

博士論文

広帯域超音波法(WUT)の弾性波伝播特性を考慮した

PC グラウト充填調査の精度向上

Accuracy Improvement for PC Grout Inspection

Based on the Properties of Elastic-wave Propagation  
of Wide-Range Ultrasonic Testing (WUT)

2024年3月

木下 尚宜

Takanori KINOSHITA

山口大学大学院 創成科学研究科

## 目 次

第 1 章 …… 序論	1
1.1 研究背景	1
1.1.1 プレストレストコンクリートとは	1
1.1.2 わが国における PC 橋の発展	3
1.1.3 PC 橋の維持管理上の課題	5
1.2 PC 橋の維持管理上の着目点	9
1.2.1 PC グラウト充填不良の原因	11
1.2.2 PC 鋼材腐食の原因	14
1.3 本研究の目的	16
1.4 本論文の構成	18
第 2 章 …… 既往の研究	22
2.1 放射線透過法	23
2.2 打音振動法	26
2.3 広帯域超音波法	28
2.4 インパクトエコー法	30
2.5 その他の非破壊検査手法	32
第 3 章 …… WUT 探触子から発せられる弾性波の挙動についての検討	39
3.1 はじめに	39
3.2 本研究で用いる計測システム	40
3.2.1 概要	40
3.2.2 計測システム	40
3.2.3 LDV を用いた計測システム	46
3.2.4 入射弾性波周波数特性についての検討	48
3.3 コンクリート中を伝播する弾性波の諸特性に関する基礎的検討	50
3.3.1 概要	50

3.3.2	検討に用いた供試体	51
3.3.3	距離減衰に関する検討	52
3.3.4	発信波の指向性に関する検討	55
3.3.5	端面反射波の特性に関する検討	60
3.3.6	まとめ	67
3.4	入射弾性波の指向性に関する検討	68
3.4.1	概要	68
3.4.2	検討に用いた供試体	69
3.4.3	入射弾性波の指向性に関する検討	70
3.4.4	まとめ	75
3.5	弾性波の伝播経路に関する検討	76
3.5.1	概要	76
3.5.2	検討に用いた供試体	78
3.5.3	シース反射波に関する検討	80
3.5.4	表面波（レイリー波）に関する検討	86
3.5.5	まとめ	89
3.6	第3章のまとめ	90
第4章	弾性波の伝播挙動に基づいた判定手法に関する検討	92
4.1	はじめに	92
4.2	新規判定手法の提案	94
4.3	コンクリート供試体を用いた検証試験	101
4.3.1	概要	101
4.3.2	検討に用いた供試体	101
4.3.3	実験方法	103
4.3.4	実験結果および考察	104
4.4	建設中の橋梁を用いた検証試験	107
4.4.1	概要	107

4.4.2・A橋における検証試験	107
4.4.3・B橋における検証試験	113
4.5 実物大供試体を用いた検証試験	118
4.5.1・概要	118
4.5.2・検討に用いた供試体	118
4.5.3・実験方法	119
4.5.4・実験結果および考察	120
4.6 第4章まとめ	124
第5章 … 結論	126
5.1 結論	126
5.2 今後の展望と課題	128
本論文に関する発表論文	129
謝辞	130

# 第1章 序論


## 1.1 研究背景


### 1.1.1 プレストレストコンクリートとは

コンクリートは圧縮力に強いが、引張力に弱い性質を持つ。この弱点を補うため、コンクリートに鉄筋を埋設し、引張力を鉄筋に負担させる鉄筋コンクリート（以下、RC とする）が一般に用いられている。これに対して、コンクリートが圧縮力に強いという特質を活かして、あらかじめコンクリートに圧縮力を導入し、引張力に抵抗するという構造がプレストレストコンクリート（以下、PC とする）である。PC 構造は RC 構造と比較した場合、以下の特徴が挙げられる。

- ・プレストレス力により、ひび割れの発生を制御することができる。
- ・プレストレス力により耐久性と水密性が向上する。
- ・少ない断面で大きな耐荷力を発揮できるため、構造物の軽量化、支間の長大化が図れる。

コンクリートに圧縮力を導入するためには、PC 鋼材と呼ばれる鉄筋の 5～6 倍の強度を持つ高強度の鋼材を用いる。PC 鋼材を緊張し、コンクリートに張力を与えた後にコンクリートと固定することで、引っ張られていた PC 鋼材が元に戻ろうとする力でコンクリートに圧縮力が与えられる。プレストレスの導入方法には、プレテンション方式とポストテンション方式の 2 種類ある。

プレテンション方式は、 1-1 に示すようにあらかじめ緊張した PC 鋼材にコンクリートを打設し、コンクリートの硬化により PC 鋼材を定着させるものである。プレテンション方式は設備の制約により工場製作に限られるため、公道での輸送を考慮すると桁長が最大でも 25m となる。

ポストテンション方式は、 1-2 に示すようにコンクリート部材内にシース管など用いてダクトを形成し、コンクリート硬化後にシース内に配された PC 鋼材を緊張し、両端をクサビやネジなどを用いてコンクリート部材に定着させたものである。緊張後はシース内に PC グラウトを注入し、PC 鋼材の防錆とコンクリートとの付着を確保している。ポストテンション方式は現場での打設が可能のため、様々な形状の構造物や、支間長が 100m を超える橋梁といった大型構造物の製作ができる。

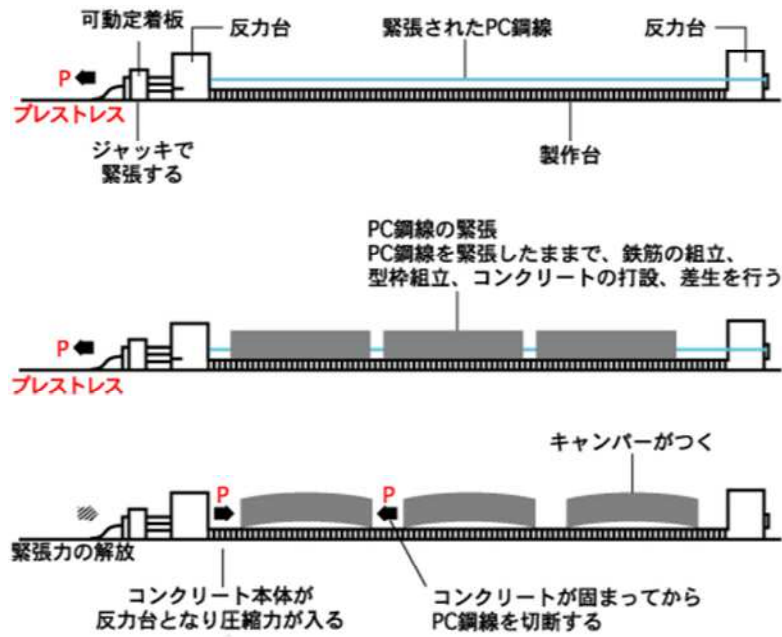


図 1-1 プレテンション方式模式図

[プレストレストコンクリート建設業協会，2023]

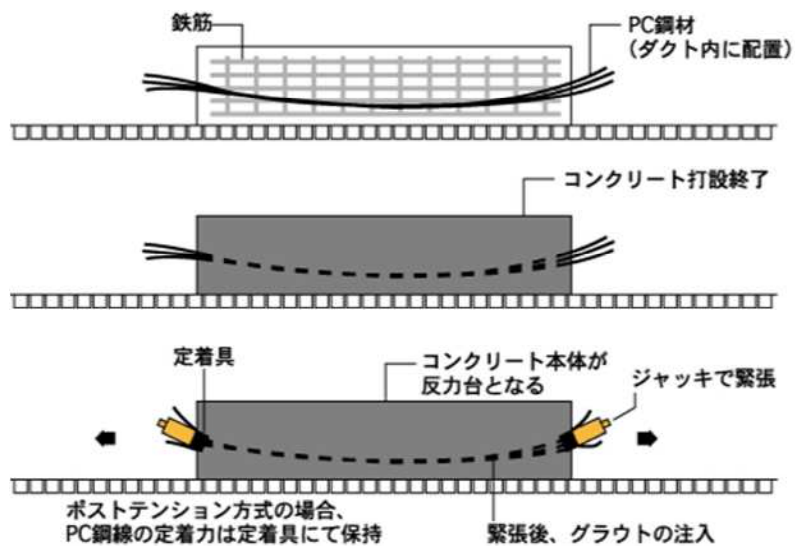


図 1-2 ポストテンション方式模式図

[プレストレストコンクリート建設業協会，2023]

### 1.1.2 わが国における PC 橋の発展

わが国で最初の PC 橋は 1951 年完成の長生橋（写真 1-1）である。長生橋は 50 年にわたり供用されたが，2001 年に河川改修のため撤去され，一部は七尾市郊外に移設された。一部の撤去された桁については材料試験や載荷試験が行われており，厳しい塩害環境にさらされていたにもかかわらず，十分な耐荷力や耐久性を保有していたことが報告されている [西垣ら，2002]。最初のポストテンション方式橋梁は 1953 年完成の十郷橋（写真 1-2）である。十郷橋は 70 年経た現在も供用されており，供用開始後 60 年の時点で健全性調査が実施され，今後の供用に耐えうる高い品質を有していたことが報告されている [原ら，2015]。いずれの橋梁も半世紀以上の供用を経て今なお健全な状態を維持していたことは，適切に施工された PC 橋が高い耐久性を有していることの証拠である。



(a) 完成当時の長生橋

(b) 移設後の長生橋

写真 1-1 長生橋



(a) 完成当時の十郷橋

(b) 健全性調査時の十郷橋

写真 1-2 十郷橋

以降約 70 年経過し、道路統計年報 2022 [国土交通省, 2023] によると 2022 年時には橋長 15m を超える道路橋は約 176,000 橋あるが、PC 橋はそのうちの約 45%にあたる約 78,000 橋を占める。また、約 78,000 橋ある PC 橋の約 8 割にあたる 62,000 橋は都道府県道や市町村道であり、地方自治体が管理している。

一方、PC 橋の老朽化も急速に進んでいる。平成 25 年度道路構造物に関する基本データ集 [玉越ら, 2015] によれば建設後 50 年を経過した橋梁は 2023 年時点で約 13,000 橋にのぼり、10 年後の 2033 年には約 28,000 橋と倍増する (図 1-4)。これら老朽化していく PC 橋の維持管理は喫緊の課題となっている。

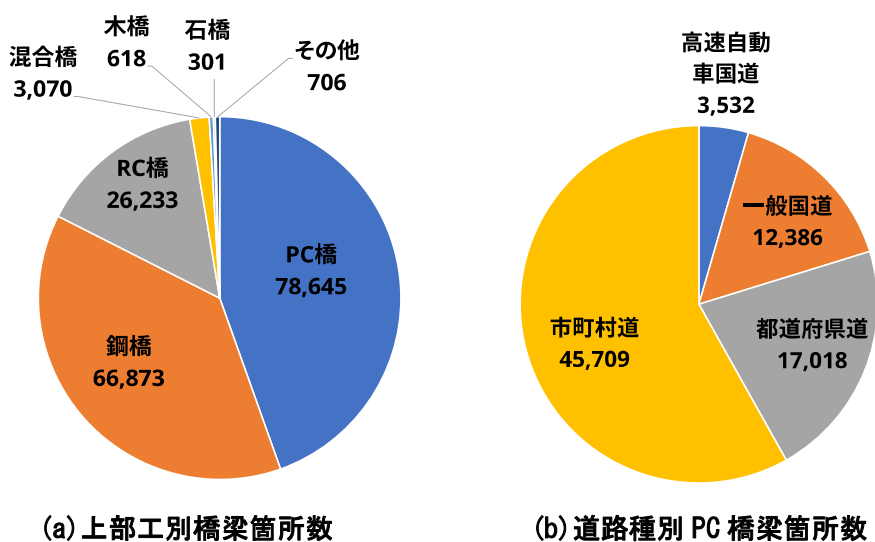


図 1-3 道路橋種別

[国土交通省, 2023]

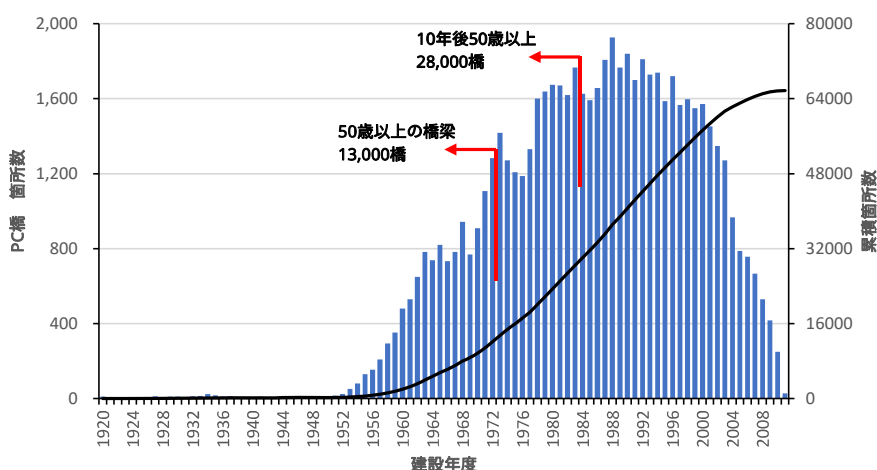


図 1-4 建設年次別 PC 橋梁数の推移

[玉越ら, 2015]



### 1.1.3 PC 橋の維持管理上の課題

PC 橋梁を取り巻く環境は年々厳しくなっている。道路橋においては 1993 年の車両制限令の規制緩和により車両の総重量が増加し、図 1-5 に示すように大型車の交通量（走行台キロ）は年々増加している傾向にある [NEXCO 3 社, 2015]。

また 1993 年よりスパイクタイヤの使用が廃止されたことを受け、積雪寒冷地での凍結防止剤（塩化ナトリウム）散布量が増加している。図 1-6 に示すように 1989 年～1992 年の平均散布量が 33t/km であったのに対して、スパイクタイヤ廃止後の 1993 年～2012 年の平均散布量は 53t/km となっており、約 1.6 倍に増加している [NEXCO3 社, 2015]。これにより凍結防止剤散布地域の塩害が加速している。

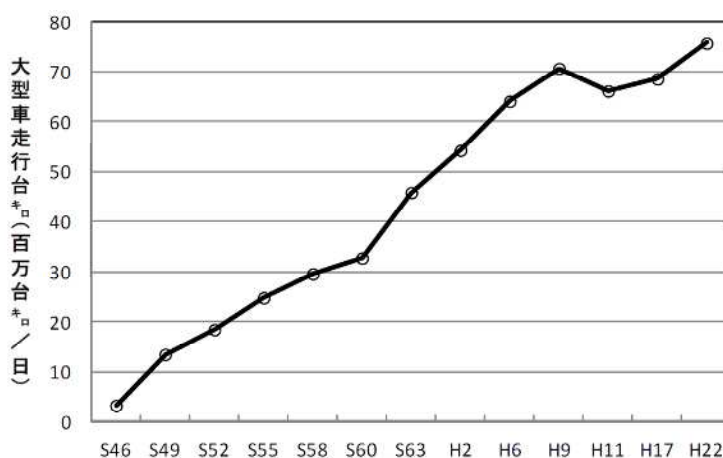


図 1-5 大型車走行台キロの推移

[NEXCO3 社, 2015]

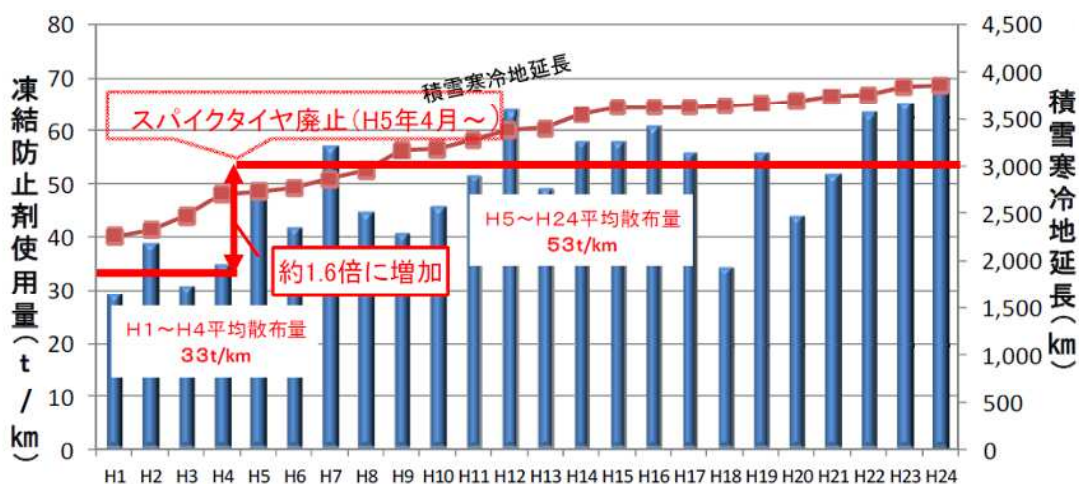


図 1-6 凍結防止剤散布量の推移

[NEXCO3 社, 2015]

また、過去に建設された PC 橋の重大な損傷事例も報告されている。落橋に至った事例として Bickton Meadows 歩道橋 (英国, 1967 年), 写真 1-3 に示す Ynys-y-gwas 橋 (英国, 1985 年) やスヘルデ川に架かる橋梁 (ベルギー, 1992 年) などが挙げられる。これらの橋梁が落橋に至った原因は, ポストテンション方式 PC 橋における PC グラウトの充填不良に起因する PC 鋼材の腐食・破断といわれている。PC 鋼材が破断した場合, 破断位置におけるプレストレスは消失する。一般に, PC 鋼材は断面に対して多数配されているため, 1,2 本破断したところで落橋には至らない。しかし, PC 鋼材が多数破断して耐荷力が大幅に低下した場合には, 落橋に至っている。

わが国でも新菅橋や島田橋において PC 鋼材の破断が原因で落橋している。また, 落橋には至っていないが, 大規模な PC 鋼材の腐食・破断が妙高大橋で 2009 年に補修工事の際に発見されている。PC 鋼材を調査した結果, PC グラウトの充填がほとんどない箇所は 66% にのぼり, 14% の PC 鋼材で破断が確認されている [村下ら, 2016]。なお, 現在では妙高大橋は新橋の架け替えが完了しており, 旧橋の撤去が検討されている。



(a) Ynys-y-gwas 橋の落橋



(b) スヘルデ川における落橋

写真 1-3 海外における落橋事例

[睦好, 2016]



写真 1-4 妙高大橋 PC 鋼材破断状況

[村下ら, 2016]

このような重大な損傷事例が発生した原因として、劣化が内部で進行し、外観に現れないという PC 橋特有の性状が挙げられる。PC 橋は、コンクリートに導入されたプレストレスにより高い耐荷力をもつ。そのため、PC 鋼材の破断によりプレストレスが減少するとともに耐荷力も減少する。PC 鋼材は PC グラウトにより保護されているが、PC グラウトが適切に充填されていない場合、水分や塩分が進入すると PC 鋼材が腐食し、やがて破断に至る。PC 鋼材の腐食はコンクリート部材内に配されたシース内で進行するため、外部からその状況を窺い知ることはできない。現在では PC 橋の深刻な損傷事例が国内外で散見されたことより、PC グラウトの重要性が改めて認識され、グラウト材や機器の改良、施工管理の徹底により PC グラウトの充填は確実なものとなっている。しかし、過去に建設された高速道路の PC 橋において、PC グラウトの充填が十分でないものが調査箇所数の約 25%あることが報告されている（図 1-7）[NEXCO3 社, 2014]。これより、過去に建設された PC 橋において PC グラウト充填不良の存在が懸念される。

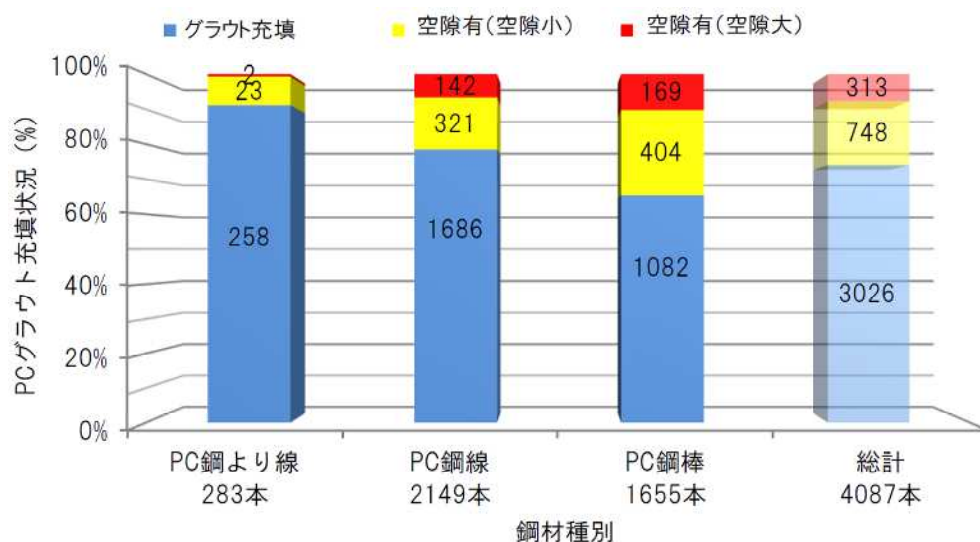


図 1-7 高速道路の PC 橋における鋼材種別グラウト充填状況

[NEXCO3 社, 2014]

図 1-8 によると RC 梁では劣化初期に曲げひび割れが外観変状として現れるため、外観目視による点検が有効である。一方、PC 梁では PC 鋼材の腐食・破断は外部から観察できず、外観変状の曲げひび割れが現れるのは、PC 鋼材が複数本破断し、耐荷性能が低下して終局に近い状態になってからである [プレレストコンクリート建設業協会, 2015]。このような状態に至ると、落橋の危険があり、構造物を修復する場合、大規模な補修補強または架け替えとなるため維持管理コストの増加は避けられない。このように PC 構造物の維持管理において、外観目視のみによる点検では、適切な劣化予測を行うことは困難である。そ

のため、PC 構造物を維持管理する上では、PC 鋼材を保護する PC グラウトの充填状況を把握することが重要となる。

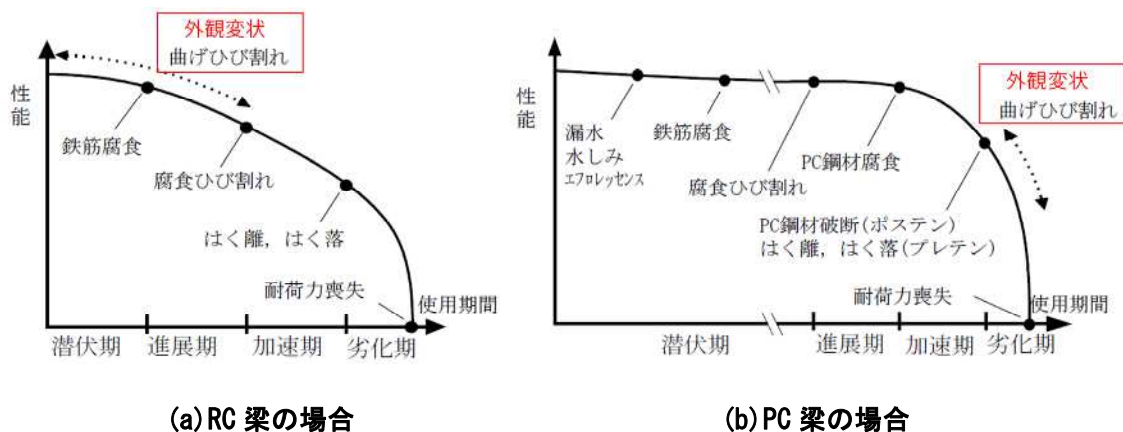


図 1-8 RC 梁と PC 梁の予想される劣化シナリオ

[プレストレストコンクリート建設業協会, 2015] 一部加筆

コンクリート部材内に配されたシース内の PC グラウトは直接検査できず、検査方法は削孔を伴う微破壊検査か、X 線や弾性波を用いた非破壊検査に限られる。微破壊検査では、PC グラウトや PC 鋼材の状況が目視により直接確認できるという利点がある。一方、削孔を伴うことにより、僅かではあるが構造物に損傷を与えることになる。また、一時的にはあるが、削孔によりシース内が通気し PC 鋼材の腐食を促進する恐れもある。そのため、構造物に損傷を与えない非破壊による PC グラウト充填検査が望ましい。



(a) 充填

(b) 充填不良

写真 1-5 削孔を伴う微破壊検査結果例



の処理に起因する鋼材腐食や、PC 鋼材の上縁定着に起因する鋼材腐食に大別される。

過去にはPCグラウトの品質が適切でなかったこと、PC橋の設計が未熟であったことや、品質管理が不十分なことによる“充填不足”や“鋼材腐食”の危険性があった。表 1-1 は、これらの要因に対して不備があった年代、要因対策が途中経過的な年代や、完了している年代を示すものである。そのため、PC橋の維持管理にあたり、建設された年代に着目し“充填不足”や“鋼材腐食”のリスクを把握することが重要である。以降にこれら“充填不足”や“鋼材腐食”の詳細を示す。

## 1.2.1 PC グラウト充填不良の原因

### (1) 材料に起因する PC グラウト充填不良

PC グラウトは表 1-2 に示すように、主にセメント、水、混和剤を練り混ぜて作製される。1982 年以前はノンブリーディング型の混和剤がなく、ブリーディング水の発生を許容していた。ブリーディング水とは、PC グラウトが硬化するまでの間、材料分離が起こり練り混ぜ水の一部が遊離して発生するものである。そのため、PC グラウトにアルミニウム粉末を添加して膨張させ、この膨張圧によりブリーディング水を排出させることを標準としていた。しかし、この方法は有効ではなく、ブリーディング水はケーブルの高い部分に集積し、グラウト硬化後に消失することによりシース内に未充填部分が発生する場合があった。

また、1980 年代に高粘性の混和剤が登場するまでは、低粘性の PC グラウトを使用していた。PC グラウトの粘性が低いと、先流れ現象が生じて下り勾配時に PC グラウトが全断面にいきわたらずシース底部を流れる。このときシース上部に生じた空気が下り勾配上部に移動し残留することにより、シース内に未充填部分が発生する。

表 1-2 1960 年代の PC グラウト示方配合例

W (kg)	C (kg)	減水剤 (g)	アルミニウム粉末 (g)
21(22.5)	50(50)	125(125)	2.5(5.0)

( ) 内はシースと PC 鋼材の間の空隙の小さい場合

[プレストレストコンクリート建設業協会, 2003]

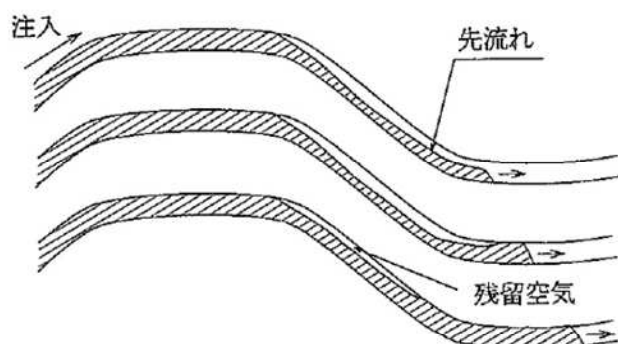


図 1-9 先流れによる空隙の発生状況

[プレストレストコンクリート建設業協会, 1996]

## (2) 施工および管理に起因する PC グラウト充填不良

1996 年に流量計による PC グラウト注入量の管理が義務付けられる以前は、緊張管理表に PC グラウト注入の有無のみを記載する管理であった。そのため、注入忘れや注入不足といったヒューマンエラーのリスクがついてまわり、確実な PC グラウトの充填は望めない状況であった。

また、1986 年に「PC グラウト施工マニュアル」が発刊される以前は、PC グラウト注入作業が標準化されていなかった。そのため、PC グラウト注入を実際に行う作業員を含めて、PC グラウトに関する体系的な教育・訓練が十分になされておらず、作業の誤りがあったと考えられる。また、PC グラウトの施工管理は PC グラウトの飛散などで汚れることが多いため敬遠され、経験の浅い若い技術者に押し付けられることがあったといわれている。

施工機械については 1984 年に電動スクイーズ式ポンプが登場し、施工性が改善されている。それ以前は、手動式ダイヤフラムポンプなどが用いられており、ポンプの性能が低いため、注入圧力が高くなるにつれてグラウト注入時の閉塞リスクが上昇した。

## (3) PC 鋼棒を用いた場合の PC グラウト充填不良

1990 年代半ばまでは、張り出し架設工法の主ケーブルはディビダーク (DW) 鋼棒が多く用いられていた。当時、標準的に用いられていたシースは、鋼棒径  $\phi 32\text{mm}$  に対して空隙率が 29% しかない径  $\phi 38\text{mm}$  のものであり、PC グラウトが入りにくい構造であった。シース径を大きくすると部材厚に対して同一断面に配置できるケーブル数が限られるため、多数の PC 鋼材を効率よく配置するよう極力小径のシースを用いたと考えられる。グラウト長は長いものでは 80m にもなり、PC グラウトの注入圧の増加に伴う偽凝結、夏季施工時の温度上昇に伴う粘性の増加や冬季施工時の凍結などの影響で、シース内で閉塞が生じ、確実な PC グラウト充填が困難な状況があったと考えられる。

PC 鋼棒は概ね 10m おきにカップラーと呼ばれる接続具により連結されている。カップラーは、径の大きいカップラーシース内に配置される。カップラーの位置は、緊張時の伸びによる移動を考慮して、カップラーとシースが接触しないよう緊張方向と反対側に配置する必要があった。カップラーの移動距離が十分に確保できていない場合や移動方向を間違えた場合、カップラーとシースが接触して閉塞するため、PC グラウト充填が困難となる。また、カップラーシースは通常のシースと同様に鋼製シースを用いていたため、カップラーの位置をコンクリート打設前に目視で確認できないといった施工管理上の課題もあった。

以上より、PC 鋼棒を用いた構造物は PC グラウト充填不良の危険性が特に高いため、優先的に PC グラウト充填調査を実施する必要がある。



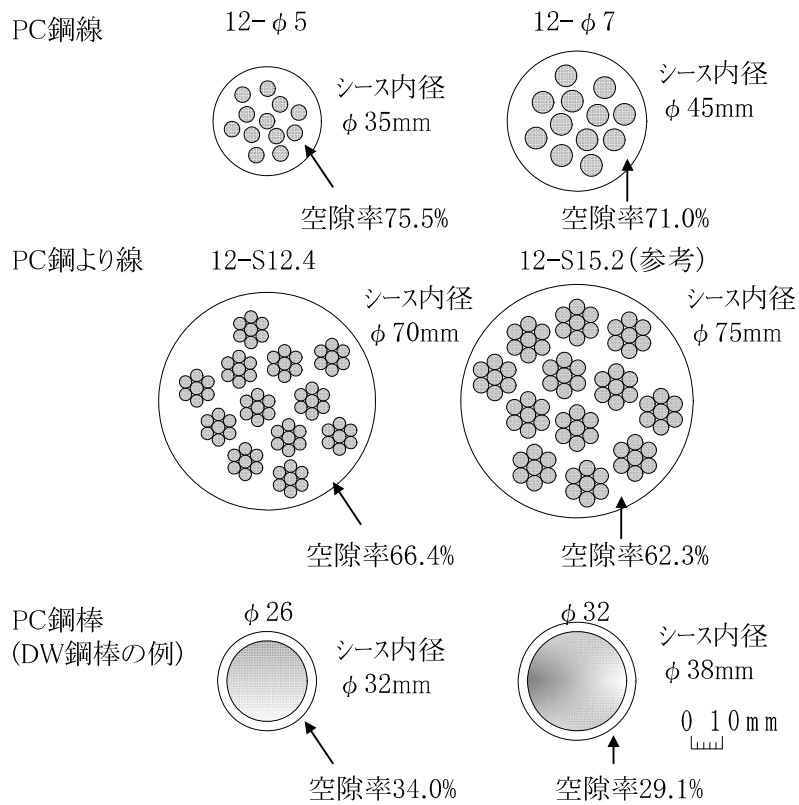


図 1-10 1990 年頃のシース内空隙率

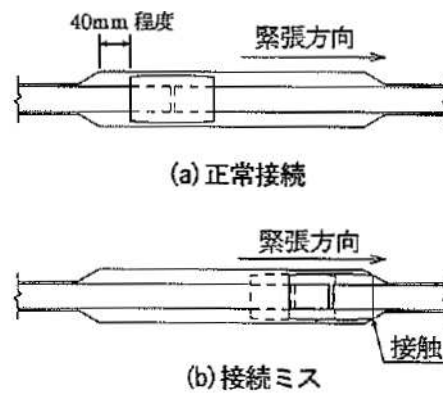


図 1-11 カップラー部でのシース閉塞

[プレストレストコンクリート建設業協会, 1996]

## 1.2.2 PC 鋼材腐食の原因

### (1) 上縁定着

1990 年代以前に建設された T 桁橋は、PC 鋼材として  $12\phi 5$  や  $12\phi 7$  といった小容量の PC 鋼線が一般に用いられていた。そのため、桁端部のみでは定着しきれず、一部を橋面上に定着していた（上縁定着）。上縁定着は橋面に接しているため、橋面の滞水が後埋めコンクリートの打ち継ぎ面を伝って定着部に進入し、PC グラウトの充填不良がある場合は、シース内に入ることから、PC 鋼材の腐食・破断の危険性が高い構造である。特に、冬季に凍結防止剤を散布する地域では塩分が供給されるため、注意が必要となる。

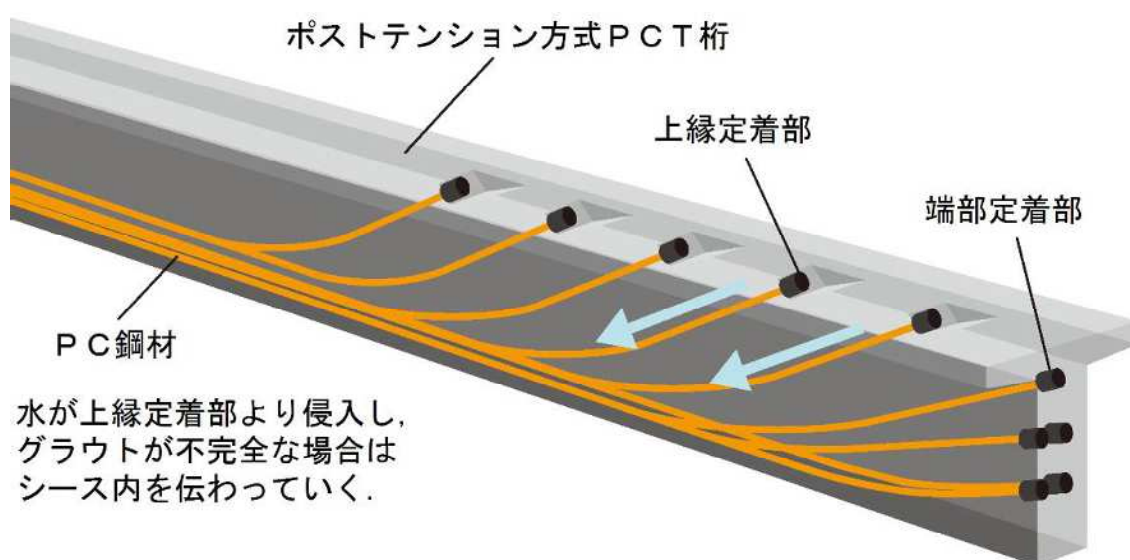


図 1-12 上縁定着の状況

[土木学会, 2018]

## (2) グラウトホース処理

1980年代半ばから1990年代半ばにかけて施工された箱桁橋では、グラウトホースを数本束ねて地覆といった後施工のコンクリートに埋まる位置まで横引きし、橋面上に取り出す配置が一般的であった。グラウトホースを数本束ねた場合、グラウトホース間に空隙が形成される場合があった。また、グラウトホースは当時ビニールホースやポリエチレン管を用いており、これらは線膨張係数がコンクリートと異なるため周囲に空隙ができ、水みちとなる可能性があった。当時施工された箱桁橋において、点検時にウェブや下床版定着突起にエフロレッセンスや漏水が散見されたことより原因究明がなされ、このようなグラウトホースの処理が原因で橋面上より雨水等が進入したといわれている。

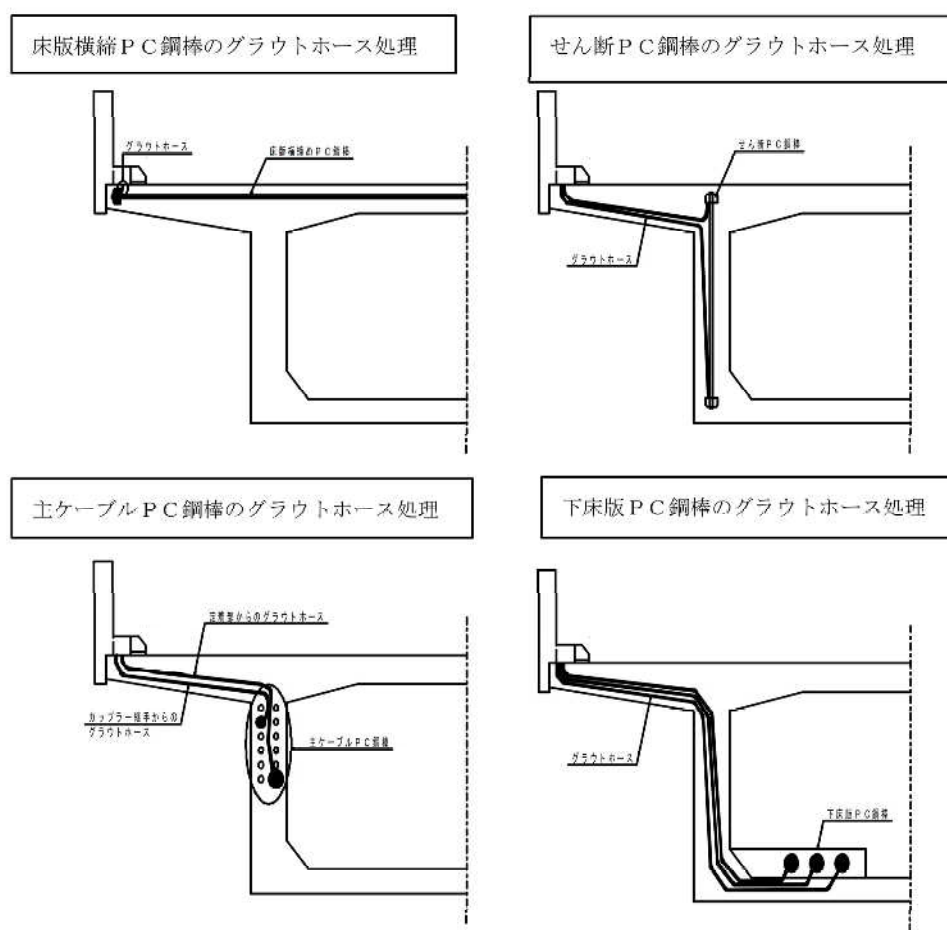


図 1-13 グラウトホースの地覆への配置例

### 1.3 本研究の目的

わが国における PC 橋は高齢化が進んでおり、図 1-4 に示すように 2023 年時点で建設後 40 年経過した PC 橋の割合が約 36%を占める。また、車両制限令の規制緩和による大型車両の交通量増加や、スパイクタイヤ廃止に伴う凍結防止剤の散布量増加など、PC 橋を取り巻く環境は年々厳しくなっている。こういった状況により、重大な損傷につながるリスクを抱えている PC 橋が増えていくことが想定される。過去に建設された PC 橋の一部では、材料、機械や設計の未熟さなどに起因する PC グラウトの充填不良が散見されている。PC 橋は PC 鋼材破断が耐荷性能低下につながるため、既設 PC 橋の維持管理において PC 鋼材を保護する PC グラウトの充填状況の把握が必要不可欠と考えられる。コンクリート部材内に配置されているシース内の PC グラウトの充填状況調査は、削孔を伴う微破壊検査、もしくは非破壊検査に限られる。その中でも、調査手法としては構造物への損傷がない非破壊によるものが望ましい。PC グラウト充填状況の非破壊検査手法は、主なものとして X 線透過法、衝撃弾性波法、インパクトエコー (Impact Echo: IE) 法や広帯域超音波法 (Wide-range Ultrasonic Testing : WUT) が挙げられる。これら非破壊検査手法にはそれぞれ一長一短があり、一つの手法に限られないのが現状である。WUT は、これらの検査手法の中では最も適用範囲が広いという特徴をもつ。そのため、WUT の測定精度が向上できれば、PC 橋の維持管理に大きく貢献できると考えられる。そこで、本研究では、非破壊による PC グラウト充填状況調査手法の一つである WUT に着目した。

濱岡ら [2014] によると、WUT の測定精度は既設 PC 橋 66 橋の調査より 80%程度あることが確認されている。しかしながら、△判定 (充填の確認に至らないもの) が約半数を占めており、この△判定の削減が必要と報告している。△判定を削減するためには、△判定とされた測点において追加計測をすることで、○または×判定に振り分ける手法が考えられる。このような新たな追加計測手法の確立により、さらなる測定精度の向上を目指した。

WUT による PC グラウト充填調査において、発信探触子と受信探触子の間隔は、測定精度に大きく影響を及ぼす重要な要素である [衣笠ら, 2010]。現在、WUT による PC グラウト充填調査では、表面波の影響を考慮し、シースかぶり深さに応じて探触子の配置間隔を段階的に設定している [濱岡ら, 2014]。

また、福島 [2020] による先行研究では、WUT 探触子から発せられた弾性波が同心円状に伝播するとの仮定のもと、探触子間隔をシースかぶり深さの 2 倍とすることで、PC グラウトの有無により、シース反射波のスペクトルピークに差異が生じやすいことが示されている。しかし、この段階では実際にコンクリート中を伝播する弾性波の特性を詳細に把握できていない。

そこで、WUT 探触子から発せられ、コンクリート中を伝播する弾性波の挙動を明らかに

し、より適切な探触子間隔を定め、新たな追加計測法を提案することでPCグラウト充填判定の精度向上を試みた。そして、提案した手法を実構造物等で試験することにより、その適用性の検証を試みた。なお、本研究は、既往手法と組み合わせることによる探査精度の向上を図るものであるため、既往手法の周波数による評価と異なる観点からの評価を試みた。

## 1.4 本論文の構成

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

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

第3章では、まず本研究で用いる計測システムについて説明するとともにWUT探触子から発せられる弾性波の周波数特性を調べた。次に直角二等辺三角形の断面を有する三角柱状の供試体を用いて、最適な探触子間隔がシースかぶり深さの2倍とする先行研究の検証を行った。その後、半円柱状の供試体とレーザードップラー振動計を用いて入射弾性波の指向性に関する検討を行った。また、供試体に切り込みを入れながら計測することで、シース反射波の伝播経路に関する検討ならびに表面波の影響に関する検討を実施した。

第4章では、第3章で明らかにしたWUTにおける弾性波の伝播挙動に基づき、適切な探触子配置間隔と新たな判定手法を提案した。建設中のPC橋や実物大供試体などにおいて、本研究で提案する判定手法の適用性について検討した。

第5章では、論文全体の結論を取りまとめ、今後の課題を述べた。

図 1-14 に本論文の構成を図示する。

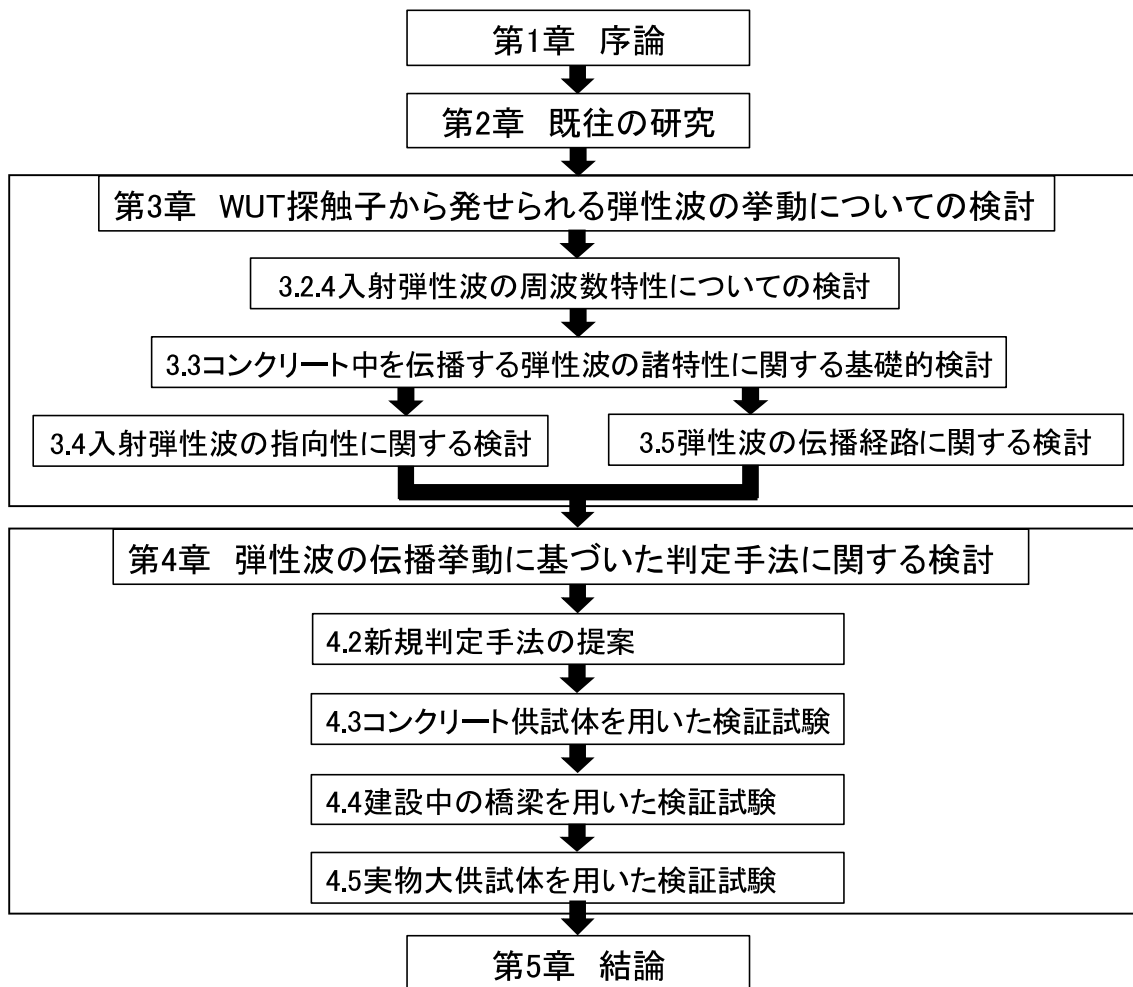


図 1-14 本論文の構成

## 第1章の参考文献

- NEXCO 東日本, NEXCO 中日本, NEXCO 西日本 : 高速道路資産の長保全及び更新のあり方に関する技術検討委員会報告書, 2014.
- NEXCO 東日本, NEXCO 中日本, NEXCO 西日本 : 東・中・西日本高速道路の更新計画について, 2015.
- 衣笠泰広, 築山有二, 谷井敬春, 蔦川敦丈, 緒方紀夫, 亀山輝夫, 廣瀬正行, 木下尚宜 : 受発信間隔が超音波反射法の判定精度に及ぼす影響, 土木学会第 65 回年次学術講演会, V-220, 2010.
- 国土交通省. (2023 年 9 月 30 日). 道路統計年報 2022 橋梁の現況. 参照先: 表 40-2 橋梁現況総括表: <https://www.mlit.go.jp/road/ir/ir-data/tokei-nen/2022/nenpo03.html>
- 玉越隆史, 横井芳輝 : 平成 25 年度道路構造物に関する基本データ集. 国土技術政策総合研究所資料 第 822 号, 2015.
- 土木学会 : 2022 年制定コンクリート標準示方書 [維持管理編], 2022.
- 西垣義彦, 小門前亮一, 奥田由法, 鳥居和之 : 日本最初の PC 橋-長生橋の耐久性調査. コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.2, pp.607-617, 2002.
- 濱岡弘二, 青木圭一, 原 幹夫, 木下直宜 : 広帯域超音波法を用いた PC グラウトの充填調査 : プレストレストコンクリート Vol.56, No.6, 2014.
- 原 幹夫, 濱岡弘二, 天谷公彦 : 建設から 60 年が経過したポストテンション方式 PC 橋の健全性調査, 第 24 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.463-468, 2015.



- 福島邦治：広帯域超音波法（WUT）を用いた PC グラウト充填調査の適用性と精度向上に関する研究，山口大学大学院創成科学研究科博士論文，2021.
- プレストレストコンクリート建設業協会：PC 構造物の維持保全-PC 橋のさらなる予防保全に向けて，2015.
- プレストレストコンクリート建設業協会：PC はどうやってつくるの？：  
<https://www.pcken.or.jp/information/pc/how/>アクセス日 2023/10/1 13:00
- 睦好宏史：橋梁の維持・管理の現状と問題点，道路の老朽化対策に関する講演会，2016.
- 村下 剛，小林憲一，谷川健一，大平英生，斎藤 玄：一般国道 18 号妙高大橋の損傷と現況報告について，光ファイバセンシング振興協会，2016.

## 第2章 既往の研究

本章においては、既往研究のレビューとして現在実施されている主な PC グラウト非破壊検査技術を紹介し、それぞれの技術的な特徴を示した。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 [プレストレストコンクリート工学会, 2016] に掲載されている主な PC グラウトの非破壊検査手法を表 2-1 に示す。

非破壊検査手法には、それぞれ部材厚、シースかぶり厚などの適用条件があるため、非破壊検査を実施する際にはこれらの特徴を把握しておく必要がある。

表 2-1 主な PC グラウト非破壊検査手法

調査方法	適用条件	適用断面形状・部位・鋼材種別
放射線透過法	・部材厚さ 500mm 未満 (対象部材表側と裏側に作業スペースが確保できること)	T 桁, I 桁:ウェブ 箱桁:ウェブ
打音振動法	・PC 鋼材が直線的に配置されていること	床版横締めケーブル 横桁横締めケーブル
広帯域超音波法	・シースかぶり厚さ 250mm 以下	T 桁, I 桁, スラブ桁:ウェブ 箱桁:ウェブ・床版 床版横締めケーブル
インパクトエコー法	・[空隙の大きさ]/[空隙までの深さ]が 0.25 程度 (シース径の 4 倍程度まで)	T 桁, I 桁, スラブ桁:ウェブ 箱桁:ウェブ・床版

[プレストレストコンクリート工学会, 2016] 一部改変

## 2.1 放射線透過法

放射線透過法とは、コンクリート部材の片側に放射線発生装置を設置し、もう片側にフィルムなどの放射線検出媒体を配置し、放射線を照射する手法である。放射線は一般的に X 線を用い、放射線検出媒体には工業用フィルムの外に、投影画像をデジタルデータで検出できるイメージングプレートやフラットパネルセンサが用いられる。

X 線は物質を透過する性質があり、X 線検出媒体に到達した X 線量が強いほど感光材料が黒化して濃度が増す。到達する X 線量は、透過する材質の密度の影響を大きく受け、密度の高い鉄等は X 線を透過しにくく、密度の低い空洞は X 線を透過しやすい。したがって、コンクリートより密度の高い鉄筋や PC 鋼材は白く写り、密度の低いグラウト未充填部などの空洞は黒く写る。また、PC グラウトはコンクリートと密度が同程度なため、コンクリートとの濃淡の差異は生じない。

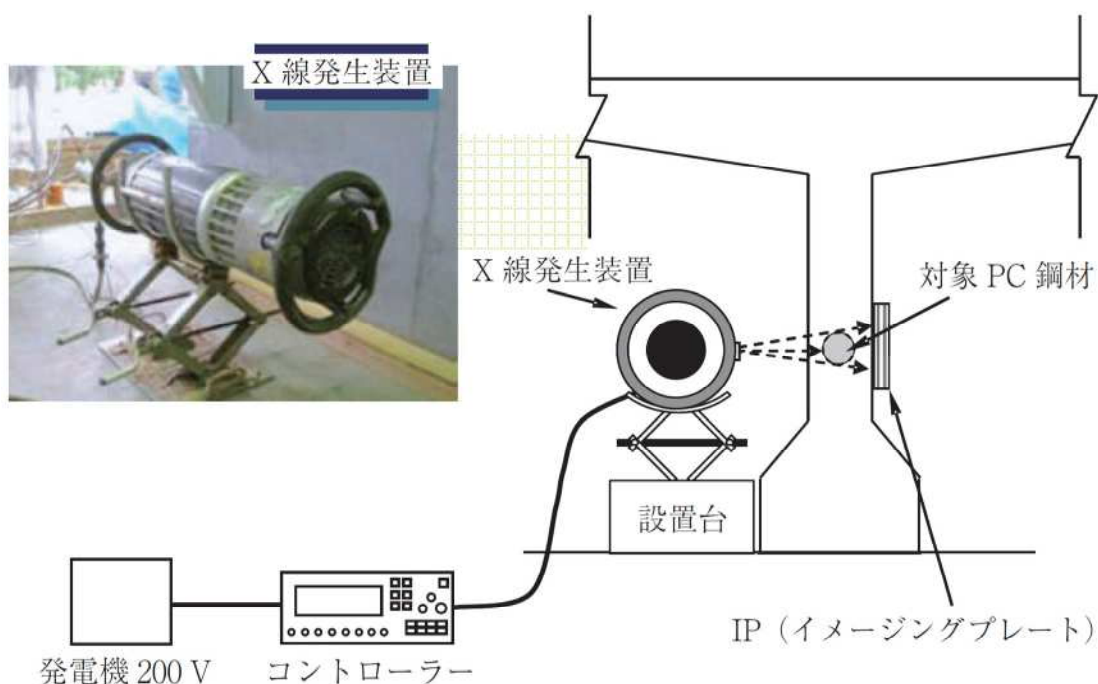
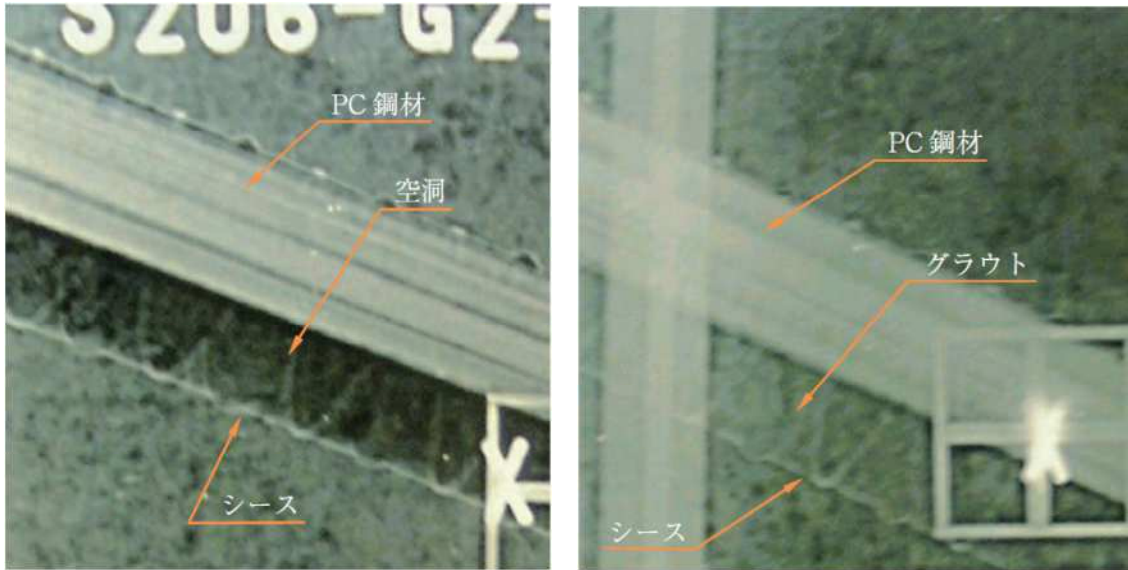


図 2-1 放射線透過法概要

[真鍋ら, 2011]



(a) シース内にグラウトが充填されている場合 (b) シース内にグラウトが未充填の場合

写真 2-1 放射線透過法による撮影事例

[真鍋ら, 2011]

放射線透過法は原理上、対象とする部材の両側に作業スペースを必要とする。また、放射線を用いるためエックス線作業主任者の配置が義務付けられ、立ち入り禁止区域の確保など安全管理が必要となる。

X線は一般的にX線源が300keV程度までのX線発生装置が用いられ、撮影可能なコンクリート部材厚は500mm程度とされている。しかし、コンクリート部材厚が大きくなるにつれX線照射時間も長くなり、画像の鮮明さが減少することにより測定精度が低下するため、一般的には300mm程度までを対象とする場合が多い。また、一般にX線照射時間は、部材厚200mm以下のものでは5分未満であるが、部材厚が500mmのものでは120分程度必要となる。

上坂ら [2015] は可搬型の 950keV, 3.95MeV の高出力 X 線源を開発した。一般的な 300keV の X 線発生装置では部材厚 400mm の撮影に 1 時間程度要していたものが, 3.95MeV では約 1 秒と撮影時間が大幅に短縮した。これにより実験室レベルではあるが, 360 度 CT スキャンにより厚さ 400mm ある PCT 桁下フランジに配されているシース内の空洞や, PC 鋼材の可視化に成功した。



(a) 切り出し PC 部材断面写真



(b) 2次元断層図

写真 2-2 3.95MeV X 線源による T 桁下フランジの 3 次元 CT 結果

[上坂ら, 2015]

## 2.2 打音振動法

打音振動法は PC 鋼材定着部近傍をハンマー等により打撃して弾性波を入力し、反対側の定着部近傍で AE センサー等を用いて弾性波を受信する手法である。打撃側でも入力波（トリガ波）を受信することで、入力信号と出力信号の起生時刻の差により弾性波伝播速度を求める。PC グラウトが充填されている場合、PC グラウトによる拘束で PC 鋼材を伝播する弾性波は減衰し、受信波は主にコンクリートを経由してきたものとなる。一方、PC グラウト充填不良の場合は PC 鋼材を拘束するものがないため、入力波は PC 鋼材を経由して受信センサーに到達する。このとき、PC 鋼材の弾性波伝播速度は約 6000m/s、コンクリートの弾性波伝播速度は約 4000m/s と約 1.5 倍の差がある。そこで、得られた弾性波伝播速度が概ね 5000m/s 以上であれば未充填、概ね 4000m/s 以下であれば充填と判定する。

打音振動法は、PC 鋼材が直線的に配置されており、PC 鋼材両端部にアクセスできるものにのみ適用される。そのため主ケーブルへの適用は困難であり、主に床版、横桁に配されている横締めケーブルにのみ用いられている。

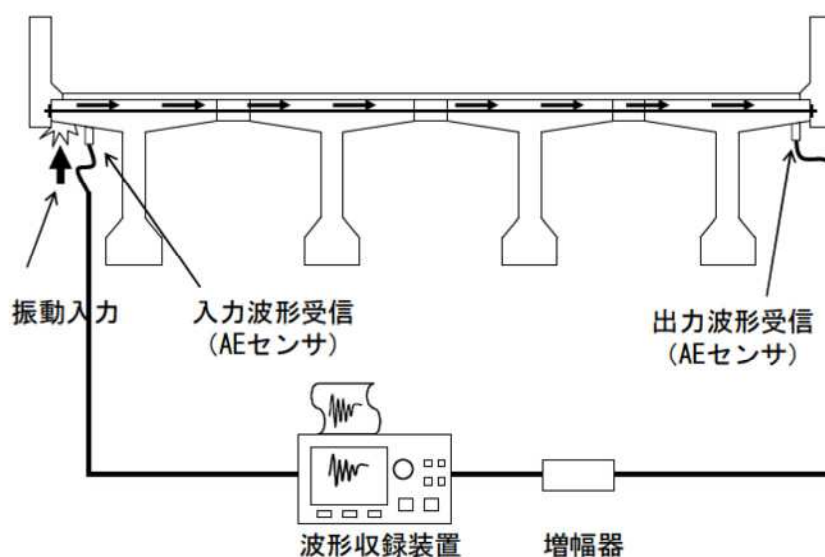


図 2-2 打音振動法の測定概要図

[真鍋ら, 2011]

葛目ら [2012] は入力波形と出力波形を比較して得られる伝播エネルギーの減衰程度が、PC グラウト充填状況の影響を受けることを動的 FEM 解析により示した。PC 鋼材は均質であるため伝播エネルギーの減衰が少ない。これより、PC グラウトが充填不良の場合は、PC 鋼材中を弾性波が伝播し出力波形は比較的大きくなる。一方、PC グラウトが充填されている場合は PC 鋼材、PC グラウト、コンクリートが一体となった複合材料を伝播するとみなせるため弾性波のエネルギーは減衰が大きくなる。

また、弾性波伝搬速度と入出力比との関係を用いた評価により、ある程度の精度をもって PC グラウト充填状況の判定が可能であることを明らかにした。

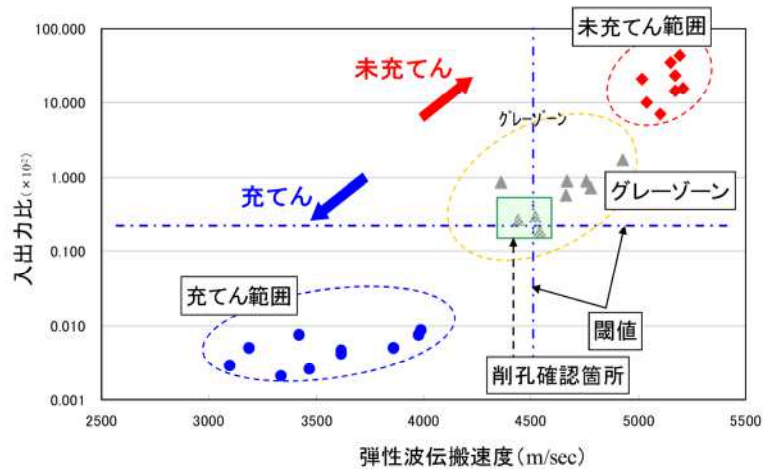
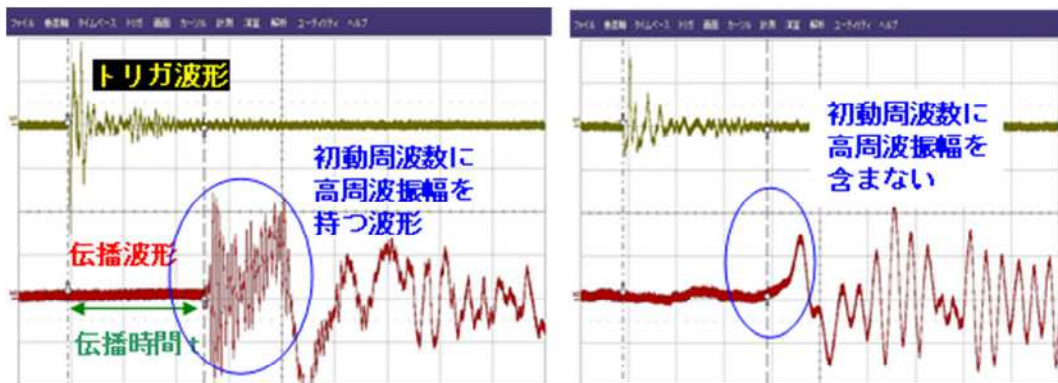


図 2-3 入出力比，弾性波伝搬速度，グラウト充てんの関係

[葛目ら，2012]

永田ら [2014] は鋼板と接触媒質を介した打撃により、15kHz 程度の高周波成分を含んだ弾性波を入力し、受信波初動部の高周波成分の有無で PC グラウト充填状況が検知できることを示した。PC 鋼材は均質であるため高周波成分の減衰は少なく、コンクリートは複合材料であるため高周波成分は減衰しやすい特徴をもつ。これらより、PC グラウトが充填不良で PC 鋼材中を弾性波が伝播した場合は、受信波初動部に高周波成分が観測される。また、PC グラウトが充填されており PC 鋼材が拘束されている場合は、PC 鋼材を伝播する弾性波は減衰するため、受信波に高周波成分は観測されない。



(a) PC グラウト充填不良時の観測波形例 (b) PC グラウト充填時の観測波形例

図 2-4 観測波形例

[永田ら，2014] 一部改変

## 2.3 広帯域超音波法

広帯域超音波法は、シーす直上のコンクリート面に接触媒質を介して探触子を配置し、発信探触子から概ね0~1000kHzの幅広い周波数帯域の弾性波を入力し、受信探触子でシーすからの反射波を受信し、その周波数特性の差によりPCグラウトの充填状況を判定する手法である。

弾性波は異なる物質の界面で反射する特性があり、空洞が存在すると、そこでほぼ全反射して大きな反射波が発生する。一方、シーす内がPCグラウトで充填され密実であると、一部はシーす内を透過するため反射波は小さくなる。シーす反射波は指向性が高いため高周波成分が支配的である。充填不足の場合は受信波中の高周波成分が卓越し、充填シーすの場合は探触子間を直接伝播する指向性の低い直接波が支配的となるため低周波成分が卓越する。

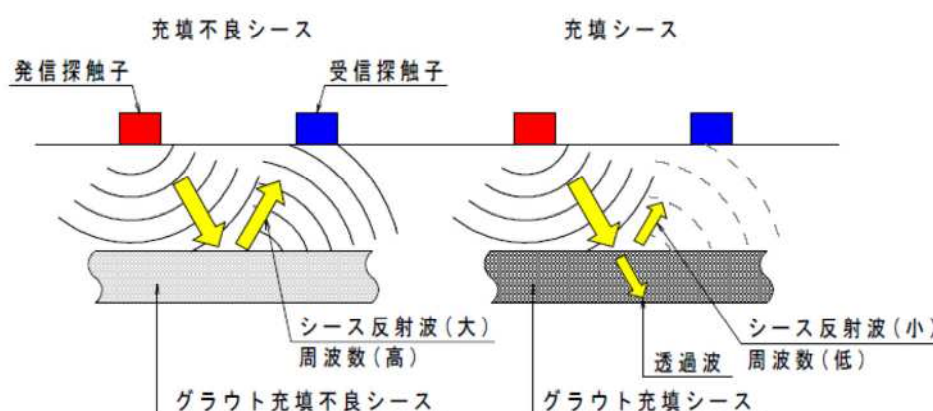
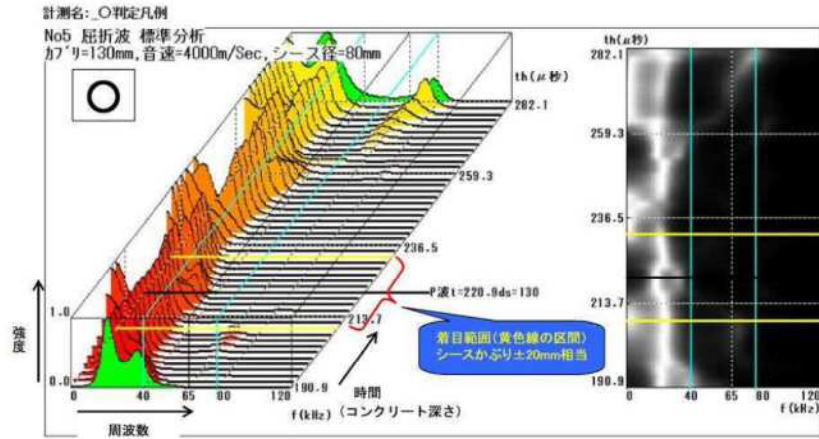


図 2-5 超音波伝播模式図

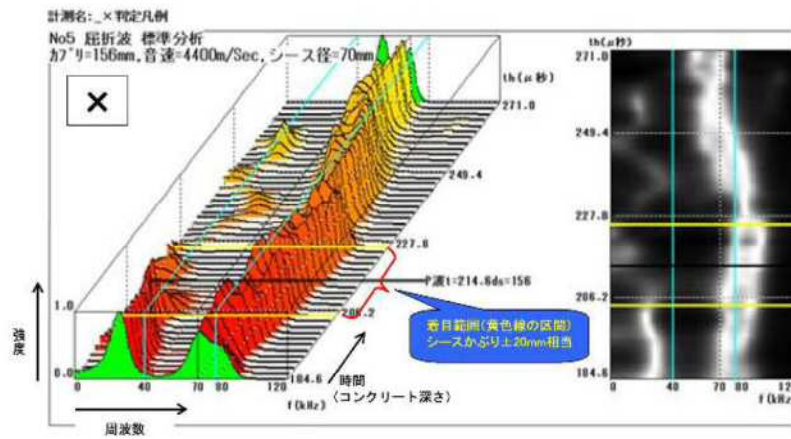
[濱岡ら, 2014]

PCグラウト充填状況の評価は、卓越周波数のパターンにより行う。短時間フーリエ変換を実施してシース反射波起生相当時刻近傍のランニングスペクトルを得る。PCグラウト充填不足の場合は、充填されている場合と比べて高い周波数帯域でスペクトルピークが生じる。このパターンの差異によりPCグラウトの充填判定を行う。





(a) 充填 (○) 判定の例



(b) 充填不足 (×) の例

図 2-6 広帯域超音波の解析結果例

[プレストレストコンクリート工学会, 2016]

福島ら [2020] は、シース反射波のみのスペクトルピークで PC グラウトの充填状況が判別できない場合、部材端面反射波のスペクトルピークを解析対象に追加することで、PC グラウト充填状況が判別できる場合があることを示した。

また福島 [2021] によると、WUT 探触子から発せられる弾性波が同心円状に拡散されることを前提とし、探触子間隔をシースかぶり深さの 2 倍としたときに PC グラウトの有無でシース反射波のピークスペクトルに差異が生じることを、供試体と実構造物での計測で示した。本研究を以降、「先行研究」とする。

## 2.4 インパクトエコー法

インパクトエコー法は鋼球等の打撃により弾性波を入力し、打撃位置近傍において変位センサーを用いて受信波を記録し、その周波数特性により PC グラウトの充填状況を調査する手法である。コンクリート表面より入力された弾性波は、コンクリート内部の境界面において反射し、コンクリート表面-コンクリート内部の境界面間を往復する定常的な波が生じる（縦波共振現象）。インパクトエコー法は、この現象を利用して受信波の周波数成分、すなわちスペクトルピーク周波数より反射源の深さを特定する。このとき、PC グラウトが充填されている場合は、部材厚に関連するピーク周波数のみ確認できる、一方、PC グラウトが充填不良の場合は部材厚に加えてシースかぶり厚に関連するピーク周波数も確認できる。

インパクトエコー法は、シース径が小さな場合や、かぶりが大きき場合、あるいは極端に小さな場合は検出精度が劣る。川嶋ら [2005] によると [空隙の大きさ] / [空隙までの深さ] が 0.25 程度（シース径の 4 倍程度の深さ）まで適用できるといわれている。

また、インパクトエコー法は原則として平板上の部材を対象としているため、部材の形状や PC ケーブルの配置状況などによっては適用できない場合がある。

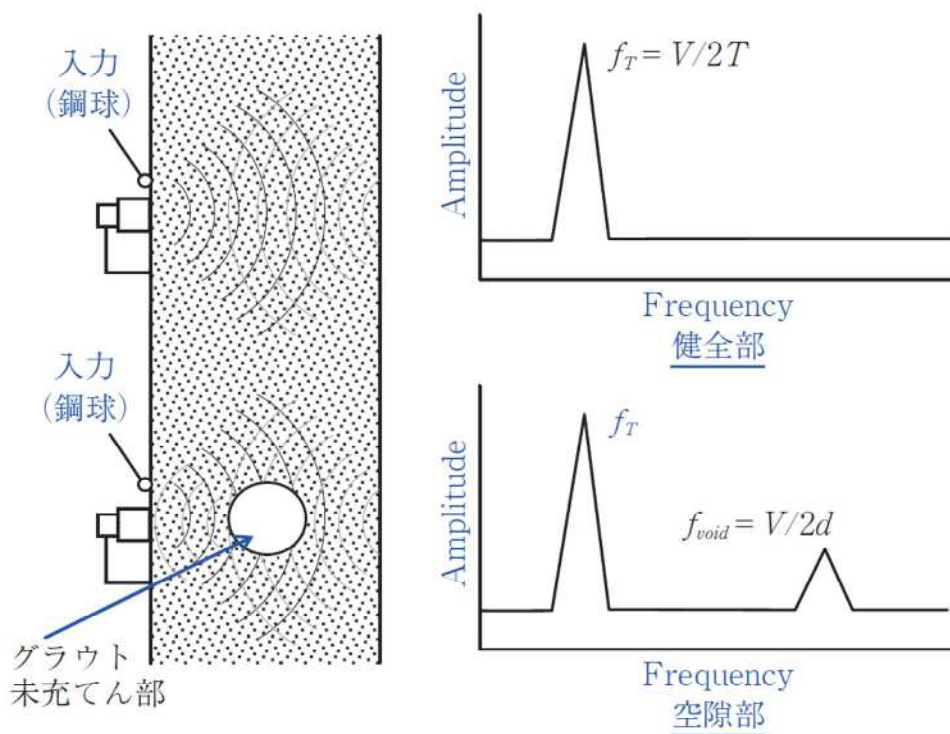


図 2-7 インパクトエコー法概要図

[真鍋ら, 2011]

インパクトエコー法では一般的に周波数解析に FFT を用いる。鎌田ら [2006] は、周波数解析に Multitaper Method (MTM) を適用させることで、空隙に起因する周波数ピークの識別精度を上昇（測定精度の向上）させられることを示した。

大津ら [2009] はインパクトエコー法で得られる周波数スペクトルが図 2-7 に示すような単純な形ではなくピーク周波数が複数あることより、検出波形の周波数スペクトルを用いて調査断面を画像化する SIBIE (Stack Imaging of spectral amplitudes Based on Impact Echo) 法を提案した。弾性波の入力には、鋼球より大きな衝撃力を与えられ再現性のある、アルミ飛翔体をコンプレッサから空気圧（約 0.05MPa）で射出する手法を用いている。鋼製または PE いずれの材質のシースを有する供試体においても、SIBIE 解析によれば PC グラウトが充填不足時にシース管上部のみ強い反射が現れ、充填されているとシース管による顕著な反射波は観測されないことを示した。

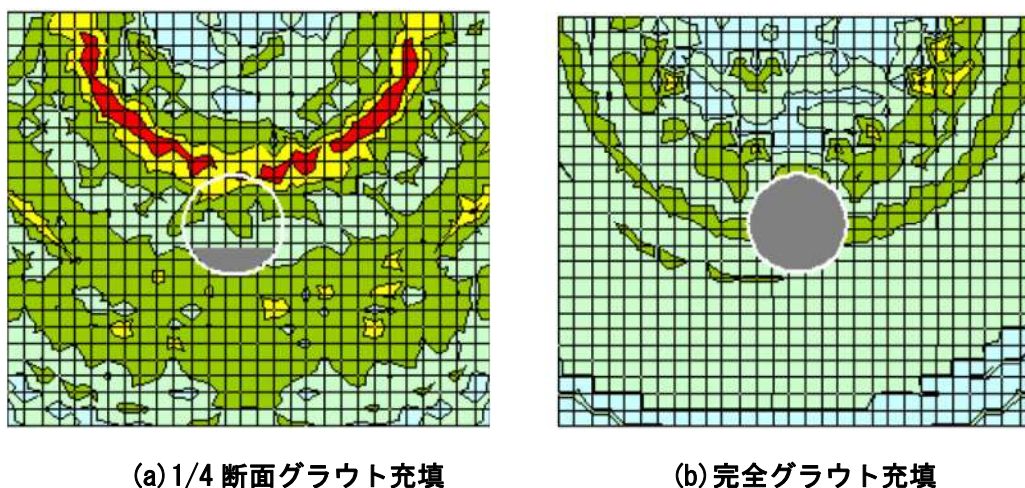


図 2-8 SIBIE 法による PC グラウト充填調査例

[大津ら, 2009]

山下ら [2017] は、インパクトエコー法が主として板状の構造物を対象としているのに対して、金属棒のプランジャーを介した鋼球打撃によりトーンバースト波状の信号を入力し、受信波の位相変動をヒルベルト変換により検出する手法で、断面形状が複雑な T 桁下フランジに配されているシース内の PC グラウト充填不良を検知できることを示した。

## 2.5 その他の非破壊検査手法

### (1) 電磁パルス法

角田ら [2010] は、パルス状の電磁力をコンクリート表面から非接触で入力し、励磁コイル直下の鋼製シースを振動させ、AE センサーで振動により生じる弾性波を受信する手法を提案した。PC 鋼棒を有する供試体において、PC グラウトが未充填の場合、鋼製シースは拘束されないため与えられた電磁力により振動するが、充填されているとシースが拘束されて振動は小さくなる。このとき、受信センサーで得られた受信波の最大振幅値において PC グラウトの有無により差異が生じることを示した。

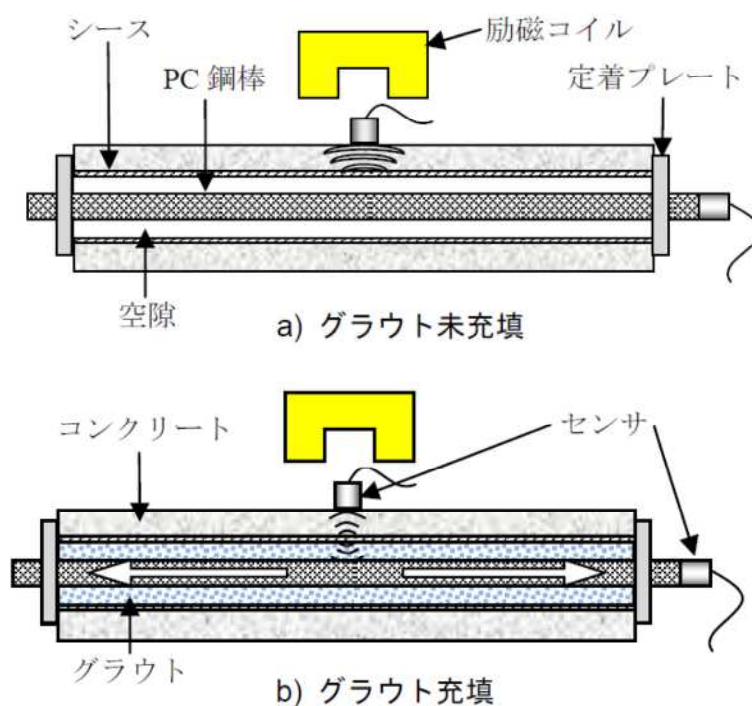


図 2-9 電磁パルス法概要図

[角田ら, 2010]

鎌田ら [2012] は、同手法を PCT 桁橋の床版横締めケーブルに適用し、実構造物においても PC グラウトの充填状況評価手法として有効であることを示した。

また、李ら [2013] はシースカぶり電磁パルス法の測定結果に与える影響を動磁場および弾性波動解析を用いて検討し、PC グラウト充填状況の評価が可能なシースカぶりは 200mm 程度までであることを明らかにした。

## (2) トモグラフィー法

トモグラフィー法とは計測対象を囲むように多数のセンサーを配置し、多数かつ多方向の走査線情報の全てに整合する有限要素モデルで表す手法である。Osawa ら [2014] はセンサー間の弾性波到達時刻より速度トモグラフィーを求め、弾性波伝播速度の情報によりシース内のグラウト充填状況の検知を提案した。PC 鋼棒を有する供試体において、シース内が空洞であると受信波経路はシースを迂回するため弾性波伝播速度は低下し、シース内が充填されていると受信波経路はシース内を伝播するため弾性波伝播速度に変化はみられない。

桃木ら [2014] は、受信点と発信点の卓越周波数のパワースペクトル密度 (PSD) の比率を減衰率とし、減衰トモグラフィーを求めることで、速度トモグラフィーより明確にシース内のグラウト充填状況を評価できることを示した。

また、大野ら [2016] は現場への適用性を考慮して、入力方法を簡易な鋼球打撃とし、受信点と発信点の受信波初動部の振幅値の比を用いる振幅トモグラフィーにより、シース内のグラウト充填状況を評価できることを示した。

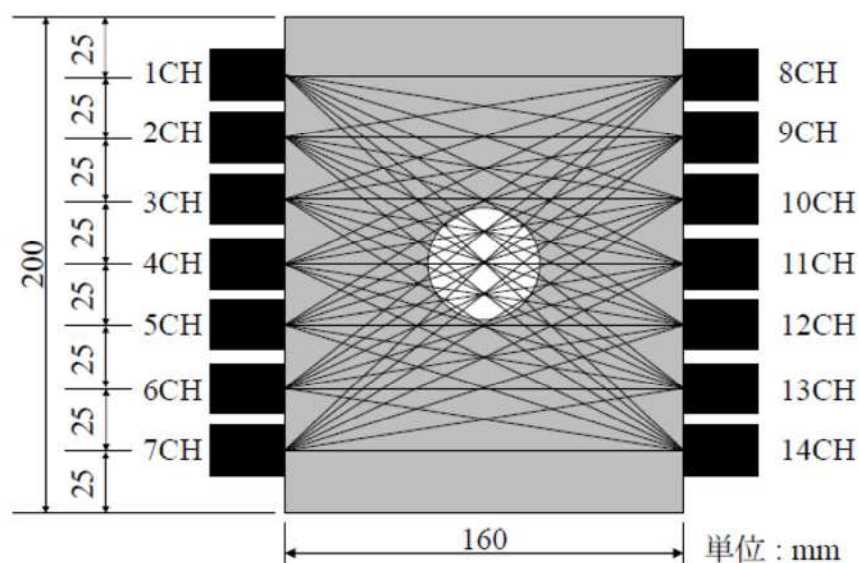


図 2-10 トモグラフィー法 測定概要図

[大野ら, 2016]

### (3) 超音波法

超音波法においては、接触媒質を必要とせず、せん断波を発生する DPC (Dry Point Contact) 探触子を有する探査装置を用いた研究が、海外で近年主流となっている。DPC 探触子を用いた探査装置の代表例として A1040 MIRA を以下に示す。



(a) A1040 MIRA 外観

(b) A1040 MIRA 底面のセンサー配置状況

図 2-11 A1040 MIRA

[Acoustic Control Systems 社フライヤー, 2012]

A1040 MIRA のセンサーは、 $4 \times 12$ CH (48 個) の素子を有するマトリクスアンテナアレイである。各素子はスプリングを装着しているため、10mm 程度の凹凸や段差があっても探査面に密着する。センサーは、1CH から送信し 2~12CH で受信した後、2CH から送信し 3~12CH で受信し、順次送受信チャンネルを切り替えながら計 66 通りの信号を受信する。各チャンネルは 4 個の素子があるため、送受信の組み合わせより 1056 ( $66 \times 4 \times 4$ ) 通りの路程信号を受信する。その後、これらの路程信号を 3D-SAFT (Synthetic Aperture Focusing Technique) 処理し、探査面内部を 3D 画像化する。なお、画像化に要する時間は 1~2 秒程度である。

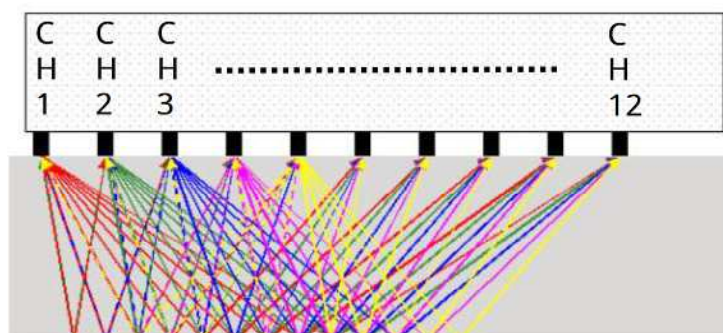


図 2-12 各チャンネルの送受信状況イメージ図

[Acoustic Control Systems 社フライヤー, 2012] 一部加筆

MAYER ら [2006] は、せん断波を発生する DPC 探触子を用いて計測し、得られたデータを 3D-SAFT または 3D-FT-SAFT (Fourier-Transform SAFT) 解析を実施した場合、供試体および実構造物においてグラウトの有無によりシーす反射波の位相に差異があることを示した。位相は受信波の包絡線より振幅が最大となる時刻において、卓越周波数におけるフーリエ変換結果により求めた。

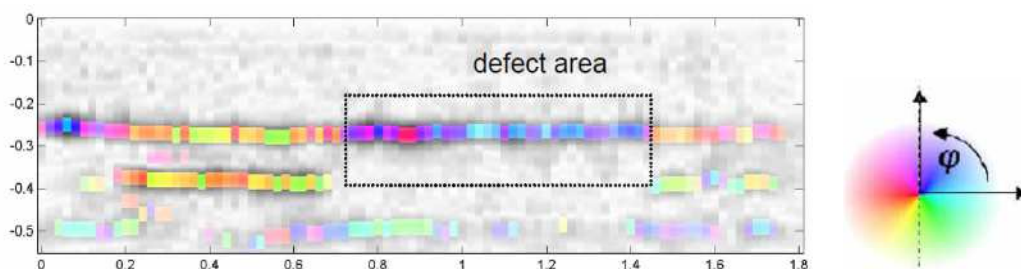


図 2-13 位相解析によるグラウト検知状況

[MAYER ら, 2006]

また、KRISCHER ら [2022] は、デジタルツインを用いた超音波伝播の 3 次元シミュレーションを実施し、全波形逆解析により 13 個のリニアアレイ DPC 探触子を有する超音波装置によりせん断波を入出力した場合、鉄筋を有する供試体においてシーす内の空洞を密度モデルとして画像化できることを示した。

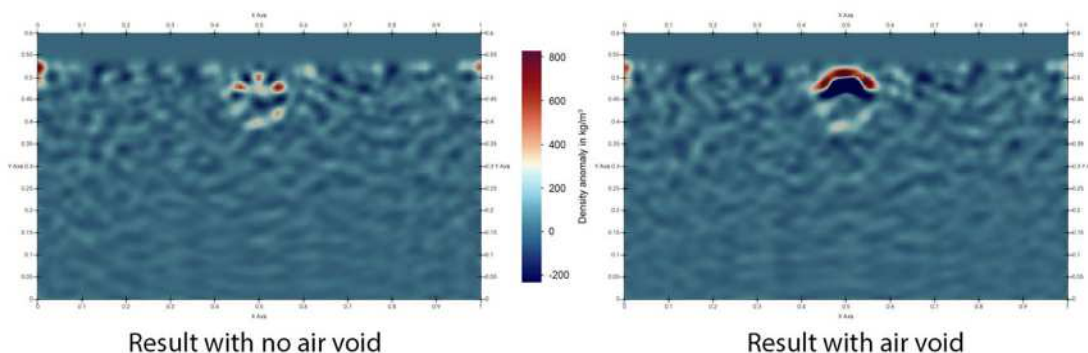


図 2-14 デジタルツインを用いた全波形逆解析によるシーす内空洞を表す密度モデル

[KRISCHER ら, 2022]

## 第 2 章の参考文献

- Acoustic Control Systems: A1040 MIRA Advertising flyer, 2012
- Lion KRISCHER, Elmar STROBACH, Christian BOEHM, Michael AFANASIEV, Ueli ANGST: Full-waveform inversion of ultrasonic echo signals to evaluate grouting quality of tendon ducts in post-tensioned concrete structures, *The International Symposium on Nondestructive Testing in Civil Engineering*, Zurich, Switzerland, August 16-18, 2022.
- Klaus MAYER, Karl-Jörg LANGENBERG, Martin KRAUSE, Christiane MAIERHOFER, Boris MILMANN, Christoph KOHL: Characterization of Ultrasonic and Radar Reflector Types in Concrete by Phase Evaluation of the Signal and the Reconstructed Image, *ECNDT*, Berlin, Germany, September 25-29, 2006.
- Satoshi OSAWA, Tomoki SHIOTANI, Hisato KITORA, Yoshiyuki MOMIYAMA : Damage Visualization of Imperfectly-Grouted Sheath in PC Structures, *31<sup>st</sup> Conference of the European Working Group on Acoustic Emission*, Dresden, Germany, September 3-5, 2014.
- 上坂 充, 橋本英子, 土橋克広, 藤原 健, 草野譲一, 大矢清司, 三浦 到, 大島義信, 石田雅博: 可搬型 950 keV/3.95 MeV X バンド電子ライナック X 線源による産業 / 社会インフラ診断「加速器」Vol. 12, No. 3, pp.142-151, 2015.
- 大津政康, 中居陽子, 大久保太郎, 松山公年: 弾性波法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.
- 大野健太郎, 西村桂一, 上野 敦, 宇治公隆: PC グラウト未充填部検出のための弾性波初動部における考察, 第 25 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.99-104, 2016.
- 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.



- 鎌田敏郎, 内田慎哉, 角田 蛍, 佐藤浩二: 実橋梁 PC 桁での非破壊試験による PC グラウト充填評価方法に関する研究, 土木学会論文集 E, Vol.68, No.4, pp.238-250, 2012.
- 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.
- 葛目和宏, 真鍋英規, 薮 直樹, 伊藤博幸, 宮川豊章: 衝撃弾性波法を用いた PC グラウト充てん度評価に関する考察, 第 12 回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, pp.349-356, 2012.
- 角田 蛍, 内田慎哉, 鎌田敏郎, 宗像晃太郎: 電磁パルス法に基づく PC グラウト充填評価手法の妥当性検証への同時場解析および衝撃応答解析の適用, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.1, pp.1691-1696, 2010.
- 永田佳文, 白鳥 明, 伊藤武文, 植木 博: 衝撃弾性波法による PC 橋の横締めグラウト充填診断手法の開発, コンクリート工学, Vol.25, pp.57-64, 2014.
- 濱岡弘二, 青木圭一, 原 幹夫, 木下尚宜: 広帯域超音波法を用いた PC グラウトの充填調査, プレストレストコンクリート, Vol.56, No.6, 2014.
- 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, Vol.76, No.4 pp.283-292, 2020.
- 福島邦治: 広帯域超音波法 (WUT) を用いた PC グラウト充填調査の適用性と精度向上に関する研究, 山口大学大学院創成科学研究科博士論文, 2021.
- プレストレストコンクリート建設業協会: PC グラウト施工マニュアル, 1996.

- プレストレストコンクリート建設業協会：PC 技術の変遷，2003.
- プレストレストコンクリート建設業協会：PC 構造物の維持保全-PC 橋のさらなる予防保全に向けて-，2015.
- 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 鋼材調査および補修・補強指針，2016.
- 真鍋英規，葛目和宏，鎌田敏郎，木村嘉富：非破壊調査技術を用いた PC グラウト充填度の評価，コンクリート工学，Vol.49，No.6，2011.
- 桃木昌平，塩谷智基，小林義和：弾性波トモグラフィ法による PC 構造物の健全性評価に関する研究，第 23 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.461-466，2014.
- 山下健太郎，手塚正道：表面波と反射波の干渉を利用した PC グラウトの充填不足非破壊検査手法，第 26 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.643-646，2017.
- 李 興洙，内田慎哉，鎌田敏郎：動磁場・弾性波動解析による PC グラウト充填率およびシースカぶりの違いが電磁パルス法で測定される最大振幅値に与える影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.35，No.1，pp.1897-1902，2013.

# 第3章 WUT 探触子から発せられる弾性波の挙動について の検討

## 3.1 はじめに

弾性波を用いた非破壊検査の研究を実施するには、入射する弾性波の諸特性、例えば周波数特性や指向特性を十分に把握したうえで検討を進める必要がある。現在 WUT による PC グラウト調査は、経験則に基づいて構築されており、基礎検討が十分といえない。また、先行研究 [福島, 2021] においても、WUT 探触子から弾性波が同心円状に発せられるという仮定のもとに行われている。

そこで本章においては、WUT 探触子から発せられる弾性波の挙動を明らかにするための検討を行った。本章の構成を以下に示す。

3.2 においては、本研究で用いる計測システムの特徴を示し、入射する弾性波の周波数特性についての検討を行った。

3.3 においては、探触子間隔をシースかぶり深さの 2 倍とする先行研究を検証するため、三角柱状の供試体を用いた検討を行った。

3.4 においては、前項の検討では WUT 探触子から発せられる弾性波の指向特性を十分に評価できなかったため、正確な弾性波の指向特性を評価することを目的として半円柱状の供試体を用いた検討を行った。

3.5 においては、探触子間隔を変え、さらにコンクリート供試体に切り込みを入れながら計測することで、コンクリート中を伝播するシース反射波の経路、探触子間隔がシース反射波に及ぼす影響や、探触子間のコンクリート表面を伝播する表面波が受信波に及ぼす影響について検討を行った。

以上の検討結果を踏まえて PC グラウト充填調査に適した探触子の配置間隔を決定した。

## 3.2 本研究で用いる計測システム

### 3.2.1 概要

ここでは、本研究に用いる広帯域超音波法 (WUT) 計測システムの概要について述べる。また、WUT では直径約 100mm と大型の探触子を用いるため、一部の検討では受信探触子が設置できず、代わりに受信側にレーザードップラー振動計 (Laser Doppler Vibrometer: LDV) を用いた。WUT 探触子を発信側に、LDV を受信側に用いた計測システムの概要についても述べる。さらに LDV を用いて WUT 探触子から発せられる弾性波の周波数特性についての検討も行った。

### 3.2.2 計測システム

本研究で用いた WUT 計測システムを写真 3-1 に示す。WUT は、一対の発信子と受信子を有する二探触子法を採用している。探触子は、ジルコン酸チタン酸鉛 (PZT) 系のセラミック製の圧電素子が使用されており、圧電効果により発信探触子では印加電圧を振動に、受信探触子では振動を電圧に変換している。発信波は公称 500kHz を中心周波数とする広帯域のパルス波である。圧電素子は雑音の低減を目的とし  $\phi 76\text{mm}$  と大型のものをを用いた。また、圧電素子後方へ発せられる振動を減衰させることを目的とし、圧電素子の背面にはタンゲステン系の素材で作られたダンパーが設置されている。探触子内部構造の概要を図 3-1 に示す。



写真 3-1 広帯域超音波法 (WUT) 測定システムの外観

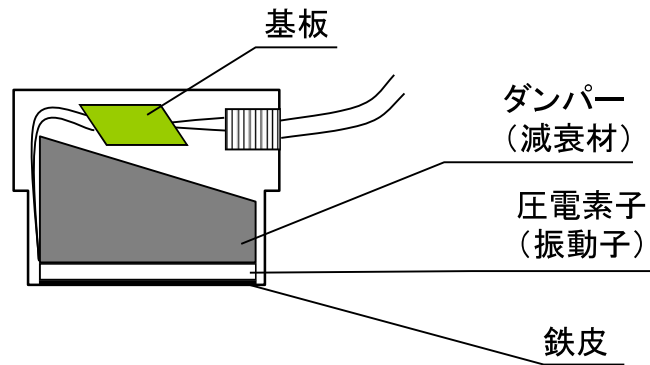


図 3-1 探触子内部構造概略図

発信探触子への電圧の印加は、USB ケーブルを介してノートパソコンに接続された超音波装置にて行った。受信探触子で受信された振動は、圧電素子の圧電効果により電圧に変換された後、超音波装置にて A/D 変換されパソコン上で電圧値として記録される。記録された時刻歴データ（時系列波）は、発信探触子が発信波を発する時刻を 0 としている。データ記録時のサンプリング周波数は 10MHz に、サンプリング数は 16384 ( $=2^{14}$ ) 点に設定されている。これらより受信波に高速フーリエ変換 (FFT) を行った場合、ナイキスト周波数は 5MHz、周波数分解能は  $1/1638.4\text{MHz}$  となる。ナイキスト周波数とは計測された受信波形における高周波側の限界周波数のことで、これより高い周波数の波形は折り返し (エイリアシング) により正確に記録されない [五十嵐, 1968]。本研究では使用した発信探触子の中心周波数の公称が 500kHz のため、MHz オーダーの振動は生じないことより、適切なパラメータ設定と考えられる。

計測の際、受信波の電氣的な雑音低減を目的とし、受信波の加算平均を実施している。計測時の弾性波の発信・受信は 5m 秒間隔で 384 回行われ、全 384 回の受信波を加算平均したものが受信波形として記録される。

広帯域超音波法は、2.5~1000kHz の幅広い帯域の波動を送受信し、受信波より測定対象の成分波が卓越する帯域においてソフト上でフィルタリングできる。そのため、測定対象の反射波を高 SN 比 (シグナル/ノイズ) で捉えられる。また、幅広い帯域の波動を発信しているため、反射波の周波数特性を精度よく捉えられる。現在 WUT によるグラウト充填調査では、反射波の周波数特性により、グラウトの空/充填を判定している。

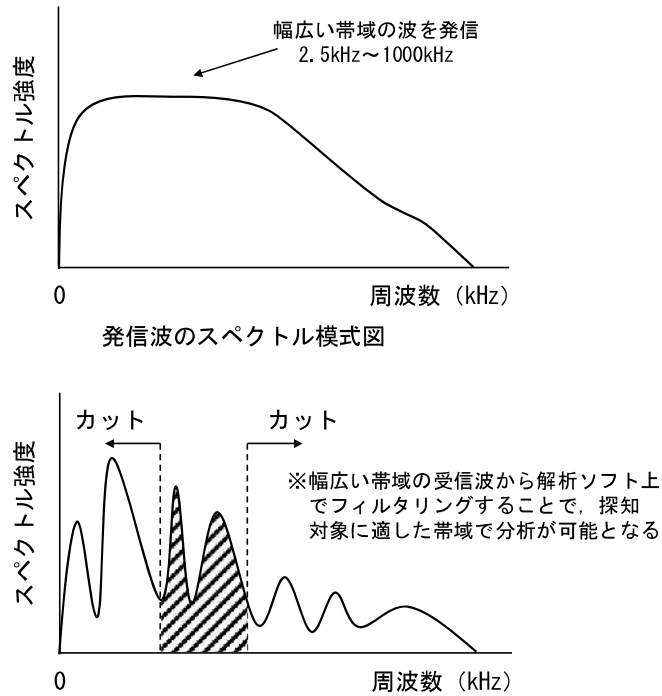


図 3-2 WUT の発信波と、周波数領域における解析模式図

また、一般に超音波法で用いられる振動子径は 10~40mm であるが、本研究においては振動子径  $\phi$ 76mm と大型の探触子を用いた。大型の探触子には、発受信面積が大きくなることで、骨材等からの反射波といった雑音に位相ずれが生じ、位相の異なる雑音が多数足し合わされることにより、雑音が低減して SN 比が向上する効果がある。

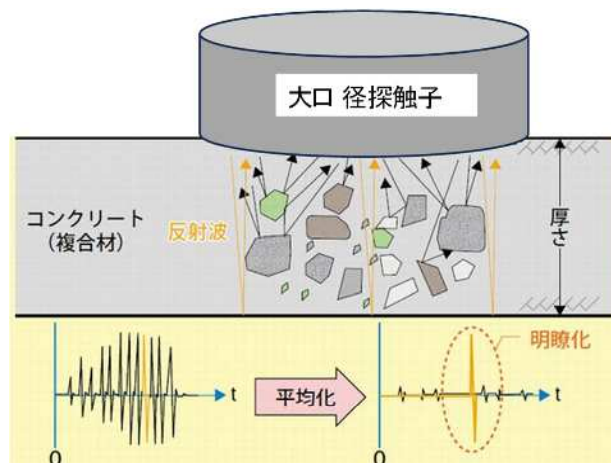


図 3-3 コンクリートにおいて大口径探触子を用いた計測模式図

また測定にあたり、各探触子の表面に水ガラス（ケイ酸ナトリウム）を主成分とした接触媒質を塗布した。表 3-1 に接触媒質の成分表を示す。

表 3-1 接触媒質成分表

水ガラス	SiO <sub>2</sub>	21.0 mass %	52.2 mass %
	Na <sub>2</sub> O	9.89 mass %	
	H <sub>2</sub> O	21.3 mass %	
エチレングリコール			2.99 mass %
グリセリン			14.7 mass %
ジグリセリン			29.9 mass %

WUT による計測手順を図 3-4 に示す。

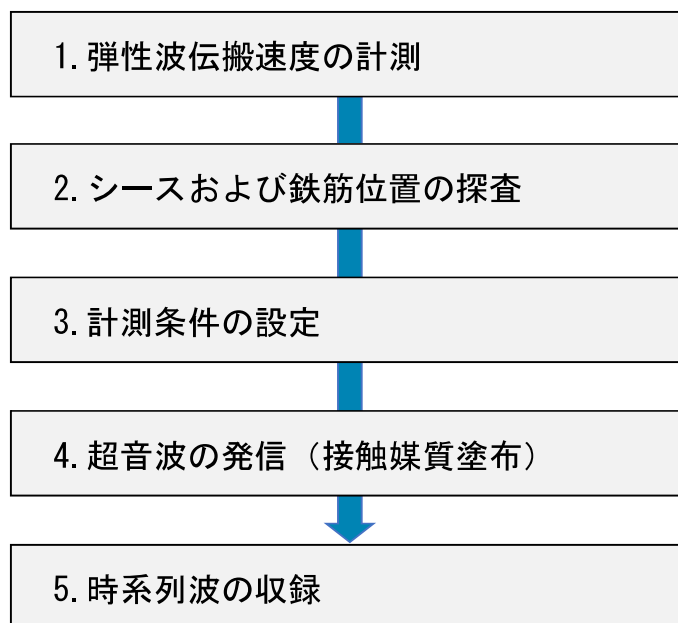


図 3-4 WUT の計測手順

WUTによる計測では、まず測定対象の弾性波伝搬速度を計測する。計測は部材を発・受信探触子で挟み込む透過法を用いた。測定状況を図 3-5 に示す。

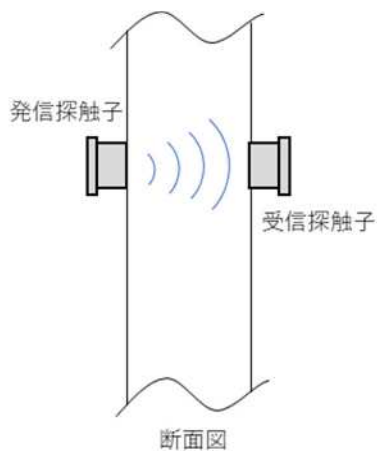


図 3-5 弾性波伝搬速度測定状況

次にシーブと鉄筋の位置を探索する。シーブや鉄筋の材質は鉄であるため、電磁波レーダーによる探索が有効である。電磁波レーダーを2方向に走査し、シーブや鉄筋の位置を探索する。電磁波レーダーの走査状況の模式図を図 3-6 に示す。

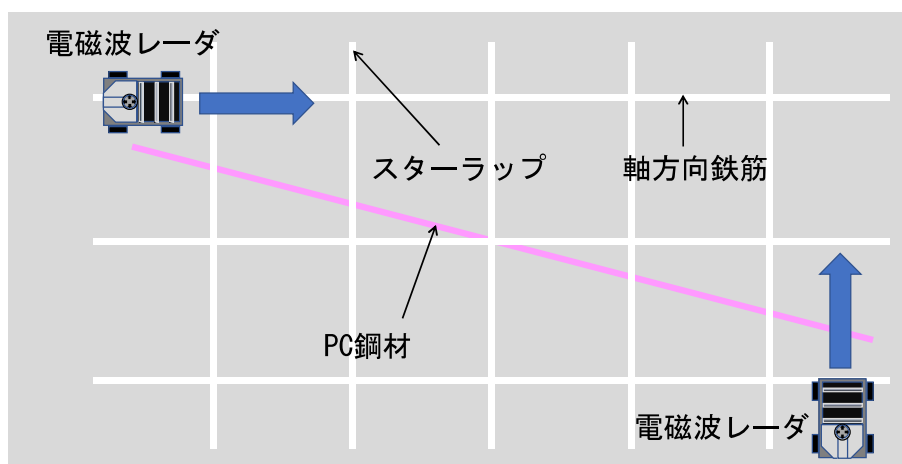


図 3-6 電磁波レーダー走査状況模式図



WUTによる計測では計測条件を設定する必要がある。計測条件は、データ数、サンプリング周波数や加算平均回数などがあり、専用ソフト上で設定する。

計測条件を定めた後、探触子に接触媒質を塗布し、測定対象面に探触子押し当てて計測する。このとき計測された時系列波は専用ソフト上に保存される。

接触媒質の塗布状況を写真 3-2 に、WUT の計測状況を写真 3-3 に示す。



写真 3-2 接触媒質塗布状況



写真 3-3 WUT の計測状況

### 3.2.3 LDV を用いた計測システム

本研究では一部計測の際、受信側に LDV を用いた。LDV の測定原理を以下に示す。

LDV とは、センサーヘッドからレーザー光を振動物体に照射し、振動物体から反射されたレーザー光（ドップラーシフトしたレーザー光）の周波数変化（速度変化）を電圧に変換（F/V 変換）して振動現象を検出する非接触型の振動速度センサーである。本研究で用いる LDV は光ヘテロダイン方式を採用しており、レーザー光の周波数 474THz に対し 80MHz の周波数シフトを行い、振動速度を検出している。

本研究では、電子技研工業(株)社製の LDV（V100-LM TYPE-N）を用いた。表 3-2 に LDV の仕様を示す。

表 3-2 研究に用いた LDV の仕様

LDV 仕様	
測定周波数範囲	0.5Hz～300kHz
測定速度範囲	0.7μm/s～10m/s
速度レンジ	2(m/s)/V , 0.2(m/s)/V
ローパスフィルタ	300kHz
ハイパスフィルタ	0.5Hz
測定精度	±2% 以内

LDV を用いた計測システムの概要を図 3-8 に示す。発信側に広帯域型超音波探触子を、受信側には LDV を用い、時刻歴波形の記録にはデータ数を 1200 点、サンプリング周波数を 10 MHz、平均化回数 1024 回としたオシロスコープを用いた。オシロスコープは、超音波装置より発信電圧の印加時にトリガ信号を取り出すことで、発信波と同期させた。

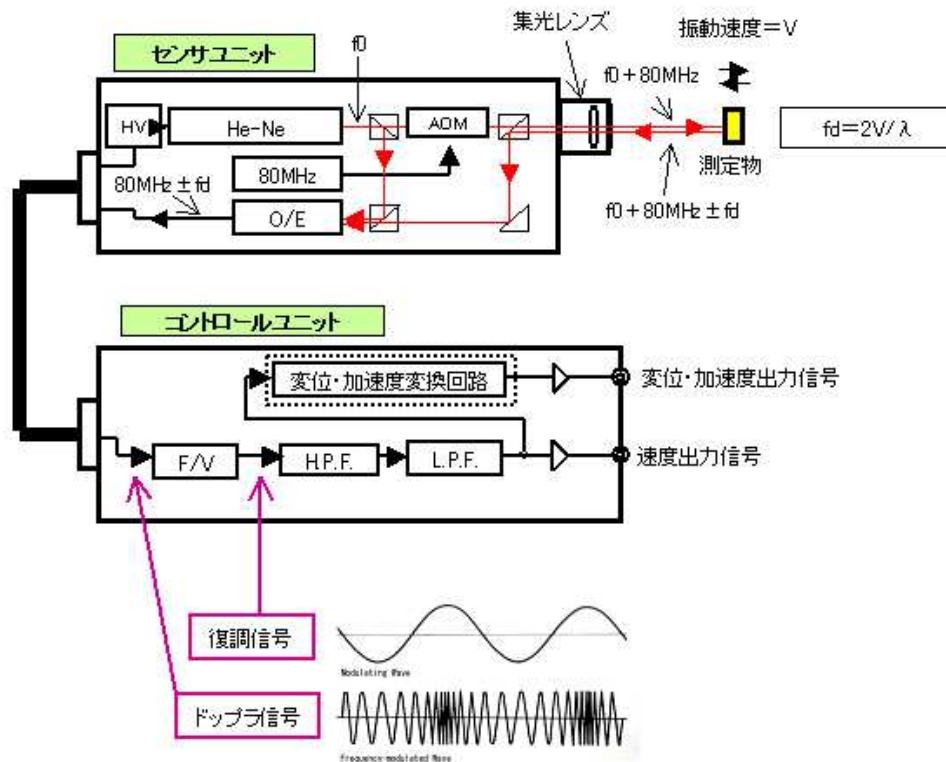


図 3-7 LDV の測定原理概略図

[電子技研工業株式会社, 2023]

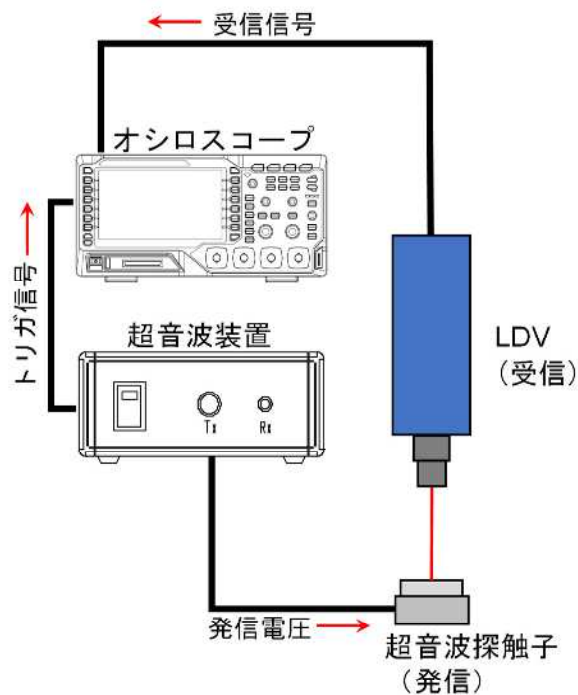


図 3-8 LDV を用いた計測システムの概要

### 3.2.4 入射弾性波周波数特性についての検討

受信波を評価する上で、どのような周波数特性を持つ弾性波が発信探触子から発せられているかを把握することは重要である

計測に際し、WUT 探触子同士を直接対向させて計測すると、塗布した接触媒質内で共振振動が生じることや、受信側探触子も周波数特性を持つことより、入射弾性波の正確な周波数特性の把握は困難となる。そこで、非接触で計測できる LDV を受信子として用いた。

WUT 探触子は公称中心周波数 500kHz であるが、使用した LDV の周波数範囲は 0.5Hz～300kHz である。300 kHz 以上の帯域の弾性波は、コンクリート中では粗骨材等の影響が顕著なため [岩波ら, 1999]、一般にグラウト充填調査に使用されない。そのため、本検討では評価する周波数範囲を 300kHz 以下の帯域に限定した。

図 3-8 に示すように発信探触子の中央に LDV を照射し、発信波を直接計測した。発信波の時刻歴波形を図 3-9 に示す。

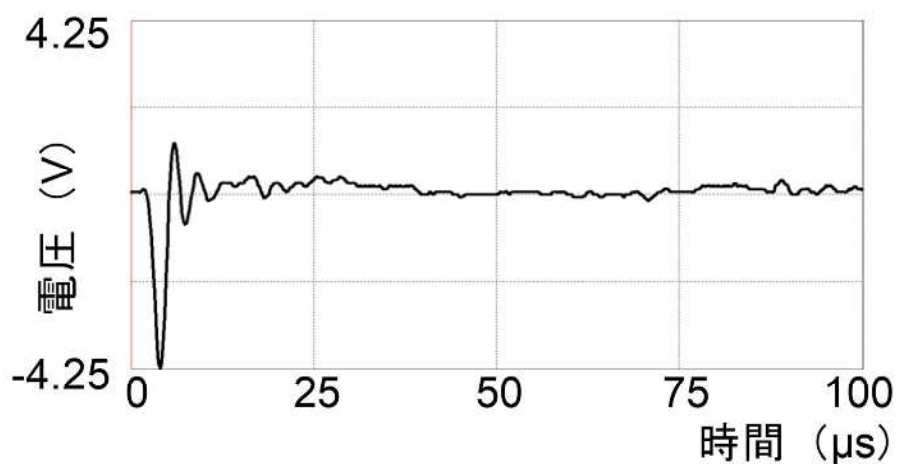


図 3-9 発信波の時刻歴波形

図 3-9 に示す時系列図の起点 ( $0 \mu\text{s}$ ) は、発信探触子に電圧が印加される際に発せられるトリガ信号をとらえた時刻とした。図 3-9 によると発信波は、マイナス方向に電圧値が卓越し、その後減衰しているため、半波長の弾性波と推定できる。

発信波の初動部分を図 3-10 に示す台形状の窓関数を用いて抽出し、FFT スペクトルを求めた結果を図 3-11 に示す。FFT の実行条件は、データ数 1024 ポイント、サンプリング時間間隔  $0.1 \mu\text{s}$  とした。

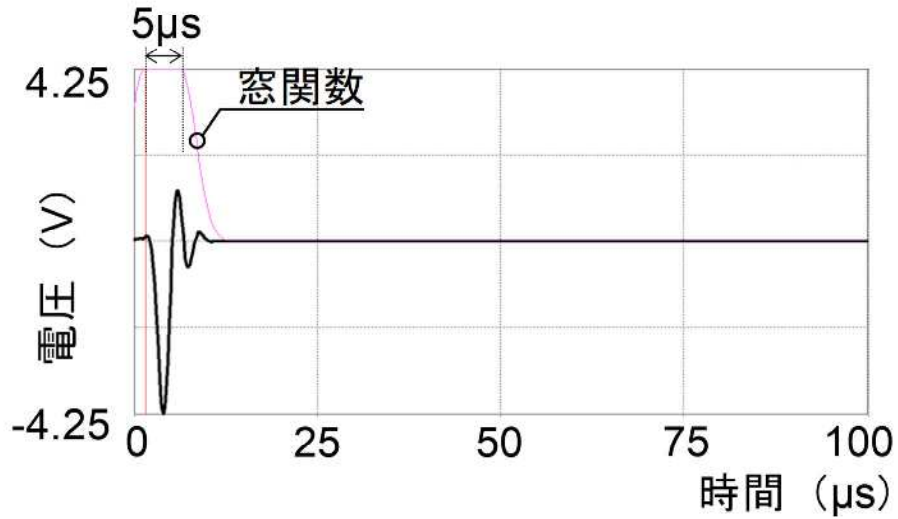


図 3-10 窓関数による発信波の切り出し状況

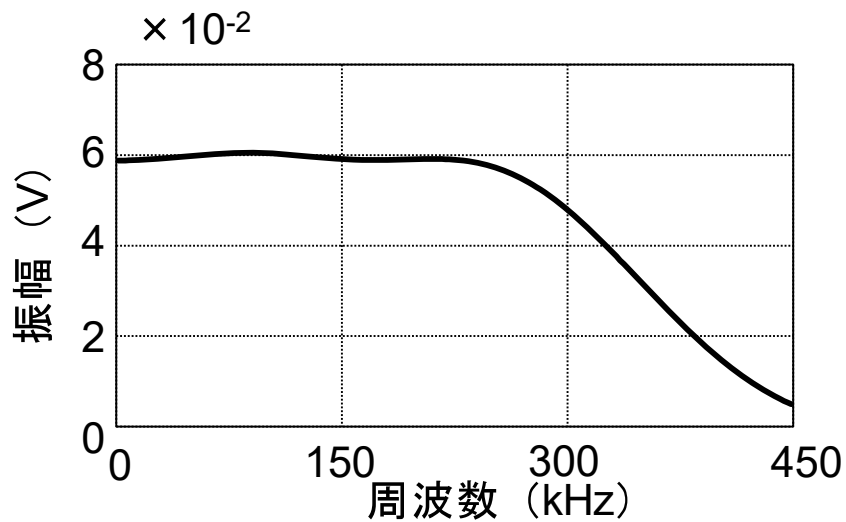


図 3-11 発信波の FFT スペクトル

図 3-11 によると発信波は、240 kHz 以降の帯域では周波数が高くなるにつれて徐々にスペクトル強度が低減するものの、0~240 kHz の帯域では概ね一定のスペクトル強度を示す平坦な周波数特性を有する。

これより発信波の周波数特性は 240kHz 以下において平坦であり、特定の周波数帯域にバイアスがかからないことが示された。

### 3.3 コンクリート中を伝播する弾性波の諸特性に関する基礎的検討

#### 3.3.1 概要

先行研究 [福島, 2021] によると WUT 探触子から発せられる弾性波が同心円状に拡散されることを前提とし, 探触子間隔をシースかぶり深さの 2 倍としたときに PC グラウトの有無でシース反射波のピークスペクトルに差異が生じるとされている. 図 3-12 に示すように, 探触子間隔をシースかぶり深さの 2 倍とし, シース反射波の伝播経路を最短距離と仮定した場合, シース反射波経路は指向角が  $45^\circ$  の直角二等辺三角形となる.

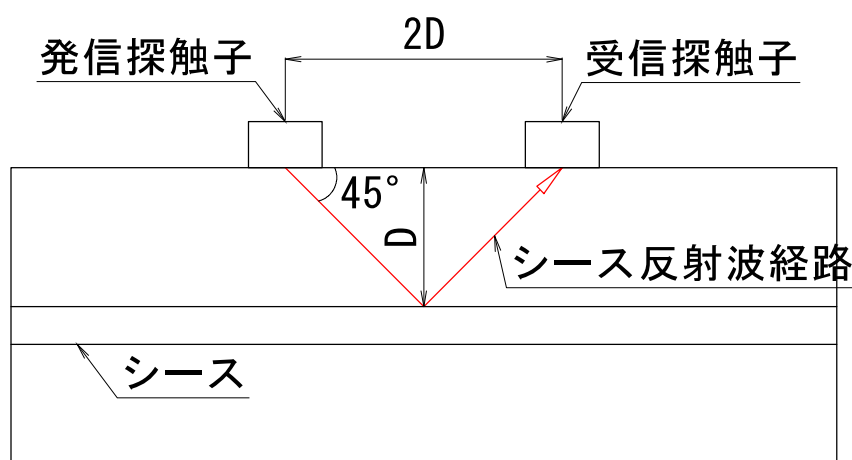


図 3-12 探触子間隔をシースかぶり深さの 2 倍とした場合のシース反射波経路

ここでは, 実際に WUT 探触子から発せられる弾性波は同心円状に拡散されているか, ならびに発信波の指向性がシース反射波経路となる指向角  $45^\circ$  方向に卓越しているかを確認するため, 前述のシース反射波経路を模擬した直角二等辺三角形の断面を有する三角柱状の供試体を用いて検討を行った.

指向性に関する検討において弾性波伝播経路の路程長が異なることより, これを補正するための距離減衰に関する検討を実施した.

次に発信探触子の指向性に関する検討を実施し, 最後に端面反射波の特性に関する検討を実施した.

### 3.3.2 検討に用いた供試体

本研究で用いた三角柱状のコンクリート供試体は、図 3-13 に示す等辺 600 mm の直角二等辺三角形断面を有し、高さ 1000 mm である。コンクリートの配合を表 3-3 に示す。作製したコンクリートには早強ポルトランドセメント、高性能減水剤（I 種）を用いた。骨材の最大寸法は 20 mm、空気量の実測値は 4.2%であった。また、実験時のコンクリートの材齢は 60 日であり、28 日強度は 53.4 N/mm<sup>2</sup>であった。

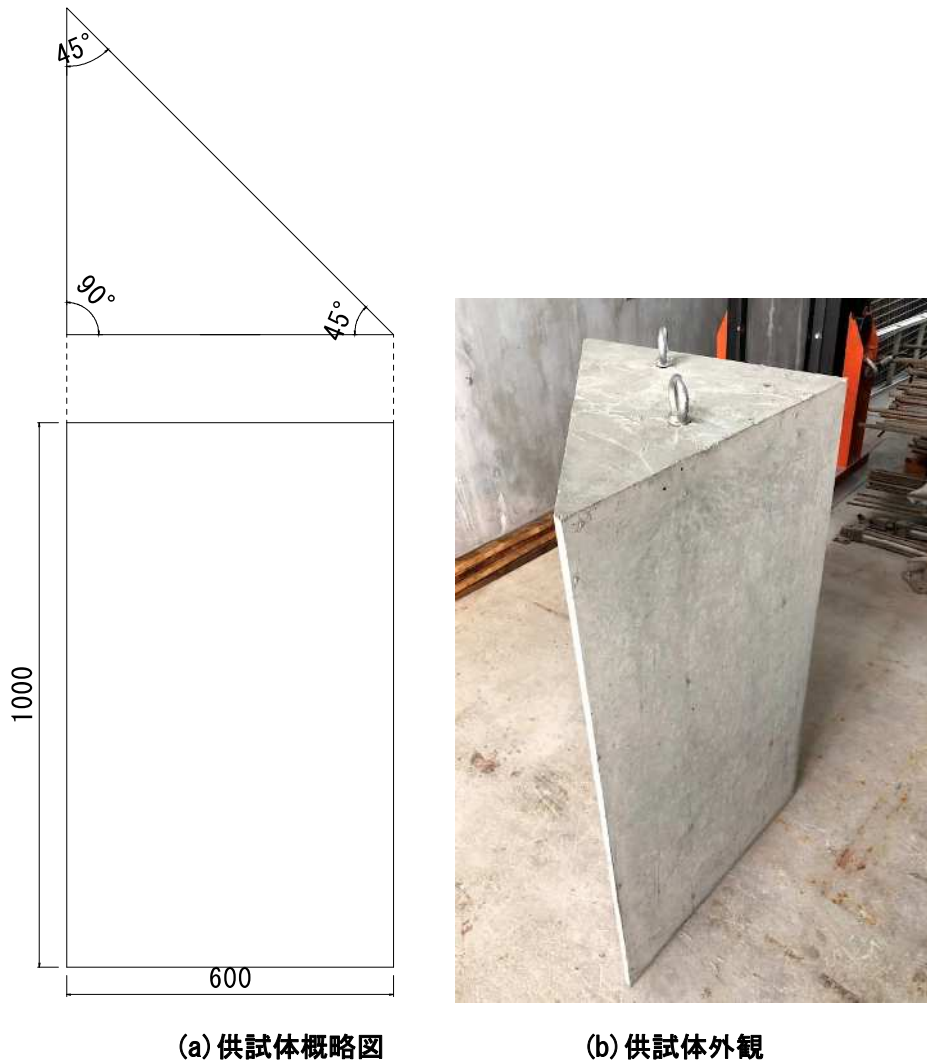


図 3-13 先行研究の検証に用いた供試体

表 3-3 コンクリートの配合条件

コンクリート	W/C %	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				
		C	W	S	G	AD
50-15-20H	36.0	433	156	730	1102	2.68

### 3.3.3 距離減衰に関する検討

#### (1) 測定方法

図 3-14 に示すように探触子を対向させて、伝播距離を 50~350 mm まで 50 mm 間隔で変化させたものに 75 mm を追加し測定した。直角二等辺三角形の短辺を入れ替えた対称の位置での計測および探触子の発信と受信を入れ替えた計測の計 4 種類実施した。図 3-14 に示す計測状況を“発信 1”とし、受・発信の探触子を入れ替えた計測を“受信 1”，短辺を入れ替えた計測を“発信 2”および“受信 2”とする。

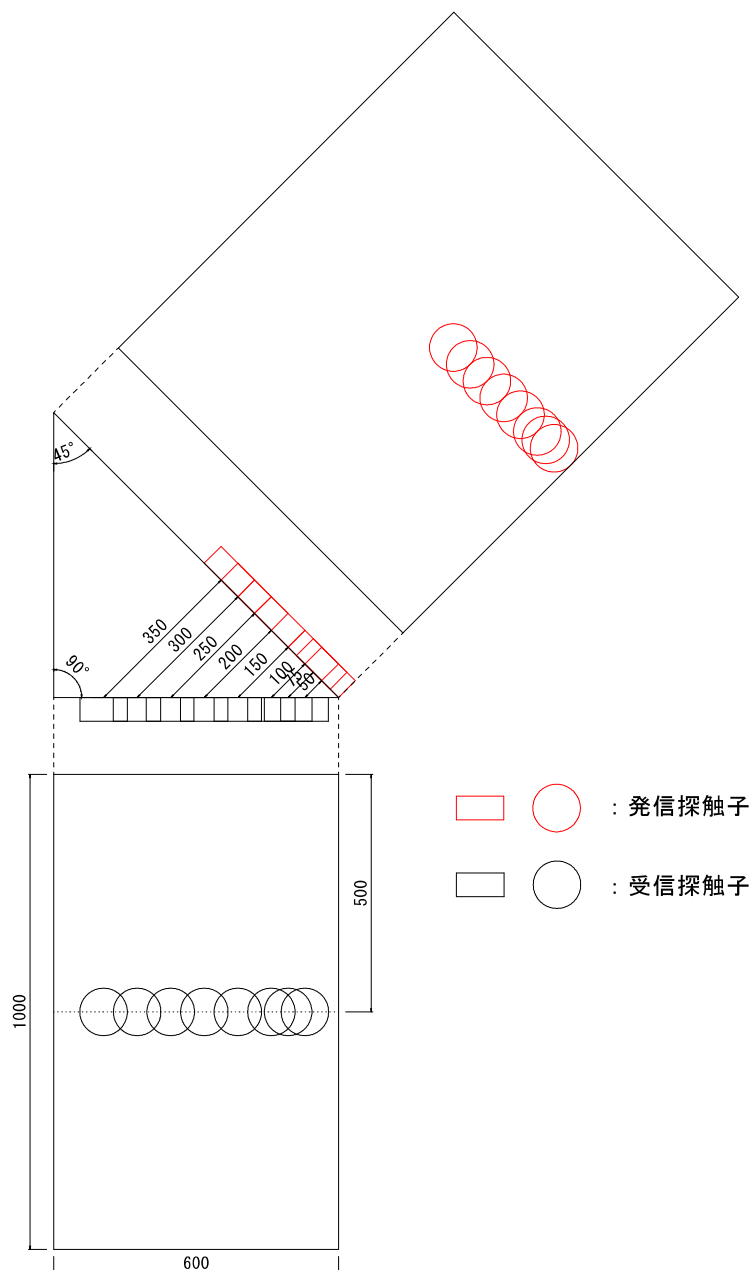


図 3-14 距離減衰検討の概略図



## (2) 実験結果および考察

各伝播距離において4回計測した透過波の最大電圧値(絶対値)の平均値と伝播距離との関係を図 3-15 に示す。伝播距離に応じて透過波の電圧値が減少していく様子がわかる。図 3-15 に示す結果をもとに近似曲線を求め、以降においては伝播距離の補正にこの回帰式を用いることとした。

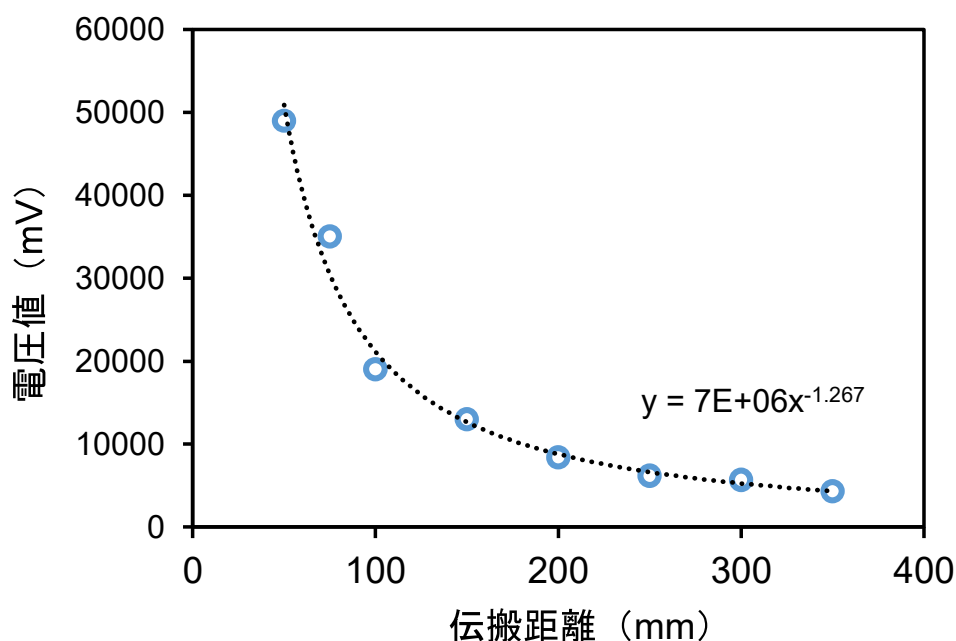


図 3-15 伝播距離と透過波電圧値

次に透過波のフーリエスペクトルについて検討した。図 3-16 に窓関数による切り出し状況を示す。図 3-16 によると伝播距離 50~150 mm において、透過波後方に高周波帯域の散乱波がみられる。これら散乱波の影響を除去するため、図示する台形状の窓関数を用いて透過波 1 周期分を切り出し、FFT スペクトルのピーク周波数を求めた。なお、図 3-16 に示すように窓関数による切り出し開始時刻は、透過波の起生時刻とした(以降も同様)。また FFT の実行条件は、データ数 16384 ポイント、サンプリング時間間隔 0.1  $\mu$ s とした。スペクトルピークと伝播距離の関係を図 3-17 に示す。図 3-17 によると伝播距離が 75 mm の場合、および伝播距離が 150 mm の場合に 70 kHz を超えるものがみられるが、伝播距離によらず概ね 60 kHz 近傍であることがわかる。以上より伝播距離が 350 mm 以内では、透過波のスペクトルは伝播距離によらず概ね一定であることがわかった。

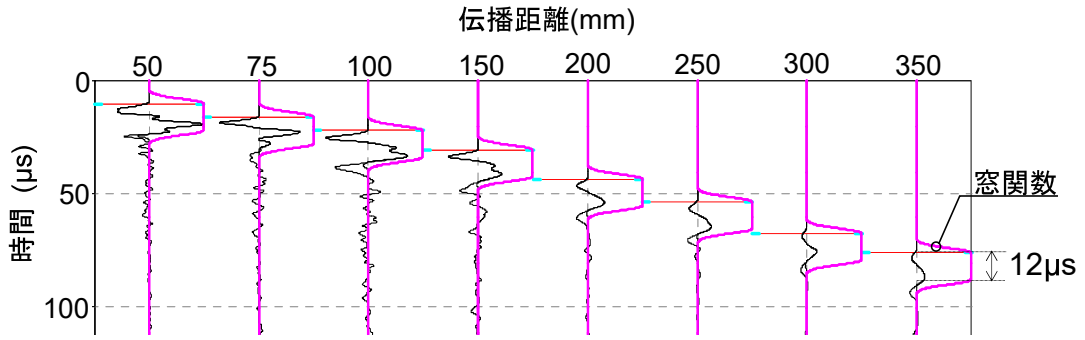


図 3-16 窓関数による時系列波切り出し状況

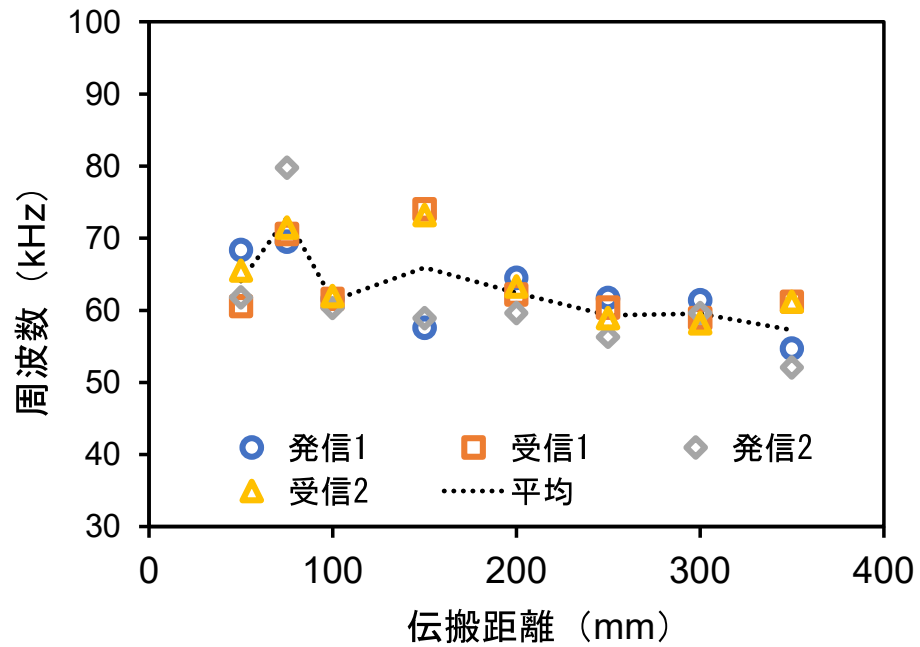


図 3-17 伝播距離と透過波スペクトルピーク

### 3.3.4 発信波の指向性に関する検討

#### (1) 実験方法

図 3-18 に示すように発信探触子を長辺の中心に固定し，受信探触子を等辺の計測点（1～10）に設置して計測した．計測における探触子の入れ替え状況は前項（3.3.3 距離減衰に関する検討）と同様の4種類とした．

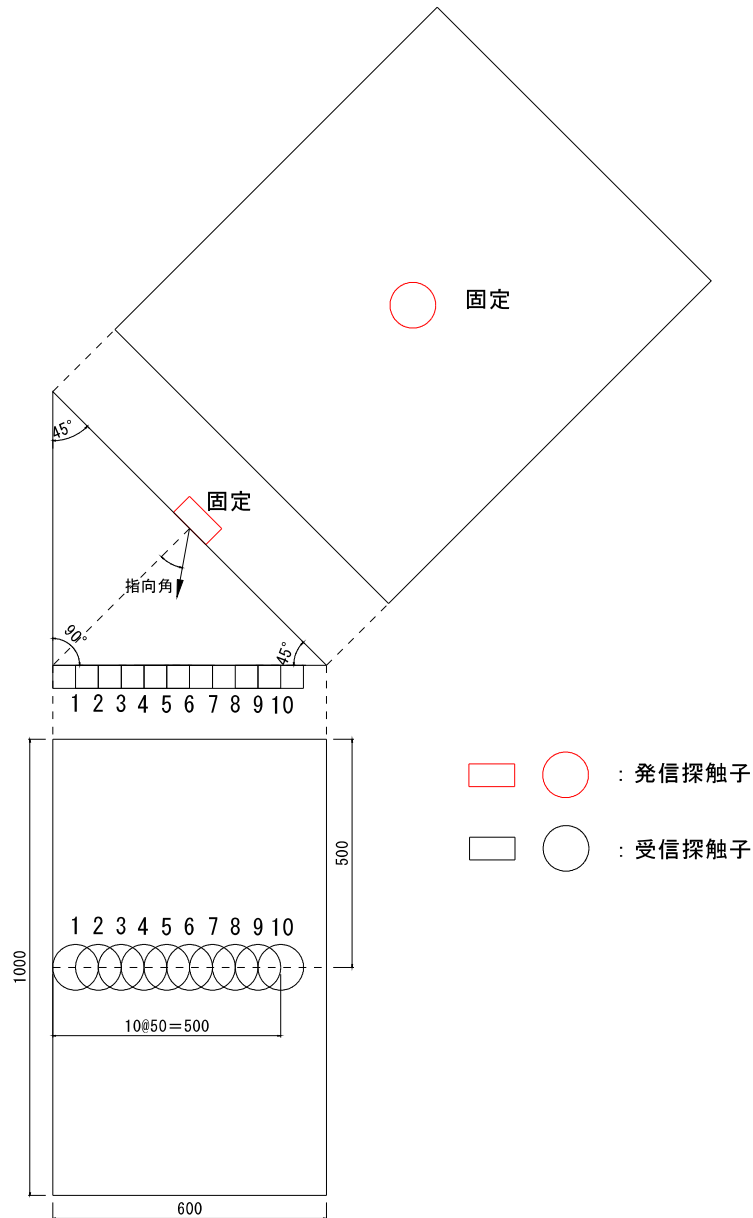


図 3-18 発信波の指向性検討の概略図

## (2) 測定結果および考察

前項によると伝播距離が長くなるにつれ電圧値は減少することから、図 3-15 に示す近似式を用いて伝播距離に応じて電圧値を補正した。

透過波の最大電圧値（補正值）と発信波の指向角との関係を図 3-19 に示す。

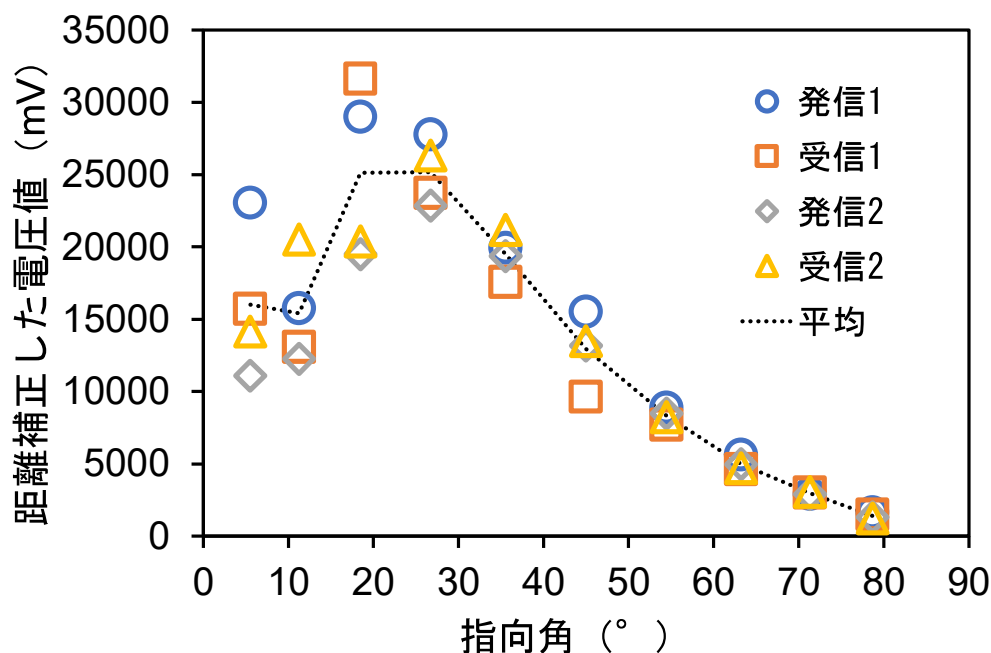


図 3-19 指向角と透過波の距離補正した電圧値

指向角が  $18^\circ$  となる計測点 3，または指向角が  $27^\circ$  となる計測点 4 において電圧値が概ね最大値を示し，指向角が増減するにつれ電圧値が減少した。また，指向角  $79^\circ$  では最大値の約 5%まで低下した。

発信波が同心円状に伝播すると，指向角によらず受信探触子に計測される電圧値は概ね等しくなると想定される。しかしながら，上記のように指向角によって電圧値が異なる結果となったことから，コンクリート中を伝播する発信波は直進性を有するものと推測される。

ただし，発信波が直進性を有する場合，指向角が  $0^\circ$  の時が最大値を示すと想定されるが，指向角が約  $10^\circ$  以下の計測点 1・2 においては電圧値が計測された最大値の 50%程度まで低下している。これは，三角柱状供試体の長辺・短辺に発信子・受信子を設置したことによる透過波の受信探触子への入射角の影響と考えられる。すなわち，透過波の入射角  $90^\circ$  で受信探触子の受信面の投影面積が最大となるが，同角度が増減することで投影面積は減少するため，みかけ上の受信面積が低下することになる。

さらに受信波の分解の影響が考えられる。ベクトル成分となる受信波（縦波）は、角度に応じて受信面における水平方向と垂直方向に分解される。主に縦波を感知する（縦効果）圧電素子を有する探触子では受信面に対して鉛直成分の波動を測定している。これにより受信波の強度は、実際に受信探触子の位置に到達している透過波に比べて小さくなることが考えられる。

また指向角約 20° 以下の測点において、測定位置および探触子の組み合わせごとの電圧値のばらつきがみられた。これは供試体の形状が原因と考えられる。すなわち直角を挟んだ他の等辺端面において反射が生じるため、直角部近傍では弾性波は複雑な挙動を示すことが予想される。そのため直角部近傍の測点においては透過波が反射波の影響を受け、電圧値のばらつきが大きくなったものと推察される。

次に透過波のフーリエスペクトルについて検討した。図 3-20 に示す窓関数を用いて透過波を切り出し、切り出し波に FFT を実施し、そのスペクトルを得た。

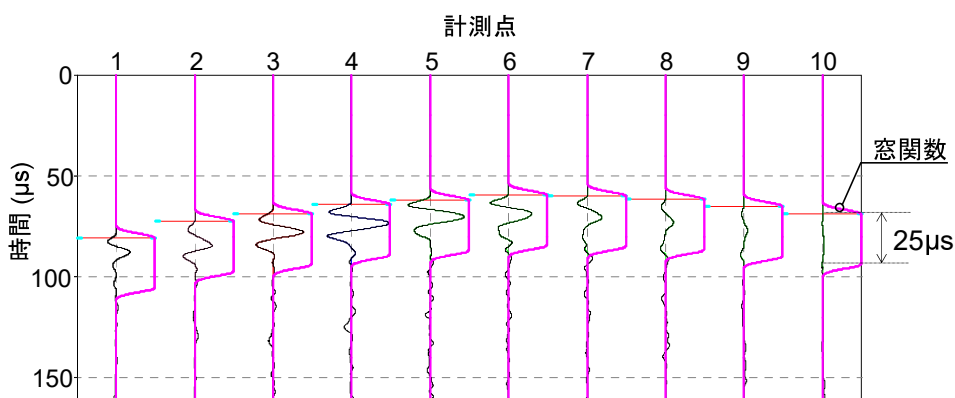


図 3-20 透過波切り出し状況

透過波のスペクトルのピーク周波数を図 3-21 に示すとともに、200kHz までのスペクトル重心を図 3-22 に示す。

なおスペクトル重心  $S_C$  は以下の式(3.3.1)で定義される。

$$S_C = \sum_{i=1}^n \frac{f_i \cdot y_i}{y_i} \quad (3.3.1)$$

ここで  $n$  はサンプリング数、 $f_i$  は各点における周波数、 $y_i$  は各点におけるスペクトル強度である。

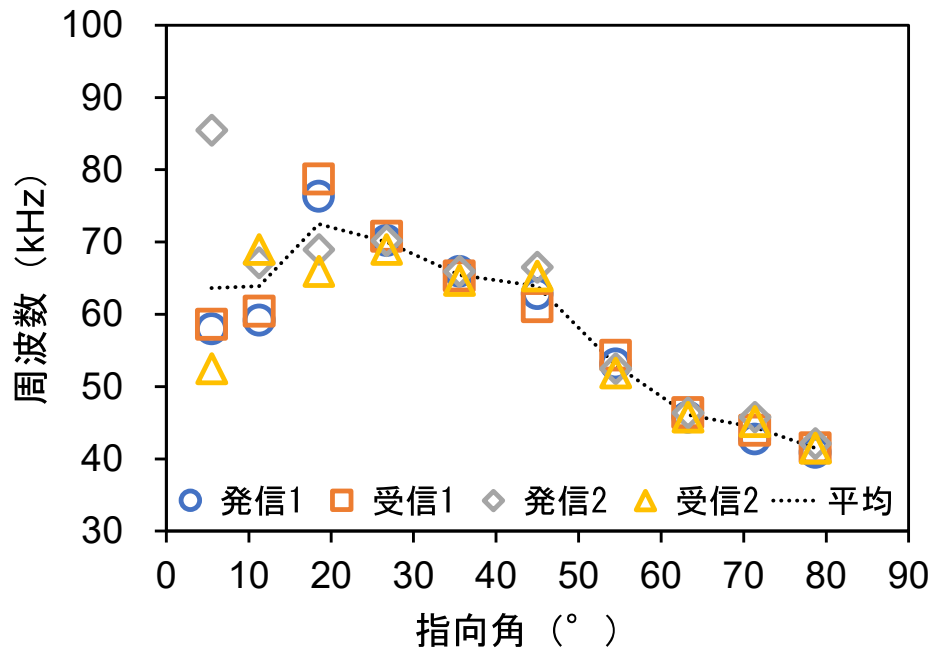


図 3-21 指向角と透過波のピーク周波数

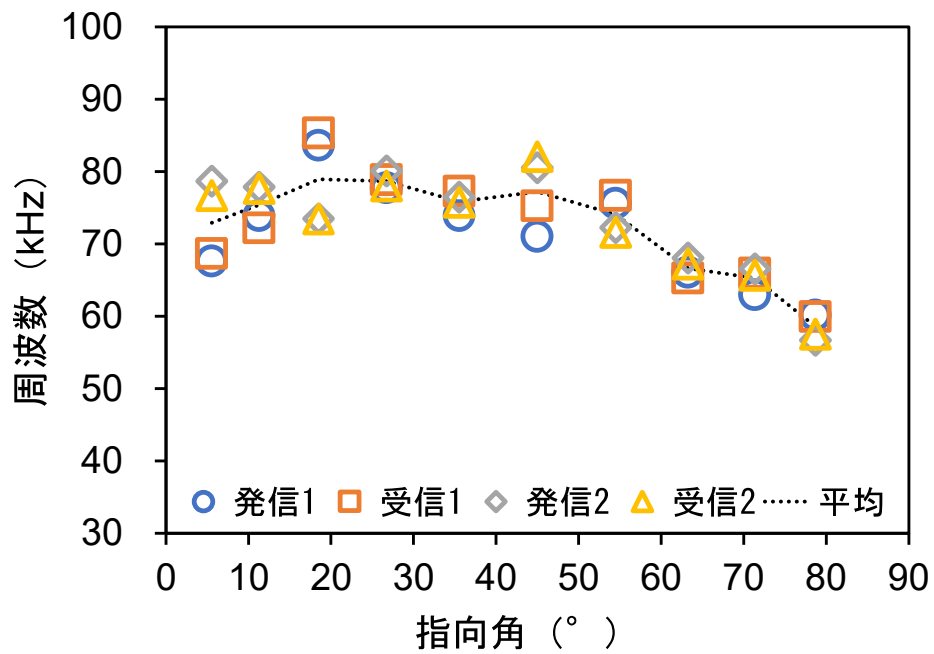


図 3-22 指向角と透過波のスペクトル重心

図 3-21 によると透過波のスペクトルピークは  $20^{\circ} \sim 45^{\circ}$  の範囲で概ね  $60 \sim 70 \text{kHz}$  の範囲にあり、その範囲を外れるとなだらかに低下し、さらに指向角が  $79^{\circ}$  となる計測点 10 においては  $40 \text{kHz}$  程度まで低下した。また、図 3-22 によるとスペクトル重心は指向角が  $55^{\circ}$  以下で概ね  $70 \sim 80 \text{kHz}$  の範囲にあった。指向角が  $79^{\circ}$  となる計測点 10 においても、スペクトル重心は  $60 \text{kHz}$  程度であり、スペクトルピークに比べて指向角による低下量は少なかった。

以上より、本実験の範囲内では、指向角  $45^{\circ} \sim 90^{\circ}$  では電圧値やスペクトルのピーク周波数の減少が顕著になること、および  $20^{\circ} \sim 45^{\circ}$  において明瞭な発信波が伝播していることがわかった。

### 3.3.5 端面反射波の特性に関する検討

#### (1) 実験方法

図 3-23 に示すように発信探触子を等辺の中心に固定し、受信探触子をもう一方の等辺の計測点（1～10）に設置して計測した。探触子および測定面の組み合わせは（3.3.3）項と同様の4種類とした。

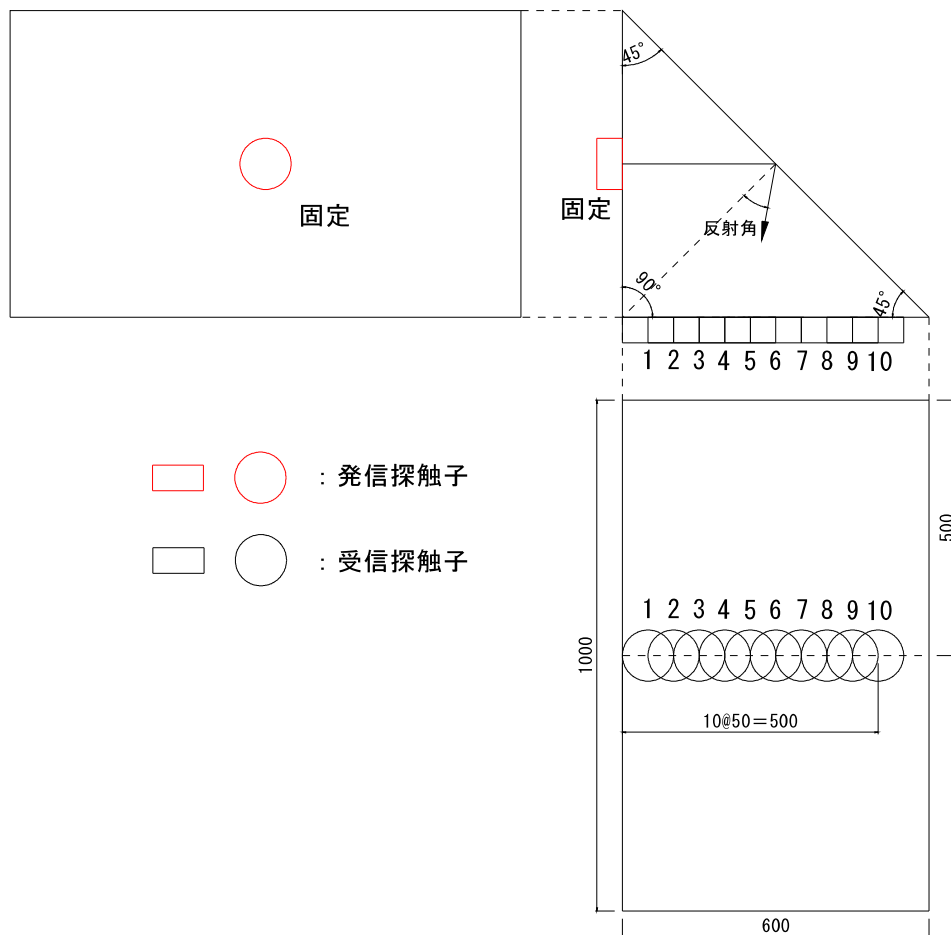


図 3-23 発信波の指向性検討の概略図



## (2) 実験結果および考察

反射波の最大電圧値（絶対値）と反射角との関係を図 3-24 に示す。

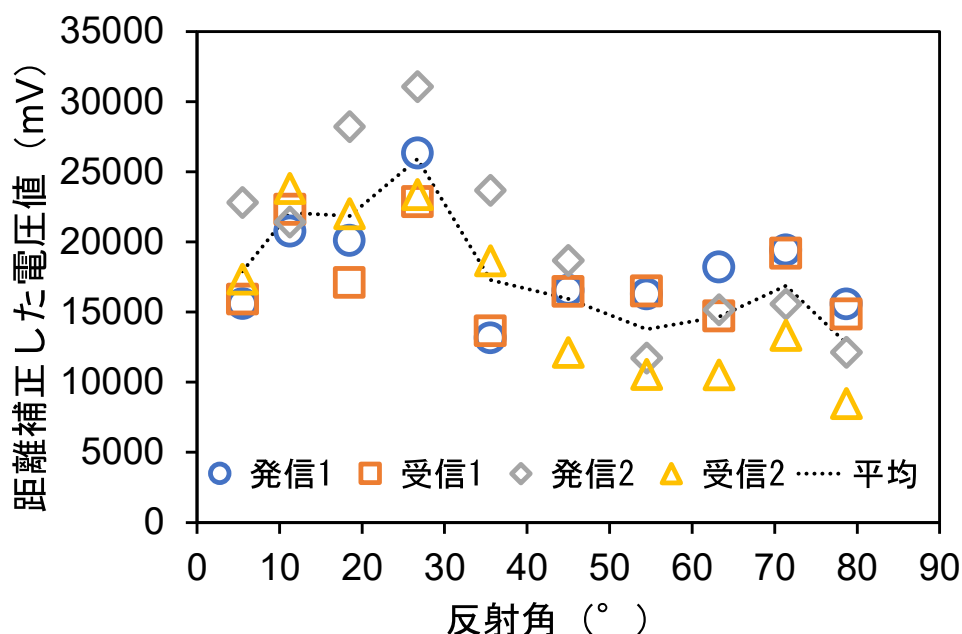


図 3-24 反射角と反射波の距離補正した電圧値

なお、反射波の経路は無数に考えられるが、本実験では発信探触子から直進し、端面到達時に様々な角度に反射するような簡素化した経路を想定する。反射角が  $27^\circ$  となる計測点 4 において電圧値が最大となり、反射角が増減するにつれ電圧値がなだらかに低下しているが、反射角  $36^\circ$  以上では、ばらつきがあるものの電圧値は概ね一定となっている。電圧値にばらつきが大きくなった原因として、探触子間を直接伝播する直接波と、それに伴う後続波の影響が考えられる。直接波は初動波であり、その後方にはコンクリートの不均質性に起因する散乱波、いわゆるコーダ波が続く。コーダ波と反射波が影響し合うため、反射波のみを評価することができず、電圧値のばらつきが大きくなったものと推察される。

次に反射波のフーリエスペクトルについて検討した。前節と同様の窓関数を用いて FFT によりスペクトルを求めた。反射波のスペクトルのピーク周波数を図 3-25 に示し、 $200\text{kHz}$  までのスペクトル重心を図 3-26 に示す。図 3-25 によると反射波のスペクトルピークは、図 3-21 に示すような透過波のスペクトルピークに比べて、反射角によるピーク周波数の変動が大きく明瞭な傾向はないものの、概ね  $60\sim 90\text{kHz}$  の範囲内に収まっていた。この変動の原因として、前述のコーダ波の影響が考えられる。

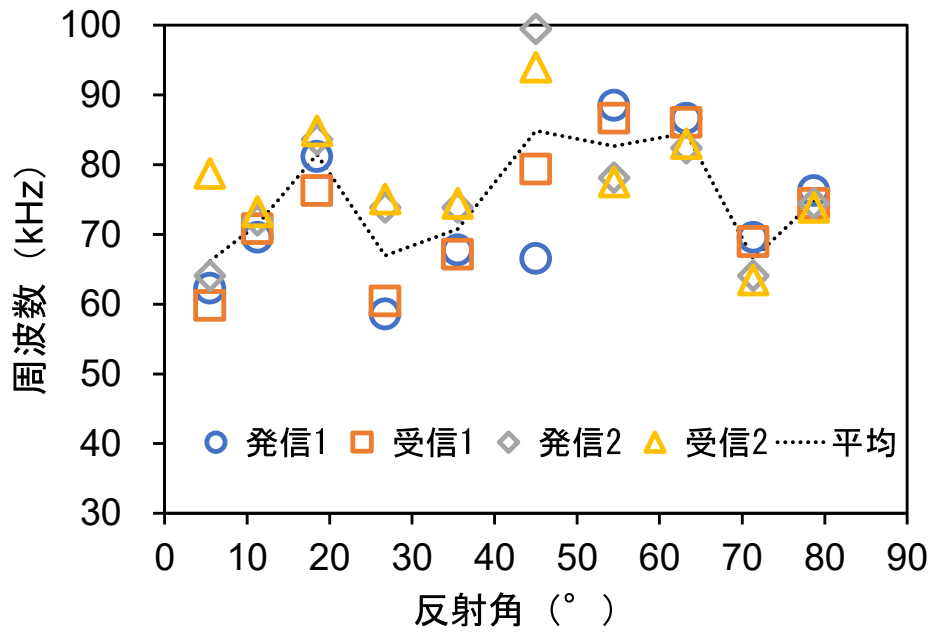


図 3-25 反射角と反射波のピーク周波数

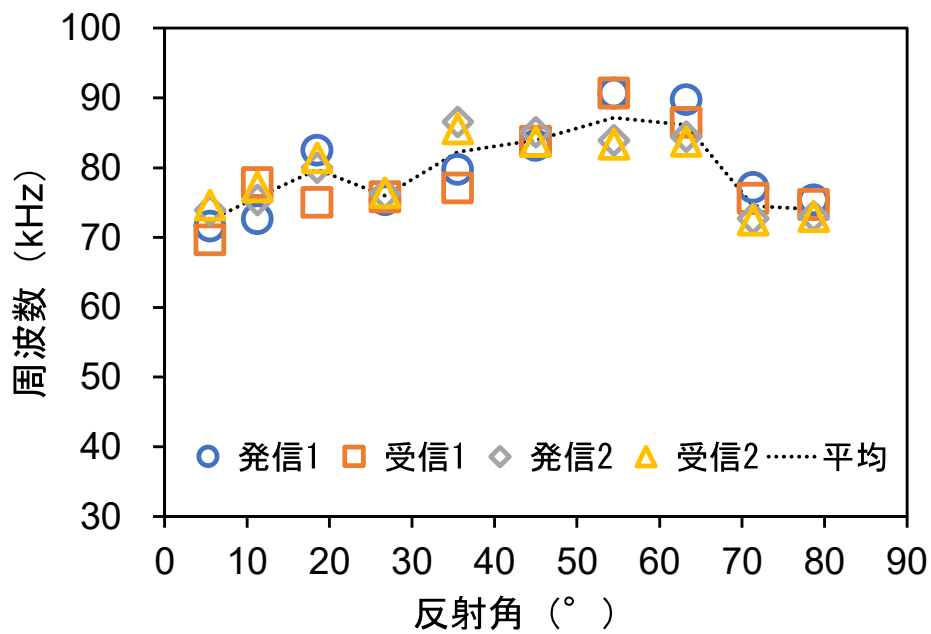


図 3-26 反射角と反射波のスペクトル重心

一方、図 3-26 によるとスペクトル重心は、70～90 kHz 程度の範囲内にあり、測定位置や測定条件による変動が小さく、比較的安定した値を示した。

縦波が異なる媒質に入射すると反射（屈折）が起こる。その際、波動の一部が伝播方向に対して横方向の要素運動を引き起こし、横波が発生する場合がある。これをモード変換といい、発生した横波はモード変換波といわれる。図 3-27 にモード変換波が生じる際の模式図を示す。

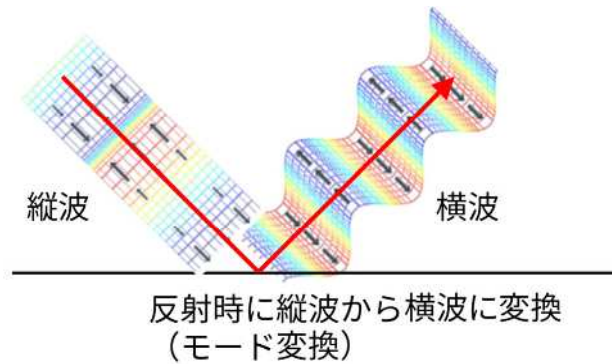


図 3-27 モード変換波発生状況 模式図

本研究では，受信波形中のモード変換波に着目した。

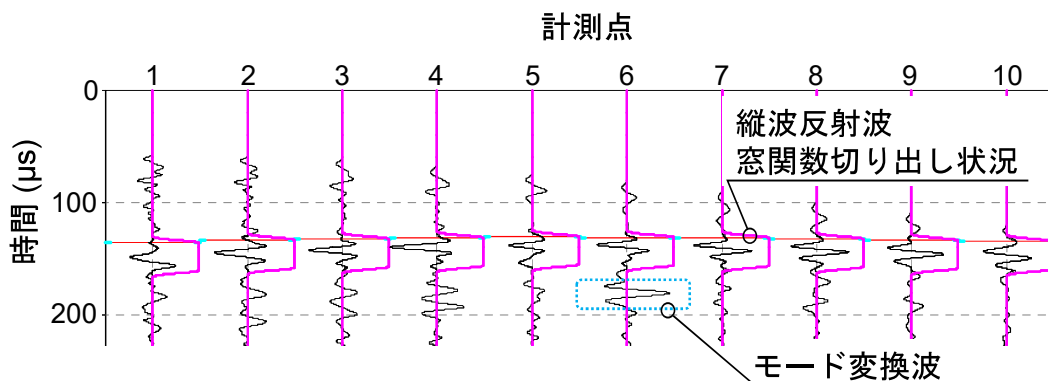


図 3-28 反射波の受信波形および窓関数切り出し状況

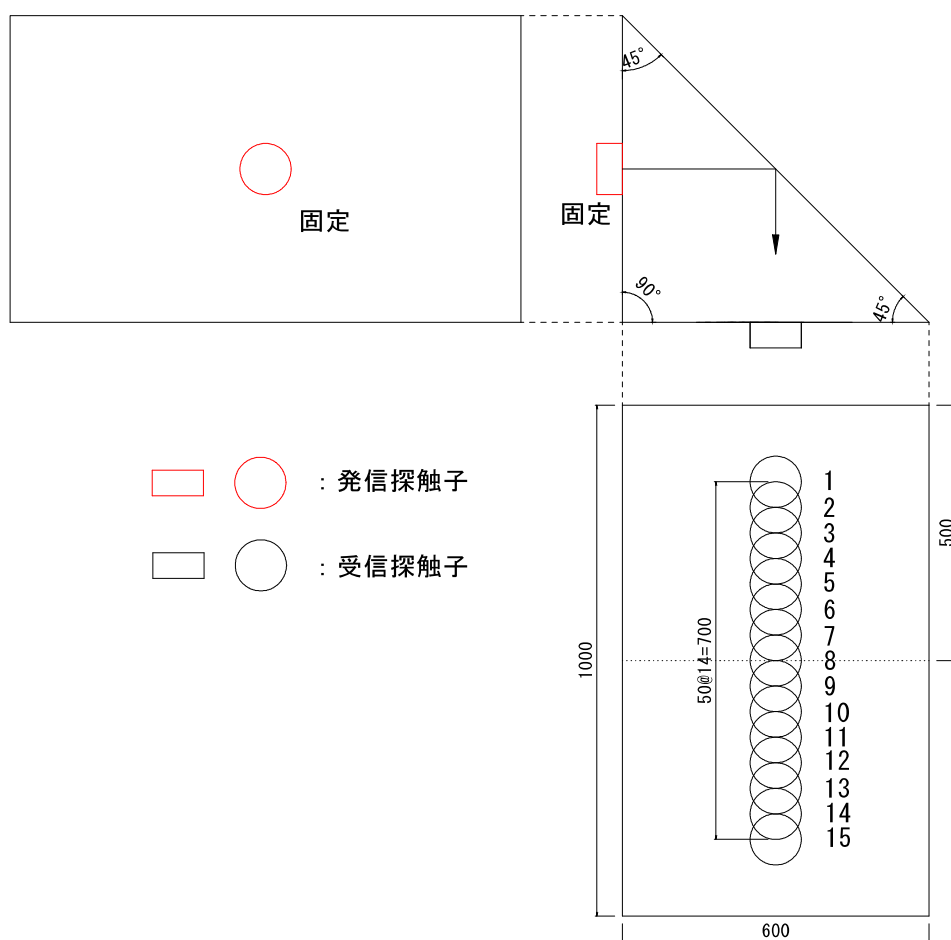
図 3-28 に示す受信波形をみると，反射角が  $45^\circ$  となる計測点 6 にのみ縦波反射波の起生時刻後方に，より大きな反射波が起生している。横波の伝播速度  $V_s$  は，弾性波動論によると以下の式 (3.3.2) で定義され，ポアソン比  $\nu$  を 0.2 と仮定すると縦波の伝播速度  $V_p$  の約 60%となる [岩波ら，1999；鎌田ら，2013]。

$$V_s = \sqrt{\frac{1-2\nu}{2(1-\nu)}} V_p \quad (3.3.2)$$

この場合、モード変換波の起生時刻は約  $170 \times 10^{-6}$  s となり、**図 3-28** に示す計測点 6 の反射波の起生時刻に概ね相当する。これより、測点 6 にモード変換波が起生したと判断した。なお、計測点 3・4 においても同様の時刻帯において受信波の振幅が大きくなっているが、縦波反射波の振幅に比べて小さい。一方、計測点 6 では縦波反射波に比べて大きい振幅を示す有意な反射波がみられたことから、モード変換波と推察された。このモード変換波の起生を検証するため、追加実験を行った。

### (3) モード変換波の再現性検討

反射角を  $45^\circ$  とし、受信探触子を鉛直方向に 50 mm 間隔で 15 点（計測点 1～15）移動させながら計測した。測定状況を**図 3-24** に示す。



**図 3-29** モード変換波の再現性検討の概略図

この実験における受信波を**図 3-30** に示す。計測点 4～12 において、斜辺でモード変換される横波が到達する時刻（縦波の伝播速度の 60%相当で換算・推定した時刻）に明瞭な弾性波が観測され、モード変換波の起生が確認された。

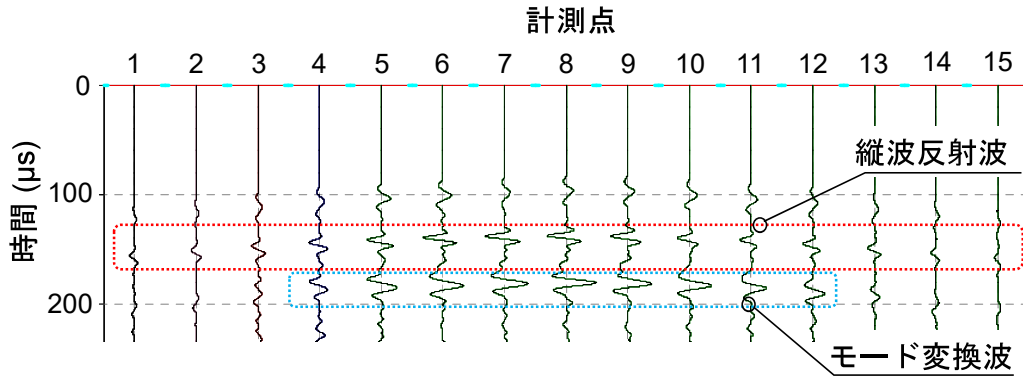


図 3-30 反射波などの受信波形

ここで、縦波反射波およびモード変換波（横波）の最大電圧値（絶対値）と反射波の鉛直方向反射角の関係を図 3-31 に示す。鉛直方向反射角が  $0^\circ$  となる計測点 8 において縦波反射波、モード変換波ともに電圧値が最大値を示し、鉛直方向反射角が増減するにつれて電圧値が減少した。また、モード変換波は縦波反射波に比べて高い電圧値を示す傾向がみられた。

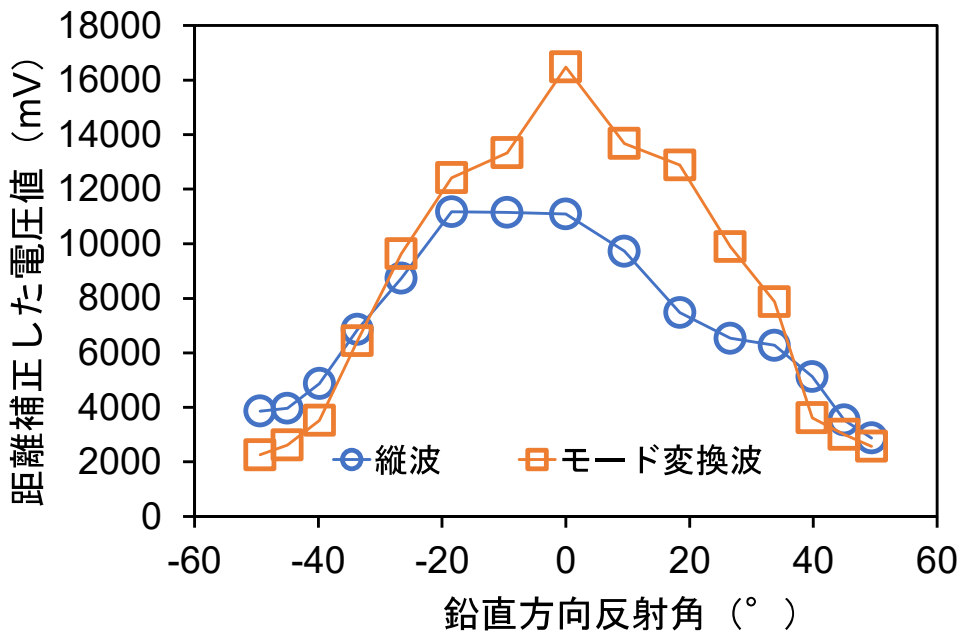


図 3-31 鉛直方向反射角と距離補正した電圧値

次に、これらの反射波のフーリエスペクトルについて検討した。図 3-16 に示す窓関数を用いて FFT よりスペクトルを求めた。縦波反射波およびモード変換波（横波）のスペクトルのピーク周波数を図 3-32 に示し、さらに 200 kHz までのスペクトル重心を図 3-33 に示

す.

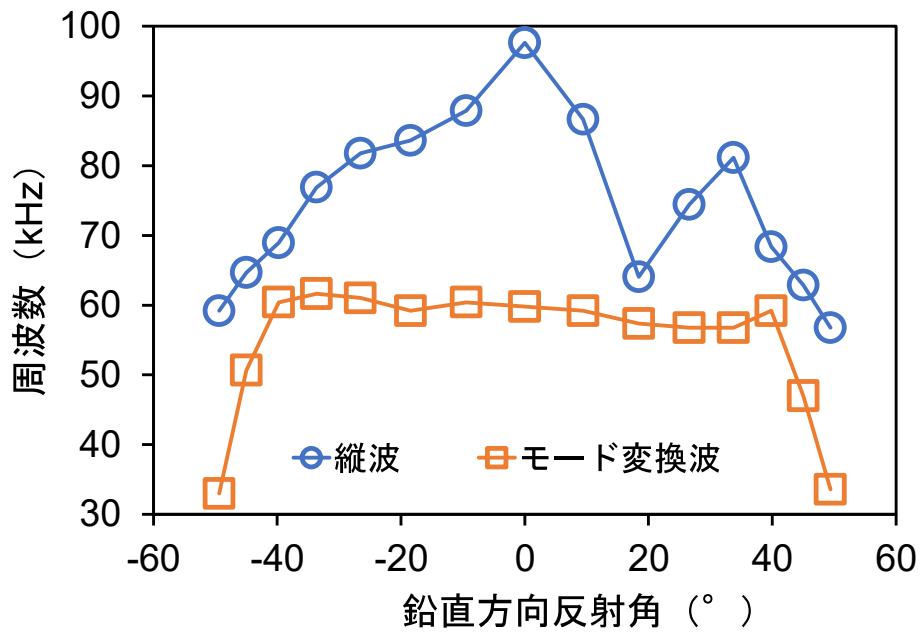


図 3-32 鉛直方向反射角と反射波のピーク周波数

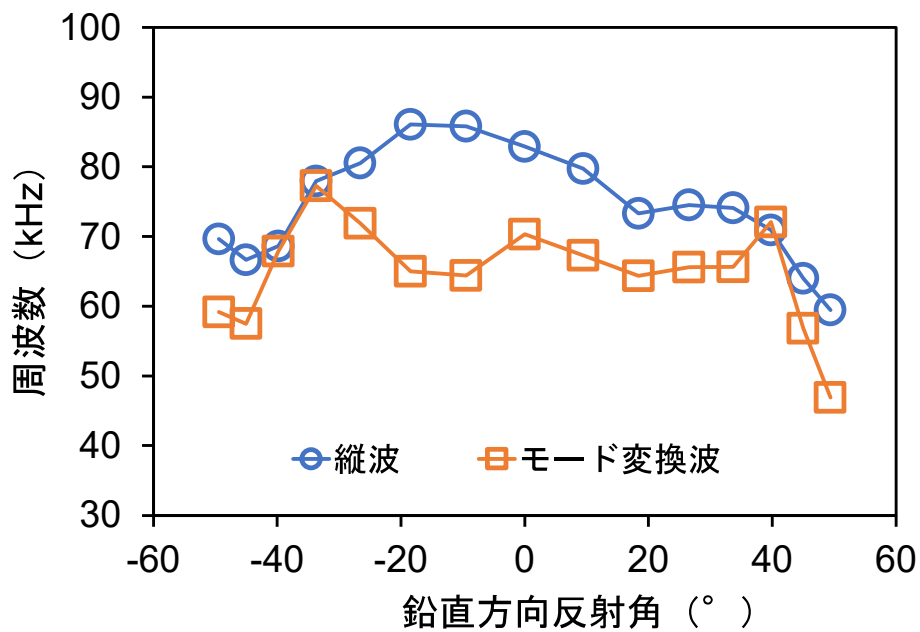


図 3-33 鉛直方向反射角と反射波のスペクトル重心

図 3-32 によると縦波反射波のスペクトルピークは、鉛直方向の反射角が  $0^\circ$  となる計測点 8 において約 100 kHz の最大値を示し、一部の例外はみられるものの角度が増減するにつれ徐々にピーク周波数が低減した。一方、モード変換波のピーク周波数は鉛直方向の反射角  $-40^\circ \sim 40^\circ$  となる計測点 3~10 において、60 kHz 程度と概ね一定値を示した。これより、縦波反射波は鉛直方向反射角によりスペクトルピークが変動するものの、横波反射波は一定の範囲で鉛直方向反射角によらず一定のピーク周波数を示すことがわかった。

なおスペクトル重心を示す図 3-33 によると、縦波反射波およびモード変換波は、それぞれ概ね 70~90 kHz、60~70 kHz の範囲内にあり、その変動も比較的小さいものであった。

### 3.3.6 まとめ

ここでは先行研究における超音波帯域の弾性波の伝播特性を調べるため、直角二等辺三角形の断面を有する三角柱コンクリート供試体を作製し、これを用いて各種の基礎的実験を行った。ここで得られた結論を以下にまとめて示す。

- ① 透過法の計測において、路程が 350 mm 以下の場合、透過波のピーク周波数は伝播距離によらず概ね一定値となった。
- ② 発信波の指向性に関する検討において、指向角  $45^\circ \sim 90^\circ$  では電圧値やスペクトルのピーク周波数の減少が顕著になるが、 $20^\circ \sim 45^\circ$  において明瞭な発信波が伝播した。
- ③ 反射波のスペクトルピークは、反射角によるピーク周波数の変動が大きいものの、概ね 60~90 kHz の範囲内に収まっていた。
- ④ 斜辺 ( $45^\circ$ ) で変換される横波の到達時刻により、明瞭なモード変換波が観測された。縦波反射波は鉛直方向の反射角によりスペクトルピークが変動するものの、横波反射波は一定のピーク周波数を示した。

以上より、WUT による計測では指向角を  $45^\circ$  以内に設定することの妥当性が窺えたものの、供試体形状に起因する問題により正確な入射弾性波の指向性は把握できなかった。

また、反射角を  $45^\circ$  とした場合、シーズ縦波反射波のみならずモード変換波の起生が推定された。従来 WUT で解析対象としていた縦波反射波に加えて、横波反射波を評価に加えることで情報量が増え、測定精度上昇の可能性が窺えた。

### 3.4 入射弾性波の指向性に関する検討

#### 3.4.1 概要

3.3 項において三角柱状のコンクリート供試体を用いて発信波の伝播特性を調べたところ、その伝達範囲は概ね  $45^\circ$  の範囲内となり、指向性（直進性をもって伝播）が高い傾向にあった。なお、この実験では測点間で受信探触子の角度が異なるため、また直角を挟んだ等辺からの反射波の影響で正確な指向性を把握できなかった。これより、さらなる検証実験が必要と考えられた。

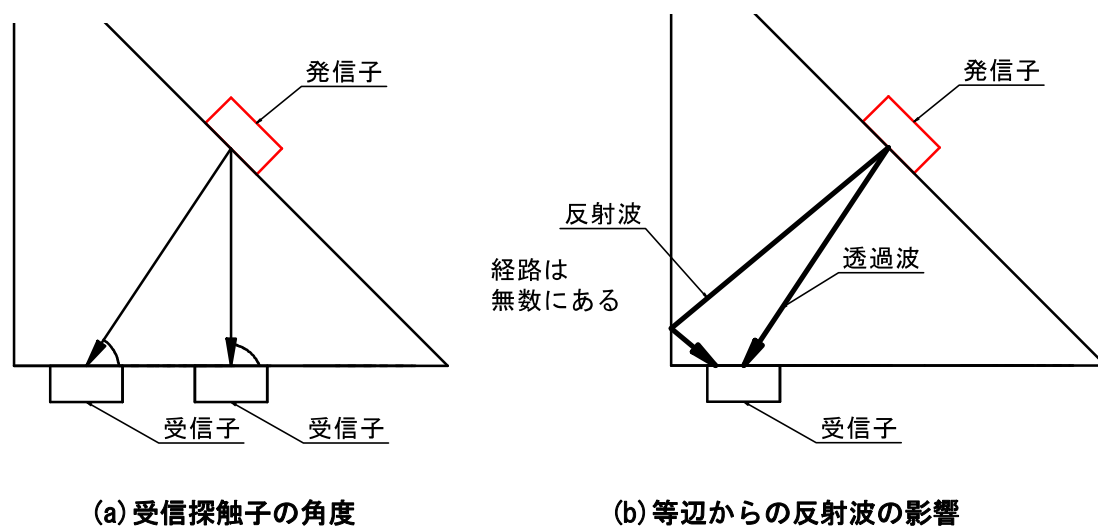


図 3-34 三角柱状供試体による実験の問題点の概要図

そこで本検討では、受信角度および路程を一定にするため半円柱状のコンクリート供試体を作製し、発信波の伝播・拡散状況を実験的に調べた。比較的受信面積の広い超音波探触子を曲面に直接配置できないため、受信探触子の代替としてレーザードップラー振動計（LDV）を用いた。さらに、粗骨材が発信波の指向性に及ぼす影響を比較検討するため、無収縮モルタル製の供試体を用いて同様の実験を行った。



### 3.4.2 検討に用いた供試体

本研究で用いたコンクリートおよび無収縮モルタル製の供試体は、直径 400 mm 半円断面、高さ 400 mm で半円柱状のものである。供試体の概要を図 3-35 に示す。コンクリートおよびモルタルの配合条件を表 3-4 に示す。作製したコンクリート (50-15-20H) には早強ポルトランドセメント、高性能減水剤 (I 種) を用いた。空気量の実測値は 4.2%であった。また、無収縮モルタルには呼び強度 50 (N/mm<sup>2</sup>) のプレミックス材を用いた。なお、実験時のコンクリートおよびモルタルの材齢は 8 か月であり、28 日強度はそれぞれ 53.4 N/mm<sup>2</sup>, 61.7 N/mm<sup>2</sup>であった。

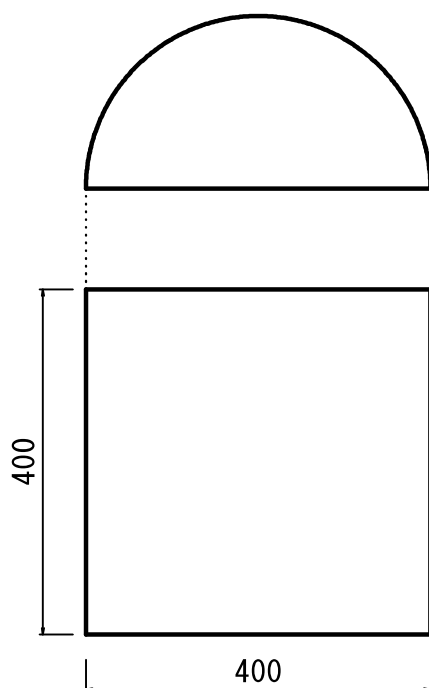


図 3-35 半円柱状供試体の概要図

表 3-4 配合条件

種別	スランプ (cm)	Gmax (mm)	W/C %	単位量(kg/m <sup>3</sup> )				
				W	C	S	G	AD
コンクリート	15	20	36.0	156	433	730	1102	2.68
モルタル	—	—	36.0	338	1875*		—	—

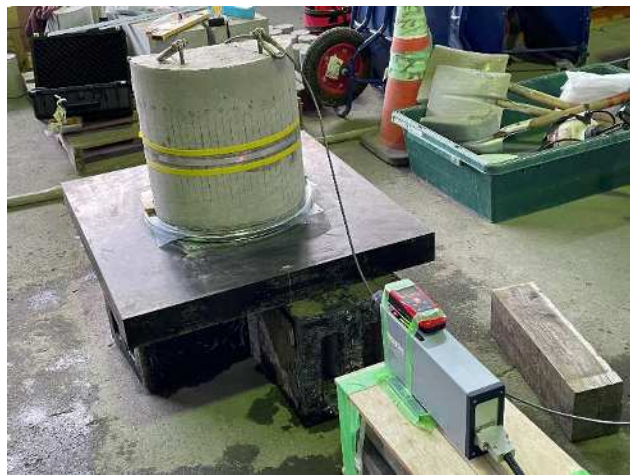
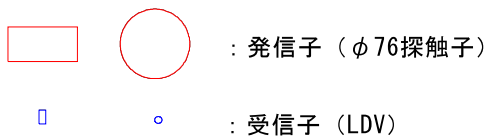
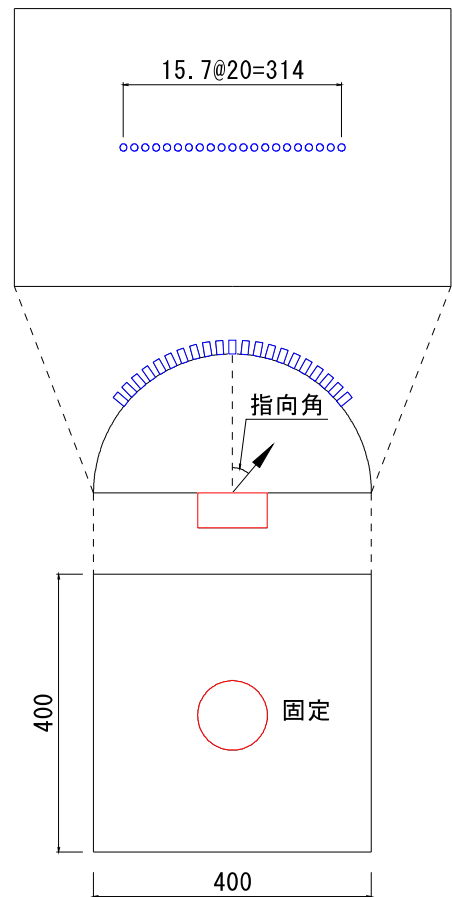
\*プレミックス材

### 3.4.3 入射弾性波の指向性に関する検討

#### (1) 測定方法

図 3-36 に示すように、平面中央に発信探触子を固定し、供試体を回転させて指向角 $-50^{\circ}$ ～ $50^{\circ}$ の範囲で $5^{\circ}$ 間隔にて受信探触子にあたる LDV を曲面に照射し、各測点における透過波を観測した。なお測定にあたり、LDV 受信面には反射材としてアルミ箔をシアノアクリレート系瞬間接着剤を用いて貼付した。

15.7mm (5° 相当) ピッチで21点計測



(a) 測定状況概要

(b) 測定状況写真

図 3-36 入射弾性波の指向性に関する検討と測定状況

## (2) 測定結果および考察

モルタルおよびコンクリート供試体を用いた試験における時刻歴波形を図 3-37, 図 3-38 に示す. 各グラフともに, 横軸は全時刻歴波形における電圧値の時間変化を正規化 (最大値を 1.0) して表したものである. また, コンクリート供試体の全測点における最大電圧値を 1.0 と正規化した時刻歴波形も併せて示す (図 3-39).

図 3-37 に示すように, モルタル供試体における時刻歴波形では 1 周期分の透過波は明瞭であるが, その後方は概ね減衰しており明瞭な波形はみられない. 一方, 図 3-38 および図 3-39 に示すように, コンクリート供試体では 1 周期の透過波の後方に複数の波形がみられる. これはコンクリート中に含まれる粗骨材等の影響により生じたコーダ干渉波 [大島, 2013] と考えられる.

指向角と受信波電圧の最大値 (絶対値) の関係を図 3-40 に示す. モルタル供試体では指向角  $0^{\circ}$  で電圧値が 1.9 V と最大となり, 指向角が増減するにつれて急峻な勾配で電圧値が低下した. 指向角  $\pm 25^{\circ}$  以降では電圧値の低下が穏やかとなり,  $\pm 40^{\circ}$  以降で概ね一定となっている. これは, モルタル中において発信波の指向性 (直進性) が著しいことを示唆した結果である.

一方, コンクリート供試体では, 指向角  $-10^{\circ} \sim 15^{\circ}$  の範囲では電圧値が 0.4 V 程度となり, その範囲から離れるにつれて電圧値が緩やかに低下し,  $\pm 40^{\circ}$  以降で概ね一定となった. コンクリートにおいては  $\pm 10^{\circ}$  の範囲でモルタルと比べて最大電圧値が 50 %以下と低く, 発信波の指向性 (直進性) が低下する結果となった. これは先述のように, 発信波が粗骨材の影響により散乱減衰したためと考えられる. 時刻歴波形より, 受信波の初動以前に僅かに生じている振動をノイズとすると, ノイズの最大振幅は 0.12 V であった. 本研究ではノイズより 2 倍以上の振幅を有意な信号と仮定すると, 透過波が確認できる範囲はモルタルで  $-30^{\circ} \sim 30^{\circ}$ , コンクリートでは  $-30^{\circ} \sim 20^{\circ}$  の範囲であった.

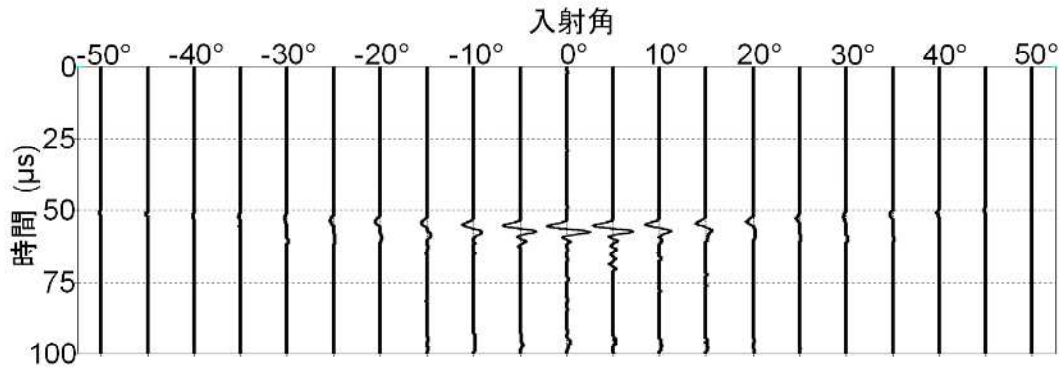


図 3-37 モルタルにおける時刻歴波形

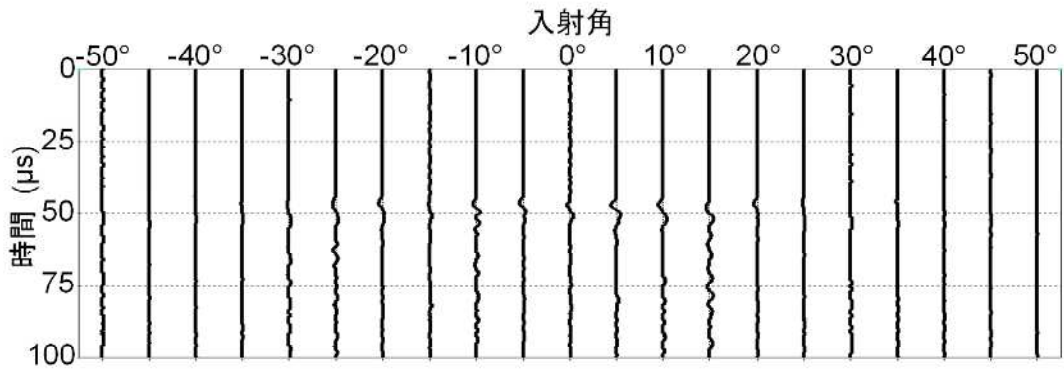


図 3-38 コンクリートにおける時刻歴波形

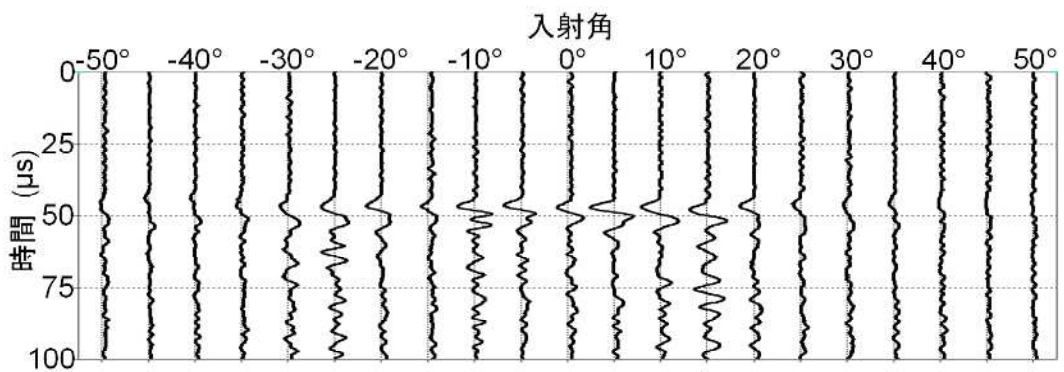


図 3-39 コンクリートにおける時刻歴波形  
(最大値で正規化)

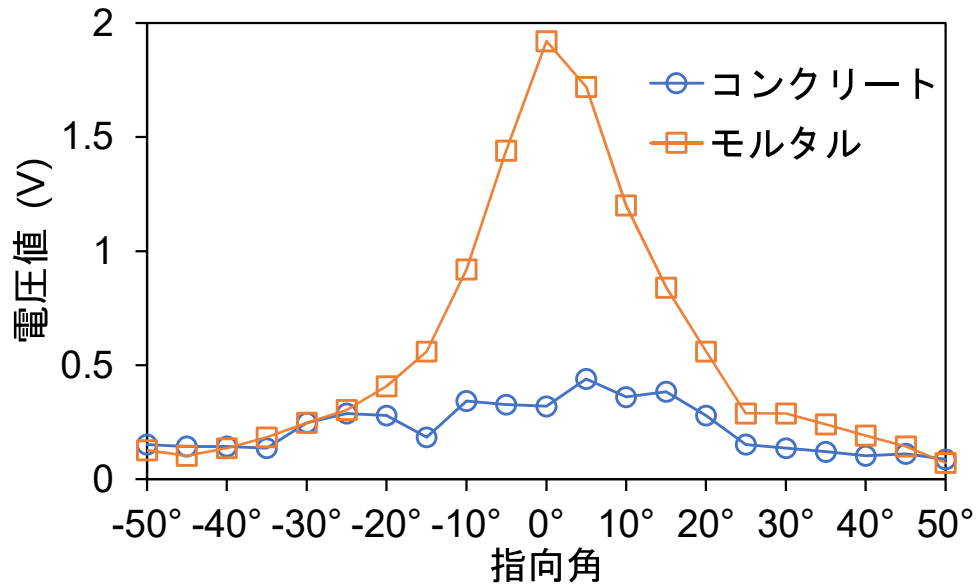


図 3-40 指向角と受信波最大電圧値

時刻歴波形より，受信波の初動部分を図 3-41 に示す台形状の窓関数で抽出し，FFT スペクトルを求めた．指向角と初動波のスペクトルピークの関係を図 3-42 に示す．

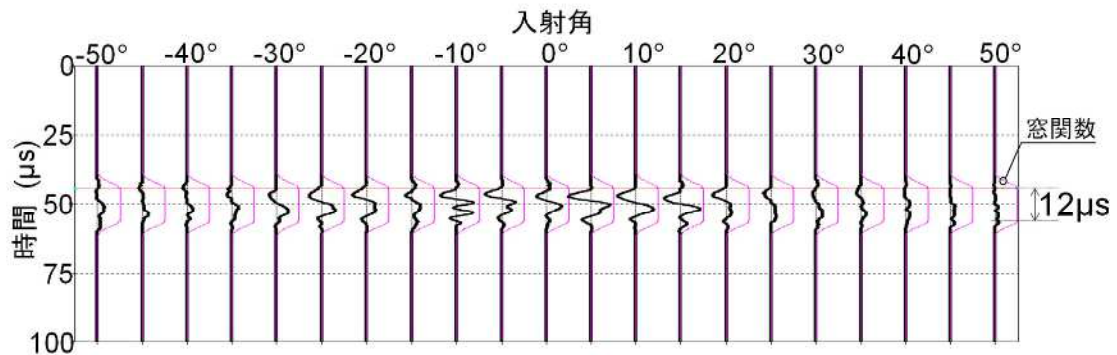


図 3-41 窓関数切り出し状況 (コンクリート)

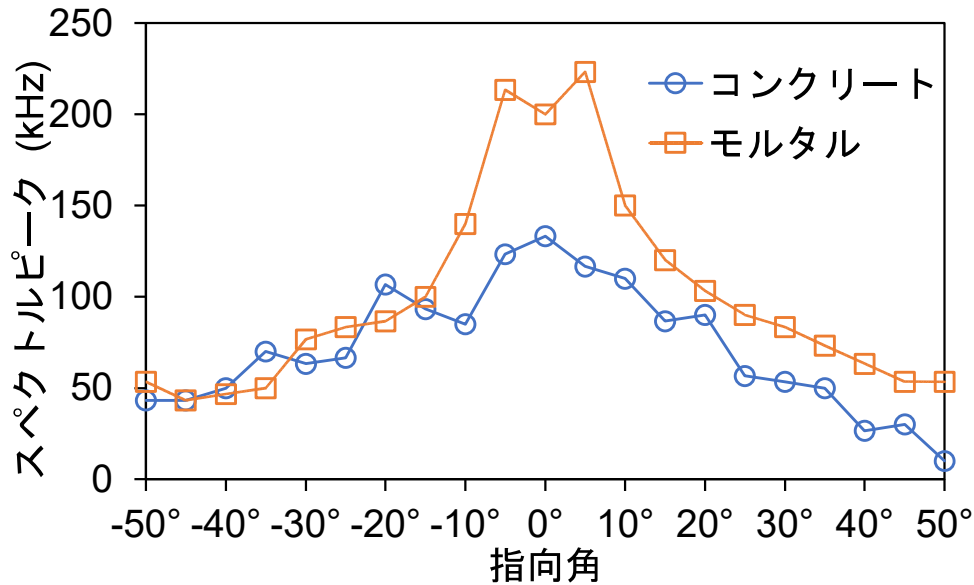


図 3-42 指向角と初動波のスペクトルピーク

図 3-42 よりモルタル供試体においては $-5^{\circ}$  ～ $5^{\circ}$  の範囲で 200 kHz 以上のスペクトルピークがみられ、指向角が増減するにつれてピーク周波数が低下した。これより、発信波は 200 kHz 程度の高周波帯域においては指向性（直進性）が強く、周波数が低下するにつれて直進性が低下することがわかった。コンクリート供試体では指向角  $0^{\circ}$  でスペクトルピークが 130 kHz と最大となり、指向角が増減するにつれてスペクトルピークは概ね低下した。モルタル供試体と比べて指向角  $0^{\circ}$  時のスペクトルピークが低下した原因として、先述の粗骨材の影響が考えられる。一般に骨材径と波長との関連が議論されるが、本研究においては、コンクリート供試体の弾性波伝播速度が 4500 m/s 程度であるため、130 kHz の弾性波の 1 波長は 35mm となり、粗骨材の最大寸法 20 mm の 1.8 倍程度に相当する。一方、モルタル供試体でみられたような 200kHz 以上の周波数では、弾性波の 1 波長が 20mm 以下となることから、粗骨材による散乱現象により減衰したものと考えられる。

#### 3.4.4 まとめ

ここでは WUT における超音波探触子からの発信波の伝播特性，特に指向性（直進性）を調べるため，コンクリートおよびモルタル製の半円柱状供試体を用い，平面中央に発信探触子をセットした上で，受信側として曲面に LDV の照射位置を変えながら計測を行った．ここで得られた結論を以下に列挙する．

- ① モルタル中を伝播する発信波の指向性（直進性）が著しい．コンクリート中では粗骨材による散乱減衰の影響により，モルタルに比べて発信波の指向性（直進性）が低下する．
- ② モルタル・コンクリートのいずれにおいても，透過波として有意な信号をノイズ振幅の 2 倍以上とすると，発信波は概ね  $-30^{\circ}$  ～  $30^{\circ}$  の範囲に拡散する．
- ③ 指向角が小さくなるにつれ初動波のスペクトルピークが高くなることから，高周波帯域の発信波の指向性（直進性）が高いことが検証できた．

以上，本検討により粗骨材の散乱現象はみられるものの，WUT による発信波（弾性波）は高い直進性をもって伝播することが示された．

## 3.5 弾性波の伝播経路に関する検討

### 3.5.1 概要

WUT ではシース反射波等のピーク周波数において、PC グラウトの有無を判別しているため、シース反射波の伝播経路を把握することは重要である。弾性波伝播経路の途上に切り込みを入れ、シース反射波の挙動を調べることにより実験的に弾性波伝播経路の特定を試みた。同時に、探触子間隔がシース反射波に与える影響を検討するために、探触子間隔を 97～500mm 間で段階的に設定した。

また、弾性波の伝播形態は縦波 (P wave) と横波 (S wave) の他に、表面に沿って伝播するラブ波 (Love wave) またはレイリー波 (Rayleigh wave) といった表面波が存在する [Lay,1995]。これら波動の伝播モデルを図 3-43 に示す。

コンクリート部材において鋼球による打撃といった機械的衝撃によって入力された弾性波は、エネルギーの 7%は縦波、26%は横波、67%はレイリー波となって伝播する [Graff, 1975]。WUT 探触子は圧電効果により弾性波を入力するため、機械的な入力とは異なるが、探触子を近接させて計測した場合、勢力が大きいといわれ、表層を伝播するレイリー波が、受信波に大きな影響を与えることが懸念される。レイリー波は、切り込みを入れることで伝播を阻害できる [吉井, 1971 ; 奥出, 2021] ため、コンクリート表層に切り込みを入れながら計測することで、探触子間距離を近づけた場合の表面波 (レイリー波) の影響を調べた。



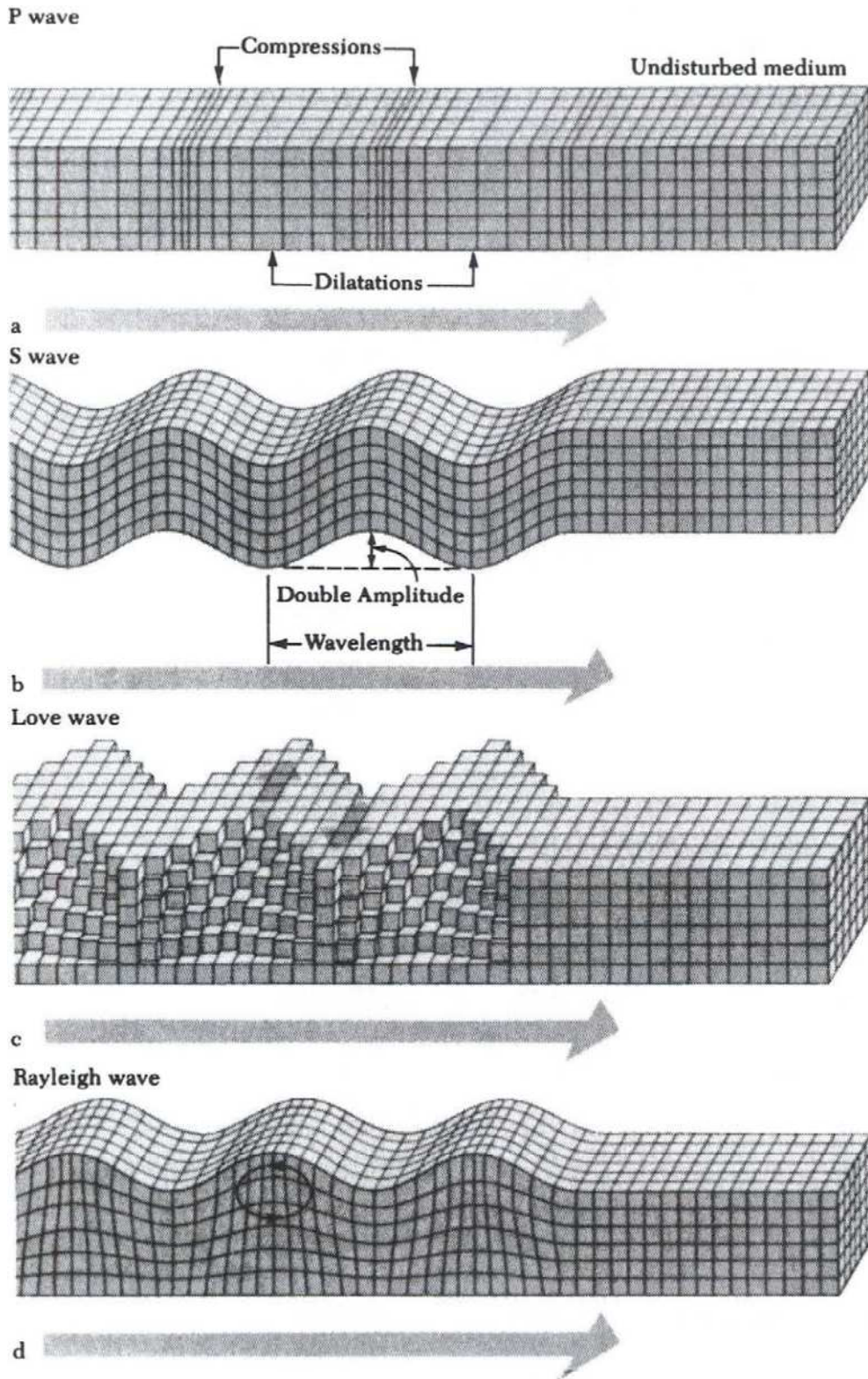


図 3-43 各モードの波動伝播モデル

[Lay, 1995]

### 3.5.2 検討に用いた供試体

本研究では、850×350×250mmの直方体のコンクリート製供試体を2体用いた。1体は、長手方向にφ65mm鋼製シース（グラウト充填率100%）を有しており、もう1体はシースを入れておらず、コンクリートと鉄筋のみである。供試体の概要を図3-44および図3-45に示す。切り込みを入れることを考慮して、長手方向の鉄筋かぶり厚は、シースかぶり厚と同一とした。

コンクリートの配合条件を表3-5に示す。作製したコンクリート（50-15-20H）には早強ポルトランドセメント、高性能減水剤（I種）を用いた。空気量の実測値は4.2%であった。なお、実験時のコンクリートの材齢は8か月であり、28日強度は53.4 N/mm<sup>2</sup>であった。

また、シースの内部にはPC鋼材として径15.2mmの鋼より線を8本用い、PCグラウトには水材料比36%の超低粘性型のプレミックス材を用いた。

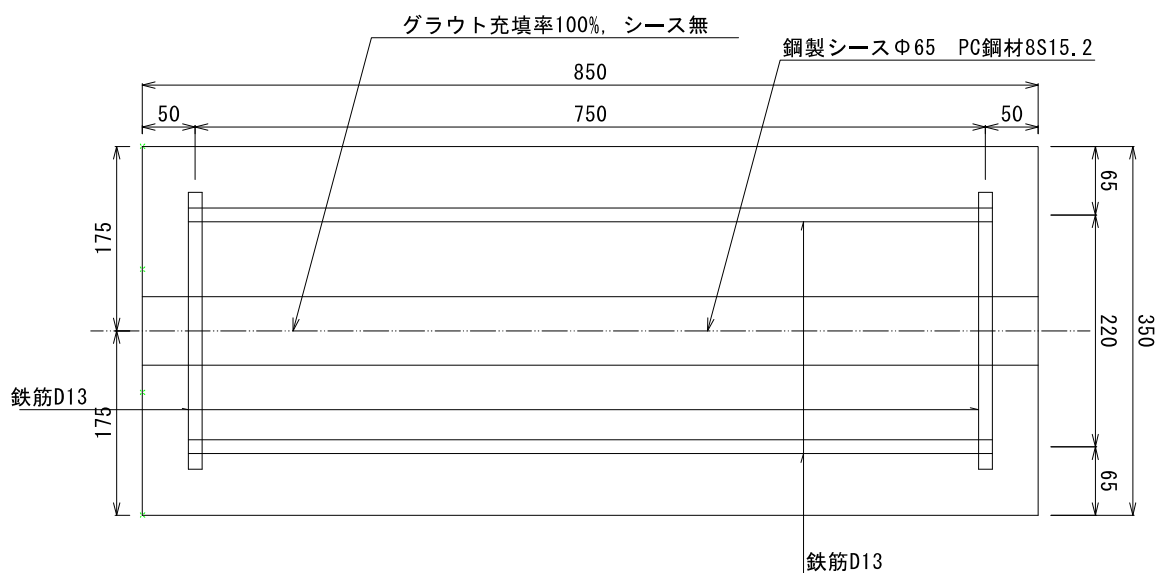


図 3-44 供試体概要図（平面図）

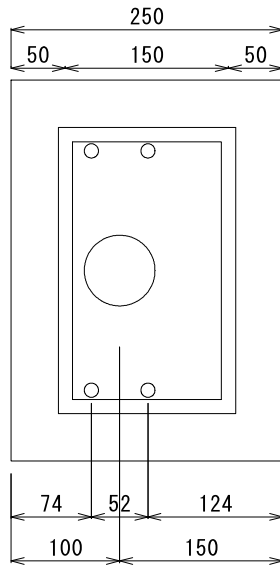


図 3-45 供試体概要図 (断面図)

表 3-5 供試体の配合条件

種別	スランプ (cm)	Gmax (mm)	W/C %	単位量(kg/m <sup>3</sup> )				
				W	C	S	G	AD
コンクリート	15	20	36.0	156	433	730	1102	2.68

### 3.5.3 シース反射波に関する検討

#### (1) 測定方法

図 3-46 に示すような配置で探触子間隔を 97, 117.5 (シースかぶり深さ), 200, 235 (シースかぶり深さの 2 倍), 300, 400, 500mm と変化させて計測した。計測は 1 状況につき 2 回行い、発信探触子と受信探触子を入れ替え 2 回、計 4 回行った。計測終了後、順次コンクリートカッターを用いて切り込みをいれ、最大切り込み深さは、コンクリートカッターの最大切削能力 60mm とした。なお、本計測に限り、サンプリング周波数は 2.5MHz となっている。探触子配置状況ならびに切削位置を図 3-46 に示す。

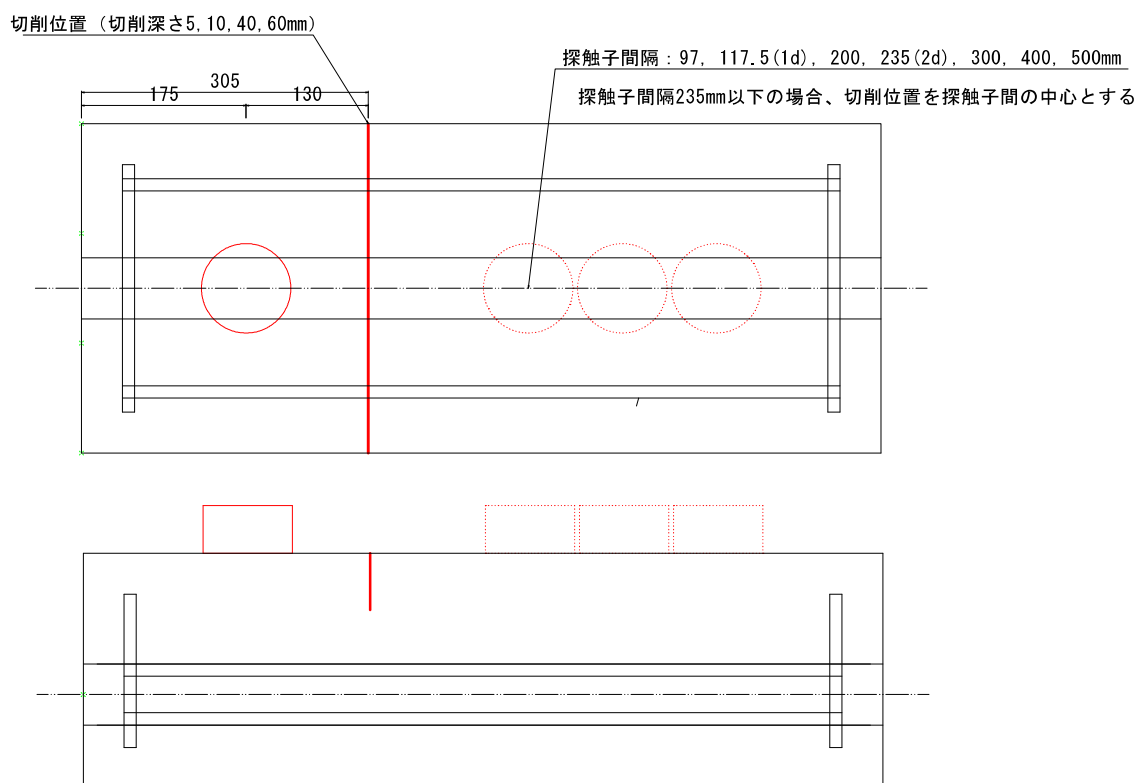


図 3-46 測定位置, 切り込み位置概要図

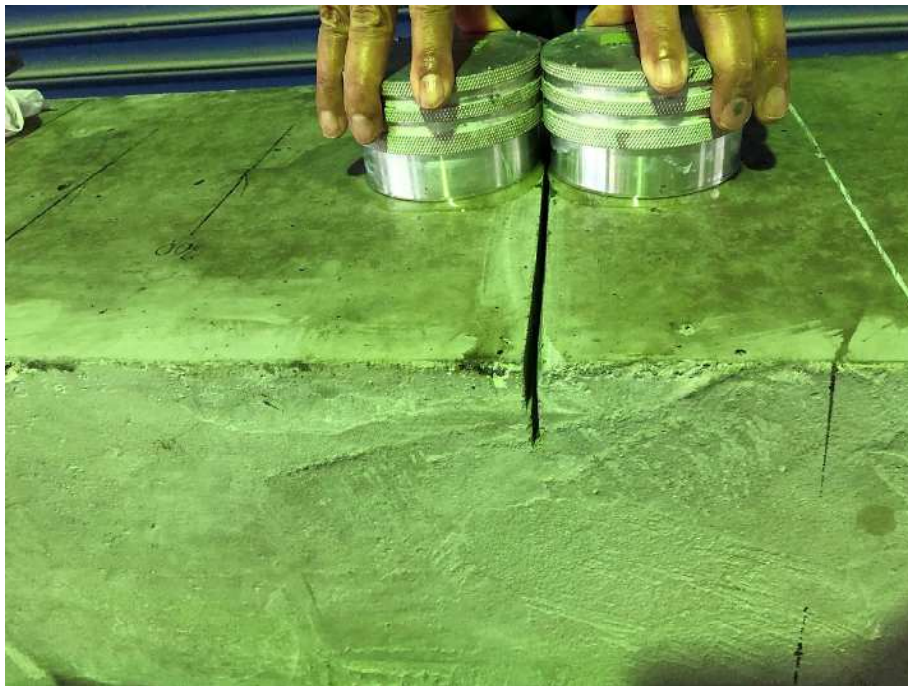
また、弾性波伝播速度を表 3-6 に示す。

表 3-6 弾性波伝播速度

供試体	弾性波伝播速度 (m/s)
シース無し	4854
充填シース	4854



(a) 切り込み切削状況



(b) 切り込みを挟んだ測定状況

写真 3-4 切り込み供試体測定状況

(2) 測定結果および考察

受信波形（時系列波）よりシース反射波の有無を確認した。シース反射波起生の確認方法は、まず切り込みのない状態の充填シースを有する供試体の測定結果において、式 (3.5.1) に示すシース縦波反射波、または式 (3.5.2) に示すシース反射時に横波にモード変換した反射波（以降、モード変換波とする）起生相当時刻に有意な反射波が確認され、かつ同様のシース無し供試体の測定結果において、同時時間帯に有意な反射波がみられない場合に、“シース反射波有”とし、“それ以外を”シース反射波無“とした。

$$t_r = \frac{2}{V_p} \times \sqrt{\left(\frac{a}{2}\right)^2 + C_d^2} \quad (3.5.1)$$

$$t_r = \left(\frac{1}{V_p} + \frac{1}{V_s}\right) \times \sqrt{\left(\frac{a}{2}\right)^2 + C_d^2} \quad (3.5.2)$$

ここに、 $a$ ：探触子間隔、 $C_d$ ：シースの純かぶり深さ、 $V_p$ ：コンクリートの縦波弾性波伝播速度、 $V_s$ ：コンクリートの横波弾性波伝播速度（縦波弾性波伝播速度の60%）

探触子間距離、反射角およびシース反射波の有無を表 3-7 に示す。なお、反射角とは、シース反射波の伝播経路を最短距離とした場合の反射波の角度を指す。図 3-47 に反射角の概要を示す。

表 3-7 探触子間距離ごとのシース反射波の有無（切り込み無）

探触子間距離(mm)		97	117.5	200	235	300	400	500
反射角(°)		22	27	40	45	52	60	65
シース反射波の有無	縦波	有	有	無	無	無	無	無
	モード変換波	無	無	有	有	無	無	無

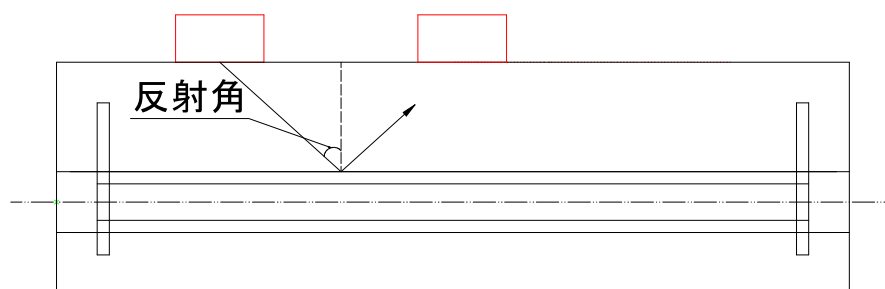


図 3-47 反射角概要図

表 3-7 より反射角  $27^\circ$  以下の場合、シース反射波の起生が確認され、反射角  $40\sim 45^\circ$  の範囲でモード変換波の起生が確認された。また反射角  $52^\circ$  以上となるとシース反射波の起生は確認できなかった。

受信波形（時系列波）の一例を以下に示す。

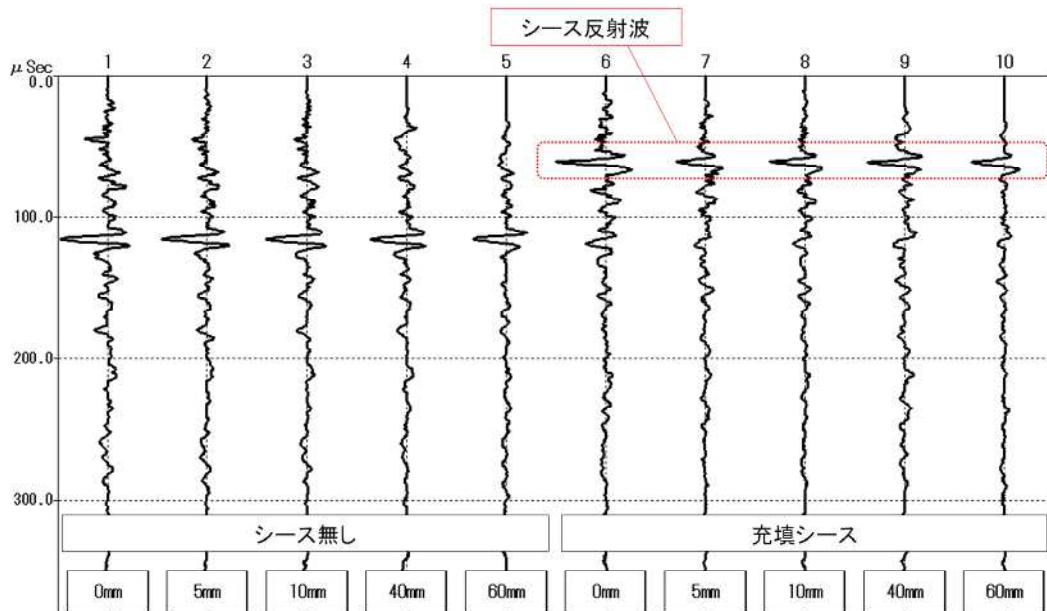


図 3-48 探触子間隔 100mm 時系列波

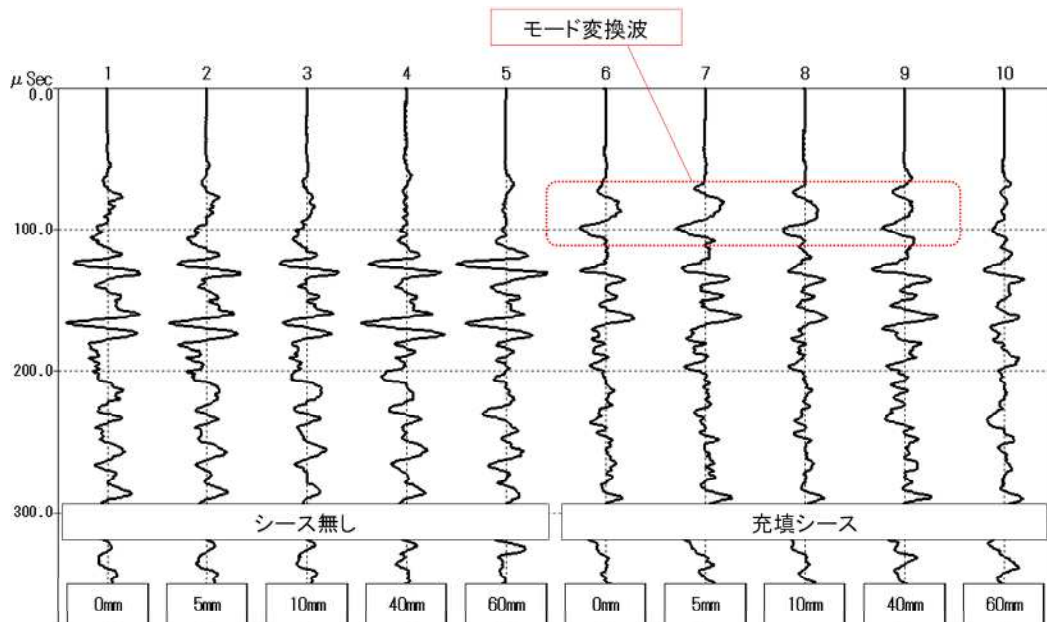


図 3-49 探触子間隔 235mm 時系列波

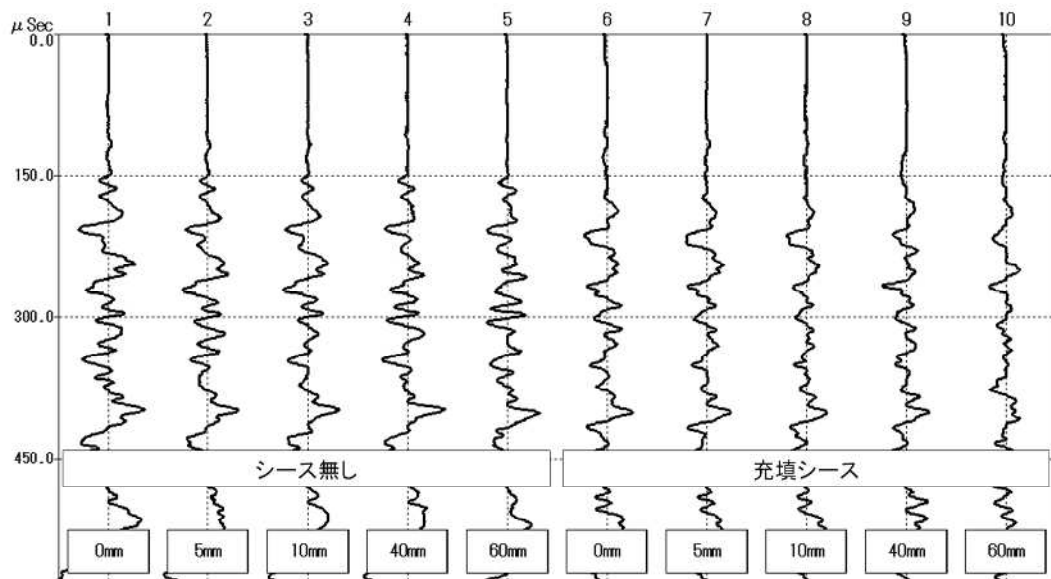


図 3-50 探触子間隔 500mm 時系列波

次に、シース反射波の伝播経路についての検討を行った。切り込み深さにより、シース反射波の起生に変化が起こるか観察した。その結果を表 3-8 に示す。

表 3-8 切り込み深さごとのシース反射波の有無

反射波 種類	探触子 間隔	切り込み深さ				
		0mm	5mm	10mm	40mm	60mm
縦波	97mm	有	有	有	有	有
	117.5mm	有	有	有	有	有
モード変換波	200mm	有	有	有	有	無
	235mm	有	有	有	有	無

表 3-8 によると探触子間隔 97mm および 117.5mm（シース縦波反射波）では、切り込み深さ 60mm になってもシース反射波の起生が確認された。一方、探触子間隔 200mm および 235mm（モード変換波）では切り込み深さ 60mm の際にシース反射波は生じなかった。ここで、シース反射波の経路が探触子間の中心で反射する最短経路の場合、深さ 60mm の切り込みはシース反射波に影響を及ぼさないと想定される。しかしながら、シース反射波の起生は確認できなかったため、シース反射波の経路上に切り込みがあったと推測される。そこで、探触子直下に伝播し、シースに反射して受信探触子に到達する経路（以降、直進経路とする）



を考える。図 3-51 に探触子間隔 235mm，切り込み深さ 60mm のシース反射波経路の模式図を示す。

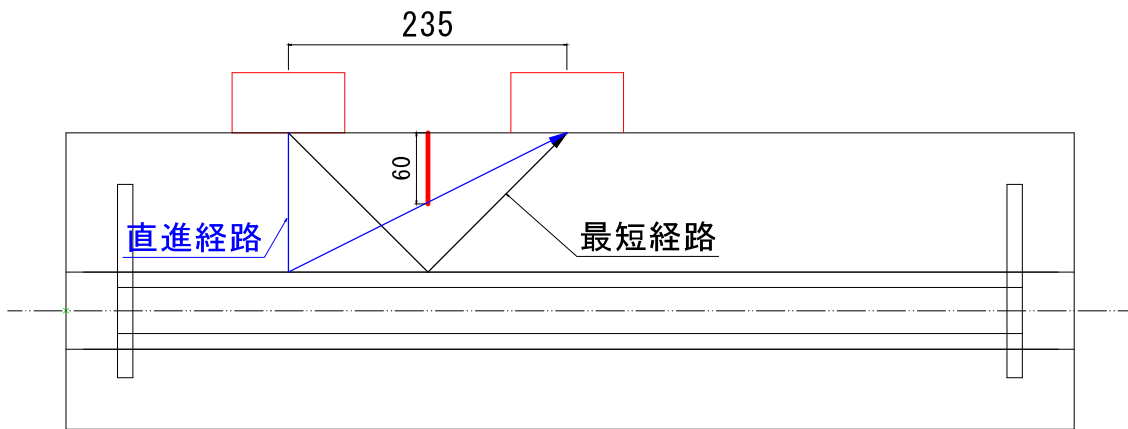


図 3-51 探触子間隔 235mm のシース反射波経路模式図

図 3-51 より，直進経路では切り込みに干渉することがわかる。これより，切り込み深さ 60mm の際にモード変換波を確認できなかったため，モード変換波の伝播経路は直進経路であったと推測される。

図 3-52 に探触子間隔 97mm のシース反射波経路模式図を示す。

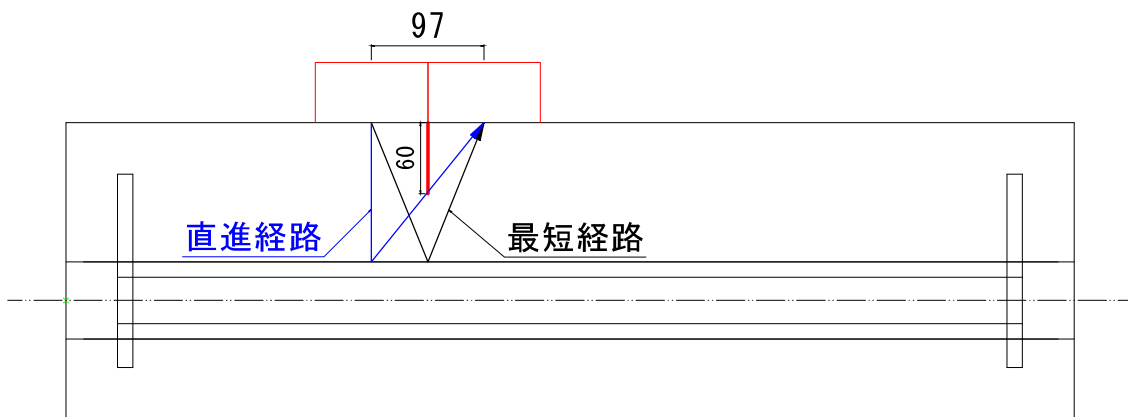


図 3-52 探触子間隔 97mm のシース反射波経路模式図

図 3-52 より，直進経路では切り込みに干渉することがわかる。しかし，切り込み深さ 60mm の際にシース反射波が明確に確認されたことより，シース反射波経路は切り込みに干渉していないと考えられる。これより，シース縦波反射波の伝播経路は，最短経路であると推測される。

### 3.5.4 表面波（レイリー波）に関する検討

#### (1) 測定方法

3.5.3 に示す実験の中より，充填シースの供試体を探触子間隔 97mm とし，切り込み深さを変えて計測したデータを用いて検討した．

#### (2) 測定結果および考察

測定により得られた時系列波を図 3-53 に示す．

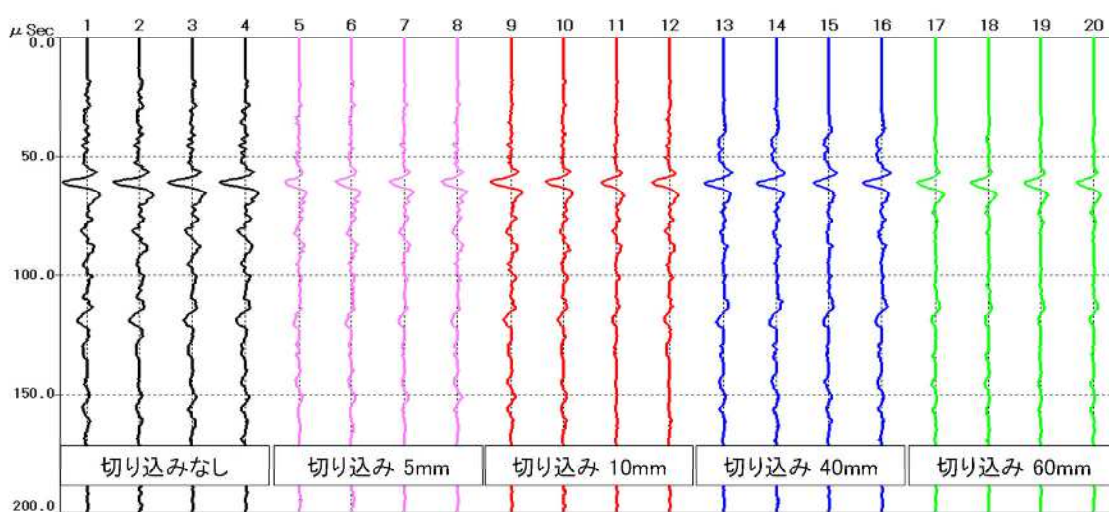


図 3-53 時系列波（探触子間距離 97mm）

Sansalone ら [1997] によるとレイリー波の伝播速度 ( $V_R$ ) は式(3.5.3)で表され，ポアソン比 ( $\nu$ ) が 0.2 の場合  $V_R$  は縦波弾性波伝播速度 ( $V_P$ ) の約 0.56 倍となる．

$$V_R = \frac{0.87 + 1.12\nu}{1 + \nu} \sqrt{\frac{1 - 2\nu}{2(1 - \nu)}} V_P \quad (3.5.3)$$

供試体の縦波弾性波伝播速度は 4854m/s であるので，レイリー波の伝播速度は 2718m/s となる．探触子間隔 ( $a$ ) を 97mm とした場合，レイリー波の到達時間は 35.6 $\mu$ s となる．また，シースかぶり深さ ( $C_d$ ) が 117.5mm であるので，反射波到達時間  $t_r$  は式(3.5.1)によると 48.4 $\mu$ s となる．

シース反射波到達時間 ( $t_r$ ) がレイリー波の到達時間に比べ遅いため， $t_r$  までの時間にレイリー波は含まれている．これより， $t_r$  以前の初動部の電圧値の最大値（絶対値）を求めた．

また、シース反射波到達時間後 1 周期相当の最大電圧値（絶対値）を求め、これをシース反射波の最大電圧値とした。切り込み深さと、初動部およびシース反射波の最大電圧値との関係を図 3-54 に示す。

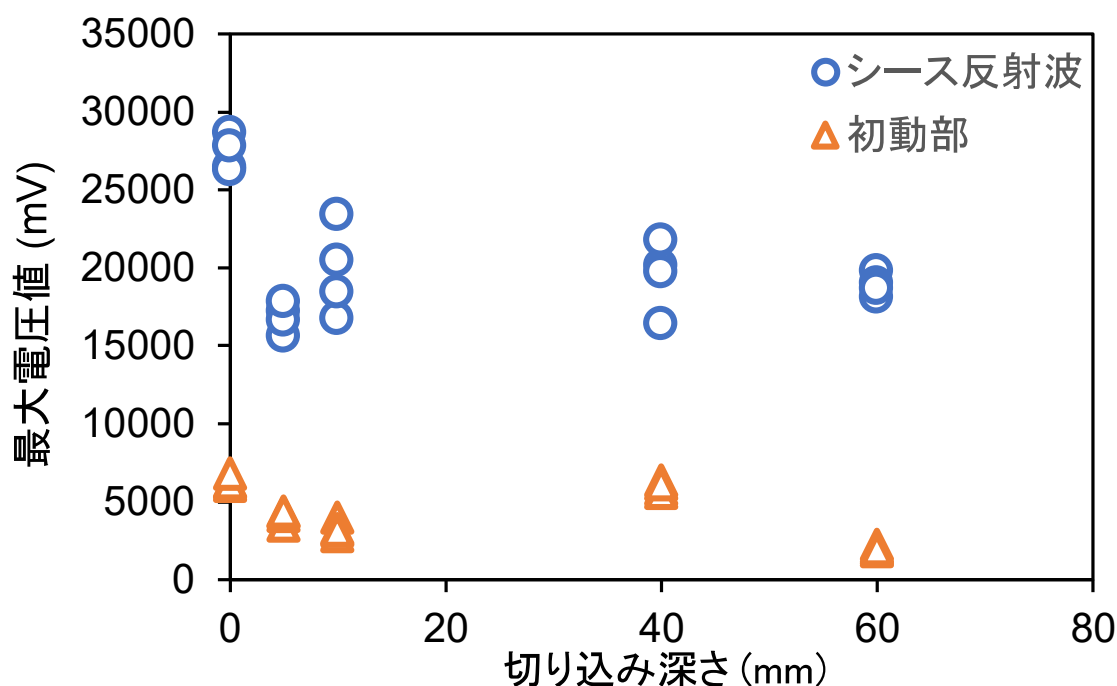


図 3-54 切り込み深さと初動部およびシース反射波の最大電圧値

図 3-54 によるとシース反射波の電圧値は、ばらつきはあるものの切り込み深さによらず概ね一定である。一方、初動部の電圧値は切り込み深さ 40mm を除き切り込み深さが増えるにつれて低下している。切り込みによりレイリー波の伝播が阻害されたものとし、初動部において切り込み無と切り込み深さ 60mm の差分をレイリー波の電圧値としたところ約 4,300mV となった。一方、シース反射波の電圧値は測定状況により約 16,000mV~28,000mV までの変動があった。以上より、レイリー波の電圧値はシース反射波の変動幅の約 1/3 と小さいため、無視できると考えられる。

レイリー波の電圧値が小さい原因として、①発信波の指向性（直進性）が高いこと、②受信探触子の径が大きいことなどが考えられる。

- ① 発信波の指向性が高いと、水平方向に伝播する表面波成分は小さくなると考えられる。
- ② レイリー波は図 3-43 に示すように上下方向の振動と水平方向の振動からなり、進行方向と逆回転の楕円を描くような挙動を示す。このような複雑な動きをするため、受信面積が大きくなれば位相の異なる成分を同時に受信することになり、電圧値が低減すると考えられる。

また、切り込み深さ 40mm の時に初動部の電圧値が増加した。図 3-53 によると切り込み深さ 40mm の場合のみにシース反射波起生の直前に長周期の波動が確認できる。この波動が生じた原因として、図 3-55 に示すような切り込みを回折した縦波弾性波（回折波）の影響が考えられる。ひび割れ回折波を利用した弾性波によるひび割れ深さの調査は一般的に用いられている。そのため、回折波が生じたものと推測される。なお、切り込み深さ 60mm 時のひび割れ回折波は、シース反射波に混入したため、時系列波上で確認できなかったものと推察する。また、切り込み深さ 5, 10mm の際は、切り込み深さが波長より短かったため、回折波は生じなかったものと推察する。

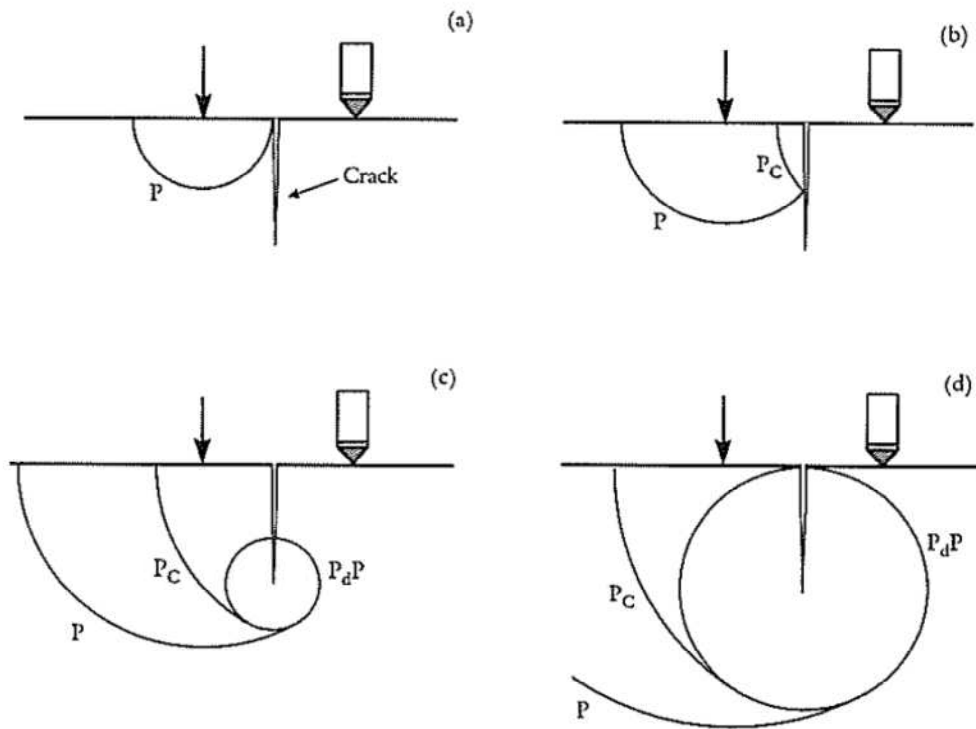


図 3-55 ひび割れ回折波の伝播挙動

[Sansalone ら, 1997]

### 3.5.5 まとめ

ここでは、弾性波伝播経路の途上に切り込みを入れ、シース反射波の挙動に着目することにより、実験的に弾性波伝播経路の特定を試みた。同時に、探触子間隔がシース反射波に与える影響を検討するために、探触子間隔を変化させた。

また、探触子を近接させて計測した場合、表層を伝播するレイリー波が、受信波に大きな影響を与えることが懸念される。コンクリート表層に切り込みを入れながら計測することで、探触子間距離を近接させた場合の表面波（レイリー波）の影響を調べた。

ここで得られた結論を以下に列挙する。

- ① 反射角  $27^\circ$  以下の場合、シース縦波反射波が生じ、反射角  $40\sim 45^\circ$  の範囲でシース反射時に横波に変換されるモード変換波が生じた。また反射角  $52^\circ$  以上になるとシース反射波は生じなかった。
- ② シース縦波反射波は探触子の中心で反射する伝播経路（最短経路）を、モード変換波は発信探触子直下に伝播しシースに反射して受信探触子に到達する経路（直進経路）をとることが示唆された。
- ③ モード変換波はシース縦波反射波に比べ、コンクリート中の障害物の影響を受けやすいことが示唆された。そのため、シース縦波反射波を評価することの有用性が窺えた。
- ④ 探触子間隔を近接（97mm）させた計測において、レイリー波の電圧値はシース反射波電圧値の変動幅の約  $1/3$  と小さいため、無視できる。

以上より、シース反射波を捉えるために探触子間隔を近接させて計測することの妥当性が示された。また、この時のシース反射波の伝播経路は、最短経路とすることの妥当性が窺えた。

### 3.6 第3章のまとめ

本章においては、WUT探触子から発せられる弾性波の挙動を明らかにするための検討を行った。各種供試体を用いて検討を行った結果、以下のことが明らかとなった。

- (1) 直角二等辺三角形断面を有する供試体を用いて、発信波が同心円状に拡散されるという前提のもと探触子間隔をシースかぶり深さの2倍とする先行研究の検証を行った。その結果、発信波の直進性は高く、探触子間隔を指向角 $45^{\circ}$ 以内に設定することの妥当性が窺えたが、供試体形状に起因する問題により正確な入射弾性波の指向性は把握できなかった。
- (2) レーザードップラー振動計(LDV)を用いて発信探触子を直接計測した結果、発信波が $240\text{kHz}$ 以下の帯域において平坦な周波数特性を持つことが示された。また、半円柱状のモルタルおよびコンクリート製の供試体を用い受信側にLDVを用いた検討を行った。その結果、モルタル・コンクリートのいずれにおいてもWUT探触子から発せられる発信波は概ね $-30^{\circ} \sim 30^{\circ}$ の範囲に拡散し、高い直進性をもって伝播していた。
- (3) 探触子間隔を変え、さらにコンクリート供試体に切り込みを入れながら計測することで、コンクリート中を伝播するシース反射波の経路、ならびに探触子間隔がシース反射波に及ぼす影響についての検討を行った。その結果、反射角 $27^{\circ}$ 未満の場合、シース反射波の起生し、反射角 $40 \sim 45^{\circ}$ の範囲でシース反射波時に横波に変換されるモード変換波が起生した。また、シース縦波反射波は探触子の中心で反射する伝播経路(最短経路)を、モード変換波は発信探触子直下に伝播しシースに反射して受信探触子に到達する経路(直進経路)をとることが示唆された。
- (4) モード変換波はシース縦波反射波に比べ、コンクリート中の障害物の影響を受けやすいことが示唆された。そのため、シース縦波反射波を評価することの有用性が窺えた。
- (5) 探触子間隔を近接させた計測において、コンクリート表層に切り込みを入れながら計測することで、表面波(レイリー波)の影響を調べた。その結果、レイリー波の電圧値はシース反射波電圧値の変動幅の約 $1/3$ と小さく無視できることがわかった。

### 第3章の参考文献

- K.F. Graff, Wave Motion in Elastic Solids, Clarendon Press, Oxford, p.356, 1975.
- Thorne Lay, Terry C. Wallace, Modern Global Seismology, International Geophysics, Vol.58, p.18, 1995.
- Sansalone, M.J., Streett, W.B., Impact-Echo, Bullbrier Press, Ithaca, N.Y., p.70, 1997.
- 五十嵐寿一編：音響と振動，実験物理学講座 9，pp.326-327，1968.
- 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，V-44/No.627，pp.223-238，1999.
- 大島義信：コンクリート透過弾性波におけるコーダ干渉波の減衰特性，土木学会論文集 A2（応用力学），Vol.69，No.2，pp.769-775，2013.
- 奥出信博：Rayleigh 波の伝播特性を利用したコンクリートひび割れ補修材の充填評価に関する研究，京都大学大学院博士論文，2021.
- 鎌田敏郎，内田慎哉：コンクリートの非破壊試験の理論と実際 3 弾性波法（超音波法・衝撃弾性波法）の理論と実際，コンクリート工学，Vol.51，No.4，pp.340-347，2013.
- 電子技研工業 HP：製品情報 レーザドップラ振動計 V100 シリーズ 測定原理：<http://www.denshigiken.com/product/v100/principle.html>，アクセス日 2023/10/1 13:00
- 福島邦治：広帯域超音波法（WUT）を用いた PC グラウト充填調査の適用性と精度向上に関する研究，山口大学大学院創成科学研究科博士論文，2021.
- 吉井敏尅：溝によるレイリー波の減衰，地震，第2輯，第24巻，pp.70-71，1971

# 第4章 弾性波の伝播挙動に基づいた判定手法に関する検討

## 4.1 はじめに

第3章の検討により，WUT探触子から発せられる弾性波の直進性が強く，また探触子を近接させた（探触子間隔を最小の97mmとした）場合に明確なシース反射波を捉えられ，かつ表面波の影響は無視できるものであった．これらは，探触子を近接させた計測の有用性を示唆している．第3章の検討により得られた知見をまとめたものを図4-1に示す．

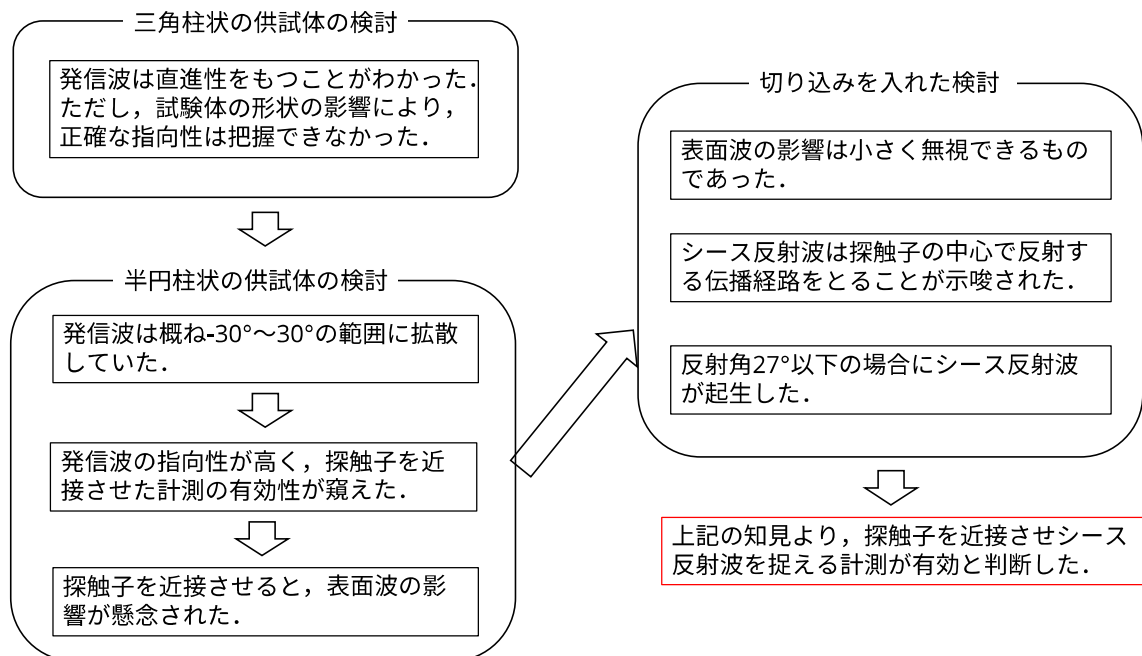


図 4-1 第3章で得られた知見のまとめ

WUTの既往手法は，受信波中のシース反射波起生相当時刻を窓関数により切り出し，FFTにより得られるピーク周波数によってグラウトの有無を判定する．本研究は，既往手法と組み合わせることによる探査精度の向上を図るものであるため，既往手法の周波数による評価と異なる観点からの評価が望ましい．そこで本章では，探触子を近接させて計測して得られるシース反射波の時系列データに着目する新しい判定手法の提案を試みた．



本章の構成を以下に示す.

4.2 においては, 新規判定手法を提案し, その詳細を示した.

4.3 においては, 先行研究で用いられた供試体を用い, 新規判定手法の有用性を確認した.

4.4 においては, 建設中の PC 橋梁で, PC グラウト未充填時と PC グラウト充填後の 2 回計測し, 実構造物において PC グラウトの有無が測定結果に及ぼす影響を調べた.

4.5 においては PC グラウト未充填区間を有する実物大供試体に本判定手法を適用し, 未充填区間の検出を試みた.

以上の検討により新規判定手法の提案ならびにその妥当性の検証を試みた.

## 4.2 新規判定手法の提案

弾性波の反射は、異なる媒質の境界面で生じる現象である。図 4-2 に示すように弾性波が媒質 I から媒質 II に入射する場合、境界面において反射または透過、あるいはこれらの現象が同時に生じる。波の反射は、反射音圧比  $r_p$  により決まる。式 (4.2.1) のその算定式を示す [鎌田ら, 2013]。

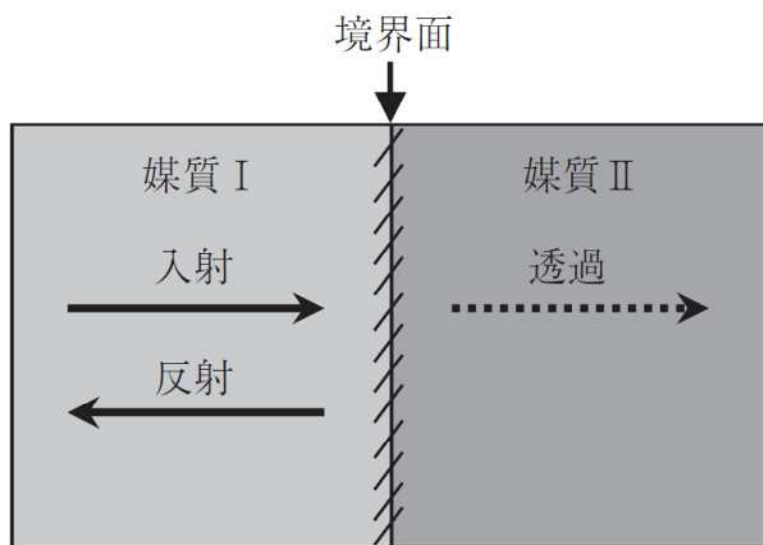


図 4-2 弾性波の反射および透過

[鎌田ら, 2013]

$$r_p = \frac{|Z_2 - Z_1|}{Z_1 - Z_2} \quad (4.2.1)$$

ここに、 $Z_1$  : 媒質 I における音響インピーダンス ( $Z_1 = \rho_1 V_1$ ),  $\rho_1$  : 媒質 I の密度,  $V_1$  : 媒質 I の弾性波伝搬速度,  $Z_2$  : 媒質 II における音響インピーダンス ( $Z_2 = \rho_2 V_2$ ),  $\rho_2$  : 媒質 II の密度,  $V_2$  : 媒質 II の弾性波伝搬速度

媒質 I がコンクリート、媒質 II が空気の場合では、反射音圧比  $r_p$  は約 1.0 となり、入射された波は境界面においてほぼ 100% 反射する。一方、媒質 I がコンクリート、媒質 II が PC グラウトの場合、双方の音響インピーダンスが近似しているため、入射された波の多くは境界面を透過する。そのため、シース反射波は PC グラウト未充填時には大きく、PC グラウト充填時には小さくなると想定される。なお、実際にはコンクリートと PC グラウト（または空洞）の間には金属シースが介在し、PC グラウト中には PC 鋼材が存在するため、シース反射波が生じる過程はより複雑になる。

後述する先行研究で用いた供試体において、探触子を隣接させて計測して得られた時系列波を図 4-3 に示す。未充填シースのデータは赤い線で、100%充填シースの計測データは青い線で示されている。図 4-3 によると最大電圧値（絶対値）は赤い線で示される未充填シースが僅かに青い線で示される充填シースを上回るが、その差は微細である。そこで、反射波の波形に着目した。最大電圧値を記録した前後のピーク値に着目すると、充填シースは最大値に比して約 1/3 以下と小さくなっているが、未充填シースは最大値の約 6 割程度あり明確な差が見て取れる。これより前後のピーク値も評価に含めるために、時系列波の積分値を求めることとした。

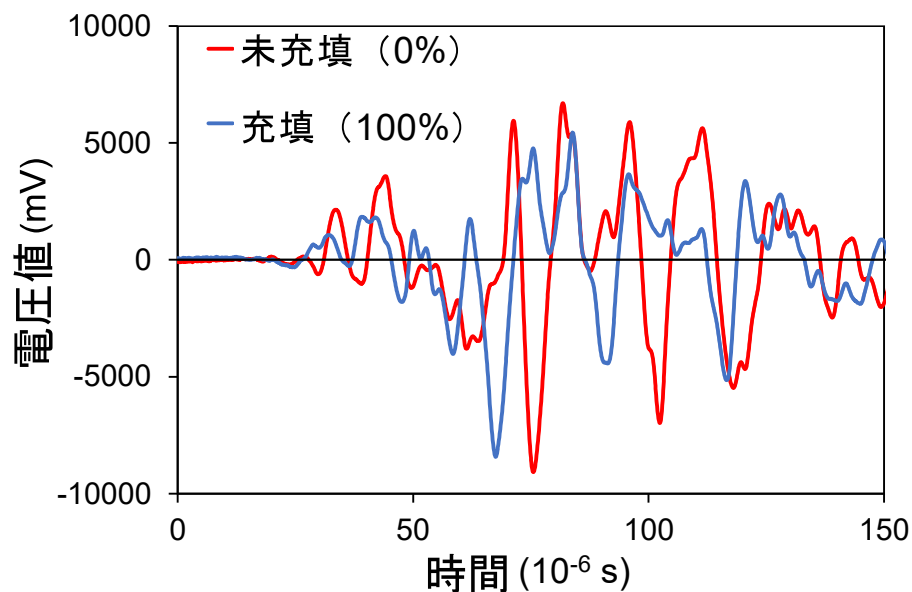


図 4-3 時系列波例

シーす反射波の強度を評価するにあたり、シーす反射波を確実にとらえ、かつ部材厚の端面反射波といった PC グラウト充填状況と無関係な反射波は除外されるのが望ましい。そこで、本研究ではシーす純かぶり深さ+シーす直径分の相当時刻を反射波到達時間  $t_r$  とし、受信波の起生から反射波到達時間  $t_r$  までの電圧値に着目した。反射波到達時間  $t_r$  の算出方法を式 (4.2.2) に示す。また、この時のシーす反射波の伝播経路を図 4-4 に示す。

$$t_r = \frac{2}{V} \times \sqrt{\left(\frac{a}{2}\right)^2 + (C_d + \varphi)^2} \quad (4.2.2)$$

ここに  $a$  : 探触子間隔,  $C_d$  : シーすの純かぶり深さ,  $\varphi$  : シーすの直径

$V$  : コンクリートの縦波弾性波伝播速度

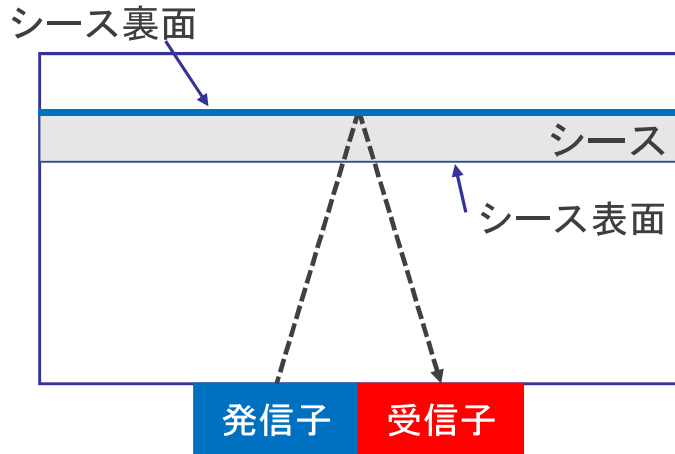


図 4-4 反射波到達時間計算時の伝播経路

さらに、シースかぶり厚（積分時間）の影響を低減させるために、積分値を積分時間で除した平均電圧値  $V_{av}$  を用いることとした。平均電圧値  $V_{av}$  は式 (4.2.3) により求まる。

$$V_{av} = \frac{1}{t_r} \cdot \int_0^{t_r} |V(t)| dt \quad (4.2.3)$$

以下に式 (4.2.3) の平均電圧値  $V_{av}$  の算出方法の詳細を示す。図 4-5 に示すように、任意の点 A における計測電圧値を  $V_A$ 、A に隣接する任意の点 B における計測電圧値を  $V_B$  としたとき、サンプリング間隔  $dt$  で積分した電圧値  $V_{A-B}$  は式 (4.2.4) により求まる。

$$V_{A-B} = \frac{|V_A + V_B|}{2} \times dt \quad (4.2.4)$$

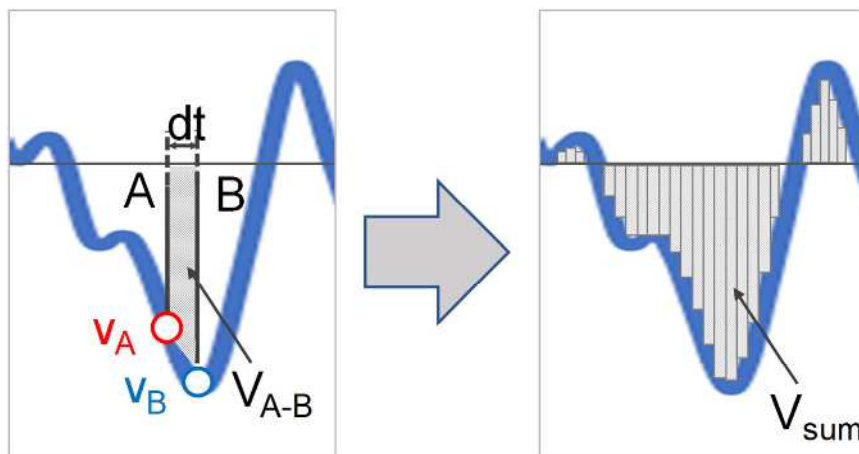


図 4-5 電圧値の算出法イメージ図

この時、計測データのサンプリング周波数が 10MHz であることより、 $dt$  は  $0.1\mu\text{s}$  となる。これより反射波到達時間  $t_r$  までの累積積分値  $V_{sum}$  は式 (4.2.5) で表される。

$$V_{sum} = \sum_{i=0.1}^{t_r} S_{N_i - N_{(i-0.1)}} \quad (4.2.5)$$

さらに累積積分値  $V_{sum}$  を積分時間  $t_r$  で除することにより、平均電圧値  $V_{av}$  を求めた。

$$V_{AV} = \frac{V_{sum}}{t_r} \quad (4.2.6)$$

図 4-6 に平均電圧値算出方法の概要図を示す。

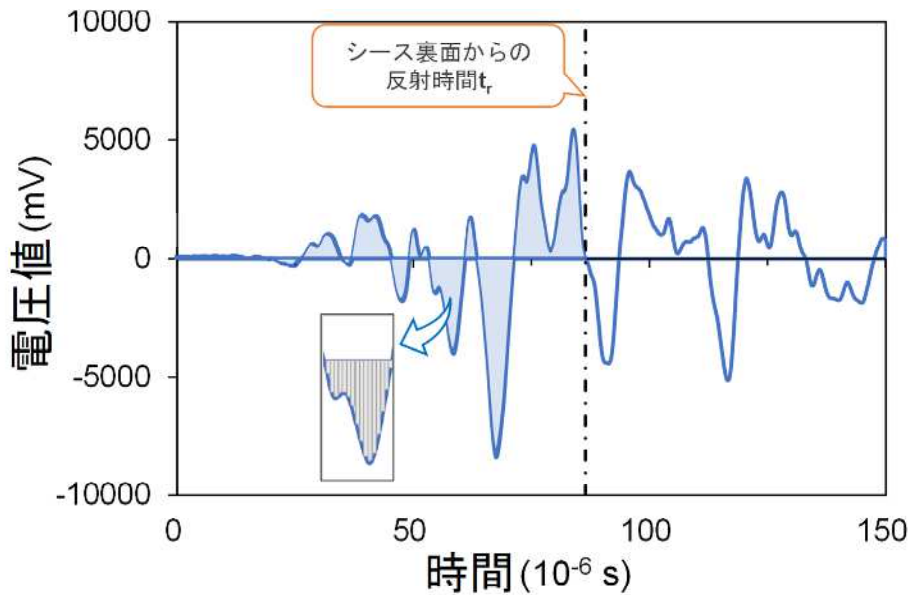
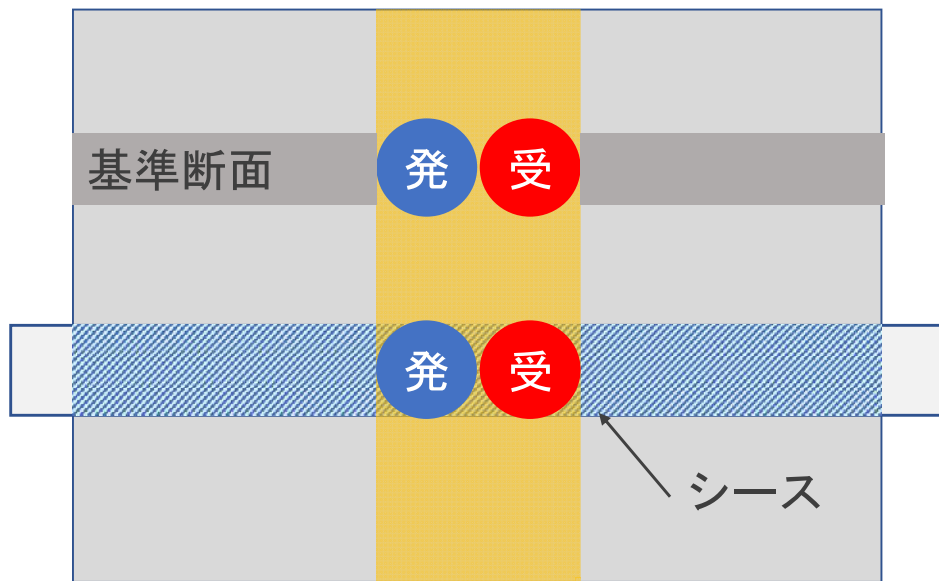
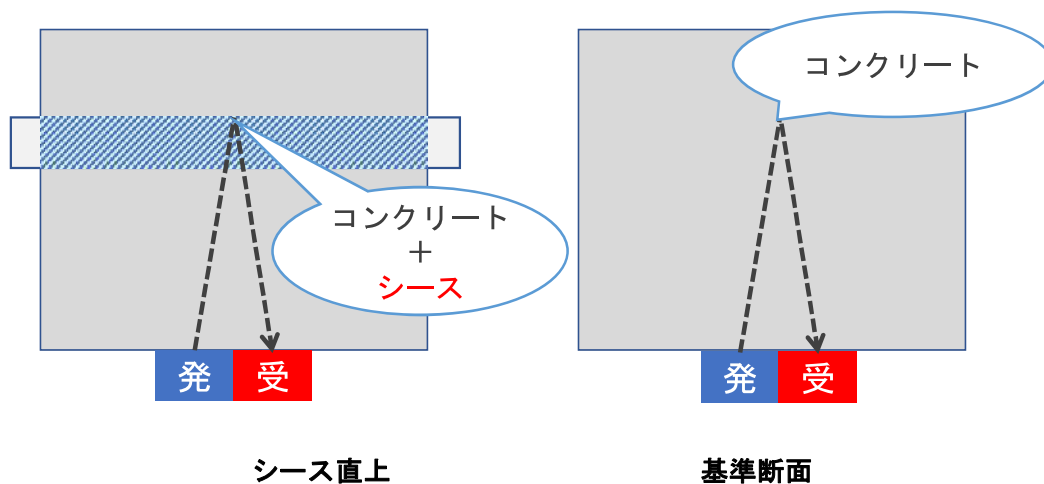


図 4-6 平均電圧値算出方法の概要図

計測で得られる時系列波は、PC グラウトの有無のみならず、主鉄筋やせん断補強鉄筋の径・形状（丸鋼または異形鉄筋）、コンクリートの諸特性（ヤング率やポアソン比など）や粗骨材の岩石種類・形状（砕石・天然骨材）など様々な要因により変化する。これら諸要因が時系列波に与える影響を解き明かすことは困難である。これより、こういった諸要因の影響を低減させるため、同一平面におけるシースが配置されていない箇所（以降、基準断面とする）を計測し、その電圧値との差分を求めることとした。



(a) 基準断面の計測位置



(b) 反射波のイメージ図

図 4-7 基準断面概要図

平均電圧値を求める時間積分の範囲は、時刻0から、シース裏面からの反射波起生相当時刻である。平均電圧値法概念図を図4-8に示す。

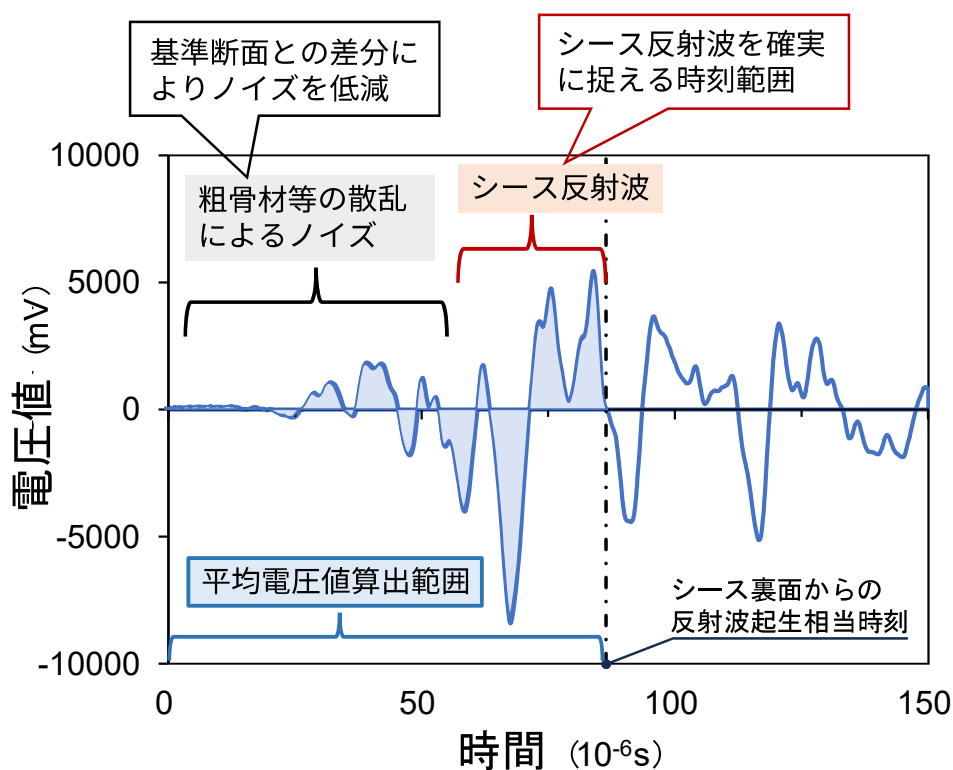


図 4-8 平均電圧値法概念図

図4-8に示すように平均電圧値算出範囲前半は主に粗骨材等の散乱によるノイズが支配的である。このノイズの影響を低減させるため、基準断面との差分（平均電圧値差）を評価する。また、シース反射波は、シース裏面からの反射波起生相当時刻まで平均電圧値を算出することにより、確実に捉えることができる。以上より、平均電圧値法を用いることで、シース反射波のエネルギーを的確に把握できると考える。

本計測の対象範囲は，第 3 章の検討で得られた発信波の指向性が概ね $-30^{\circ} \sim 30^{\circ}$ であったという知見より，発信探触子直下より概ね $-30^{\circ} \sim 30^{\circ}$ の範囲を計測していると考える．計測対象範囲の模式図を図 4-9 に示す．

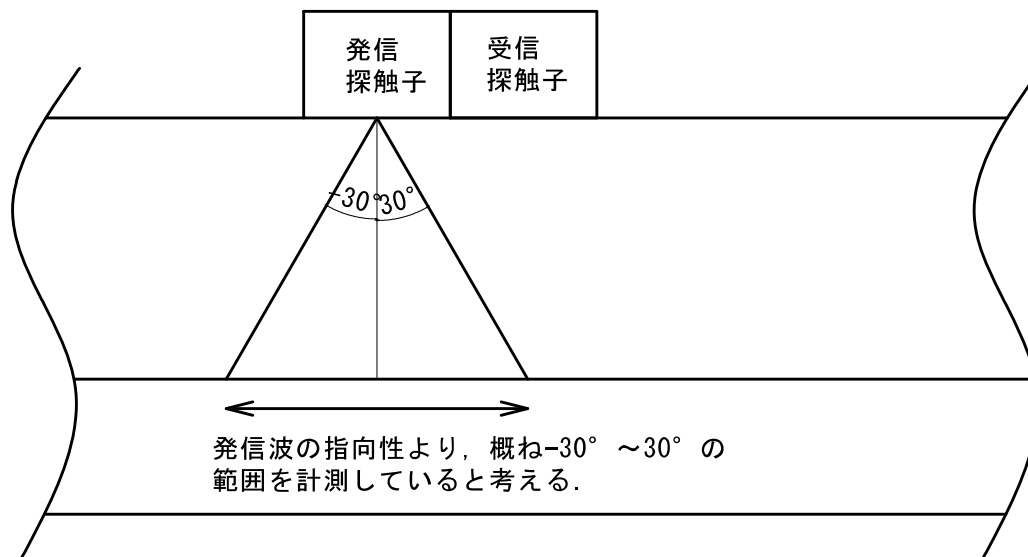


図 4-9 計測対象範囲模式図



### 4.3 コンクリート供試体を用いた検証試験

#### 4.3.1 概要

前述の新規判定手法の有用性を検証するため、先行研究で用いられた供試体を使用して実験を行った。

#### 4.3.2 検討に用いた供試体

本検証試験では、図 4-10 に示す 1500mm×1000mm×240mm のコンクリート供試体を 2 体用い、一方は未充填の、もう一方は PC グラウトが 100%充填された外径  $\phi 70$ mm の鋼製シースが埋設されている。なお、シース内に PC 鋼材は挿入されていない。コンクリートの配合を表 4-1 に示す。作製したコンクリートには早強ポルトランドセメント、高性能減水剤 (I 種) を用いた。骨材の最大寸法は 20mm であった。また、実験時のコンクリートの材齢は約 2 年であり、28 日強度は 62 N/mm<sup>2</sup> であった。

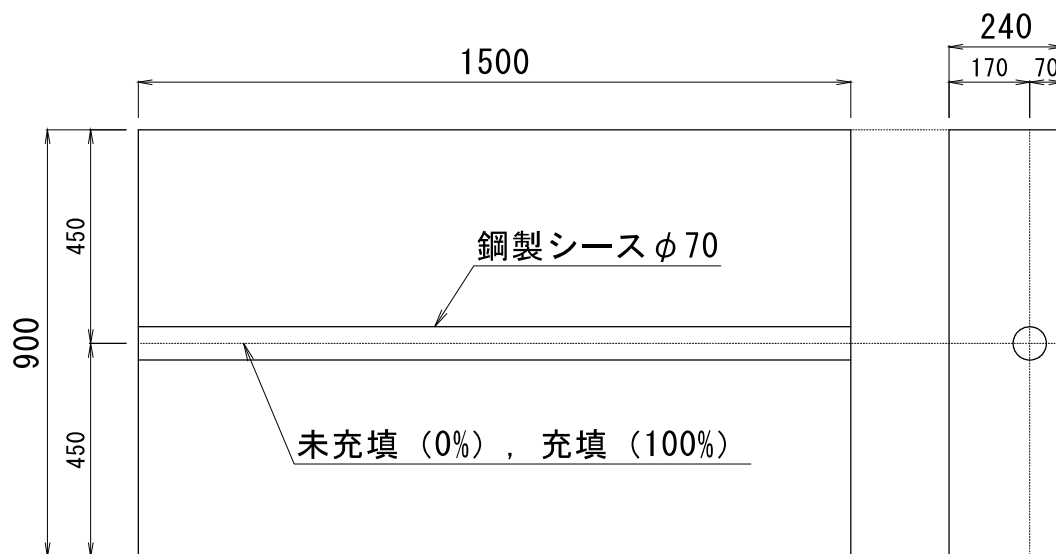


図 4-10 使用した供試体の概要

表 4-1 コンクリートの配合条件

コンクリート	W/C %	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				
		C	W	S	G	AD <sup>※</sup>
50-12-20H	36.0	420	151	731	1093	2.44

※：高性能 AE 減水剤



写真 4-1 供試体外観

### 4.3.3 実験方法

各供試体のシースカぶり厚が 135mm となる面の中央付近において、探触子を近接させてシース直上にて計測し、その後探触子を鉛直方向に移動させて基準断面の計測を実施した。測定状況イメージ図を図 4-11 に示す。

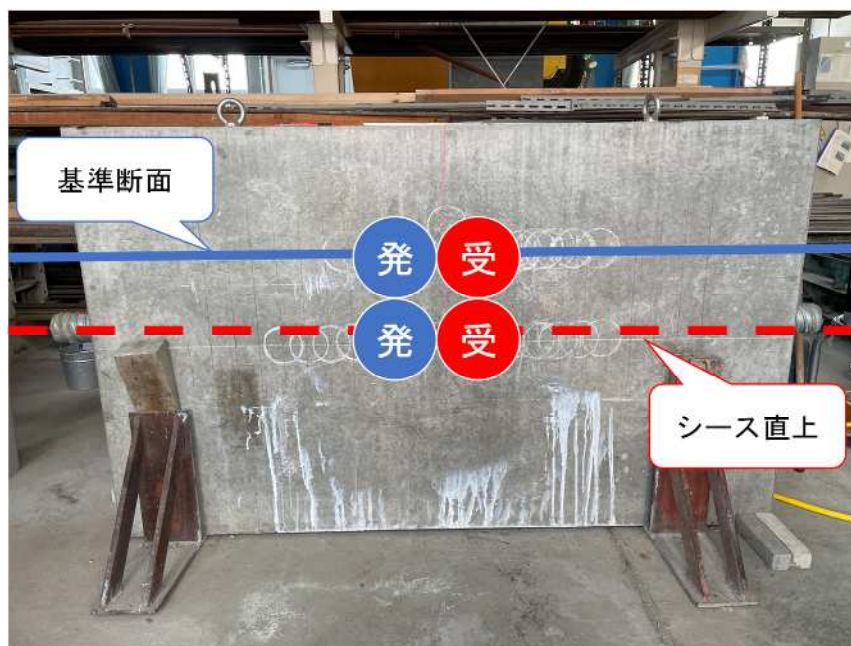


図 4-11 供試体計測状況 イメージ図

また、コンクリートの弾性波伝播速度は、試験体を挟み込んで計測する透過法によりシースや鉄筋を外した位置で計測した。測定結果を表 4-2 に示す。

表 4-2 供試体の弾性波伝播速度

供試体	弾性波伝播速度 (m/s)
未充填 (0%)	4781
充填 (100%)	4800

#### 4.3.4 実験結果および考察

得られた受信波より式 (4.2.3) に従い平均電圧値を求めた。それぞれの平均電圧値を図 4-12 に示す。

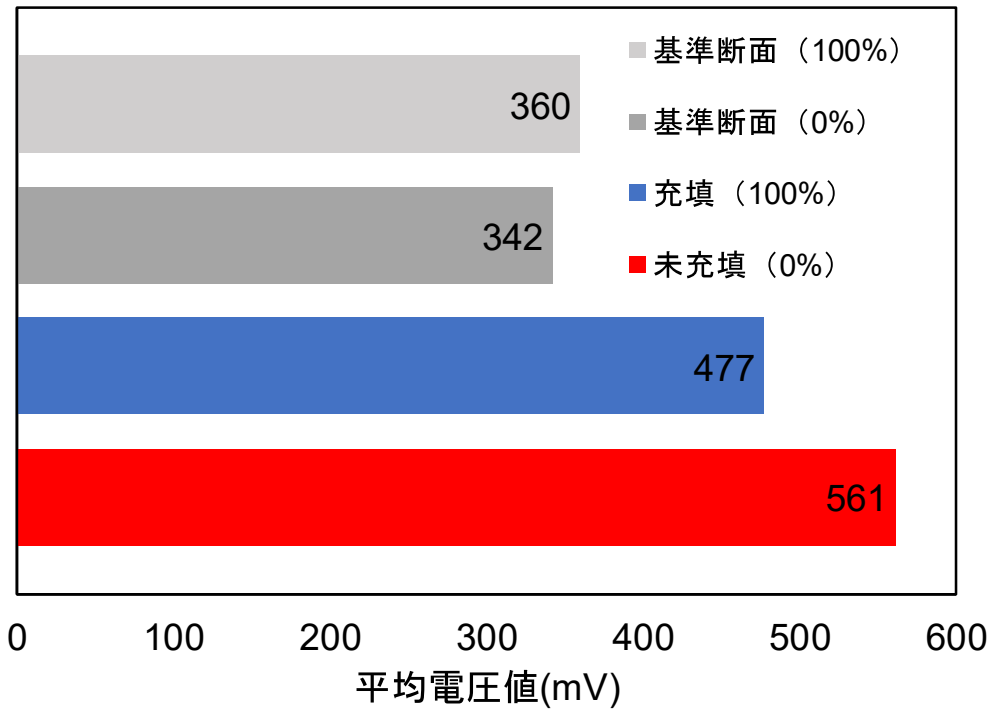


図 4-12 供試体の平均電圧値

図 4-12 によると、PC グラウトの有無により平均電圧値に差異が生じていることがわかる。しかしながら、PC グラウト充填と未充填の平均電圧値の差は 16%程度と少なく、明確に判別できるといえない状況である。そこで、それぞれの平均電圧値より、シースを外して計測した基準断面の平均電圧値を差し引いた値を求めた。図 4-13 に平均電圧値差を示す。

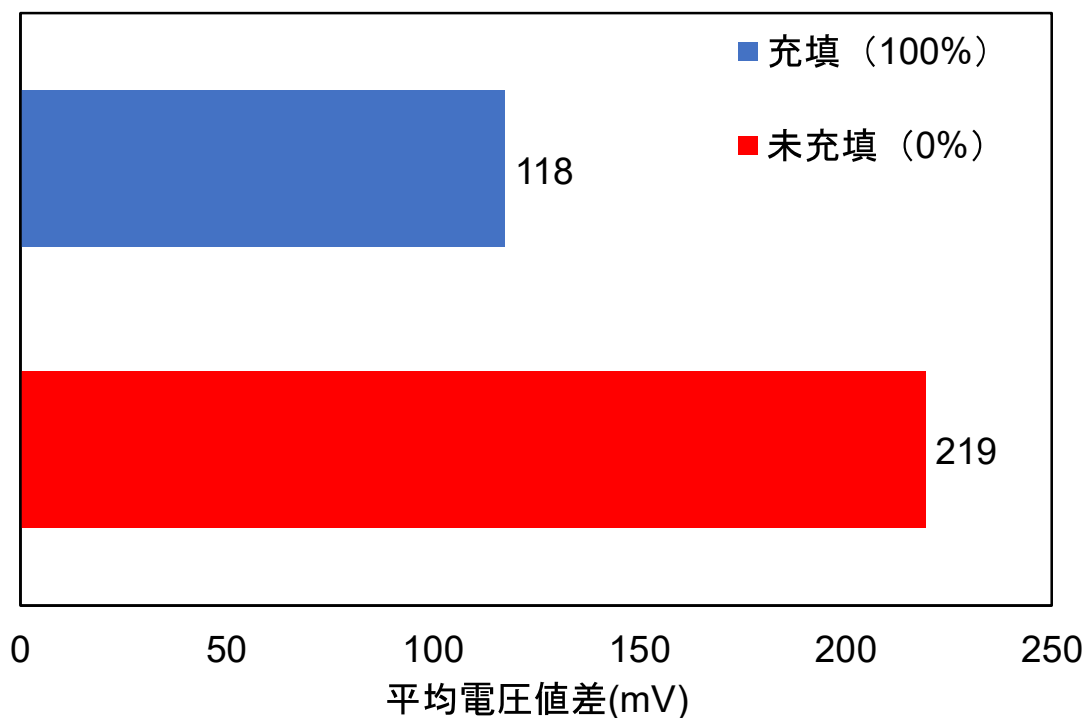


図 4-13 平均電圧値差

図 4-13 によると、平均電圧値差においては、PC グラウト未充填時は、PC グラウト充填時に比べ約 2 倍の大きさとなり、PC グラウトの有無で明確な差異がみられた。

図 4-12 より基準断面における平均電圧値は充填シースである供試体 A の方が大きいことがわかる。これは表 4-2 に示す弾性波伝播速度の差によるものと考えられる。式 (4.2.1) に付随する説明文によると弾性波伝播速度が増加すると音響インピーダンスも増加する。音響インピーダンスは音の伝搬しやすさを表すもので、音響インピーダンスが増加すると、反射波強度も大きくなると考えられる。基準断面との差分を評価することで、弾性波伝播速度差により生じた反射波強度の差を低減できたと考えられる。

以上より、供試体レベルにおいて本研究で提案した新規判定手法の有用性が窺えた。

また、探触子を近接させた計測におけるシース反射波の周波数特性を調べるため、台形の窓関数を用いてシース反射波を 28  $\mu$  秒間切り出し、FFT を実施した。

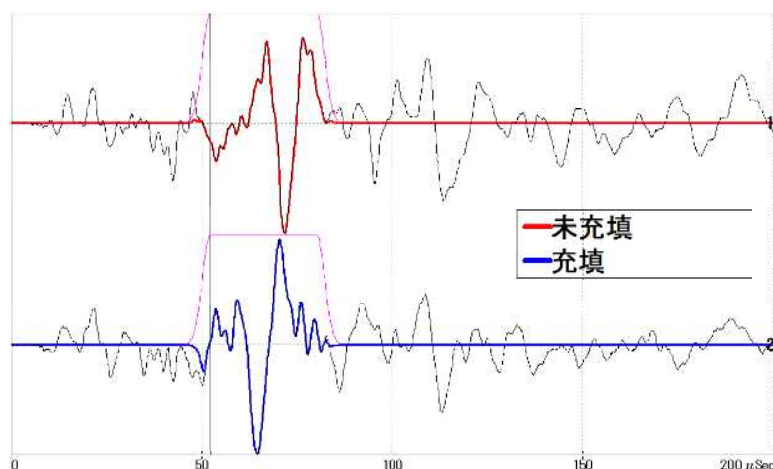


図 4-14 シース反射波切り出し状況（時系列図）

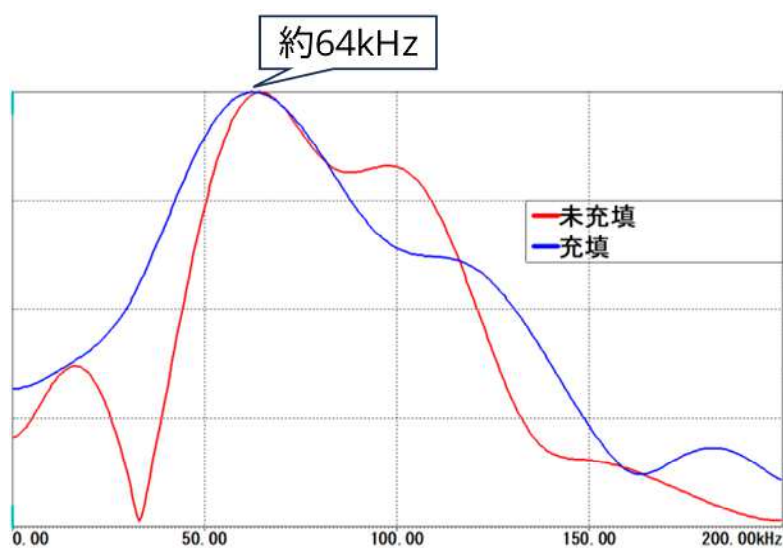


図 4-15 シース反射波スペクトル図

図 4-15 より、PC グラウトの有無にかかわらずシース反射波のスペクトルピークは約 64kHz であった。これより、探触子間隔を近接させるとシース反射波に PC グラウトの有無でピーク周波数に差異が生じないことが示唆された。WUT の既往手法 [例えば 濱岡ら, 2014] では探触子間隔を 200 または 500mm としており、PC グラウトの有無でシース反射波の周波数に変化が生じるため、探触子間隔がシース反射波の周波数特性に影響を及ぼすと推察される。

## 4.4 建設中の橋梁を用いた検証試験

### 4.4.1 概要

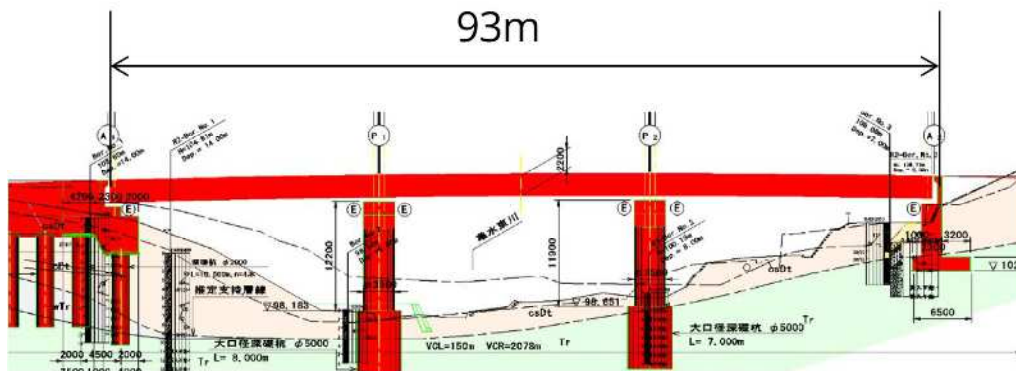
前節では、新規判定手法の有用性が供試体レベルにおいて確認された。そこで、実構造物における新規判定手法の適用性を調べるため、建設中の3径間連続PCコンポ橋（A橋）と単純中空床版橋（B橋）において、同一シースを対象としてPCグラウト未充填時とPCグラウト充填・硬化後の2回計測し、平均電圧値差を求めた。

また、第3章で探触子間隔の検討を実施したが、実構造物における適用性を検証するために、A橋では探触子間隔を複数設定して計測した。B橋では新規判定手法のPEシースにおける適用性を検討した。

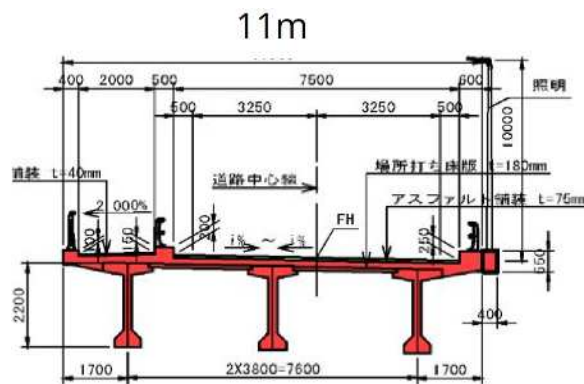
### 4.4.2 A橋における検証試験

#### (1) 測定対象構造物

橋長93m、幅員11m、3主桁の3径間連続PCコンポ橋を測定対象とした。測定はA1-P1間のP1側、G1桁において実施した。図4-16に測定対象橋梁概要図を示す。



(a) 測定対象橋梁全景



(b) 測定対象橋梁 断面図（標準部）

図 4-16 測定対象橋梁の概要図

また、測定対象径間の PC 鋼材配置図を図 4-17 に、測定対象主桁の断面図を図 4-18 に示す。

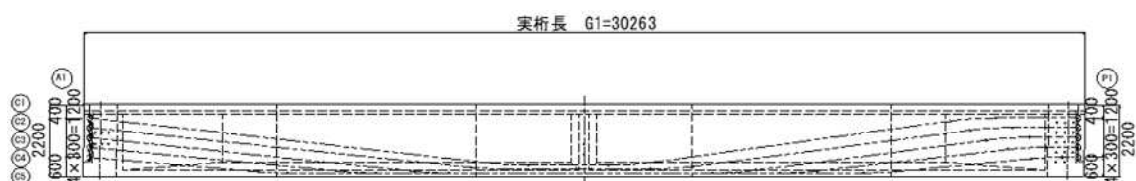


図 4-17 測定対象径間 PC 鋼材配置図

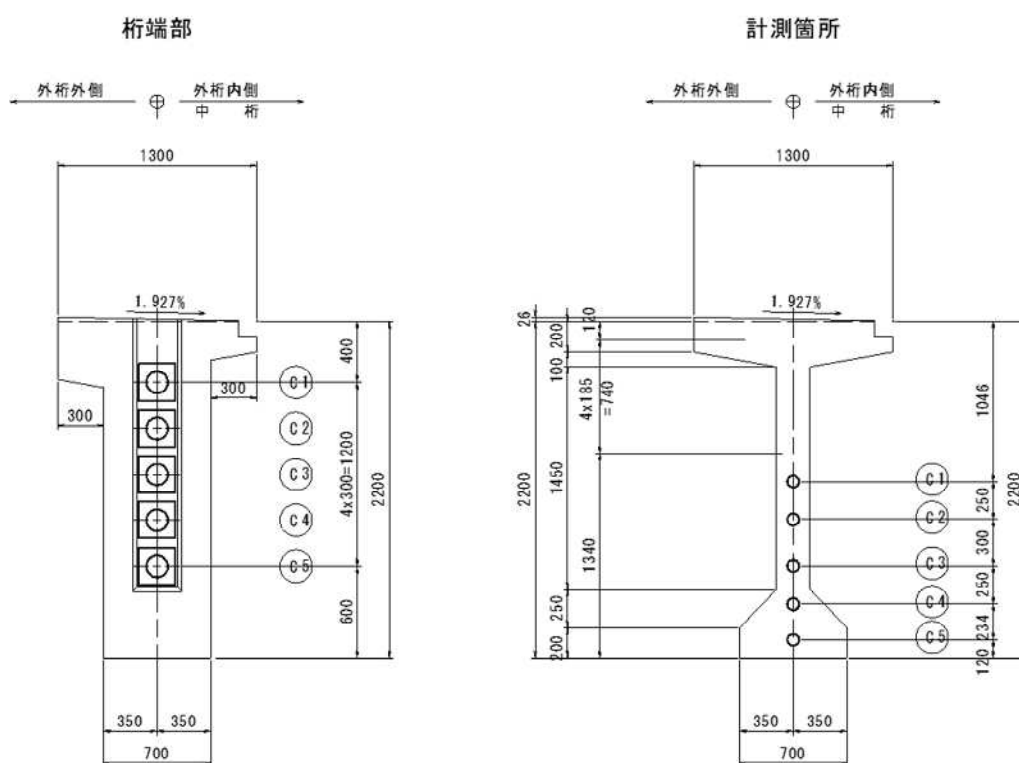


図 4-18 測定対象主桁 断面図

測定対象である G1 桁の 28 日圧縮強度は  $70\text{N/mm}^2$  であった。試験時のコンクリートの材齢は、未充填計測時は 185 日、充填計測時は 227 日であった。

シー스는内径  $\phi 70\text{mm}$  の鋼製シースを用いていた。PC グラウトは超低粘性混和剤を含むプレミックス材を用いており、PC グラウトの 28 日圧縮強度  $51\text{N/mm}^2$ 、充填計測時の PC グラウトの材齢は 15 日であった。また、PC 鋼材として径  $12.7\text{mm}$  の鋼より線が 12 本 (12S12.7) 配置されている。



(2) 計測方法

探触子間隔は近接配置(97mm), 先行研究で提唱されていたシースかぶり厚の2倍(150mm)と実務で用いられている間隔(200, 500mm)の計4種類とした。測定対象ケーブルをC2とし, シースかぶり厚の変動を避けるため, ウェブ厚が一定の区間で, かつセグメント接合面の影響を除去するためセグメント目地から500mm程度離れた位置で計測した。概略測定位置を図4-19に示す。

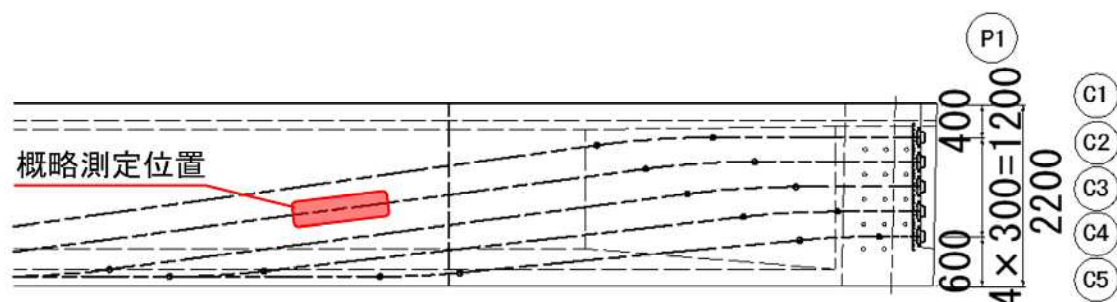


図 4-19 概略測定位置

弾性波伝播速度は, 同一セグメントのウェブ部において鉄筋およびPC鋼材を外した位置で探触子を挟み込む透過法にて計測した。測定結果を表4-3に示す。

表 4-3 弾性波伝播速度測定結果

充填状況	弾性波伝播速度 (m/s)
未充填時	4740
充填時	4733



写真 4-2 測定状況

### (3) 測定結果および考察

測定結果例として、探触子間隔 97mm の平均電圧値算出過程を示す。

式 (4.2.2) より、シース裏面からの反射波起生相当時刻を算出する。ここに  $a$  : 探触子間隔 97mm,  $C_d$  : シースの純かぶり深さ 75mm (設計図書を参照),  $\phi$  : シースの直径 70mm,  $V$  : 4733m/s (充填時)

これらよりシース裏面からの反射波起生相当時刻は概ね  $65 \times 10^{-6}$ s となる。未充填時、充填時および基準断面の受信波形を図 4-20 に示す。

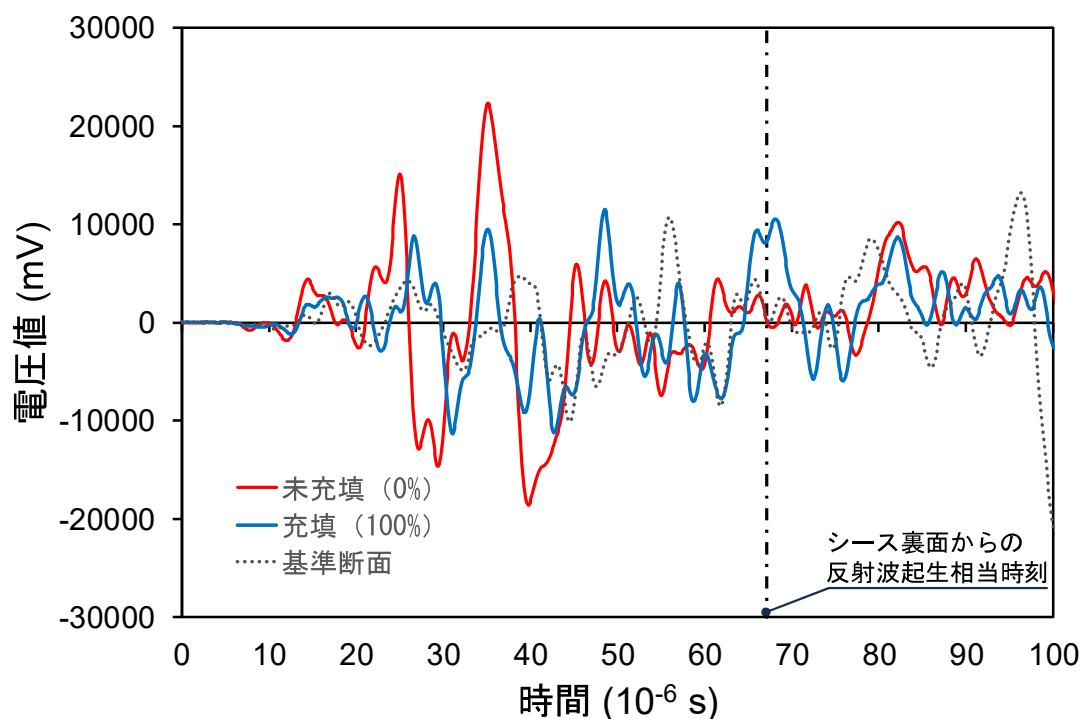


図 4-20 受信波形の例 (探触子間隔 97mm)

PC グラウト未充填時, 充填時, 基準断面の平均電圧値を探触子間ごとに図 4-21 に示す.

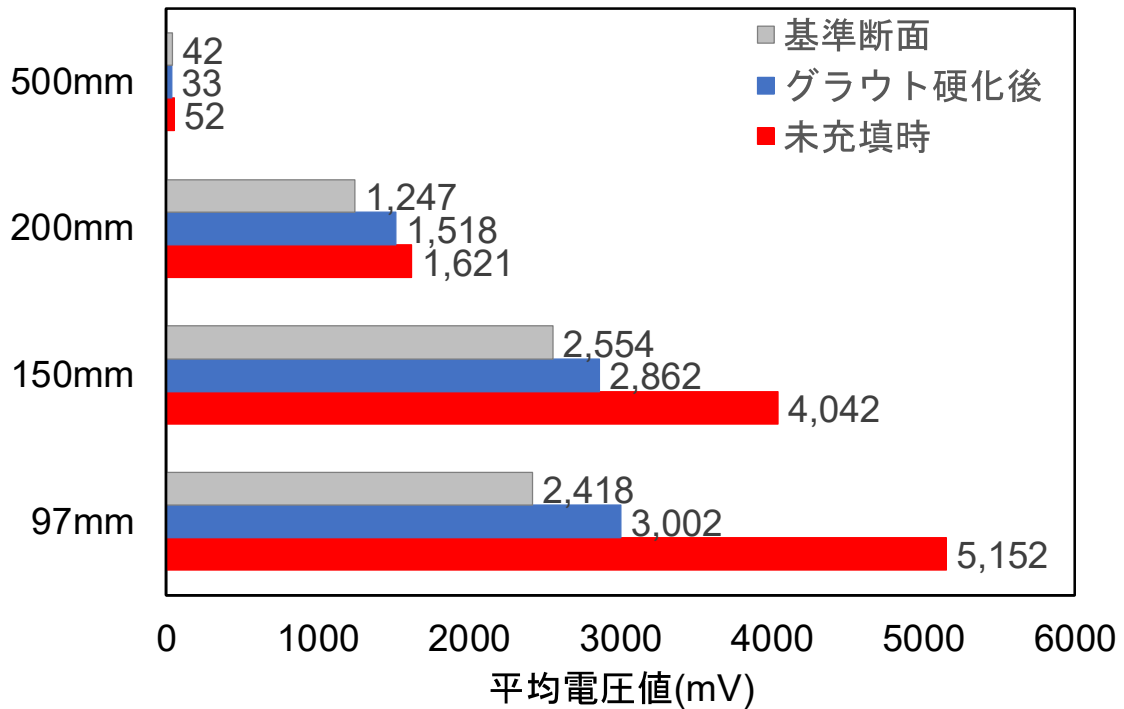


図 4-21 実構造物における平均電圧値

図 4-21 によると, 探触子間隔 97mm 時の平均電圧値が概ね最大値を示し, 探触子間隔が増えるに従い低下している. また, いずれの探触子間隔においても未充填時の平均電圧値は, 充填時の平均電圧値を上回っている.

未充填時の計測において平均電圧値は, 探触子間隔 200mm は 97mm の約 3 分の 1 に, 探触子間隔 500mm は 97mm の約 10 分の 1 まで低下している. これは明確なシーブ反射波が得られなかったことを示唆しており, 第 3 章の実験結果を裏付けていると考えられる.

PC グラウト未充填時，充填時，基準断面の平均電圧値差を探触子間ごとに図 4-22 に示す。

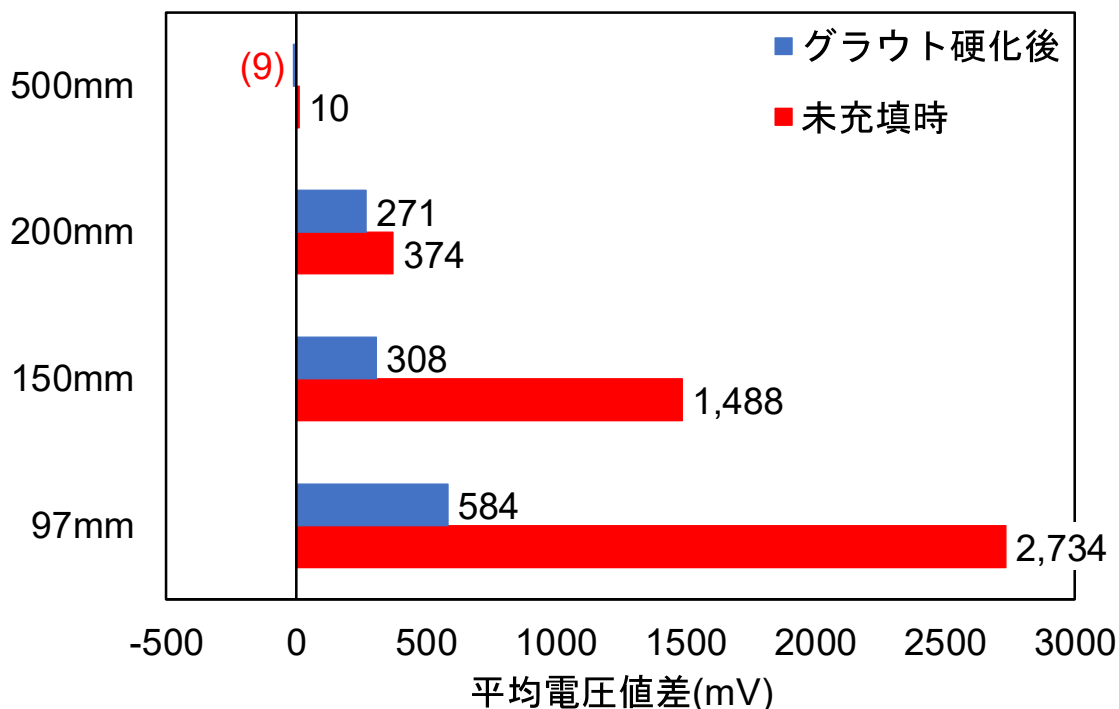


図 4-22 実構造物における平均電圧値差

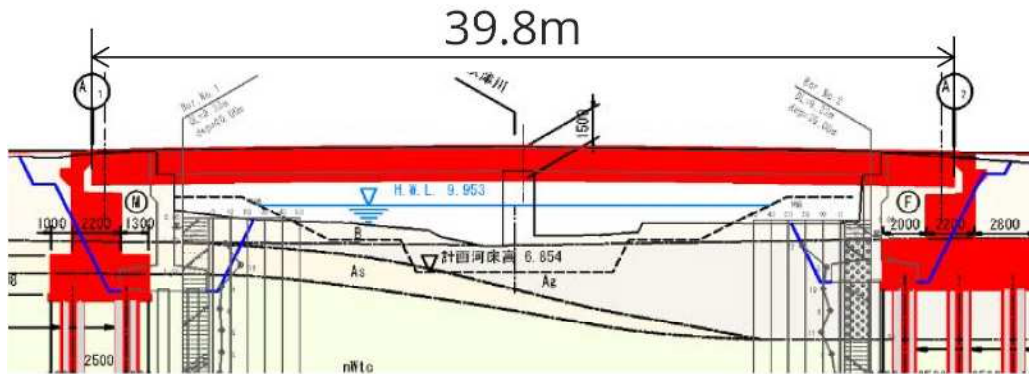
図 4-22 によると，いずれの探触子間隔においても未充填時の平均電圧値差は充填時を上回っている．特に探触子間隔が 97mm の時は，PC グラウトの有無による平均電圧値差が顕著であり，未充填シースは充填シースの約 5 倍となっている．探触子間隔を 97mm としたときに，平均電圧値差において PC グラウト未充填時と充填時の差異が最大であったため，探触子間を 97mm と近接させる計測手法の有用性が確認された．

以上より，実構造物においても探触子間隔を近接させて計測し，基準断面との平均電圧値差を求めた場合，PC グラウトの有無で顕著な差異が観測でき，実構造物においても新規判定手法の有用性が窺えた．

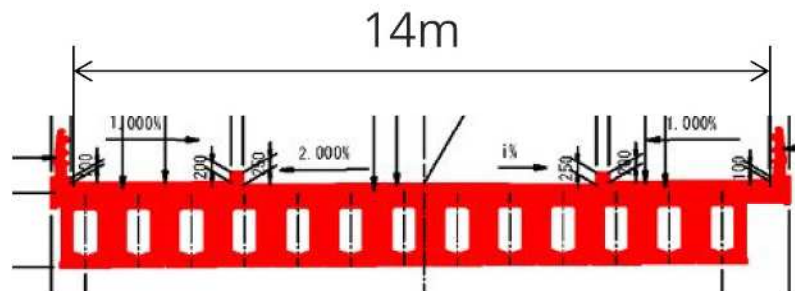
#### 4.4.3 B橋における検証試験

##### (1) 測定対象構造物

橋長 39.8m, 幅員 14m の PC 単純中空床版橋を測定対象とした。測定は A1-A2 間の A1 側の側面において実施した。図 4-23 に測定対象橋梁概要図を示す。



(a) 測定対象橋梁全景



(b) 測定対象橋梁 断面図 (標準部)

図 4-23 測定対象橋梁の概要図

また、測定対象径間の PC 鋼材配置図を図 4-24 に示す。



図 4-24 測定対象橋梁 PC 鋼材配置図

測定対象桁の 28 日圧縮強度は  $50\text{N/mm}^2$  であった。シー스는径  $\phi 65\text{mm}$  の PE シースを用いていた。PC グラウトは超低粘性混和剤を含むプレミックス材を用いていた。また、PC 鋼材として径  $12.7\text{mm}$  の鋼より線が 12 本 (12S12.7) 配置されている。

## (2) 計測方法

探触子間隔は近接配置 (97mm) とした。測定対象ケーブルを C1 とし、シースかぶり厚の変動を避けるため、ウェブ厚が一定の区間で、かつセグメント接合面の影響を除去するためセグメント目地から 3m 程度離れた位置で計測した。概略測定位置を図 4-25 に示す。

測定は同一位置で 2 回、探触子の送受信を入替え 2 回、計 4 回実施した。

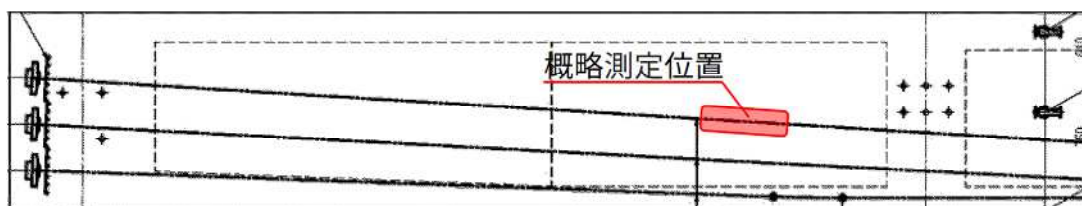


図 4-25 概略測定位置

弾性波伝播速度は、同一セグメントのウェブ部において鉄筋および PC 鋼材を外した位置で探触子を挟み込む透過法にて計測した。測定結果を表 4-4 に示す。

表 4-4 弾性波伝搬速度測定結果

充填状況	弾性波伝播速度 (m/s)
未充填時	4785
充填時	4796



写真 4-3 測定状況

### (3) 測定結果および考察

測定結果例として1回目の計測データ (No.1) の平均電圧値算出過程を示す。

式 (4.2.2) より, シース裏面からの反射波起生相当時刻を算出する. ここに  $a$ : 探触子間隔 97mm,  $C_d$ : シースの純かぶり深さ 67.5mm (設計図書を参照),  $\varphi$ : シースの直径 65mm,  $V$ : 4796m/s (充填時)

これらよりシース裏面からの反射波起生相当時刻は概ね  $62 \times 10^{-6}$ s となる. 未充填時, 充填時および基準断面の受信波形を図 4-26 に示す.

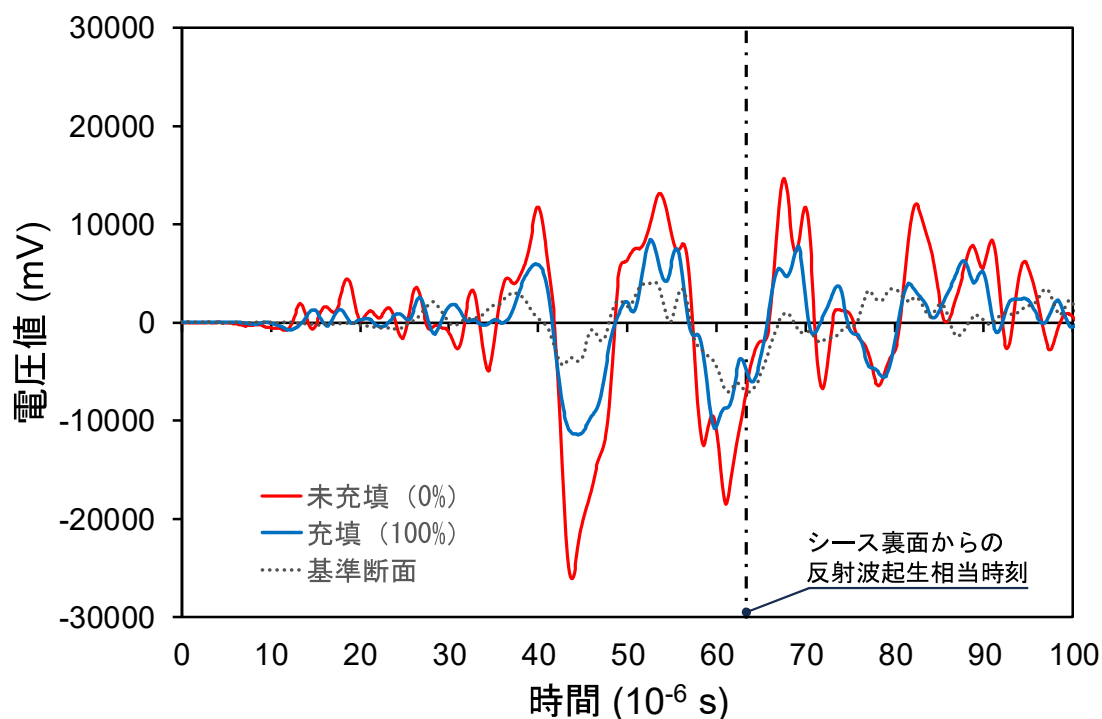


図 4-26 受信波形の例 (No. 1)

PC グラウト未充填時，充填時，基準断面の平均電圧値を図 4-27 に示す。

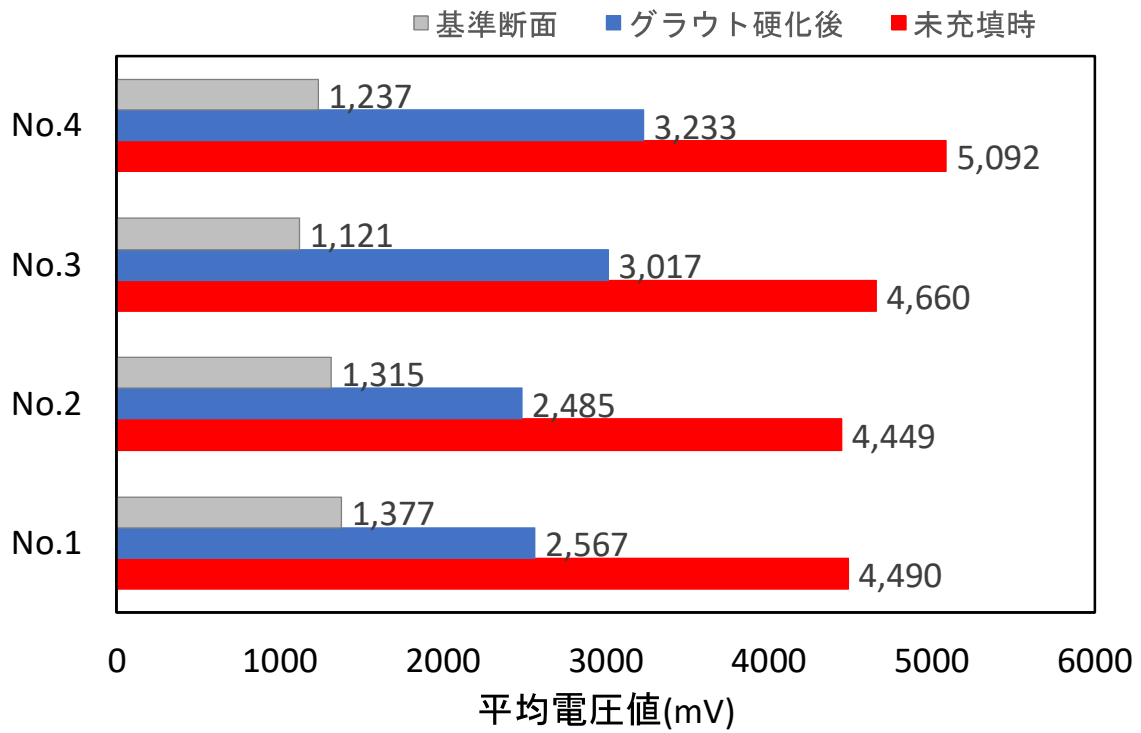


図 4-27 PE シースを有する実構造物における平均電圧値

図 4-27 によると，いずれの計測においても未充填時の平均電圧値が概ね最大値を示し，充填時の平均電圧値を大きく上回っている。



PC グラウト未充填時，PC グラウト充填・硬化後の平均電圧値差を図 4-28 に示す。

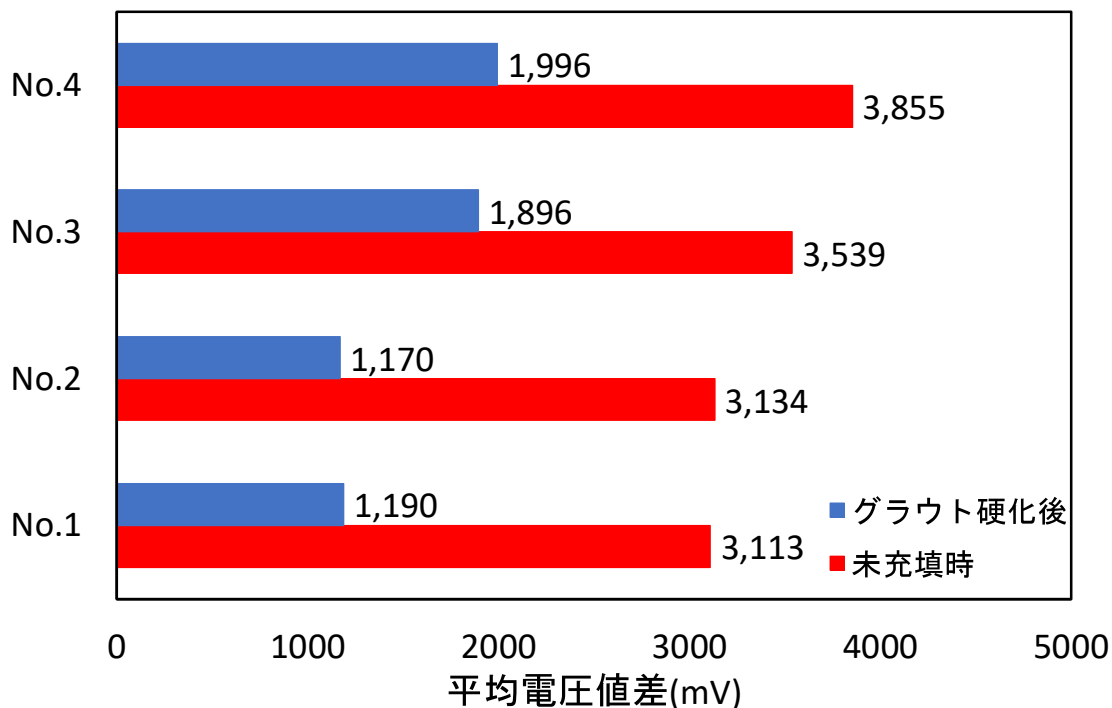


図 4-28 PE シースを有する実構造物における平均電圧値差

図 4-28 によると，いずれの測定でも未充填時の平均電圧値差は充填時を上回っており，未充填時の平均電圧値差は充填時の概ね 2～3 倍となっている．なお，平均電圧値差において，未充填時と充填時の差は 1643～1964 (mv) と概ね一定であった．

以上より，PE シースを有する実構造物においても，PC グラウトの有無で平均電圧値に顕著な差異が観測でき，PE シースにおける新規判定手法の有用性が窺えた．

## 4.5 実物大供試体を用いた検証試験

### 4.5.1 概要

全長約 35m の PCT 桁の供試体（以下、実物大供試体とする）を用いて検証試験を実施した。実物大供試体は 5 本の PC ケーブルを有しており、意図的に PC グラウト未充填区間が形成されている。そこで、新規判定手法を用いて PC グラウト未充填区間の検出を試みた。

### 4.5.2 検討に用いた供試体

桁長約 35m、桁高 1950mm のストレート T 断面を有するポストテンション方式 T 桁の供試体を測定対象とした。図 4-29 に測定対象とした実物大供試体の概要を、図 4-30 に実物大供試体の断面図を示す。

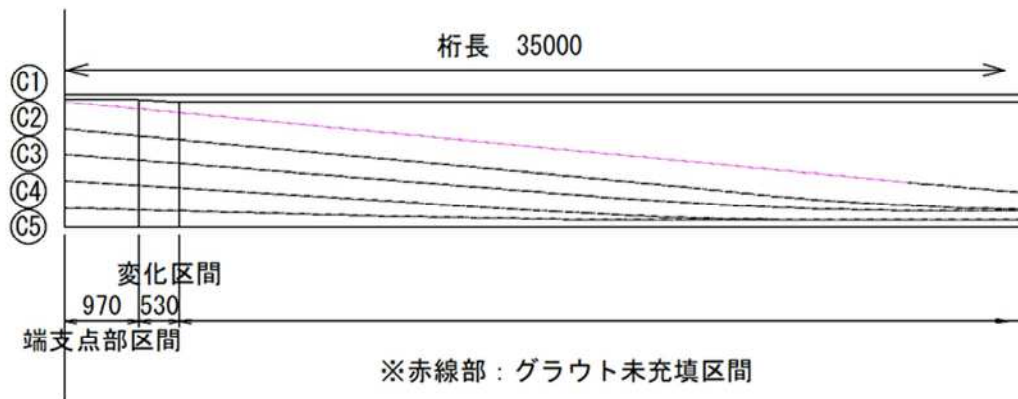


図 4-29 実物大供試体の側面図

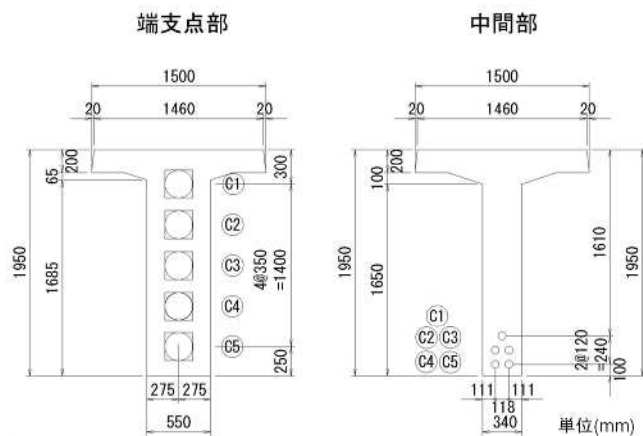


図 4-30 実物大供試体の断面図

実物大供試体のコンクリートの設計基準強度は  $40\text{N/mm}^2$  で、PC グラウトの設計基準強度は  $30\text{N/mm}^2$  である。また、コンクリートの材齢に関する資料は無かったが、当時の関係者の記憶によると少なくとも完成後 15 年以上経過していることがわかっている。シースは径  $\phi 65\text{mm}$  の鋼製シースを用いており、PC 鋼材として径  $12.7\text{mm}$  の鋼より線が 12 本 (12S12.7) 配置されている。

#### 4.5.3 実験方法

探触子間隔は近接配置 ( $97\text{mm}$ ) とした。測定対象ケーブルは、事前に部分的な未充填区間を有することが既知の C1 とした。測定は、探査面の裏面に桁端より  $11\text{m}$  の位置にグラウトホース痕があったため、そこを基準として前後を  $500\text{mm}$  間隔の計 6 測点で実施した。また、各測点を計測した際に探触子を鉛直方向に約  $300\text{mm}$  移動させシースを外した位置で計測し、これを基準断面とした。測定位置を図 4-31 に示す。

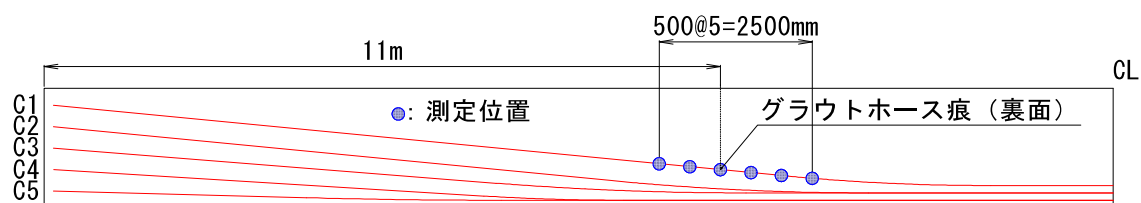


図 4-31 実物大供試体 測定位置



写真 4-4 実物大供試体 測定状況

弾性波伝播速度は、ウェブ部において鉄筋および PC 鋼材を外した位置で探触子を挟み込む透過法にて計測し、 $4749\text{m/s}$  であった。

#### 4.5.4 実験結果および考察

測点ごとのシース直上および基準断面の平均電圧値を図 4-32 に示す。

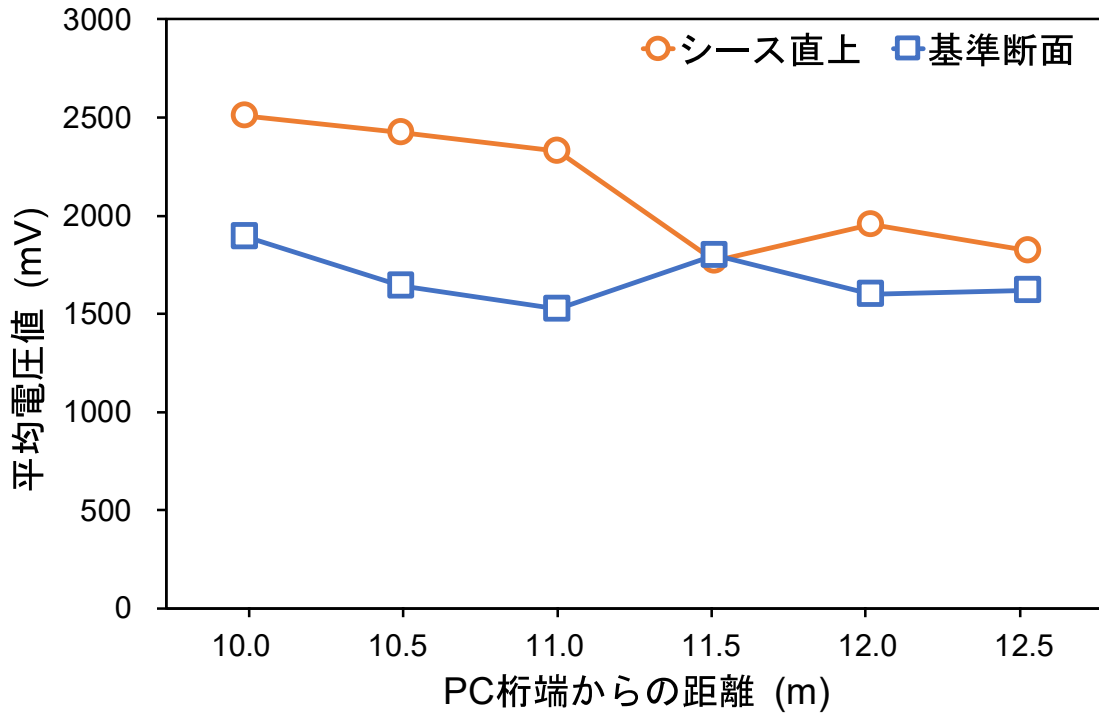


図 4-32 実物大供試体 測点ごとの平均電圧値

図 4-32 によると、シース直上における平均電圧値は、PC 桁端より 10.0m の位置から遠ざかるに従い概ね減少傾向にあるが、11.0-11.5m 間の減少が顕著であった。また基準断面の平均電圧値は、測定位置によらず概ね一定な傾向にあった。

測定位置ごとのシース直上および基準断面の平均電圧値差を図 4-33 に示す。

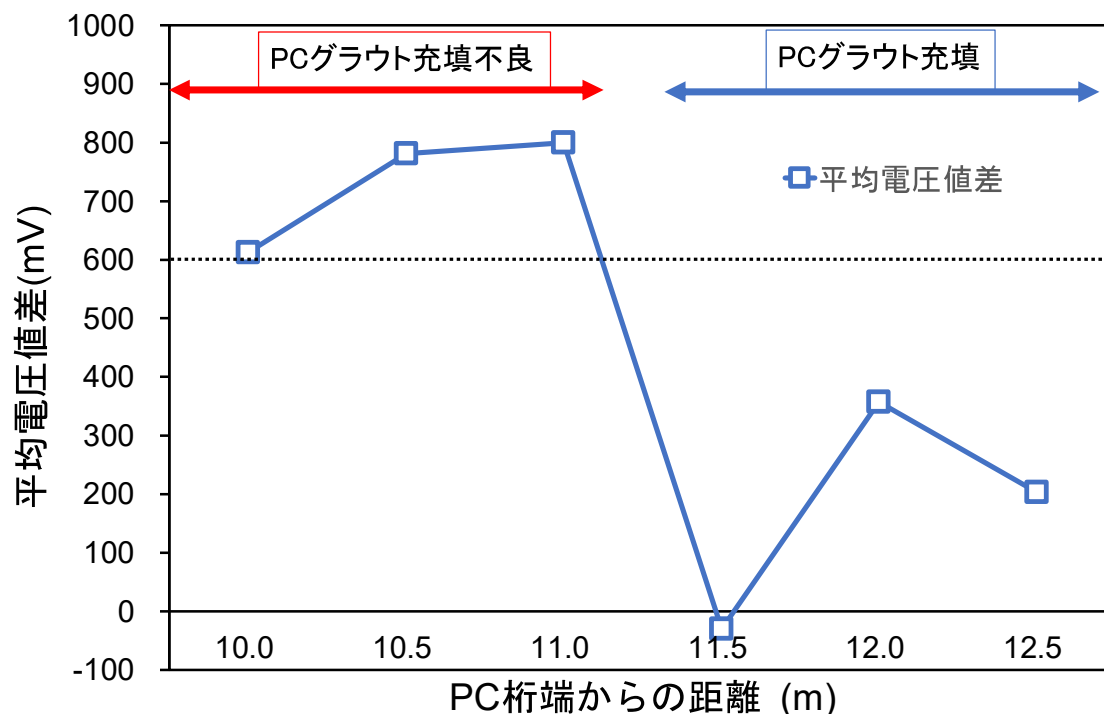
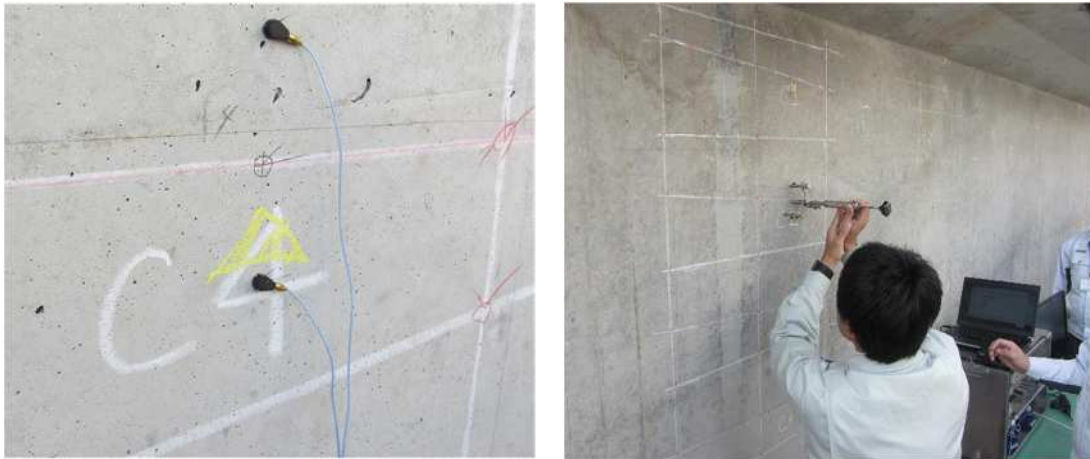


図 4-33 実物大供試体 測点ごとの平均電圧値差

図 4-33 によると、平均電圧値差は PC 桁端より 10.0～11.0m の範囲は 600mV 以上ある。一方、11.5～12.5m の範囲は平均電圧値差が 400mV 以下と小さく、11.5m の位置にいたっては負の値となっている。これらより、10.0～11.0m の範囲は平均電圧値差が比較的大きい傾向にあるため PC グラウト充填不良と、11.5～12.5m の範囲は平均電圧値差が比較的小さい傾向にあるため PC グラウト充填区間と判断できる。

後日、供試体の管理者より供試体に関する設計図書を取り寄せて C1 ケーブルの PC グラウト充填状況を確認した。C1 ケーブルは桁中央部より PC グラウトを注入し、11.5m に位置するグラウトホースより排出し、グラウトホースより桁端部側のシースは未充填区間となるよう設計されていた。新規判定手法による測定結果においても、11.0m までは充填判定で 11.5m 以降は未充填判定となり、設計図書の PC グラウト充填状況と概ね合致した。

なお、本検討と同一の試験体を用い、福島 [2021] は先行研究において従来の解析手法を用いた WUT と、インパクトエコー法 (IE 法) の一種である SIBIE 法を用いて計測し、その測定精度を比較している。測定状況を写真 4-4 および写真 4-5 に例示するとともに、測定結果を表 4-4 に示す。



(a) 加速度計の設置状況

(b) 鋼球の設置状況

写真 4-5 IE (SIBIE) による PC グラウト充填調査

[福島, 2021]



写真 4-6 WUT による PC グラウト充填調査状況

[福島, 2021]

表 4-5 PC グラウト充填判定結果 [福島, 2021]

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

表 4-4 によると, IE 法は正答率 67% (6/9), WUT では 56% (5/9) であった. しかし, 誤答であった箇所は, すべて UD (判定不能) であり, 両調査技術の測定精度に有意な差異は見られないとしている [福島, 2021].

ここで, 既往の WUT 解析手法で UD (判定不能) とされた測点において, 平均電圧値差を用いた計測を実施することで, 測定精度の上昇が見込める. 例えば, 表 4-4 の測点 NO7~9 を連続して計測し, その平均電圧値差を求め, 平均電圧値差の急激な変化点を見つけることにより PC グラウトの概略境界位置の検出が見込まれる. このように, 既往手法で△判定 (判定不能) とされた箇所において, 新規判定手法による追加計測を実施することにより, △判定を○判定または×判定に振り分けられることが示唆された.

なお, 現時点では平均電圧値差を用いた充填判定の閾値は無く, 連続して計測し, 電圧値差の変動により充填判定を行っている. ただし, これまでの計測結果によると, 平均電圧値差において未充填箇所は充填箇所の概ね 2 倍以上となっていた.

以上より, 探触子間隔を近接させて計測し, 基準断面との平均電圧値差を求めた場合, 実物大供試体においても未充填区間を概ね特定することができ, 新規判定手法の有用性が窺えた.

また, WUT 既往手法で△判定の箇所において, 新規判定手法の追加計測をすることにより, 測定精度向上の可能性が窺えた.

## 4.6 第4章まとめ

本章においては、探触子を近接させた計測において、時系列波上でシース反射波到達時間までの平均電圧値を求め、シース直上とシースを外した基準断面との平均電圧値差によるPCグラウト充填状況の新規判定手法を提案した。この新規判定手法を検証するために各種供試体を用いて検討を行った結果、以下のことが明らかとなった。

- (1) 先行研究で用いられたPCグラウト充填および未充填の2体の供試体を用い、新規判定手法を用いて検討した。その結果、PCグラウトの有無で平均電圧値差に明確な差異が現れ、供試体レベルにおいてその有用性が窺えた。
- (2) 建設中のPC橋梁において、PCグラウト未充填時とPCグラウト充填後の2回計測し、新規判定手法を用いて検討した。その結果、鋼製シースとPEシースのいずれにおいても、PCグラウトの有無で平均電圧値差に明確な差異が現れ、新設橋梁においてその妥当性が確認された。
- (3) 作成後15年以上経過したポストテンション方式PCT桁の実物大供試体を用い、新規判定手法によりPCグラウト未充填区間の検出を試みた。平均電圧値差の急峻な変化地点をPCグラウト未充填区間の境界と判断し、後日入手した設計図書と照合したところ概ね一致した。これより、PCグラウト未充填区間の検出における新規判定手法の有用性が示唆された。



## 第4章の参考文献

- 鎌田敏郎, 内田慎哉 : コンクリートの非破壊試験の理論と実際③弾性波法 (超音波法・衝撃弾性波法) の理論と実際 : コンクリート工学, Vol.51, No.4, 2013.
- 濱岡弘二, 青木圭一, 原 幹夫, 木下尚宜 : 広帯域超音波法を用いた PC グラウトの充填調査, プレストレストコンクリート, Vol.56, No.6, 2014
- 福島邦治 : 広帯域超音波法 (WUT) を用いた PC グラウト充填調査の適用性と精度向上に関する研究, 山口大学大学院創成科学研究科博士論文, 2021.

## 第5章 結論

### 5.1 結論

本研究では、WUT 探触子から発せられ、コンクリート中を伝播する弾性波の挙動を明らかにすることで、より適切な探触子間隔を定め、新たな判定手法を提案することで PC グラウト充填判定の精度向上を試みた。そして、提案した判定手法を実構造物等で試験することにより、その妥当性を検討した。本研究で得られた結論について、各章ごとに要点を整理して以下に示す。

第 3 章「WUT 探触子から発せられる弾性波の挙動についての検討」では、WUT 探触子から発せられる弾性波の挙動を明らかにするための検討を行った。以下にその内容を示す。

- (1) 直角二等辺三角形断面を有する供試体を用いて、発信波が同心円状に拡散されるという先行研究の前提条件についての検証を行った。その結果、発信波の直進性は高く指向角  $45^\circ$  以内に設定することの妥当性が窺えたが、供試体形状に起因する問題により正確な入射弾性波の指向性は把握できなかった。
- (2) レーザードップラー振動計 (LDV) を用いて発信探触子から発せられる弾性波を直接計測した結果、発信波が  $240\text{kHz}$  以下の帯域において平坦な周波数特性を持つことが示された。また、半円柱状の供試体を用い受信側に LDV を用いた検討を行った結果、WUT 探触子から発せられる発信波は、概ね  $-30^\circ \sim 30^\circ$  の範囲に拡散し、高い直進性をもって伝播していた。
- (3) 探触子間隔を変え、コンクリート供試体に切り込みを入れながら計測することで、コンクリート中を伝播するシース反射波の経路、ならびに探触子間隔がシース反射波に及ぼす影響についての検討を行った。その結果、反射角  $27^\circ$  以下の場合、シース縦波反射波が起生し、反射角  $40\sim 45^\circ$  の範囲でシース反射波時に横波に変換されるモード変換波が起生した。また、シース縦波反射波は探触子の中心で反射する伝播経路 (最短経路) を、モード変換波は発信探触子直下に伝播しシースに反射して受信探触子に到達する経路 (直進経路) をとることが示唆された。さらに、モード変換波はシース縦波反射波に比べ、コンクリート中の障害物の影響を受けやすいことが示唆された。そのため、シース縦波反射波を評価することの有用性が窺えた。
- (4) 探触子間隔を近接させた計測において、コンクリート表層に切り込みを入れながら計測することで、表面波 (レイリー波) の影響を調べた結果、レイリー波の電圧値はシース反射波電圧値の変動幅の約  $1/3$  と小さく無視できる。

以上より、シース反射波を捉えるために、探触子を近接させて計測すること、そしてシース反射波の伝播経路を最短距離とすることの妥当性が示された。

第4章「弾性波の伝播挙動に基づいた判定手法に関する検討」では、探触子を近接させた計測において、時系列波上でシース反射波到達時間までの平均電圧値を求め、シース直上とシースを外した基準断面との平均電圧値差によるPCグラウト充填状況の新規判定手法を提案した。この新規判定手法を検証するために各種供試体を用いた検討を行った。以下にその内容を示す。

- (1) PCグラウト充填および未充填の2体の供試体を用い、新規判定手法を用いて検討した結果、PCグラウトの有無で平均電圧値差に明確な差異が現れた。
- (2) 建設中のPC橋梁において、PCグラウト未充填時とPCグラウト充填後の2回計測し、新規判定手法を用いて検討した結果、PCグラウトの有無で平均電圧値差に明確な差異が現れた。また、PEシースを用いた橋梁においても同様の結果が得られた。
- (3) 製作後15年以上経過したポストテンション方式PCT桁の実物大供試体を用い、新規判定手法によりPCグラウト未充填区間の検出を試みた。平均電圧値差の急峻な変化地点をPCグラウト未充填区間の境界と判断し、設計図書と照合したところ概ね一致した。これより、PCグラウト未充填区間の検出における新規判定手法の有用性が示唆された。

以上のように本研究により、PCグラウト充填状況調査において、WUT探触子を近接させ平均電圧値差を用いる新規判定手法の有用性が示された。ただし、本研究では既設構造物への適用は検討しておらず、既設構造物に対する問題点については、さらに検討を進める必要がある。

## 5.2 今後の展望と課題

本研究で提案した電圧値差による判定手法を実務で用いるためには、本判定手法の適用範囲を明らかにする必要がある。適用範囲の中でもシースかぶり厚を定めることは、特に重要度が高いと考える。シースかぶり厚が深くなるにつれて、コンクリート中の粗骨材による散乱現象や反射波の拡散などにより、シース反射波の振幅が低減すると想定される。そのため本手法が適用可能な深度を見極める検討が望まれる。

供試体レベルの計測でさえ、シース反射波の電圧値差にばらつきがみられた。そのため、実務においては、このばらつきの影響を低減させるための計測・評価方法の確立が望まれる。具体的には1測点あたりの試行回数を増やす、1シースあたりの測点を多くとるといった計測や、外れ値を排除するデータ処理などが考えられる。

シース反射波の振幅は、コンクリートの弾性波伝播速度などの諸特性や、シース径・かぶり厚などの影響を大きく受けると考えられる。そのため、測定場面ごとにPCグラウトの有無により生じる電圧値差が変動すると想定される。今後、シース反射波に関するデータの蓄積を図りデータベース化することで、シース反射波の電圧値差とこれらパラメータとの関係が明らかにする必要がある。

本研究で、WUT探触子は概ね0~240kHzの帯域において平坦な周波数特性を持つ弾性波を発することが示された。このWUT探触子の特徴を活用するため、周波数スペクトル上での検討が考えられる。例えば、受信波に周波数フィルタを施した後、平均電圧値を求めるといった手法が挙げられる。

本研究の提案手法では計測される電圧値の極性(±)を考慮していなかった。図2-13に示すような反射波の位相解析によりグラウトの充填を判定する手法もあることから、電圧値の極性に着目した検討が考えられる。

また、最終的には広帯域超音波法の平均電圧値差を用いたグラウト充填調査手法のガイドライン作成を目指したいと考えている。

## 本論文に関する発表論文

木下尚宜, 迫 美乃, 福島邦治, 原 幹夫, 吉武 勇 : 広帯域超音波法におけるコンクリート中を伝播する弾性波の特性に関する基礎的検討, 土木学会論文集, Vol.79, No.5, 22-00122, 2023

【本文との関連 : 第3章】

吉武 勇, 木下尚宜, 迫 美乃, 福島邦治 : 広帯域超音波法を用いた新たなグラウト充填評価方法, プレストレストコンクリート, Vol.65, No.5, pp.77~84, 2023

【本文との関連 : 第3章, 第4章】

木下尚宜, 迫 美乃, 福島邦治, 原 幹夫, 吉武 勇 : 広帯域超音波法における発信波の指向性に関する検証実験, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, Vol.23, pp.235~238, 2023

【本文との関連 : 第3章】

## 謝辞

本研究の実施と論文をまとめるにあたり、ご指導・ご教示を賜りました山口大学大学院創成科学研究科 吉武 勇教授に心より感謝申し上げます。吉武先生には、研究の進め方から論文の書き方といった様々な場面において辛抱強く懇切丁寧にご指導いただき、このように本論文をまとめることができ、感謝の言葉を尽くしようがありません。

山口大学大学院創成科学研究科教授 中村秀明先生、同教授 河村 圭先生、同准教授 中島伸一郎先生、同講師 山田悠二先生には、ご多忙の中、本論文の審査を行っていただき、研究内容と取りまとめに関して、多くの御助言をいただきました。深く感謝いたします。

本研究は、株式会社日本ピーエス スマートインフラサービス推進室室長 福島邦治博士の研究を発展させたものであり、著者が研究を引き継ぐにあたり、多くの御助言・御協力をいただきました。ここに深く感謝申し上げます。

本研究で用いられた供試体の製作・計測に際して、株式会社日本ピーエス 事業推進本部 本部長 寺口秀明博士、事業開発グループ長 天谷公彦博士、栗原勇樹氏、金枝俊輔氏、山田浩司氏、野村裕太氏をはじめとする日本ピーエスの皆様に多大なるご協力をいただきました。ここに厚く御礼申し上げます。

4章の実橋の計測に際して、多大なご協力をいただいた株式会社日本ピーエス山口康隆所長、三苦哲也所長をはじめとする現場の皆様に厚く御礼申し上げます。

4章で用いた実物大供試体の使用を快諾していただいた株式会社高速道路総合技術研究所 橋梁研究室室長 高原良太氏に厚く御礼申し上げます。また、計測に際してご協力をいただいた一般社団法人施工技術総合研究所 研究第二部主幹 設楽和久氏に厚く御礼申し上げます。

本研究の実施にあたり、山口大学の迫 美乃氏（現 株式会社日本ピーエス）、小市翔太氏（現 株式会社大本組）、切川雅斗氏には、実験の実施、データ整理・解析などで多くのご協力いただきました。ここに厚く御礼申し上げます。

著者の所属する株式会社エッチアンドビーシステムの前社長 原 幹夫氏には、著者が研究を始めるきっかけを与えてくださったほか、実験に際して多大なるご協力をいただきました。ここに深く感謝申し上げます。株式会社エッチアンドビーシステム社長 濱岡弘二博士には、株式会社日本ピーエス在籍時から本研究の遂行に多大なるご協力をいただきました。ここに深く感謝申し上げます。また、株式会社エッチアンドビーシステムの皆様には、一部業務を負担していただくなど、研究をバックアップしていただきました。ここに感謝申し上げます。

最後に、本論文をまとめるにあたって、著者を支えて協力してくれた妻に感謝いたします。

2024年3月 木下尚宣