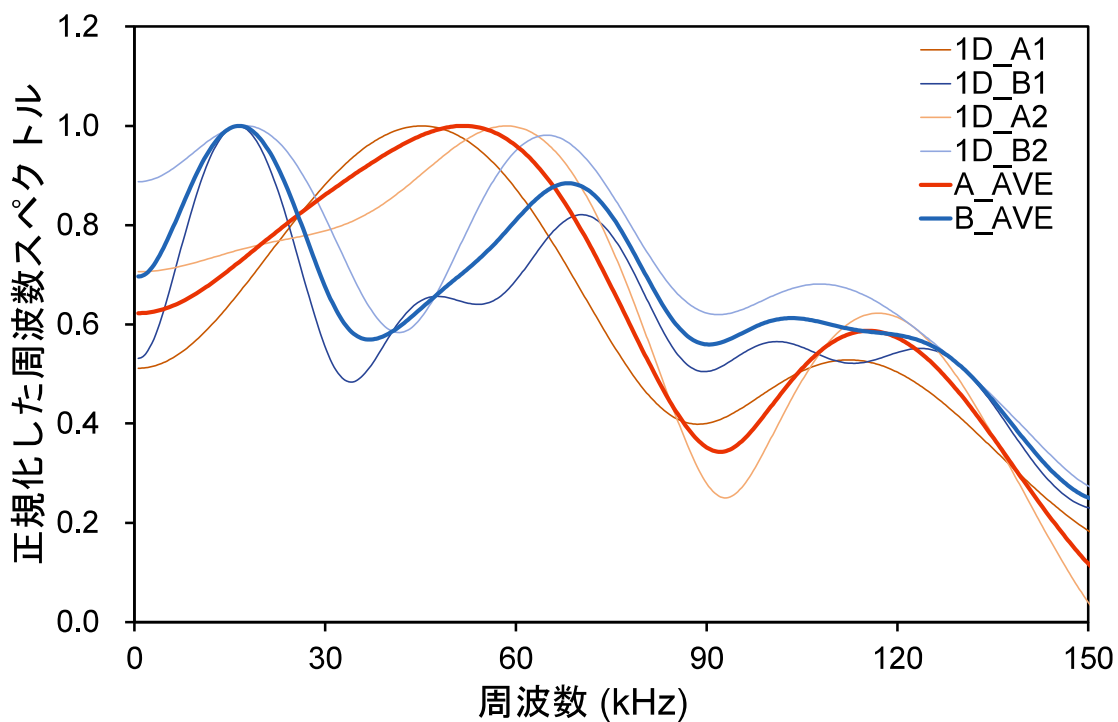


(a) 供試体 A

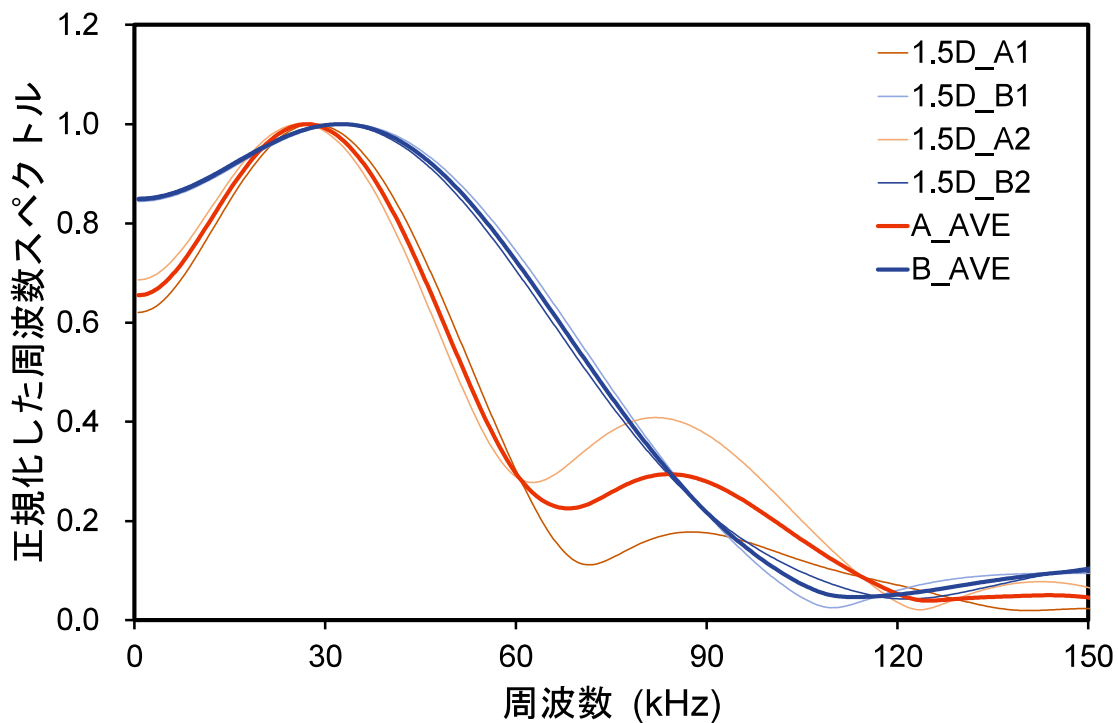


(b) 供試体 B

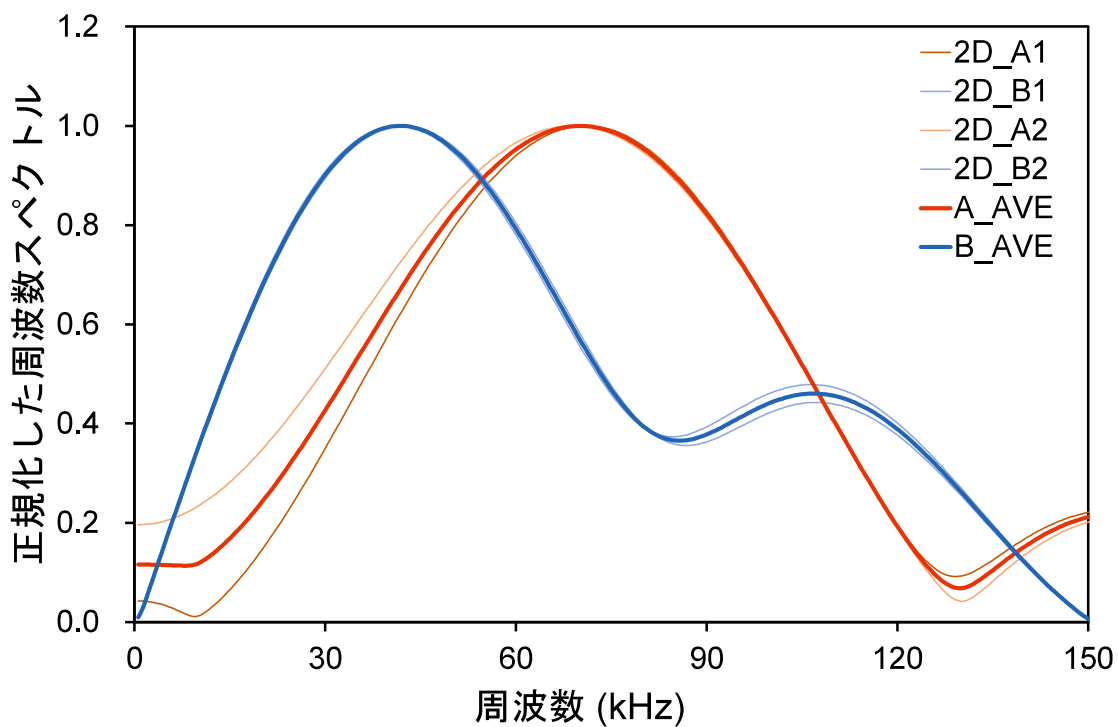
図-4.41 探触子間隔検証実験の時系列波形



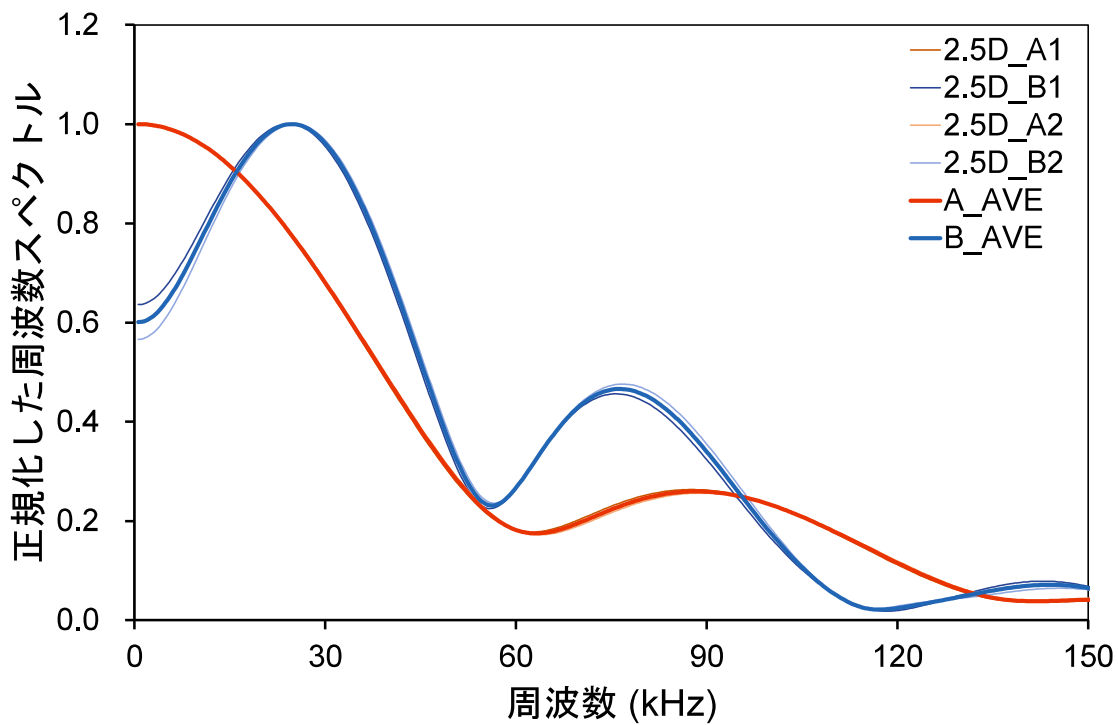
(a) 探触子間隔 1D (135 mm)



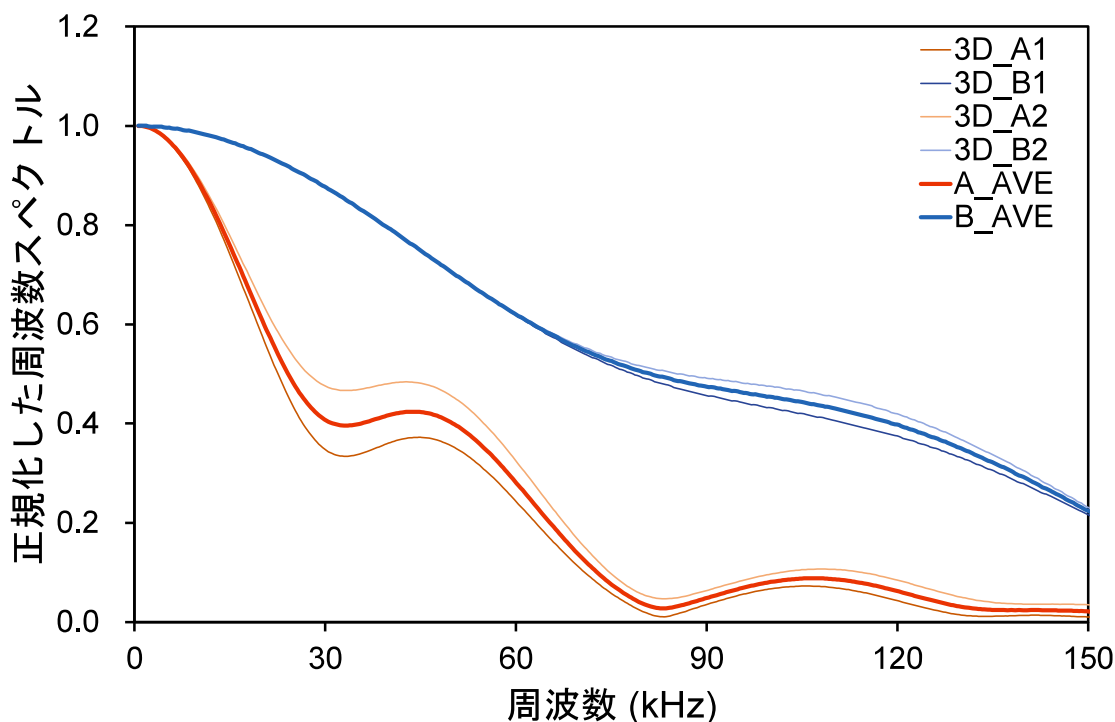
(b) 探触子間隔 1.5D (202.5 mm)



(c) 探触子間隔 2D (270 mm)



(d) 探触子間隔 2.5D (337.5 mm)



(e) 探触子間隔 3D (405 mm)

図-4.42 探触子間隔検証実験の正規化周波数スペクトル

図-4.41に示すように、供試体A・Bのいずれも探触子間隔1Dで初期時間の電圧値が大きい結果となっている。1Dでは初期時間のグラフの正負の傾きが頻繁に入れ替わる傾向を示している。これはコンクリート内部からの反射の影響を大きく受けた結果と考えられる。供試体Aは、概ね供試体Bよりもグラフの傾きが緩やかに変化している。これは未充填シースの空隙で大きく反射した波が相互に干渉しているものと推測される。

図-4.42に示す周波数解析結果では大きな差が確認された。探触子間隔1Dでは、供試体A・Bともに、他の探触子間隔に比べて測点毎のばらつきが大きい結果となった。これは時系列波の結果と同様、コンクリート内部の反射によるものと推測される。供試体Aでは平均17 kHz、供試体Bでは平均52 kHzの結果が得られた。探触子間隔1.5D以上では、2回の計測結果でばらつきが少ない結果となり、再現性が高いことが明らかとなった。探触子間隔1.5Dの周波数ピークに着目すると供試体Aでは平均27 kHz、供試体Bでは平均32 kHzとなった。周波数ピーク差は5 kHzと小さく、周波数ピークのみでの充填判定は困難と考えられる。探触子間隔2Dでは、供試体Aで平均70 kHz、供試体Bで42 kHzの結果が得られた。供試体Aと供試体Bとの周波数ピーク差が約30 kHzあり、充填判定が可能と考えられる。探触子間隔2.5D、3Dでは、ともにばらつきは小さいものの、いずれも供試体Aで周波数ピークが0 kHzとなっている。これはシース相当位置を切り出す際の打ち切り誤差によるものと考えられる。探触子間隔2Dの場合、ピーク周波数の差が最も明らかであり、最適な探触子間隔であると考えら

れる。4.7.5の端面反射波の結果図-4.35に基づき低周波と高周波の閾値を45 kHzと設定した場合、充填供試体Bでは、1D、1.5D、2D、2.5Dで低周波が確認できたが、未充填供試体Aでは1Dと2Dのみ高周波が確認される結果となった。各探触子間隔における平均ピーク周波数を表-4.9に示す。

以上の結果より、本供試体のかぶり厚135mmでは、探触子間隔は特に未充填シーすに対して与える影響が大きいと考えられる。WUTでは、探触子を片側のみに設置する反射法を用いており、コンクリート内部からの反射波に加え、コンクリート表面を伝搬する表面波の影響を受ける。本実験では、探触子間隔をかぶり厚の0.5倍毎にずらして計測を行ったが、その周波数ピークは大きく異なる値となった。探触子間隔がPCグラウトの充填判定に与える影響が大きいことが明らかとなった。

表-4.9 各探触子間隔におけるピーク周波数

供試体	1 D	1.5 D	2 D	2.5 D	3 D
A	52 kHz	27 kHz	70 kHz	0 kHz	0 kHz
B	17 kHz	32 kHz	42 kHz	25 kHz	0 kHz

4.9 第4章のまとめ

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、その基礎特性の把握を行った。WUTを用いて行うPCグラウト充填調査の手順に従い、接触媒質、探触子特性、再現性、探触子を押しあてる際の力の強弱による影響、部材端面からの反射波の影響、最適な探触子間隔について供試体や実橋梁を用いて実験的検証を行った。

以下に得られた知見を列記する。

- WUTでは、コンクリート表面と探触子の間の不陸除去と接触面への空気の混入除去を目的として接触媒質を塗布する。接触媒質を塗布しない場合、または接触媒質の粘性が低い場合は、超音波がコンクリート内部に十分発信されず微弱な反射波強度となり、周波数解析に影響を与えるおそれがあることが明らかとなった。調査の際には、接触媒質の使用が必須と考えられる。
- $\phi 76$ 探触子と直径の小さな $\phi 10$ 探触子を組み合わせると $\phi 76$ 探触子から超音波が発信される範囲を実験的に特定した。探触子の直径は 95 mm であるが、内部に設けられた圧電素子の直径 76 mm の区間では、超音波が一定に発せられていることを実験的に明らかにした。WUTでは、対象物からの反射波を超音波伝搬速度と超音波が伝搬する経路から得られる時間によって切り出している。実験結果から超音波の伝搬経路は、圧電素子の内側と対象物を結ぶ区間が妥当であることを示した。
- 探触子をコンクリート表面に押し当てる力が反射波強度と周波数ピークにあたる影響について供試体を平置きし、探触子上面に重りを載荷して影響を実験的に明らかにした。探触子の自重 1.4 kg 以上の力を与えることで、反射波強度と周波数ピークのいずれにも差がみられず、充填判定に影響を与えないことを示した。
- WUTを用いたPCグラウト充填調査の再現性を確認するため、31点で計測を行った。計測時は同点で2回の計測を行い、得られた時系列波の電圧値を積分して比較した。2回の積分結果は31点全てで一致しており、再現性が高いことが明らかとなった。
- PCグラウト充填調査では、探触子間隔をかぶり厚に応じて 500 mm または 200 mm としている。探触子間隔を広げると得られる反射波強度は指数関数的に減少することが明らかとなった。PCグラウト充填調査に用いる探触子間隔は 1 m 以内が妥当であると考えられる。
- シース反射波について周波数解析を行ったところ、未充填・充填シースともに低周波域でピークがみられ、さらに未充填シースでは比較的高い周波数域の顕著なピークがみられた。一方、充填シースでも、未充填シースほど顕著な傾向はないものの、高周波数域で若干のピークがみられた。このことより、シース反射波の周波数ピークのみではグラウト充填判定が困難な場合もあることがわかった。
- 充填シースを含むコンクリート版の端面反射波をみると、平均 44 kHz でピークを示し、コンクリート単味の端面反射波の周波数ピーク $37\sim 38\text{ kHz}$ とほぼ一致した。一方、未

充填シースを含む場合、反射波の周波数ピークは平均 69 kHz を示し、充填シースの場合と比較して高い傾向がみられた。

- 充填・未充填によらず端面反射波は、シース反射波に比べて周波数スペクトル強度が大きく、ピーク周波数も明瞭である。シース反射波に加えて端面反射波の周波数分布をグラウト充填判定に用いることで、その精度向上が期待できることを明らかにした。
- 最適な探触子間隔の検証を行うため、かぶり厚 (D) の倍数として探触子間隔を変化させて周波数ピークに与える影響を実験的に検証した。充填供試体では、探触子間隔がかぶり厚の 1D, 1.5D, 2D, 2.5D で低周波を示したが、未充填供試体では 1D と 2D のみが高周波を示した。再現性を考慮すると、入射波と反射波の干渉の影響が少ないかぶり厚の 2 倍が最適な探触子間隔であると考えられる。高周波となった探触子間隔は 5 ケースのうち 2 ケースであったが、低周波となった探触子間隔は 5 ケース中 4 ケースであった。かぶり厚 135mm の供試体における探触子間隔は充填シースよりも未充填シースに与える影響が大きいことが明らかとなった。

【参考文献】

- 1) 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, pp.35-40, 2014.
- 2) 堀 慎一, 後藤恵一, 渡辺 健, 谷村幸裕: 構造物への適用を想定した超音波法による PC グラウト充填判定方法の提案, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, pp.1831-1836, 2013.
- 3) 大島義信, 眞武俊輔, 楠本秀樹, 河野広隆: PC シースがコンクリート内部を透過する弾性波に与える影響, 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, Vol.16, pp.119-124, 2016.
- 4) 鎌田敏郎, 浅野雅則, 国枝 稔, 六郷恵哲: コンクリート表層部欠陥の定量的非破壊検査への打音法の適用, 土木学会論文集, No.704/V-55, pp.65-79, 2002

第 5 章

WUT によるグラウト充填調査 の現場実験

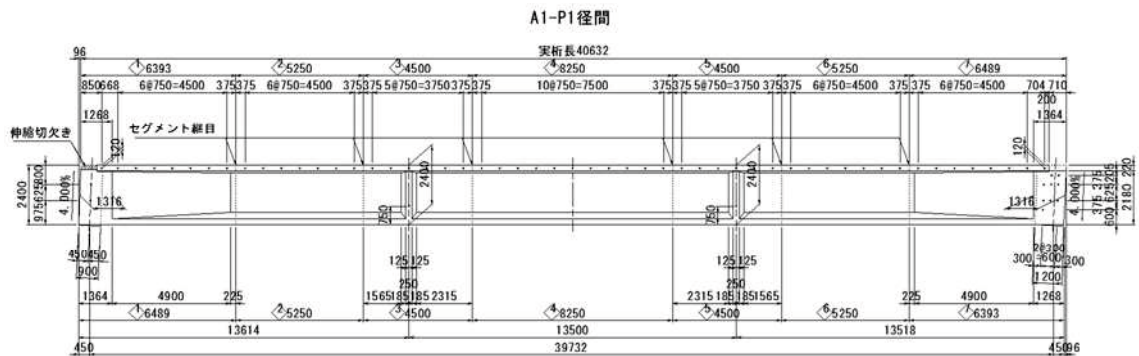
第5章 WUTによるグラウト充填調査の現場実験

5.1 実験目的

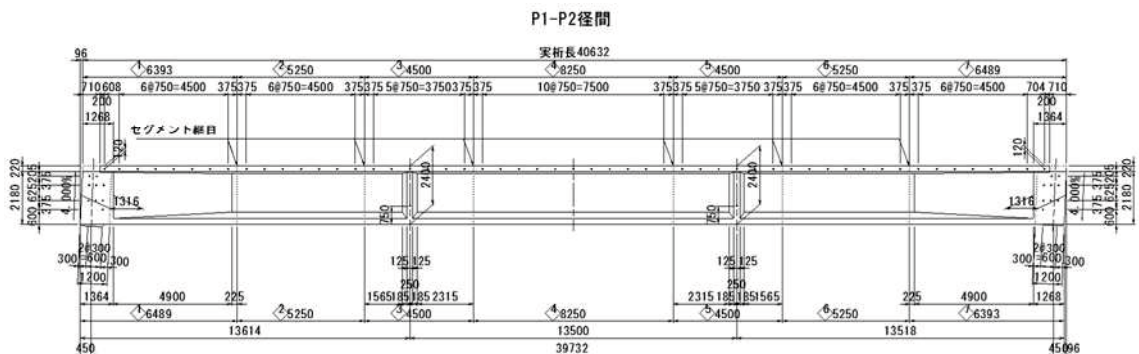
第4章では供試体を用いて、信号処理を用いない周波数ピークと周波数値による充填判定方法とかぶり厚に応じた最適な探触子間隔を提案した。本章では、第4章までで得られた知見を活かした上記の手法が実橋のPCグラウト充填調査に適用できるか実験的に検証を行った。

5.2 新設プレキャストT桁への適用実験

新設のPC4径間連結ポストテンション方式T桁橋でPCグラウト充填調査実験を行った。実験は、1径間目のグラウト施工完了(充填)、2径間目のグラウト施工未実施(未充填)のタイミングで行った。対象とした橋梁の側面図を図-5.1に、断面図を図-5.2に、ケーブル配置図を図-5.3に示す。充填、未充填ともに最上段のC1ケーブルを対象とした。



(a) 充填 : 1径間目 (A1-P1)・G2桁



(b) 未充填 : 2径間目 (P1-P2)・G3桁

図-5.1 対象橋梁の側面図

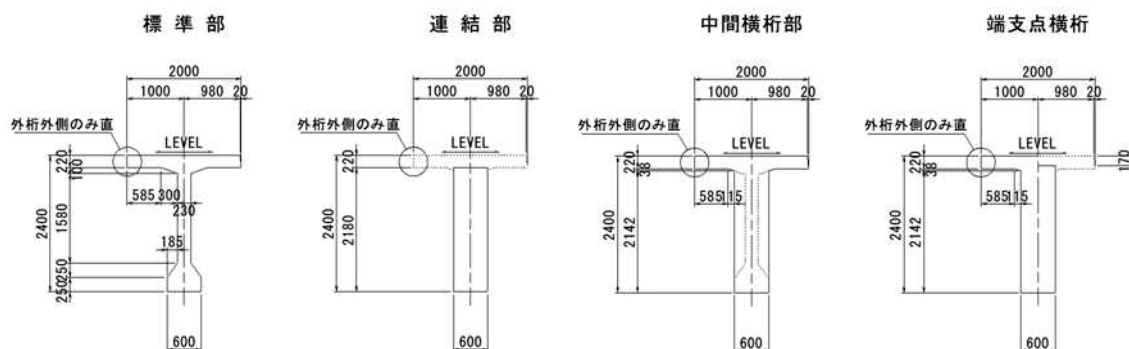
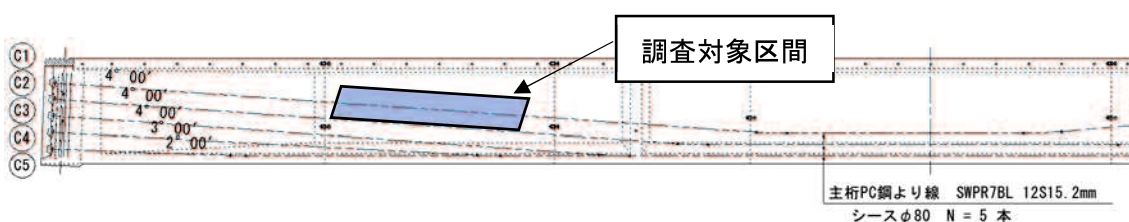
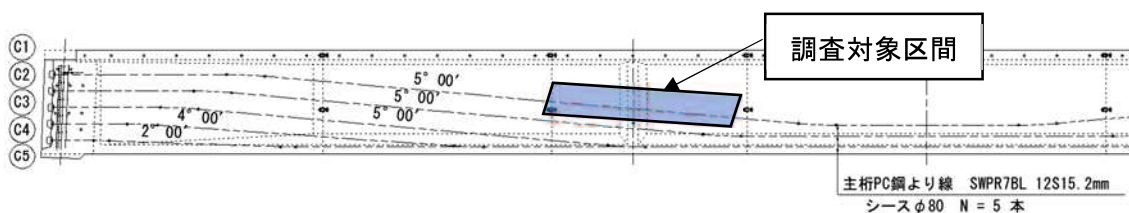


図-5.2 対象橋梁の主桁断面図



(a) 充填：1径間目（A1-P1）・G2桁



(b) 未充填：2径間目（P1-P2）・G3桁

図-5.3 対象橋梁のケーブル形状図と調査箇所

5.2.1 実橋の諸元

主桁の材齢28日時の圧縮強度は、充填G2桁で60MPa、未充填G3桁で63.4MPaであった。試験時のコンクリートの材齢は、それぞれ141日と76日であった。

グラウトには、超低粘性混和剤を含むプレミックス材を使用した。グラウトは材齢7日圧縮強度が47.6MPa、材齢28日圧縮強度が76.2MPaであった。試験時のグラウトの材齢は17日であった。鋼製シースは内径80mm、0.32mm厚を用いた。

5.2.2 計測方法

本実験では、充填G2桁、未充填G3桁ともに図-5.3に示すC1ケーブル区間を対象とした。実験に際し、あらかじめ電磁波レーダを用いて鉄筋とPC鋼材の位置出しを行った。計測位置の部材厚は230mm、シースのかぶり厚は75mmであった。計測時のサンプリング周波数は10MHz、サンプリング数は16384点とした。計測開始時には、部材厚230mmの主桁ウェブを挟み込んで超音波伝搬速度を計測した。結果を表-5.1に示す。その後、C1ケー

ブル直上に探触子を押し当てて1測点あたり5回計測を行った。探触子の印加電圧は150Vとした。

探触子間隔は、かぶり厚(=D:75mm)の2倍(150mm)と2.7倍(200mm)および3倍(226mm)とし、最適な探触子間隔の検証を行った。

本実験でも波形を詳細に分析するため、一般的なPCグラウト調査業務で用いる多点計測による加算波の算出は行わず、計測点毎に時系列波形の記録と超音波伝搬速度とかぶり厚から求めたシース相当位置で波形を抽出して周波数分析を行い、周波数スペクトルピークとその周波数値に着目して評価を試みた。sin関数による周波数のフィルタリングと窓関数による時系列波の切り出しを用いずに信号処理を排した解析を行った。計測状況を図-5.4に示す。

表-5.1 超音波伝搬速度 (V)

実験対象	超音波伝搬速度 V_l (m/s)
充填G2桁	4855
未充填G3桁	5020

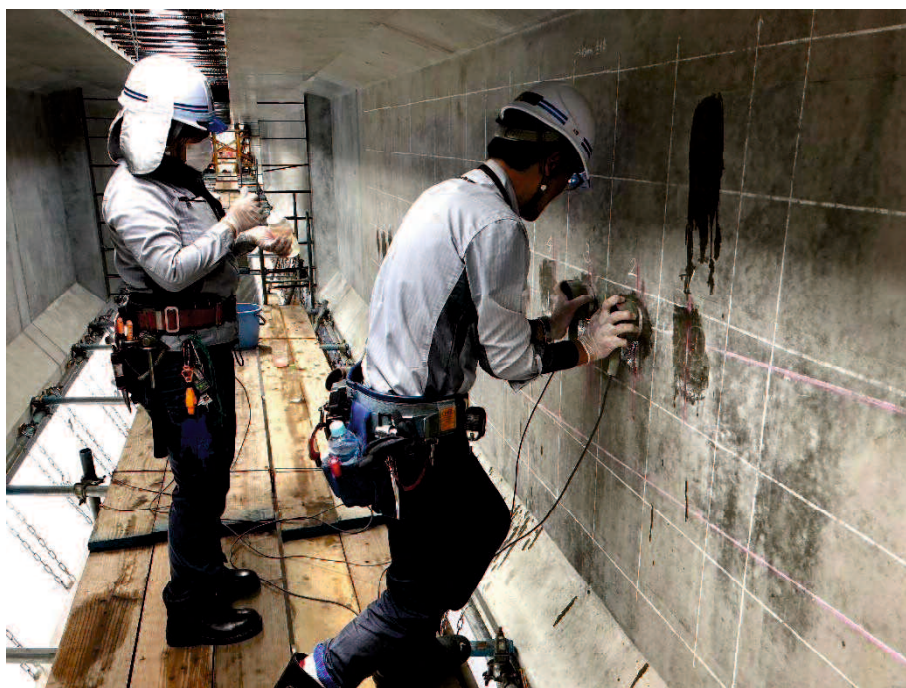


図-5.4 グラウト充填調査状況 (未充填 G3 桁)

5.2.3 実験結果

(a) 時系列波の結果

探触子間隔 2D (150 mm) で得られた充填 G2 桁と未充填 G3 桁の時系列波を図-5.5 に示す。図中の C_d はシース位置 ± 2 cm の範囲抽出区間を示す。充填 G2 桁と未充填 G3 桁ともに電圧値のばらつきが大きい。第4章の4.7では無筋でシースのみを設けた供試体での時系列波を示したが、今回の実橋データでは、よりばらつきの大きい結果を示している。これは内部に埋設されたシースの接続具や鉄筋、シースの支持金具、型枠支持金具などの影響によるものと考えられる。また、本桁はかぶり厚が小さく粗骨材によって発生するコンクリート内部の散乱反射による影響も大きいと考えられる。

(b) 周波数スペクトルの結果

探触子間隔 2D (150 mm) で得られた充填 G2 桁と未充填 G3 桁におけるシース反射波のスペクトル強度を図-5.6 に示す。充填 G2 桁のスペクトル強度は G3 桁のスペクトル強度と比べて約 1/4 程度の大きさとなっている。未充填シースに比べて充填シースは音響インピーダンスの差が小さく、その結果、反射波強度も小さくなるためと考えられる。

(c) 正規化周波数スペクトルの結果

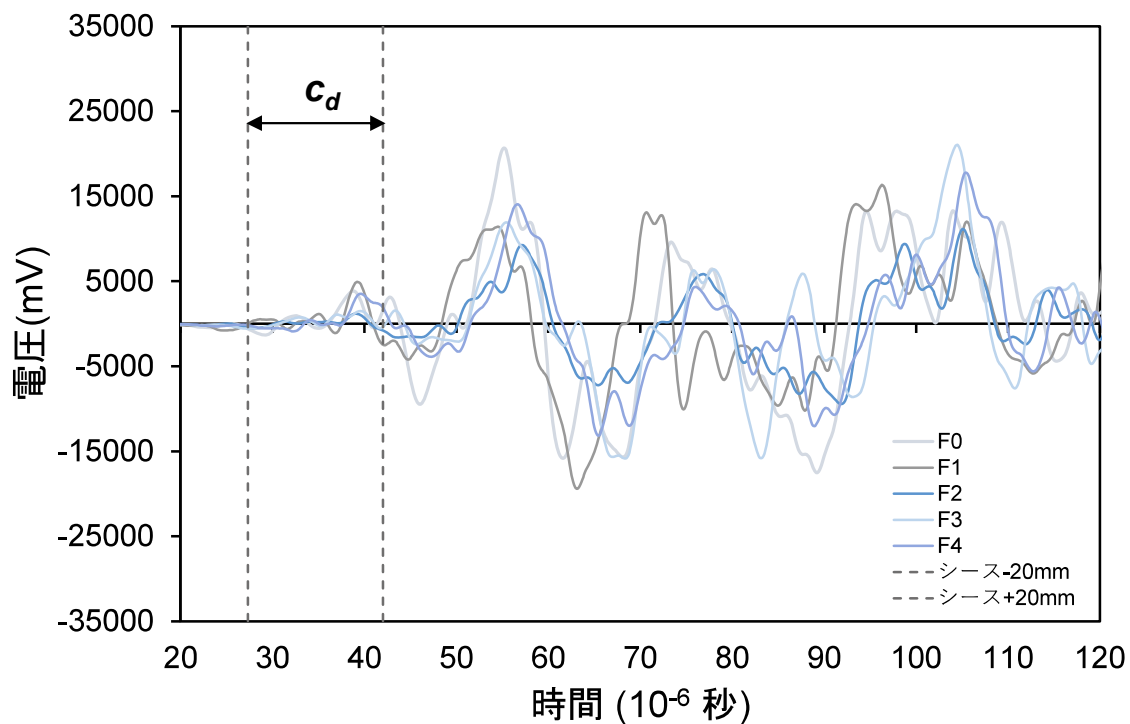
本実験で得られた時系列波をシース相当位置で抽出し、高速フーリエ変換を行い、周波数解析を行った。各探触子間隔で得られた充填 G2 桁と未充填 G3 桁のシース反射波を正規化した周波数スペクトル分布を図-5.7 に示す。図中には、各探触子間隔で計測した5回の結果とその平均値を示す。

探触子間隔 2D (150 mm) では、充填 G2 桁で 38.5 kHz、未充填 G3 桁で 82.4 kHz の結果が得られた。探触子間隔 2.7D (200 mm) では、充填 G2 桁で 60.0 kHz、未充填 G3 桁で 73.2 kHz となった。最も探触子間隔の大きな 3D (226 mm) では、充填 G2 桁で 61.6 kHz、未充填 G3 桁で 65.3 kHz の結果が得られた。

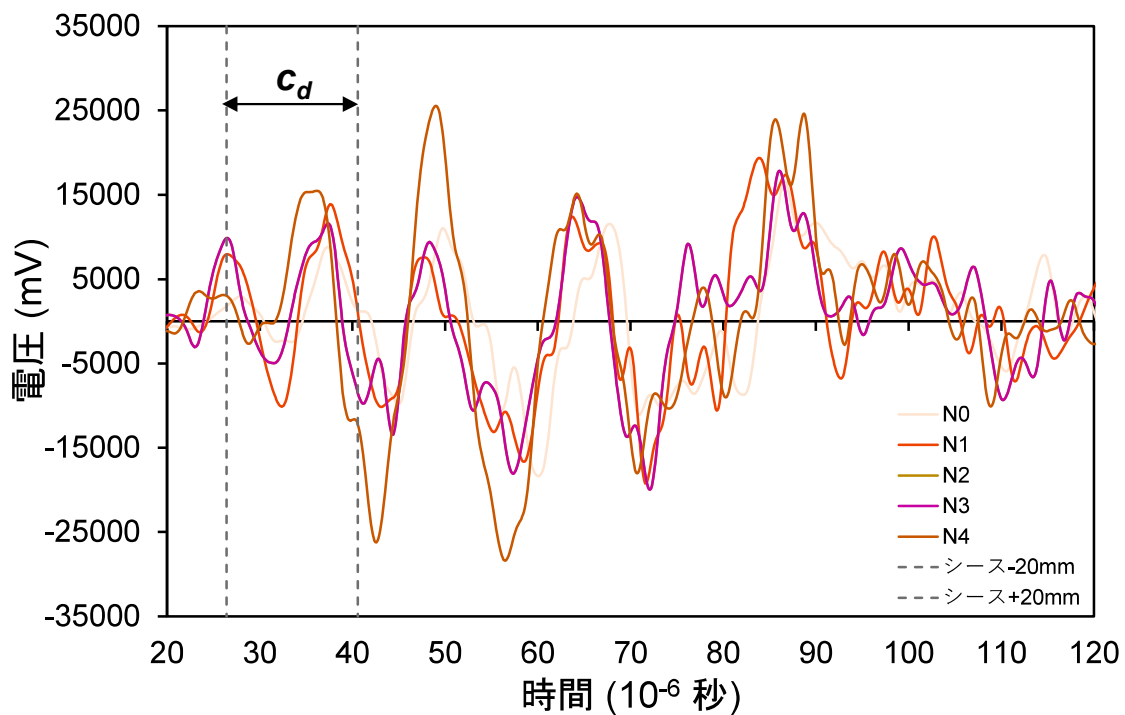
(d) まとめ

前章4.7で示した供試体を用いた探触子間隔の検証実験と同様、かぶり厚の2倍の探触子間隔が最も精度良く充填判定できることが明らかとなった。

また、本実験では充填シースでも高周波でピークが得られた。今回使用した実桁はかぶり厚が 75mm と比較的小さいことから、コンクリート内部で超音波が伝搬する際に散乱減衰の発生が少ないことから高周波帯域が多く観測されたものと推測される。

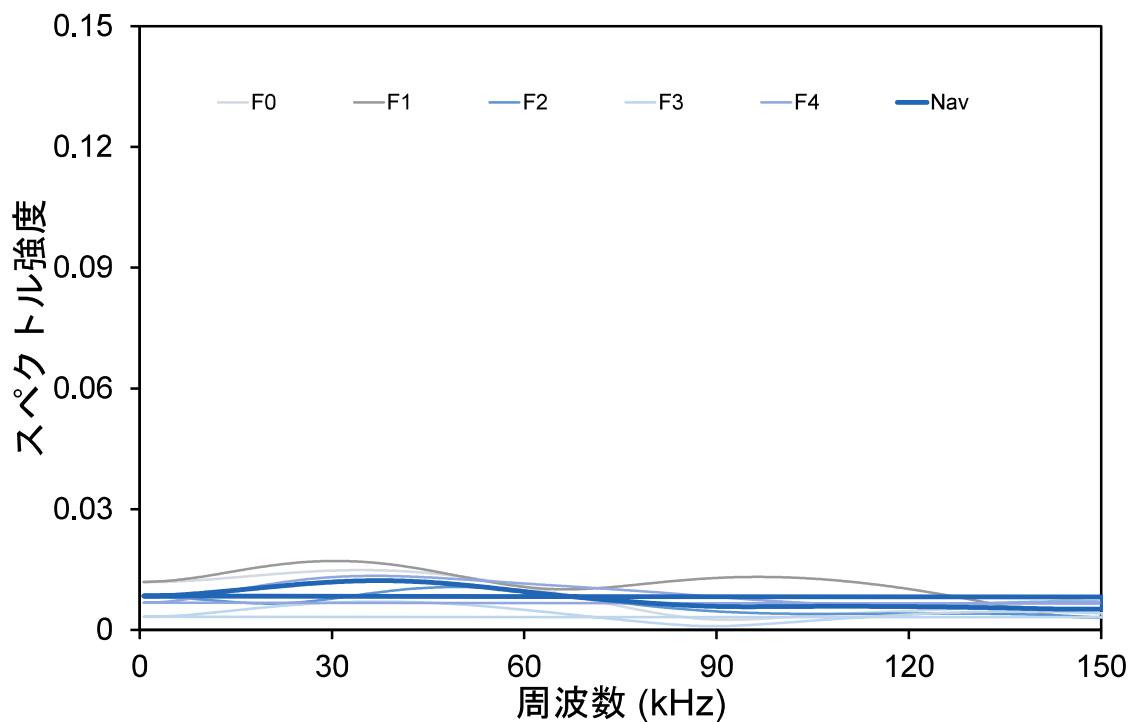


(a) 充填 G2 桁

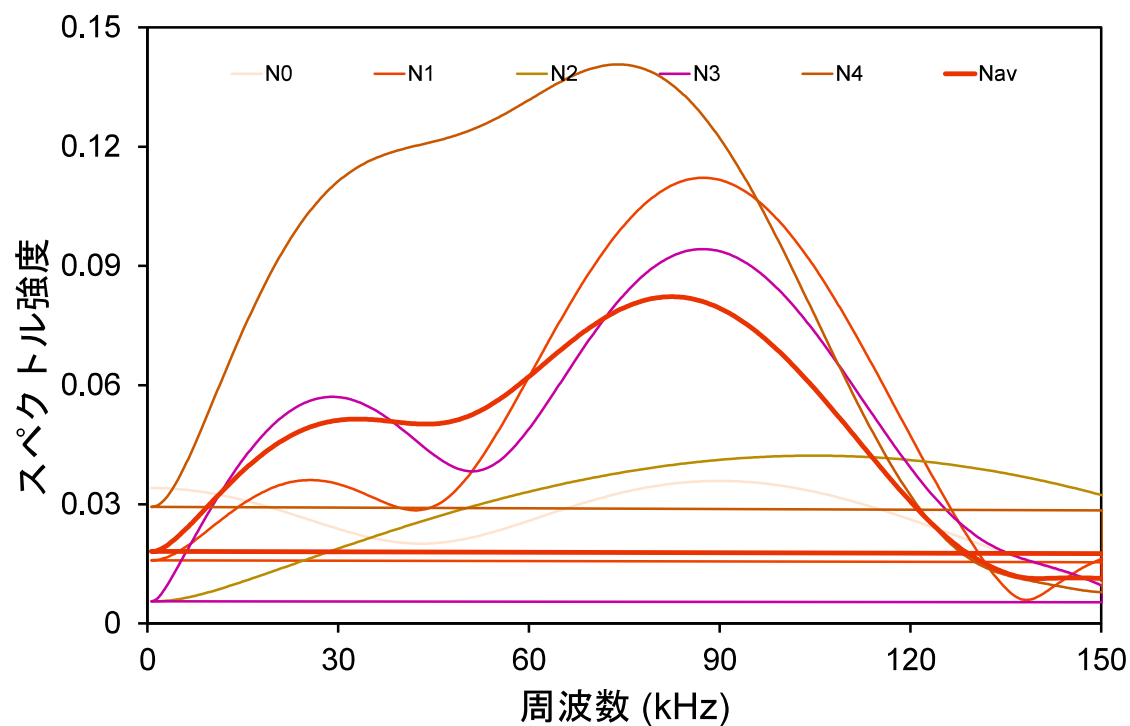


(b) 未充填 G3 桁

図-5.5 時系列波 (探触子間隔 2D : 150mm)

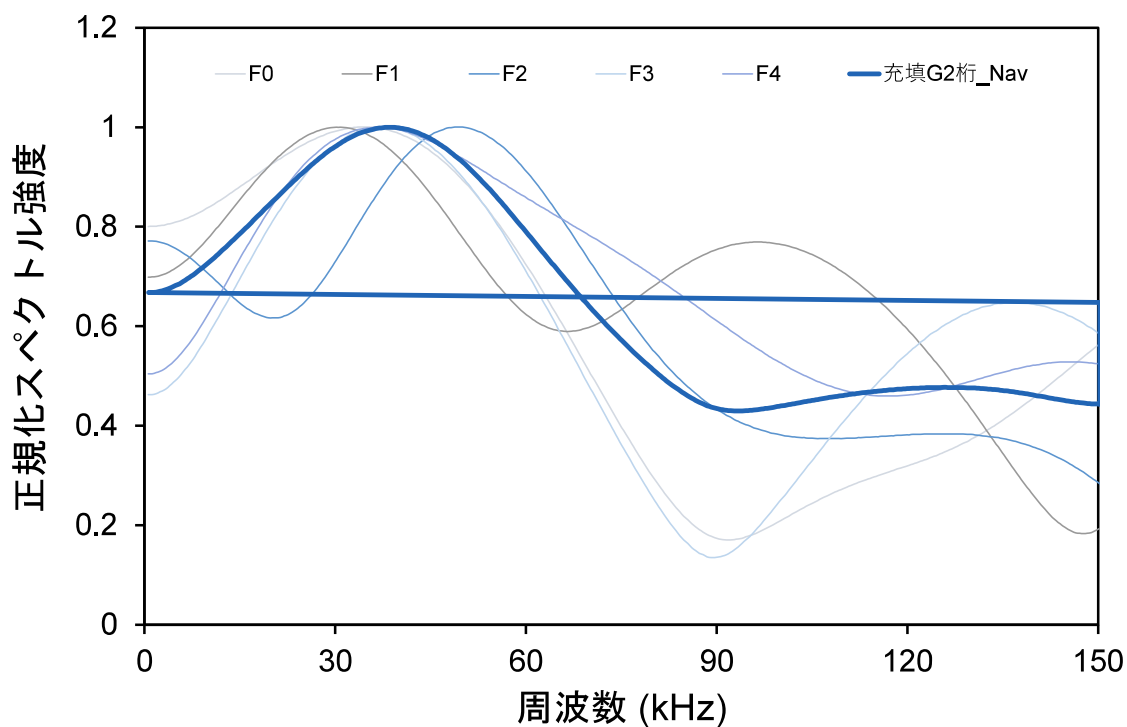


(a) 充填 G2 桁

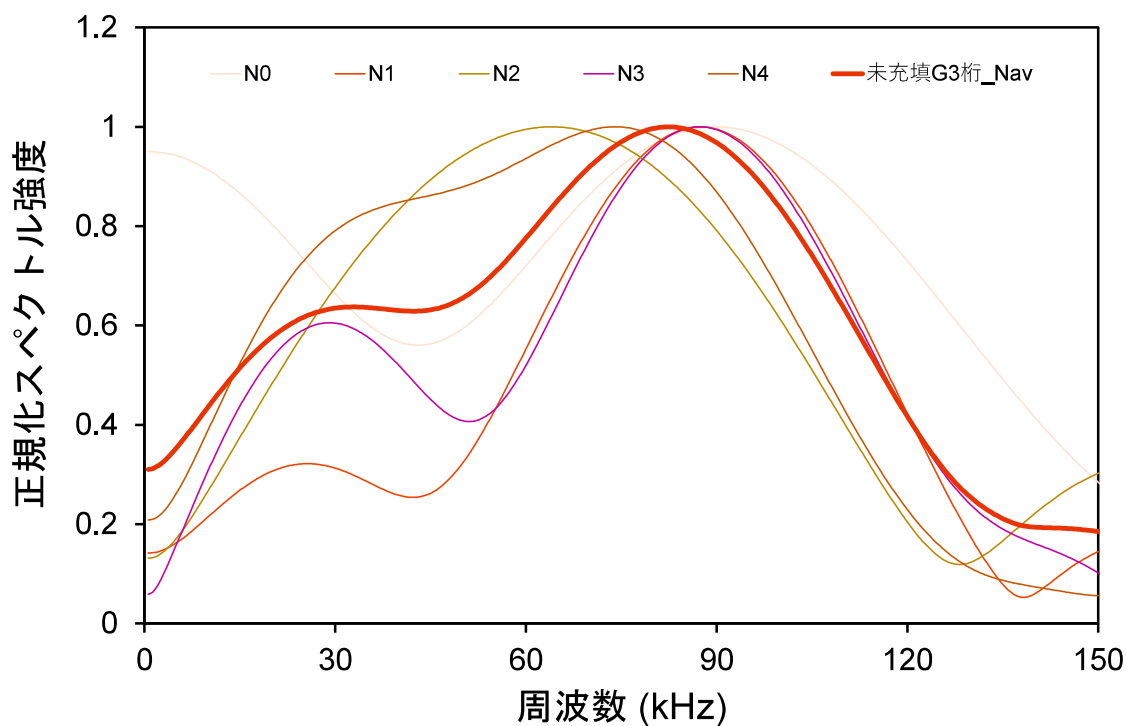


(b) 未充填 G3 桁

図-5.6 スペクトル強度 (探触子間隔 2D : 150mm)

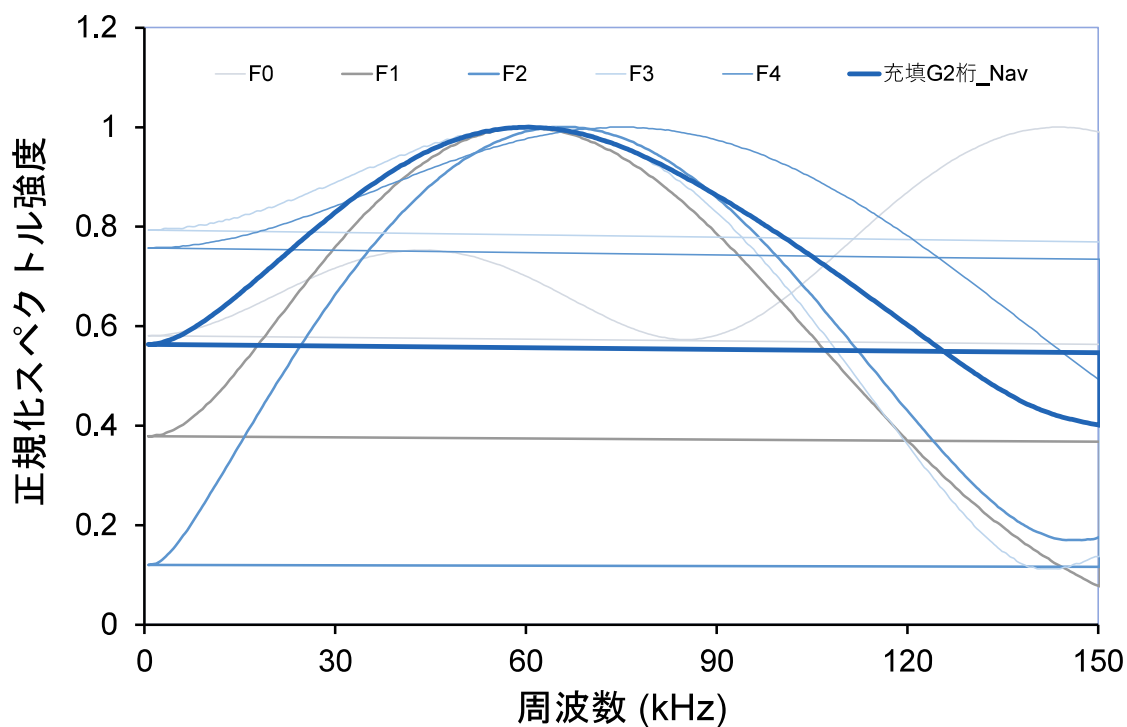


(a) 充填 G2 桁

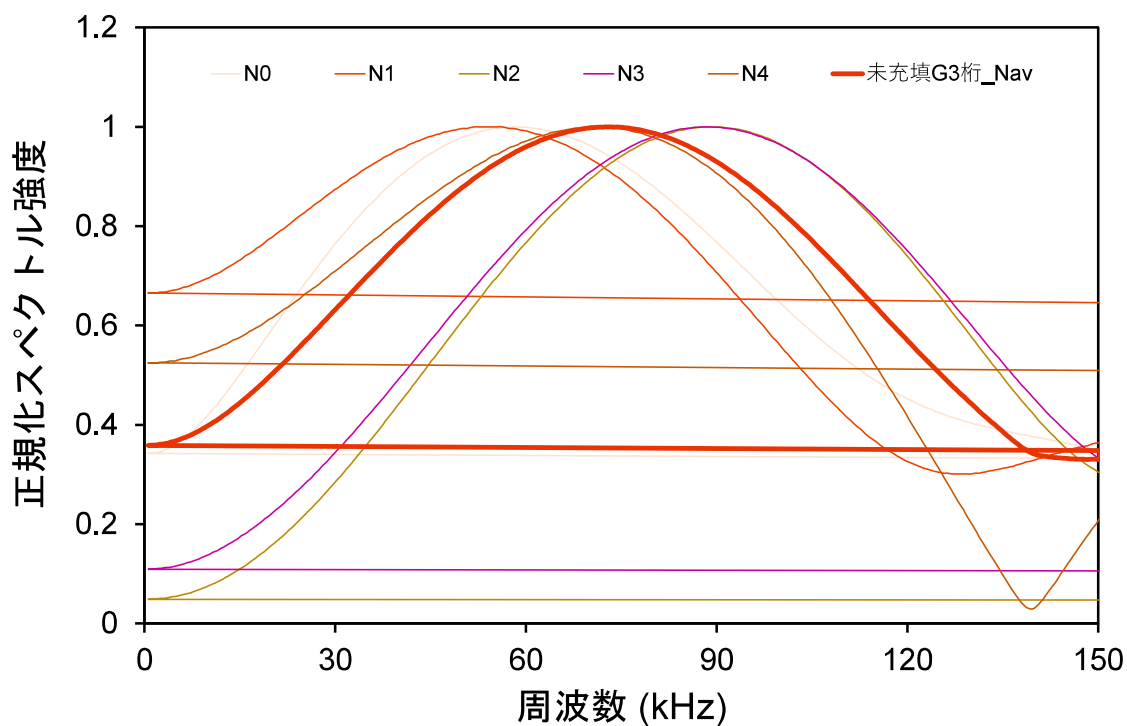


(b) 未充填 G3 桁

図-5.7 正規化スペクトル強度 (探触子間隔 2D : 150mm)

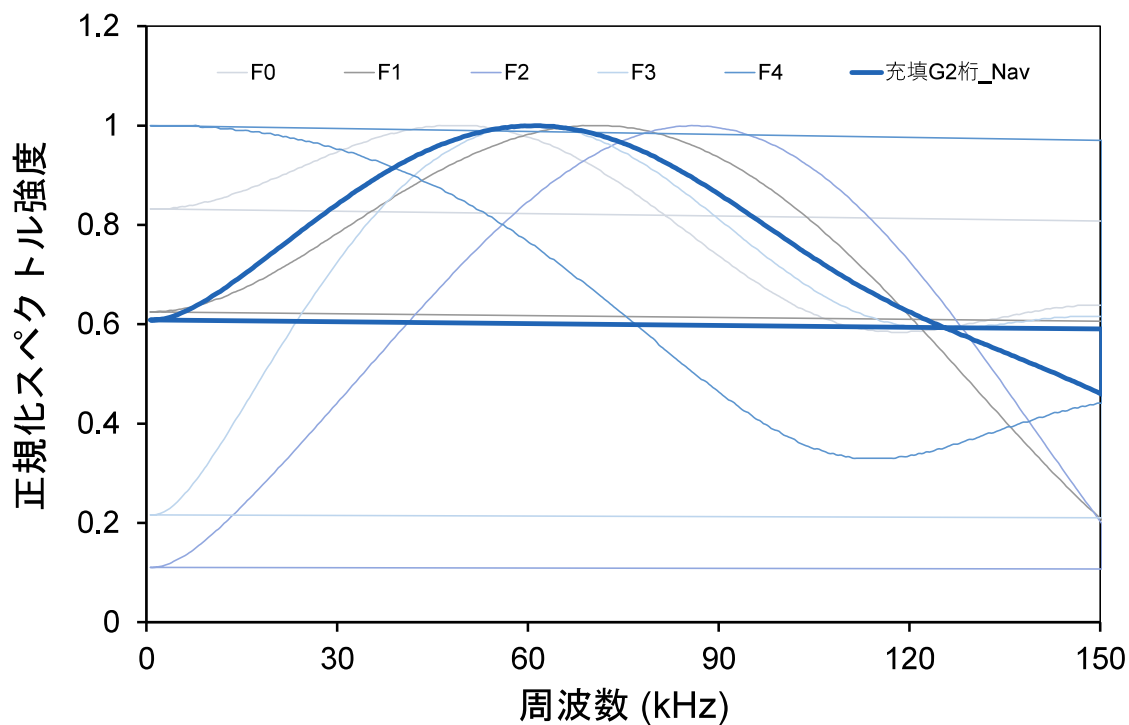


(a) 充填 G2 桁

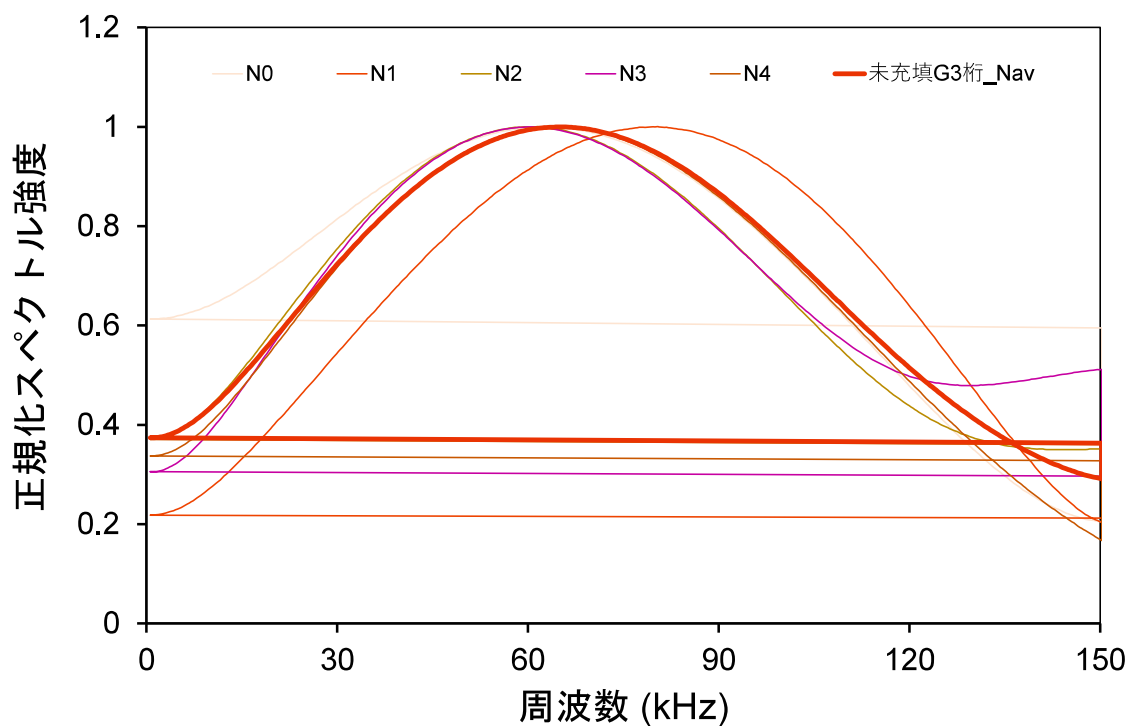


(b) 未充填 G3 桁

図-5.8 正規化スペクトル強度 (探触子間隔 2.7D : 200mm)



(a) 充填 G2 桁



(b) 未充填 G3 桁

図-5.9 正規化スペクトル強度 (探触子間隔 3D : 226mm)

5.3 かぶり厚の大きな実橋への適用実験

WUTの適用限界は一般的にかぶり厚250mmが限界とされている。ただし、実橋を対象としたPCグラウト充填調査業務では、かぶり厚300mmを超える部材での調査結果も得られている。このため、箱桁橋の支点部を対象として、かぶり厚の大きな実橋でPCグラウト調査の検証実験を行った。

5.3.1 グラウト充填橋梁での検証実験

(a) 実橋の諸元

本実験では、1975年1月に竣工して供用中のPC5径間連続ポストテンション箱桁を対象とした。対象橋梁の断面図を図-5.10に示す。竣工時の設計図面を基に鉄筋とPC鋼材位置の位置出しを行った。部材厚は650mm、電磁波レーダによるかぶり厚は375mmであった。PCグラウト調査時の位置出し状況を図-5.11に、かぶり厚を図-5.12に示す。

設計図面より、鋼材種別は $\phi 32\text{mm}$ のPC鋼棒、シース径は $\phi 38\text{mm}$ であった。本橋で対象としたケーブルは事前のWUTによる非破壊調査とドリル削孔による微破壊検査によって充填確認された区間を対象とした。

(b) 計測方法

本実験では、探触子間隔を1D(375mm)、1.5D(563mm)、2D(750mm)、2.5D(934mm)、3D(1125mm)と変化させた。各探触子間隔で、2回ずつ計測を行い、時系列波を収録した。実験のサンプリング周波数は10MHz、サンプリング数16384点とした。超音波伝搬速度は、1径間目の支間中央にある中間横桁で探触子を挟み込んで計測を行い、 $V=4506\text{m/s}$ の結果を得た。得られた超音波伝搬速度とかぶり厚からシース相当位置を算出し、時系列波の抽出を行った。

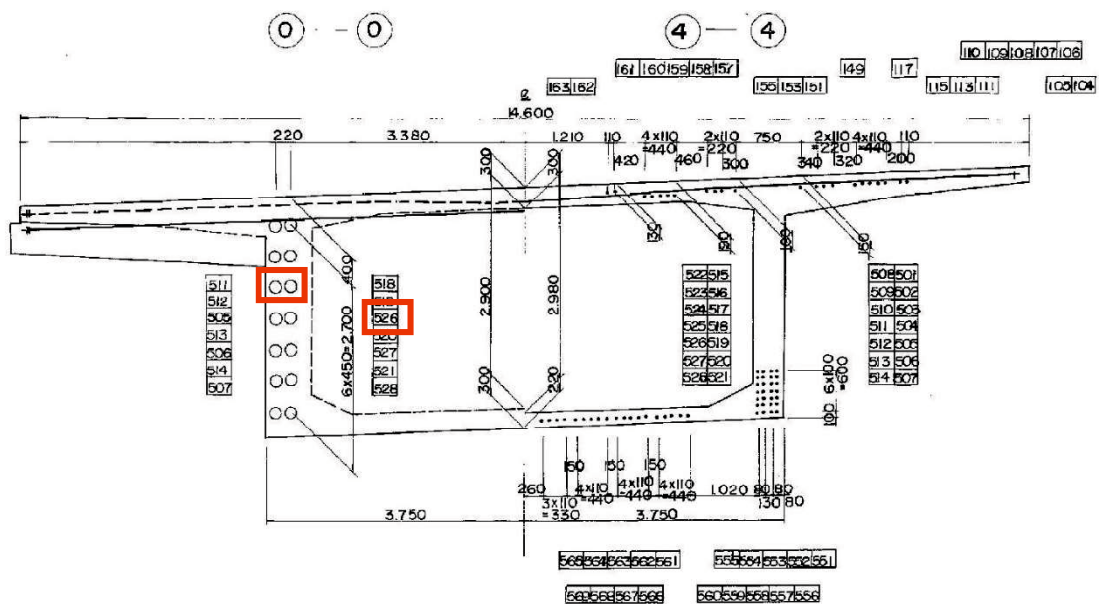


図-5.10 対象橋梁断面図（ケーブル番号 526）



図-5.11 鉄筋とPC鋼材の位置出し状況（ケーブル番号 526）

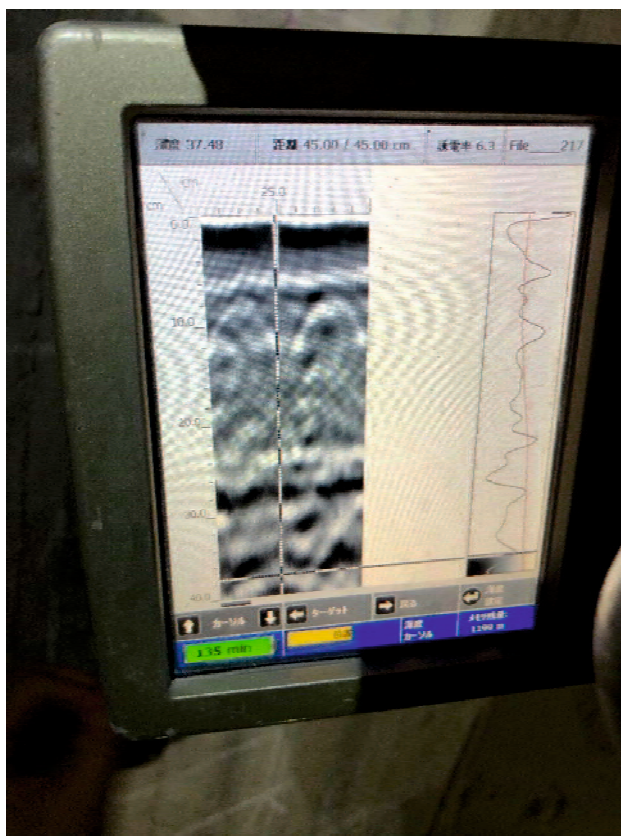


図-5.12 ストラクチャスキャンを用いたかぶり厚計測（かぶり厚 375mm）

(c) 実験結果

本実験で得られた時系列波をシース相当位置で切り出して高速フーリエ変換を行った。

本実験でも、sin窓関数を用いずに時系列波の切り出しを行った。さらに多点計測による加算波を算出せず、測点ごとにスペクトル強度と周波数ピークによって充填判定を行った。各探触子間隔で得られた各2点の平均の時系列波からシース反射位置で切り出して正規化した周波数解析結果を図-5.13に示す。

探触子間隔と得られた周波数ピークの結果を表-5.2に示す。探触子間隔2.5Dと3Dでは、5 kHz未達の周波数ピークとなった。これは、時系列波抽出時の打ち切り誤差と考えられる。探触子間隔1D~2Dは20 kHz程度の低周波が得られた。

表-5.2 各探触子間隔における周波数ピーク

探触子間隔	周波数ピーク (kHz)
1.0D (375mm)	16.5
1.5D (563mm)	28.0
2.0D (750mm)	23.8
2.5D (934mm)	5.0
3.0D (1125mm)	2.0

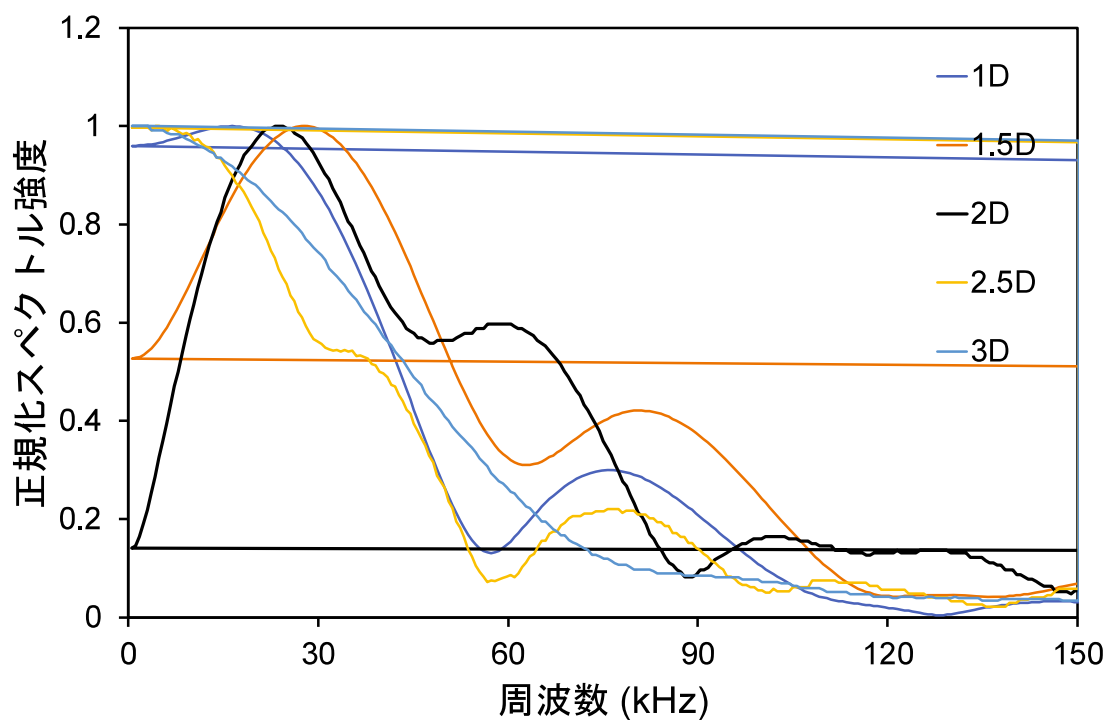


図-5.13 正規化スペクトル強度

5.3.2 グラウト未充填橋梁での検証実験

(a) 実橋の諸元

本実験では、現在施工中の PC3 径間連続ラーメン箱桁を対象とした。対象橋梁の断面図を図-5.14 に示す。計測対象は、部材厚が 873mm から 900mm の主桁ウェブ内に設置された、かぶり厚 250mm を超える柱頭部の架設ケーブルとした。設計図面と電磁波レーダによって鉄筋と PC 鋼材位置の位置出しを行った。計測の結果、かぶり厚は 265 mm と 310 mm, シース内径は $\phi 80\text{mm}$ であった。架設ケーブルは定着のため柱頭部横桁前面からブロック先端にかけてコンクリート表面からの位置が 210mm から 436.5mm と変化している。このためケーブルは $\theta = 6.4^\circ$ の平面角変化を有していた。平面角変化の概要を図-5.15 に示す。

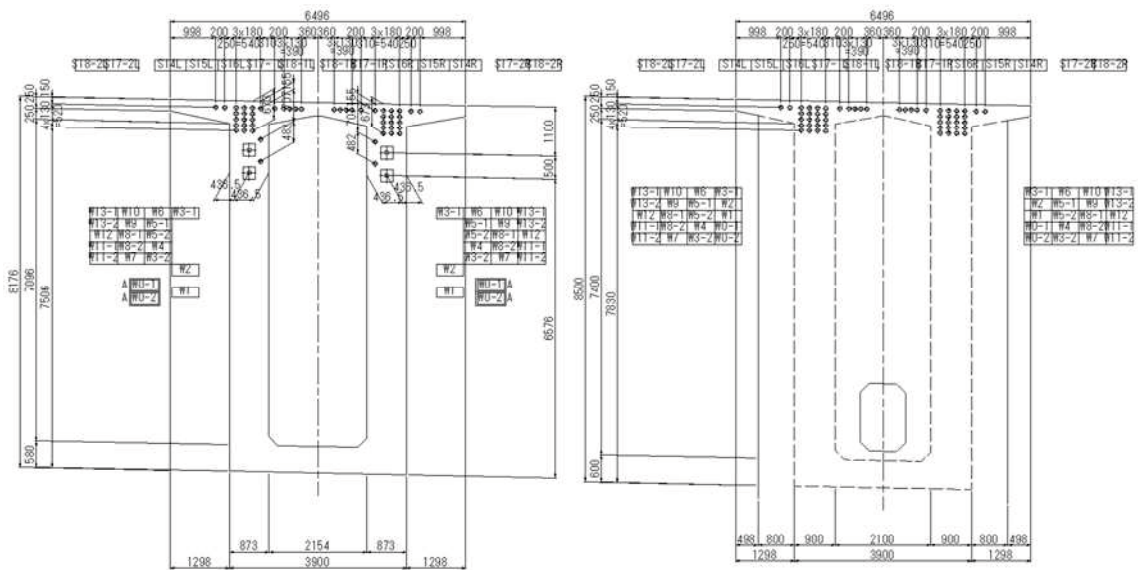


図-5.14 対象橋梁の調査位置断面図

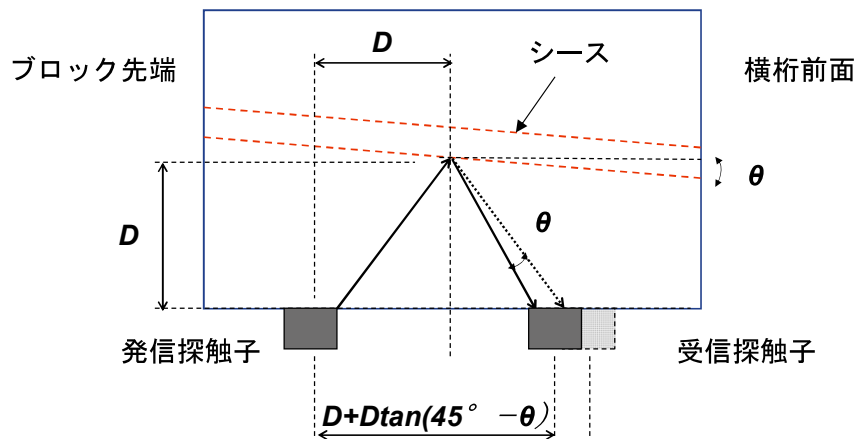


図-5.15 対象橋梁の架設ケーブル平面角変化概要

(b) 計測方法

本実験では、探触子間隔を、かぶり 265 mm で 2 D (530 mm) と平面角変化を考慮して探触子間隔を狭めた 1.8 D (480 mm)、かぶり 310 mm で 2 D (620 mm) と狭めた 1.9 D (603 mm) と設定した。各探触子間隔で、3 回ずつ計測を行い、時系列波を収録した。実験のサンプリング周波数は 10 MHz、サンプリング数 16384 点とした。超音波伝搬速度は、ブロック先端の部材厚 878 mm のウェブで探触子を挟み込んで計測を行い、 $V=4641$ m/s を得た。得られた超音波伝搬速度とかぶり厚からシース相当位置を算出し、時系列波の抽出を行った。

(c) 実験結果

本実験で得られた時系列波をシース相当位置で切り出して高速フーリエ変換を行った。

本実験でも、sin窓関数を用いずに時系列波の切り出しを行った。さらに多点計測による加算波を算出せず、測点ごとにスペクトル強度と周波数ピークによって充填判定を行った。各探触子間隔で得られた時系列波からシース反射位置で切り出して正規化した各3回とその平均の周波数解析結果を図-5.16、図-5.17に示す。

かぶり 265 mm の 2 D では 34 kHz、1.8 D では 48 kHz で周波数ピークが得られた。また、かぶり厚 310 mm では 2 D で 0 kHz、1.9 D で 51 kHz のピークが得られた。いずれの場合も平面変化を考慮することで、より高周波となる結果が得られた。シースが平面変化する場合には、その角変化を考慮した探触子間隔とすることで精度向上が図れると考えられる。

本実験では、かぶり厚が大きいいため未充填の周波数ピークが低周波の傾向を示した。これは発信された超音波が部材内部を透過する際に散乱減衰し、高周波成分が小さくなるためと考えられる。

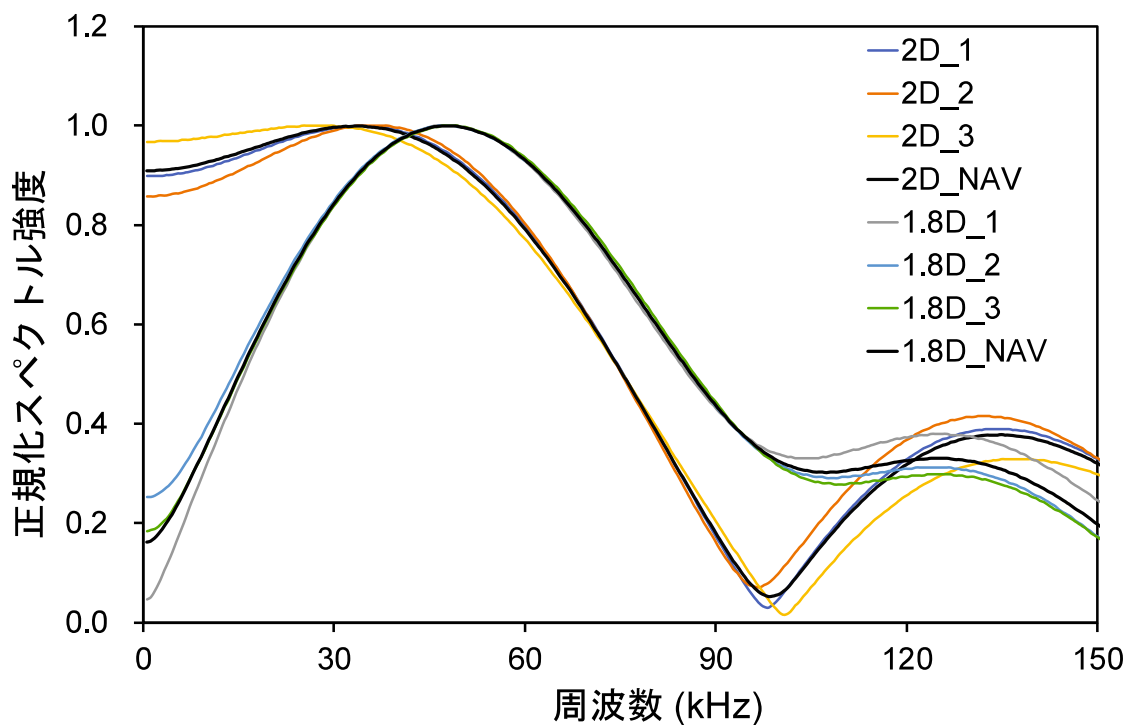


図-5.16 かぶり厚 265 mm における正規化周波数スペクトル結果

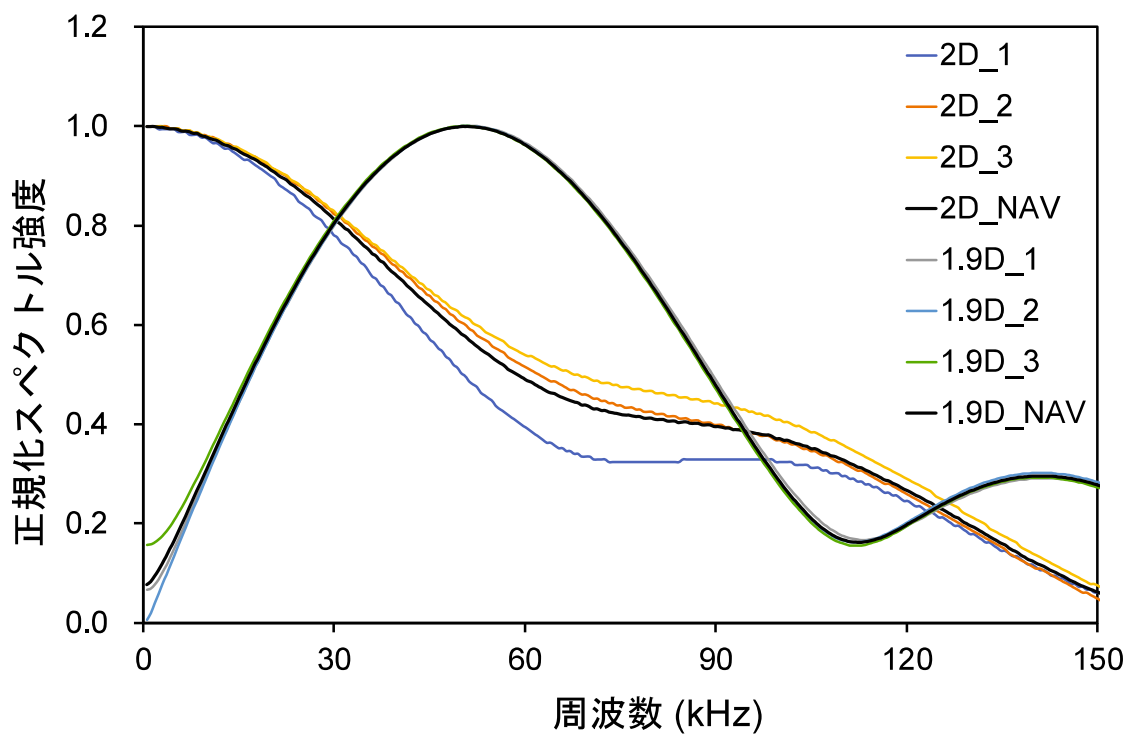


図-5.17 かぶり厚 310 mm における正規化周波数スペクトル結果

5.4 部材厚が周波数帯域に及ぼす影響

5.2 では一般的な部材厚のプレキャスト T 桁を対象として、5.3 ではかぶり厚の大きな箱桁での検証実験を行った。WUT を用いた PC グラウト充填探査では透過法を用いて超音波伝搬速度の計測を行う。部材を挟み込む透過法は探触子を部材の両端に設置するため、反射法で発生するコンクリート表面を伝わる表面波の影響が排除でき、コンクリート内部を透過する波の周波数分布をより詳細に確認できる。部材厚が周波数分布に与える影響を検証するため、これら T 桁と箱桁で収録した超音波伝搬速度計測時の時系列波を高速フーリエ変換して、部材を透過した波の周波数帯域分布の検証を行った。

5.4.1 計測方法

本実験では、5.2 に示した新設のプレキャスト T 桁橋と 5.3.2 に示した新設の連続ラーメン箱桁橋を対象とした。超音波伝搬速度を計測した T 桁橋の部材厚は 230 mm、箱桁橋の部材厚は 878 mm であった。いずれも実験のサンプリング周波数は 10 MHz、サンプリング数 16384 点とした。探触子の印加電圧は 32764 mV の計測上限電圧値を超過しないよう T 桁橋で 10 V とした。部材厚の大きな箱桁橋では、探触子の最大印加電圧である 500 V とした。探触子で挟み込む位置は、内部鉄筋とシース位置を外したコンクリートの充実部とした。本実験では、部材厚の差による周波数分布に着目するため、収録した時系列波を時間抽出せず、計測点全てを高速フーリエ変換によって周波数変換して分析を行った。

5.4.2 実験結果

(a) 時系列波の結果

得られた時系列波を図-5.18 に示す。部材厚 230 mm の T 桁では、探触子の印加電圧を 10V と小さな値に設定したが、51.3 μ s で最大電圧値 30771 mV の大きな値を得た。部材厚 878mm の箱桁では、探触子の印加電圧を最大の 500 V に設定し、201.7 μ s で最大電圧値 16401 mV を得た。部材厚が大きい場合、コンクリート内部の骨材の散乱減衰によって、得られる最大電圧値が小さくなると考えられる。

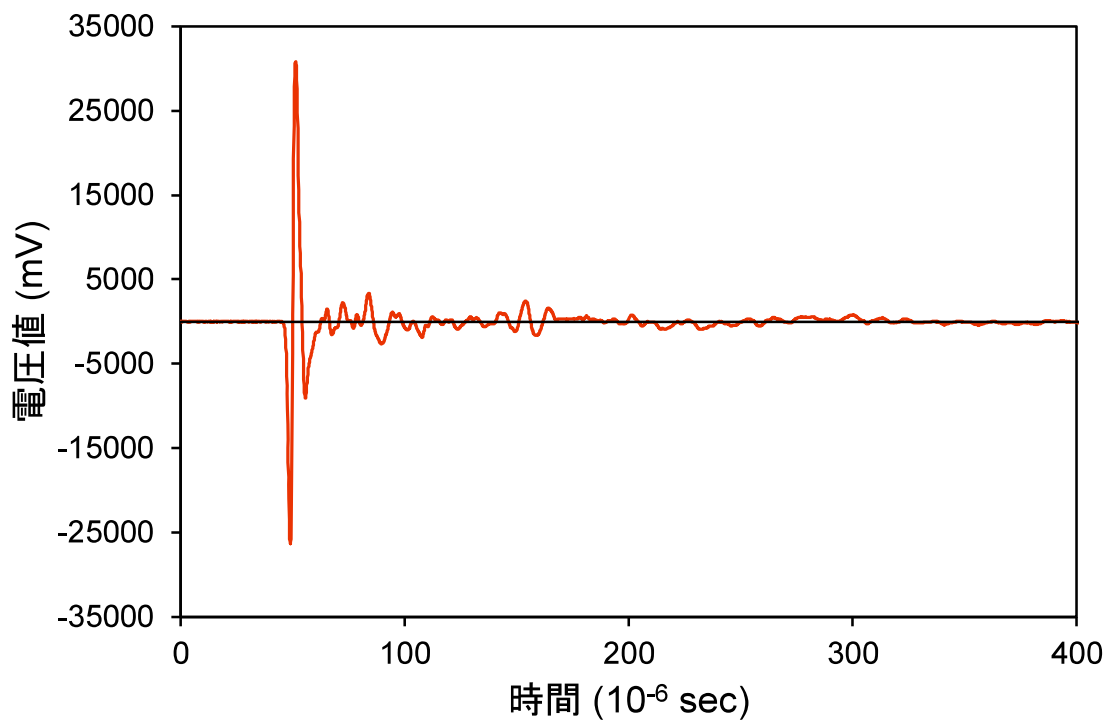
(b) 周波数スペクトルの結果

収録した時系列波を高速フーリエ変換した周波数スペクトルを図-5.19 に示す。T 桁橋では、90 kHz 付近で周波数のピークが得られ、それ以上の高周波帯域についても分布が確認できた。箱桁橋では、60 kHz 付近で周波数のピークが得られており、90 kHz を境界として、それ以上の高周波帯域では分布が少ない結果となった。時系列波と同様、部材厚が大きい場合には、コンクリート内部の骨材の散乱減衰によって、波長の短い高周波帯域の成分が少ないと考えられる。

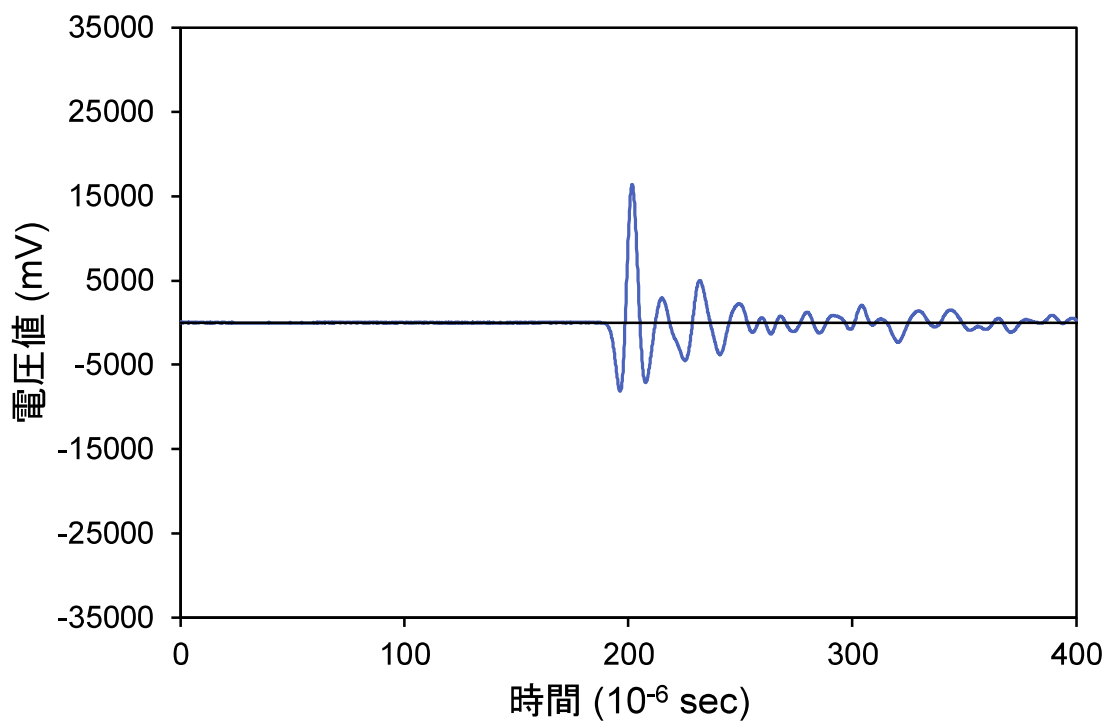
(c) 周波数スペクトルの分析結果

図-5.19より、部材厚によって周波数ピークに差があることが検証できた。周波数分布を定量的に表すため、一般的なWUTのPCグラウト探査業務で使用する周波数帯域0~120kHzを対象として10kHzごとに周波数が占める割合を求めた。周波数スペクトルの分布を図-5.20に示す。部材厚230mmのT桁橋では、0~90kHzまでの周波数割合が56%であったのに対して、部材厚878mmの箱桁橋では、0~90kHzの割合が77%と20%の差が発生した。90kHz~120kHzではT桁橋で44%、箱桁橋で23%の割合となった。部材厚が大きい場合は超音波が透過する際に直進性の大きな高周波の減衰が大きくなることが明らかとなった。

この実験では、透過法による計測結果を示した。反射法を用いて部材端面を対象とした場合、超音波伝搬距離が透過法の2倍となるため、周波数ピークの差が顕著となることが推測される。PCグラウト充填探査を行う際に、部材厚に応じた充填・未充填の周波数ピーク設定が必要であることが窺える。



(a) T桁 : t=230mm の時系列波



(b) 箱桁 : t=878mm の時系列波

図-5.18 透過法によって得られたT桁と箱桁の時系列波

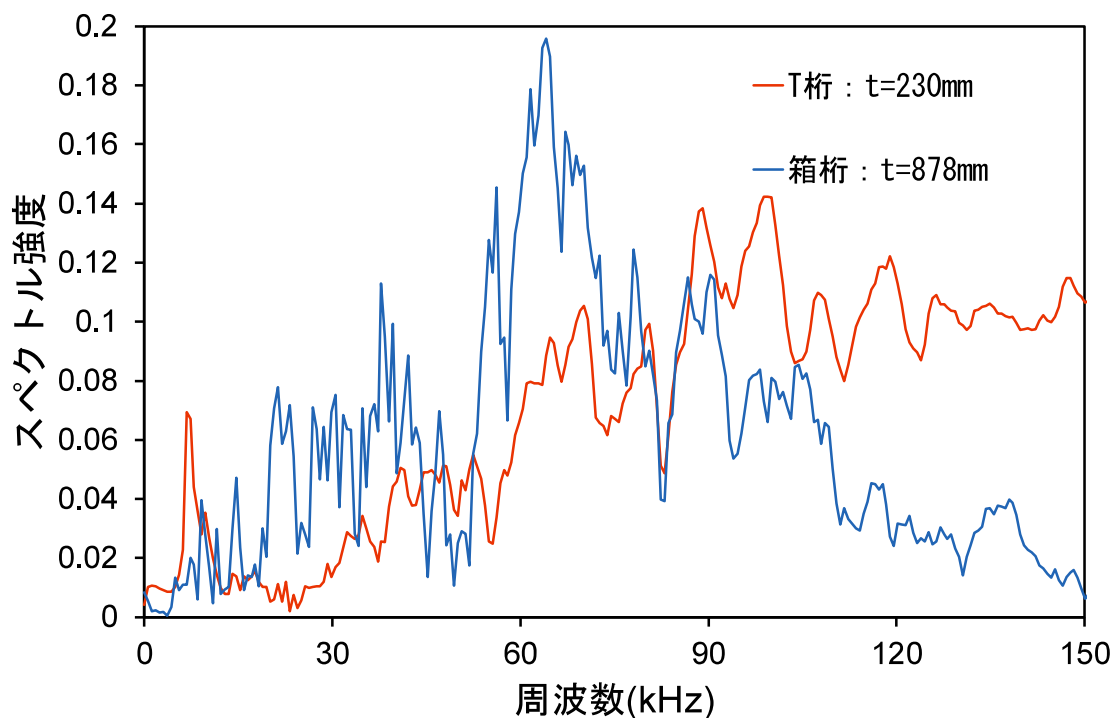


図-5.19 T桁橋と箱桁橋の周波数スペクトル比較

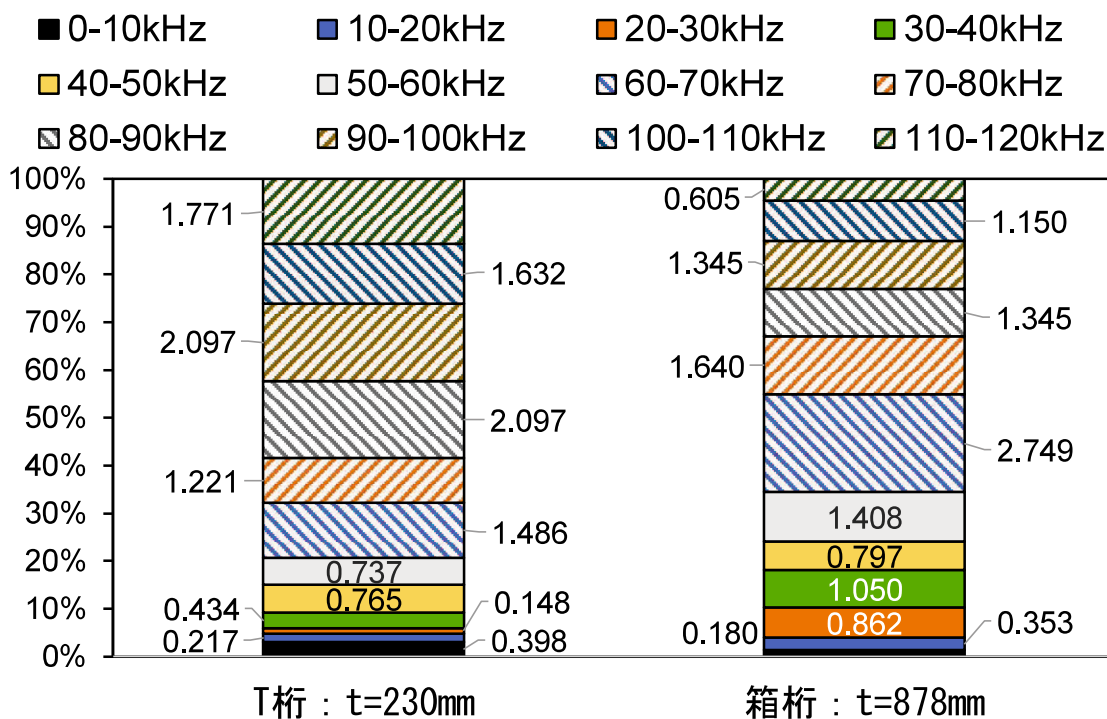


図-5.20 T桁橋と箱桁橋の周波数スペクトルの分析結果

5.5 第5章のまとめ

第5章では、第4章までに得られた知見に基づいた手法が実橋のPCグラウト充填調査でも適用可能かどうか実験的に検証した。WUTを用いたグラウト調査では、対象物以外からの反射波を低減するため、多点計測による加算波を算出して周波数解析を行っている。本実験では、各計測結果を詳細に分析するため、各測点毎に得られた時系列波を周波数解析し、その周波数ピークから充填判定を行った。また、波形を抽出する際の信号処理を排除するため、sin窓関数を用いずに切り出しを行った。さらに、第4章で提案した最適な探触子間隔について検証を行った。

プレキャストT桁では、一般的なかぶり厚75mmを対象として充填・未充填シースを対象としてPCグラウト充填判定を行った。また、箱桁の支点部を対象に、かぶり厚が250mmを超える実橋梁に対して実験を行った。

以下に得られた知見を列記する。

- ・かぶり厚75mmのプレキャストT桁を対象としたPCグラウト充填調査では、探触子間隔がかぶり厚の2倍で最も精度向上する結果が得られた。
- ・かぶり厚75mmのプレキャストT桁では充填シースでも概ね高周波の周波数ピーク結果となった。これはかぶり厚が小さくコンクリート内部の散乱減衰が少なく、高周波成分が減少しないためと考えられる。かぶり厚135mmの場合、探触子間隔は未充填シースに与える影響が大きかったが、かぶり厚75mmの本実験では、探触子間隔は充填シースに与える影響が大きかったことが明らかとなった。以上より、かぶり厚に応じた充填判定の周波数の閾値設定が重要と考えられる。
- ・プレキャストT桁で充填と未充填のスペクトル強度を比較したところ、充填では強度が小さく、未充填では強度が大きい結果が得られた。また、その強度差は約4倍あることが明らかとなった。これは対象物の音響インピーダンス差に起因すると考えられる。周波数ピーク以外にスペクトル強度を充填判定に用いることで充填判定の一助になると考えられる。
- ・箱桁橋の支点部を対象とした、かぶり厚375mmのシースに対して充填判定が可能であった。この場合も探触子間隔2Dで低周波が得られており、最適な探触子間隔であることが示された。
- ・箱桁橋の支点部を対象とした、かぶり厚が265mm、310mmのシースに対して未充填判定が可能であった。内部のシース位置が変化する場合は、その変化量を考慮した探触子間隔とすることで精度向上が図れることが明らかとなった。
- ・超音波伝搬速度収録する際の時系列波を周波数解析して部材厚をパラメータとした周波数分布の実験を行った。その結果、部材厚が878mmの場合、部材厚230mmと比較してコンクリート内部の散乱減衰によって90kHzを超える高周波成分が失われることが明らかとなった。かぶり厚の小さい場合と同様、部材厚が大きな場合でもPCグラウト充填判定時の周波数ピークの閾値設定が精度向上に寄与すると考えられる。

第 6 章

結 論

第6章 結論

6.1 本研究のまとめ

プレストレストコンクリート技術が日本国内に用いられるようになって約70年が経過した。プレストレストコンクリートはコンクリートの引張強度を補完する技術と位置づけられ、圧縮に強いコンクリートの特長を活かした構造といえる。

我が国では、橋長15m以上の橋梁17万橋のうち44%、約76,000橋がプレストレストコンクリート構造である。中でも、より長支間に適用可能なポストテンション橋は、プレストレストコンクリート橋(PC橋)の80%、約60,000橋に及んでいる。

PC橋は、国道をはじめ高速道路、県道、市町村道など日本全国各地で採用され、活用されている。現在、我が国は経済的にも社会資本設備的にも安定しており、今後は成熟した社会として少子高齢化による労働力の低下と税収減が懸念されている。社会資本の有効活用が望まれている中、日本全国で利活用されているPC橋の維持管理手法を向上化し、重要な社会資本として耐久性を伸ばしていくことは非常に意義がある。グラウトが確実に施工され、シーす内部が充填されている場合、たとえ内部のPC鋼材が破断した場合でもその影響は限定的で、耐荷力に与える影響は小さいことが既往の研究でも明らかになっている[蒲ら、2020]。

本研究では、日本全国で用いられているプレストレストコンクリート構造のうち、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超音波広帯域超音波法(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、 $\phi 76\text{mm}$ の圧電素子を備えた大型探触子を含む特殊機器について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解明したものであり、そ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となっている。その主な要旨と結論を以下に示す。

第3章「WUTの特徴と適用性の検証」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、判定方法について明らかにした。また、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るXRT、IEについてそれぞれの手法の特徴を明らかにした。さらに、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、供試体を用いて上記3手法を用いたPCグラウト充填調査実験を行った。その実験結果より、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。実験結果よりWUTの課題を明らかにし、本研究で提案する手法を述べた。

第4章「WUTの特性に関する基礎実験」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、その基礎特性の把握を行った。WUTでは、コンクリート内部に超音波帯域の弾性波を発信する際に、接触媒質を塗布するが、これが有効な反射波を得るために必要であることを実験的に明らかにし、探触子を押し当てる際に充填判定に影響を与えない力の大きさを定量的に示した。また、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스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。さらに、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かぶり厚の2倍を提案した。かぶり厚135mmの充填供試体と未充填供試体の周波数ピーク値の比較から、探触子間隔が充填シースに与える影響よりも未充填にシースに与える影響が大きいことを明らかにした。

第5章「WUTによるグラウト充填調査の現場実験」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桁橋で行った実験では、探触子間隔とかぶり厚の相対比をパラメータとして変えながら充填・未充填シースに対する充填判定を行った。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寄与することを明らかにした。かぶり厚75mmのプレキャストT桁では、探触子間隔が未充填シースよりも充填シースに与える影響が大きいことを明らかにした。第4章の結果と合わせて、かぶり厚に応じて得られる反射波の周波数が異なることを示した。また、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、箱桁橋の支点部を対象としたかぶり厚が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。また、シースカぶり厚が変化する場合、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グラウト充填判定が可能となりうることが示唆された。部材厚をパラメータとして周波数帯域に及ぼす影響を検証した結果、部材厚が厚い場合は、高周波帯域の周波数が減少することが明らかとなった。PCグラウト充填調査で充填・未充填を判定するための周波数帯域は、部材厚に応じて設定することが望ましいことを示した。

6.2 今後の課題と展望

本研究では、PC グラウト調査に用いられている超音波広帯域超音波法(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、特殊機器について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解明した。

本研究では、探触子から超音波が発生する範囲について実験的に明らかにしたが、どのようにコンクリート内部に波が伝達され、対象物でどのように反射されるか、について十分に検証できていない。コンクリートは内部に粗骨材などがあり、一様な弾性波が伝達されないため、アクリルなど均一な材料を用いて超音波伝搬に関する基礎実験を行うことで性状を的確に把握でき、精度向上に寄与できると考える。

PC グラウト充填判定を行う際には、得られた時系列波を高速フーリエ変換して周波数解析を行う。得られた周波数スペクトルでは、ピーク周波数が0kHzとなる場合がある。これは、波形を変換する際の打ち切り誤差と考えられる。打ち切り誤差を発生させない解析方法としては、時系列波がX軸と交わる点で切り出す方法が妥当と考えられる。今後、打ち切り誤差と切り出し範囲の変更が、周波数ピークに与える影響を定量的に示すことで精度向上に寄与できると考える。

一般的なPCグラウト探査業務では、電磁波レーダーなどを用いて鉄筋の位置出しを行い、それを避けた位置に探触子をセットする。内部鉄筋がある場合に、その反射波が与える影響について今後、検証する必要があると考えられる。鉄筋の音響インピーダンスはコンクリートのそれと比較して4倍の大きさである。連続ラーメン構造の柱頭部など形式によっては太径鉄筋が125mmピッチなどで密配置されており、その影響の大きさを検証することが望まれる。

WUTは反射法によってPCグラウトの充填調査を行う技術である。ただし、反射法ではコンクリート表面を伝達する表面波が反射波と干渉して影響を及ぼすことが考えられる。現在、WUTの発信探触子と受信探触子は同期しない仕様となっている。これを同期させる装置に改良することで、表面波と反射波を分けて検証することが可能となり、反射波が及ぼす影響をより定量的に評価できるものと考えられる。

WUTは、他の非破壊調査手法に比べて再現性が高く、かぶり厚が大きな部材にも適用できることが本研究で明らかとなった。今後、上記の課題を解決することで、グラウトの充填判定に至らないケースをより少なくでき、PCグラウト充填判定の精度向上に寄与できると考える。現在のWUTを用いたPCグラウト充填調査で、最も時間的にクリティカルとなる作業は、コンクリート表面に塗布した接触媒質の除去作業である。接触媒質は、現在の充填調査には必要不可欠であるが、探触子とコンクリートの密着性を高めるため高い粘性を有している。この高い粘性が除去作業に時間を要する原因となっている。現在のWUTは、発信する弾性波に圧縮波であるP波を用いているが、接触媒質の塗布を不要にできるせん断波のS波を用いたドライ探触子の開発が進められている。今後、S波を用いたグラウト調査機器

の開発が進めば、より短時間で効率的なPCグラウト充填調査となることが期待される。

本論文に関する著者の発表論文

- 1) 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.
..... 【本文との関連 : 第 4 章】

- 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*, doi: 10.14455/ISEC.res.2017.121, 2017.
..... 【本文との関連 : 第 3 章】

- 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*, 2018.
..... 【本文との関連 : 第 4 章】

謝 辞

本論文は、著者が株式会社日本ピーエスに在籍しながら、2018年4月から2021年3月まで山口大学大学院博士後期課程で社会人学生として取り組んだ「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」の成果を取りまとめたものです。

本論文の主査を務めていただいた山口大学大学院創成科学研究科准教授 吉武 勇先生には、研究者としての経験が乏しい著者に対して「研究とは研ぎ究めること」である、として研究に対する考え方や論理的な思考方法などについて、多くのご教授をいただきました。博士後期課程に入学後、進めていく研究テーマに関しても、先生とたくさん打ち合わせをさせていただきましたが、当初とは異なる、最も「いばらの道」のテーマを選択することとなりました。先生の貴重なアドバイスを振り切ってテーマ選定を行ったにもかかわらず、3年を超える長きにわたり、懇切丁寧なご指導をいただきました。本当に言葉で言い表せないほど深く感謝申し上げます。吉武先生には、研究内容についてもさることながら、文書作成ソフトや表計算ソフト、発表資料作成ソフトなど、著者が学生の時とは様変わりした研究ツールについてもたくさんご教授いただきました。著者が何時間も要した作業をまるで「魔法使い」のように先生が事も無げに処理される姿を見て、鳥肌が立ったことを今でも鮮明に覚えております。また、投稿論文の締め切り前などは、無理をお願いして山口大学工学部の先生のお部屋にお邪魔し、まさにマンツーマンでご指導いただきました。研究成果をまとめ、学位を取得できることは大変光栄で名誉なことですが、先生とお会いできる機会が少なくなることがとても残念です。是非、今後もタイミングを見つけて先生のお部屋にお邪魔したいと考えております。出来の悪い学生で申し訳ありませんが、今後とも変わらず、どうぞご指導・ご鞭撻のほど、よろしくお願い申し上げます。

山口大学大学院創成科学研究科教授 進士 正人先生、同教授 中村 秀明先生、同教授 麻生 稔彦先生、同准教授 渡邊 学歩先生には、ご多用にも関わらず、本論文の副査を快くお引き受けいただきました。心よりお礼申し上げます。予備審査、本審査と2度の論文審査では、様々な視点から貴重なご意見とご助言を頂戴できたおかげで、本研究の内容を高めることができました。

本研究の遂行にあたっては、多くの方々からご指導・ご助言・ご支援をいただきました。

京都大学学際融合教育研究推進センター特任教授の大津 政康先生には、広帯域超音波法で用いる機器の基礎特性の検証方法について、具体的で貴重なご助言をご教示いただきました。本研究を進めていくにあたり、たくさんの学びにつながりました。厚く御礼を申し上げます。

元アプライドリサーチ株式会社の境 友昭博士には、ご多用中にも関わらず、弊社の東京

支店に足をお運びいただき、広帯域超音波の波動の伝搬、波動の周波数と振幅などについてたいへん多くのご教示を頂きました。境博士のご教示のおかげで、本研究の内容をより高めることができました。厚くお礼申し上げます。

株式会社エッチアンドビーシステムの原 幹夫社長、張 弘取締役、山口 佳宏氏、木下 尚宜氏、梶野 学氏には、広帯域超音波法全般と実務に関する様々のご教示・ご助言・ご支援を頂きました。特に、張氏と木下氏からは、解析ソフト UCM2000 の操作方法を含め、広帯域超音波法に関する様々なことをご教示いただきました。本研究成果はお二人のお力添えがなければ、ここまで成し遂げることができなかつたと考えております。厚く御礼申し上げます。

一般社団法人日本建設機械施工協会 施工技術総合研究所の渡邊 晋也博士には、快く模擬 PC はりの実験にご協力いただきました。深く感謝の意を表します。福井大学大学院工学研究科准教授の鈴木 啓悟先生には、ご多用にもかかわらず解析と実験にご協力いただきました。厚く御礼申し上げます。山口大学工学部施設材料学研究室（吉武研究室）の在校生、卒業生の皆様には、たくさんの時間を共有させていただき、多くのご助言と研究に対するモチベーションを与えていただきました。深く感謝の意を表します。特に本研究と一緒に取り組んでいただいた WUT 班の各位、元大学院博士前期課程の山田浩司氏（現 株式会社日本ピーエス）、元学部 4 年生の武永 大輝氏（現 株式会社日本ピーエス）、元学部 4 年生の山口 颯太氏（現 東京都）、学部 4 年生の迫 美乃氏には、とても一所懸命にグラウト調査実験やその解析と検証に尽力していただきました。また、炎天下の中での計測や冬の悪天候下でのグラウト調査実験などでは、率先して対応いただき感謝の念でいっぱいです。研究を進めていく中で、山田氏からは前向きさと熱意を、武永氏からは素直さと周りに対する気配りを、山口氏からは冷静な分析と意志の強さを、迫氏からは素早い解析の対応と明るさをいただきました。本研究は、4 名のみなさんとともに、ときには超音波の波に乗り、大半のときを超音波の波に溺れながらも、一緒にまとめあげた成果だと感じております。本当に心からお礼申し上げます。また、いつの日か、WUT 班のみなさんと、今度は実際の仕事で一緒にできる日を楽しみにしております。

著者が所属し、日頃よりお世話になっている一般社団法人九州橋梁・構造工学研究会（KABSE）、一般社団法人ツタワールドボク、一般社団法人プレストレストコンクリート建設業協会九州支部の皆様からは貴重なご意見やご助言と、研究に対するたくさんのモチベーションを頂戴しました。厚く御礼申し上げます。

著者が在籍する株式会社日本ピーエスの代表取締役社長 有馬 浩史氏、元取締役（現 株式会社エッチアンドビーシステム 代表取締役社長）原 幹夫氏、技術本部長 濱岡 弘二博士、著者所属の西日本本部取締役本部長 坂口 敏夫氏、九州支店支店長 用貝 洋氏、九州支店顧問（前西日本本部長）田中 和幸氏には、著者の大学院博士後期課程入学やその後の実験や研究に対して多大なるご支援やご協力を頂戴しました。あらためて心からお礼申し上げます。特に、原氏には、研究に対する姿勢や実験内容について、3 年以上の長きに渡って、一

謝 辞

張一弛の助言と励ましをいただきました。研究開発グループ長 天谷公彦氏，研究開発グループの栗原 勇樹氏，金枝 俊輔氏，角田 貴也氏，人財開発グループ長 月東 宏之氏，経営企画室長 立石 陽輝氏，九州支店技術グループの右田 正人氏，河口 慎也氏，中井 太樹氏，比嘉 葵氏，をはじめとして快くフィールドを提供いただいた現場のみなさまには，実橋での計測実験や，供試体実験における供試体作製や計測などで，ご協力いただき，研究遂行の大きな助けになりました。左記の皆様を含め，著者の学位取得の機会を与えていただき，その遂行を温かく見守っていただいた株式会社日本ピーエスの全社員のみなさまに対して深く，深く，感謝申し上げます。

最後に，著者が土木という「いばらの道」へ進むことを後押ししてくれた父と，その父を支え続けていてくれる母，社会人学生として大学院へ入学することを快く受け入れて，陰ながら支えて応援してくれた妻と2人の息子に心からの感謝を記し，結びといたします。

2021年3月
福島 邦治