

衝撃弾性波を用いた応答波形の時系列変化量である
差分値を指標としたコンクリート構造物の内部欠陥評価

令和 4年 1月

日本大学大学院理工学研究科博士後期課程

土木工学専攻

池 端 宏 太

目次

第1章 序論	7
1.1 社会背景.....	7
1.1.1 コンクリート構造物の老朽化問題.....	7
1.1.2 建設投資額の減少と技術者不足.....	9
1.2 コンクリート構造物の維持管理.....	11
1.2.1 コンクリート構造物の長寿命化へ取り組み.....	11
1.2.2 維持管理における非破壊検査の役割.....	12
1.2.3 コンクリート構造物の非破壊検査.....	13
1.3 研究の目的.....	15
1.4 論文の構成と内容.....	15
第1章の参考文献.....	17
第2章 衝撃弾性波法	19
2.1 弾性波の基礎.....	19
2.1.1 音波（気体や液体中の波）[2.1].....	19
2.1.2 音響インピーダンス.....	20
2.1.3 媒質が異なる境界面での反射・透過と屈折.....	21
2.1.4 弾性体の波動現象[2.3][2.4].....	23
2.1.5 応力と粒子速度の関係.....	26
2.1.6 伝搬する弾性波の種類.....	27
2.1.7 波の減衰.....	29
2.1.8 自由端と固定端.....	29
2.1.9 多重反射の周期と周波数[2.17].....	31
2.1.10 周波数解析（フーリエ解析）[2.19].....	33
2.1.11 インパルス応答関数のフーリエ変換.....	35
2.2 衝撃弾性波法の特徴と内部欠陥評価の課題.....	36
2.2.1 概説.....	36
2.2.2 衝撃弾性波法の特徴[2.21].....	37
2.2.3 衝撃弾性波法を用いた内部欠陥評価手法.....	39

2.2.4 多重反射の周波数を用いた測定および評価	42
① Impact-Echo 法	42
② 弾性波の反射	43
③ 弾性波と伝搬速度	44
④ 鋼球の接触時間と入力周波数[2.43][2.44]	44
⑤ 周波数を用いた板厚の評価	46
⑥ 周波数を用いた内部欠陥評価	47
2.2.5 周波数を用いた内部欠陥評価手法の課題	48
① 測定条件や欠陥による周波数の変化	48
② 測定対象の断面形状の制約	51
第2章の参考文献	53
第3章 Difference Value Analysis (DVA)	57
3.1 概説	57
3.2 DVA を用いた内部欠陥評価	58
3.2.1 応答波形の変化量を用いた欠陥評価の考え方	58
3.2.2 差分値の定義	59
3.3 DVA の測定条件	60
3.3.1 測定間隔と入力条件	60
3.3.2 入力に用いる鋼球直径	61
3.3.3 測定時間とサンプリング時間間隔	61
3.3.4 差分値の算出データ数について	62
3.4 実験における測定波形の処理	63
3.4.1 測定波形の誤差	63
3.4.2 振幅の正規化	65
3.4.3 立ち上がり時刻の補正	65
3.4.4 AIC-picker 用いた時間補正	66
3.4.5 UP 法を用いた時間補正	67
3.4.6 正規化後の測定波形の分散	69
3.4.7 測定過誤等による波形の除外	70
第3章の参考文献	72

第4章	数値実験による基礎検討	74
4.1	概説	74
4.2	Finite-Difference Time-Domain(FDTD)法 [4.14][4.15]	74
4.2.1	FDTD法の概説	74
4.2.2	FDTD法による固体中の弾性波	75
4.3	二次元モデルを用いた基礎検討[4.11]	78
4.3.1	解析モデルの概要	78
4.3.2	数値シミュレーションの条件	80
4.3.3	計算波形の事前処理	83
4.3.4	DVAによる内部欠陥の評価結果	85
	① 算出データ数と差分値	85
	② 内部空洞のサイズ変化と差分値	89
	③ 内部空洞の位置と差分値	91
	④ 空洞高さの変化に伴う差分値についての追加検討[4.12]	95
4.3.5	二次元モデルを用いた数値実験のまとめ	100
4.4	三次元モデルを用いた検討[4.13]	101
4.4.1	概説	101
4.4.2	解析モデルの概要	101
4.4.3	数値シミュレーションの条件	102
4.4.4	数値シミュレーションの条件と計算波形の処理	104
4.4.5	数値実験の結果	105
	① 内部空洞の平面位置と差分値	105
	② 内部空洞のサイズと差分値	109
4.4.6	三次元モデルを用いた数値実験のまとめ	111
	第4章の参考文献	112
第5章	コンクリート試験体を用いた実験的検討	114
5.1	概説	114
5.2	既製品土止め板を用いた実験	115
5.2.1	概説	115
5.2.2	試験体の概要	115
5.2.3	実験の概要	116

5.2.4	測定波形の比較.....	118
5.2.5	実験結果.....	120
①	周波数を用いた空洞評価.....	120
②	算出データ数別の差分値.....	122
③	空洞深さ位置および空洞サイズが差分値に与える影響.....	124
④	複数入力点の結果を用いた内部空洞の評価.....	126
5.2.6	既製品土止め板を用いた実験のまとめ.....	128
5.3	未充填シース試験体を用いた実験.....	130
5.3.1	概説.....	130
5.3.2	試験体の概要.....	130
5.3.3	実験の概要.....	133
5.3.4	実験結果.....	135
①	算出データ数別の差分値.....	135
②	シースの深さ位置と大きさによる差分値.....	140
③	差分値と周波数を用いた未充填シースの評価結果の比較.....	143
5.3.5	未充填シース試験体を用いた実験のまとめ.....	145
5.1	矩形断面を有する試験体を用いた実験.....	147
5.1.1	概説.....	147
5.1.2	試験体の概要.....	147
5.1.3	測定の概要.....	149
5.1.4	Case01 実験結果.....	152
①	算出データ数別の差分値.....	152
②	空洞サイズと差分値.....	154
5.1.5	Case02 実験結果.....	155
①	算出データ数別の差分値.....	155
②	DVA による空洞位置評価結果.....	156
5.1.6	実験結果の考察.....	159
①	算出データ数と鋼球直径が差分値に与える影響.....	159
②	DVA を用いた定量的な内部欠陥評価の課題.....	160
5.1.7	矩形断面を有するコンクリート試験体を用いた実験のまとめ.....	161
	第5章の参考文献.....	162

第6章 結論.....	163
① 数値実験による基礎検討.....	163
② コンクリート試験体を用いた実験的検討.....	166
③ 今後の展望と課題.....	169
謝辞.....	171

第1章 序論

1.1 社会背景

1.1.1 コンクリート構造物の老朽化問題

主要な建設材料であるコンクリートは、材料単価が安く、現場施工が容易であるため、経済性と施工性の観点から多くの構造物に用いられている[1.1][1.2]。我が国においては、「道路整備五箇年計画」をはじめとした社会資本整備計画が1954年に策定され、同年に高度経済成長期を迎え、日本全土で急速な社会資本の整備が実施された[1.3][1.4]。この結果、図1.1に示すように建設投資額は増加し、高度経済成長期に多くの社会資本構造物が建設されたことで、これらの建設材料として大量のコンクリートが用いられている[1.5]。従来、コンクリートはメンテナンスの必要がないと考えられてきたが、1999年の山陽新幹線のトンネルにおけるコンクリート剥落事故や2012年の笹子トンネルの天井板崩落事故など、構造物の経年的な損傷や劣化を起因とした事故が発生したことによって、社会資本構造物のメンテナンスの必要性が顕在化した[1.4][1.6]。また、我が国の社会資本構造物は表1.1に示すように、建設後50年を経過する割合が急速に増加し、2033年には下水管きょを除く約半数の社会資本構造物が建設後50年を迎える[1.7]。

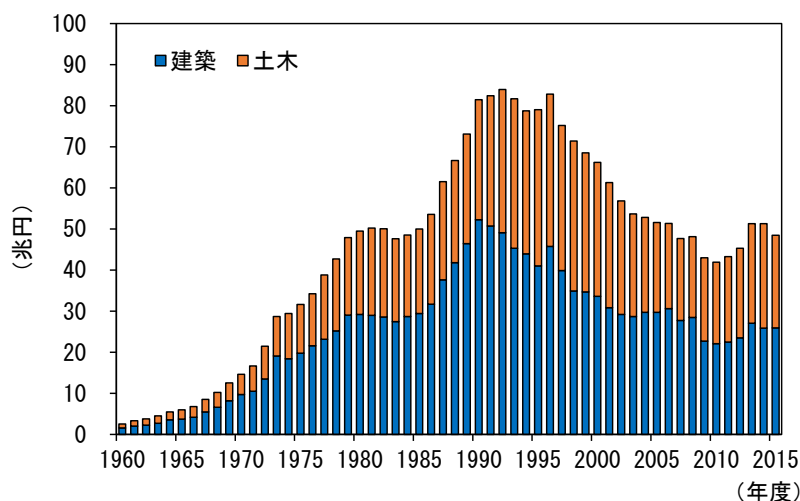


図1.1 1960年以降の建設投資額の推移[1.3]

表1.1 建設後50年を経過する社会資本構造物の割合[1.5]

社会資本構造物	2023年3月	2033年3月
道路橋 [約73万橋 (橋長2m以上の橋)]	約39%	約63%
トンネル [約1万1千本]	約27%	約42%
河川管理施設 (水門等) [約1万施設]	約42%	約62%
下水道管きょ [総延長: 約47万km]	約8%	約21%
港湾岸壁 [約5千施設 (水深-4.5m以深)]	約32%	約58%

このため、半永久的に運用できると考えられていたコンクリート構造物の資本ストックが急速な更新（メンテナンスや点検）時期を迎えるため、図 1.2 に示すように更新費（メンテナンス費用＝更新費＋維持管理費）は年々増加し、2035 年以降には、維持管理費と更新費が新設費を上回ることが予測されている[1.8][1.9]。また、図 1.3 に公共発注工事における元請完成工事高と維持・修繕工事の割合の推移を示すが、これを裏付けるように新設工事費は 1996 年を境に減少し、新設工事費と維持修繕費の割合は急速に縮まっている[1.3]。また、2012 年度における費用は 1996 年度と比較して約 40%と大幅に減少している一方で、維持修繕費は概ね同じ値で推移していることから、建設投資額の減少は否めない。

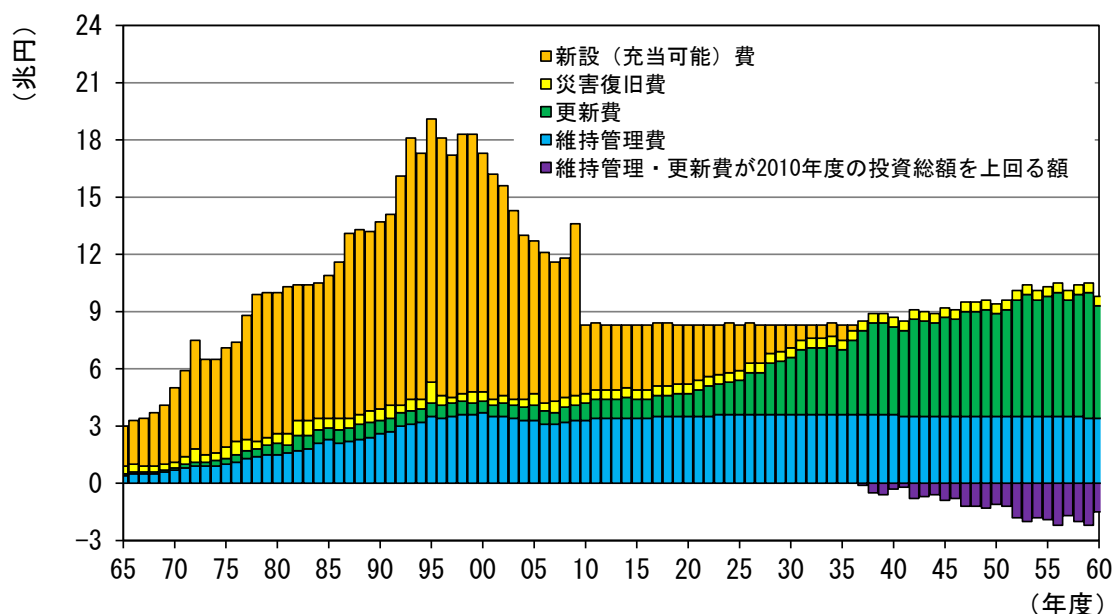


図 1.2 従来通りの維持管理・更新を行った場合の建設費用の推計[1.8]

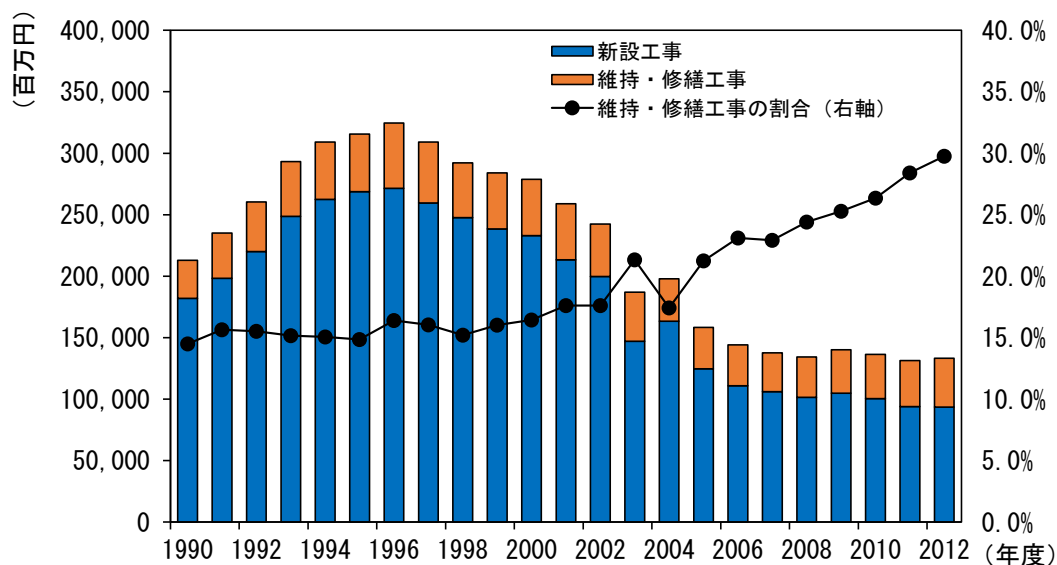


図 1.3 公共発注工事における元請完成工事高と維持・修繕工事の割合の推移[1.3]

さらに、このような社会資本構造物の老朽化に加えて、1995年の阪神淡路大震災によって露呈したコンクリート構造物の耐震性能の見直しや、2011年に発生した東日本大震災の津波によって被害を受けた社会資本構造物の性能評価や構造性能を回復するためのメンテナンス方法等の検討が行われている[1.10]。これに加えて、近年の異常気象がもたらす大規模な河川氾濫や土砂崩れなどの豪雨災害等による被害も増加していることから、自然災害がもたらす外的な応力によって生じる損傷についてもメンテナンスの必要性が認識されている。このため、維持管理費は予測値以上に増加することが懸念される。

1.1.2 建設投資額の減少と技術者不足

我が国では、社会資本構造物の維持管理問題にくわえて、人口減少に伴う財政不足と技術者不足という問題に直面している。図1.4に建設投資額と許可業者数および就業者数の推移を示す[1.3]。建設投資額は高度経済成長期の1960年頃から年々増加し、1991年のバブル崩壊後から減少している。投資額の減少と同じく、建設工事における登録業者数および就業者数の減少が確認できる。バブルの崩壊と一定の社会資本が整備されたことから、国土開発における新規投資額は減少し、これらの理由から、業者数と就業者数の減少につながったと考えられる。

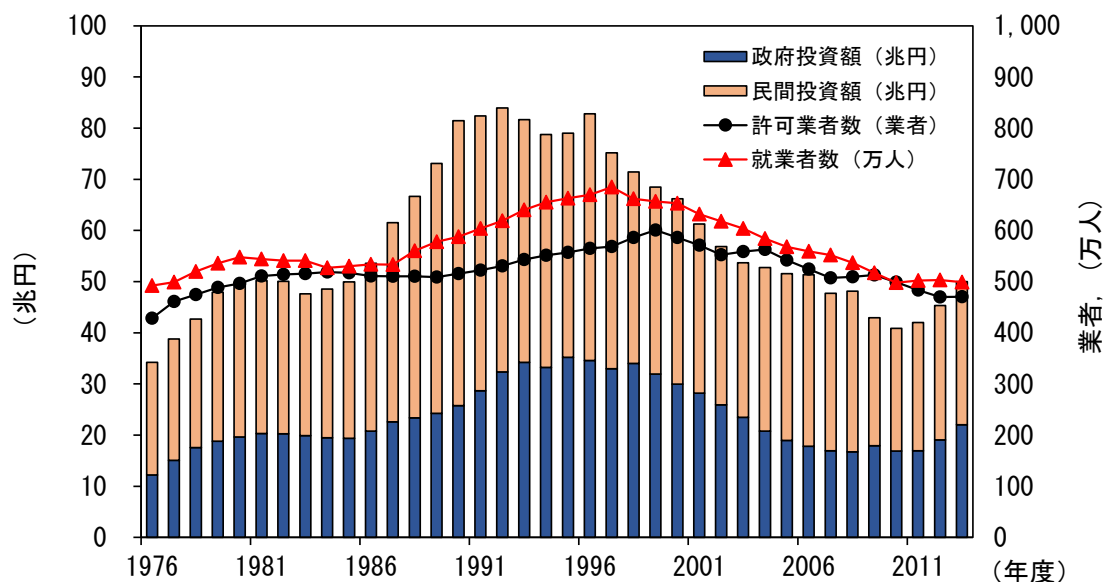


図 1.4 建設投資額と許可業者数および就業者数の推移[1.3]

これに加えて、少子高齢化による税収不足や社会保障制度の仕組みによって、我が国は、厳しい財政状況のなかにある。表 1.2 に日本の総人口と 65 歳以上と 65 歳未満の人口割合を示す。2015 年時点で 65 歳以上の人口割合が 26.6%，その後 2040 年には 35.3%まで増加すると試算されている[1.11]。また、総人口においても 2015 年の 12,709 万人から 2065 年には 8,808 万人にまで減少する。このような将来的な予測を踏まえると、今後、税収の増加や労働者の確保は非常に困難になるものと予測される。また、図 1.5 の就業者の年齢構成の変化をみると、総就業者数の減少と就業者の高齢化が顕著に進んでいる。特に建設業は、労働に体力を必要とするため高齢での労働が難しい業界であり、少子高齢化による技術者不足が他業種と比べ深刻化している[1.3]。このように、厳しい財政状況による建設投資額の減少や技術者不足といった側面からも、限られた予算と人員のなかで社会資本構造物の運用を行ってゆく必要があることから、戦略的な維持管理方法の確立は急務であるといえる。

表 1.2 日本の総人口と 65 歳以上と 65 歳未満の人口割合

	2015 年	2040 年	2065 年
総人口 (万人)	12,709	11,092	8,808
65 歳以上の割合 (%)	26.6	35.3	38.4
65 歳未満の割合 (%)	73.4	64.7	61.6

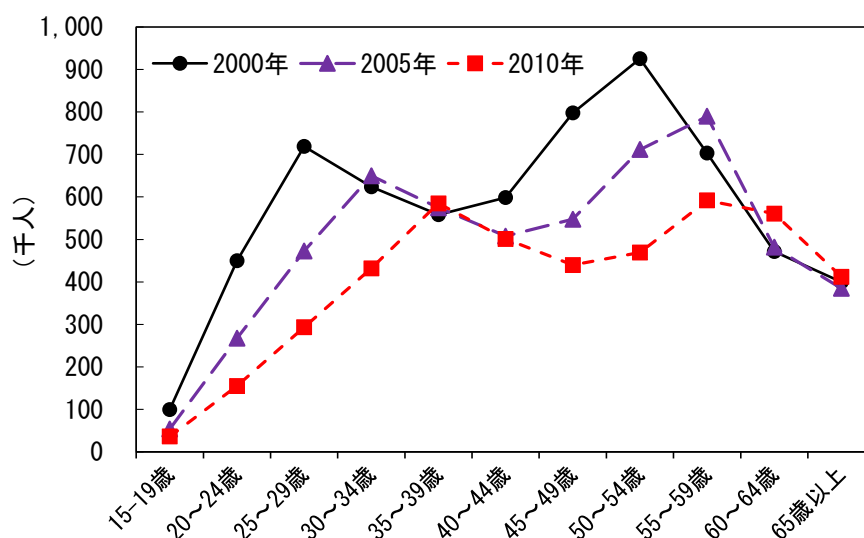


図 1.5 建設業就業者の年齢構成の変化[1.3]

1.2 コンクリート構造物の維持管理

1.2.1 コンクリート構造物の長寿命化へ取り組み

限られた予算や人員のなかで、経済的かつ効率的にコンクリート構造物を管理運用する必要がある。このためには、維持管理体制を事後保全型から予防保全型に切り替えることで構造物の性能を「長期間・安全安心」に運用することを目的とした、コンクリート構造物の「長寿命化」を図る必要がある。このため、施工時の品質管理試験や竣工後の調査・点検および非破壊検査を用いた検査手法の活用といった維持管理体制によって、コンクリート構造物の長寿命化が図られている[1.3][1.13-1.15]。このような、社会資本ストックの維持管理方法を予防保全型に見直すことによって得られる経済効果は、2019年を基準とした場合、2048年までの30年間で約80兆円の経済効果が期待できると試算報告されている[1.12]。構造物の長寿命化を目的とした主な取り組みは、2006年以前と2006以降に建設したコンクリート構造物で多少異なる。近年の建設工事においては、コンピューター技術の発展によって、建設時の設計計算および設計図や使用材料等の情報が全て電子データとして保管されている。このため、竣工後の点検・調査や評価・診断における構造物の基本情報が充実している。加えて、コンクリート構造物の長寿命化を目的とした、施工管理や品質管理方法が定められており、これらがマニュアル化されている。例えば、国土交通省が発注する橋梁等の工事においては2006年以降から、コンクリート打設後の鉄筋探査や強度試験などの品質管理試験が非破壊検査を用いて行われている[1.16][1.17]。また近年では、劣化因子の侵入を防ぐことを目的として、表層の緻密性に着目した非破壊検査手法の検討および実用的な現場での実施が検討されている[1.18][1.19]。このような非破壊検査を用いた品質管理試験は、近年のコンクリート構造物の劣化や損傷の調査結果から、老朽化に起因する劣化因子の抑制として、表層の緻密性が重要視されており、緻密度がコンクリート構造物の長寿命化や耐久性の向上につながるものだと考えられているからである[1.20][1.21]。このように、2006年以降の構造物においては、長寿命化を目的とした施工管理と非破壊検査を用いた品質管理が進められている。

他方で、2006年以前のコンクリート構造物は、設計時や竣工時の年数について幅が広いいため、現行の設計基準と異なるものが存在する。また、建設当時の設計計算や設計図等の基本情報が電子データとして保管されていない場合や、基本的な情報が欠如している場合もある。加えて、竣工から年数が経過していることから、経年的な劣化や損傷が生じていることが多く、現状の状態についても把握する必要がある。これらの理由から、構造物の性能を評価・診断する上で基本的なデータベースが乏しい。また、建設後50年を迎える構造物が急増することから、戦略的な維持管理計画のためのデータベースの構築は急務となっている。このような現状を踏まえて、政府は、これらの構造物に対して大規模な点検計画を策定しており、社会資本構造物の基本的なデータベースの構築および劣化や損傷の把握を目的とした、定期

的な目視点検や触診および打音点検を義務付け、社会資本の効率的な運用を図っている [1.22][1.23]. しかし、目視や打音検査といった簡易点検手法は、一時的なスクリーニング手法であることから、構造物の適切な診断情報としては不十分であるといえる. したがって、簡易的な調査点検では、メンテナンスの必要性の判断が難しい場合があることから、非破壊検査等を活用した詳細調査が実施される場合が多い. 非破壊検査技術は劣化の進行度や強度といった材料の物性を評価可能であると共に、鉄筋腐食や浮きやひび割れ深さなどの目視や打音点検では判断できない構造物内部の評価に力を発揮している. また近年では、少子高齢化による技術者不足や効率的な維持管理手法の確立を目的として、これら目視点検や打音点検手法や非破壊検査手法を搭載したロボット等の開発が進められており、これらを活用した調査点検の自動化や効率化に向けた検討が国策として行われている [1.24].

このような構造物の調査や点検によって、劣化や損傷を初期の段階で把握した上で構造物の性能や安全性を評価し、適切なメンテナンスを施すことが構造物の長寿命化につながる. さらに、安全性の担保にくわえて、維持管理費用の削減となる. そのため、効果的かつ効率的な維持管理手法の検討がいまなお進められている.

1.2.2 維持管理における非破壊検査の役割

非破壊検査とは、構造物に損傷を与えることなく劣化や損傷を評価する検査技術の総称である. 前項で触れた、新設時の品質管理に用いられている強度推定や配筋探査も非破壊検査手法のひとつである. 図 1.6 に構造物の長寿命化を目的とした新設構造物と既設構造物の取り組みを概略的に示す. 維持管理における非破壊検査の役割を考えると、構造物を適切に評価や診断するために必要な構造物の状態を情報化する作業であるといえる.

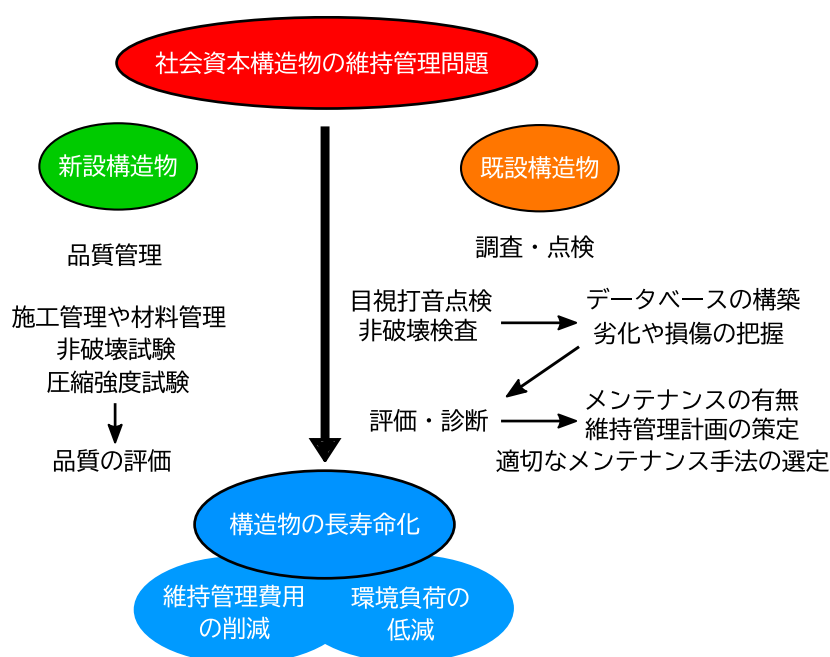


図 1.6 長寿命化を目的とした新設構造物と既設構造物における取り組み

維持管理を目的とした新設構造物に対する非破壊検査の役割は、品質の高い製品（構造物）を建設することを目的とした管理と評価である。その結果、初期不良等の軽減や早期発見につながり、品質が高く緻密な構造物の建設に寄与している。また、これからの維持管理を考えた場合、構造物の物性的な初期値を有していることは、竣工後の品質管理の際に有効な指標となるため、維持管理において優位に働くことが期待できる。このように新設時の非破壊検査は、施工時の品質管理にくわえて、建設当時の初期値に基づいた竣工後の調査点検においても有効であると考えられる。

他方で、既設構造物においては、維持管理を目的とした目視や打音による損傷の把握が進められている。詳細な評価手法として、非破壊検査が利用されることは多いが、大多数は目視や打音によって一時的に評価される。これらは、表面に露呈した劣化や損傷に対しては有効な調査手法であるものの、構造物内部の損傷を的確に評価することは難しい。また、強度や劣化度等の材料の物性を定量的に評価することはできない。さらに、人間の視覚や聴覚によって判断するため、点検者の感覚や技術力によって評価にばらつきが生じる場合や、客観的な数値データが少ないことから、評価の信憑性が乏しい。加えて、コンクリート構造物は、材料の性質上、マッシブな構造になることが多く、目視や打音では内部の状態までを評価することは難しい構造体である。特に、ダムや橋梁、原子力施設等の重要度の高い社会資本構造物は大型になることが多く、簡易評価であっても調査に時間を要する。また、評価結果の客観性と信頼性の向上は必要不可欠である。したがって、調査結果の客観性を確保し、構造物全体の状態を可及的速やかに評価するには、技術的根拠のある非破壊検査を用いることが効果的であると考えられる。非破壊検査を用いることで、構造物の劣化や損傷に対する適切なメンテナンス方法の選定が可能になるため、これら検査技術を利用することが望ましい。さらに、これらの評価結果の蓄積は、今後の維持管理におけるバックデータとして貴重な情報源になると考えられるため、検査技術の活発な利用は重要であると考えられる。

1.2.3 コンクリート構造物の非破壊検査

維持管理の重要性が認識されたことから、これらに関連する点検技術、検査技術の検討が盛んに行われてきた[1.25-1.27]。表 1.3 にコンクリート構造物を対象とした主な非破壊検査手法を示す。これらは、コンクリート構造物の品質や性能を評価することを目的として開発されており、検査手法によって評価原理と評価項目および評価範囲が異なる。例えば、表層の品質に着目した非破壊検査手法は、得られる物理現象から表層の緻密性を評価する。評価範囲は浅く、表層の品質評価に特化した検査手法である。一方、弾性波法は、強度、ひび割れ深さや内部欠陥など評価項目が多く、評価範囲が深い。特に衝撃弾性波法は、入力エネルギーが大きく減衰の影響を受けにくいことから、複合材料でマッシブな構造の多いコンクリート構造物の測定に適しているといった特徴を持つ。また、入力方法が簡便で、入力装置の寸

1.3 研究の目的

本論文では、周波数を用いた評価手法の課題である、評価手法の標準化と断面形状の制約を克服するため、応答波形の時系列変化量である差分値を用いた衝撃弾性波法における新しい欠陥評価手法を提案する。差分値は、構造物の完成直後あるいは出荷前を健全時として、予め測定した応答波形に基づいて算出される時間領域における応答波形の変化量である。差分値を用いた内部欠陥評価は差分値の大小関係によって欠陥を評価するため評価が単純である。また、予め測定した波形に基づいて内部結果の評価を行うことから、評価時の測定条件が不変的に定まっている。このため、評価や測定における標準化が容易である。さらに、健全時における形状固有の応答波形を基準としているため、あらゆる断面形状の構造物に適用できる。

1.4 論文の構成と内容

本論文は第1章から第6章の章立てによって構成されている。各章の概要を以下に示し、本論文の構成を図1.7に示す。

- ◆ 第1章の『序論』は、研究の背景と目的である、コンクリート構造物の維持管理の課題について我が国の社会情勢を踏まえて示す。また、コンクリート構造物の非破壊検査手法である衝撃弾性波を用いた内部欠陥評価の課題について概略的に述べ、本研究の目的を明らかにした上で、論文の構成を示す。
- ◆ 第2章の『衝撃弾性波法』では、弾性波の反射や伝搬速度等に関する弾性波の基礎的な物理現象についてまとめ、衝撃弾性波法がコンクリート構造物の測定に適している理由を測定方法の特徴と超音波法との簡単な比較によって述べる。また、衝撃弾性波を用いた既往の内部欠陥評価手法の測定方法および評価原理と課題について概略的にまとめ、現行の測定方法の特徴と課題を示す。最後に、Impact-Echo法（多重反射法）を基本としたコンクリート構造物の内部欠陥の評価原理と課題について、既往の研究成果を含めながら具体的に明示した。
- ◆ 第3章の『Difference Value Analysis(DVA)』では、差分値を用いた新しい内部欠陥評価手法であるDVAの測定および評価方法について述べる。衝撃弾性波法の入力から波形の出力の過程から、差分値を用いた内部欠陥評価手法の考え方について示す。また、DVAの測定条件について、衝撃弾性波法を用いた既往の研究成果や厚さ測定手法の規格を基に考察した。最後に、測定時に考えられる誤差の要因や測定過誤等の取り扱いについて検討し、差分値の算出までの測定および正規化方法について算出フローを定め、それらに関する測定波形の正規化についての手順と検討した結果について述べる。
- ◆ 第4章の『数値実験による基礎検討』では、時間領域有限差分法と呼ばれる数値シミュ

レーションを用いて、板状コンクリートを仮定した二次元モデルおよび、矩形断面を有するコンクリートを仮定した三次元モデルを用いた数値実験によって差分値の基礎検討を行った。欠陥の大きさや位置の条件を変化させた計算波形から差分値を算出し、差分値の大きさや分布から内部欠陥を評価し、差分値の有用性を確認した。

- ◆ 第5章の『コンクリート試験体を用いた実験的検討』では、板状構造の既製品土止め板を用いた実験および、未充填シースを埋設したコンクリート版を用いた実験、矩形断面を有するコンクリート試験体を用いた実験を行った。差分値は、測定波形を正規化処理した波形によって算出され、差分値の分布と大きさから内部欠陥を評価した。既製品土止め板を用いた実験では、製品のばらつきや差分値と内部欠陥の大きさや深さについて基礎的な検討を行った。未充填シース試験体を用いた実験では、現実的な非健全モデルを仮定した未充填シースの検出について、平面的に測点を配置し、差分値と周波数を指標とした内部欠陥評価の比較検討を行った。矩形断面を有するコンクリート試験体を用いた実験においても、同様に内部欠陥評価を実施した。内部欠陥によって差分値は増加し、欠陥位置の評価が可能であることが明らかとなった。また、入力点が欠陥から離れた場合においても、欠陥近傍の受信点の差分値によって内部欠陥を評価可能であることが示された。
- ◆ 第6章の『結論』は、本研究の成果を要約し、研究の成果を明確にするとともに、DVAを用いた内部欠陥評価手法の展望と検討課題を述べる。

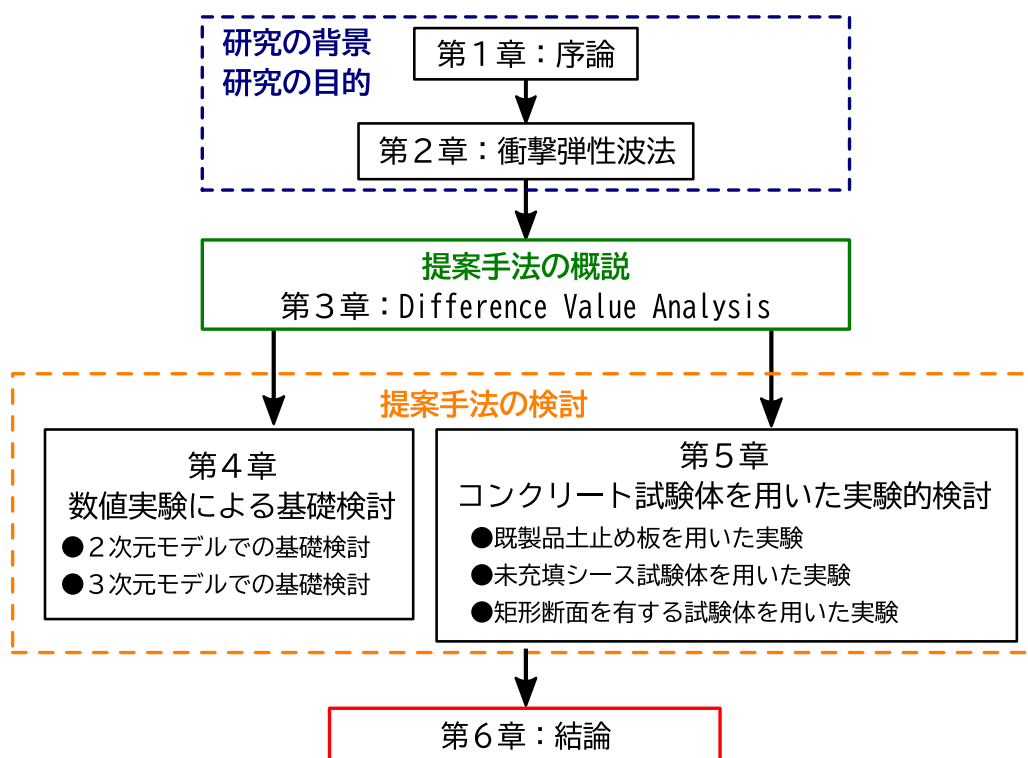


図 1.7 論文の構成

第 1 章の参考文献

- [1.1] Portland Cement Association.: 2016 U.S. Cement Industry Annual Yearbook; Construction Facts, Industry Trends and Domestic & International Coverage: Old Orchard Road Skokie, IL, 2016.
- [1.2] 魚本健人, 信田佳延, 山田一夫: 世界で使用されているコンクリート材料と技術の現状ーコンクリート材料ならびに関連規格の国際調査研究委員会報告からー, 日本コンクリート工学会誌, Vol.49, No.2, pp.54-62, 2011.
- [1.3] 国土交通省編: 国土交通白書, 2014.
- [1.4] 魚本健人: 我国のコンクリート構造物の劣化と都市の安全性, 生産研究; 生産公開講演, Vol. 57, No.5, pp.37-50, 2005.
- [1.5] 国土交通省総合政策局建設経済統計調査室: 平成 27 年度建設投資見通し, 2015.
- [1.6] トンネル天井板の落下事故に関する調査・検討委員会: トンネル天井板の落下事故に関する調査・検討委員会報告書, 2013.
- [1.7] 国土交通省: 建設業を取り巻く情勢・変化; 参考資料 4, 2016.
- [1.8] 国土交通省編: 国土交通白書, 2011.
- [1.9] 国土交通省国土交通政策研究所: 社会資本の維持管理・更新のための主体間関係に関する調査研究 (中間報告書), 国土交通政策研究, 第 121 号, 2015.
- [1.10] 細野暁: 社会基盤を支えるコンクリート構造物の安全性と耐久性, SE, Vol.170, pp.21-25, 2013.
- [1.11] 国立社会保障・人口問題研究所: 「日本の将来推計人口 (平成 29 年推計)」, 総務省統計局; 「国勢調査」資料, 2017.
- [1.12] 国土交通省: 国土交通省所管分野における社会資本の将来の維持管理・更新費の推計, 2018.
- [1.13] 道路構造物の今後の管理・更新の在り方に関する検討委員会: 参考 2; 道路構造物の今後の管理・更新の在り方, 国土交通省道路局; 国道・防災課, 2003.
- [1.14] 社会資本メンテナンス戦略小委員会: 今後の社会資本の維持管理・更新のあり方について答申; 本格的なメンテナンス時代に向けたインフラ政策の総合的な充実～キックオフ「メンテナンス政策元年」～, 参考資料, 2013.
- [1.15] 岸田弘之: 社会資本ストックマネジメントの推進に向けて, 国土技術政策総合研究所研究資料, 2012.
- [1.16] 国土交通省大臣官房技術調査課: 微破壊・非破壊試験によるコンクリート構造物の強度測定要領, 2018.
- [1.17] 国土交通省大臣官房技術調査課: 非破壊試験によるコンクリート構造物中の配筋状態およびかぶり測定要領, 2018.
- [1.18] 森濱和正: 構造体コンクリートの超音波による緻密性の評価, コンクリート工学年次論文

- 集, Vol.29, No.2, pp.601-606, 2013.
- [1.19] 後藤佳子, 谷口克彦, 村田康平, 湊太郎: WAPP を用いた透水試験のコンクリート品質評価への適用, 青木あすなろ建設技術研究所報, Vol.3, pp. 1-5 2019.
- [1.20] 半井健一郎ら: 新設コンクリート構造物における表層品質検査手法の確立, 道路政策の質の向上に資する技術研究開発成果報告レポート; No.28-6, 2018.
- [1.21] 今本啓一: コンクリートの表層透気試験方法の現状と課題, コンクリート工学, テクニカルレポート, Vol.53, No.7, pp.601-606, 2015.
- [1.22] 国土交通省道路局国道・技術課: 橋梁定期点検要領, 2019.
- [1.23] 国土交通省道路局: 道路メンテナンス年報, 2021.
- [1.24] 内閣府, 戦略的イノベーション創造プログラム (SIP) 第1期課題評価最終報告書, 3.7 インフラ維持管理・更新・マネジメント技術, 2019.
- [1.25] 大津政康: コンクリート工学における非破壊試験法の現状, コンクリート工学会誌, Vol.31, No.12, pp.5-14 1993.
- [1.26] 川上幸一, 小西真治, 篠原秀明, 久保昌史, 黒須秀明, 赤城寛一: 熱赤外線計測による地下鉄覆工コンクリートの浮き検出方法とその応用, 土木学会論文集 F1(トンネル工学), Vol.74, No.1, pp.25-39, 2018.
- [1.27] 根津 達也, 下澤 和幸: コンクリートの強度推定に関する非破壊試験最近の動向, GBRC, Vol.45, No.4, pp.34-40, 2020.
- [1.28] Sansalone, M., and Carino, N.J.: *Impact-Echo: A Method for Flaw Detection in Concrete Using Transient Stress Waves*, NBSIR 86-3452, National Bureau of Standards, Sept., 222 p. (Available from NTIS, Springfield, VA, 22161, PB #87-104444/AS), 1986.
- [1.29] Sansalone, M., and Streett, W. B.: *Impact-Echo: Nondestructive Testing of Concrete and Masonry*; Bullbrier Press, Ithaca, N.Y., 1997.
- [1.30] Sansalone, M.: *Impact-Echo: The Complete Story*, *ACI Structural Journal*, Vol.94, No.6, pp.777-786, November-December 1997.
- [1.31] Ohtsu, M.; Watanabe, T.: Stack Imaging of Spectral Amplitudes based on Impact-Echo for Flaw Detection, *NDT E Int.*, Vol. 35, pp.189-196, 2002.
- [1.32] Zou, C.; Chen, Z.; Dong, P.; Chen, C.; Cheng, Y.: Experimental and Numerical Studies on Nondestructive Evaluation of Grout Quality in Tendon Ducts Using Impact-Echo Method, *J. Bridge Eng.* 2014, 21, 04015040.
- [1.33] Ma, M.; Cao, R.; Niu, C.; Zhang, H.; Liu, W.: Influence of Soil Parameters on Detecting Voids behind a Tunnel Lining Using an Impact Echo Method, *Appl. Sci.*, Vol.9 ,2019, 5403.
- [1.34] ASTM C1383-04.: *Test Method for Measuring the P-Wave Speed and the Thickness of Concrete Plates using the Impact-Echo Method*, ASTM Standards; West Conshohocken, PA., 2010.

第2章 衝撃弾性波法

本章では、衝撃弾性波法を用いた内部欠陥評価に関する課題を明確に示すことを目的とし、以下に示す内容を述べる。

- 1 節では、弾性体の内部を伝搬する波動である「弾性波」の基本的な性質と物理現象と解析方法について概略的にまとめ、従来の衝撃弾性波法を用いた非破壊検査技術の原理について述べる。
- 2 節では、弾性波の伝搬を用いた内部欠陥評価手法について、実務的に利用されている衝撃弾性波法を用いた主な内部欠陥評価手法を取り上げ、それらの特徴と課題を概略的に示す。最後に、Impact-Echo 法を基本としたコンクリート構造物の内部欠陥の評価原理と課題について、既往の研究成果を含めながら具体的に明示し、本研究の目的を明らかにする。

2.1 弾性波の基礎

2.1.1 音波（気体や液体中の波） [2.1]

静止している気体や液体の媒質の圧力を p_0 とし密度を ρ とする。この状態に音波が伝わり、媒質は音波の伝搬方向に振動する。そのとき振動する粒子の速度を粒子速度 v という。粒子速度は、一点の粒子に着目した時の振動速度であり伝搬過程の場所によって異なる。このため、時間経過に伴い密度と圧力に変化が生じる。そのときに変化する密度を $\Delta\rho$ とし、圧力変化を音圧 p という。各物理量の変化が時間経過とともに空間を伝わる現象が音波である。固体についても、ひずみ ε 、応力 σ 、変位 u に同様の伝搬変化が起こる。

一次元の波動現象を用いて x 軸方向に伝わる平面波 v について考える。図 2.1 のように、 x と $x + \Delta x$ の間にある媒質の加速度 $dv/dt \approx \partial v/\partial t$ と、単位面積当たりの質量 $\rho\Delta x$ の積は運動方程式から、両側から押す圧力の差 $p(x) - p(x + \Delta x) \approx (\partial p/\partial x)\Delta x$ に等しい。つまり、

$$\rho \frac{\partial v}{\partial t} = - \frac{\partial p}{\partial x} \quad (2.1)$$

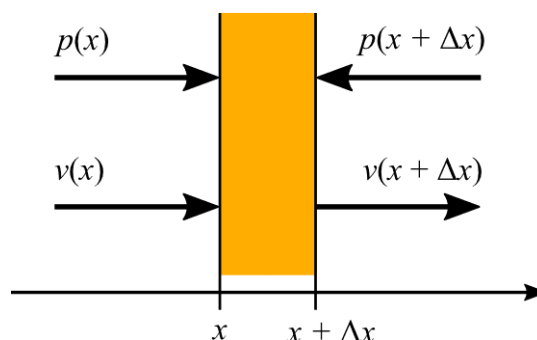


図 2.1 一次元の微小要素の運動 [2.1]

運動方程式を得る。また、仮想平面の単位面積あたりに単位時間に流入する媒質の質量は、 $[\rho + \Delta\rho(x)]v(x)$ であり、同様に $x + \Delta x$ 地点で流出する媒質の質量は $[\rho + \Delta\rho((x + \Delta x))]v((x + \Delta x))$ となる。この差が $-\rho\Delta x \partial v/\partial x$ は、 x と $x + \Delta x$ の間にある媒質の単位時間当たりの質量の増加量 $\partial\Delta\rho/\partial t$ に等しいことから、

$$\frac{\partial\Delta\rho}{\partial t} = -\rho \frac{\partial v}{\partial x} \quad (2.2)$$

連続の式を得る。このとき、粘性や熱伝導を無視できる完全気体では、定積比熱と定圧比熱の比を γ として、(圧力) \times (体積) $^\gamma =$ (一定)、すなわち、 $p_0\rho^{-\gamma} = (p_0 + p)(\rho + \Delta\rho)^{-\gamma}$ が成り立つため、近似的に

$$p = \gamma p_0 \frac{\Delta\rho}{\rho} \quad (2.3)$$

を得る。液体では、式(2.3)の係数 γp_0 に体積弾性率 K を用いる。式(2.1)、(2.2)、(2.3)を連立して v 、 $\Delta\rho$ を消去すると、

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad (2.4)$$

波動方程式が得られる。ここで、 c は波の伝搬速度で、空気の場合、 $c = \sqrt{\gamma p_0/\rho}$ 、液体では、 $c = \sqrt{K/\rho}$ である。正弦波を仮定して

$$p = P e^{-j\omega t} \quad (2.5)$$

とおくと、式(2.4)はヘルムホルツ方程式、

$$\frac{d^2 P}{dx^2} + k^2 P = 0 \quad (2.6)$$

となる (ただし $k = \omega/c$)。この一般解は、

$$p = e^{j(\omega t - kx)} + e^{j(\omega t + kx)} \quad (2.7)$$

となり、第1項、第2項はそれぞれ $+x$ 方向、 $-x$ 方向に速度 $c = \omega/k$ で伝搬する波を表す。角周波数 ω が単位時間当たりの位相の変化量であるのに対し、 k は単位距離当たりの位相の変化量を表し、 k を波数という。一波長で 2π の位相変化があるので、 $k/2\pi$ は伝搬方向に単位長さに当たりの波の数を表す。つまり、その逆数は波長である。

2.1.2 音響インピーダンス

任意の点における音圧と粒子速度の振幅比を音響インピーダンス Z という。粒子速度は式(2.1)より $v = \partial u/\partial t$ となり、音響インピーダンスは式(2.8)のよう表される。

$$Z = \frac{P}{(k/\rho\omega)} = \rho c \quad (2.8)$$

音響インピーダンスは媒質固有の値であることから、 ρc を固有音響インピーダンスと呼ぶ。

2. 1. 3 媒質が異なる境界面での反射・透過と屈折

図 2.2 に示すように、異なる媒質が平面で接しているモデルを仮定する。媒質 1 と媒質 2 の持つ固有の音響インピーダンスは $Z_1 = \rho_1 c_1$, $Z_2 = \rho_2 c_2$ である。このモデルの上面から音圧振幅 P_i の平面波が垂直に入射したとき、音圧振幅 P_r , P_t の音波は、反射または透過する。これらの反射波および透過波の振幅の関係は媒質が接する境界条件によって決まる。境界面の上下で音圧は連続とならなければならないため、

$$P_i + P_r = P_t \quad (2.9)$$

の関係が得られる。また、媒質の粒子速度が異なると、境界面の上下で粒子速度が連続でなければならない。これより

$$\frac{P_i}{\rho_1 c_1} - \frac{P_r}{\rho_1 c_1} = \frac{P_t}{\rho_2 c_2} \quad (2.10)$$

となる。左辺第 2 項の反射波は、進行方向が入射波と反対であるためマイナスとなっている。式 (2.9), (2.10) を連立させ、 P_r/P_i , P_t/P_i について解くと、

$$\frac{P_r}{P_i} = \frac{\rho_2 c_2 - \rho_1 c_1}{\rho_1 c_1 + \rho_2 c_2} \quad (2.11)$$

$$\frac{P_t}{P_i} = \frac{2\rho_2 c_2}{\rho_1 c_1 + \rho_2 c_2} \quad (2.12)$$

が得られる式 (2.11) を反射係数、式 (2.12) を透過係数と呼び、それぞれ音圧の反射、透過の割合を表す。ここで、式 (2.11) から $\rho_2 c_2 = \rho_1 c_1$ であれば反射が起こらないことがわかる。

図 2.3 に示すように、平面波が境界面に入射角 θ_i で入射する場合にも、同様の境界条件が成り立つ。角度 θ を用いると境界に垂直な粒子速度は、

$$\frac{P_i \sin \theta_i}{\rho_1 c_1}, \quad \frac{P_r \sin \theta_r}{\rho_1 c_1}, \quad \frac{P_t \sin \theta_t}{\rho_2 c_2} \quad (2.13)$$

となるため、垂直入射の場合の $\rho_1 c_1$, $\rho_2 c_2$ がそれぞれ $\rho_1 c_1 / \cos \theta_i$, $\rho_2 c_2 / \cos \theta_t$ と変わるだけである。つまり、式 (2.10), (2.11) を、置き換えると反射・透過係数が求まる。また、 θ_i と θ_t の間にはスネルの法則

$$\frac{\sin \theta_i}{c_1} = \frac{\sin \theta_t}{c_2} \quad (2.14)$$

が成り立つ、媒質の音速の変化によって伝搬方向が変わる現象を屈折という。

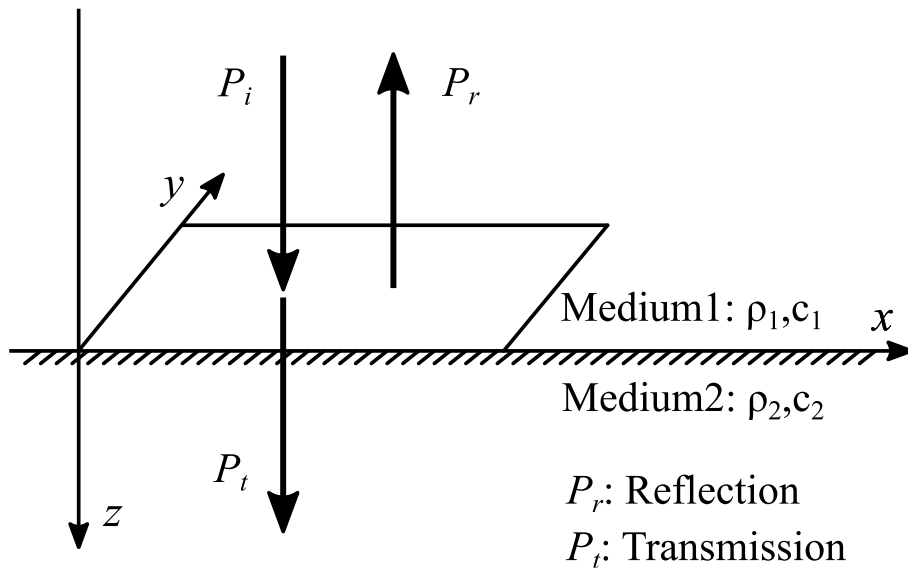


図 2.2 異なる音響インピーダンスを持つ境界モデル図[2.2]

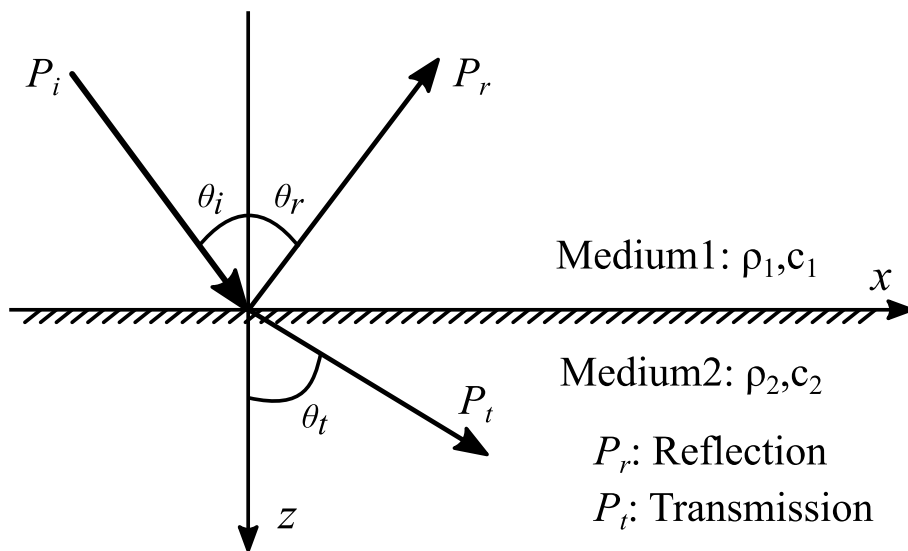


図 2.3 波の入射角による反射と屈折[2.2]

2. 1. 4 弾性体の波動現象 [2. 3] [2. 4]

弾性体を伝搬する波動を弾性波と呼び、その伝搬速度を弾性波速度という。空気中を伝わる音波の場合の「音速」に相当する物理量である。ここでは、弾性波が伝わっていく現象を簡単に説明するために、図 2. 4 のような棒の一部を切った微小部分の力のつり合いを考える。棒の微小部分の長さを δx 、棒材料の密度を ρ とする。棒の切断部の両端に作用する力をそれぞれ F_1 、 F_2 とすれば、慣性と力のつり合いから、

$$\rho A \delta x \frac{d^2 u}{dt^2} + (F_2 - F_1) = 0 \quad (2.15)$$

が成り立つ。ここで、 A は微小部分の断面積、 u は微小部分の変位である。式の第 1 項は、質量と加速度を掛け合わせたものであり、[質量] × [加速度] = [力] を表している。また、対象としている棒は一次元であることから、断面積 A は場所によらず一定であり、断面積と微小部分の長さおよび密度の積は、対象としている微小部分の質量となる。また、第 2 項は、 $(F_2 - F_1)$ は微小部分の両側に作用する力の差であることから、微小部分を動かそうとする力そのものである。弾性体に圧縮力や引張力が作用するとひずみが発生し、逆にひずみが生じるとそこに力が発生する。応力とひずみの関係は、

$$\sigma = \varepsilon E \quad (2.16)$$

となり、 ε はひずみ、 E は弾性係数、 σ が応力である。この関係は、作用した応力によって生じたひずみで除した値として、弾性係数が式 (2. 17) のように定義されているからである。

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (2.17)$$

応力は、単位面積あたりに作用する力のことであり、 $[\text{N}/\text{m}^2]$ （もしくは、 $[\text{Pa}]$ ：パスカル）という単位を持つ。ひずみは、長さや大きさの変化の度合いを示す比率のため無次元量であり、金属やコンクリートのような材料の分野では、ひずみは比較的小さく 100 万分の 1 程度（ μs ：マイクロストレイン）である。また弾性係数は、ひずみと応力の比例係数となっている。弾性係数は材料固有の値であり、コンクリートの場合には強度や配合によって異なる値を示すが、一般的な物性値の場合で約 $40,000 \text{N}/\text{m}^2$ 程度となる。ひずみは、長さ方向の距離の変化であることから、

$$\varepsilon = \frac{du}{dx} \quad (2.18)$$

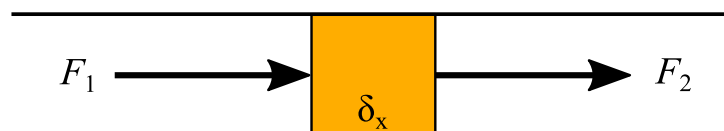


図 2. 4 一次元の棒中の力のつり合い

となる。 u は棒の変位量、 x は変位が生じている向きを示している。つまり、変位が距離方向に勾配を持てば、それがひずみであるということを意味している。この勾配は、距離 x 地点の変位 u_1 と、そこから少し移動した $x + \delta x$ 地点の変位 $u_2 (= u_1 + \delta u)$ 間での変位差 δu である。仮に、 x と $x + \delta x$ の間での変位差が 0 とすれば $\delta u = 0$ であることから、ひずみは発生していないことになる。図 2.4 に示す棒の場合、 F_1 が作用する断面 1 が $x = 1$ のとき、 F_2 が作用する断面 2 は $x = 1 + \delta x$ である。このとき、それぞれの断面に発生している力は、

$$F_1 = AE \left(\frac{du}{dx} \right)_1, \quad F_2 = AE \left(\frac{du}{dx} \right)_2 \quad (2.19)$$

これらを式 (2.15) に代入すると、

$$\rho A \delta x \frac{d^2 u}{dt^2} + \left(AE \left(\frac{du}{dx} \right)_2 - AE \left(\frac{du}{dx} \right)_1 \right) = 0 \quad (2.20)$$

さらに整理して、

$$\rho \frac{d^2 u}{dt^2} + \frac{E}{\delta x} \left(\left(\frac{du}{dx} \right)_2 - \left(\frac{du}{dx} \right)_1 \right) = 0 \quad (2.21)$$

となる。ここで、第 2 項がひずみの勾配を示していることに着目すると、運動方程式の対象としている微小部分 (断面 2 から断面 1 に至る部分) でのひずみの勾配となっている。また、この区間でひずみがほぼ直線的な勾配を表現できる微小区間であると仮定すると、

$$\frac{1}{\delta x} \left(\left(\frac{du}{dx} \right)_2 - \left(\frac{du}{dx} \right)_1 \right) = - \frac{d^2 u}{dx^2} \quad (2.22)$$

と表すことができる。つまり、変位の距離方向に対する二階微分となる。なお、右辺の項がマイナスとなる理由は、断面 1 から断面 2 の X 軸の正の方向に対して微分すると、式の左辺は、断面 1 から断面 2 を差し引く必要がある。このため、右辺の二階微分の項はマイナスとなる。式をまとめると、

$$\rho \frac{d^2 u}{dt^2} - E \frac{d^2 u}{dx^2} = 0 \quad (2.23a)$$

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - E \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = 0 \quad (2.23b)$$

となる。また、式 (2.23b) において、

$$c^2 = \frac{E}{\rho} \quad (2.24)$$

とおくと、

$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = 0 \quad (2.25)$$

一次元の波動方程式が得られる。一次元波動方程式の一般解は、

$$u \left(\frac{1}{c} \frac{\partial}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x} \right) \left(\frac{1}{c} \frac{\partial}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \right) = 0 \quad (2.26)$$

とおいて、

$$f(x - ct) + g(x + ct) = u \quad (2.27)$$

となる。上式では、ふたつの関数の和を変位としているが、 f, g それぞれが一次元波動方程式の特解となる。ここで、 u を任意の定数として $x - ct = u$ を微分すると $dx - cdt = 0$ となることから、

$$\frac{dx}{dt} = c \quad (2.28)$$

が得られる。これは、距離の時間微分であるから速度、すなわち弾性波速度である。ここで、一次元の場合、弾性波速度は、

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (2.29)$$

となり、媒質の弾性係数 E を媒質の密度 ρ で除した値の平方根となっている。したがって、弾性波速度は媒質固有の値であるといえる。

波動方程式の特解である関数 f と g は、関数内の変数記号が逆となっている。弾性波の進む速度についてまとめると

$$\left. \begin{array}{l} \text{関数 : } f, \quad c = \frac{dx}{dt} \\ \text{関数 : } g, \quad c = -\frac{dx}{dt} \end{array} \right\} \quad (2.30)$$

となり、両関数で波動の進行方向が逆となっていることがわかる。このため、ここでは便宜的に座標軸の正の方向に進行する波動成分を「進行波」、負の方向に進行する波動成分を「後退波」と呼ぶ。

2.1.5 応力と粒子速度の関係

固体内の任意の一点に着目した応力 σ と粒子速度 v の関係は、それぞれ

$$\text{応力: } \sigma = -E \frac{\partial u}{\partial x} \quad \text{粒子速度: } v = \frac{\partial u}{\partial t} \quad (2.31)$$

である。応力の符号が負となっているのは、圧縮応力つまり進行波を仮定しているためである。したがって、変位は圧縮ひずみであることから、着目した点での変位の距離方向の勾配は負となる。進行波については、 $x - ct = \varepsilon$ の関係から、

$$\text{応力: } \sigma = -E \frac{\partial f}{\partial \varepsilon} \frac{d\varepsilon}{dx} \quad \text{粒子速度: } v = \frac{\partial f}{\partial \varepsilon} \frac{d\varepsilon}{dt} \quad (2.32)$$

となる。ふたつの独立変数からなる微分は、

$$\frac{d\varepsilon}{dx} = \frac{dx}{dx} = 1 \quad \frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{-cdt}{dt} = -c \quad (2.33)$$

であるから、それぞれを式(2.31)に代入し、

$$\text{応力: } \sigma = -E \frac{\partial f}{\partial \varepsilon} \quad \text{粒子速度: } v = -c \frac{\partial f}{\partial \varepsilon} \quad (2.34)$$

となる。ここで、式を $\partial f / \partial \varepsilon$ について整理すると、

$$\text{応力: } \frac{\partial f}{\partial \varepsilon} = -\frac{\sigma}{E} \quad \text{粒子速度: } \frac{\partial f}{\partial \varepsilon} = -\frac{v}{c} \quad (2.35)$$

と表せられる。つまり、

$$\frac{\sigma}{E} = \frac{v}{c} \quad (2.36)$$

となる。さらに式を応力で整理すると、

$$\sigma = \frac{E}{c} v \quad (2.37)$$

が得られる。式(2.37)が進行波についての応力と粒子速度の関係である。また、弾性係数 E および伝搬速度 c は材料固有の値であるため、

$$z = \frac{E}{c} \quad (2.38)$$

となる。ここで、 $c^2 = E/\rho$ の関係から、式(2.38)は、

$$z = \rho c \quad (2.39)$$

すなわち、音響インピーダンスである。

2.1.6 伝搬する弾性波の種類

固体中を伝搬する弾性波にはいくつかの波が存在する。実体波と呼ばれる縦波：P 波 (Primary wave, P-wave) および横波：S 波 (Secondly wave, S-wave) にくわえて、実体波と異なる伝搬特性を持つ表面波が存在する。また表面波には、レイリー波 (Rayleigh wave) および板波と呼ばれるラム波 (Lamb waves) 波が存在する [2.2][2.5-2.8]。図 2.5(a)～(g) に伝搬する弾性波のイメージを示す [2.2][2.9][2.10]。縦波は、波の進行方向（波の伝わる方向）と粒子の振動方向が一致するものである。一方、横波は、波の進行方向に対して粒子の振動が垂直に作用する。また、伝搬方向が鉛直面内で振動する横波を SV 波、水平面内で振動するものを SH 波と呼ぶ。コンクリートを対象とした表面波は、主としてレイリー波とラム波がある。図 2.5(c) に示すように、レイリー波は入力面付近に限って運動する波で、入力面に対して、上下方向に動く横波成分と、平行に動く縦波成分が合成され楕円状に伝搬し、深さ方向に進むにつれて急激に減少する。一方、ラム波は、入力面に対して垂直に作用する表面波であり、面内に作用する。入力面に対して垂直な断面の寸法と波長が同程度になると、側面で反射した波が干渉することで生じる被導波である。このため、比較的薄い板や管などを伝搬する被導波は、すべてラム波にあたり、板や鉄板などの傷の検査に用いられることが多い。また、ラム波には、対称モード (S モード) と非対称モード (A モード) があり、レイリー波と同様に楕円状に伝搬する。

これらの弾性波が伝搬する速度は、媒質の弾性係数と密度およびポアソン比から、それぞれ

$$c_P = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad (2.40)$$

$$c_S = \sqrt{\frac{E}{\rho 2(1+\nu)}} \quad (2.41)$$

$$c_R = c_S \frac{0.87 + 1.12\nu}{1 + \nu} \quad (2.42)$$

となる [2.11]。ここで、 c_P は縦波の速度、 c_S は横波の速度、 c_R は表面波の速度、 E は伝搬する媒質の弾性係数、 ρ は媒質の密度、 ν はポアソン比である。一般的なコンクリートの物性値を仮定しポアソン比を 0.2 として計算した場合、伝搬速度の比は、縦波：1.00 > 横波：0.61 > 表面波：0.56 となり、縦波が一番早く、横波と表面波の速度差は小さい。また、波のエネルギーの割合は、レイリー波が 67%、横波が 26%、縦波が 7% と計算されることから、レイリー波は実体波に比べて距離による減衰が小さい [2.12]。したがって、表面近傍の振動は、レイリー波の振幅が最も大きく影響する。

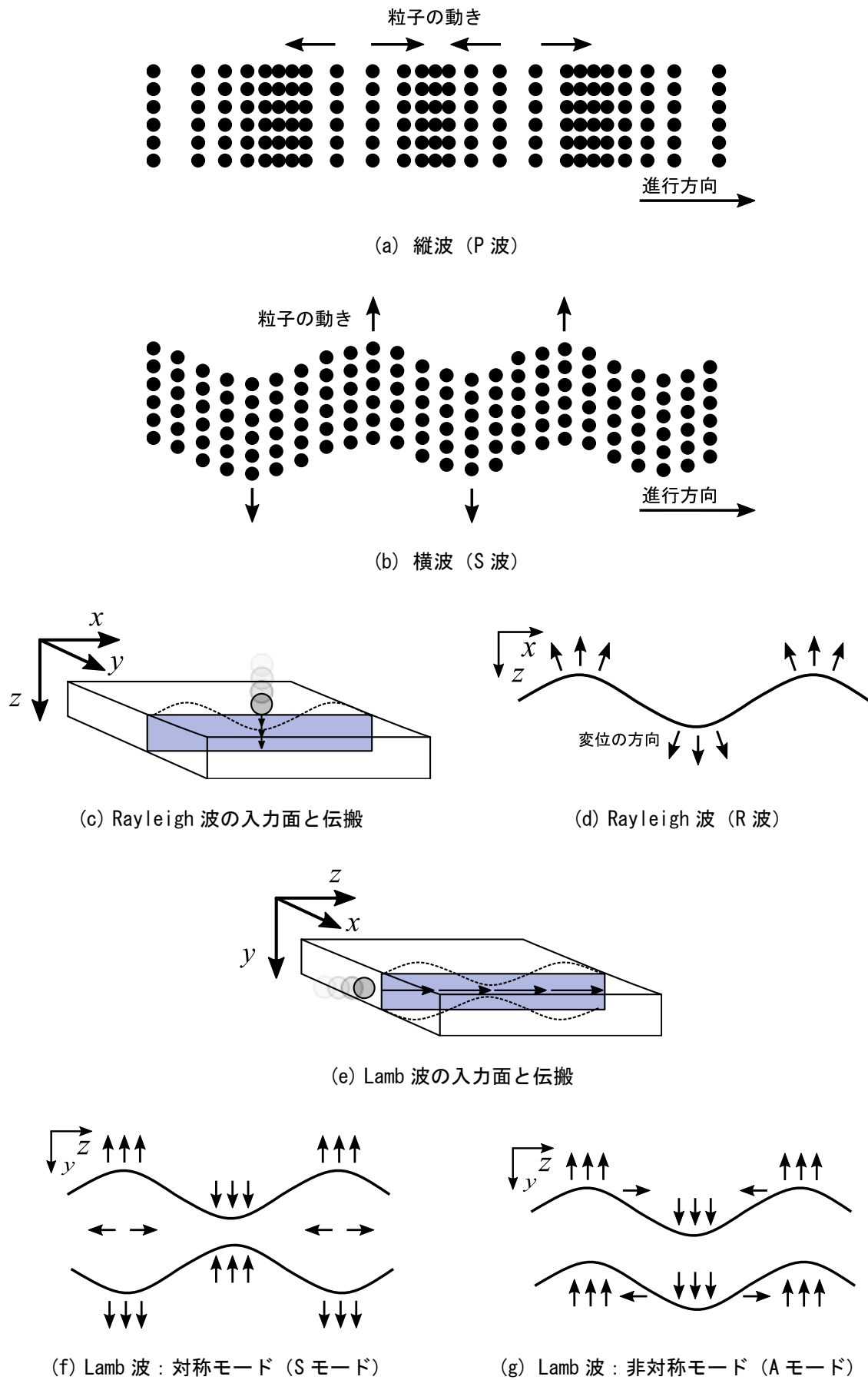


図 2.5 伝搬する弾性波の種類と伝搬イメージ [2.2] [2.9] [2.10]

2.1.7 波の減衰

無限に広がる一様な媒質の一点から発生した波は、媒質内部の粘性により波の運動エネルギーが熱になって散逸する。同様に、媒質の膨張や圧縮といった局所的な変位によっても波のエネルギーが減少する。また、式(2.11)、(2.12)の反射や透過と同様な理由で、音響インピーダンスの不連続面が存在する不均一境界面では、波の一部が反射もしくは透過するためエネルギーが減少する。これらをまとめて減衰という。一次元の x 方向に伝搬する波を考えたとき、距離 x で振幅 $P(x)$ の波が、 $x + \Delta x$ では $P(x)\Delta x$ に比例した量だけ振幅が減少するとして、その比例定数を α とすると、

$$\Delta P = -\alpha P(x)\Delta x \quad (2.43)$$

と表せる。 Δx を0として微分すると

$$\frac{dP}{dx} = -\alpha P \quad (2.44)$$

となり、この解から

$$P = P(0)e^{-\alpha x} \quad (2.45)$$

と表せられる。 α を減衰係数と呼び、物質の周波数により値が異なる。 α の単位は[Neper/m]である[2.5]。振幅 P を[dB]表示するときは[dB/m]や[dB/cm]も用いられる。

コンクリートにおいて、この減衰係数に係わる主な減衰現象として、粘性減衰 α_V と散乱減衰 α_S があり、減衰係数 α はこれらの和として次式で表すことができる[2.13]。

$$\alpha = \alpha_V + \alpha_S \quad (2.46)$$

2.1.8 自由端と固定端

対向反射面のインピーダンス境界の条件によって、自由端と固定端に分けられる。自由端は、境界面の下側に該当する音響インピーダンス有する材料が無いに等しい場合である[2.16]。一方、固定端は境界の下側の音響インピーダンスが無限大の場合に相当する。

ここで、インピーダンスの比 η を式(2.47)に示すように定義する。

$$\eta = \frac{z_2}{z_1} \quad (2.47)$$

また、反射成分の波 P_r と透過成分の波 P_t は、入射成分の波 P_i とインピーダンス比 η を用いて、それぞれ式(2.48)、式(2.49)のように表すことができる。

$$P_r = \frac{1 - \eta}{1 + \eta} P_i \quad (2.48)$$

$$P_t = \frac{2}{1 + \eta} P_i \quad (2.49)$$

境界面が空気などの自由端では、インピーダンス比が限りなく0に近いことから、入射波 P_i

と反射波 P_r は,

$$P_i = P_r \quad (2.50)$$

となる。したがって、入射波と等しい振動振幅の弾性波が反射することになる。入射波と反射波は応力と速度関係が逆となり、応力の絶対値は同じであるものの方向成分は逆向きとなる。これは入射面に対して、圧縮波が境界に到達した場合には引張波、引張波が到達した場合には圧縮波が反射するという意味である。また、式(2.49)の計算を直接実行すると、境界を透過する波動は、境界に進行した振幅の2倍となる。しかし、自由端では境界の下側には波動を伝える媒質は存在しないため透過波は発生しない。つまり、この透過波は境界面での振動速度そのものである。ここで、入射成分の粒子速度を v_i 、反射成分の粒子速度を v_r とすると、境界での透過波は、振幅および振動方向が進行波と同じであるから、境界での粒子速度 v は、

$$v = v_i + v_r = 2v_r \quad (2.51)$$

となる。境界では速度および力のつり合いの連続性が確保されるため、インピーダンスが0の媒質があると仮定すれば、進行波の2倍の振幅が生じることを示している。一方、固定端は、式(2.48)および式(2.49)の音響インピーダンス比 η に ∞ を代入すると理解できる。固定端では、境界が固定されているため、波は当然のことながら境界から先へは伝搬しない。反射波は、振幅が同じでも振動速度の方向が逆となる。入射面からみると速度の符号が逆であるから応力の方向は同じ、つまり、固定端の境界に圧縮波が到達した場合、反射波は変わらず圧縮波となる。同様に、引張波が到達した場合には引張波が反射する。さらに境界の振動速度は、

$$v = v_i + v_r = 0 \quad (2.52)$$

となる。つまり、境界が固定端の場合には境界面で振動は生じないということに他ならない。

このように、境界面の音響インピーダンスの大小関係によって自由端と固定端と呼ばれる特別な境界条件が存在する。Sansaloneらは、この境界条件の存在について同様の結果を報告している[2.11].

また、既往の研究からも、このような境界面の音響インピーダンス条件の影響が報告されている[2.14][2.15]. 通常、構造物の対向反射面は空気であることが多いが、ダムやトンネルなどでは、対向反射面に水や土といった空気と異なる音響インピーダンスを持つ材料が存在する場合がある。このような場合、弾性波が多重反射する位相速度が自由端とは異なる。例として、固定端であれば弾性波の位相は自由端の場合とは逆となり、観測される多重反射の周波数は自由端の場合と比べて半分となる。図2.6は、一次元の波動方程式を用いた数値シミュレーションによって、境界面の音響インピーダンスの比と多重反射によって得られた周波数の関係を求めたものである[2.16]. インピーダンス比が1.00付近で周波数が急激に変化する

ることがわかる。なお、この事例では、入力周波数と多重反射した場合の周波数が一致する条件である。この結果から、境界面の条件を形成する媒質の音響インピーダンスの関係によって、周波数が変化することに注意する必要がある。

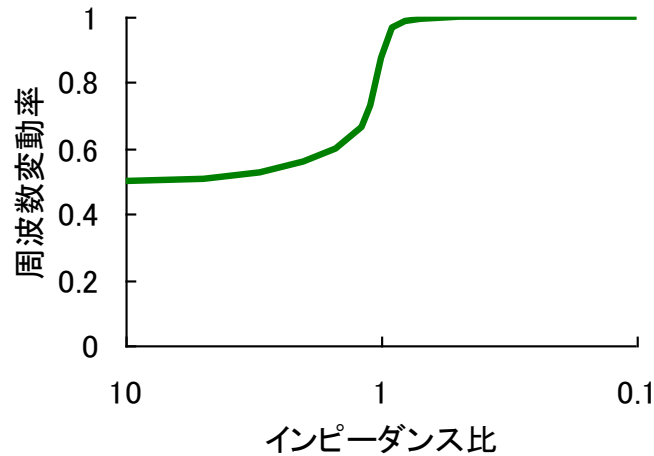


図 2.6 測定対象の媒質と背面媒質の音響インピーダンス比における周波数変動率

2.1.9 多重反射の周期と周波数[2.17]

多重反射は衝撃弾性波法を用いた非破壊検査技術を理解する上で重要な現象のひとつである。伝搬する経路に音響インピーダンスの境界があれば、弾性波の反射と透過現象が生じる。多重反射とは、このときの反射波が繰り返し多数回継続する現象を意味している。多重反射が成立するには、当然のことながら反射面はふたつ以上必要である。実構造物では、測定面に対する対向面は必ず存在し、この測定面と対向面が形成する区間の長さをここでは「厚さ」と定義する。完全に平行なふたつの平面があったとき、厚さの間で多重反射が成立すると、多重反射の周期は厚さによって決まる。つまり、多重反射の周期を知ることが可能であれば「厚さ」を知ることができる。この関係を衝撃弾性波法によるコンクリートの非破壊検査分野において確立したのが、Sansalone らである[2.18]。ここでは、弾性波の多重反射から厚さを評価する上で必要な周波数解析についてパルス状の応答を用いて述べる。

● インパルス応答

インパルスは時間幅が 0、振幅が無限大の信号である。振幅が無限大と定義するのは、時間幅が 0 であるため、 $0 \times \infty = 1$ となるような関係を期待しているからである。信号をデジタル化して取り扱う場合、時間幅はサンプリング時間間隔の Δt である。したがって、 Δt をひとつの単位と考えれば、振幅は $1/\Delta t$ としてよいことになる。インパルス応答は、このような単位時間幅を持つ波が考察対象としているシステムに入力された場合、どのような出力信号が生成されるかを記述したものである。インパルス応答は、時間の関数として表現されるので、振幅が応答の強さ、時間遅れが波動の伝搬遅延時間を示す。これを多重反射に当てはめると、対向反射面での反射率と弾性波の幾何減衰の積が振幅、波が対向反射面と測定面間を

伝搬するのに必要な時間が時間遅れとなった関数である。つまり、

$$h(\tau) = \begin{cases} \lambda_N & t = \frac{2LN}{v} \\ 0 & t \neq \frac{2LN}{v} \end{cases} \quad (2.53)$$

となっている。ここで、 λ_N は、 N 回反射した弾性波が測定面に到達したときの振幅を示しており、その振幅となるのは、弾性波が $2LN$ の距離を伝搬した時間間隔である。なお、 L は、測定面と対向反射面間で形成される厚さの長さである。また、反射波が到達しないその他の時間では振幅は0となる。図2.7は、インパルス応答の概念を示している。パルス状の入力信号が入ると、反射波も入力と同じ時間幅のパルスが反射波として観測される。図のパルス振幅が段階的に減少しているのは弾性波が幾何学的に広がりながら伝搬する過程での減衰を表現するためである。多重反射現象から厚さを求める場合には、この時間間隔 T を求め、その時間間隔から、

$$L = \frac{1}{2}vT \quad (2.54)$$

とすれば厚さは導かれる。しかし現実的には、このようなインパルス応答を求めることはない。実測定においてパルス波を入力することは不可能であり、特に衝撃弾性波法では鋼球やインパクトを用いた打撃力信号を入力信号として扱うため、時間幅を持った連続的な入力信号が入力される。この場合インパルス応答関数が同じであれば、出力信号は図のように周期性のある連続した波形として観測される。つまり、出力システムとしてのインパルス応答関数が同じであっても入力信号の形が変わると、出力信号の形も同様に変わることになる。このような関係を式で示すと、

$$y(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} h(\tau) x(t - \tau) d\tau \quad (2.55)$$

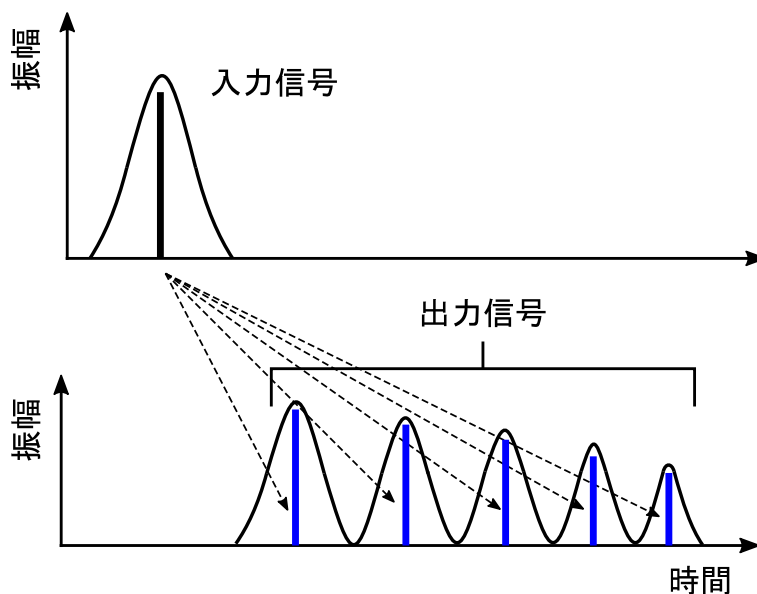


図 2.7 インパルス応答の概念図 (入出力の波形とパルス波)

これを離散型，つまりデジタル形式で書き換えると，

$$y_i = \lim_{N \rightarrow \infty} \sum_{j=0}^N a_j x_{i-j} \quad (2.56)$$

となる．さらに，分解して，

$$y_i = a_0 x_i + a_1 x_{i-1} + a_2 x_{i-2} + \dots + a_N x_{i-N} \quad (2.57)$$

と記述できる．式(2.56)，(2.57)で係数 a_j がインパルス応答関数 $h(\tau)$ の離散型での値を意味している．このようなインパルス応答関数は，出力システム固有のものであることから，インパルス応答関数を解析的に求めることができれば，出力システムの中身を知ることができる．

2.1.10 周波数解析（フーリエ解析）[2.19]

厚さ方向に多重反射する弾性波は，図2.7のように周期性を持つ．この周期は，弾性波が厚さ方向を一往復する時間であり，その周期を知ることができれば「厚さ」を推定することができる．この周期性の解析方法にはインパルス応答関数を求めて，波のピークとピークの時間間隔を求める方法や，目視によって判読することも可能であるが，Impact Echo法をはじめとした弾性波法では，入力に対する出力信号の周波数解析（フーリエ解析）を行う．周波数解析とは，時刻歴波形の時間領域を周波数領域に変換し，その周波数成分について分析することを意味する．時間領域を周波数領域に変換する作業を「フーリエ変換」と呼ぶ．周波数は，一般的に \sin ， \cos の三角関数で表現される．つまり，ある信号が，

$$x(t) = A \cos 2\pi f t \quad (2.58)$$

として三角関数で表現される．このときの f が周波数， π は円周率であり，周波数 f と角周波数 ω の間には，

$$\omega = 2\pi f \quad (2.59)$$

の関係がある．周波数は一秒間当たりの波の振動回数，角周波数は一秒間当たりの回転角度で表現した値である．フランスの数学者フーリエは，どのような波の時間関数であっても \sin ， \cos 関数によって分解できるのではないかと考えた．逆に，全ての時間波形は， \sin ， \cos の関数の和で表現できると考え，時間関数を周波数関数に変換する手法を研究し，これに基づく変換手法がフーリエ変換である．この考えによれば，任意の波の関数 $y(t)$ は，

$$y(t) = \sum_j A_j \cos(j\Delta\omega t) + \sum_j B_j \sin(j\Delta\omega t) \quad (2.60)$$

として記述することができる．ここで，係数 A_j ， B_j をフーリエ係数と呼び，係数 A_j ， B_j を決定できれば，時間関数を周波数に変換できることになる．この関係は，逆変換することも可能であり，係数 A_j および B_j が既知であれば，時刻歴波形を \sin ， \cos によって記述できる．このこ

とから、時刻歴波形を周波関数に変換することをフーリエ変換、逆に周波数を時刻歴波形に変換することを逆フーリエ変換という。このふたつの変換関係は、相互に可逆的である。係数 A_j および B_j は、三角関数の特異な性質が巧みに応用されている。三角関数には、「排他的直交性」という性質があり、周波数が異なる三角関数の積を一周分積分した値は全て0になる。積分は、図の面積を求めるような操作であるが、**図 2.8**に示すような正弦波は、正の部分の面積と負の部分の面積が等しく、全体としての面積は計算上0になる。三角関数の加法、減法定理を用いると、

$$\cos A \cos B = \frac{1}{2} \cos(A + B) + \frac{1}{2} \cos(A - B) \quad (2.61)$$

$$\sin A \sin B = \frac{1}{2} \cos(A + B) - \frac{1}{2} \cos(A - B) \quad (2.62)$$

であるから、 $A = B$ 以外の周波数の組み合わせでは全て0になる。したがって、**式 (2.60)**において係数 A_j, B_j を求めるためには、両辺に $\cos(j\Delta\omega t)$ を掛けて、一周期の時間で積分すれば、

$$\int_0^{2\pi} \cos(j\Delta\omega t) y(t) dt = A_j \pi \quad (2.63)$$

となり、これから係数 A_j は、

$$A_j = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} \cos(j\Delta\omega t) y(t) dt \quad (2.64)$$

として求められる。実際の計算では、測定した波形の測定時間長を一周期とする。フーリエ変換の係数は、測定波形と正弦(sin)あるいは余弦(cos)関数の相互相関となっていることがわかる。

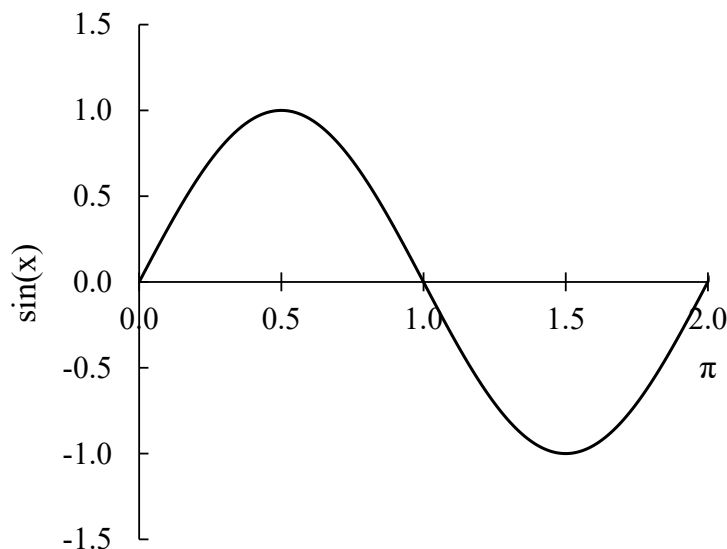


図 2.8 正弦波信号

2.1.1.1 インパルス応答関数のフーリエ変換

複素数領域のフーリエ変換は,

$$Y(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} y(t) e^{-i\omega t} dt \quad (2.65)$$

である。 $Y(\omega)$ フーリエ変換の出力, このときの, $e^{i\omega t} = \cos \omega t + i \sin \omega t$, $e^{-i\omega t} = \cos \omega t - i \sin \omega t$ である。ここで, 上式に式(2.55)を代入すると

$$Y(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-i\omega t} h(\tau) x(t - \tau) d\tau dt$$

$$Y(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-i\omega(t-\tau)} e^{-i\omega\tau} h(\tau) x(t - \tau) d\tau dt \quad (2.66)$$

$$Y(\omega) = X(\omega) \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-i\omega\tau} h(\tau) d\tau$$

$$Y(\omega) = X(\omega) H(\omega) \quad (2.67)$$

ここで, $H(\omega)$ はインパルス応答, $X(\omega)$ は入力 of フーリエ変換となっている。これから, インパルス応答は,

$$H(\omega) = \frac{Y(\omega)}{X(\omega)} \quad (2.68)$$

によって導かれる。

2.2 衝撃弾性波法の特徴と内部欠陥評価の課題

2.2.1 概説

本節では、衝撃弾性波法の特徴と実務的に利用されている欠陥評価手法の課題について、代表的な3つの測定手法を例として紹介する。それぞれの測定方法および適用範囲や評価原理について概略的に述べ、評価手法別の特徴を比較し、既往の衝撃弾性波法を用いた内部欠陥評価手法が抱える課題についてまとめる。最後に、衝撃弾性波法を用いた非破壊検査手法の先駆けである、多重反射する弾性波の周波数に基づいた内部欠陥評価手法である、多重反射法(Impact-Echo 法)の技術的な課題について具体的に示し、本研究の必要性と目的を明確にする。

はじめに、本論で述べている衝撃弾性波法とは、構造物を傷つけることなく弾性体内を伝搬する波動（以下、弾性波という）を測定する非破壊検査手法のひとつである。一般的に、衝撃弾性波法という「内部欠陥評価手法」や「強度推定手法」などの評価手法というイメージが先行する印象を持つが、衝撃弾性波法そのものは、評価手法ではなく測定手法のことを指す。そのため、本論文で述べる「衝撃弾性波法」は、“超音波法と比較して、機械的な入力方法によって低い帯域の周波数を測定対象に励起し、これによって生じた弾性体内を伝搬する弾性波を測定する手法”を総称して『衝撃弾性波法』と定義する。

衝撃弾性波法は、入力に用いる周波数が数 kHz から 20.0kHz 程度と低く、入力波長が長くエネルギーが大きいことから長距離を伝搬する弾性波を励起することが可能である。また、入力に用いる周波数帯域が低いため、コンクリート内部の鉄筋の影響や減衰の影響を受けにくい。このため、複合材料でマッシュな構造形状の多いコンクリート構造物の評価に適しているといった特徴がある。衝撃弾性波法を用いた評価手法の原理は、伝搬する弾性波の物理的な性質と現象から、間接的に評価対象の物性値や形状を評価するものである。「弾性波の多重反射の周波数を用いた厚さ評価」や「弾性波の伝搬速度を用いた強度推定」などが例として挙げられる[2.17][2.20]。また、目的に応じて測定の方法や解析方法を設定することで、複数の評価項目を弾性波の物理現象から評価可能であるため、弾性波を用いた非破壊検査評価技術は多岐にわたる[2.21]。このため評価項目に応じて、測定の方法や解析方法が異なることから、評価項目別に技術資格制度が導入されている評価手法も存在する[2.17]。また、弾性波の物理現象を適切に測定し評価することを目的として、測定方法や適用条件等の規格が存在するものもある[2.17][2.20][2.22]。衝撃弾性波法を用いた評価技術の検討は現在でも盛んに進められており、技術の進歩や社会のニーズに合わせた規格の整備および資格認証等の技術普及が進められている[2.23]。

2.2.2 衝撃弾性波法の特徴[2.21]

衝撃弾性波法は弾性波を用いた非破壊検査技術の一測定手法であり、弾性波を用いた非破壊検査手法を弾性波法と呼ぶ。一般的に弾性波法は入力方法の違いによって、大別してふたつの測定手法として以下のように分類される。探触子の振動を用いて、可聴域よりも高い周波数帯域を入力信号として用いる「超音波法」、鋼球やハンマを機械的に衝突させ、超音波法と比較して低い周波数帯域を入力信号として用いる「衝撃弾性波法」に分類される。図 2.9 に、これらの測定手法の入力周波数帯域と入力エネルギーの相互比較図、表 2.1 に測定手法の特徴、表 2.2 に両手法のコンクリート構造物の評価項目の一覧を示す[2.22][2.24]。超音波法は電気的な入力方法であることから、入力周波数を制御することが可能で、安定した入力波を励起することができる。また、高い周波数帯域を入力波として用いていることから指向性が高い。そのため、金属などの均質な材料を用いた構造部材や部品の微小な傷や亀裂位置の評価を得意とする。しかし、コンクリートのように水、空気、セメント、砂利、鉄筋などで構成される複合材料の場合では、減衰の影響が大きくなるため、探触子を用いた高周波の入力信号は長距離を伝搬することが難しくなる。そのため、長距離を伝搬するには入力する周波数を低くせざるを得ず、結果的に超音波法の指向性は低くなる。加えて、コンクリート構造物は材料の性質上、マッシュな構造形状になることが多いことから適用できる大きさが限定される。言い換えれば、比較的薄いコンクリート部材にしか適用できないことになる。一方、衝撃弾性波法は、鋼球等による機械的な入力方法であることから、超音波法と比較して入力周波数が低く、入力エネルギーが大きい。このため、減衰の影響を受けにくく、長距離を伝搬する弾性波を励起することが可能である。このため、弾性波を用いたコンクリート構造物の測定には衝撃弾性波法が用いられることが多い。

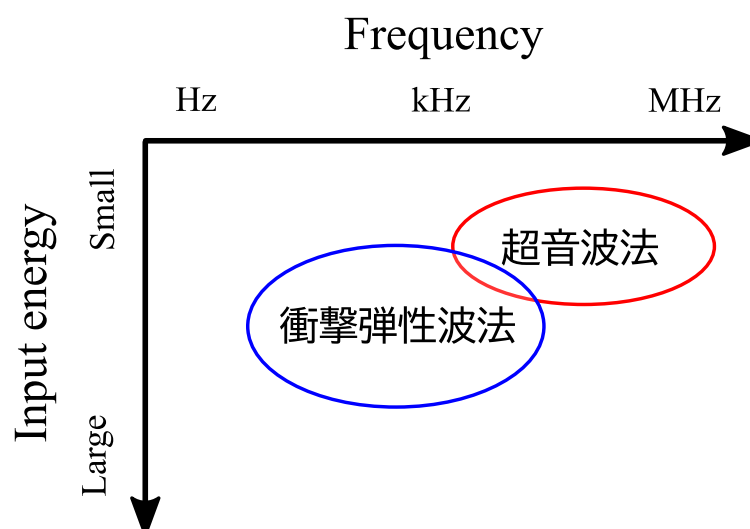


図 2.9 衝撃弾性波法と超音波法の入力周波数帯域と入力エネルギーの相互比較[2.21]

表 2.1 衝撃弾性波法と超音波法の特徴[2. 21]

名称	衝撃弾性波法	超音波法
特徴	使用する周波数が低いため減衰の影響を受けにくく、弾性波の伝搬距離が長い しかし、欠陥検出の分解能は超音波法に劣る	2 探触子による透過法や 1 探触子のみでの反射波がある 規模の小さな欠陥に対する検出能力がある
センサの周波数帯域	加速度計，速度計，変位計 数 kHz～数十 kHz	超音波探触子，AE センサ 数十 kHz～500kHz 程度
評価指標	伝搬速度・時間 振幅・エネルギー，周波数特性等	伝搬速度・時間 振幅・エネルギー，周波数特性等
測定事例	品質評価（弾性係数・圧縮強度），内部空隙・剥離，部材寸法・厚さ，PC グラウトの充填評価等	品質評価（弾性係数・圧縮強度），ひび割れ深さ，内部空隙・剥離，部材寸法・厚さ，鉄筋位置推定等
計測誤差の要因	センサ感度，装置の時間分解能	センサ感度，装置の時間分解能，表面状態，センサ接触状態等

2. 2 衝撃弾性波法と超音波法を用いた評価項目 [2. 20]

対象	評価項目	衝撃弾性波法	超音波法	
新設	凝固硬化過程		○	
	強度，表層部の品質	○	○	
	部材厚さ	○	○	
	初期不良	充填不良部	○	○
		コールドジョイント	○	○
内部空洞		○	○	
グラウト未充填		○	○	
既設	ひび割れ (乾燥収縮，温度ひび割れ)	○	○	
	ひび割れ (荷重，鋼材腐食に伴うひび割れ)	○	○	
	材料劣化	○	○	
	かぶりコンクリートの剥離	○	○	
	仕上げ材の剥離	○	○	

2.2.3 衝撃弾性波法を用いた内部欠陥評価手法

衝撃弾性波法を用いた欠陥評価は、評価対象の形状や設置環境およびターゲットとする欠陥によって評価方法が異なることから、それらの条件によって測定方法を変更する必要がある。例として、ひび割れの深さを評価する「ひび割れ深さ測定」や、構造物の厚さを評価する「厚さ測定」は、測定方法や解析方法の考えが異なる[2.21]。ここでは、主として内部欠陥評価を目的とした衝撃弾性波法の測定方法に述べる。この場合、大別して以下のように分類されると考えられる[2.21][2.24][2.25]。

- ① 入力点近傍の測定面に受信点を設けた、多重反射法(Impact-Echo 法)
- ② 入力点と受信点が評価対象を挟み込むように設置した透過弾性波法
- ③ 入力点と2つの受信点と同じ面に一定の距離を離して設置し、表面を伝搬する弾性波を測定する表面弾性波法

がある。図 2.10 にそれぞれの測定模式図を、表 2.3 に測定方法別の評価指標および項目を示しており、表中の赤字は、測定方法固有の主な課題点を表している。以下に、これらの測定方法の評価原理と課題について簡単にまとめる。なお、本研究の目的である、多重反射法(Impact-Echo 法)を用いた評価原理および検討課題については次項に詳細にまとめる。

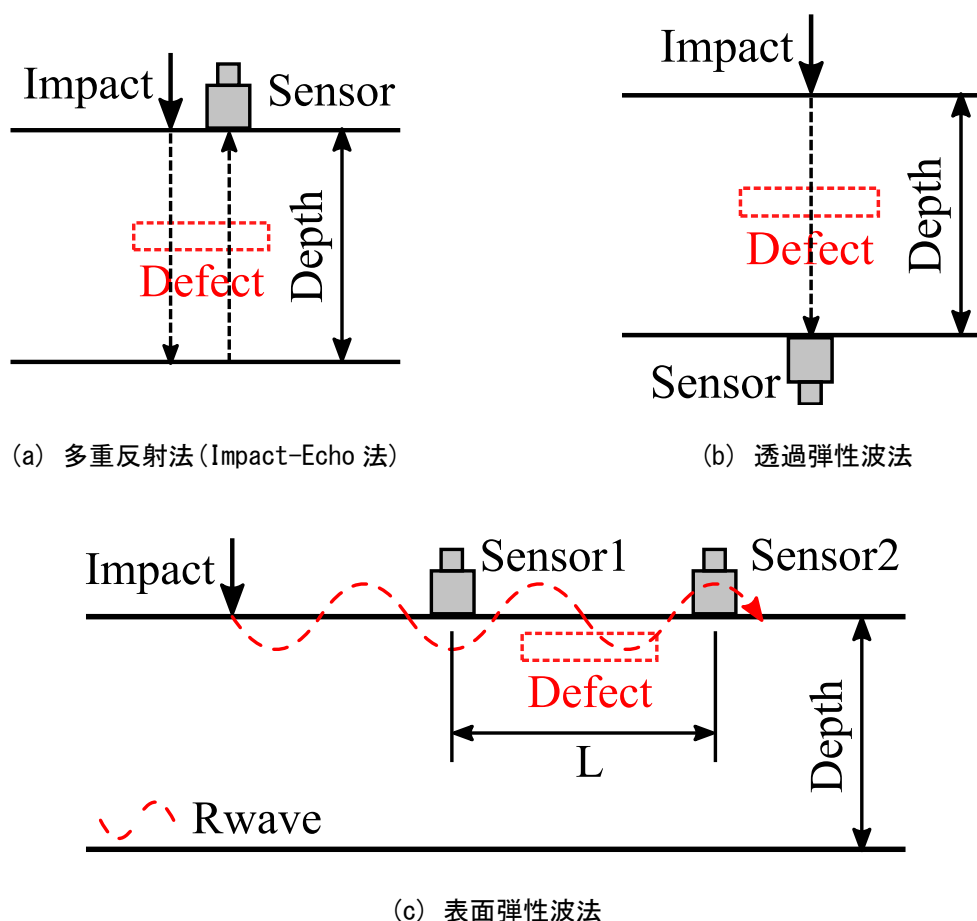


図 2.10 衝撃弾性波法を用いた内部欠陥評価を目的とした測定方法の一例

表 2.3 衝撃弾性波法を用いた測定方法別の評価指標および項目と課題点

評価指標値	評価手法の呼び名	評価項目	評価対象の断面形状の制約	測定面
周波数(振動速度)	多重反射法 (Impact-Echo 法)	部材厚さ 内部欠陥	板状構造	1面
透過弾性波速度	透過弾性波法	内部欠陥	制限無	2面
表面弾性波速度	表面弾性波法	表層の欠陥	制限無	1面

➤ 多重反射法 (Impact-Echo 法)

多重反射法は、世界的には Impact-Echo 法と呼ばれ、1986年に Sansalone と Carino らによって板厚を評価する手法として確立された[2.18][2.26]。この評価手法は、衝撃弾性波法を用いた非破壊検査手法の基本的な概念となっており、世界的に広く認知されている。このため、Impact-Echo 法に基づいた研究は数多く行われている[2.27-2.32]。多重反射法は、音響インピーダンスの異なる境界面で多重反射する弾性波の定在波の周波数を用いてコンクリートの板厚を評価する手法であるが、この評価原理を用いることでコンクリート内部の欠陥を評価することが可能である。また、入力点と受信点が同一面に設置されているため、測定方法としても簡便で、一人で測定することが可能である。さらに、内部欠陥の状態によっては、欠陥の有無や平面的な大きさにくわえて、欠陥の深さ位置を評価することが可能であるとしている[2.33]。多重反射法は、実務的な利用も多く、PC 桁の未充填シースの評価や豆板や剥離など、内部欠陥評価の実績が報告されている[2.34][2.35]。しかしながら、多くの検討結果と実績が報告されているにも関わらず、欠陥評価における具体的な評価基準や測定方法は定まっていない。このため、多重反射を用いた内部欠陥評価手法は、測定条件や評価結果が技術者の能力に依存することから、結果が、必ずしも適切であるとは限らない。また、評価対象の厚さが不明の場合には、評価基準となる固有周波数が得られないため適用することができない。加えて、評価対象の形状が板状という適用条件がある[2.17][2.20]。このため、測定対象の断面形状によっては、測定および評価することができない。コンクリートは、形状を自由自在に変えることができる施工性に優れた材料であることから様々な構造形状が存在する。このため、断面形状の制約は克服すべき課題であると考えられる。

➤ 透過弾性波法

透過弾性波法は入力面と受信面が異なり，入力面の対向面や直交面に受信点を設け，測定間の内部を通過する弾性波を測定する方法である[2.36][2.37]．主な透過弾性波法の評価指標は弾性波の到達時刻である．下記の評価式に示すように弾性波の発信時刻 S_{time} と波形の到達時刻 G_{time} から伝搬時間 Δt を算出し，測定間の伝搬距離を $Depth$ とした場合，一般的な伝搬速度 V_p の関係から導かれる理論上の伝搬時間 t と Δt の比較によって，伝搬距離区間内を評価する手法である．

$$\text{評価式： } t \approx \Delta t, \text{ 健全} \quad t = Depth/V_p, \quad \Delta t = S_{time} - G_{time}.$$

透過弾性波法は，入力面と受信面が異なるため一人で測定を行うことは難しい場合がある．一方，構造物の形状に左右されることはない．しかし，対向面等に受信点を設けることができない場合，適用することができない．このため，重力式擁壁やトンネル，ダムなど，背面に地盤や水などが存在する構造物では，反射面にアクセスすることが不可能であるため適用できないといった課題がある．したがって，構造物の設置環境に大きく左右される測定手法である．

➤ 表面弾性波法

弾性波には，表面波と呼ばれるレイリー波がある．図 2.10(c)に示すように表面波は表面を伝わる波のことを指し，振幅が大きく減衰の影響を受けにくいため長距離を伝搬するといった特徴を持つ．レイリー波は，弾性体内部を伝搬する実体波とは異なり，比較的浅い表面部分にのみ作用する．このため，ひび割れや断面欠損といった表面に露呈した欠陥評価に適している．レイリー波は，深さ方向の影響を受けながら伝搬し，その影響する深さの距離は，入力装置の接触時間によって変化する [2.33]．また，長距離を伝搬する特徴を活かして，長いスパンの桁や広い範囲の壁面等を短時間で測定することが可能である．表面弾性波法を用いた欠陥評価は，受信点間の伝搬時間（伝搬速度）や波形の振幅比を用いた評価方法がある [2.38-2.40]．これは，比較的表層に存在する欠陥によって，見かけの伝搬距離の増加や欠陥によって生じる弾性波の減衰を用いた評価方法である．もっとも利用されている評価指標は伝搬速度であり，これは透過弾性波法と同様の評価原理である．一方，表面弾性波法は，入力装置の大きさによって，深さ方向の欠陥検出能力が変化するため，深い場所の欠陥を評価する場合には入力装置を大きくする必要がある．しかしながら，入力装置を過度に大きくすることは，重量の増加によって入力面を損傷させる可能性がある．このため，表面波を用いた内部欠陥評価は，深さ方向の評価範囲に限界が生じることから，比較的表層の部分に限定した評価となる．したがって，表面波を用いた内部欠陥評価は長距離を伝搬する特徴を活用したスクリーニング手法として有効であるが，部材の比較的深い位置に存在する内部欠陥評価は難しいといった課題がある．

以上のように、衝撃弾性波法は共通して弾性波を扱うが、入力点と受信点の位置関係と着目する弾性波の伝搬挙動の違いによって、測定方法と評価指標が異なる。また、測定方法や評価手法別によって適用範囲に条件があることから、これらの特徴と条件を理解した上で、評価手法の選定と測定を実施する必要がある。一方、これらの評価課題を満足する評価手法の確立が必要であると考えられる。特に、構造の形状や設置環境に左右されない内部欠陥評価手法の確立が必要である。また、コンクリート構造物のマッシブな形状と維持管理費用などの経済的な側面を踏まえると、一面で短時間に広範囲を測定および評価可能な手法が望ましいと考えられる。

2.2.4 多重反射の周波数を用いた測定および評価

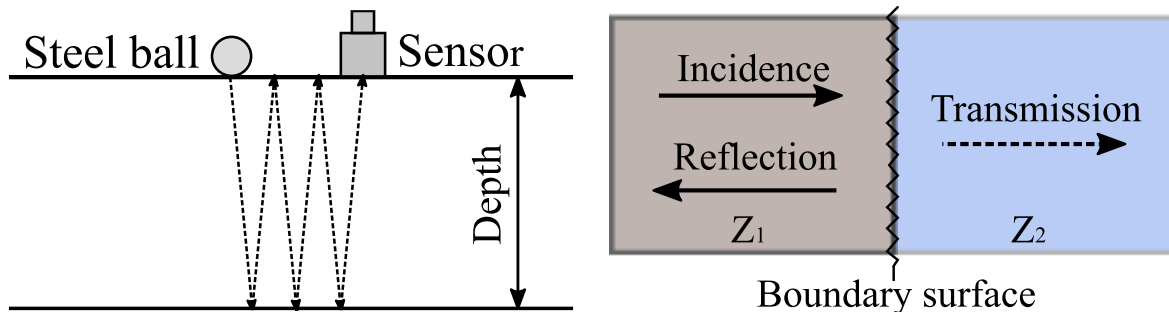
多重反射する弾性波の周波数を用いた内部欠陥評価手法について、これまでに示した弾性波の基本的な性質と既往の知見から評価手法の原理と適用範囲をまとめ、多重反射法の検討課題を明示する。

① Impact-Echo 法

衝撃弾性波法を用いたコンクリート構造物の非破壊検査手法の検討は、1980年代に Sansalone と Carino らによって基礎的検討が行われ、1997年に一連の研究結果が報告されている[2.41][2.42]。Sansalone らは、弾性体の厚さ方向に多重反射する一次振動モードの定在波の卓越周波数からコンクリート構造物の板厚や内部欠陥を評価する手法を確立した。この評価手法は、Impact-Echo 法と呼ばれ、衝撃弾性波法を用いたコンクリート構造物の評価手法の基本概念となっている。世界的に Impact-Echo 法を用いた非破壊検査手法は IE 法と呼ばれているが、日本においては、Impact-Echo 法を含む、多重反射の周期性や応答特性を用いた異なる解析評価手法が存在するため、多重反射する弾性波の周波数特性を用いた評価手法を総称して「多重反射法」と呼んでいる[2.17][2.20]。これらは、弾性波が多重反射する性質を利用する点は変わらないため、測定している物理現象は同じである。異なる部分は解析技術や評価に用いる指標の違いであるが、一般的に多重反射法と呼べば、Impact-Echo 法を基本とした「厚さ評価」と「内部欠陥評価」である。

② 弾性波の反射

図 2.11 (a) に衝撃弾性波法における多重反射測定の様式図を示す。多重反射法の測定は、鋼球等を対象表面に衝突させ弾性波を励起し、入力点近傍に鉛直に設置した加速度センサ等の受信センサで内部を伝搬する弾性波の振動応答を測定する。測定波形に対して、フーリエ変換を用いて時間領域から周波数領域に変換し、卓越する周波数スペクトルから、主として板状構造物の厚さや内部欠陥を評価する技術として利用されている。内部を伝搬する弾性波は音響インピーダンスの異なる境界面で反射もしくは通過する性質を持っている。図 2.11 (b) に弾性波の反射と透過を模式的に示す。音響インピーダンス Z は、弾性波が伝搬する媒質の密度 ρ と波の速度 V の積として $Z = \rho V$ から導かれる材料固有の値である。また、弾性波の反射度合いを表す反射係数 γ_p は $\gamma_p = Z_2 - Z_1 / Z_2 + Z_1$ から定まることから、異なる媒質が重なる境界面の音響インピーダンスの関係によって変化する。ここで、媒質 1 をコンクリート $Z_1 (Z_1 = \rho_1 V_1)$ 、媒質 2 を空気 $Z_2 (Z_2 = \rho_2 V_2)$ とし、これらが表 2.4 に示す一般的な物性値を仮定すると、限りなく 1.00 に等しくなる。したがって、境界面で弾性波は全反射する。このような弾性波の基本的な反射の性質を用いて、測定面と反射面の間で多重反射する弾性波の振動応答を用いて板厚や内部欠陥を評価する。



(a) 測定様式図

(b) 弾性波の反射と透過[2.22]

図 2.11 衝撃弾性波法の測定原理

表 2.4 媒質の物性値

Medium	$\rho(\text{kg/m}^3)$	$V(\text{m/s})$	$Z(\text{kg/s}\cdot\text{m}^2)$
1: Concrete	2400	4000	9.60×10^7
2: Air	1.29	332	4.28×10^3

③ 弾性波と伝搬速度

弾性体内を伝搬する弾性波には、実体波と呼ばれる縦波：P波(Primary wave, P-wave)と横波：S波(Secondly wave, S-wave)および、表面波と呼ばれるレイリー波(Rayleigh wave)が存在する。これらの弾性波の伝搬速度は異なり、その伝搬速度の比は、縦波：1.00 > 横波：0.61 > 表面波：0.56 となり、縦波が一番早い。また、これら3つの波のエネルギーの割合は、レイリー波が67%、横波が26%、縦波が7%となる。表面波は実体波に比べて波のエネルギーが大きいことから、距離による減衰が小さく長距離を伝搬するといった特徴を持つ。厚さ方向に多重反射する周波数に着目した多重反射法は主として縦波の弾性波法速度を用いて評価を行う。測定対象が一般的な物性値を有するコンクリートの場合、縦波の速度は4000m/s程度である。より具体的な弾性波の伝搬特性や速度の算出式については、2章1節6項を参照されたい。

④ 鋼球の接触時間と入力周波数[2.43][2.44]

衝撃弾性波法は入力装置に鋼球等を用いる。このとき、入力される周波数は入力装置とコンクリート表面が接触する時間によって決定され、これらが接触している時間を接触時間と呼ぶ。接触時間は、理想的な弾性体と仮定した鋼球とコンクリートの衝突現象を、ヘルツ接触理論に基づいて理論的に展開されており、鋼球の接触時間 T_c は式(2.69)から算出できる[2.45].

$$T_c = 4.53 \left\{ \frac{(\delta_s + \delta_c)m_s}{\sqrt{R_s v_0}} \right\}^{\frac{2}{5}} \quad (2.69)$$

ここで、 m_s は鋼球の質量、 R_s は鋼球の半径、 v_0 は鋼球の衝突速度、また、 δ_s と δ_c はそれぞれ

$$\delta_s = \frac{1 - \nu_s^2}{E_s} \quad \delta_c = \frac{1 - \nu_c^2}{E_c} \quad (2.70)$$

と表せられ、 ν_s は鋼球のポアソン比、 E_s は鋼球の弾性係数、 ν_c はコンクリートのポアソン比、 E_c はコンクリートの弾性係数となり、接触する材料固有の値となる。また、 m_s および v_0 は、

$$m_s = \rho_s V_s \quad (2.71)$$

$$v_0 = \sqrt{2gh} \quad (2.72)$$

と表せられる。 ρ_s は鋼球の密度、 V_s は鋼球の体積、 g は重力加速度、 h は鋼球の落下高さである。式(2.70)および式(2.71)、式(2.72)を式(2.69)に代入し整理すると、

$$T_c = 5.97 R_s \frac{\{(\delta_s + \delta_c)\rho_s\}^{\frac{2}{5}}}{h^{0.1}} \quad (2.73)$$

となる。各材料定数に一般的な物性値を代入し、鋼球半径 R_s を鋼球直径 $d_s (=2R_s)$ に変換し、落下高さの影響を無視できると仮定すると、Sansaloneらが提唱する接触時間と鋼球直径の関

係式である式(2.74)が得られる[2.41].

$$T_c = 0.0043d_s \quad (2.74)$$

また、このときの入力周波数 F_{INP} は接触時間の逆数として以下の式から導かれる.

$$F_{INP} = 1/T_c \quad (2.75)$$

図 2.12 は、鋼球入力によって生じた衝撃力と接触時間 T_c の関係を示す。図から接触時間が長くなると、入力エネルギーが増加することがわかる。実際の測定に用いる入力周波数は、測定対象とする構造物の厚さや伝搬距離によって決定する必要がある。「NDIS2426-2」では、衝撃弾性波法の厚さ測定時に用いる入力周波数を表 2.5 に示す値を用いることを推奨している[2.20]。表 2.6 には参考値として、鋼球直径別の接触時間、入力波長、入力周波数の一覧を示す。

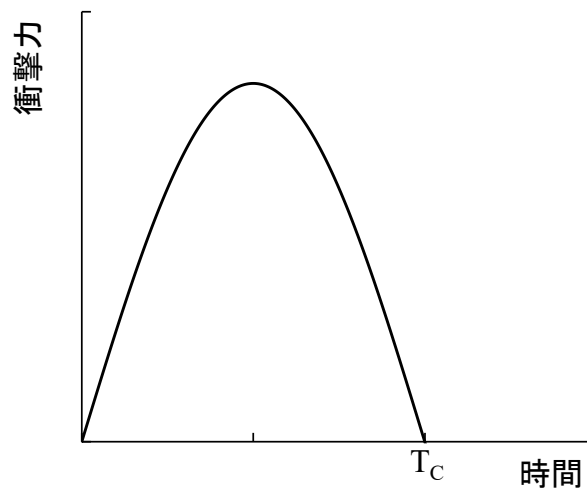


図 2.12 鋼球入力によって生じる衝撃力と接触時間の関係

表 2.5 NDIS2426-2 で推奨されている部材厚さ別に用いる鋼球の直径[2.20]

部材の厚さ (mm)	固有周波数※ (kHz)	鋼球の直径： d_s (mm)	入力周波数： F_{INP} (kHz)
100	20.0	10.0 以下	23.3 以上
150	13.3	10.0~15.0	15.5~23.3
200	10.0	15.0~20.0	11.6~15.5
300	6.7	20.0~30.0	7.8~11.6
450	4.4	30.0~40.0	5.8~7.8
700	2.9	40.0~75.0	3.1~5.8
1,250	1.6	75.0~145	1.6~3.1
2,500	0.8	145 以上	1.6 以下

※固有周波数は弾性波速度を 4000m/s と仮定して算出

表 2.6 鋼球直径と接触時間, 入力波長および入力周波数の一覧

Diameter of steel ball d_s : (mm)	Contact time T_C : (ms)	Input wavelength* λ : (mm)	Input frequency F_{INP} : (kHz)
10.0	0.043	172	23.3
20.0	0.086	344	11.6
30.0	0.129	516	7.8
40.0	0.172	688	5.8
50.0	0.215	860	4.7
60.0	0.258	1,032	3.9

*入力波長は弾性波速度を 4000m/s と仮定して算出

⑤ 周波数を用いた板厚の評価

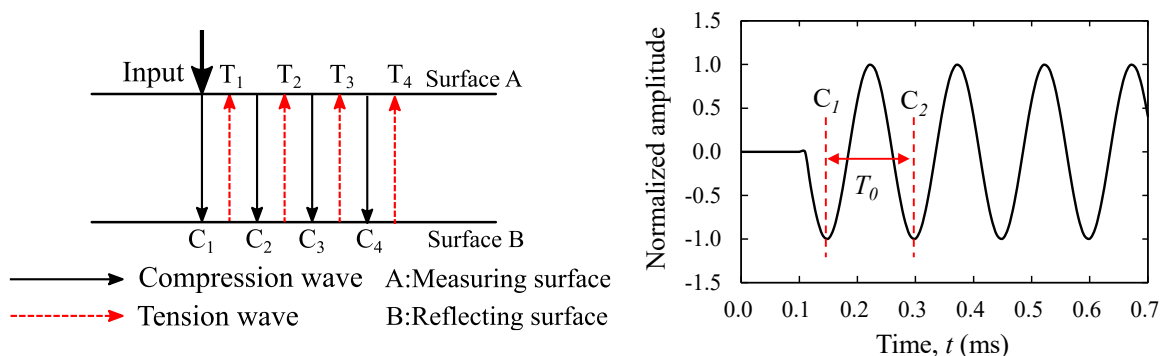
図 2.13 (a) に縦弾性波の伝搬模式図, 図 2.13 (b) に多重反射する縦弾性波の波形のイメージ図を示す. 厚さ方向に進む弾性波は, 音響インピーダンスの異なる境界面で反射し, 再び入力面に戻る. 弾性波が往復する距離は測定面と反射面からなる部材の厚さの 2 倍の距離である. つまり, 厚さ D_0 は, 固有周期 T_0 と縦波の伝搬速度 (以下, 縦弾性波速度という) V_P の関係から, 式 (2.76) によって導かれる.

$$D_0 = \frac{T_0}{2} V_P \tag{2.76}$$

また, 周期は周波数の逆数であることから,

$$D_0 = \frac{V_P}{2F_0} \tag{2.77}$$

と表せられる. ここで, F_0 は厚さ方向の固有周波数である. つまり, 厚さの固有周波数を知ることができれば式 (2.77) から厚さが導かれる. 測定波形の周波数成分はフーリエ変換を用いることで容易に得ることができる. そのため, 実務では周波数を用いて厚さを評価するこ



(a) 縦弾性波の伝搬模式図

(b) 縦弾性波の波形イメージ図

図 2.13 厚さ方向に伝搬する弾性波の伝搬と多重反射の周期性

とが一般的である。また算出時に用いる縦弾性波速度は、評価対象の縦弾性波速度が不明である場合が多いため、一般的な物性値を仮定した縦弾性波速度（4000m/s 程度）を用いて算出する場合や、表面弾性波速度を用いて算出することもある[2.20]。この厚さ評価に関する測定方法は、ASTM International「ASTM-C1383-04」や日本非破壊検査協会「NDIS2420-2」によって規格化されている[2.17][2.20][2.22]。これらの規格では、厚さ方向の一次振動モードの周波数を卓越させることを目的とした、入力周波数や測定点間の条件が規格化されており、測定および評価の標準化が進んでいることから、実務的な利用実績も多く報告されている[2.46]。

⑥ 周波数を用いた内部欠陥評価

多重反射法を用いた内部欠陥評価は、この厚さ評価の原理に基づいて実施される。図 2.14 に内部に空洞が存在しない健全モデル(No void)と内部空洞を有する非健全モデル(With void)内を伝搬する弾性波の経路と周波数スペクトルのイメージ図を示す。健全の場合、板厚 D_C の固有数波数に相当する周波数 F_{Dc} が卓越する。一方、非健全モデルの場合、空洞によって生じた境界面による反射波や伝搬経路の変化によって卓越する周波数が変化する。このように、厚さの周波数を基準とした内部欠陥評価は、健全時の厚さから導かれる固有周波数と測定波形の卓越周波数の比較によって欠陥の有無を判断する。

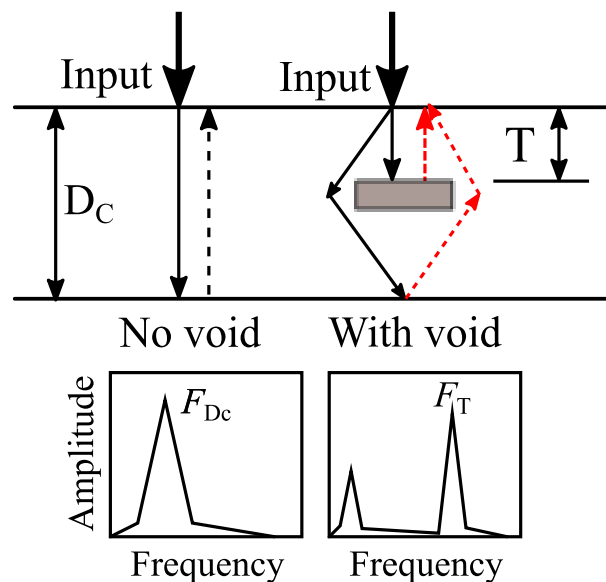


図 2.14 欠陥を有する断面内の弾性波の伝搬と周波数のイメージ図[2.41]

2.2.5 周波数を用いた内部欠陥評価手法の課題

① 測定条件や欠陥による周波数の変化

厚さの周波数に基づいた内部欠陥評価は、欠陥が存在しない場合を健全と判断することから、測定波形の卓越周波数と測定対象の厚さ方向の固有周波数の比較によって欠陥の有無を判断する。つまり「卓越周波数 \approx 固有周波数」を健全と評価する。このため、厚さを適切に評価する測定条件を基本設定とすることが望ましい。しかし、厚さ測定を基本とした場合、内部欠陥の評価について以下に示す課題が生じている。

▶ 入力点と出力点の距離による周波数変化

卓越する周波数は、入出力点の間隔と入力周波数の大きさおよび、欠陥の大きさや深さ位置によって変化することが知られている。Sansaloneらは入力点と出力点間の距離を、反射面や厚さの長さの20%から50%の範囲が適切であるとしている[2.33]。これは、厚さ方向に伝搬する縦波を主として測定するために適切とされている入出力点間の距離である。入出力点の間隔が離れすぎると、横波の影響が大きくなることで、縦波の影響は小さくなる。また、縦波と横波では、伝搬速度や波のエネルギーも異なることから測定波形に変化が生じる。つまり、厚さ評価を目的とした応答波形と異なった波が測定されるため、卓越する周波数が変化する。逆に、入力点と出力点が近すぎると、入力信号の影響が大きくなるため、卓越する周波数が入力周波数に依存し変化する。特に、波長が長く、入力エネルギーの大きい入力信号の影響は大きくなる。このため、入力点と出力点の間隔の設定については注意が必要である。

▶ 入力周波数と内部欠陥による周波数の変化

測定対象の厚さ方向の共振を目的とした場合、測定対象を共振させるために必要な入力周波数を選定する必要がある。厚さ測定手法は、ASTM International「ASTM-C1383-04」や日本非破壊検査協会の「NDIS2420-2」によって規格化されている。「NDIS2420-2」によれば、入力周波数は測定対象の厚さが持つ固有周波数の1.0倍以上であることを推奨している[2.20]。これは、入力周波数が低くなることで卓越する周波数が入力周波数によって変化することを防ぐためである。このように厚さ測定の入力周波数の規格は、測定対象の厚さに基づいて定められている。

一方、境らは一次元モデルを用いた数値シミュレーションによって、入力波長と卓越する周波数の関係を波動方程式によって理論的に導いており、入力波長と卓越周波数の間には図2.15に示す関係があるとしている[2.47]。図の横軸は入力波長 λ と解析モデルの往復分の厚さ $2D_c$ の波長比、縦軸は卓越周波数 F_{MAX} と固有周波数 F_0 の周波数比である。図によれば、波長比が0.6倍から1.9倍の範囲で厚さに相当する周波数が卓越する。しかし、入力波長が短い（入力周波数が高い）場合、周波数比が増加している。つまり、高周波の入力周波数成分の影響によって、卓越周波数 F_{MAX} が高くなったことがわかる。厚さに対して高い周波数を入力

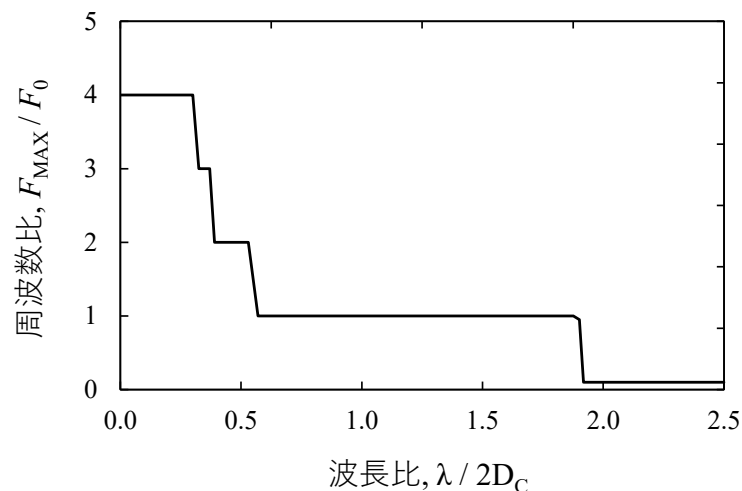


図 2.15 入力波長比と周波数比の関係[2.47]

周波数として設定する際には注意が必要である。逆に入力波長が長く（入力周波数が低い）波長が厚さの2倍以上の場合、周波数比は減少している。このことから、低周波の入力周波数成分の影響によって卓越周波数 F_{MAX} は低くなったといえる。境らの研究報告からは、入力周波数は測定対象の部材厚の0.6倍以上の波長から1.9倍未満の範囲の波長を入力することが望ましいと考えられる。一方で、「NDIS2420-2」の入力周波数は1.0倍以上であることを規定していることから、これらを鑑みると、厚さ測定を目的した場合の入力周波数は部材厚の1.0倍程度から1.6倍の範囲を用いることが適切であると判断される。また、岩野らや浅野らの複数の鋼球径を用いた実験的検討によって、入力周波数の違いによる卓越周波数の変化が報告されている[2.48][2.49]。実験結果は、入力周波数の変化に伴い高周波領域と低周波領域の周波数スペクトルの変化を示しており、目的とする周波数に対して適切な入力周波数を選定することの必要性が示されている。

他方で、厚さ測定に基づいた入力条件を設定した場合、入力面と欠陥部の周波数は卓越しない場合が多い。これは、欠陥が測定対象の厚さに比べて浅い位置に存在するため、欠陥の深さ位置に相当する固有周波数が入力周波数と比較して高いことが要因となっている。この現象は、欠陥の大きさや深さによって様々であるが、入力周波数によって卓越する周波数が変化する可能性があることに留意する必要がある。このため、欠陥位置を精度良く検出するには、入力周波数を板厚より十分に大きくするなど、段階的に入力周波数を大きくし測定することが推奨されている[2.41]。その結果、複数の入力周波数を用いて測定する必要があることから測定に時間を要する。

さらに卓越する周波数は、欠陥の深さ位置や大きさによっても変化する。入出力の条件が同じ場合、Sansalone らは、欠陥の大きさと深さ位置によって変化する周波数は図 2.16 に示す関係があるとしている[2.11][2.33]。欠陥の幅(d)と欠陥深さ位置(T)の関係によって、周波数の変化パターンが異なることがわかる。また、「 $d/T < 1/4$ 」の場合、欠陥による明確な周波数の変化は観測されないとしている。このように周波数の変化が生じない場合、欠陥の位置を特定することは容易ではない。加えて、これら周波数変化の特徴や測定条件が周波数に及ぼす影響を熟知した上で内部欠陥を評価しなければならない。このため、高い技術力と豊富な経験が必要となる。また、厚さ測定と異なり、欠陥を評価するための測定条件や評価方法について明確な規格や基準等は定まっていない。これは上述した、入力条件、欠陥の状態など、卓越する周波数を変化させる要因が複雑に混じり合うことによって、一様な周波数スペクトル分布の変化を示さないためである。このため、標準的な基準を定めることが困難となっており、結果として、欠陥の位置や大きさを評価することが難しくなっている。したがって、周波数の変化から欠陥の有無は評価可能であるが、深さ方向の大きさや位置を評価することは難しい場合が多い。

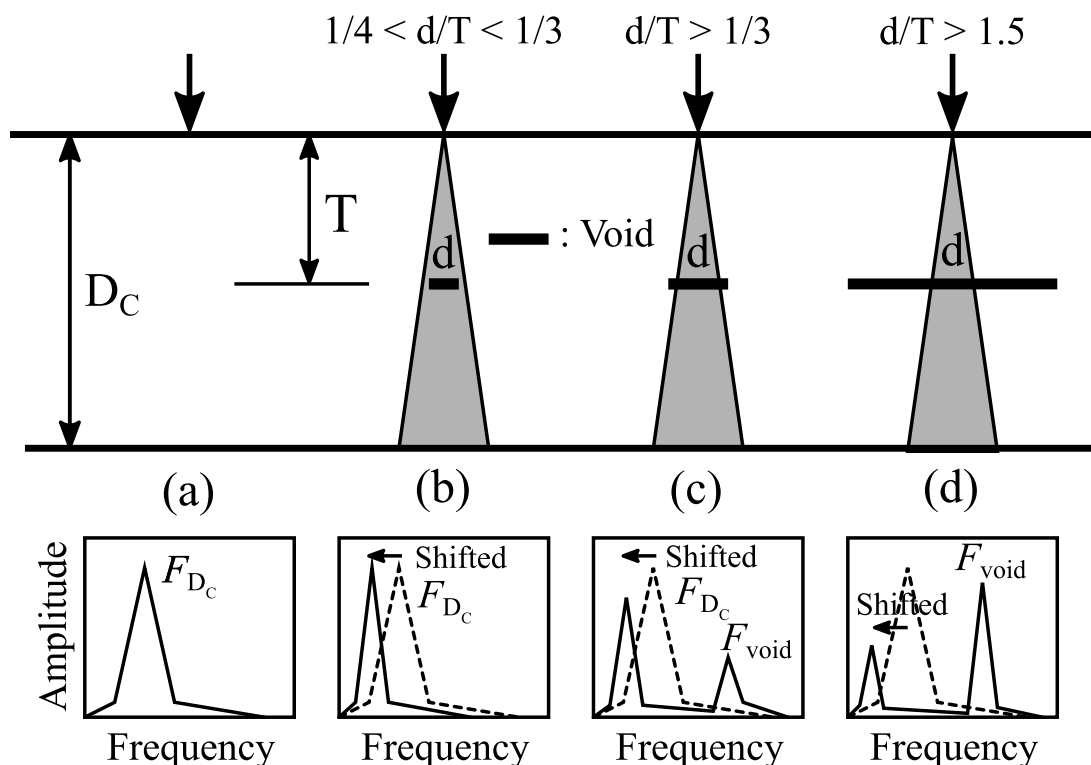


図 2.16 欠陥の幅と深さの条件によって生じる周波数スペクトルの変化[2.11]

② 測定対象の断面形状の制約

従来の卓越周波数を用いた厚さ測定手法は、図 2.17 (a), (b) に示す矩形の柱部材や複雑な断面形状の桁部材の場合、厚さを評価することは困難となる。これは、厚さ方向の対向反射面のみならず側面の境界からも弾性波が反射し、時間経過に伴う反射波が複雑になるためである。この結果、対向反射面と側面からなる複数の反射成分の周波数が卓越するため、厚さ方向の周波数を特定し、評価することが困難となる。このため、「ASTM-C1383-04」では、厚さ測定の対象を「部材の横方向の寸法は、厚さの少なくとも 6 倍である構造または、構造の一部」と定義している。「NDIS2420-2」においても、「幅および長さが、厚さに対して十分に大きいコンクリート部材に適用する」と規定されている。したがって、厚さ測定の原理は、矩形断面を有する構造物に適用することはできない。つまり、厚さの固有周波数に基づいた内部欠陥評価についても適用することは困難となる。これに対して Lin らは、同じ断面で得られた特徴的な周波数スペクトルのパターンから、矩形断面を有する部材であっても相対的に周波数を比較することによって評価が可能であるとしている[2.50-2.52]。しかし、評価基準は、健全とみなした既設構造物の周波数スペクトル分布であり、指標が健全である保証はない。したがって、評価結果の安定した信頼性を確保することは難しい。また、評価対象の端部などの、境界条件が異なる領域は相対評価の適用が難しい場合がある。

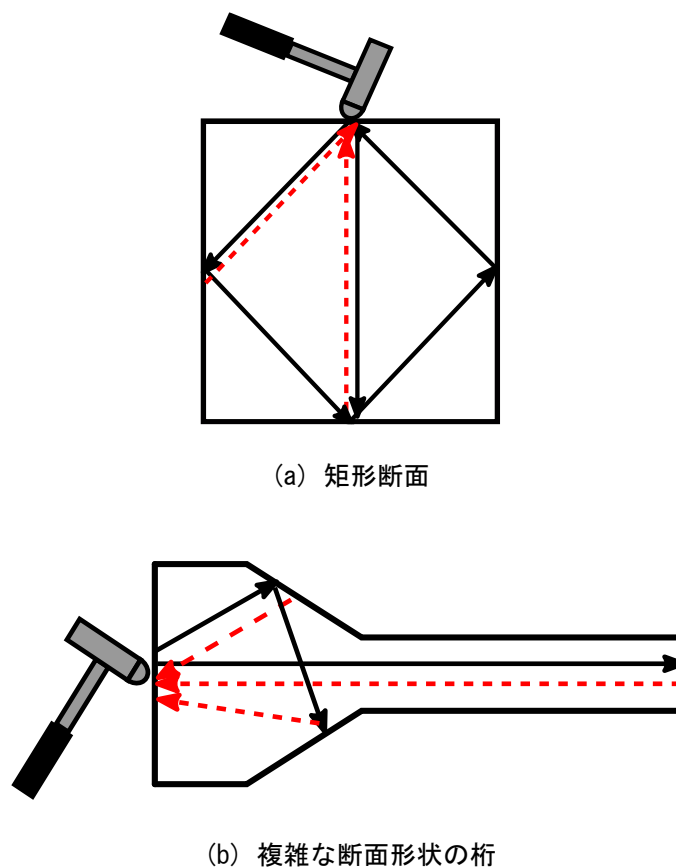


図 2.17 矩形断面を有する部材の反射経路のイメージ図

図 2.18(a), (b)に、衝撃弾性波法の厚さ評価に基づいて測定した周波数スペクトル分布を示す。図 2.18(a)は、厚さ測定の評価対象である板状構造物に対して内部欠陥評価を実施した結果、図 2.18(b)は、矩形断面構造物に対して実施した結果である。図の横軸は周波数、縦軸はスペクトル強度、凡例は内部欠陥の有無を示しており、欠陥の無い健全時が「No void」、欠陥を有する非健全時を「With void」と表記している。評価対象の形状や実験の条件は同一ではないため、単純に2つの結果を比較することはできないが、板状構造物の周波数スペクトルに対して、矩形断面構造物の周波数スペクトルが非常に複雑であることがわかる。このような複雑なスペクトル分布から内部欠陥を評価することは容易ではないとことが理解できる。

このように、従来の周波数に基づいた内部欠陥評価手法は、測定対象の断面形状によって適用範囲に限界が生じている。コンクリート構造物は材料の性質と施工性の特徴から、大小様々な構造形状が存在する。そのため衝撃弾性波法は、コンクリート構造物の測定に適した測定手法であるが故に、測定対象の断面形状の制約は克服すべき課題であるといえる。

以上、本研究では、これまで上述した課題を踏まえ、測定対象の形状に左右されず欠陥の位置や大きさを評価可能であり、測定および評価方法の標準化を目的とした評価手法の検討が必要であると考え、従来の評価手法の課題を克服するために、衝撃弾性波法を用いた新しい内部欠陥評価手法を確立し提案することを目的とした。

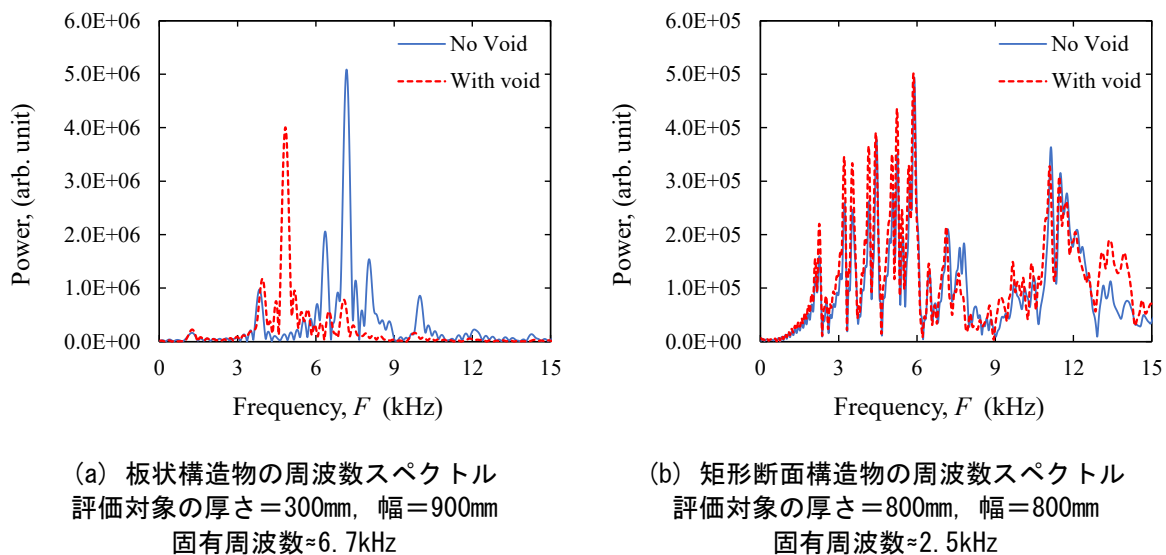


図 2.18 実構造物の健全時 (No Void) と非健全時 (With void) における周波数スペクトルの一例

第2章の参考文献

- [2.1] 齋藤繁実：超音波の伝搬，電子情報通信学会「知識ベース」，Vol.1, No.2-1, 2014.
- [2.2] 渡辺健：コンクリートの弾性波動理論と欠陥評価に関する研究，熊本大学大学院学位論文，2001.
- [2.3] 大好直：弾性波動論，秋田大学学術情報
- [2.4] 前野昌弘：波動論，琉球大学学術情報，2008.
- [2.5] 石井勇五郎：新版，非破壊検査工学，産報出版，1992.
- [2.6] 尾上守夫，高木幹雄：板を伝わる超音波，生産研究，Vol.18, No.12, pp.2.19-2.2.2, 1966.
- [2.7] 山口正恒，橋本研也，小郷寛：物質表面と弾性波，金属表面技術，Vol.2.0, No.12, pp.626-62.2, 1979.
- [2.8] 国松直：「振動に関わる苦情への対応」－第2回 振動の基礎：振動の発生と伝搬－，総務省公害等調整委員会(74)，2012.
- [2.9] 大津政康，新妻弘明，湯山茂徳，吉岡武雄：アコースティック・エミッションII，日本非破壊検査協会，pp.48-54, 1996.
- [2.10] 大谷憂馬，中畑和之：板波の伝搬モードの数値解析と動弾性有限積分法による検証，土木学会附属土木図書館，pp.17-18, 2019, 19-01-0009.
- [2.11] Carino, N.J.: Impact Echo: The Fundamentals, NDT.net, 2015.
- [2.12] F.E.リチャード jr (岩崎敏男他訳)：土と基礎の振動，鹿島出版会，pp.95, 1986.
- [2.13] 明石外世樹：コンクリート中の超音波の減衰について，セメント技術年報，12, pp.2.29-2.2.4, 1958.
- [2.14] 岩野聡史，森濱和正，極檀邦夫，境友昭：縦弾性波の反射面の材質による振動数変化について，コンクリート工学年次論文集，Vol.26, No.1, pp.1887-1892 2004.
- [2.15] 首藤浩一，極檀邦夫，境友昭，岩野聡史：衝撃弾性波法による厚さ測定でのコンクリート背面の影響，第2.2回土木学会関東支部技術研究発表会講演概要集，Vol.2.2, V-5, 2005.
- [2.16] 池端宏太，勇秀忠，極檀邦夫，境友昭，山下健太郎：衝撃弾性波法による厚さ測定値に与える背面材料の影響，日本非破壊検査協会秋季講演大会講演概要集，pp.176-178, 2011.
- [2.17] 一般社団法人 iTECS 技術協会教育委員会：iTECS 技術によるコンクリートの非破壊試験，一般社団法人 iTECS 技術協会，2016.
- [2.18] Sansalone, M.; Carino, N.J. "Impact-Echo: A Method for Flaw Detection in Concrete Using Transient Stress Waves", NBSIR 86-2.452, 1986.
- [2.19] 花田和史，荒牧軍治，塩尻弘雄，鈴木順一，仲村成貴：建設技術者のための振動理論—基礎編—，日本大学学術情報.

- [2.20] 日本非破壊検査協会規格, NIDS 2426-2: コンクリートの非破壊試験-弾性波法-第2部: 衝撃弾性波法, (一社) 日本非破壊検査協会, 2014.
- [2.21] 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, (公社) コンクリート工学会機関誌, Vol.51. No.4, pp.340-347, 2013.
- [2.22] ASTM C1383-04.: Test Method for Measuring the P-Wave Speed and the Thickness of Concrete Plates using the Impact-Echo Method, ASTM Standards; West Conshohocken, PA., 2010.
- [2.23] 日本非破壊検査協会, 衝撃弾性波法研究委員会: 「衝撃弾性波法による非破壊試験の高度化と信頼性向上に関する取組み」特集号, (一社) 日本非破壊検査協会機関誌, 2016, 9.
- [2.24] 渡辺健: コンクリート構造物の点検における評価対象別の非破壊試験・③剥離および内部欠陥, (公社) コンクリート工学会機関誌, Vol.53. No.8, pp.715-720, 2015.
- [2.25] 重松宏和, 三上信雄, 極檀邦夫, 笠井哲郎: 衝撃弾性波法による沿岸構造物の劣化診断に関する基礎研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.1, pp.1703-1708, 2010.
- [2.26] Carino, N.J., Sansalone, M., and Hsu, N.N.: Flaw Detection in Concrete by Frequency Spectrum Analysis of Impact-Echo Waveforms, International Advances in Nondestructive Testing, Ed. W.J. McGonagle, Gordon & Breach Science Publishers, New York, pp. 117- 146, 1986.
- [2.27] Ohtsu, M.; Watanabe, T.: Stack Imaging of Spectral Amplitudes based on Impact-Echo for Flaw Detection, *NDT E Int.*, Vol. 35, pp.189-196, 2002.
- [2.28] 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劇の大きさと深さについて, コンクリート工学年次論集, Vol.27, No.1, pp.1693-1698, 2005.
- [2.29] Dvořák, R.; Topolář, L.: Effect of Hammer Type on Generated Mechanical Signals in Impact-Echo Testing, *Materials*, Vol.14, 2021, 606.
- [2.30] Yoon, Y.-G.; Lee, J.-Y.; Choi, H.; Oh, T.-K.: A Study on the Detection of Internal Defect Types for Duct Depth of Prestressed Concrete Structures Using Electromagnetic and Elastic Waves, *Materials*, Vol.14, 2021, 3931.
- [2.31] Lee, C.; Kee, S.-H.; Kang, J.W.; Choi, B.-J.; Lee, J.W.: Interpretation of Impact-Echo Testing Data from a Fire-Damaged Reinforced Concrete Slab Using a Discrete Layered Concrete Damage Model, *Sensors*, Vol.20, 2020, 5838.
- [2.32] Kim, H.-J.; Mission, J.L.; Dinoy, P.R.; Kim, H.-S.; Park, T.-W.: Guidelines for Impact Echo Test Signal Interpretation Based on Wavelet Packet Transform for the Detection of Pile Defects, *Appl. Sci*, Vol.10, 2020, 2633.
- [2.33] Carino, N.J.: THE IMPACT-ECHO METHOD: AN OVERVIEW, Reprinted from the Proceedings of the 2001 Structures Congress & Exposition, 18 p, May 21-23, 2001.

- [2.34] Zou, C.; Chen, Z.; Dong, P.; Chen, C.; Cheng, Y.: Experimental and Numerical Studies on Nondestructive Evaluation of Grout Quality in Tendon Ducts Using Impact-Echo Method, *J. Bridge Eng.* Vol.21, 2014, 04015040.
- [2.35] 岩野聡史, 極檀邦夫, 境友昭: 衝撃弾性波法によるコンクリート内部欠陥探査, *コンクリート工学年次論集*, Vol.24, No.1, pp.1521-1526, 2002.
- [2.36] 藤田孝康, 松本力, 斎藤将貴, 笠井哲郎, 奥野正洋, 加藤広之, 野神功一, 不動雅之: 透過法衝撃弾性波法による漁港施設の内部欠陥診断手法の検討, *土木学会論文集 B3 (海洋開発)*, Vol.74, No.2, pp.I_79-I_84, 2018.
- [2.37] 桃木昌平, 蔡華堅, 塩谷智基, 小林義和, 宮永孝志: 三次元弾性波トモグラフィによるコンクリート構造物の健全性評価, *土木学会構造工学論文集* Vol.57A, pp.959-966, 2011.
- [2.38] 山口喜堂, 渡辺健, 橋本親典, 石丸啓輔: 衝撃弾性波法(表面波法)を用いたコンクリートの表面ひび割れの評価, *コンクリート工学年次論集*, Vol.35, No.1, pp.1867-1872, 2013.
- [2.39] 安井利尚, 真田佳典, 三ヶ田均, 芦田讓, 松岡俊文: 空溝による表面波の減衰効果, *物理探査*, Vol.60, No.4, pp.305-313, 2007.
- [2.40] 小山昭, 京谷孝史, 岩館礼, 斎藤秀樹, 鶴原敬久, 曾根好徳: 表面波によるトンネル覆工コンクリート健全度評価法の検討, *岩の力学連合会*, Vol.13, pp.757-762, 2013.
- [2.41] Sansalone, M., and Streett, W. B.: *Impact-Echo: Nondestructive Testing of Concrete and Masonry*; Bullbrier Press, Ithaca, N.Y., 1997.
- [2.42] Sansalone, M.: *Impact-Echo: The Complete Story*, *ACI Structural Journal*, Vol.94, No.6, pp.777-786, November-December 1997.
- [2.43] 久保元樹, 内田慎哉, 岩野聡史, 森和也, 炭谷浩一: 鋼球打撃によってコンクリートへ入力される弾性波の周波数特性に関する実験的検討, *日本材料学会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.17, pp.515-520, 2017.
- [2.44] Ikebata, K. Kobayashi, Y. K, Oda and Nakamura, K.: Influence of the input frequency for soundness evaluation of concrete structure based on waveform analysis, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Vol.1138, No.012033, 2020.
- [2.45] Goldsmith, W.: *Impact: The Theory and Physical Behavior of Colliding Solids*, Edward Arnold Press, Ltd., pp.24-50, 1965.
- [2.46] (一社) iTECS 技術協会: <https://www.itecs.or.jp/4event/society.html> (閲覧日: 2020.4)
- [2.47] 境友昭, 山下健太郎, 菅野匡: 周波数変化に着目した衝撃弾性波法による内部欠陥探査コンクリート工学年次論集, Vol.36, No.1, pp.2044-2049, 2014.
- [2.48] 岩野聡史, 極檀邦夫, 塙忠夫: 多種鋼球打撃によるコンクリート板の共振振動数の確定, *第 52 回土木学会全国大会年次学術講演会講演概要集*, Vol.52, 部門 V, 1997.

- [2.49] 浅野雅則, 鎌田敏郎, 国枝稔, 六郷恵哲: 打撃によるコンクリート部材の共振現象 と打撃音の周波数特性, 土木学会論文集, No. 760/V-63, pp.213-222, 2004.
- [2.50] Lin, Y. and Sansalone, M.: Detecting Flaws in Concrete Beams and Columns Using the Impact-Echo Method, *ACI Materials Journal*, Vol.89, No.4, pp.394- 405, July-August 1992.
- [2.51] Lin, Y., and Sansalone, M.: Transient Response of Thick Circular and Square Bars Subjected to Transverse Elastic Impact, *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol.91. No.2, pp.885-893, February 1992.
- [2.52] Lin, Y., and Sansalone, M.: Transient Response of Thick Rectangular Bars Subjected to Transverse Elastic Impact, *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol.91, No.5 pp.2674-2685, May 1992.

第3章 Difference Value Analysis (DVA)

3.1 概説

衝撃弾性波法を用いて得られる測定波形は、入力と出力の条件によって記録された測定対象固有の振動応答である。従来の周波数を指標とした内部欠陥評価は、この振動応答の卓越する周波数と厚さの固有周波数の比較によって内部欠陥を評価している。しかし、前章で示したとおり卓越周波数は、欠陥の無い健全な場合であっても、必ずしも厚さに相当する周波数が卓越することはない。特に、測定対象の断面形状に左右されることから、評価可能な構造物の形状が限定される。また測定の対象であったとしても、測定条件と内部欠陥の大きさや位置関係によって生じる周波数の変化が一様ではないため、明確な測定方法と評価基準が未だに確立されていない。このように、卓越する周波数に着目した内部欠陥評価結果は、周波数変化の不確かさが不明確であることから、安定した技術の運用と普及に課題が生じている[3.1][3.2]。

本論文では、このような卓越周波数を用いた従来の評価手法の課題を満足するために、新たな評価指標値として差分値を提案する。差分値は、構造物の完成直後あるいは出荷前を健全時として、予め測定した応答波形に基づいて算出される応答波形の時系列変化量である。従来の評価手法では、複雑なスペクトル分布を示す複数の周波数成分から欠陥を評価しているが、差分値を指標とした評価手法は、時間領域内の差分量を用いた比較的単純な一変数の成分分析である。そのため、差分値の大小関係や分布から欠陥を評価することから、複雑な情報を精査し判断する必要はなく、従来手法と比較して評価が単純である。これに加えて、予め取得した応答波形に基づいて差分値を算出し内部欠陥評価を行うため、評価時の測定条件が不変的に定まっている。したがって、測定や評価における標準化が容易となる。このように、評価の単純化と測定条件の不変性から、評価手法の規格等を定めることは容易になるといえる。このため、差分値を用いた内部欠陥評価手法は、技術的な差異が起りづらいつ考えられる。さらに、健全時の構造物が持つ測定対象固有の応答波形を評価基準としているため、あらゆる形状の構造物に適用できることが期待される。特に、製品化されたコンクリート部材等を用いて建設される構造物においては、出荷前の健全時状態の測定が容易であることにくわえて、同一の製品を用いた構造物に対して、同じ健全時応答波形を用いて評価できるため、提案手法は力を発揮するものだと考えられる。本論文では、この差分値を評価指標としたコンクリート構造物の内部欠陥評価手法を Difference Value Analysis (以下、DVA と呼ぶ)と称する。

本章では、DVA の評価指標である差分値の概念や測定条件の設定方法について考察し、差分値を算出するまでの過程について示す。

3.2 DVA を用いた内部欠陥評価

3.2.1 応答波形の変化量を用いた欠陥評価の考え方

図 3.1 に示すように、入力信号が何かしらの変換システムを介して出力信号として出力されるモデルを考える。これを衝撃弾性波法の測定に当てはめると、測定条件等が入力信号、入力信号を与える対象、つまり変換システムが評価対象である構造物となり、そのシステムの中身を構築するものが構造の材料や形状である。このときの出力信号が応答波形（測定波形）となる。したがって出力信号は、入力信号と変換システムが変わらなければ変化しない。つまり、同じ信号が出力されるはずである。このように測定条件が変化しない場合に、仮に出力信号に変化が生じたとすると、変換システムに何かしら変化が生じたと考えることが自然である。さらに、このときのシステムを構築する構造の材料および形状についても変化しないとなれば、システムを変化させた要因は欠陥等によって生じたものだと考えられる。つまり、「測定条件や構造条件が不変的に一定だと仮定した場合に、欠陥によって変化した出力システムによって生じる応答波形の変化量を用いて内部欠陥を評価する」、これが DVA の基本的な考え方である。提案手法である DVA は、この出力システムの変化によって生じた変化量を、測定した応答波形の時系列の変化量と定義し内部欠陥の評価を行う。

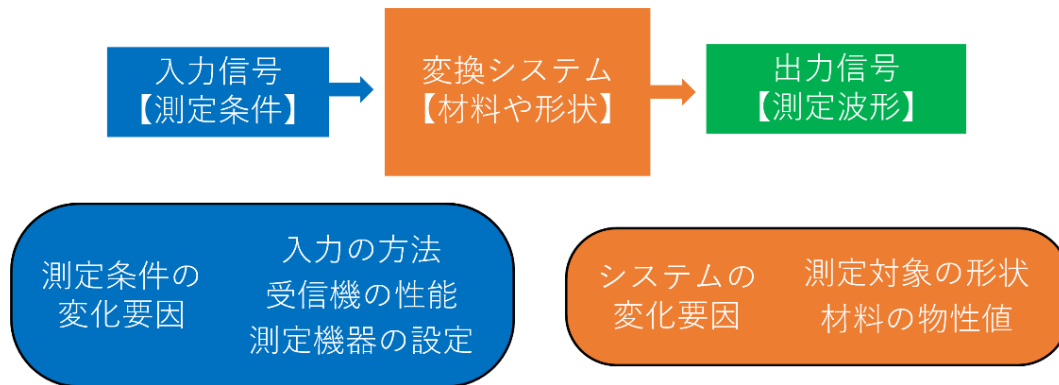


図 3.1 衝撃弾性波法を用いた測定波形の変化要因

3.2.2 差分値の定義

DVA は評価指標として、時間領域における応答波形の時系列変化量である差分値を評価指標としている。この差分値は、構造物の完成直後あるいは出荷前を健全時として、予め取得した応答波形に基づいて算出する。図 3.2 (a), (b), (c) に時間領域における差分値の概念図を示す。図 3.2 (a), (b) は、同一の測定条件として、測定対象の材料および形状も同じであると仮定すると、このモデル図の違いは内部に生じた空洞の存在だけである。空洞の存在しない図 3.2 (a) を健全時モデルの応答波形として、空洞の存在する図 3.2 (b) を非健全時モデルの応答波形として比較すると、時間領域における応答波形は図 3.2 (c) のように変化する。この時系列応答波形の変化は、内部空洞によって生じたものであると考えられることから、この応答波形の時系列変化量を式 (3.1) のように定義し、これを差分値とした。

$$D = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (A_i - A'_i)^2 \quad (3.1)$$

ここで、 D は差分値、 A_i はモデル (a) の応答波形の i 番目の時系列の振幅値、 A'_i はモデル (b) の応答波形の i 番目の時系列の振幅値、 N はサンプリング時間間隔で測定したデータ数である。この差分値の大小関係や分布から欠陥の大きさや位置を評価する。

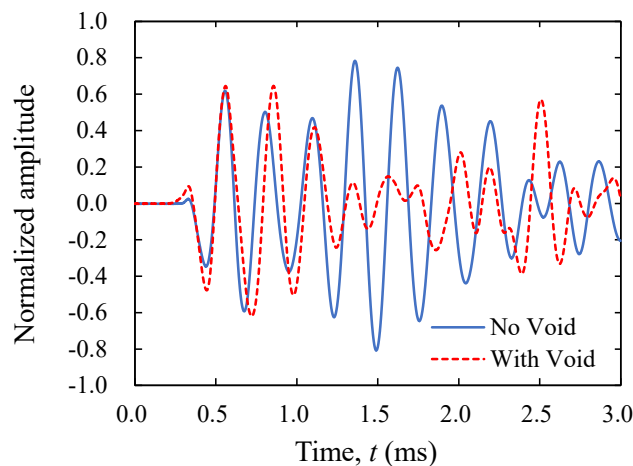
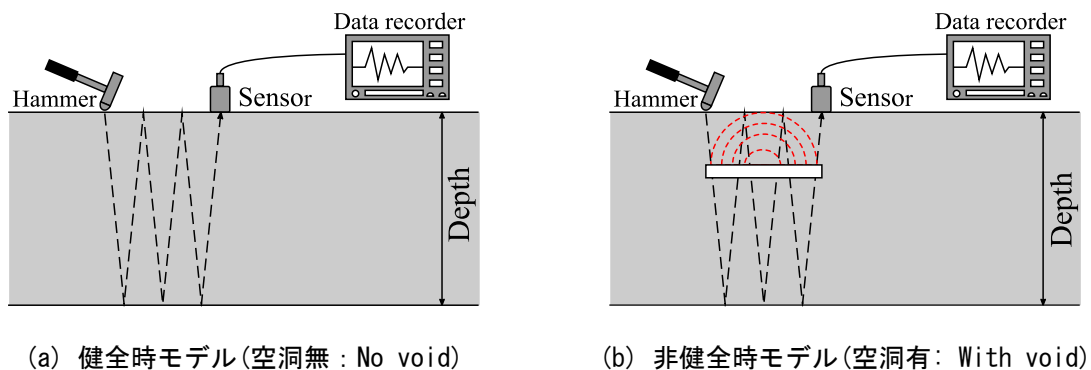


図 3.2 時間領域の応答波形を用いた差分値の概念図

3.3 DVA の測定条件

DVA は、同一の測定条件で得られた応答波形の差分値を用いるため、入力周波数や入力点と受信点の間隔等の測定条件によって、評価領域や評価精度に変化が生じることが予測される。また、予め測定した健全時応答波形を用いて差分値を算出するため、初期測定の条件設定が、その後の評価結果を左右することになる。従来の評価手法を参考にすると、多重反射法のように、厚さ方向に伝搬する弾性波の周波数を用いた内部欠陥評価手法では、入力点近傍に設置した受信点の測定波形から、受信点近傍の内部欠陥を評価している[3.3-3.5]。また、これらの測点を平面的に等間隔で増やすことで面的な評価を可能としている[3.6][3.7]。DVA は、従来手法と同様の測定条件を設定することで、同等の評価結果を測定対象の形状に関係なく得られることが期待できる。また、従来手法と異なる点として、入力点と受信点の間隔（以下、測定間隔という）を明確に制限する必要はない。これに加えて、入力周波数についても多重反射の成立を目的としていないことから、具体的な制約条件を設ける必要はないと考えられる。つまり、目的に応じた測定条件を予め設定し測定を実施しておくことで、幅広い角度から欠陥を評価することが可能となる評価手法である。

3.3.1 測定間隔と入力条件

DVA は主として、厚さ方向に伝搬する弾性波を対象とした内部欠陥の評価が目的であることから、部材の厚さは測定条件の設定に関して重要なパラメータとなる。このため、評価対象の厚さに基づいて、各測定条件を設定する必要があると考えられる。2章において、衝撃弾性波法を用いた部材の厚さ評価手法が「ASTM-C1383-04」や「NDIS2426-2」によって規格化され、その測定と評価原理に基づいた内部欠陥の評価手法について示しているが、DVA においても、多重反射法と同様に厚さ方向の評価が目的であることから、従来手法の規格や測定方法を一部参考にして測定条件を定めている。

多重反射法の測定間隔は、厚さや欠陥によって形成される境界面までの長さの 20%から 50%の間隔が適切であるといわれている（2章参照）。しかし、このような条件下では内部欠陥評価を目的とした場合と厚さ評価を目的とした場合で、対象とする厚さ方向の距離が異なるため、測定間隔の設定範囲に差異が生じる。また、平面的な内部欠陥評価を目的とした場合、測定間隔は評価領域の分解能にあたるため、測定間隔が測定対象の大きさと欠陥深さによって変化し、さらに、その間隔に 20%から 50%の幅があることに対して、推奨される測定間隔の設定が適切であるということに疑問が生じる。この点 DVA は、測定条件が同じであれば、同一条件における差分値が指標であるため、従来測定間隔の影響は少なく評価できる可能性がある。つまり DVA は、厚さに依存せずに統一した測定間隔を設定することが可能である。そのため本研究では、入力点近傍を評価することを目的とした場合、測定間隔の最小幅の寸法を評価対象の厚さに関わらず 50.0mm に統一し、これを基準として 50.0mm の倍数で

測定間隔や測定点を設定することを基本とした。

3.3.2 入力に用いる鋼球直径

入力に用いる鋼球は、「NDIS2426-2」と既往の研究成果に基づいて決定する。ただし、推奨される鋼球の大きさによっては、測定間隔の条件を考慮しなければならないため、鋼球径が測定間隔に近い場合や超える場合、または、鋼球が過度に大きくなる場合はコンクリート表面を損傷させる恐れがある場合は、推奨される鋼球の使用を取りやめた。

3.3.3 測定時間とサンプリング時間間隔

DVA は入力面に対する厚さ方向の内部欠陥評価を目的としている。このため、適切に内部欠陥の評価を行うには、少なくとも厚さの往復分以上の距離を伝搬したとみなせる測定時間を設定する必要があると考えられる。一般的に測定時間は、測定機器の設定によって調整できる条件となっており、サンプリング時間間隔と測定データ数の関係から測定時間は

$$t = N_m \Delta t \quad (3.2)$$

となる。ここで、 t は測定時間、 Δt はサンプリング時間間隔、 N_m は測定データ数である。サンプリング時間間隔は、測定時間内の離散時間間隔であり、 Δt を細かく設定することで N_m は増加することが式(3.2)からわかる。測定した応答波形の時系列変化量である差分値を指標とする DVA では、時系列の瞬時時間変化を捉える必要があると考えられるため、 Δt は可能な範囲で細かく設定しておくことが望ましく、また、予めサンプリング時間間隔を細かく設定しておくことで波形の補完が容易となる。これら Δt 、 t および N_m の関係から弾性波の記録条件が定まり、この条件によって測定波形の形状が決まる。また、測定時間は、縦波の往復伝搬時間を満たすように設定する必要がある。この往復伝搬時間は、縦弾性波速度を V_p 、厚さを D_c としたとき

$$t_{V_p} = \frac{2D_c}{V_p} \quad (3.3)$$

から導かれる。ここで、 t_{V_p} は縦波の往復伝搬時間である。したがって、 $t > t_{V_p}$ が DVA における最低限必要だと考えられる測定時間となる。現実的な測定条件の設定を考えると、構造物の縦弾性波速度を正確に知ることは一般的に不可能である。また、コンクリートの強度や断面形状によっても伝搬速度は変化するため、伝搬時間は厚さの距離を「十分に満たす測定時間」を設定することが望ましく、厚さの数倍以上に設定することを推奨する。

3.3.4 差分値の算出データ数について

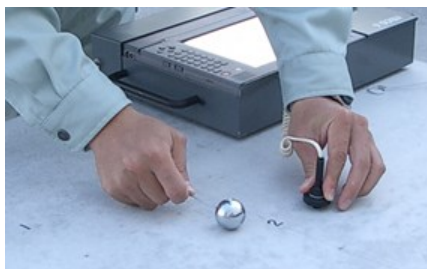
差分値の算出に用いる、算出データ数 N は設定した測定条件で記録した測定データ N_m から、任意の数を抽出して算出することができる。この算出データ数の大きさは、差分値の算出結果に影響を与えることが予測される。弾性波は同心円状に広がりながら時間経過に伴い広範囲に伝搬するため、欠陥等の影響によって生じた反射波が広範囲に伝搬し、評価対象領域の広い範囲で差分値が増加する恐れがある。このため、算出データ数を制限なしに大きくすることに注意する必要がある。また弾性波は、幾何学的な減衰と物質的な減衰によって時々刻々と減衰する。その結果、波形の振幅は時間領域の後半になると減衰することから、時系列の変化に対して影響する割合が時間領域によって異なることが考えられる。これは、差分値の算出式 $D = 1/N \sum_{i=1}^N (A_i - A'_i)^2$ から理解できるが、算出データ数の増加によって差分値が平均化されるためである。したがって、算出データ数が大きくなることで減衰の影響が大きくなり、結果的に算出データ数の増加に伴い相対的に差分値が減少する可能性が高い。対照的に、算出データ数が少ない場合は減衰の影響が小さくなるため、差分値が増加することが予測される。このため、算出データ数の設定は慎重に検討する必要がある。

以上のように、設定する測定条件と算出データ数が及ぼす考察を踏まえて、本研究では厚さに対して十分に長い測定時間を設定し、サンプリング時間間隔は、使用した測定器の上限として $0.50\mu\text{s}$ に設定した。また算出データ数については、測定波形から算出データ数を任意に定め、差分値の算出に適切な算出データ数 N の設定について 4 章および 5 章において検討を行った。

3.4 実験における測定波形の処理

3.4.1 測定波形の誤差

図 3.3 に衝撃弾性波法（多重反射法）の測定状況と入力装置の写真を示す。衝撃弾性波法のもっとも単純な入力方法は、鋼球に柄を取り付けたハンマのような入力機構を形成した入力装置を振り下ろしてコンクリート表面を打撃することで弾性波を人為的に励起する手法である。簡便な入力方法であるため、入力点の微小なずれや、入力時の衝突力が制御されることはなく、測定される応答波形にわずかな変化が生じる。また、測定面に対する研磨等の前処理や、受信センサと測定面を固着する接着剤等を使用することもない。そのため、安定した測定手法とは言い難い。さらに、測定器の性能や記録方法によって、記録に関する基準時刻が異なる場合がある。これらの誤差は、差分値の算出結果に影響を与える可能性が高い。このため、測定波形の振幅値の正規化や波形の開始時刻（以下、立ち上がり時刻という）の補正を行い、これらの誤差によって生じる影響を最小限にする必要がある。例として、図 3.4 に同一点で測定した応答波形の変化例を示す。図の実線を基準波形とした場合、破線のように振幅のずれや、波形の立ち上がり時刻に時間差が生じる。このような誤差に対して本研究では、実験で測定した応答波形に限定して、図 3.5 に示す手順で測定波形の正規化を行った。



(a) 測定状況



(b) 入力装置（鋼球）

図 3.3 衝撃弾性波法（多重反射法）の測定状況と入力装置

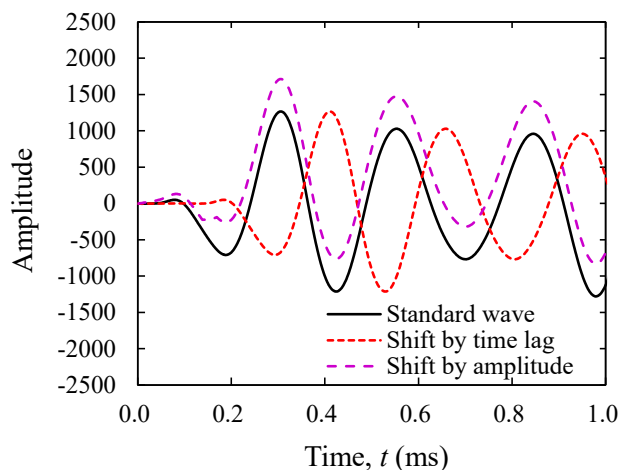


図 3.4 同一受信点における応答波形の変化例

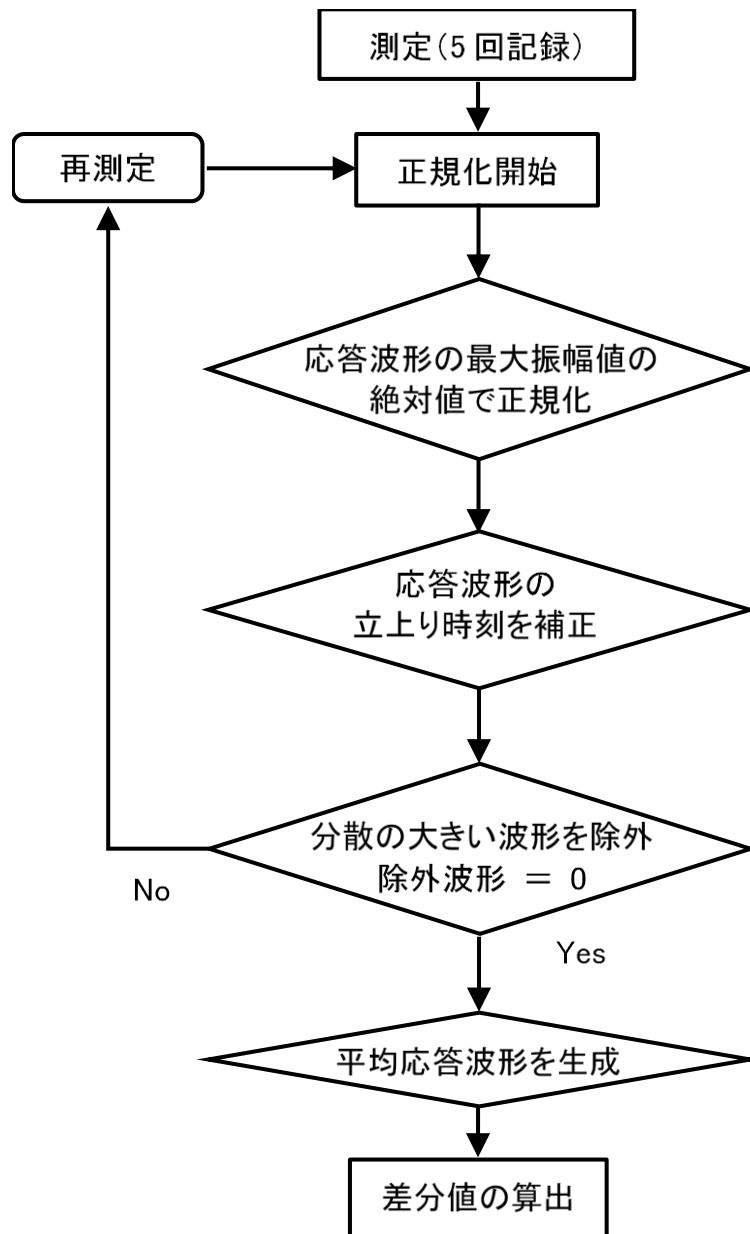


図 3.5 実測定波形を用いた差分値算出までの流れ

3.4.2 振幅の正規化

同一測点における測定は5回とし、測定毎に波形の最大振幅の絶対値 $|A_{\max}|$ を求め、測定波形個別に時系列振幅値 A_i を式(3.4)に従い正規化した。

$$A_{ni} = \frac{A_i}{|A_{\max}|} \quad (3.4)$$

ここで、 A_{ni} は正規化後の i 番目の時系列振幅値である。

3.4.3 立ち上がり時刻の補正

多量の測定波形の立ち上がり時刻を手作業で検出し補正することは非現実的である。そのため、弾性波の立ち上がり時刻（到達時刻とも呼ばれる）の自動検出手法を取り入れる。自動検出手法には、閾値法、勾配法、AIC(Akaike Information Criterion)法などが存在し、これら検出手法を用いた検討結果が報告されている[3.8][3.9]。コンクリートを対象とした非破壊検査分野において、これらの自動検出手法は、AE法や透過弾性波法等の弾性波の伝搬時間を評価指標として用いる手法に広く利用されており、自動検出手法を取り入れた非破壊検査手法の効率化と確立が進められている[3.10][3.11]。もっとも一般的に用いられている手法として、大野らが提案するAIC-pickerがある[3.12][3.13]。この手法は、測定波形に直接AICを適用し、AICが最小となる点を立ち上がり時刻として定義している。AIC法は、衝撃弾性波法のように、到達時の弾性波のエネルギーがAE波と比較して大きい場合には、比較的精度良く立ち上がり時刻を検出することが可能である。一方、S/N（シグナルノイズ）比が比較的低い波が初動として到達した場合は、立ち上がり時刻の検出精度が低下するといわれている[3.14][3.15]。DVAにおいて、立ち上がり時刻の検出精度のばらつきは、差分値の算出結果に影響を与え兼ねない。このため、検出精度の影響について精査する必要がある。

そこで差分値を用いた内部欠陥評価手法の事前検討を行った。AIC-pickerによって得られた立ち上がり時刻によって補正した、複数の同一測定点の測定波形から分散を求め、立ち上がり時刻の検出に関するばらつきを確認した。これに加えて、立ち上がり時刻の検出条件を独自に定めた条件判断アルゴリズムを用いた立ち上がり時刻補正を同時に実施した。この時刻補正手法をここでは、Under Peak(UP)法と呼ぶ。AIC-pickerを実行した同じ測定波形に対して、UP法による時刻補正を行い、AIC-pickerと同様に分散を求め、AIC-pickerとUP法で比較を行い、本研究で用いる立ち上がり時刻の補正方法を決定した。

3.4.4 AIC-picker 用いた時間補正

AIC-picker は、測定波形に対して直接的に AIC を適用し AIC が最小となる点を立ち上がり時刻として定める手法である。AIC は、あるサンプリング時間間隔で測定した n 個のデータで形成される受信波形の任意の点 k に対して

$$AIC_k = k \cdot \log\{\text{var}(X[1, k])\} + (n - k) \cdot \log\{\text{var}(X[k, n])\} \quad (3.5)$$

式(3.5)から任意の点の AIC_k を求める。ここで、 $\text{var}(X[1, k])$ は振幅値 X_1 から X_k の分散であり、 $\text{var}(X[k, n])$ は振幅値 X_k から X_n の分散を表している。測定波形の全ての時系列振幅値に対して AIC を実行することで時系列の AIC 値が得られる。この時系列 AIC 値の最小となる点を弾性波の立ち上がり時刻として検出するため、式(3.6)によって弾性波の立ち上がり時刻 $AICt_0$ を読み取る。

$$AICt_0 = t_k\{\min(AIC_k)\} - \Delta t \quad (3.6)$$

ここで、 $t_k\{\min(AIC_k)\}$ は AIC が最小値を示す時間を示し、 Δt はサンプリング間隔である。したがって、AIC-picker を用いた場合、差分値は $t_k\{\min(AIC_k)\} - \Delta t$ から任意の算出データ数 $N + t_k\{\min(AIC_k)\} - \Delta t$ によって定まる。図 3.6 (a), (b) に AIC-picker を適用した測定波形と AIC 値の算出結果を示す。図 3.6 (a) は測定間隔の距離が短い場合、図 3.6 (b) は測定間隔の距離が長い場合の結果を示す。図 3.6 (a) では、測定波形の上向きの立ち上がり時刻と AIC-picker の判定値が一致している。一方、図 3.6 (b) では立ち上がり時刻と AIC-picker の判定値が異なることが確認できる。このように、AIC-picker を用いた立ち上がり時刻の検出には誤差が生じる場合があることを確認した。

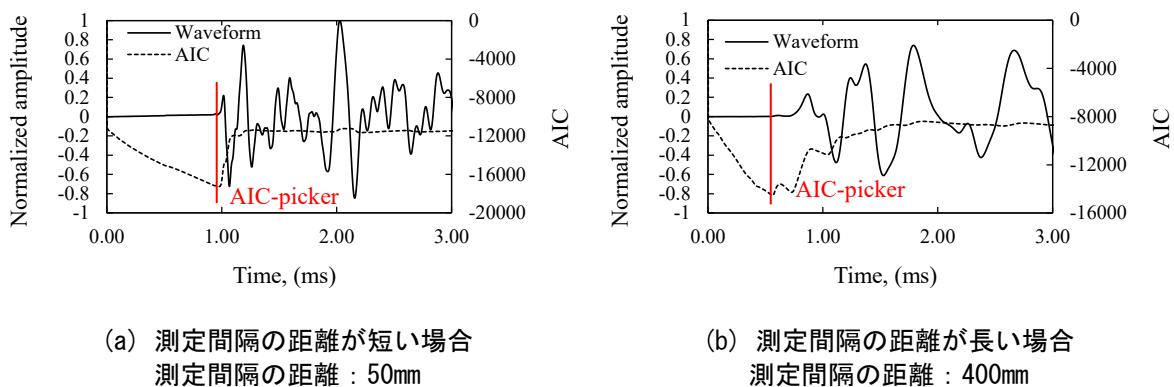


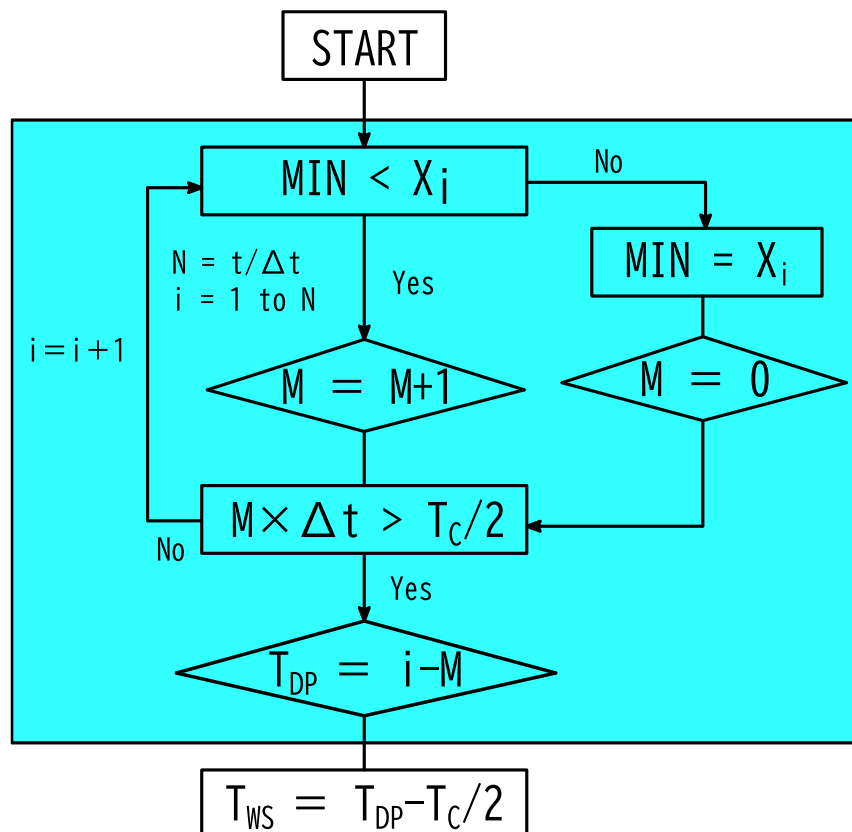
図 3.6 AIC-picker を適用した測定波形と AIC の算出結果

3.4.5 UP法を用いた時間補正

DVAの算出に用いる測定波形は、時間領域の波形の基準時刻の補正を目的としているため、弾性波の初動を明確に捉える必要はない。したがって、時間領域の測定波形から容易に検出することが可能な一定の基準を定め、その基準を用いて立ち上がり時刻の補正を行えばよい。UP法は、このような考えに基づいて考案したDVA独自の時刻補正手法である。UP法は、この基準時刻を測定波形の最初の下向きピーク時刻として定め、測定波形の時系列振幅値から下向きピークを検出するアルゴリズムを簡易的に構築した。図3.7に示すように、アルゴリズムの中身は単純な構造となっており、本研究では、最小値の更新が入力に用いた鋼球接触時間の半分の時間幅で更新されなかった点を最初の下向きピークとして扱うことにした。図3.8(a), (b)はUP法を用いた測定波形の補正イメージ図を示す。このときの立ち上がり時刻 T_{WS} は、最初の下向きのピーク時刻 T_{DP} から、測定に用いた鋼球の接触時間 T_C の半分を減じた時刻とし、式(3.7)に従い補正した。

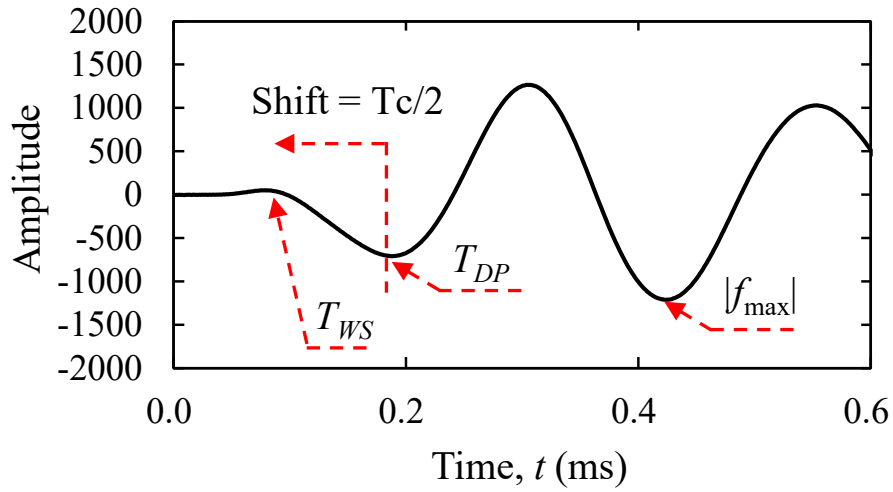
$$T_{WS} = T_{DP} - \frac{T_C}{2} \quad (3.7)$$

なお、接触時間 T_C は、Sansaloneらの提唱する鋼球直径 d_S と接触時間 T_C の算出式 $T_C = 0.0043d_S$ によって算出した。

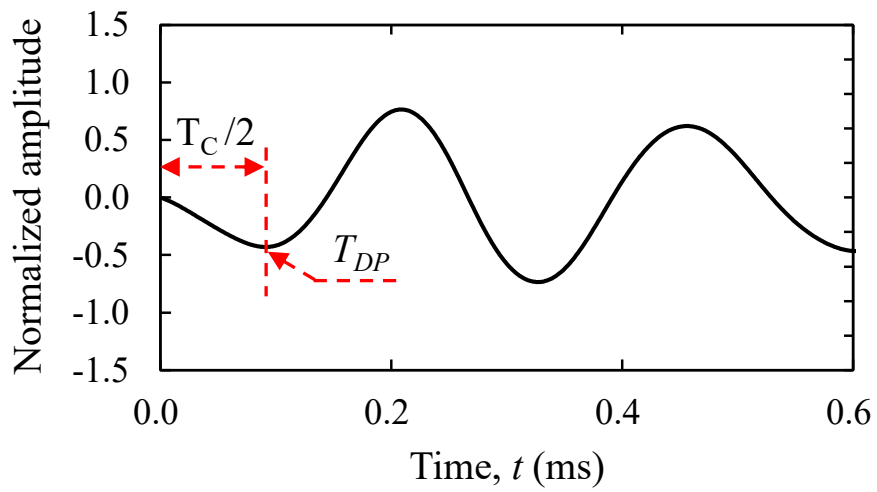


X_i : 時系列の振幅値, MIN : 振幅の最小値, M : 条件を満たした個数

図 3.7 UP法を用いた立ち上がり時刻決定



(a) 正規化前



(b) 正規化後

図 3.8 UP 法による弾性波の立ち上がり時刻の補正図

3.4.6 正規化後の測定波形の分散

AIC-picker と UP 法の比較を行う。正規化する測定波形は最小 50.0mm から最大 650mm の測定間隔で測定した 900 個の測定波形である。入力に用いた鋼球は 20.0mm，測定した試験体は厚さ 300mm の既製品の土止め板である。全ての測定波形に対して振幅の正規化を実施した後，AIC-picker と UP 法による時刻補正を行った。正規化後の測定波形は測定間隔別に分散を算出した。なお，この検討では分散を差分値の算出式 $D = 1/N \sum_{i=1}^N (A_i - A'_i)^2$ によって算出した。このときの， D は分散， A は同じ測定間隔で得られた正規化後の応答波形を単純平均した平均応答波形の i 番目の振幅値， A'_i は同じ測定間隔で得られた正規化後の応答波形の i 番目の振幅値， N はサンプリング時間間隔で測定したデータの数である。サンプリング時間間隔は $0.50\mu\text{s}$ ，測定時間は 2.00ms ，データ数は 4,000 個である。正規化後のデータ数は補正時刻によって異なるため，差分値の算出に用いた算出データ数は 2,000 個とした。図 3.9 に，測定間隔と分散の関係を示す。横軸は測定間隔（入力点と受信点間の距離），縦軸は分散，凡例は立ち上がり時刻の検出方法を示す。分散は測定間隔が広くなることによって増加する傾向があることが確認できる。分散の最大値は，AIC-picker で約 0.33，UP 法で約 0.14，標準偏差は，AIC-picker で約 0.0369，UP 法で 0.00988 となり，AIC-picker を用いた場合に偏差が大きくなることがわかった。この結果から，本研究における立ち上がり時刻の補正手法を UP 法と定めた。

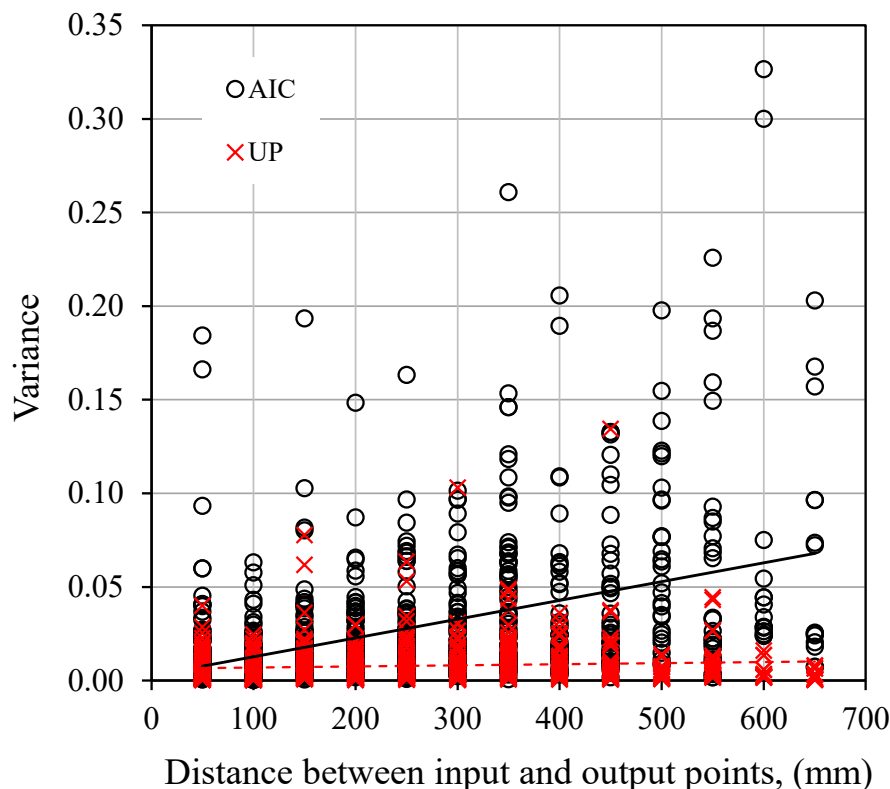


図 3.9 AIC-picker と UP 法によって時刻補正した測定波形のばらつきと測定間隔の関係

3.4.7 測定過誤等による波形の除外

前項の結果から、正規化後の波形は同一の測定条件であっても全く同じになることはないことを確認した。このことから、衝撃弾性波を用いて得られる測定波形は、測定毎にわずかな変化が生じていることは自明である。これらは測定手法固有の誤差であるため、このばらつきを含んだものとして DVA の評価は実施される。一方、測定した波形には、これらの誤差とみなせない波形が含まれる場合がある。特に、多量の測点を設けた実務的な現場では、入力点と受信点の誤った認識による測定点のずれや、測定点の位置情報と保存情報の乖離など、マニュアル的な作業によってヒューマンエラーが生じる可能性が高い。その他にも、測定器の予期しない誤作動や時刻補正の誤り等によっても同様の過誤が生じる場合がある。これら、「測定過誤 or 補正過誤」と考えられる波形は、通常の見誤差と比べて大きく外れたばらつきを示すことが多く、このような測定固有のばらつきから大きく外れた測定値を「外れ値」という。外れ値を含んで算出される差分値は、DVA の評価結果に大きな影響を与え兼ねないため、測定誤差として一様に扱うことはできない。したがって、外れ値の対象となる測定波形は、差分値を算出する前に取り除く必要がある。

同一測定点における測定のばらつきが正規分布に従うとすると、測定固有のばらつきは図 3.10 に示すような、ばらつきの平均値 μ を中央値とした釣鐘状の正規分布を示す[3.16][3.17]。横軸は平均値を基準とした測定値のばらつき、縦軸は確立密度である。このとき、確立密度曲線下の面積は、標準偏差 σ によって、 $\mu \pm \sigma$ で 68.0%、 $\mu \pm 2\sigma$ で 95.0%、 $\mu \pm 3\sigma$ では 99.7% の範囲に値（測定波形の分散）が収まる関係が成り立つ。つまり、 $\pm 3\sigma$ の範囲で、測定データのほぼ全てが収まることになる。したがって、 $\pm 3\sigma$ の範囲を超える値は、通常の見誤差と

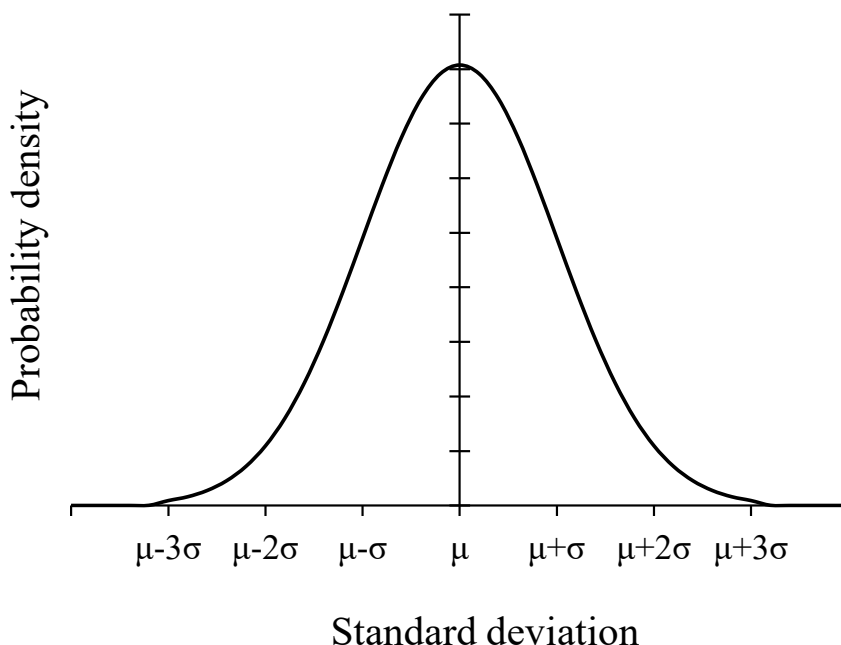


図 3.10 正規分布における確立密度曲線

異なる影響によって、測定波形が変化したと考えることが自然である。このように、正規分布に従い外れ値を判断する手法を 3σ 法と呼ぶ。この手法は、1つの変数に対して外れ値を検出する方法として有効であり、同じ工程によって製作する工場製品等の品質管理方法として一般的に利用されている手法である[3.18]。例として図 3.9 の UP 法におけるばらつきの結果を用いて外れ値を考えると、UP 法のばらつきの平均値 μ は 0.0077, $\pm 3\sigma \approx 0.0374$ ($\sigma = 0.00988$) である。平均値を中央値とした $\pm 3\sigma$ の範囲は、 $-0.0223 \sim 0.0377$ となる。実質的な測定波形のばらつきは 0 以上であるため、0.0377 を超える値は異常値とみなすことができる。図 3.11 に図 3.9 における分散の頻度を示す。UP 法の結果では、0.0377 の範囲に収まるデータは 887 点、そのうち、 $+\sigma$ の範囲に収まるデータ数は 811 個となった。一方、最大値は約 0.135 と明らかに大きく外れた値を示した。この値は 3σ 法に従うと「測定過誤 or 補正過誤」として除外できる。これらの結果から、図 3.9 の測定データに「外れ値」は存在しており、DVA ではこれらの波形を除外する必要がある。以上の検討結果から、本研究では事前に確認した測定波形のばらつきに基づき外れ値を除外するため、UP 法を用いて正規化した測定波形のばらつきの平均値 $\mu = 0.0077$ を基準として、その標準偏差 $\sigma \approx 0.01$ に従い $+3\sigma$ (≈ 0.0370) を超える値を「測定過誤 or 補正過誤」と判断し、外れ値として除外することにした。

以上が差分値を算出するまでの手順である。実験で得られた測定波形は、差分値の算出フローに従い、本章で示した測定波形の事前処理を実施し差分値を算出した。

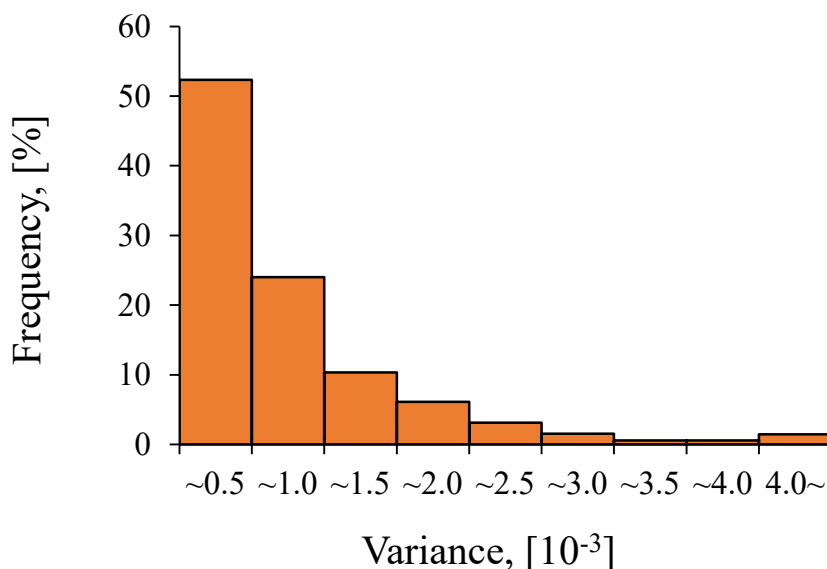


図 3.11 UP 法における分散の頻度 (図 3.9 の結果)

第3章の参考文献

- [3.1] Carino, N.J.: Impact Echo: The Fundamentals, Open Access Portal of *NDT.net*, International Symposium Non-Destructive Testing in Civil Engineering (NDTCE 2015) Conference Proceedings, Berlin, Germany, 15-17 September 2015.
- [3.2] NIDS 2426-2: コンクリートの非破壊試験 - 弾性波法 - 第2部: 衝撃弾性波法, (一社) 日本非破壊検査協会, 2014.
- [3.3] 岩野聡史, 極檀邦夫, 境友昭: 衝撃弾性波法によるコンクリート内部欠陥探査, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.1, pp.1521-1526, 2002.
- [3.4] 渡辺健, 大津政康, 友田祐一: インパクトエコー法による PC グラウト充てん度評価に関する考察, 「材料」 *J.Soc. Mat. Sci. Japan*, Vol.48, No.8, pp.870-875, 1999.
- [3.5] Cao, R.; Ma, M.; Liang, R.; Niu, C.: Detecting the Void behind the Tunnel Lining by Impact-Echo Methods with Different Signal Analysis Approaches, *Appl. Sci.* 2019.
- [3.6] Yoon, Y.-G.; Lee, J.-Y.; Choi, H.; Oh, T.-K.: A Study on the Detection of Internal Defect Types for Duct Depth of Prestressed Concrete Structures Using Electromagnetic and Elastic Waves, *Materials*, 2021.
- [3.7] Chunjiang, Z.; Zhengzhou, C.; Dong, P.; Chen, C.: Experimental and Numerical Studies on Nondestructive Evaluation of Grout Quality in Tendon Ducts Using Impact-Echo Method, *Bridge Engineering*, 2014, DOI: 10.1061.
- [3.8] 上高正寛, 林和彦, 長谷川雄基, 北村大地, 宇野洋志城: 衝撃弾性波法におけるコンクリートの弾性波伝搬速度の計算手法に関する検討, 令和元年度土木学会全国大会第74回年次学術講演概要集, V-581, 2019.
- [3.9] 小西貞則: 情報量規準 AIC の統計科学に果たしてきた役割, *統計数理*, Vol.67, No.2, pp.193-214, 2019.
- [3.10] Wuwei, M.; Shogo, A.; Towhata, I.: A study on particle breakage behavior during pile penetration process using acoustic emission source location, *Geoscience Frontiers*, Vol.11-2, pp.413-427, March 2020.
- [3.11] 大野健太郎, 下藺晋一郎, 沢田陽佑, 大津政康: AE 波初動部の自動読み取りの開発による SiGMA 解析の改良, 日本非破壊検査協会, Vol.57 No.11, pp.531-536, 11, 2008. コンクリート構造物の安全性と耐久性, SE, Vol.170, pp.21-25, 2013.
- [3.12] Ohno, K.; Uji, K.; Ueno, A.; Ohtsu, M.: Fracture process zone in notched concrete beam under three-point bending by acoustic emission, *Construction and Building Materials*, Vol.67-30B, pp.139-145, September 2014.
- [3.13] 沢田陽佑, 大野健太郎, 下藺晋一郎, 大津政康: AE-SiGMA 解析における AE 波初動部自動読み取り法の提案, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.1, pp.2101-2106, 2009.

- [3.14] 前田直樹：地震波自動処理システムにおける読み取りおよび評価，日本地震学会，第2輯，Vol.38, pp.365-379, 1985.
- [3.15] 中村勝哉，小林義和，小田憲一，池端宏太：時刻歴波形ノイズ部の実行電圧を用いた AE 到達時刻自動検出手法の開発，土木学会応用力学委員会第 24 回応用力学シンポジウム講演概要集，オンライン，S05C06, 2021.
- [3.16] 田中秀幸：データ評価のための統計的方法—確率分布と平均値の推定・検定—，日本分析化学会，pp.114-118, 2010.
- [3.17] 上本道久：検出限界と定量下限の考え方，日本分析化学会，pp.216-221, 2010.
- [3.18] 永田靖：品質管理のための統計的方法，成形加工学会，Vol.31, No.4, pp.132-136, 2019.

第4章 数値実験による基礎検討

4.1 概説

衝撃弾性波法は、主に応答波形の周波数成分や伝搬速度を指標とした欠陥評価手法の検討が行われてきたことから、欠陥が周波数や伝搬速度に及ぼす影響については、既往の研究成果から確認することが可能であるとともに、それらの指標を用いて、内部欠陥を評価できることは周知の事実となっている[4.1-4.7]。一方、応答波形の時系列変化量である差分値を指標とした、欠陥評価技術の検討は行われていない。そのため、時間領域の応答波形が、欠陥によってどのように変化するのか不明であると同時に、実際に差分値を用いた欠陥評価が可能であるか定かではない。したがって、同一の測定条件によって得られた健全時と非健全時の応答波形から、時系列変化量である差分値を取得し、欠陥と差分値の関係について検討する必要がある。しかしながら、提案手法であるDVAは、健全時に予め測定した健全時応答波形を基準として差分値を算出するため、健全時の応答波形を取得することが不可能である既設構造物を用いて基礎的な検討を行うことができない。また、健全時状態の試験体を用いた実験の場合であっても、評価対象に欠陥の大きさや位置を自由に設定することに、多くの時間と費用を要するため現実的ではない。したがって、欠陥が応答波形に及ぼす影響を多变的に捉えることは難しい。このため、想定する現象の再現や仮説の検証を安価かつ迅速に行うため、本研究では時間領域有限差分法（Finite-Difference Time-Domain Method：以下、FDTD法）と呼ばれる数値シミュレーション法を用いた数値実験的によって提案手法の基礎的な検討を行った[4.8-4.10]。

本章では、差分値を指標とした内部欠陥評価手法の基礎的な検討として、構造材料としてコンクリートを仮定した、二次元と三次元の解析モデルを用いた数値実験を行った。解析モデル内部に欠陥を模擬した空洞を設け、その大きさや位置を変化させ、条件別に算出した応答波形から差分値を算出した。欠陥の大きさや位置によって生じる差分値の増減や分布変化から、欠陥が差分値に及ぼす影響を確認し、DVAの有用性を検証した[4.11-4.13]。

4.2 Finite-Difference Time-Domain(FDTD)法 [4.14][4.15]

4.2.1 FDTD法の概説

FDTD法は、モーメント法(Method of Moments; MOM)、有限要素法(Finite Element Method; FEM)と並んで広く用いられている数値解析手法であり、1966年にK. S. Yeeによって基本的アルゴリズムが提案されている[4.16]。この手法は、時間領域のMaxwell方程式を直接差分化することから、連立一次方程式を解くことなく、簡単に計算ができることにくわえて並列化も容易である。また時間領域解法であるため、広帯域の応答が一回の計算で得ることが可能である[4.17][4.18]。構造体の数値シミュレーションにおいては、有限要素法による応力解析

や温度解析などが広く用いられているが、時間領域における解析においては、有限要素法と比較して計算量が少ないことから差分法の有用性が高い。本研究は時間領域における応答波形を、構造物の形状および複数の条件で設定した欠陥を有したモデルを用いて数値実験を行うことを目的としているため、検討する実験ケースが多い。このため、現象の把握を効率的に実行する観点から FDTD 法を用いた。

4. 2. 2 FDTD 法による固体中の弾性波

固体中を伝搬する一次元の弾性波は、次のような基本法式で表すことができる。

$$\frac{\partial \sigma}{\partial t} = c \frac{\partial \dot{u}}{\partial x} \quad (4.1)$$

$$\frac{\partial \dot{u}}{\partial t} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial \sigma}{\partial x} \quad (4.2)$$

式(4.1)は空間一次元の Hook の法則、式(4.2)は運動量方程式である。ここで σ は応力、 \dot{u} は粒子速度、 c はスチフネス、 ρ は密度である。FDTD 法では式(4.1)、式(4.2)を中央差分で近似した差分式として次のように表すことができる。

$$\sigma^n(i) = \sigma^{n-1}(i) + c \frac{\Delta t}{\Delta x} \left\{ \dot{u}^{n-\frac{1}{2}}\left(i + \frac{1}{2}\right) - \dot{u}^{n-\frac{1}{2}}\left(i - \frac{1}{2}\right) \right\} \quad (4.3)$$

$$\dot{u}^{n+\frac{1}{2}}\left(i + \frac{1}{2}\right) = \dot{u}^{n-\frac{1}{2}}\left(i + \frac{1}{2}\right) + \frac{1}{\rho} \frac{\Delta t}{\Delta x} \{ \sigma^n(i+1) - \sigma^n(i) \} \quad (4.4)$$

n は時間ステップ、 Δt がその時間間隔、 i は空間離散、 Δx がその離散間隔である。

流体中を伝搬する音波の三次元の波動方程式は次式で表すことができる。

$$\frac{\partial P}{\partial t} = -\kappa \nabla \cdot \dot{\mathbf{U}} \quad (4.5)$$

$$\frac{\partial \dot{\mathbf{U}}}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \nabla P \quad (4.6)$$

$$\dot{\mathbf{U}} = \begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \\ \dot{w} \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

P は音圧、 $\dot{\mathbf{U}}$ は粒子速度のベクトル、 κ は体積弾性率、 ρ は密度である。また、固体中を伝搬する三次元の弾性波は

$$\mathbf{T} = \mathbf{cS} \quad (4.8)$$

$$\rho \frac{\partial \dot{\mathbf{U}}}{\partial t} = \nabla \mathbf{T} \quad (4.9)$$

と表すことができる。式(4.8)は Hook の法則、式(4.9)は運動方程式である。 \mathbf{T} は応力テンソル、 \mathbf{S} はひずみテンソル、 \mathbf{c} はスチフネステンソルと呼ばれ、それぞれ次のように表される。

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} T_{xx} & T_{xy} & T_{xz} \\ T_{yx} & T_{yy} & T_{yz} \\ T_{zx} & T_{zy} & T_{zz} \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} S_{xx} & S_{xy} & S_{xz} \\ S_{yx} & S_{yy} & S_{yz} \\ S_{zx} & S_{zy} & S_{zz} \end{bmatrix} \quad (4.11)$$

$$\mathbf{c} = \begin{bmatrix} c_{11} & \cdots & c_{16} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{61} & \cdots & c_{66} \end{bmatrix} \quad (4.12)$$

ここで、 $T_{xy} = T_{yx}$, $S_{xy} = S_{yx}$ の関係が成り立ち、等方性の固体におけるスチフネスの性質から、 \mathbf{T} , \mathbf{S} , \mathbf{c} は次式のように扱うことができる。

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{xx} \\ T_{yy} \\ T_{zz} \\ T_{yz} = T_{zy} \\ T_{zx} = T_{xz} \\ T_{xy} = T_{yx} \end{bmatrix} \quad (4.13)$$

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ S_5 \\ S_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \partial_u/\partial_x \\ \partial_v/\partial_y \\ \partial_w/\partial_z \\ \partial_w/\partial_y + \partial_v/\partial_z \\ \partial_u/\partial_z + \partial_w/\partial_x \\ \partial_v/\partial_x + \partial_u/\partial_y \end{bmatrix} \quad (4.14)$$

$$\mathbf{c} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{12} & 0 & 0 & 0 \\ c_{12} & c_{11} & c_{12} & 0 & 0 & 0 \\ c_{12} & c_{12} & c_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c_{44} \end{bmatrix} \quad (4.15)$$

ここで、 $c_{11} = \lambda + 2\mu$, $c_{12} = \lambda$, $c_{44} = \mu$ であり、 λ と μ はラメ定数と呼ばれる弾性係数である。弾性体であるコンクリートの伝搬をFDTD法によって計算するには、式(4.13)～式(4.15)の条件から、式(4.8)および式(4.9)の式を中心差分で離散化した近似式として定式化し、空間における応力 $T_1 \sim T_6$ および粒子速度 $\dot{u}, \dot{v}, \dot{w}$ を計算する。

$$x \text{方向の垂直応力} : \frac{\partial}{\partial t} T_1 = c_{11} \frac{\partial}{\partial x} \dot{u} + c_{12} \frac{\partial}{\partial y} \dot{v} + c_{12} \frac{\partial}{\partial z} \dot{w} \quad (4.16)$$

$$y \text{方向の垂直応力} : \frac{\partial}{\partial t} T_2 = c_{12} \frac{\partial}{\partial x} \dot{u} + c_{11} \frac{\partial}{\partial y} \dot{v} + c_{12} \frac{\partial}{\partial z} \dot{w} \quad (4.17)$$

$$z \text{方向の垂直応力} : \frac{\partial}{\partial t} T_3 = c_{12} \frac{\partial}{\partial x} \dot{u} + c_{12} \frac{\partial}{\partial y} \dot{v} + c_{11} \frac{\partial}{\partial z} \dot{w} \quad (4.18)$$

$$yz \text{方向のせん断応力} : \frac{\partial}{\partial t} T_4 = c_{44} \frac{\partial}{\partial z} \dot{v} + c_{44} \frac{\partial}{\partial y} \dot{w} \quad (4.19)$$

$$zx \text{方向のせん断応力} : \frac{\partial}{\partial t} T_5 = c_{44} \frac{\partial}{\partial z} \dot{u} + c_{44} \frac{\partial}{\partial x} \dot{w} \quad (4.20)$$

$$xy \text{方向のせん断応力} : \frac{\partial}{\partial t} T_6 = c_{44} \frac{\partial}{\partial y} \dot{u} + c_{44} \frac{\partial}{\partial x} \dot{v} \quad (4.21)$$

$$x \text{方向の粒子速度} : \rho \frac{\partial}{\partial t} \dot{u} = \frac{\partial}{\partial x} T_1 + \frac{\partial}{\partial z} T_5 + \frac{\partial}{\partial y} T_6 - \eta \dot{u} \quad (4.22)$$

$$y \text{方向の粒子速度} : \rho \frac{\partial}{\partial t} \dot{v} = \frac{\partial}{\partial y} T_2 + \frac{\partial}{\partial z} T_4 + \frac{\partial}{\partial x} T_6 - \eta \dot{v} \quad (4.23)$$

$$z \text{方向の粒子速度} : \rho \frac{\partial}{\partial t} \dot{w} = \frac{\partial}{\partial z} T_3 + \frac{\partial}{\partial y} T_4 + \frac{\partial}{\partial x} T_5 - \eta \dot{w} \quad (4.24)$$

ここで、 η は吸収減衰係数である。

4.3 二次元モデルを用いた基礎検討[4.11]

4.3.1 解析モデルの概要

図 4.1 (a), (b) に、解析モデルの概略図を示す。計算領域は Perfectly Matched Layer 領域（以下、PML 境界という）を含んだ長さ： $X=1,900\text{mm}$ 、高さ： $Y=400\text{mm}$ の二次元空間となっており、この空間を図 4.1 (b) の正方形要素の空間離散間隔で分割した。PML 境界とは、評価対象となるモデル以外の領域の物性値を設定する条件であり、本検討では、設定する内部欠陥を空洞とし、コンクリート内部を伝搬する弾性波が解析モデルの境界面で減衰が生じないようにするため、PML 境界の物性値を空気として設定した。この空間内の外周 50.0mm 内にコンクリート板を仮定した解析モデルを図のように設定し、その下面に表 4.1 の条件で受信センサを鉛直上向きに設定した。入力点は一点とし、図 4.1 (a) に示すようにコンクリート板中心の 900mm から y 軸方向に入力した。表 4.2 にコンクリート板に設定した空洞の条件を示す。図 4.1 (a) に示す赤破線の空洞の幅(w)および高さ(h)や空洞の平面位置の座標(x, y)を表の条件で変化をさせながら数値シミュレーションを行った。解析モデルに空洞の存在しない Case_1-1 を健全時モデルの応答波形とし、その他のケースで算出した各受信センサの応答波形を用いて差分値を算出した。

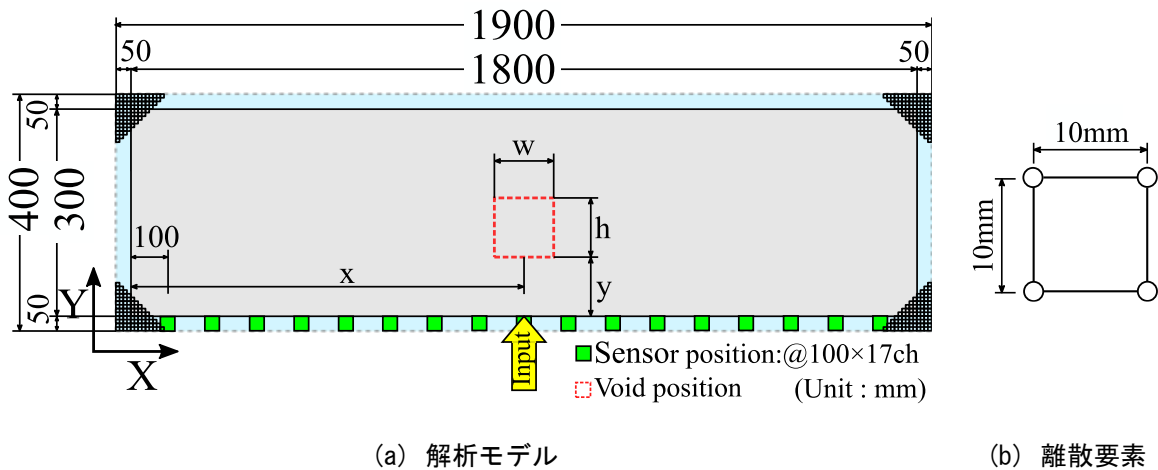


図 4.1 解析モデルの概略図と離散要素

表 4.1 コンクリート板に設置した受信センサの座標値

	Input point	Sensor_1ch~ Sensor_17ch
X, (mm)	900	100~1,700: @100×17
Y, (mm)	0	0

表 4.2 シミュレーションケースと空洞の条件

Case_No	Void size		Void position	
	w(mm)	h(mm)	x(mm)	y(mm)
Case_1-1	No-void (Sound wave)			
Case_2-1	30		900	150
Case_2-2	50			
Case_2-3	80			
Case_2-4	100			
Case_2-5	120			
Case_3-1	30	30	900	150
Case_3-2	50			
Case_3-3	80			
Case_3-4	100			
Case_3-5	120			
Case_4-1	30	30	900	150
Case_4-2		50		
Case_4-3		80		
Case_4-4		100		
Case_4-5		120		
Case_5-1	100	100	900	50
Case_5-2				80
Case_5-3				100
Case_5-4				150
Case_5-5				200
Case_6-1	100	100	300	150
Case_6-2			600	
Case_6-3			900	
Case_6-4			1000	
Case_6-5			1500	

4.3.2 数値シミュレーションの条件

表 4.3 に解析モデルの各パラメータを示す。コンクリート内部を伝搬する縦弾性波速度 V_P および横波の伝搬速度 V_S は、設定した材料定数で決定される。本検討では、密度 ρ 、ラメ定数 λ 、 μ から式(4.25)、式(4.26)によって速度をそれぞれ表のように設定した。減衰係数 η は、実際の測定波形の減衰（距離減衰や幾何減衰）を考慮することを目的として、式(4.22)、式(4.23)および式(4.24)に便宜的に取り入れられた係数であり、本検討では、これを 0.03 とした。

$$V_P = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} \quad (4.25)$$

$$V_S = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad (4.26)$$

表 4.3 解析モデルのパラメータ

密度： ρ	2,000 kg/m ³
ラメ定数： λ	8.00 GPa
ラメ定数： μ	12.0 GPa
縦弾性波速度： V_P	4,000 m/s
横波の伝搬速度： V_S	2,150 m/s
減衰係数： η	0.03

入力信号 $f_{\text{inp}}(t)$ は、式(4.27)によって三角関数を用いて近似した入力信号を粒子速度に変換するため、式(4.28)に示すように微分した一波長分の正弦波信号を用いた。

$$f_{\text{inp}}(t) = 1 - \cos(\omega t) \quad (4.27)$$

$$v_{\text{inp}}(t) = \frac{df_{\text{inp}}(t)}{dt} = \omega \sin(\omega t) \quad (4.28)$$

実際に入力される信号は、数値シミュレーションで設定した入力周波数によって定まり、本検討では入力周波数 F_{inp} を 6.00kHz とした。これは、解析モデル内部を伝搬する縦弾性波速度が 4,000m/s の場合に板厚方向に振動する一次モードの共振周波数を基に設定した。

本検討で設定したシミュレーション条件を表 4.4 に示す。サンプリング周波数は設定した空間離散間隔 Δd と縦弾性波速度 V_p の関係から、二次元領域では式 (4.29)、三次元領域では式 (4.30) のクーランの安定条件を満足する必要がある。

$$\text{二次元領域の場合} \quad V_p \Delta t \leq \frac{\Delta d}{\sqrt{2}} \quad (4.29)$$

$$\text{三次元領域の場合} \quad V_p \Delta t \leq \frac{\Delta d}{\sqrt{3}} \quad (4.30)$$

$$\text{判定式} \quad \Delta t \leq \frac{\Delta d}{\sqrt{2}V_p} \quad \Delta t \leq \frac{\Delta d}{\sqrt{3}V_p} \quad \Delta t = \frac{1}{F_s}$$

また、空間離散間隔を決定する際は、一般的に以下の点に注意する必要がある。

- ① 問題とする最大周波数に対して空間離散間隔(離散要素)を 1/10 波長程度以下にする。
- ② ナイキストのサンプリング定理により 1/2 波長以上にしてはならない。

したがって、設定した空間離散間隔 Δd と縦弾性波速度 V_p の条件を基に、条件を満たすサンプリング時間間隔 Δt が定まり、周期と周波数の関係からサンプリング周波数 F_s の設定を行った。これらの条件から設定したサンプリング時間間隔で 10,000step 計算を行った。

また算出した応答波形には、解析誤差やサンプリング時間間隔の設定によって、高周波成分に大きな雑音成分が含まれる場合がある。そのため、応答波形から高周波成分を除去するために 40.0kHz を上限としたローパスフィルタ処理(以下、LPF という)を施した。図 4.2(a),(b)から図 4.4(a),(b)に、これらの計算条件を定めた際に、解析モデル内を伝搬する弾性波の伝搬状況を計算ステップ数別に示す。それぞれの図の(a)は、空洞が存在しない健全時モデル Case_1-1、(b)は空洞を有する非健全時モデル Case_2-4 における伝搬状況である。図の横軸と縦軸は、PML 境界を含んだ X 軸と Y 軸の距離(mm)となっており、空洞の有無によって、弾性波の伝搬状況の変化が視覚的に確認できる。

表 4.4 シミュレーションの計算条件

入力周波数 : F_{inp}	6.00 kHz
空間離散間隔 : Δd	10.0mm×10.0mm
サンプリング時間間隔 : Δt	0.25 μ s
サンプリング周波数 : F_s	4.00 MHz
計算ステップ数	10,000step

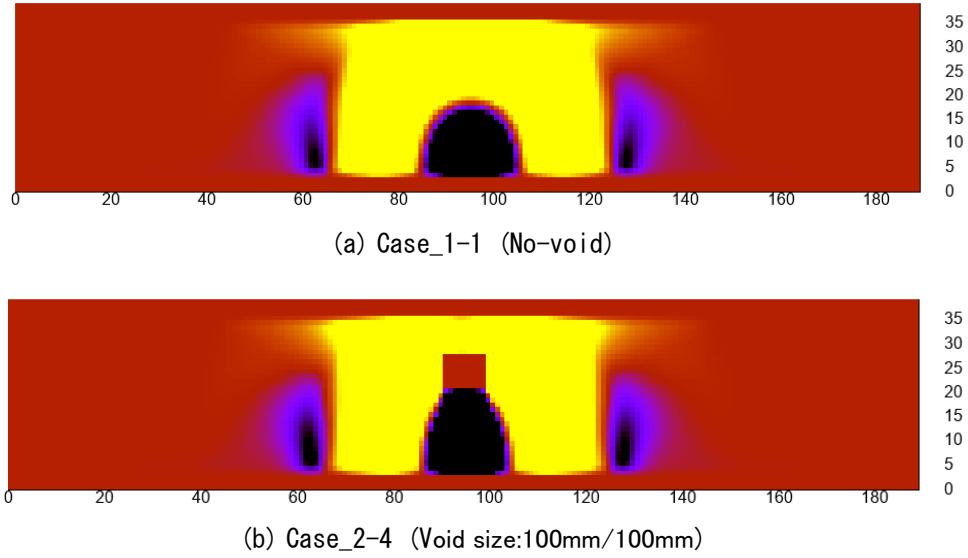


図 4.2 健全時と非健全時の弾性波の伝搬状況の比較, N=600step

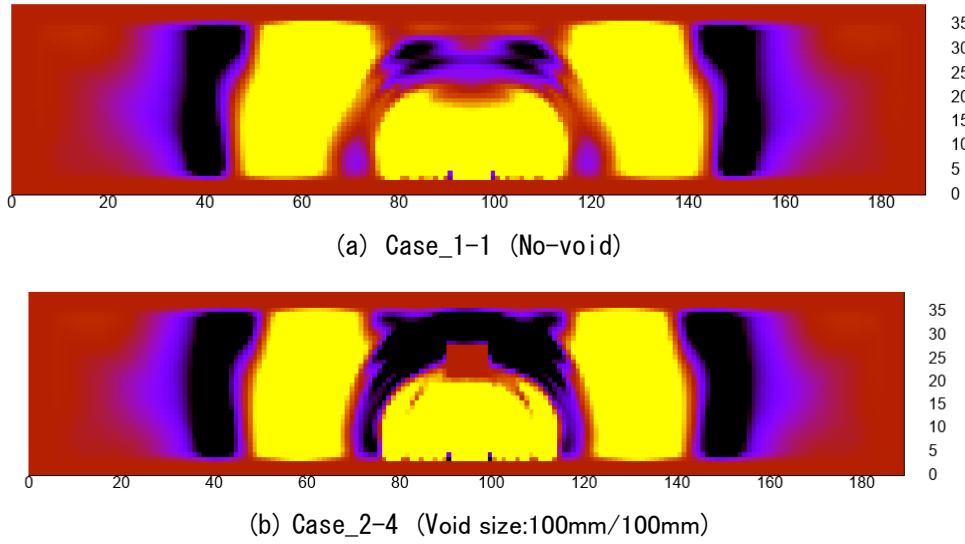


図 4.3 健全時と非健全時の弾性波の伝搬状況の比較, N=1000step

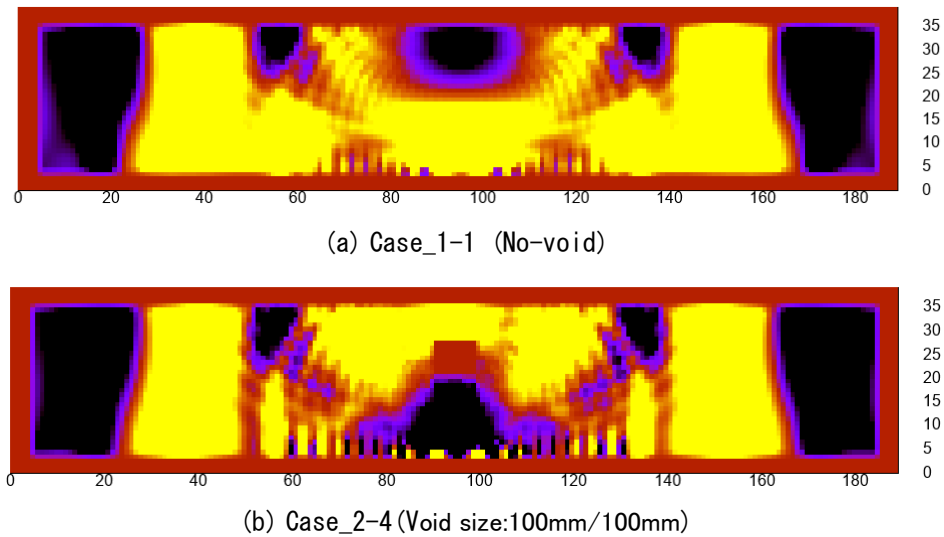


図 4.4 健全時と非健全時の弾性波の伝搬状況の比較, N=1400step

4.3.3 計算波形の事前処理

数値シミュレーションを用いた場合、複数の受信センサを一度に設定できるため、一回の計算で多数点の応答波形を算出することができる。一方、このような計算条件の場合、計算上の基準時刻は、入力開始を基準とした時刻歴の応答波形が算出されるため、入力点から離れるほど弾性波の到達時刻は遅くなる。このため、図 4.5(a) に示すように応答波形の立ち上がり時刻に時間差が生じる。差分値の算出式 $D = 1/N \sum_{i=1}^N (A_i - A'_i)^2$ は、サンプリング時間間隔毎の振幅の差を足し合わせ、算出データ数 N で正規化する。通常、弾性波の立ち上がり時刻以前の振幅値は殆ど 0 に等しいことから、入力時刻を基準として算出される差分値の大きさは、入力点と受信センサの距離関係によって大きく変化することが予測される。また、時間領域の応答波形の変化は、立ち上がり時刻以降に変化するものだと考えられる。したがって、DVA においては、立ち上がり時刻以前の波形データについては基本的にあまり意味がなく不要である。このため、差分値の計算上の基準時刻を応答波形の立ち上がり時刻として基準化するために以下の手順で時刻補正を行った。

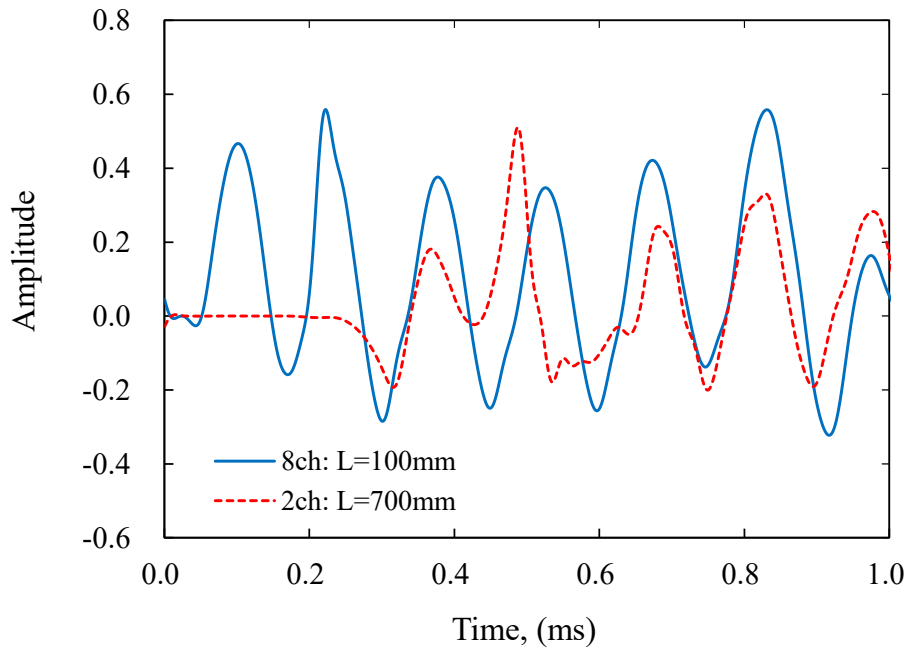
数値シミュレーションの解析モデルは、等方均質な物性値を有する理想的なモデルであると仮定している。加えて、衝撃弾性波法の測定時に考えられる、入力点のずれや受信センサの接着状態の変化などによる誤差も生じない。このため、弾性波の立ち上がり時刻は、入力点と受信センサ間の距離とその区間を伝搬する弾性波速度に依存する。このとき、受信センサに先に到達する弾性波が横波であると仮定すると、横波の伝搬速度 V_s と入力点と受信センサ間の距離 L から伝搬に要する時間 t は式 (4.31) によって導かれる。

$$t = \frac{L}{V_s} \quad (4.31)$$

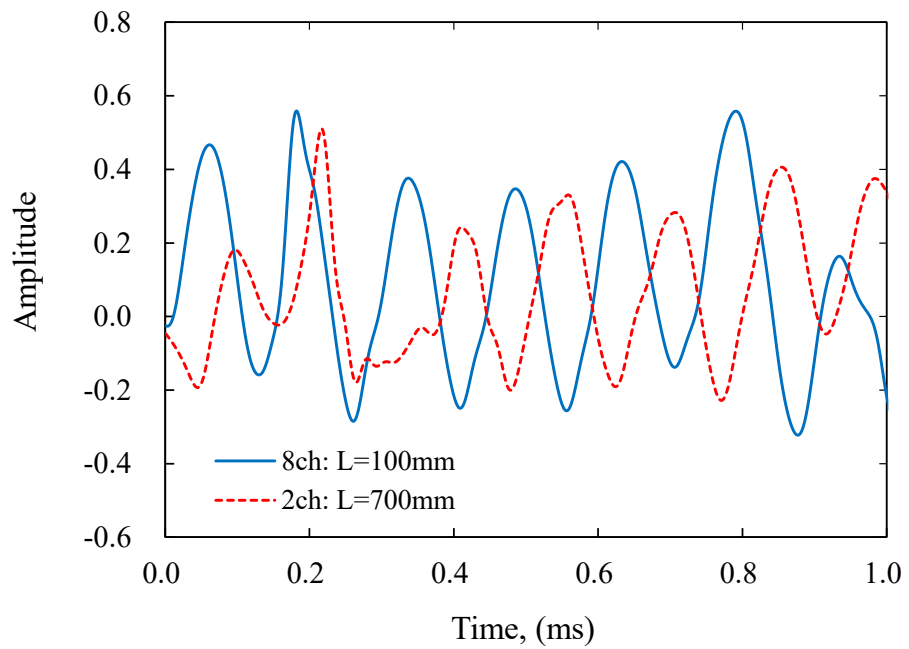
また、伝搬時間 t とサンプリング時間間隔 Δt の関係から、弾性波の到達までに必要なデータ数 N_t は式 (4.32) によって定まる。

$$N_t = \frac{t}{\Delta t} \quad (4.32)$$

この関係に基づき、入力点と各受信センサの距離別に N_t を求め、元のデータ数の N_t 番目のデータを立ち上がり時刻として基準化した。図 4.5(a) の波形を時刻補正した結果を図 4.5(b) に示す。



(a) 立ち上がり時刻補正前



(b) 立ち上がり時刻補正後

図 4.5 計算波形の立ち上がり時刻の差と補正後の計算波形

4.3.4 DVAによる内部欠陥の評価結果

① 算出データ数と差分値

差分値の算出に用いる算出データ数 N は、サンプリング時間間隔で記録した測定時間内の応答波形から任意に設定できる。しかし、算出データ数が極端に少ない場合（時間が短い）や多い場合（時間が長い）は、欠陥の評価が難しくなる場合が考えられる。また、算出データ数の変動によって、欠陥の影響する範囲の増減や算出データ数そのものが差分値の大きさや分布に影響することが予測される。したがって、適切な算出データ数の設定に関して検討するため、算出データ数が差分値に及ぼす影響について確認した。図4.6は、Case_2-5の条件で得られた応答波形と健全時応答波形から算出した各受信センサの差分値である。図の横軸はX軸上の受信センサの位置、縦軸は差分値、凡例は算出データ数 N の数である。データ数の変動によって差分値の大きさが変化している。 $N=600$ 以下では、差分値は小さく、空洞近傍の800mm~1,000mm区間における差分値の分布が、その他と異なる。本検討では入力周波数を6.00kHzとし、その一波長分の正弦波信号を入力信号としている。このときの入力時間（一波長分の時間幅）は約170 μ sとなる。一方、 $N=600$ の測定時間は約150 μ sであることから、算出データ数が600個以下では入力時間を満足していないことになる。つまり、 $N=600$ 以下では、入力信号の時間幅を示しているといえる。このため入力点近傍では、算出データ数が示す時間領域の範囲に変化が生じず、結果的に空洞近傍の差分値が減少したと考えられる。一方で、 $N=800$ 以上では、データ数の増加によって空洞近傍で差分値が増加し、 $N=1,500$ 以上で差分値の大きさが比較的に安定することが確認できる。

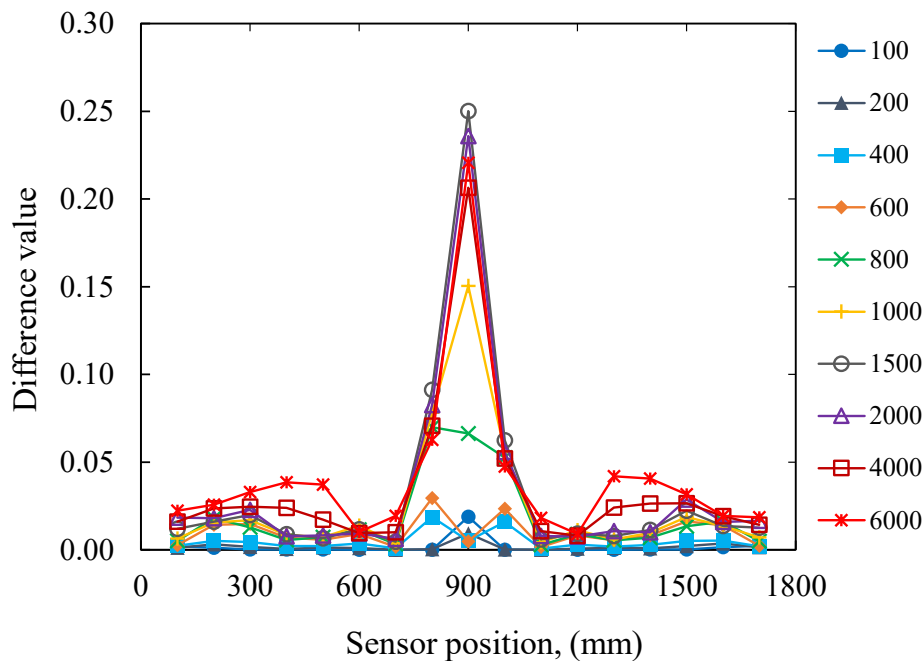


図 4.6 算出データ数 N の変化による差分値の分布 : Case_2-5

図 4.7 に空洞近傍の受信センサ 9ch~12ch における算出データ数別の差分値を示す。横軸は算出データ数 N 、縦軸は差分値、凡例は受信センサの番号である。空洞直下の受信センサ 9ch においては、 $N=1,500$ を境に差分値の大きさが安定したように見受けられる。同様に 10ch~12ch においても、 $N=800$ 付近から差分値の大きさが安定している。これらの結果から、入力周波数の波長を十分に満足する算出データ数を設定することで、差分値の増加傾向から空洞位置を評価可能であることが示された。一方、図 4.6 の 1ch~5ch および 13ch~17ch においては、算出データ数の増加に伴い差分値が微量に増えている。図 4.8 は、図 4.6 の 1ch~7ch 区間を抽出した分布図である。差分値は算出データ数の増加に伴い、相対的な増加と分布変化が確認できる。空洞によって変化した弾性波は、時間経過に伴い広範囲に伝搬する。このため空洞から離れた受信センサでは、算出データ数の増加によって差分値が増加したものと考えられる。

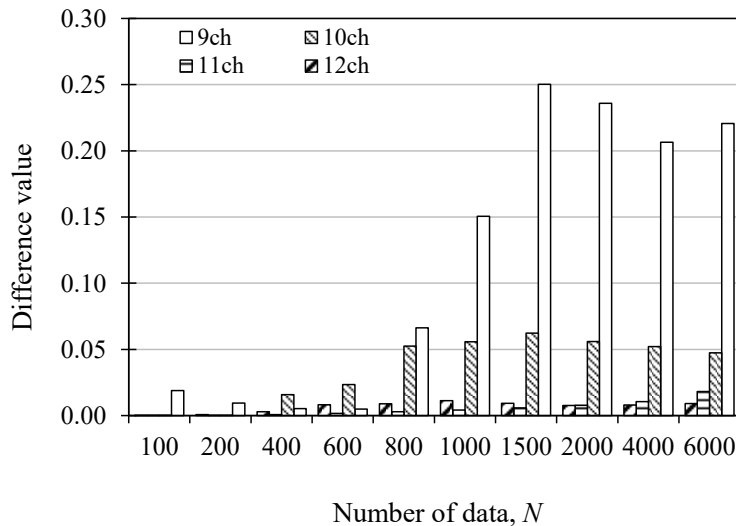


図 4.7 空洞近傍における算出データ数 N の変化による差分値 : Case_2-5

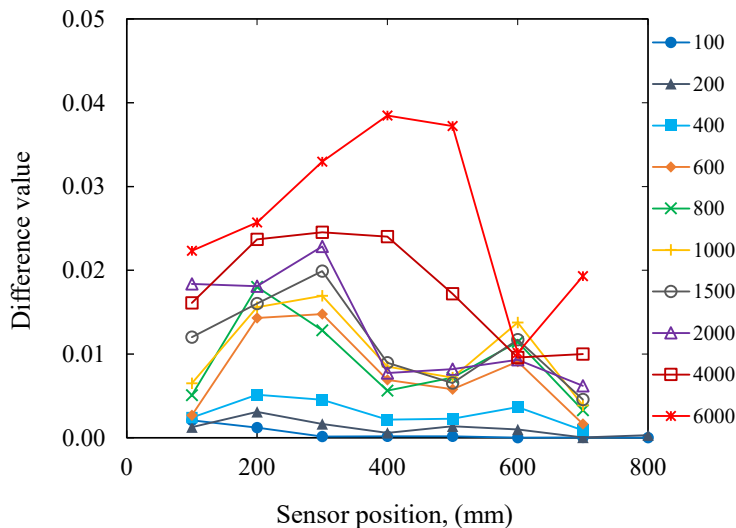


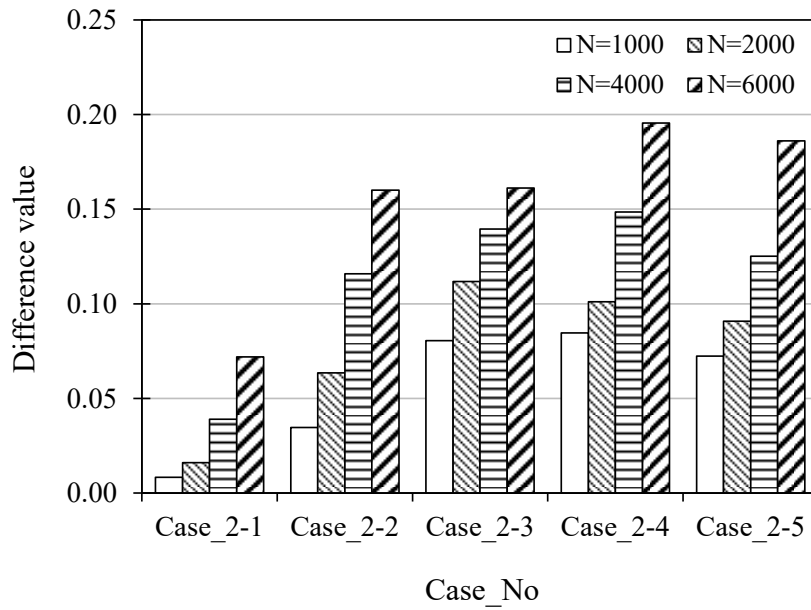
図 4.8 1ch~7ch 区間における算出データ数 N の変化による差分値 : Case_2-5

次いで、空洞の大きさ別に算出データ数の変化を確認した。ここでは、Case_2-1～Case_2-5の結果から得られた差分値を板の左端側の1ch～7chと空洞近傍の8ch～10chの二つの区間に分けて考えた。図4.9(a)には1ch～7ch, 図4.9(b)には8ch～10chにおける両区間のそれぞれの受信センサの差分値を式(4.33)に基づき足し合わせた結果を示す。

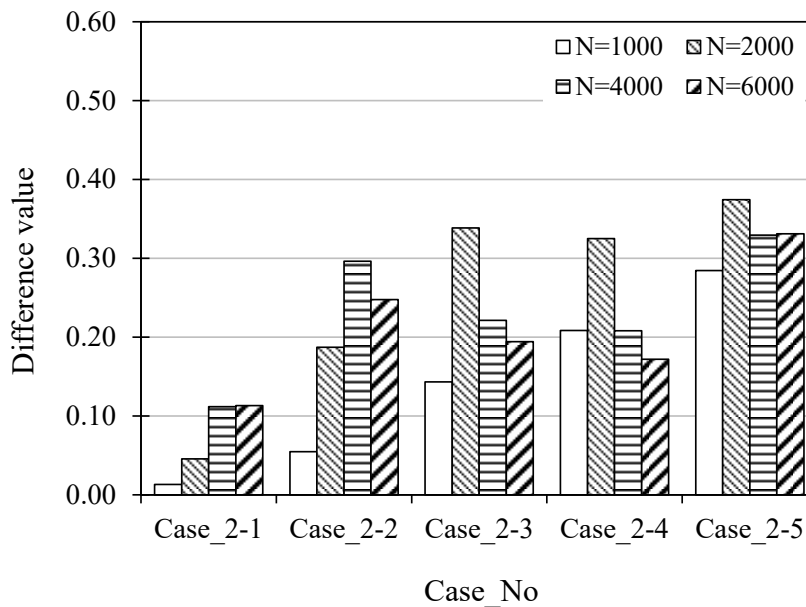
$$D_s = \sum_{j=1}^M D_j \quad (4.33)$$

ここで、 D_s は各受信センサの差分を累加した差分値、 D_j は各受信センサで算出した差分値、 M は累加する受信センサの数である。したがって、図4.9(a)は1ch～7chの7測点、図4.9(b)は8ch～10chの3測点の差分値の和となる。図の横軸はシミュレーションケース、縦軸は差分値、凡例は算出データ数である。図4.9(a)では、全ての実験ケースにおいて算出データ数の増加に伴い差分値が増加している。この図からも、空洞によって変化した弾性波が時間経過とともに広範囲に伝搬した可能性を示している。一方で、図4.9(b)においては、差分値の増加傾向が異なる。空洞サイズが小さいCase_2-1では、データ数の増加に伴い差分値が増加しているが、一方で、Case_2-2においては、 $N=6,000$ 、Case_2-3～Case_2-5では $N=2,000$ から差分値が減少した。算出データ数の増加に伴う差分値の増加傾向は一様でないことを確認した。弾性波は時間経過と共に同心円状に広がりながら伝搬し、伝搬距離が長くなることで減衰する。このため、波形の振幅は時間の経過に伴い失われることから、時間領域の後半では、減衰の影響が大きくなることで、平均化される差分値は相対的に減少する。したがって、入力点近傍において算出データ数を過度に多くすることに留意する必要があることがわかった。

以上の結果、差分値は算出データ数 N の変動によって変化することを確認した。時間経過に伴う差分値の変化から、算出データ数 N は入力波長以上のデータ数を設定する必要があることがわかった。また差分値は、空洞と離れた受信センサにおいては、算出データ数 N の増加に伴い大きくなることを確認した。一方、入力点近傍では、算出データ数 N の個数が一定の個数を満たすと減少する傾向があることがわかった。



(a) 1ch~7ch 区間



(b) 8ch~10ch 区間

図 4.9 シミュレーションケース別の算出データ数 N の変化による差分値の和 : Case_2

② 内部空洞のサイズ変化と差分値

空洞サイズの変化が差分値に与える影響を確認することを目的として、表 4.5 に示す Case_2~Case_4 の空洞サイズの条件を設定し数値実験を行った。

表 4.5 シミュレーションケース別の空洞のサイズ

Case_No	Void size		Case_No	Void size		Case_No	Void size	
	w(mm)	h(mm)		w(mm)	h(mm)		w(mm)	h(mm)
Case_2-1	30/30		Case_3-1	30	30	Case_4-1	30	
Case_2-2	50/50		Case_3-2	50		Case_4-2	50	
Case_2-3	80/80		Case_3-3	80		Case_4-3	80	
Case_2-4	100/100		Case_3-4	100		Case_4-4	100	
Case_2-5	120/120		Case_3-5	120		Case_4-5	120	

図 4.10(a), (b) にシミュレーションケース別の差分値の結果を示す。差分値の算出に用いた算出データ数 N は 1000 個であり、図 4.10(a) は Case_2、図 4.10(b) は Case_3 の結果を示しており、凡例はそれぞれのシミュレーションケースである。空洞サイズの増加に伴い、空洞近傍 800mm~1,000mm の区間で段階的に差分値が増加した。また、Case_2 と Case_3 は、空洞の高さ(h)が異なるだけであるが、全ケースにおいて Case_3 で空洞近傍の差分値が大きくなった。空洞の高さの増加によって、反射面までの見かけの伝搬経路の増加と空洞側面部の反射波の変化によって、弾性波の伝搬と反射経路に変化が生じることが考えられる。このため、空洞近傍の差分値の大きさに若干の変化が生じたものと推察される。また、空洞近傍以外の差分値に着目すると、Case_3 においては一様な増加傾向を示している。一方、Case_2 では、差分値の増加と分布に変化が生じている。この結果から、空洞の高さは差分値の分布に影響を与え、幅は差分値の大きさに影響を与えている可能性を確認した。

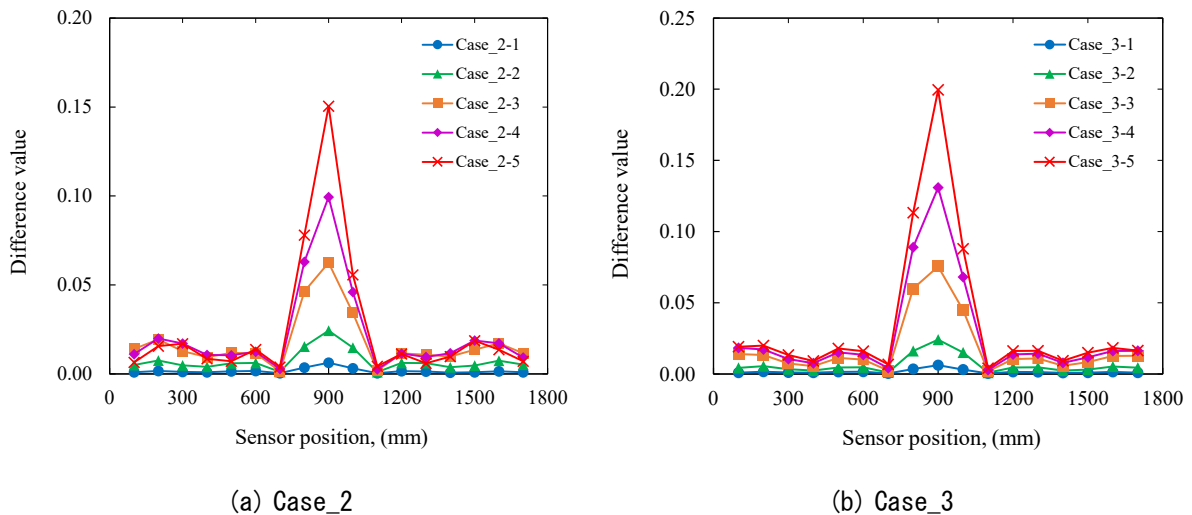


図 4.10 シミュレーションケース別の差分値の比較

図 4.11 に Case_4 におけるシミュレーションケース別の差分値を示す。Case_4-5 における空洞直下の受信センサ 900mm の差分値と分布が図 4.10 (a), (b) と比べ大きく異なる。受信センサ 900mm の差分値は、Case_2-5 と比較して約 3% と大幅に減少した。この結果からも、空洞の幅は差分値に大きな影響を与えていることを確認した。また、空洞高さの増加によって Case_2 と同様に差分値が減少する傾向があることを確認した。加えて、100mm から 600mm 区間の差分値は、空洞高さの増加によって差分値の大きさと分布の変化が確認できる。空洞の高さは、弾性波の変化を広範囲に影響させる要因になっている可能性を Case_4 の結果からも示された。図 4.12 は、Case_2~Case_4 における空洞直下 900mm の差分値をまとめたものである。横軸はシミュレーションケース、縦軸は差分値を示す。Case_2 および Case_3 の結果から、差分値は空洞の幅の大きさによって変化し、幅が増加することで大きくなる。一方で、Case_4 の結果から、空洞の高さの変化による差分値の変化は極めて小さく、この図からも、空洞高さが差分値与える影響は小さいことは明らかとなった。

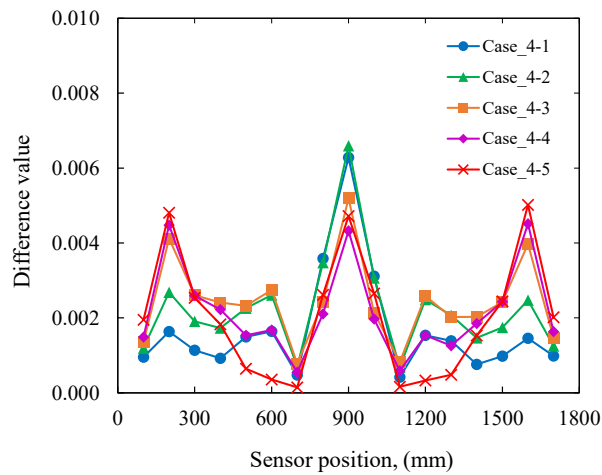


図 4.11 シミュレーション別の差分値の比較 ; Case_4

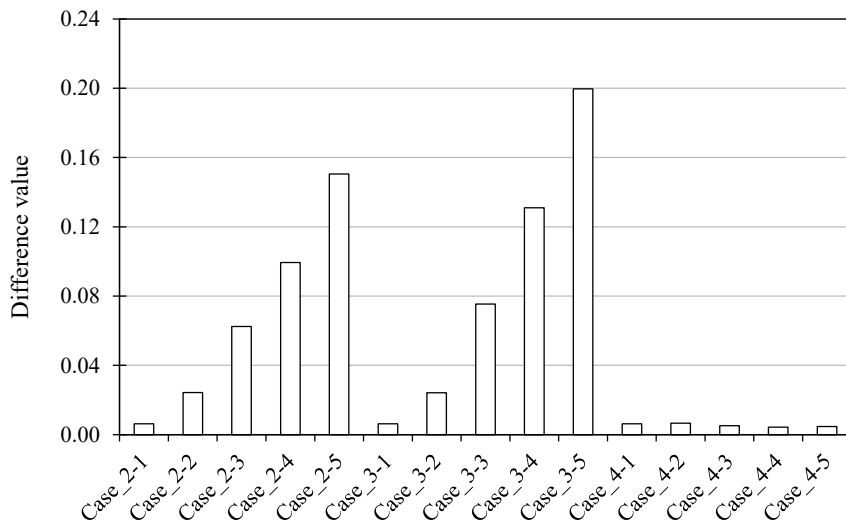


図 4.12 Case_2~4 における空洞直下 900mm (9ch) の差分値 : N=1000

以上の結果をまとめると、空洞直下の差分値は空洞の幅（入力面と平行な面の長さ）が大きくなることで増加し、幅の増減が差分値に与える影響は大きい。一方、空洞高さ（入力面と垂直な面の長さ）の変化による影響は小さいが、差分値の分布に影響することがわかった。したがって、差分値の大きさから空洞の平面的な大きさを評価し、差分値の分布から空洞の高さを評価可能であることを示唆している。

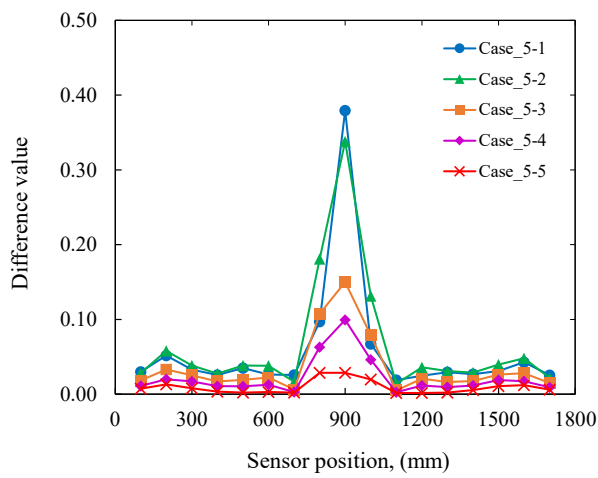
③ 内部空洞の位置と差分値

ここでは、空洞位置の変化によって生じる差分値の分布変化を確認した。表 4.6 は Case_5 および Case_6 の空洞位置の条件を示す。算出データ数 N は 1000 個、空洞サイズの幅(w)と高さ(h)は 100mm に固定した。図 4.13(a)に Case_5 におけるシミュレーションケース別の差分値の結果を示す。空洞の位置が深くなることで空洞近傍の差分値が減少した。Case_5-5（空洞深さ $y = 200\text{mm}$ ）と Case_5-1（空洞深さ $y = 50.0\text{mm}$ ）における受信センサ 900mm の差分値を比較すると、約 8%と大きく減少した。また、図 4.13(b)には、受信センサ 900mm で得られた空洞深さ別の差分値を示す。空洞の位置が深くなることで差分値は減少し、深さ 80.0mm から大きく減少した。弾性波は同心円状に広がりながら伝搬し、伝搬距離の増加に伴い減衰の影響が大きくなる。空洞の位置が浅い場合は、入力面と空洞の間の距離が近いことから、減衰の影響が小さく、振幅の大きい弾性波が繰返し反射していることが考えられる。そのため、空洞の位置が浅い場合に差分値が増加したものだと考えられる。この結果から、空洞深さ位置が差分値に与える影響は大きく、空洞直下の差分値は、空洞位置が浅いと大きくなり、空洞位置が深くなると小さくなることがわかった。

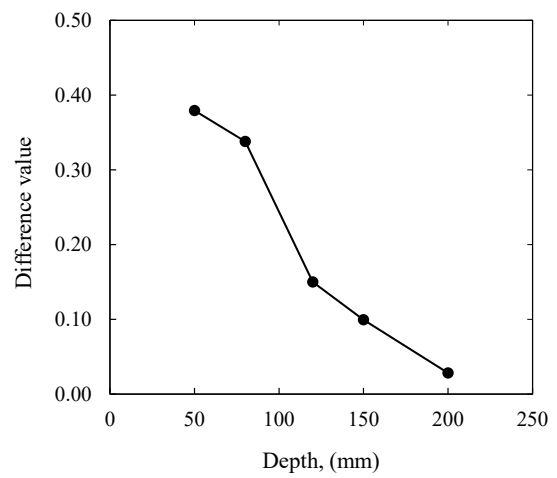
図 4.14 に Case_6 における差分値の結果を示す。なお、Case_6-3 は Case_2-4 と同じ結果であることから図から除いた。空洞の平面位置の変化によって差分値の分布が異なる。また、Case_6-1 と Case_6-5 および Case_6-2 と Case_6-4 は、入力点が解析モデル中心であり、空洞の位置が左右対称であることから差分値の分布は対称となった。Case_6-1 では、500mm 地点から差分値が増加し、左端に近づくことで増加した。Case_6-2 も同様の傾向となり、800mm 地点から差分値は増加し、それ以降は左端に近づくにつれて増加した。入力点を基準として空洞をみた場合、配置した受信センサを空洞の手前と奥に分けて考えると、空洞の手前の区間では受信点に到達した瞬時に弾性波の変化はなく、空洞に到達した後に空洞の影響によって弾性波に変化が生じる。一方、空洞より奥の受信センサは、空洞によって既に変化した弾性波が初動として到達する。このため、空洞を越えた受信センサ以降の差分値は大きく増加し、空洞手前では小さくなることは明らかである。つまり、空洞近傍から差分値の変化が始まり、以降増加する傾向があることがわかった。また、空洞と離れた入力点近傍の領域では算出データ数が 1000 個程度では、空洞からの反射波の影響を受けないことから差分値は増加しない。

表 4.6 シミュレーションケース別の空洞の位置

Case_No	Void position		Case_No	Void position	
	x(mm)	y(mm)		x(mm)	y(mm)
Case_5-1	900	50	Case_6-1	300	150
Case_5-2		80	Case_6-2	600	
Case_5-3		120	Case_6-3	900	
Case_5-4		150	Case_6-4	1,200	
Case_5-5		200	Case_6-5	1,500	



(a) Case_5 の差分値の分布



(b) 空洞直下 (900mm) の
差分値と空洞深さ位置の関係

図 4.13 Case_5 におけるシミュレーションケース別の差分値 : N=1000

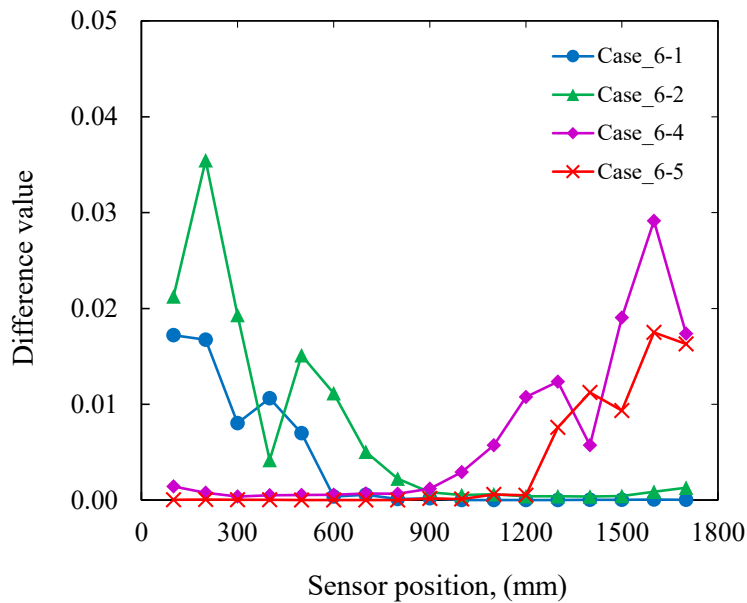


図 4.14 Case_6 におけるシミュレーションケース別の差分値 : N=1000

図 4.15(a1), (a2)~(e1), (e2)に健全時モデルである Case_1-1 と Case_6-1 における弾性波の伝搬状況を計算ステップ数別に示す。解析モデル内の左右で弾性波の伝搬状況のゆらぎが確認できる。また空洞近傍の伝搬状況に着目すると、1200step 以降から左端側の変化が顕著である。このことから、立ち上がり時刻を基準とした空洞近傍の受信センサの計算波形は、弾性波の到達時点から空洞の影響を受けるため差分値は大きくなる。

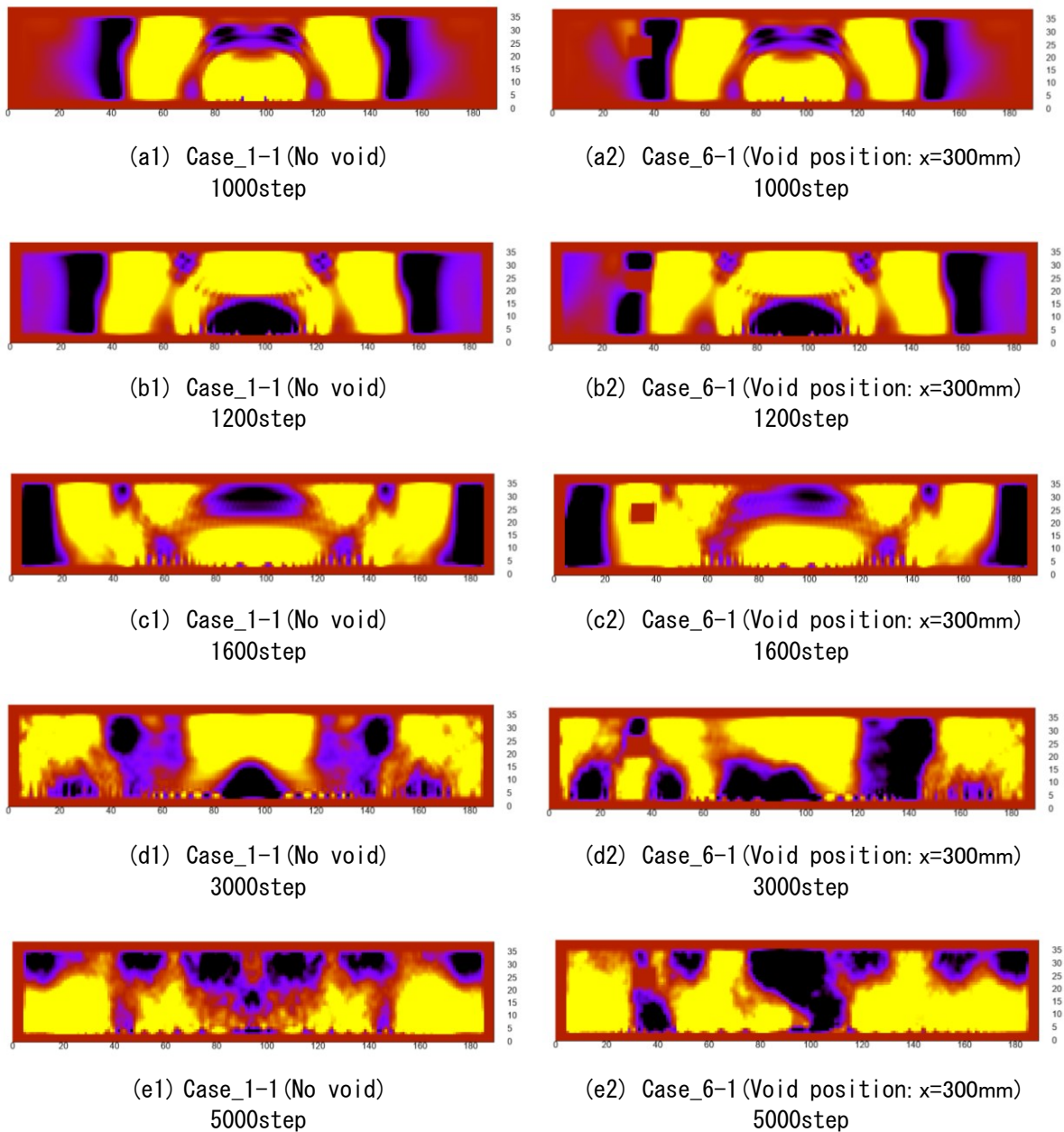
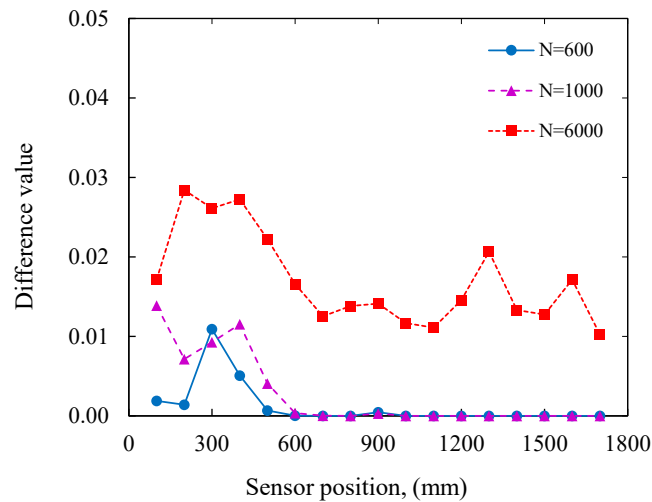
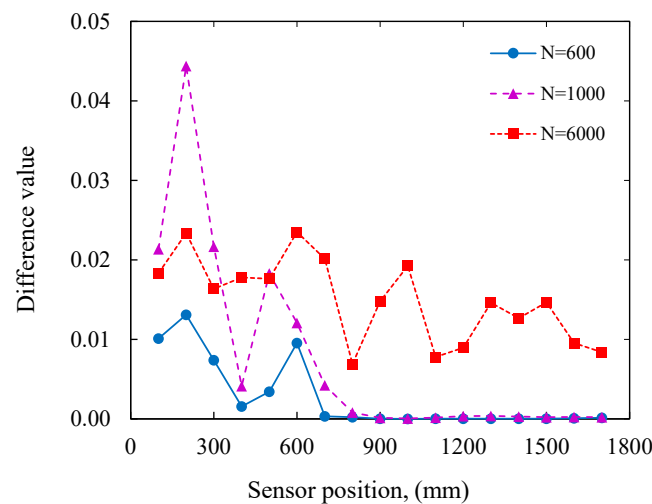


図 4.15 Case_1-1 と Case_6-1 の弾性波の伝搬状況の比較

図 4.16(a), (b)に Case_6-1 と Case_6-2 における算出データ数 N 別の差分値の分布を示す。算出データ数が $N=6,000$ において各受信センサの差分値が増加した。算出データ数が多い場合は、空洞の影響を受けた弾性波が広範囲に伝搬するため、空洞位置の評価が難しくなる。一方、 $N=600$ においては、空洞直下で差分値が明確に増加していることが確認できるため、空洞位置の評価が可能であると考えられる。しかし、空洞を越えた受信センサについても、差分値の増加が生じているため、空洞位置の正確な評価は難しい。しかしながら、差分値の分布傾向から空洞の存在する方向を定めることは容易に可能である。この差分値の分布傾向は、 $N=800$ も概ね同じ傾向を示した。この結果、算出データ数 N の設定によって、入力点と離れた空洞の概ねの位置や方向を評価できる可能性が示された。以上の結果、算出データ数 N の変動に伴う差分値の分布から、空洞位置を簡易的に広い範囲で評価できる可能性が明らかとなった。このため、DVA はスクリーニング手法としても利用できると考えられる。



(a) Case_6-1 (空洞位置 : $x=300\text{mm}$)



(b) Case6-2 (空洞位置 : $x=600\text{mm}$)

図 4.16 Case_6-1 と 6-2 における算出データ数 N 別の差分値

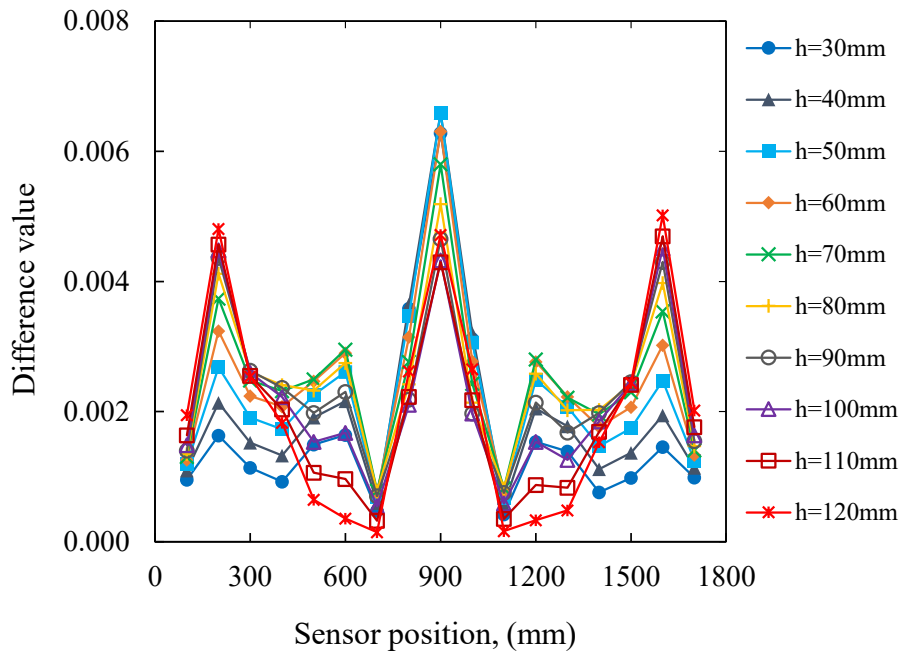
④ 空洞高さの変化に伴う差分値についての追加検討 [4. 12]

これまでの検討結果から、空洞の平面的な大きさや位置の変化によって生じる差分値の増減や分布傾向を確認した。一方、空洞高さについては、空洞近傍の差分値の変化量は小さく、空洞高さを評価することは容易ではない。このため、表 4. 7 に示す計算条件を追加で設け、空洞高さの影響をより詳細に確認することを目的とした数値実験を行った。なお、追加検討における解析モデルや出力条件等の変更はなく、差分値の算出データ数についても 1000 個に固定した。内部空洞の位置は、表に示す座標値に固定した。

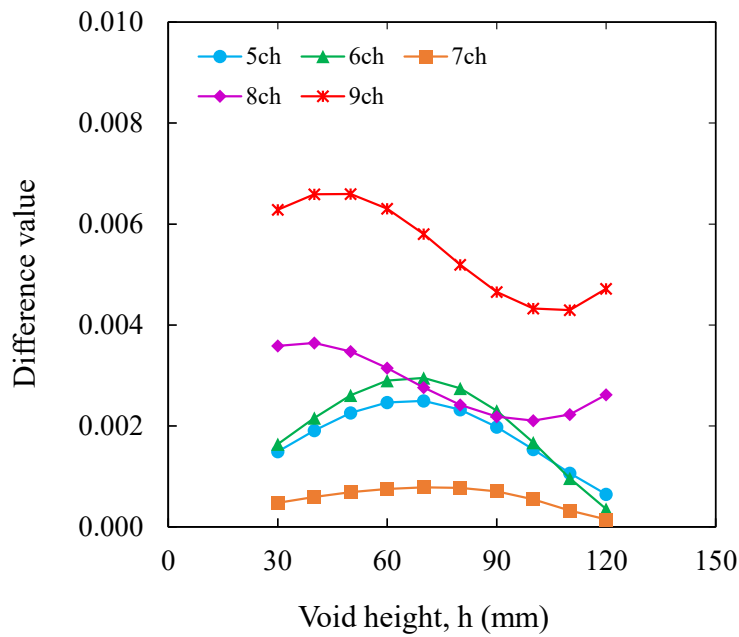
表 4. 7 追加検討の計算条件

Case_No	Input point	Void size		Void position	
	X(mm)	w(mm)	h(mm)	x(mm)	y(mm)
Case_7-1	500	30	30~120 @10	900	150
Case_7-2	600				
Case_7-3	700				
Case_7-4	800				
Case_7-5	900				

図 4. 17(a) に、Case_7-5 における差分値の分布を示す。凡例は空洞高さ(h)である。入力点が空洞直下 900mm では、差分値の増減や分布変化は小さい。図 4. 17(b) に受信センサ 5ch~9ch の空洞高さ と差分値の関係を示す。図の横軸は空洞高さ、縦軸は差分値、凡例は受信センサの番号を示す。受信センサ 9ch(900mm) における空洞高さ と差分値の相関関係は低い。また比較的、空洞に近い受信センサにおいても、空洞高さの増加に伴う一様な増加傾向は確認できない。この結果、空洞直下を入力点とした差分値の大きさと分布から空洞の高さを評価することは難しい。一方、図 4. 17(a) の受信センサ 2ch(200mm) では、段階的な差分値の増加が確認できる。しかし、入力点と受信センサ間の距離が 700mm と大きく離れている。実構造物の測定を考えた場合、構造物の大きさは様々であることから、入力点近傍の受信センサで評価できることが望ましい。したがって、入力点近傍の受信センサの差分値について主に着目した。図 4. 17(b) の受信センサ 6ch(600mm) では、空洞高さ h=70.0mm まで差分値は増加し、その後、減少した。5ch および 7ch についても同様の傾向を示した。一方、8ch および 9ch については、差分値の一定の増減傾向は確認できない。したがって、入力点が空洞直下の場合、差分値が一定の増減傾向を示さないため、差分値の大きさから空洞高さを評価することは容易ではない。



(a) 空洞高さ (h) の変化による差分値



(b) 5ch~9ch の空洞高さ (h) と差分値の関係

図 4.17 Case_7-5 における差分値 : 入力点=900mm

図 4.18 (a) ~ (d) に Case_7-1 ~ Case_7-4 で得られた差分値の分布を示す。入力点の位置条件によって差分値の分布が異なる。Case_7-1 の入力条件（入力点 = 500mm）では、空洞手前の受信センサ 8ch(800mm) で段階的な差分値の増加が確認できる。また、空洞以降の受信センサで差分値が大きく増加した。これは、Case_6 の結果と同じ傾向を示している。また、入力点が空洞に近づくことで、差分値の分布変化が Case_7-2 ~ Case_7-4 の結果から確認できる。Case_7-2 は Case_7-1 と概ね同じ分布を示した。一方、Case_7-3 と Case_7-4 では、空洞中心とした板左側の差分値が増加し右側の差分値が減少した。つまり、入力点が空洞に近づくことで、空洞を中心とした左右で差分値の分布に変化が生じた。

図 4.19 (a), (b) に入力点と空洞位置の距離間が異なる反射波のイメージ図を示す。図 4.19 (a) に示すように入力点と空洞が近い場合、空洞の側面によって生じる反射波は入力時間を基準とした時間から、短い時間で反射波が生じ入力点に到達する。この場合、到達時刻を基準とした時間軸上の弾性波の変化は、入力点の近傍において大きくなる。また、空洞高さの増加によって、反射波や伝搬経路の影響は大きくなることから、結果的に差分値は増加することが考えられる。一方、図 4.19 (b) では、入力点と空洞の位置が離れることで、空洞までの伝搬距離の増加と、それに伴う距離減衰によって反射強度は小さくなる。さらに、入力点側の時間軸上の弾性波の弾性波の変化に遅延が生じる。したがって、入力点と空洞位置の距離関係によって差分値の分布に変化が生じたものだと考えられる。

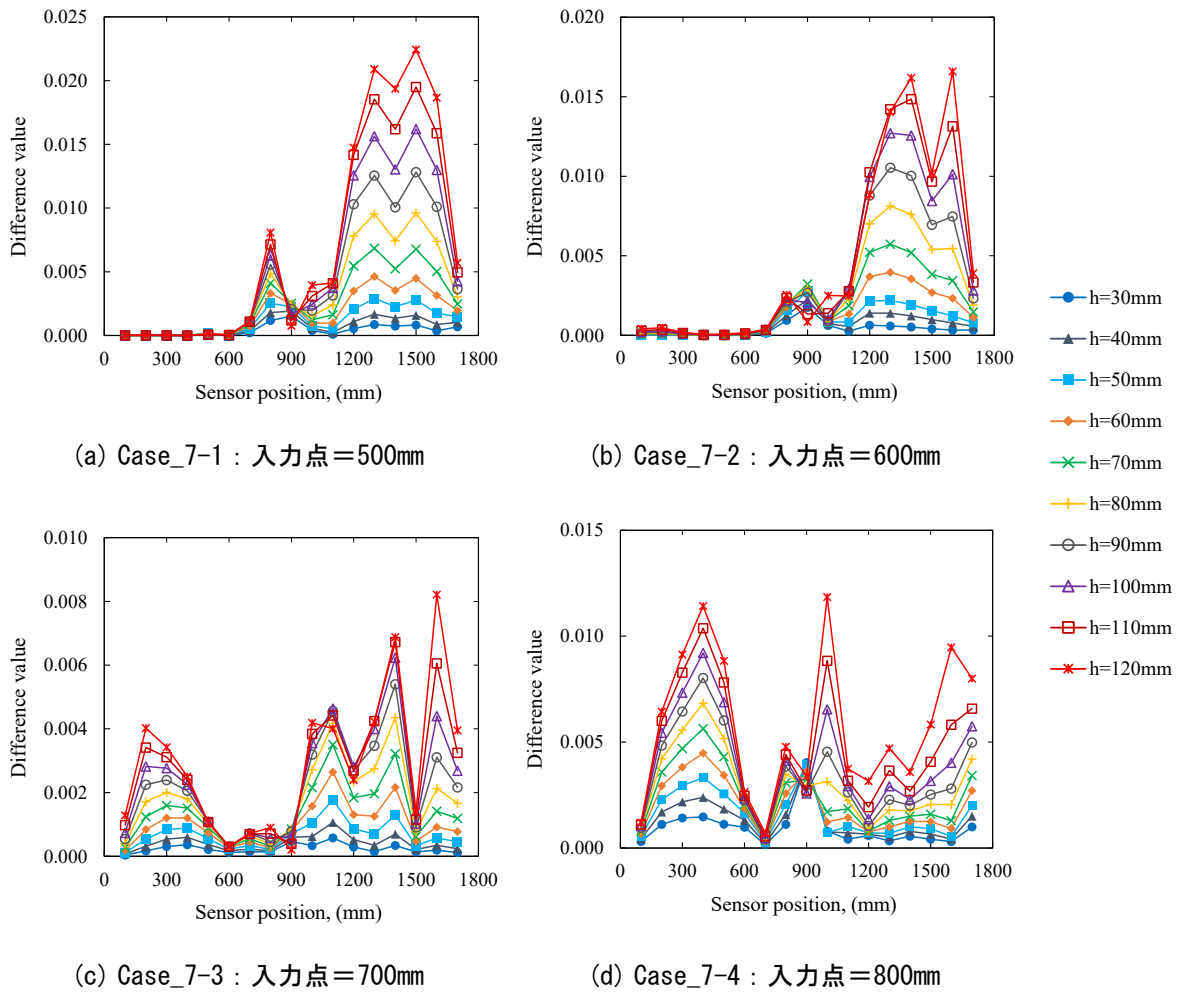


図 4.18 Case_7-1~Case_7-4 における差分値

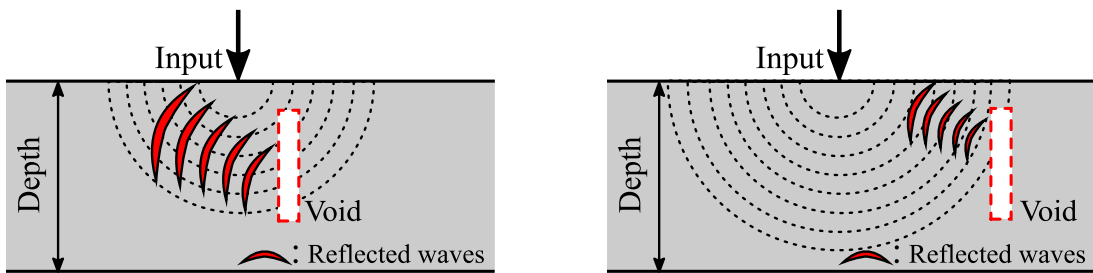


図 4.19 入力点と空洞の位置関係の違いによる反射波のイメージ図

図 4.20(a), (b) は、入力点別に空洞に隣接する受信センサ 8ch(800mm)および 10ch(1,000mm)で得られた空洞高さ(h)と差分値の関係である。図の横軸は空洞高さ(h)、縦軸は差分値、凡例は入力点: INP の位置を示す。INP=900mm を除いた全ての入力点で、空洞高さの増加に伴い差分値が増加した。特に、INP=500mm と INP=800mm においては、両受信センサで差分値が段階的に増加することが確認できる。図 4.21(a), (b) は、INP=500mm および INP =800mm において、各最大差分値で正規化した空洞高さとの差分値の関係を入力点別に示したものである。受信センサ 8ch で空洞高さとの差分値に高い相関関係があることがわかった。

以上の結果から、空洞直下以外を入力点とした空洞近傍の差分値の大きさを用いて、空洞高さを評価できる可能性が明らかとなった。特に、入力点と受信センサが空洞近傍かつ、空洞を越えない場合に、空洞高さとの差分値の間には高い相関関係があることがわかった。

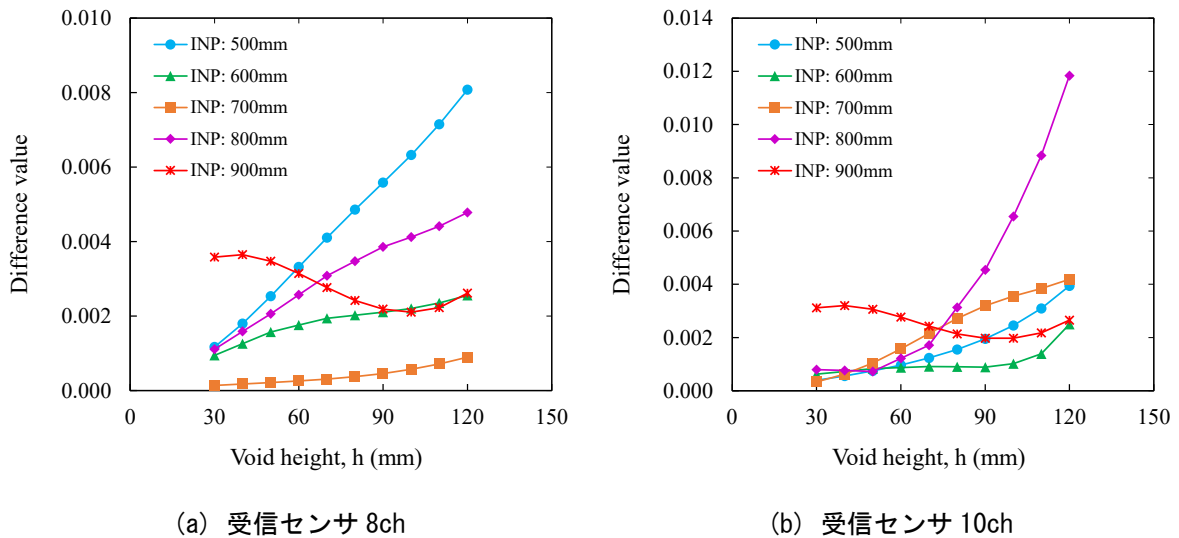


図 4.20 入力点別の空洞高さ (h) と差分値の関係

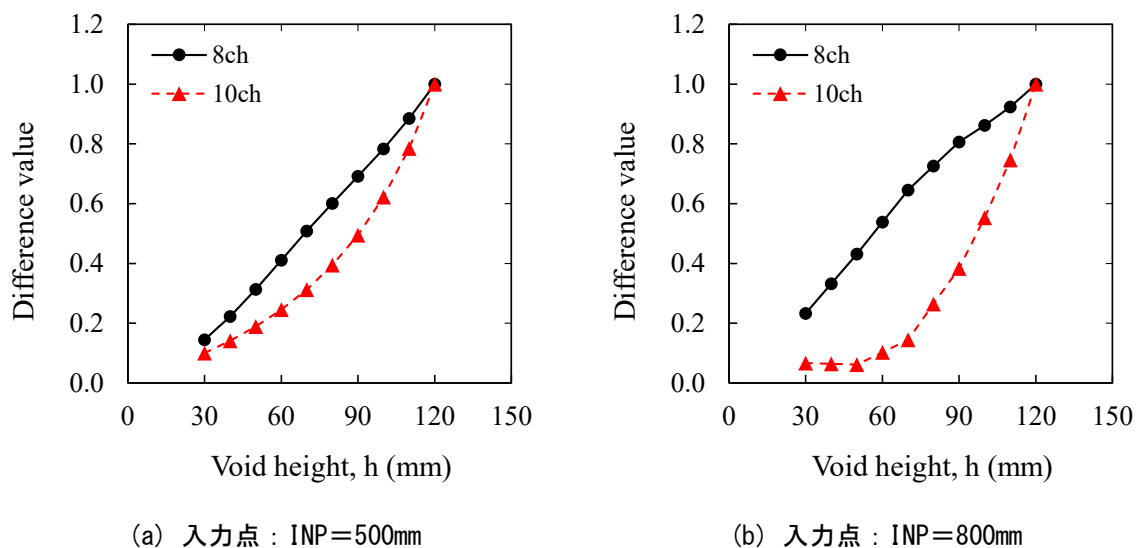


図 4.21 最大差分値で正規化した空洞高さとの差分値の関係

4.3.5 二次元モデルを用いた数値実験のまとめ

応答波形の時系列変化量である差分値を用いた内部欠陥評価手法の基礎検討として、コンクリート板を仮定した二次元モデルを用いた数値シミュレーションを行った。解析モデル内部に設置した模擬欠陥である空洞の大きさや位置の条件を変化させ差分値を算出し、差分値の大きさと分布から、欠陥が差分値に及ぼす影響を確認した。以下に結果をまとめる。

- 差分値は、算出データ数の大きさで変化することを確認した。また、算出データ数の増加に伴う差分値の増加傾向は一定の算出データ数以降から安定することを確認した。
- 算出データ数の変動による差分値の分布変化と増減から、算出データ数は入力波長以上の時間を満たす条件を設定する必要があることを確認した。また、空洞と離れた受信センサの差分値は、算出データ数の増加に伴い大きくなることを確認した。
- 空洞直下の差分値は、空洞の幅（入力面と平行な面の長さ）が大きくなることで増加し、幅の増減が差分値に与える影響は大きいことがわかった。一方、空洞の高さ（入力面と垂直な面の長さ）の変化は、差分値の大きさに与える影響は小さいことを確認した。しかし、差分値の分布に関しては、大きく影響する可能性を確認した。これらの結果から、差分値の大きさから空洞の平面的な大きさを評価できる可能性と、差分値の分布から空洞の高さを評価できる可能性があることが示された。
- 空洞の深さ位置の変化が差分値に与える影響は大きく、空洞直下の差分値は、空洞が浅いときに増加し、空洞位置が深くなることで減少することがわかった。
- 差分値は、入力点と空洞が離れた場合、空洞近傍の受信センサで差分値の増加が始まり、入力点からみて空洞を越えた受信センサ以降で大きく増加した。一方で、入力点からみて空洞の存在しない方向では差分値が増加しないことを確認した。この結果、差分値の増加開始位置や分布傾向から空洞位置を簡易的に評価できる可能性を示した。このため、差分値を用いた評価手法である DVA は、入力点と受信点を広げることで、広範囲の空洞評価手法として利用できる可能性が示された。
- 差分値は入力点と空洞が離れた場合、算出データ数の増加によって弾性波の変化が広範囲に伝搬した結果、空洞位置を評価することが難しくなることがわかった。したがって、算出データ数は、評価領域や区間によって適切に設定する必要があることがわかった。
- 空洞高さの増加によって生じる差分値の変化は、空洞直下を入力点とした場合、空洞近傍の受信センサにおける差分値への影響は小さく、空洞高さとの相関は小さいことを確認した。一方、空洞直下以外を入力点とした場合、複数点の受信センサにおいて差分値は一定の増加傾向があることを確認した。特に、入力点と受信センサが空洞に近傍に設定し、それらが空洞を直交しない条件下では、空洞高さとの相関

関係があることが明らかとなった。この結果から、入力点と受信センサの設定によって差分値から空洞高さを評価できる可能性が示された。

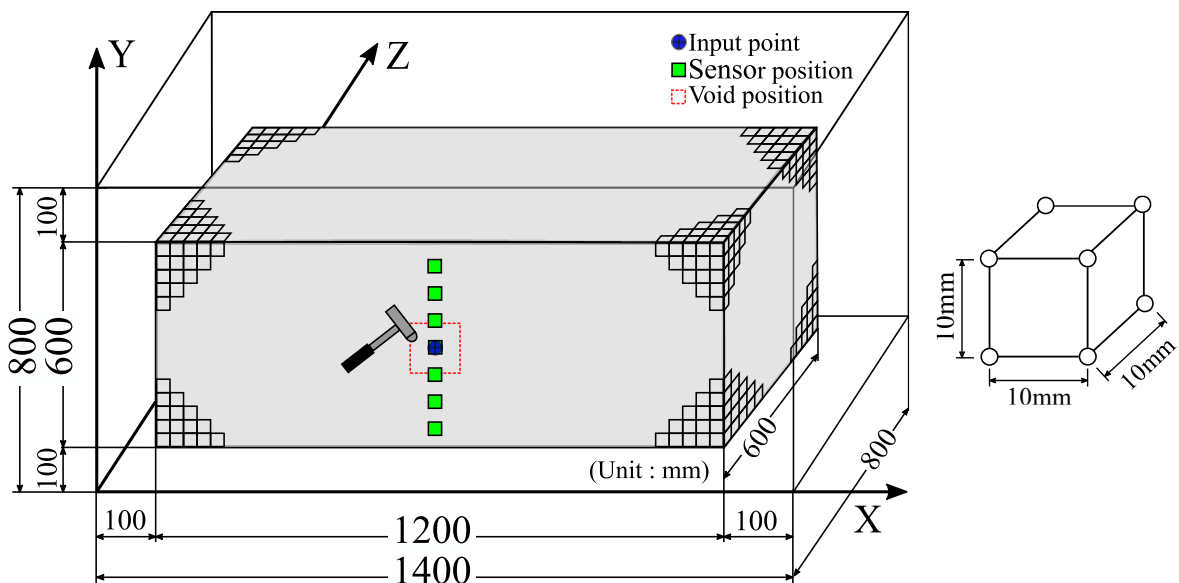
4.4 三次元モデルを用いた検討 [4.13]

4.4.1 概説

本節の検討では、従来の卓越周波数を指標とした内部欠陥評価手法の対象外である、矩形断面を有するコンクリート構造物を模擬した三次元モデルを用いて数値実験を行った。二次元モデルと同様に矩形断面を有する三次元モデルに対して、差分値を用いた内部欠陥評価手法を適用し、提案手法の有用性と欠陥が差分値に及ぼす影響について検討した。

4.4.2 解析モデルの概要

図 4.22 (a), (b) に、解析モデルの概略図と離散要素の概略を示す。計算領域は PML 境界を含んだ、長さ： $X=1,400\text{mm}$ 、高さ： $Y=800\text{mm}$ 、奥行き： $Z=800\text{mm}$ の三次元空間となっており、この空間を一辺が $\Delta d=10.0\text{mm}$ の正六面体の空間離散要素で分割した。数値実験の評価対象であるコンクリートモデルは、一般的な物性値を有する均質なコンクリートとして、 $X=1,200\text{mm}$ 、 $Y=600\text{mm}$ 、 $Z=600\text{mm}$ とした。このモデルを PML 領域の外周の各面から 100mm 内に図のように設置した。PML 境界は、二次元モデルの数値実験と同様に、評価対象のモデル外の境界条件を設定する領域であり、本検討においても、コンクリート内部を伝搬する弾性波が解析モデルの境界面で減衰が生じないように領域内を空気として設定した。



(a) 解析モデル

(b) 離散要素

図 4.22 解析モデルの概略図と離散要素

4.4.3 数値シミュレーションの条件

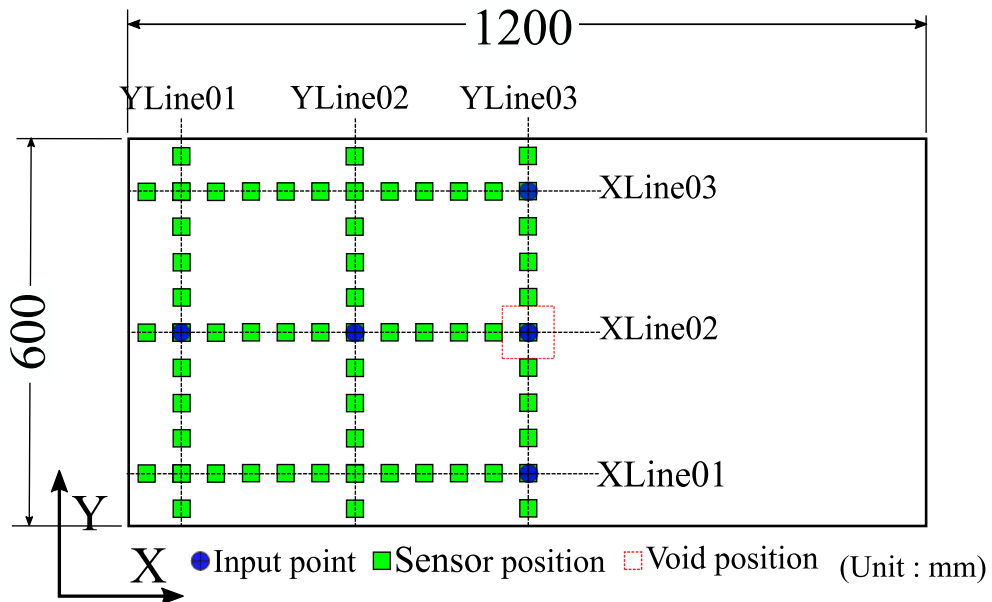
図 4.23 (a), (b) に測定条件を概略的に示したコンクリートモデルの平面図, 表 4.8 には, 図 4.23 (a) の受信センサの座標値を示す. コンクリートモデルの X-Y 平面上の中心位置 600mm から左側に, 表の条件で 60 点の受信センサを設けた. X 軸方向の受信センサの測定ラインを X-Line, Y 軸方向の測定ラインを Y-Line とした. 表 4.9 にモデル内に設定した, 内部空洞の条件と入力点の座標値を示す. 内部空洞の形状は正六面体の空洞として, 幅(x), 高さ(y), 奥行き(z)を 40.0mm~100mm まで 20.0mm 間隔で等しく増加させた. 内部空洞の平面位置は, 図の赤枠破線部で示すように, 空洞の x-y 平面の中心位置が表の X, Y 座標となるように設定した. 内部空洞の深さ位置である Z 軸方向の距離は, 空洞始端が入力面から 100mm~500mm まで 100mm 間隔で設定した. 応答波形の計算は, 空洞の条件と入力点の条件別に個別に算出し, 健全時応答波形と内部空洞を設けたそれぞれの非健全時応答波形を用いて差分値を算出した. また, 本検討では, X-Line と Y-Line を表 4.9 に示すように分けて考えており, 入力点が X-Line 上を移動する条件を Case_1, 入力点が Y 軸方向に移動する条件を Case_2 として, それぞれ表の条件で入力点を移動させた.

表 4.8 コンクリートモデルに設置した受信センサの座標値

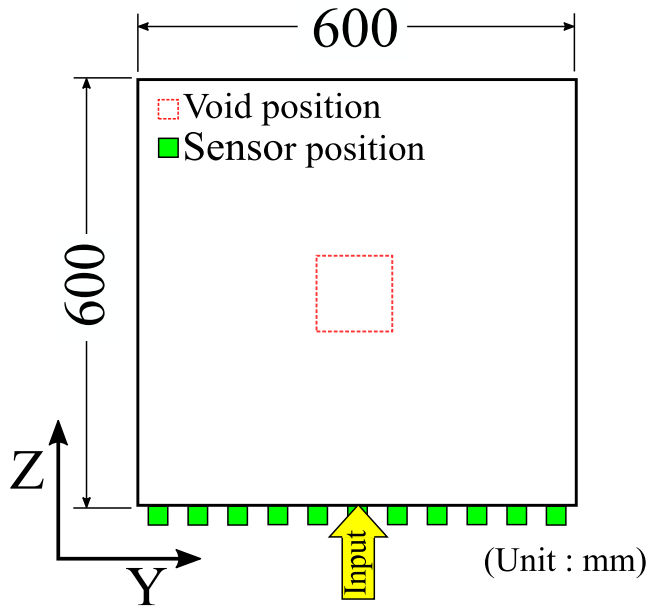
Line_No	Sensor position		Line_No	Sensor position	
	X(mm)	Y(mm)		X(mm)	Y(mm)
X-Line01	50~600 @50	100	Y-Line01	100	50~550 @50
X-Line02		300	Y-Line02	350	
X-Line03		500	Y-Line03	600	

表 4.9 内部空洞の条件と入力点の座標値

Case_No	Void size (mm)			Void position (mm)			Input point (mm)		
	x	y	z	X	Y	Z	X	Y	Z
Case_1-1	No-void (Sound wave)						100 350 600	300	0
Case_1-2	40			600	300	100 200 300 400 500			
Case_1-3	60								
Case_1-4	80								
Case_1-5	100								
Case_2-1	No-void (Sound wave)						600	100 300 500	0
Case_2-2	100			600	300	100 200 300 400 500			
Case_2-3	100								
Case_2-4	40								
Case_2-5	60								
Case_2-6	80								
Case_2-7	100								



(a) X-Y 平面図



(b) Y-Z 平面図

図 4.23 測定条件の概略図

4.4.4 数値シミュレーションの条件と計算波形の処理

本数値実験で設定したシミュレーションの計算条件を表 4.10 に示す。入力周波数は 6.00kHz の一波長分の正弦波信号とし、X-Y 平面から Z 方向に入力を行った。サンプリング周波数は 1.00MHz、計算回数は 10,000step とした、測定時間に換算すると 10.0ms である。なお、計算波形には、高周波成分を除去するために 40.0kHz を上限とした LPF 処理を施した。表 4.11 は、コンクリートモデルの各パラメータである。モデル内部を伝搬する縦弾性波速度 V_p および横波の伝搬速度 V_s は、設定した材料定数から式 (4.25)、式 (4.26) によって算出した。減衰係数 η は二次元モデルと同じく 0.03 とした。また、計算波形についても同様に伝搬時間 t とサンプリング時間間隔 Δt から伝搬に必要なデータ数 N_t を式 (4.32) によって算出し、元のデータ数の N_t 番目のデータ番号を立ち上がり時刻として補正した。図 4.24 は、コンクリートモデル内を伝搬する弾性波の計算波形の一例である。

表 4.10 計算パラメータ

入力周波数 : F_{inp}	6.00 kHz
サンプリング周波数 : F_s	1.00 MHz
空間離散間隔 : Δd	10.0mm
サンプリング時間間隔 : Δt	1.00 μ s
計算 step 数	10,000step

表 4.11 コンクリートモデルのパラメータ

密度 : ρ	2,000 kg/m ³
ラメ定数 : λ	8.00 GPa
ラメ定数 : μ	12.0 GPa
縦弾性波速度 : V_p	4,000 m/s
横波の速度 : V_s	2,450 m/s
減衰係数 : η	0.03

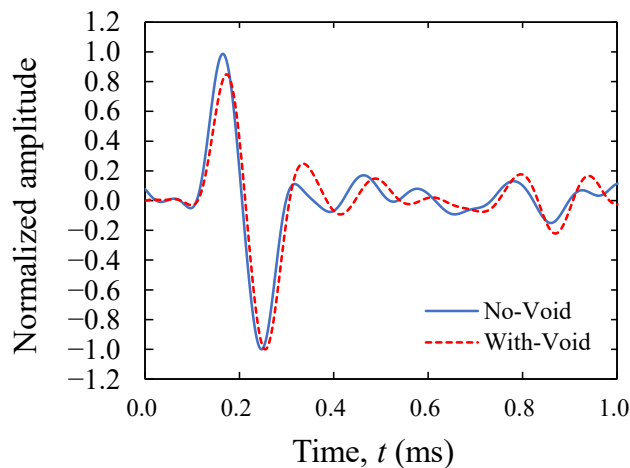


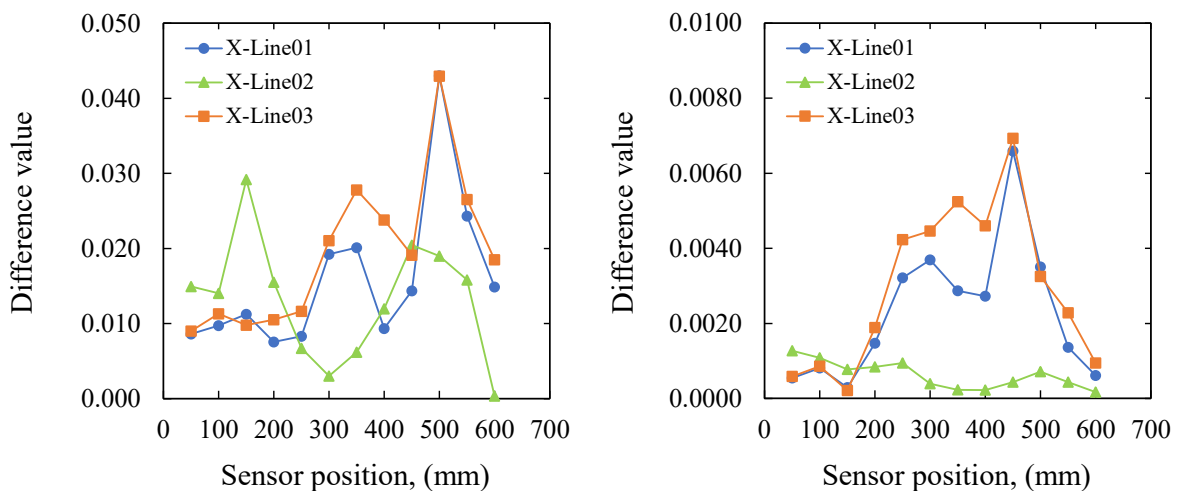
図 4.24 補正後の計算波形の一例 : Case_2-5

4.4.5 数値実験の結果

① 内部空洞の平面位置と差分値

本検討では、差分値の算出に用いる算出データ数 N は、補正した立ち上がり時刻から $N=1,000$ 個とした。二次元モデルにおいて、差分値を用いた内部空洞の平面位置の評価では、空洞近傍で差分値が増加することが確認されており、差分値が最大値を示す受信センサと空洞位置が概ね一致した。図 4.25 (a), (b) に、入力点を $X=600\text{mm}$ とした場合に得られた差分値の分布を X-Line 別に示す。図 4.25 (a) は空洞深さが 100mm 、図 4.25 (b) は 400mm である。両図の横軸は、受信センサの X 座標の位置、縦軸は差分値、凡例は X-Line を示している。両図の結果から、内部空洞の中心線状と異なる測定ラインにおいて、空洞近傍の X 座標上で差分値が増加している。この結果から、内部空洞の影響によって変化した弾性波が、空洞近傍の広い範囲に影響することがわかった。したがって、三次元モデルにおいては、差分値の影響領域について留意して内部空洞の位置を評価する必要がある。一方、測線上の差分値の分布傾向から簡易的に空洞が存在する方向を評価できる可能性が示された。

図 4.26 (a), (b) は、Case_1-5(Void size= 100mm)の条件において、X-Line02 の受信センサで得られた入力点別の差分値の結果を空洞の深さ位置別に示している。凡例は入力点（凡例の入力点は、IP(Input point)と表記）の X 座標値である。図 4.26 (a) では、いずれの測線上の結果も空洞近傍で差分値が増加した。しかし、IP : $X=600\text{mm}$ では、受信センサ 150mm で差分値が最大となり、空洞直上の受信センサ 600mm で差分値が最小となった。三次元モデルの計算波形は二次元モデルと比較して、減衰の影響が大きく作用していることが図 4.24 の計算波形から確認できる。この結果、減衰の影響を受けにくい入力信号の成分が、算出データ数内の時間領域に対して影響が大きくなる。このため、入力点上の計算波形は、入力信号が計算波形の振幅と時間領域の大部分を占めることから、差分値が最小になったものだと考え



(a) Depth=100mm

(b) Depth=400mm

図 4.25 X-Line 別における差分値の分布 (空洞の深さ位置別)

られる。さらに、空洞近傍に入力点がある場合、入力直後から空洞の影響を受けた弾性波が同心円状に広がりながら伝搬する。この結果、空洞近傍以外の受信センサで差分値が大きく増加することが懸念される。また、その分布変化は、空洞のサイズと深さ位置によって変化することが二次元モデルの数値実験によって確認している。これらの要因から、本検討の数値計算の条件については、受信センサ 150mm の位置で最大になったものと推察される。逆に、空洞と離れた左側を入力点とした場合は、健全部から非健全部に弾性波が進むため、差分値は空洞近傍で大きく増加した。この結果は、図 4.26(b)において同様の傾向を示している。また、空洞の深さ位置の深くなることによって、差分値の大きさが全体的に 1/10 ほど減少した。これらの結果から、単一空洞を設けた三次元モデルでは、入力点が空洞と離れた条件で、空洞近傍の受信センサの差分値から空洞の平面位置を評価できる可能性と差分値の大きさから空洞深さ位置を評価できる可能性が示された。

他方で、複数の入力点における差分値の分布と増加傾向は、二次元モデルと同様に空洞近傍で増加している。このため、差分値の増加傾向を用いて簡易的に空洞位置を評価できる可能性がある。そこで、同じ X 軸上の座標値で得られた受信センサ毎の差分値を累加し、相対的な差分値の増加傾向から内部空洞位置の評価を試みた。差分値の累加方法は式(4.33)と同じであり、 $D_s = \sum_{j=1}^M D_{Xj}$ から算出した。 D_s は、同じ X 座標の受信センサにおける差分値を累加した差分値、 D_{Xj} は各受信センサで算出した差分値、 M は累加する受信センサの数である。X-Line は 3 測線あることから、同じ X 座標位置に設置した受信センサは 3 点である。つまり、3 測点分の差分値の和となる。

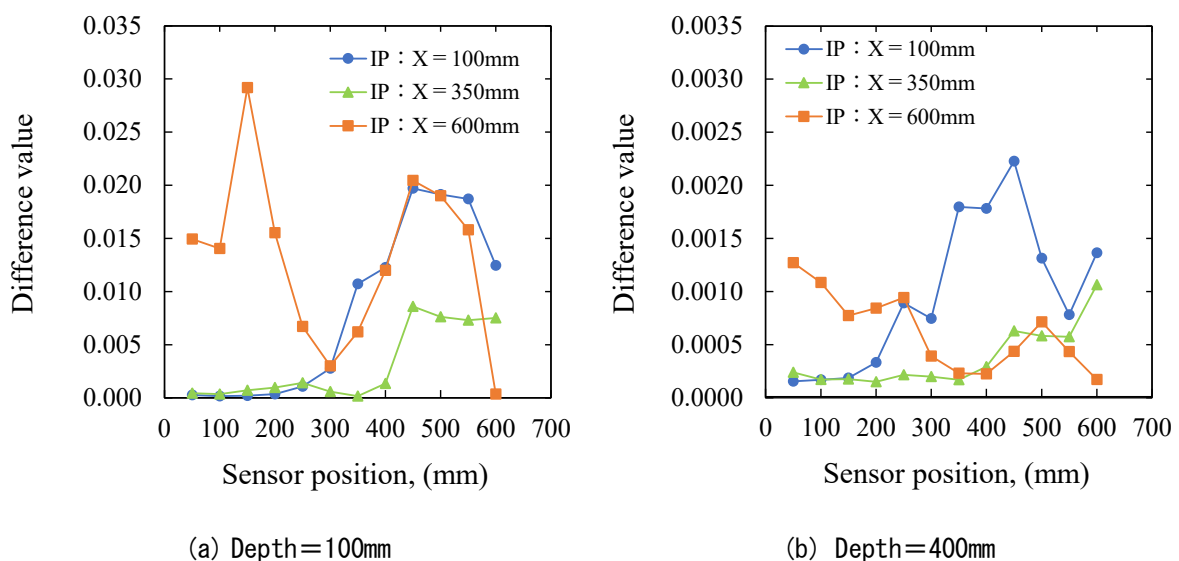


図 4.26 X-Line02 における入力点別の差分値の分布 (Y 座標=300mm)

図 4.27 は、図 4.26 (a) に対して差分値を累加した結果を示したものであり、この差分値の分布から最大差分値を抽出し、内部空洞の概ねの位置を検出する。図 4.28 (a) は、比較対象として、空洞深さ別に X-Line02 の差分値から個別に抽出した最大差分値の位置、図 4.28 (b) は、累加後の最大差分値の位置を示した図である。図の横軸は、X 軸上の受信センサの位置、縦軸は空洞の深さ、凡例は入力点の X 座標の位置である。図 4.28 (a) では、IP: X=600mm の場合、最大差分値から空洞位置を評価することは容易ではない。一方、図 4.28 (b) の累加した結果では、最大差分値と空洞の位置が概ね一致していることから、内部空洞の存在する方向を定めることが容易となった。この結果、簡易的ではあるものの、累加差分値を用いることで、空洞位置を容易に評価できる可能性が示された。

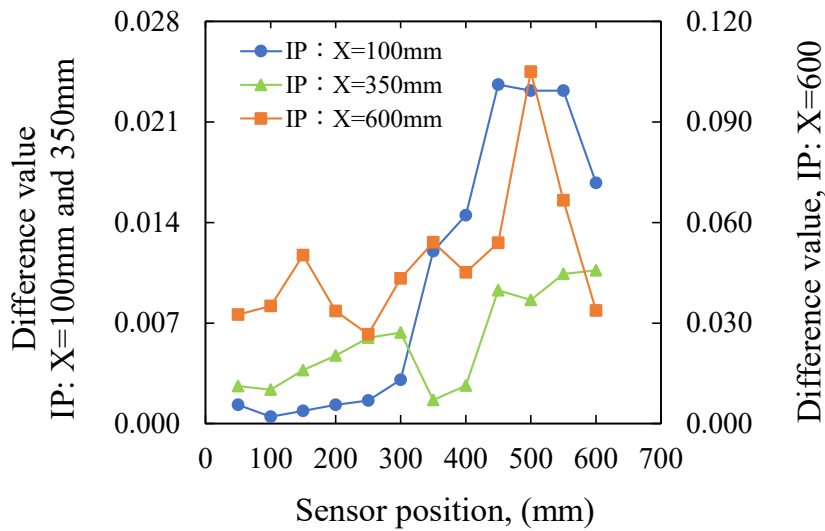
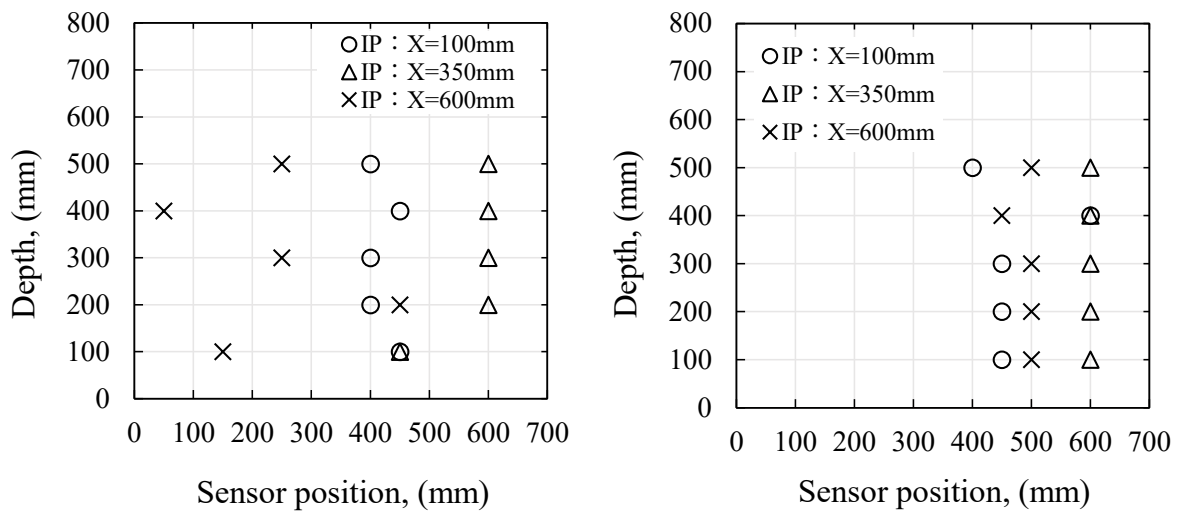


図 4.27 累加後の差分値の分布図；空洞サイズ=100mm, Depth=100mm



(a) 入力点別の最大差分値 (X-Line02)

(b) 累加した最大差分値

図 4.28 差分値が最大値を示した受信センサの座標値

図 4.29 (a), (b) は, Y-Line03 において入力点別に得られた差分値の分布を空洞位置別に示す. 図の凡例は, Y 軸上における入力点の座標値である. X 軸の差分値の分布結果と同様に, 空洞直上を入力点とした条件においては差分値が減少した. 図 4.29 (b) は, 空洞位置が Y=300mm に対して, 入力点が左右対称であることから, 差分値の分布が概ね対称となった. また, 入力点上の差分値については X-Line と同様に低下した. 図 4.30 (a), (b) は, これらの差分値の分布から最大となった差分値の受信センサの座標値を空洞の深さ位置別に抽出した結果である. 空洞直上を入力点とした場合, 最大差分値を示した受信センサと空洞位置に差異が生じている. その他の入力点については, 概ね空洞近傍の受信センサで最大差分値が示された.

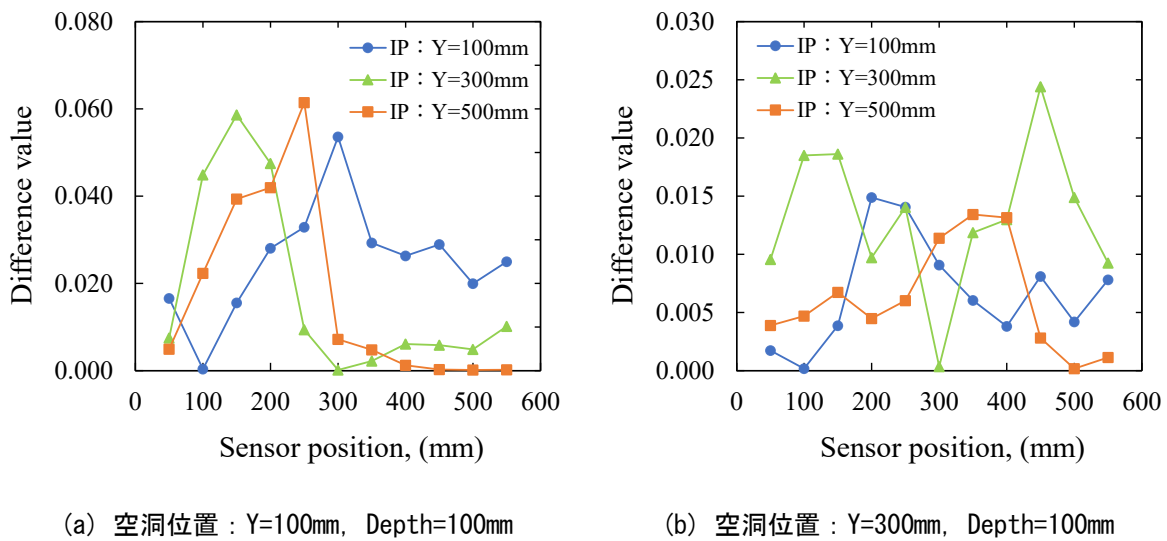


図 4.29 Y-Line03 における入力点別の差分値

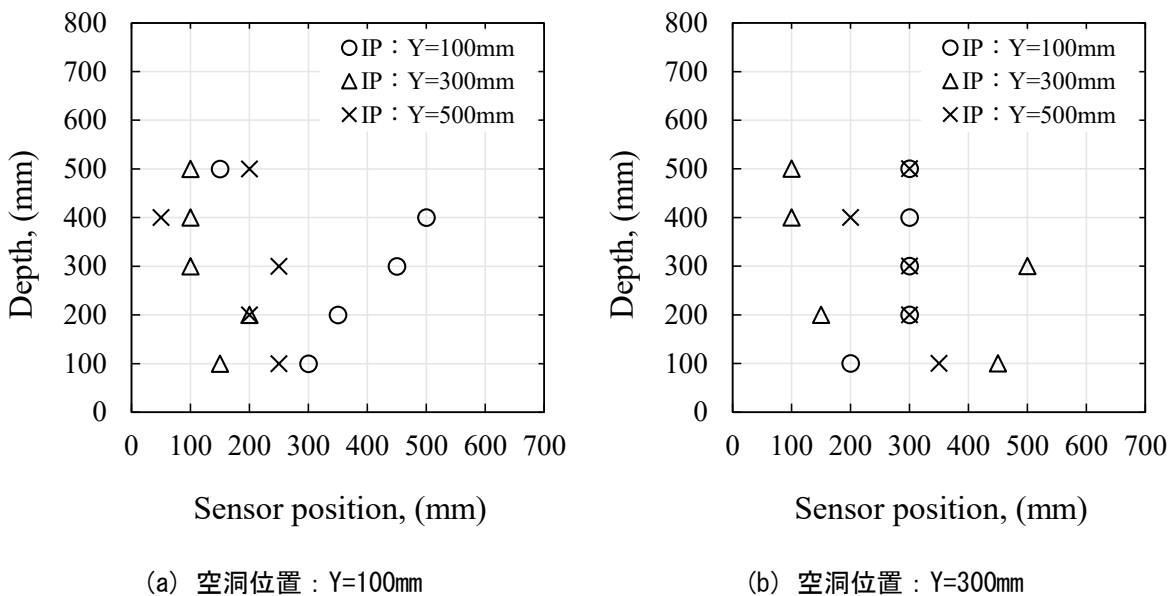
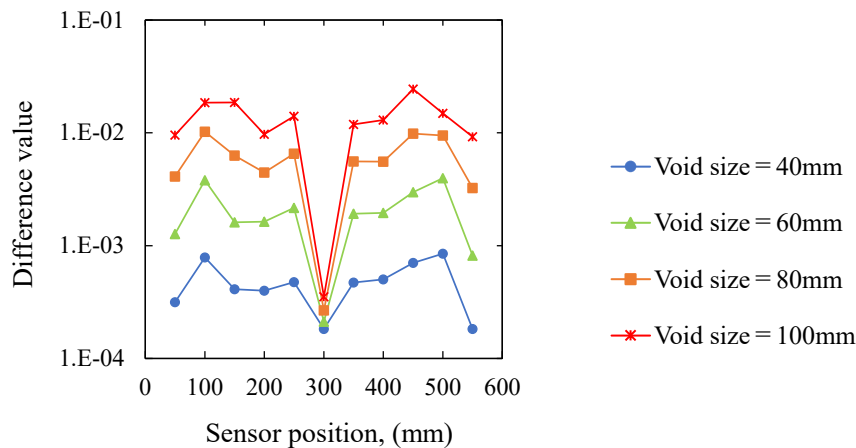


図 4.30 Y-Line03 における入力点別の最大差分値 : 内部空洞の位置別

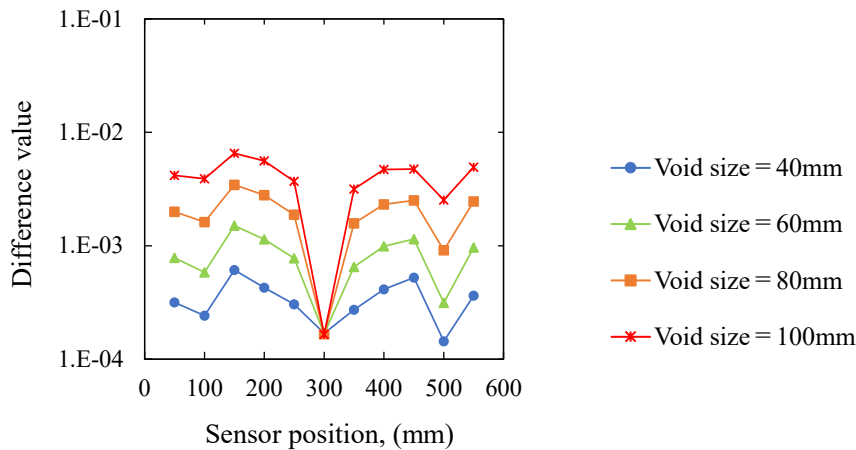
以上の結果から、三次元モデルを用いた数値実験上における内部空洞の位置評価は、複数の入力点から得られる差分値の分布傾向から評価することが望ましい。特に、空洞直上以外の入力点の差分値の分布から評価することが容易であることがわかった。また、内部空洞の深さ位置が深くなることで差分値は減少した。このため、差分値の大きさから空洞の深さを評価できる可能性が示された。

② 内部空洞のサイズと差分値

図 4.31 (a), (b) は、Y-Line03 において、空洞の深さ位置を固定し空洞サイズを変化させた場合の差分値の分布を示す。入力点は、 $X=600\text{mm}$, $Y=300\text{mm}$ 、図の凡例は内部空洞のサイズである。空洞サイズの変化に伴い、全ての受信センサで差分値の増減が確認できる。差分値はいずれの結果においても、空洞サイズ 100mm で最大となり、空洞サイズ 40.0mm で最小となった。このため、三次元モデルにおいても内部空洞のサイズは、差分値の大きさに影響し、その大きさから内部空洞のサイズを評価可能であることが示唆された。一方、空洞サイズの変化に伴う差分値の分布変化は大きくない。



(a) Depth=100mm



(b) Depth=200mm

図 4.31 内部空洞のサイズ変化による差分値 ; Y-Line03

図 4.32 は、図 4.31 と同じ測定条件で空洞サイズを 100mm に固定した場合に、空洞の深さ位置を変化させた差分値の分布である。図の凡例は、内部空洞の深さを示している。深さの増加によって、差分値が減少し、分布が変化することが確認できる。この結果、空洞深さ位置の変化は、差分値の分布に影響を与え、分布傾向と差分値の大きさから、空洞深さ位置を評価できる可能性が示された。図 4.33 (a), (b) は、入力点が X=600mm, Y=300mm の座標値で Y-Line03 において算出した全ての受信センサの差分値を累加した差分和を空洞サイズと空洞深さについてまとめたものである。空洞サイズが大きく、空洞の深さ位置が浅くなることで差分値が大きくなることを確認できる。また、その増加傾向は、空洞サイズが大きく浅い場合に急激に増加し、小さく深い場合には緩やかに増加している。この結果、差分値の大小関係から空洞サイズと深さ位置を簡易的に絞り評価できる可能性がある。

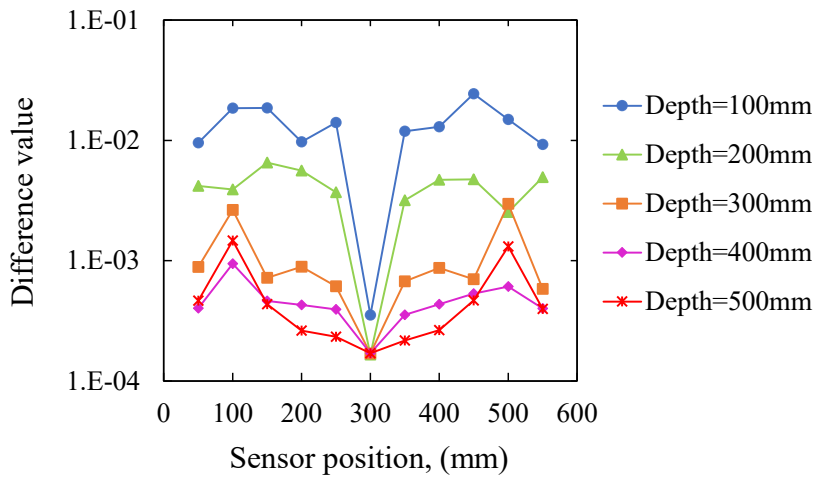
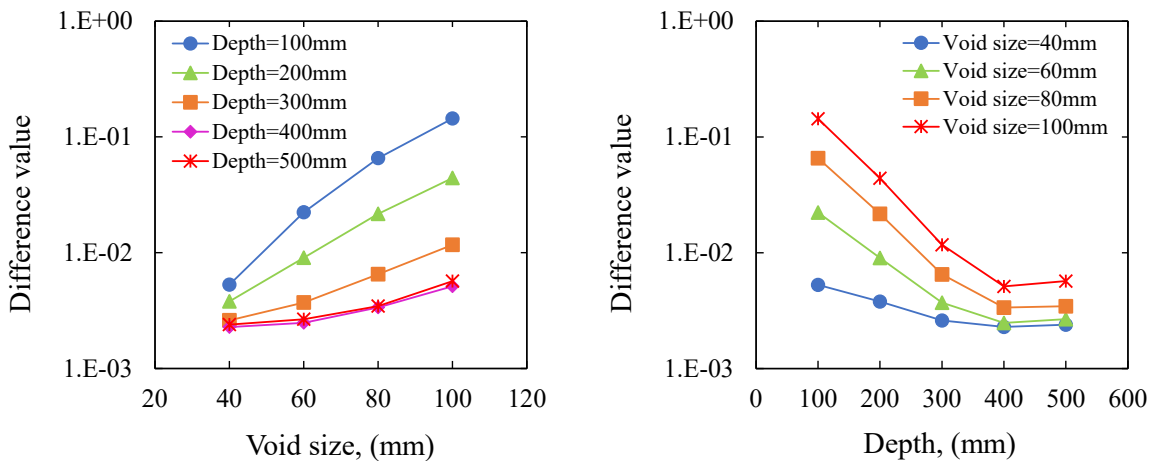


図 4.32 Case_6 におけるシミュレーションケース別の差分値 : N=1000



(a) 空洞サイズと差分値

(b) 空洞深さと差分値

図 4.33 内部空洞のサイズと深さ位置の変化による差分値の増減傾向

4.4.6 三次元モデルを用いた数値実験のまとめ

本検討では、従来の卓越周波数を指標とした内部欠陥評価手法の対象外である、矩形断面を有する三次元モデルを用いて、差分値を指標とした内部欠陥評価手法の有用性と欠陥が差分値に及ぼす影響を数値実験によって確認した。その結果を以下にまとめる。

- 空洞直上を入力点とした場合、内部空洞の影響を受けた弾性波が広範囲に伝搬した結果、空洞と離れた受信センサで差分値が増加した。算出データ数の設定および、入力点と出力点の設定に留意する必要があることがわかった。
- 空洞直上を入力点とした場合、得られる差分値は空洞から離れた受信センサで最大となった。一方、入力点が空洞から離れた場合、差分値は空洞近傍で最大となった。この結果、三次元モデル内の内部空洞の位置を評価する場合は、空洞から離れた入力点によって得られた差分値の分布傾向から、空洞の平面位置を評価できる可能性があることを確認した。
- 差分値は三次元の場合においても、空洞のサイズや空洞の深さ位置の条件変化によって変化し、空洞サイズが大きく空洞深さ位置が浅い場合に最大となり、空洞サイズが小さく深いときに最小となった。この結果、差分値の大きさから、内部空洞のサイズと深さを簡易的に絞ることが可能であることがわかった。
- 空洞のサイズ変化は、差分値の分布に対する影響は小さい。一方、空洞の深さ位置の変化は、空洞のサイズ変化と比較して差分値の分布に大きく影響した。この結果から、差分値の分布傾向から空洞の深さ位置を評価できる可能性が示された。

第4章の参考文献

- [4.1] 岩野聡史, 極檀邦夫: 周波数応答解析によるコンクリート構造物の健全性試験, 土木学会全国大会第53回年次学術講演会概要集, Vol.53, V-21, pp.850-851, 1998.
- [4.2] 尾場瀬宏美, 極檀邦夫, 境友昭, 池端秀幸: 動的FEM解析によるコンクリート内部欠陥探査のメカニズムに関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.27, No.1, pp.1717-1722, 2005.
- [4.3] 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コンクリートの未充填グラウト部検出の改良, 土木学会論文集 E2(材料・コンクリート構造), Vol.65, No.2, pp.208-215, 2009.
- [4.4] 山下健太郎, 境友昭, 極檀邦夫: 衝撃弾性波法による複数の反射経路を考慮した内部欠陥探査手法の基礎的検討, 日本非破壊検査協会秋季講演大会講演概要集, pp.171-174, 2011.
- [4.5] Kentaro, Y.; Tomoaki, S.; Kunio, G. "Detection of internal defects of concrete structures by analyzing wave speed scattering", *S F&R Proceedings* 2012.
- [4.6] 内田慎哉, 久保元樹, 岩野聡史, 山下健太郎: 衝撃弾性波法によるコンクリートの内部欠陥の検出に関する理論的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.38, No.1, pp.2121-2126, 2016.
- [4.7] 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(材料・コンクリート構造), Vol.73, No.2, pp.239-250, 2017.
- [4.8] 大石進一, 荻田武史: 数値シミュレーションを支える精度保証技術, 情報処理学会誌, Vol.48, No.10, pp.1103-1110, 2007.
- [4.9] 長沼一洋: 数値解析技術と建設分野への応用, 大林組技術研究所報(73), pp.1-11 2009.
- [4.10] 山崎憲, 大石進一, 小山田耕二: シミュレーション技術とその未来展望, 横幹, Vol.2, No.2, pp.77-82, 2008.
- [4.11] 池端宏太, 小林義和, 小田憲一: 応答波形による内部欠陥探査に関する基礎検討, 日本非破壊検査協会秋季講演大会講演概要集, pp.29-32, 2018.
- [4.12] 池端宏太, 小林義和, 小田憲一: 時系列応答波形を用いたコンクリート構造物の内部空洞の評価, 土木学会全国大会第70回年次学術講演会概要集, Vol.70, V-540, 2019.
- [4.13] 池端宏太, 小林義和, 小田憲一, 中村勝哉: 時系列応答波形を用いた矩形断面構造物の内部欠陥探査, 日本材料学会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.20, pp.377-382, 2020.
- [4.14] 藤岡豊太, 永田仁史, 安倍正人: インパルスハンマを用いた非破壊診断のための時間領域差分法によるケーソンの衝撃弾性波解析, 日本音響学会学会誌, Vol.71, No.2, pp.53-64, 2015.
- [4.15] 藤岡豊太, 永田仁史, 安倍正人: 衝撃弾性波法によるPCシース内空隙の非破壊診断に関

- する実験と数値解析による検討, 日本非破壊検査協会学会誌, Vol.66, No.9, pp.443-450, 2017.
- [4.16] K.S Yee, “Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell’s equations in isotropic media”, *IEEE Trans. Antennas Propag.*, AP-14, pp.302-307, 1966.
- [4.17] 佐藤雅弘；FDTD 法による弾性波振動・波動の解析入門, 森北出版, 東京, 2003.
- [4.18] M. Sato, Y. Takahata, M. Tahara and I. Sakagami, “Expression of contour vibration modes of a square plate by scalar and vector velocity potentials”, *Acoust. Sci. & Tech.*, Vol.23, pp.346-349, 2002.

第5章 コンクリート試験体を用いた実験的検討

5.1 概説

本章では提案手法である DVA の実用的な測定および評価結果の検証を目的とした実験的検討として、コンクリート試験体を用いた実験結果を報告する。実験は、以下に示す順序で3種類の試験体を用いて実施した。

- I. 基礎的な検討として、JIS で規格化され製品として利用されている、既製品の土止め板を用いた実験を行った。同じ品質と形状の試験体を容易に入手できるため、製品の品質における測定波形のばらつきについて確認した。さらに、同一試験体を複数使用することで、欠陥の大きさや位置等を変化させ、欠陥と差分値の関係を実験的に検討した[5.1][5.2].
- II. DVA の実用的な検査能力を従来手法と比較し確認することを目的として、従来の周波数を評価指標とした多重反射法によって評価可能とされている、未充填シースを埋設した板状構造体を用いた実験を行った。実務的にニーズのあるプレストレスコンクリート橋等に埋設されているシース管内のグラウト充填不足を模擬した試験体を評価することで DVA の実用性と検査能力を検証し、従来の卓越周波数を用いた評価結果と比較することによって、DVA の優位性を明らかにした[5.3].
- III. 最後は、従来の周波数を用いた内部欠陥評価手法で困難とされている、矩形断面を有するコンクリート試験体を用いた実験的検討を行った。DVA の実用的な検討として、基本的な測定条件にくわえて、測定間隔の距離を広げた簡易検査方法の適用を試みた。それぞれの測定結果から差分値を算出し、内部欠陥の評価を行った。矩形断面における内部欠陥評価結果から、DVA の実用性と優位性が示された。

5.2 既製品土止め板を用いた実験

5.2.1 概説

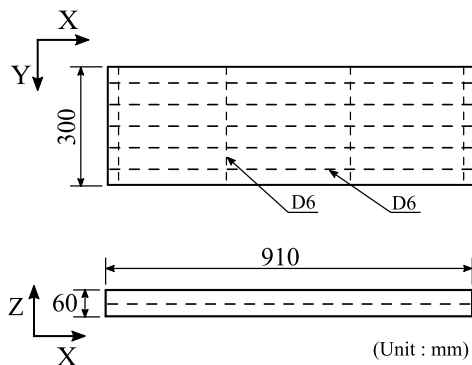
近年では、工事作業の効率化や工期短縮の観点から、プレキャスト製品を活用が進められており、これらを用いた工事件数が増加している[5.4]。これらプレキャスト製品等のコンクリート二次製品（以下、製品という）は、現場施工に比べて施工環境に左右されず品質管理が容易で、安定した製品の提供が可能である。さらに、JISで認証されている製品は、出荷前の性能試験や出荷時の受渡試験などの品質管理方法がJIS規格によって定められており、製品の性能や品質を保証する取り組みが行われている[5.5]。しかしながら、これらの規格は、出荷以前の工場内の品質管理について定められているもので、出荷後、つまり竣工後の検査方法については明記されていない。したがって、施工後の管理は実質的に管理者が行うことになる。DVAは健全時の応答波形に基づいた差分値によって構造物の欠陥評価を行うため、健全時応答波形の取得が容易である製品の検査手法として適している。同時に、製品の出荷前の検査についても適用が可能である。また、同一の製品を用いた構造物の施工後の検査手法としても適用できるため、コンクリート製品を対象とした場合、DVAの実用性は高くなる。

5.2.2 試験体の概要

本実験に使用した試験体は、JISで規格化されている鉄筋コンクリート組立土止め板1種である。図5.1に試験体の概略図、表5.1に試験体の配合条件を示す。長さ： $X=910\text{mm}$ 、高さ： $Y=300\text{mm}$ 、幅： $Z=60\text{mm}$ となっており、主鉄筋および配力筋はいずれも異形鉄筋D6が使用されている。

表 5.1 試験体の配合条件

設計基準強度: σ_{ck}	30.0 (N/mm ²)	スランプ	15.0±2.5 (cm)
標準偏差: σ	2.00 (N/mm ²)	水セメント比	48.0 (%)
配合強度: σ_c	36.0 (N/mm ²)	細骨材率	43.0 (%)



(a) 概略図



(b) 試験体の写真

図 5.1 鉄筋コンクリート組立土止め JIS 型の概略図

5.2.3 実験の概要

表 5.2 に測定条件を示す。試験体の入力面に対する厚さは 300mm、板の固有周波数に換算すると約 6.7kHz である。固有周波数を参考に、入力に用いる鋼球の直径を 16.0mm とした。この鋼球の入力周波数は鋼球の接触時間から 14.5kHz である。受信センサは高感度加速度センサ(352C66-PCB : 100mV/G)を使用した。測定器の設定として、測定時間は 2.00ms、サンプリング時間間隔は 0.50 μ s とした。測定時間とサンプリング時間間隔の関係から、測定データ数は 4000 個となる。なお、測定器固有の記録条件として、プリトリガとして測定データ数の 10%が利用されるため、実質的な弾性波の応答は 3600 個分の時系列の離散データである。

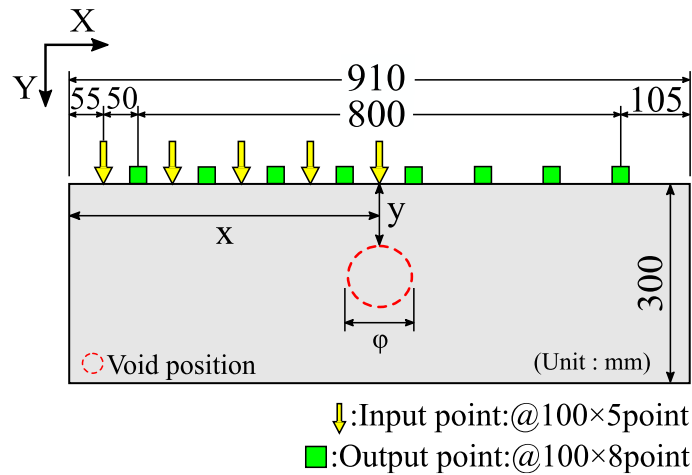
表 5.2 測定条件

Diameter of steel ball	d_s	16.0mm
Contact time	T_C	0.069ms
Input frequency	F_{INP}	14.5kHz
Measurement time	t	2.00ms
Sampling interval	Δt	0.50 μ s

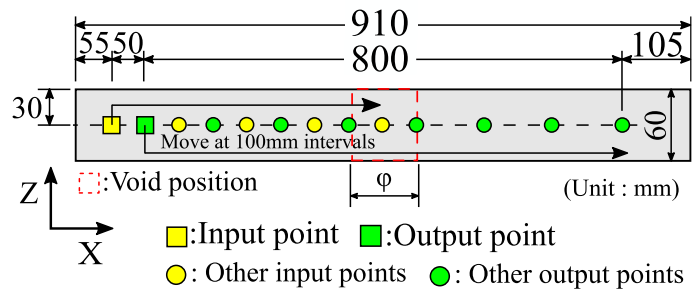
図 5.2(a), (b) に入力点と出力点(受信センサ)の位置図, 表 5.3 には, その座標値を示す。図 5.2(a) は便宜的に全ての入力点と出力点を示しているが, 実際の測定は図 5.2(b) に示すように入力点毎に実施した。測定は, 図 5.2(b) のように左端部を入力点とした場合(Case_1), 1 点の出力点の測定が完了すると, 出力点が 100mm 間隔で X 軸方向へ移動させた。ひとつの入力点に対して全ての出力点の測定が完了すると, 次いで入力点が移動し, 出力点は再び左端に戻り同様の測定手順を再度行った。測定回数は差分値の算出フロー図(3 章を参照)に従い, 同一測定点で 5 回測定を行い, 全ての測定波形に正規化を施した。

表 5.3 入力点と出力点の座標位置

Case_No	Input points (mm)			Output points (mm)		
	X	Y	Z	X	Y	Z
Case_1	55	0	30	105~805 @100 × 8ch	0	30
Case_2	155	0	30			
Case_3	255	0	30			
Case_4	355	0	30			
Case_5	455	0	30			



(a) X-Y 平面図



(b) X-Z 平面図

図 5.2 入力点と出力点の位置図

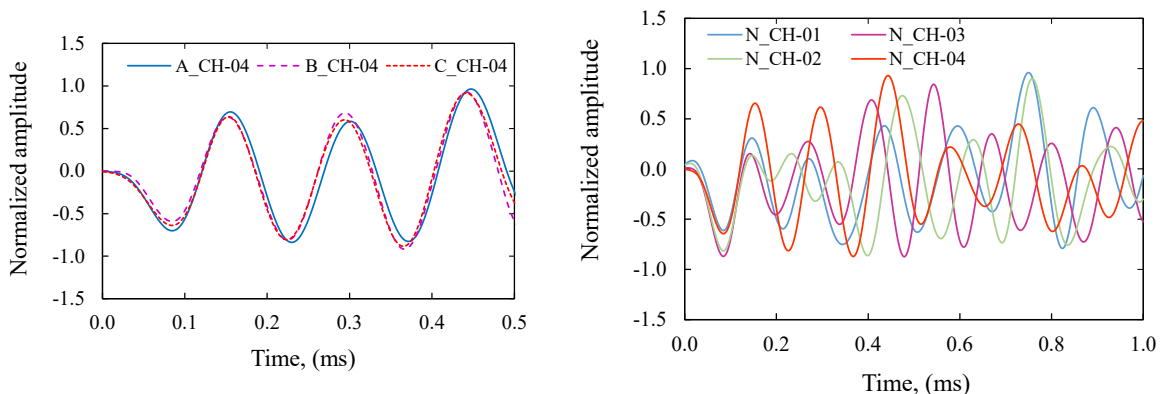
本実験では、同じ製品の試験体を 3 枚用いて、異なる条件の内部欠陥を模擬した空洞を表 5.4 の条件で設けた。空洞はコア削孔機を用いて設置を行った。そのため、空洞の形状は円形となっている。したがって、図 5.2 の「φ」は円の直径を示している。3 枚の試験体に、表の条件で空洞を削孔するが、空洞の中心位置や入力面（板上面：Y=0mm）と空洞始端の距離は変化しないように、空洞の直径を段階的に増加させた。空洞を増加させる度に同様の測定と正規化を行い、これらを非健全時応答波形とした。差分値の評価基準となる健全時応答波形は、試験体の品質によるばらつきを考慮することを目的として、空洞設置前の 3 枚の試験体を用いて表 5.3 の条件で測定した同一測点の測定波形である 15 回分（3 枚×5 回）の測定波形を用いて単純平均した波形を生成し、これを各出力点における健全時応答波形とした。

表 5.4 試験体別の内部空洞の条件

Specimen	Void size: φ	Void position	
	(mm)	x(mm)	y(mm)
A	56, 81, 106	455	50
B	21, 56, 81, 106	455	100
C	21, 56, 81, 106	455	150

5.2.4 測定波形の比較

図 5.3(a) は、入力点が 455mm、出力点が 405mm において、空洞設置前の各試験体の波形を比較した一例である。図の横軸は時間、縦軸は正規化した振幅、凡例は試験体を示す。同一測点の測定波形は概ね同じ形状を示していることから、製品の違いによる品質のばらつきは大きくないと考えられる。図 5.3(b) は、入力点が 455mm における 1ch~4ch の正規化後の健全時応答波形を示す。凡例は、出力点の番号である。波形の下向きピークの時間が一致していることから、時刻補正に問題は生じていないことが確認できる。また、入力点と出力点の距離（以下、測定間隔という）の違いによって波形の形状に違いが確認できる。図 5.4(a)~(d) は、正規化した健全時応答波形について、同一測定間隔別に比較したものである。凡例は対応する受信点の番号である。入力点が 455mm では左右の出力点の位置関係が、1ch=8ch、2ch=7ch...と対称となっている。図の波形は、全ての測定点で健全時応答波形が左右対称となっていることが確認できる。つまり、測定および波形の正規化が適切に行われたと判断が可能である。図 5.5 は、健全時応答波形と非健全時応答波形を比較したものである。凡例は空洞深さの位置を示しており、空洞サイズは全て $\phi=106\text{mm}$ である。健全時応答波形を基準として非健全時応答波形と比較すると、測定波形の時系列に変化が生じている。また、空洞深さ位置の違いによっても同様に時系列変化が生じている。これら波形の時系列変化量を差分値の算出式から求め、差分値の大きさと分布から内部欠陥を模擬した空洞の評価を行った。



(a) 各試験体における同一点の測定波形

(b) 生成した 1ch~4ch の健全時応答波形

図 5.3 空洞設置前の健全時応答波形の比較

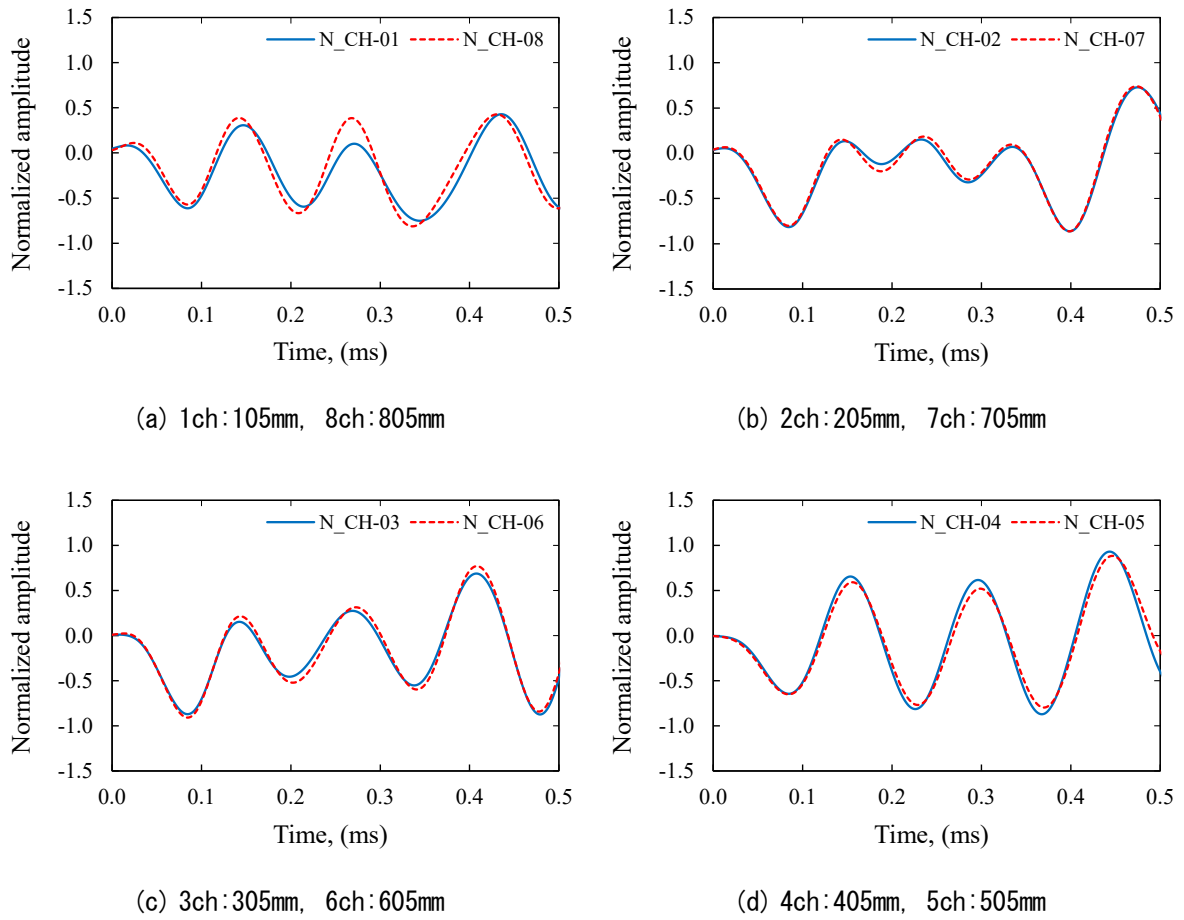


図 5.4 平均化した健全時応答波形

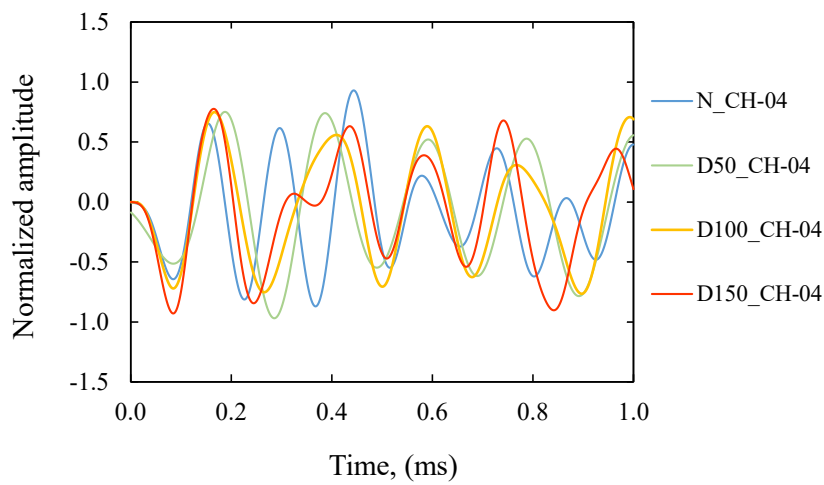


図 5.5 空洞の深さ位置別の健全時と非健全時の応答波形の比較例, 空洞サイズ $\phi=106\text{mm}$

5.2.5 実験結果

① 周波数を用いた空洞評価

図 5.6 は, 入力点を空洞直上の 455mm, 出力点を 405mm の場合に得られた測定波形を FFT によって周波数変換した結果である. 図の横軸は周波数, 縦軸はスペクトル強度, 凡例は空洞サイズを示す. 空洞の深さ位置は全て入力面から 100mm である. また, 表 5.5 には試験体の理論上の固有周波数と図の周波数スペクトルの卓越周波数の一覧を示す. 空洞が存在しない健全時(No-Void)試験体の卓越周波数は固有周波数と概ね一致している. 一方, 空洞サイズ 56.0mm 以降の卓越周波数は低周波数へ遷移している. この結果, 厚さの固有周波数と比較して大きく変化していることから空洞の有無を評価できる. また, 図 5.7(a), (b) は入力点別における周波数スペクトルであり, 出力点の位置は入力点から+50.0mm の位置である. 図 5.7(a) では入力点が 355mm の場合, 卓越周波数が健全時と同等の周波数となった. したがって, 健全時と非健全時の境界を判断可能である. 一方図 5.7(b) では, いずれの入力点においても卓越周波数の明確な変化は確認できない. また, この場合の卓越周波数は健全時状態と変わらない値を示しており, 比較的小さい空洞を卓越周波数から評価することは難しいことが図から理解できる.

表 5.5 空洞条件別の卓越周波数と試験体の厚さに基づいた固有周波数

空洞サイズ 直径 : φ (mm)	卓越周波数 F_{MAX} (kHz)	固有周波数 F_P (kHz)
No-void	7.18	7.00*
21.0	7.16	
56.0	5.89	
81.0	5.33	
106	4.83	

*縦弾性波速度 4200m/s で算出

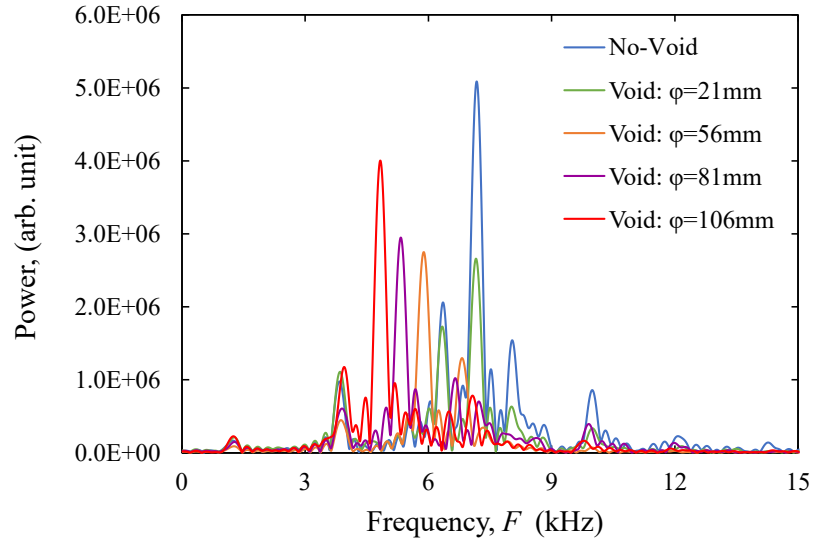
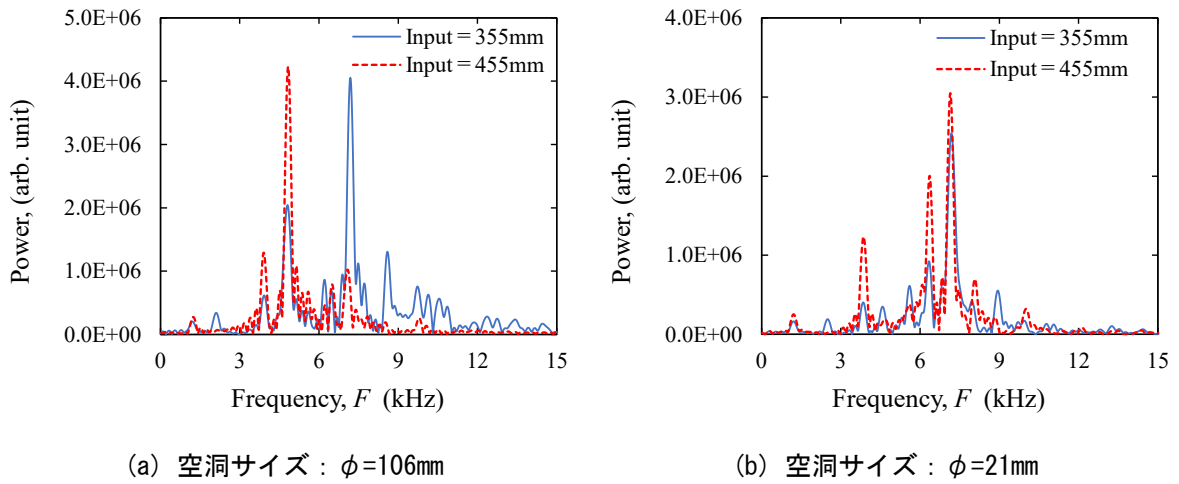


図 5.6 空洞サイズ別の FFT の結果：入力点 455mm，出力点 405mm，空洞深さ位置 100mm



(a) 空洞サイズ： $\phi=106\text{mm}$

(b) 空洞サイズ： $\phi=21\text{mm}$

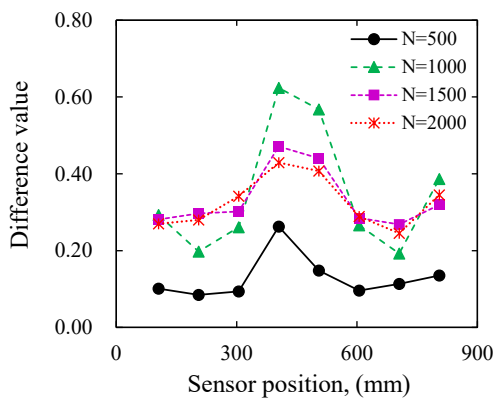
図 5.7 入力点別の FFT の結果（出力点の位置は入力点+50mm），空洞深さ位置=100mm

② 算出データ数別の差分値

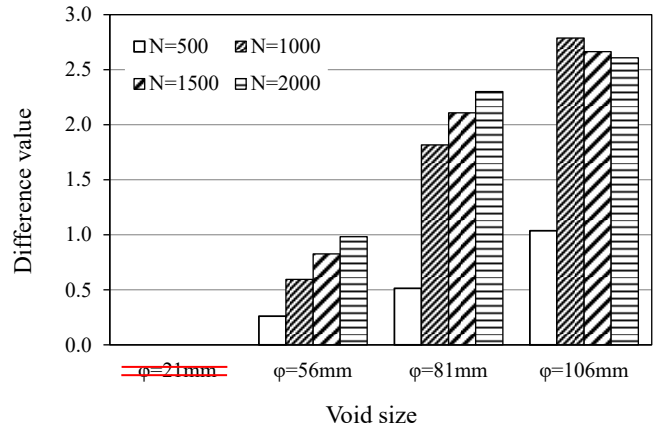
図 5.8(a),(b)～図 5.10(a),(b)は、Case_5：空洞サイズ $\varphi=106\text{mm}$ における算出データ数 N 別の DVA の結果である。各図(a)の横軸は出力点の位置、縦軸は差分値、凡例は差分値の算出データ数 N を示す。算出データ数の変化によって差分値の大きさと分布に変化が生じた。また、各図(b)は算出データ数別の差分値の和を示している。図の横軸は空洞サイズ、縦軸は差分値、凡例は算出データ数である。この差分値の和は、4章の $D_s = \sum_{j=1}^M D_j$ に従い算出した。ここで、 D_s は各出力点の差分を累加した差分値、 D_j は各出力点で算出した差分値、 M は累加する出力点の数である。したがって、 D_s は 8 点分の差分値の和である。いずれの結果においても、算出データ数の増加によって差分値が相対的に増加している。これは、4章の数値シミュレーションの結果と概ね一致している。しかし、算出データ数 $N=500$ においては、その他と比べて差分値の大きさが突出して離れている。これは、4章の結果と同じく、算出データ数が少なくなることによって、入力信号である鋼球の接触時間の影響が大きくなり、差分値が顕著に減少したものだと考えられる。

他方で、図 5.10 では、 $N=1500$ から差分値の分布が大きく異なっている。弾性波は同心円状に広がりながら伝搬するため、空洞位置が深い場合に、空洞によって生じた反射波が広範囲に伝搬することが予測される。加えて、空洞の形状が円形であることから、弾性波の反射角が垂直面の場合に比べて曲面の影響を受けることで影響範囲が大きくなる。さらに、試験体が比較的薄く小さいことから、三次元的な弾性波の伝搬と減衰の影響が制限され、板の端部では通常よりも反射を多く繰り返す。これらの要因から、空洞によって生じた反射波の影響が端部で大きくなったと考えられる。このため、空洞深さ位置が深く算出データ数が多い場合に、異なった分布傾向を示したものと推察される。言い換えれば、算出データ数を段階的に変更することで空洞深さ位置を評価できる可能性がある。一方、図 5.8、図 5.9 においては、 $N=1000$ 以降で、差分値の増減は多少あるものの比較的安定した分布を示している。このため、空洞の深さ位置が浅い場合は、差分値の分布と大小関係から空洞評価が容易である。

以上、実際の測定においても算出データ数の増減によって差分値は変化した。この結果は、4章の数値シミュレーションの結果と同じく、差分値の分布や大きさに影響を与えるため、今後も重ねて精査する必要がある。また、本実験の試験体においては、算出データ数 $N=1000$ 以降において、差分値に大きな増減は確認されず、空洞の深さ位置の違いによる特徴的な変動も生じていないことから、 $N=1000$ 程度が空洞の評価に適した算出データ数だと考えられる。そのため、以降の検討は算出データ数 $N=1000$ の結果を用いて検討を行った。

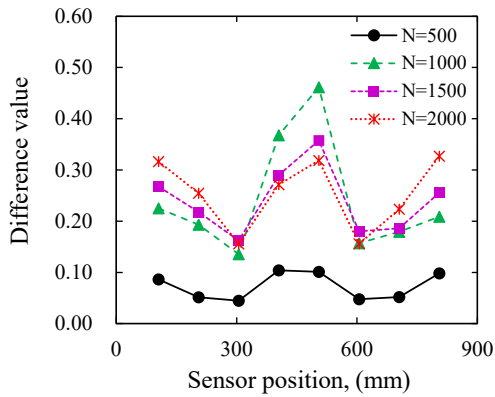


(a) 算出データ数別の差分値の分布

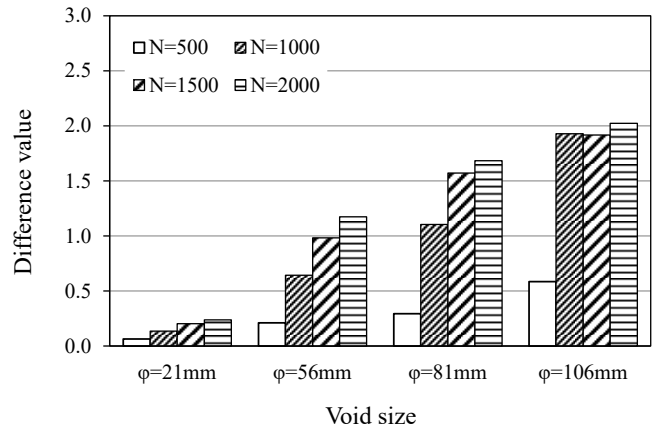


(b) 算出データ数別の差分値の和

図 5.8 DVA 結果 ; 空洞サイズ : $\phi=106\text{mm}$, 空洞深さ位置 : Depth=50mm

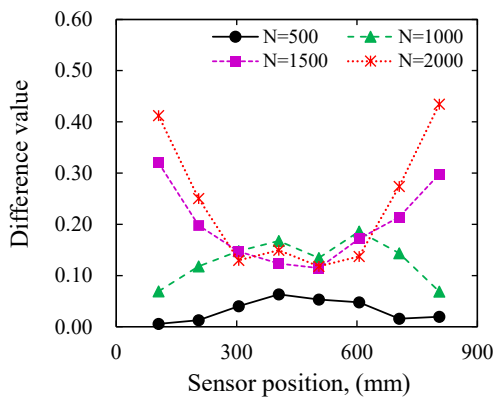


(a) 算出データ数別の差分値の分布

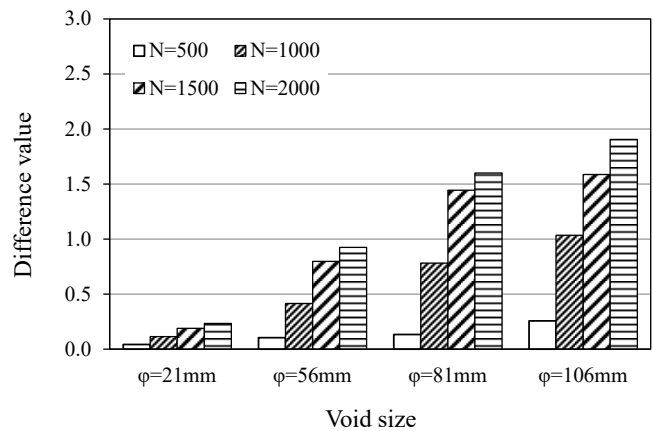


(b) 算出データ数別の差分値の和

図 5.9 DVA 結果 ; 空洞サイズ : $\phi=106\text{mm}$, 空洞深さ位置 : Depth=100mm



(a) 算出データ数別の差分値の分布

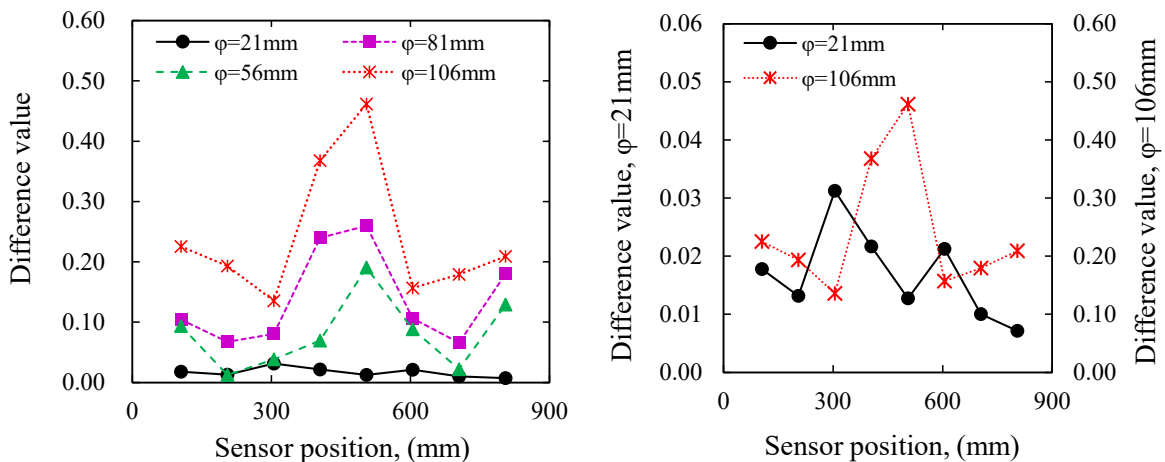


(b) 算出データ数別の差分値の和

図 5.10 DVA 結果 ; 空洞サイズ : $\phi=106\text{mm}$, 空洞深さ位置 : Depth=150mm

③ 空洞深さ位置および空洞サイズが差分値に与える影響

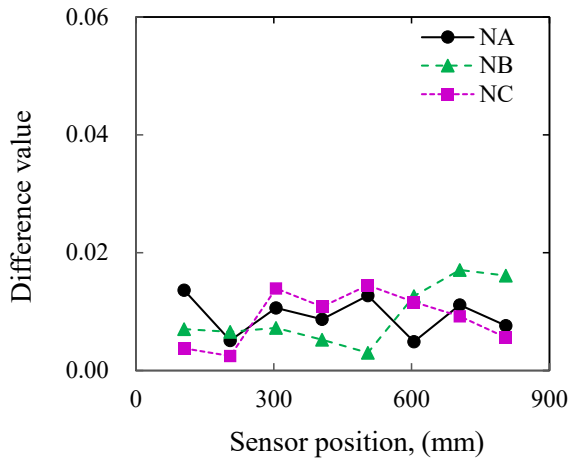
図 5.11 (a) は, Case_5(入力点 455mm), 空洞深さ位置=100mm における, 空洞サイズ別の DVA の解析結果を示す. 図の横軸は受信センサの位置, 縦軸は差分値, 凡例は空洞サイズを示す. 空洞近傍で差分値が増加した. また, 空洞サイズの増加に伴い全ての受信点において相対的に差分値が増加しており, 空洞近傍では顕著に増加した. 一方, 空洞サイズ $\phi=21.0\text{mm}$ については, 明確な差分の増加が確認できない. 図 5.11 (b) は, 空洞サイズ $\phi=21.0\text{mm}$ と $\phi=106\text{mm}$ の差分値を用いた比較図である. 差分値の分布からは, $\phi=21.0\text{mm}$ の空洞位置を評価することは難しい. また, それぞれの最大の差分値の差は約 16 倍となった. 図 5.12 (a) ~ (d) は, Case_5 の測定条件において得られた全ての DVA の結果を示す. 図 5.12 (a) は生成した健全時応答波形と空洞設置前の 3 枚の試験体 A~C における差分値の分布, 図 5.12 (b) ~ (d) は, 空洞深さ位置別に得られた結果である. 空洞サイズ $\phi=21.0\text{mm}$ を除いて, 空洞近傍で差分値の増加が確認できる. また差分値の大きさは, 空洞サイズが $\phi=106\text{mm}$, 空洞深さ位置が 50.0mm のときに最大となり, 空洞サイズの減少と空洞深さの増加に伴い差分値が減少した. これらの結果は, 4 章の数値シミュレーションの結果と同様の傾向を示した. 図 5.13 (a), (b) は, これらの結果の空洞近傍の受信センサ 4ch と 5ch における差分値の平均と空洞深さ位置および空洞サイズの関係について示したものである. なお, 図の赤い破線部は図 5.13 (a) の差分値を示している. 空洞サイズ $\phi=21.0\text{mm}$ を除いて, 空洞深さの減少および空洞サイズの増加に伴い, 差分値は段階的に増加する傾向を示しており, 差分値とこれらの間には, 高い相関関係があることが示された. つまり, 空洞近傍で観測される差分値の大小関係から, 空洞の深さや大きさを評価できる可能性が高い. これらの結果から, DVA は, 比較的単純な板状試験体において, 従来手法と同等の検査能力を有しており, さらに, 算出される差分値の大小関係と分布から空洞の深さや大きさを評価可能であることを示唆した.



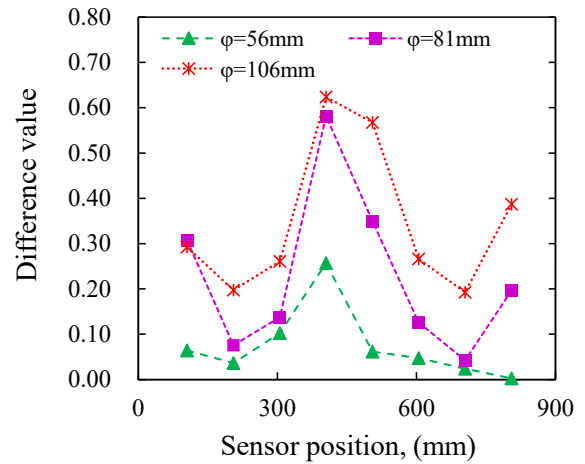
(a) 空洞サイズ別の差分値の分布

(b) 空洞サイズ $\phi=21\text{mm}$ と $\phi=106\text{mm}$ 差分値

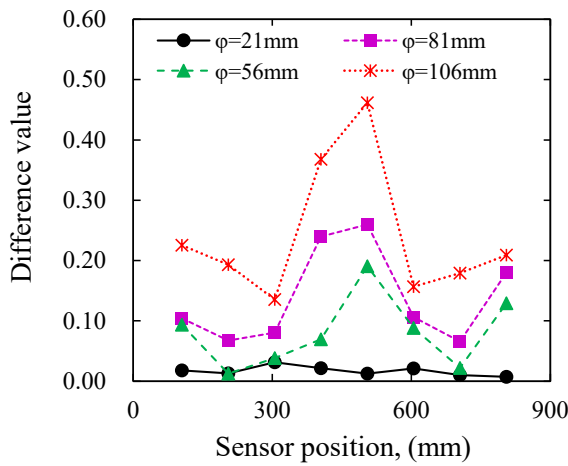
図 5.11 空洞サイズ別の DVA の結果 : Case_5(入力点 455mm), 空洞深さ位置=100mm



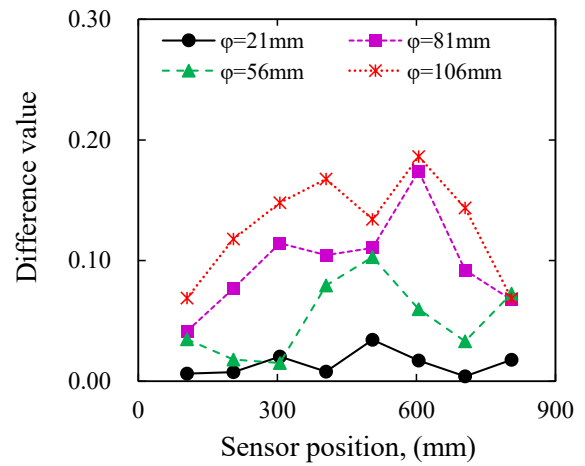
(a) 空洞設置前の試験体別の差分値



(b) 空洞設置後(空洞深さ=50mm)

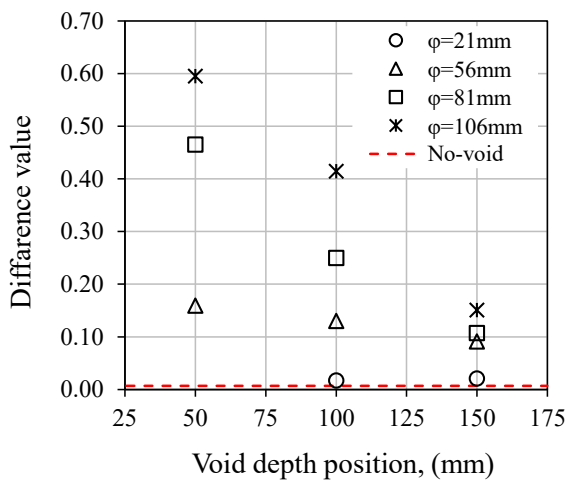


(c) 空洞設置後(空洞深さ=100mm)

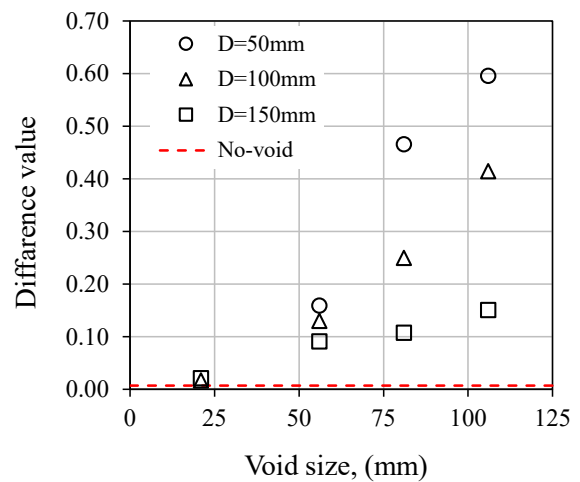


(d) 空洞設置後(空洞深さ=150mm)

図 5.12 各試験体における DVA の結果 : Case_5(入力点 455mm)



(a) 空洞深さと差分値の関係



(b) 空洞サイズと差分値の関係

図 5.13 空洞深さ位置および空洞サイズの変化に伴う差分値の増減関係

④ 複数入力点の結果を用いた内部空洞の評価

図 5.14 (a), (b) に、各入力点における DVA の結果を空洞深さ別に示す。空洞サイズは全て 106mm であり、図の凡例は実験ケースを示している。入力点が空洞から離れた場合においても空洞近傍で差分値が増加した。しかし、図 5.14 (a) の Case_3 (入力点 255mm) においては、空洞近傍で特徴的な差分値の増加は確認できない。一方図 5.14 (b) では、空洞近傍で差分値の増加が確認できるが、Case_1 (入力点 55mm) で差分値の増加が確認できない。この結果から、空洞深さ位置と入力点の位置関係によっては、空洞の影響を受けにくい条件があることが考えられる。しかしながら、いずれの結果においても空洞近傍で差分値が増加する傾向が強いことを確認した。この結果は、入力点が空洞から離れた場合でも空洞位置を評価可能であることを示唆している。

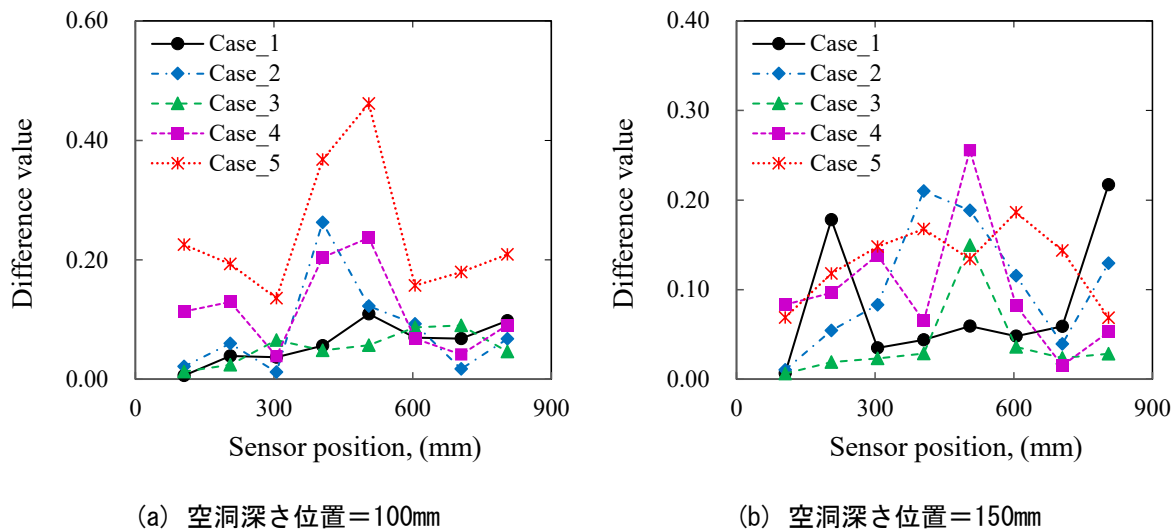


図 5.14 入力点別に算出した差分値； Void size: $\phi=106\text{mm}$

実務的な評価を考えた場合、複数の測定間隔によって得られた結果を個別に評価することは時間を要する。ここで、差分値の増加傾向が図 5.14 のとおりであると仮定した場合、測線上における複数入力点の平均的な差分値の分布から空洞位置の評価が可能になると考え、以下の式から複数入力点における任意の出力点の平均差分値を求めた。

$$\bar{D} = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M D_{ij} \quad (5.1)$$

ここで、 \bar{D} は出力点毎の平均差分値、 D_{ij} は個別の測定間隔で得られた差分値、 M は入力点の数、 i は出力点の番号である。式 (5.1) に基づいて得られた差分値の分布結果を図 5.15 に示す。図の凡例は空洞サイズである。空洞サイズ 56.0mm 以上から比較的単純に空洞位置を評価可能である。このため、平均的な差分値の分布を用いることで容易に内部空洞の位置を評価可能であることが示された。

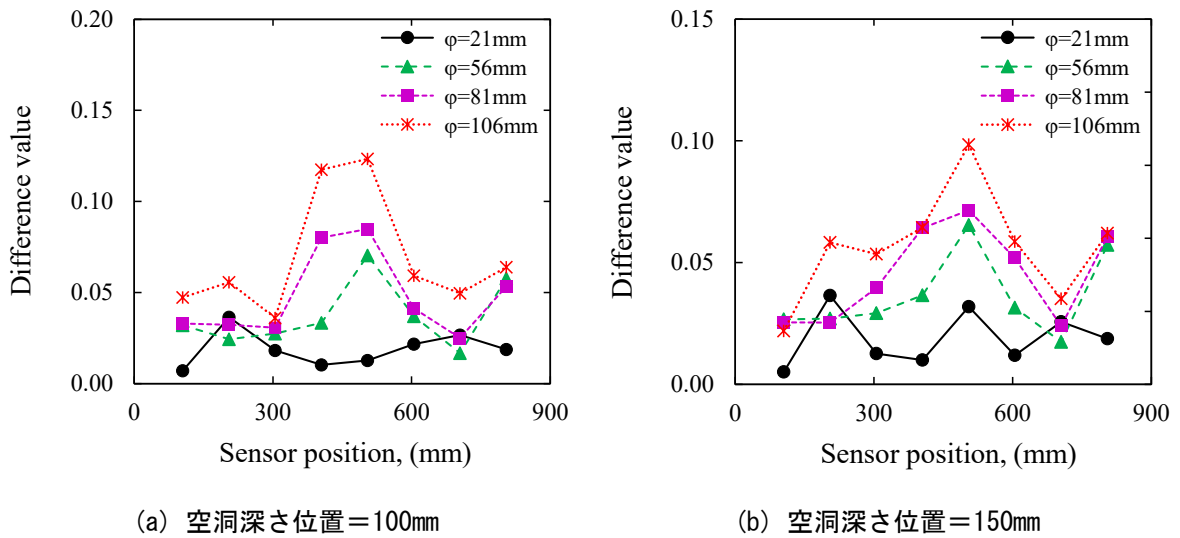


図 5.15 複数入力点によって得られた同一出力点における平均差分値の分布

図 5.16(a),(b) に入力点別の差分値の増減関係を示す。図 5.16(a) は空洞の深さ位置が 100mm, 図 5.16(b) は, 空洞の深さ位置が 150mm における空洞サイズと差分値の関係である。Case_2,4,5 においては, 両図ともに良好な相関関係であることを示している。また, 空洞深さの増加によって, 差分値の増加傾向は緩やかとなり差分値は減少した。この結果から, DVA は測定間隔の影響が少なく内部空洞の大きさや深さ位置を評価できる可能性が示された。以上の結果から, 実測定においても DVA は, 測定間隔を広げることが可能であると判断できる。このため, 簡易的なスクリーニング手法として利用ができる可能性が実験によっても明らかとなった。

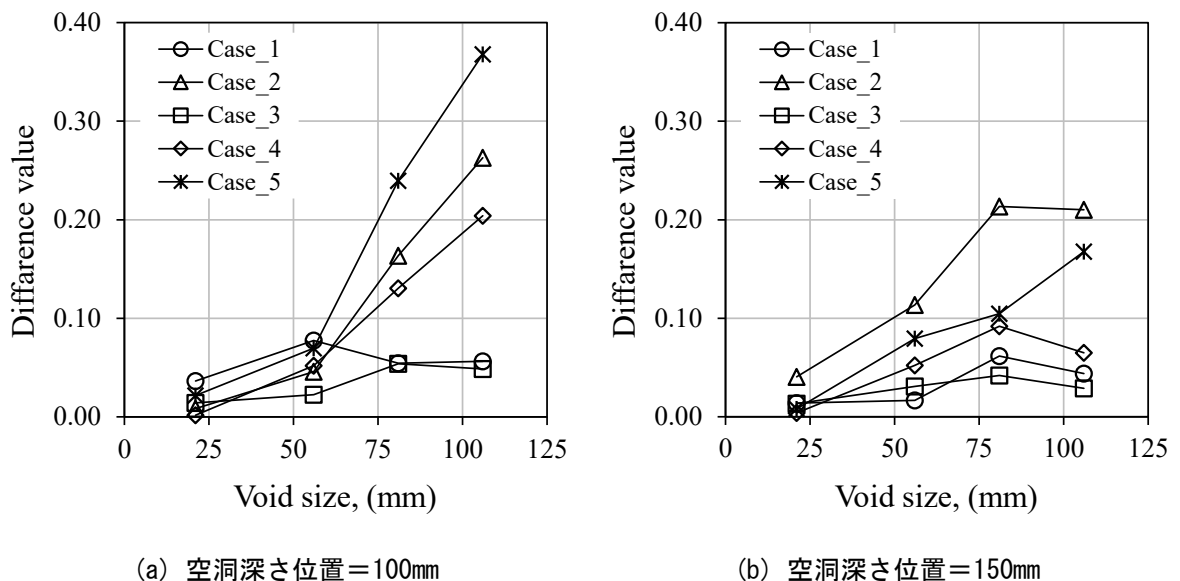


図 5.16 入力点別の空洞サイズと差分値の関係 (受信センサ : 4ch)

5.2.6 既製品土止め板を用いた実験のまとめ

本検討では、既製品土止め板を用いた実験によって、実際の測定で得られた応答波形から差分値の算出した。差分値の大きさや分布変化によって、製品の違いによるばらつきや内部欠陥の状態が差分値に与える影響について検討を行い、差分値の有用性を実験的に検証した。以下に検討した結果をまとめる。

➤ 製品によるばらつきと測定波形の変化

- コンクリート二次製品である既製品土止め板を用いた実験によって、同一製品による品質ばらつきが差分値に与える影響は小さいことを確認した。これによって、平均化したひとつの健全時応答波形を用いて複数の試験体を評価できる可能性が示された。
- 時間領域の測定波形は、入力点と出力点の関係が左右対称である場合、同じ波形の形状を示すことを実験的に確認した。

➤ 算出データ数の変動と差分値

- 実際の測定波形を用いた場合においても差分値は、算出データ数の変動に伴い大きさと分布に変化が生じることを確認した。また、算出データ数の増加に伴い、差分値は相対的に増加する傾向があることを確認した。一方、算出データ数が少ない場合に差分値は、大きく減少した。
- 既製品土止め板を用いた実験結果では、内部空洞の位置が深い場合に算出データ数の増加によって差分値が試験体の端部で大きくなることを確認した。この結果、空洞の深さが差分値の分布に与える影響は大きいことがわかった。一方、空洞深さ位置が浅い場合、差分値の分布傾向は算出データ数の増加に伴い安定することを確認した。この結果、比較的浅い内部空洞の評価は容易であることがわかった。

➤ 空洞深さ位置と空洞サイズが差分値に与える影響

- 3体の健全時状態を評価した際の差分値は、非健全時と比較して小さく一定の分布傾向を示すことを確認した。このため、内部空洞の設置によって生じた差分値の増加と分布変化が内部空洞の影響によって生じたものであることが示された。
- 差分値は、空洞サイズの増加に伴い相対的に増加し、特に空洞近傍の入力点で増加した。加えて、空洞の深さ位置が浅くなることで差分値は増加した。
- 本検討の測定条件では、空洞サイズが21.0mmと比較的に小さい場合、差分値の分布から評価することは困難であることを確認した。
- 空洞近傍で得られた差分値の増加量は、空洞の深さ位置が浅く、空洞サイズが大きい場合に最大となり、空洞深さが深く、空洞サイズが小さい場合に最小となった。また、この増減傾向には高い相関関係があることが示された。

➤ 複数入力点の結果を用いた内部空洞の評価

- 差分値は、入力点が空洞から離れた場合においても、空洞近傍の出力点で増加する傾向を確認した。また、複数入力点の差分値の分布を用いることで容易に内部空洞の位置を評価可能であることを示した。
- 入力点と空洞の深さ位置の条件によっては、空洞位置で差分値が増加しない場合があることを確認した。一方、その他の入力点の条件においては、差分値が空洞近傍で増加することにくわえて、差分値の増加量と空洞サイズの間に良好な相関関係があることが明らかとなった。この結果 DVA は、実測定においても測定間隔を広げて内部空洞を簡易的に評価できる可能性を示した。

5.3 未充填シース試験体を用いた実験

5.3.1 概説

橋梁の内部欠陥のひとつにプレストレスコンクリート（ポストテンションコンクリートを含んで以下、PC という）橋梁のシース管内のグラウト未充填による PC 鋼材の腐食破断がある[5.6]. 通常、PC 鋼材等が通るシース管内には、外的な劣化因子の侵入を防ぐことを目的として、グラウト材を完全に充填することで PC ケーブルを保護している。しかし、充填が不十分な場合、雨水等がシース内に侵入することによって PC 鋼材が腐食し破断するといった現象が発生している。PC 橋梁は、橋梁の断面内に通る PC 鋼材に張力を与えることで、コンクリート下面に生じる引張応力に対して逆向きの圧縮力を作用させ、コンクリート橋梁の曲げ耐力を向上させている。これによって PC 橋梁は、コンクリートの弱点である引張応力に対する耐力が大きくなるため、一般的な RC 橋梁と比べて断面の形状を薄くできることから、コンクリート橋梁の設計において合理的な構造形式のひとつとなっている。このため、PC 部は、橋梁の耐力や断面形状を左右する重要な機構である。したがって、グラウト材の充填不足が要因となって PC 鋼材が破断した場合、橋梁の性能を著しく低下させる恐れがあることから、未充填部には早急なメンテナンス等が必要となる[5.7][5.8]. しかし、PC 鋼材の劣化やグラウトの充填不足は、目視や打音等の簡易点検で検出することは難しく、明確な評価手法の確立はされていない。

シース管内のグラウト未充填部は、衝撃弾性波法を用いた内部欠陥評価でいうところの空洞部と同じ伝搬挙動を示すことが既往の研究から明らかとなっている[5.9-5.12]. しかし、PC 橋梁の桁部材は単純な板状とみなせる場合や、下フランジやウェブなどの断面変化によって複雑な形状を示す場合もある。このため、従来の周波数を用いた評価手法を用いた評価が難しい場合や、断面の形状によっては適用ができない場合がある。また、シース管の直径や配置状況によっても評価が難しい場合がある。一方、このような測定対象の形状やシース管の状態による評価課題は、DVA を適用することで評価可能となることが期待される。

本検討では、スパイラルシースを埋設したコンクリート試験体に対して DVA を適用し、グラウト未充填部の評価を目的とした実験的検討を行った。また、従来の評価手法を用いた評価結果と比較することで、提案手法の実用性と優位性を示す。

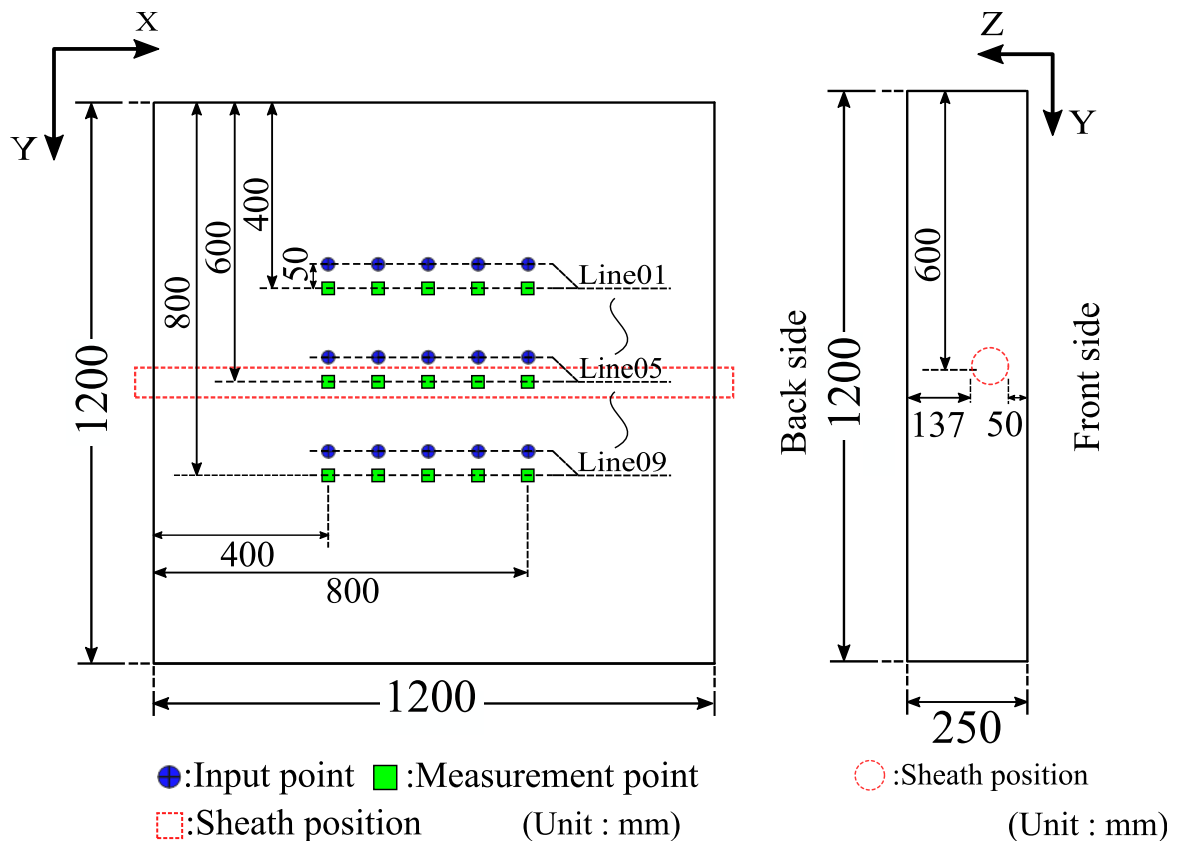
5.3.2 試験体の概要

本検討は、DVA の実用的な利用を想定した検討として、充填度の異なるスパイラルシース（以下、シースという）を埋設した 4 体のコンクリート試験体を用いた模型実験を行った。試験体は、普通ポルトランドセメントを使用した同一配合条件のコンクリートを用いて作製されている。図 5.17(a),(b)に試験体の概略図、表 5.6 に各シースの直径とグラウトの充填

率を示す。各試験体は図のように同じ構成となっており、直径の異なる長さ： $X=1,300\text{mm}$ のシースが、試験体の高さ： $Y=600\text{mm}$ 、奥行き： $Z=50.0\text{mm}$ の位置に埋設されている。図 5.18 (a), (b) に、実験に用いた試験体(Specimen_1)の写真、図 5.19 (a), (b) に試験体の側面から撮影したシース近傍の写真を示す。シースの直径(ϕ_s)は 63.0mm と 33.0mm の 2 種類のシース径を用いており、シースの直径別にグラウトの充填率が 100%と 0%に設定した。グラウト充填率が 100%の試験体は健全時状態、グラウト充填率が 0%は非健全時状態を模擬しており、健全時状態の測定波形に基づいて差分値を算出する。算出した差分値の大きさと分布から、充填率の異なる同一径の未充填シースを評価した。また、異なる直径のシースから得られた差分値を比較し、シースの直径が差分値に与える影響について検討を行った。

表 5.6 スパイラルシースの直径と充填率

Specimen_No	Sheath diameter: ϕ_s	Filling rate
Specimen_1	63.0mm	100%
Specimen_2		0%
Specimen_3	33.0mm	100%
Specimen_4		0%



(a) 正面図 (X-Y 平面)

(b) 断面図 (Y-Z 平面)

図 5.17 試験体の概略図



(a) 正面写真 (X-Y 平面)



(b) 側面写真 (Y-Z 平面)

図 5.18 試験体の写真



(a) Specimen_1 : $\phi_s=63.0\text{mm}$



(b) Specimen_3 : $\phi_s=33.0\text{mm}$

図 5.19 シース近傍の写真 (Y-Z 平面)

5.3.3 実験の概要

図 5.20 は、入力点と測定点の構成（以下、測定ユニットという）および掃引方向を示した測定概略図である。測定ユニットの距離は 50.0mm に固定しており、入力点別に一打点ずつ測定を行った。1 点の測定が完了すると、測定ユニットは X 軸方向に 100mm 間隔で移動し、次の入力点の測定を行った。測定ライン上の全ての測定が完了すると、次いで Y 軸方向へ 50.0mm 間隔で移動し、同様にライン上の測定が再び始まる。このように測定と移動が繰り返され、表 5.7 に示す 45 点の入力点の座標位置で測定を行った。また、Specimen_1 および Specimen_2 では、試験体の背面においても同一の X-Y 座標値で測定を行った。この測定条件では、測定面に対するシースの位置が深くなることから、同じシースの直径で深さ位置の異なる差分値が得られる（図 5.17 (b) を参照）。この結果を比較し、シースの深さ位置の変化が差分値に与える影響について検討を行った。表 5.8 に、全ての測定条件におけるシースの直径と深さ位置をまとめて示す。

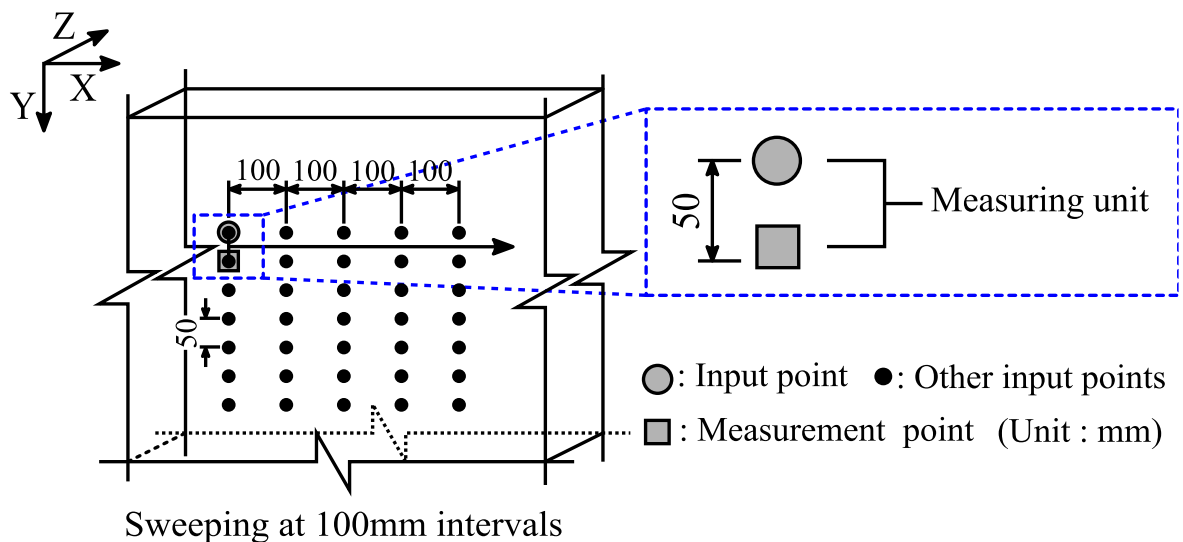


図 5.20 測定の概略図（測定点と測定ユニットおよび掃引方向）

表 5.7 入力点の座標値

Line_No	X(mm) Y(mm)	Input pint_No, (IP_No)				
		400	500	600	700	800
Line_01	350	IP_01	IP_02	IP_03	IP_04	IP_05
Line_02	400	IP_06	IP_07	IP_08	IP_09	IP_10
Line_03	450	IP_11	IP_12	IP_13	IP_14	IP_15
Line_04	500	IP_16	IP_17	IP_18	IP_19	IP_20
Line_05	550	IP_21	IP_22	IP_23	IP_24	IP_25
Line_06	600	IP_26	IP_27	IP_28	IP_29	IP_30
Line_07	650	IP_31	IP_32	IP_33	IP_34	IP_35
Line_08	700	IP_36	IP_37	IP_38	IP_39	IP_40
Line_09	750	IP_41	IP_42	IP_43	IP_44	IP_45

表 5.8 測定条件別のシースの直径と深さの位置

Case_No	Sheath diameter: ϕ_s	Depth position
Case_1	63.0mm	50.0mm
Case_2	63.0mm	137mm
Case_3	33.0mm	50.0mm

測定の条件を表 5.9 に示す。測定は、入力に直径 20.0mm の鋼球を用いて試験体表面から Z 軸方向に衝突させ、X-Y 平面に対して鉛直に Z 軸方向に設置した高感度加速度センサを用いて測定を行った。測定回数は差分値の算出フロー（3 章を参照）に従い、同一測定点で 5 回測定し、全ての測定波形に正規化を行った。正規化した 5 つの測定波形を用いて単純平均した波形を生成し、それを用いて差分値を算出した。算出に用いた平均波形を比較した例を図 5.21 に示す。サンプリング時間間隔 Δt は $0.5\mu\text{s}$ とし、測定時間 t は測定対象の厚さを十分に満たすよう 2.00ms とした。サンプリング時間間隔と測定時間の関係から測定データ数 N_m は 4,000 個となる。なお、測定データ数の 10.0% がプリトリガとして用いられるため、実質的な弾性波の測定データ数は約 3,600 個となる。入力周波数は、Sansalone らが提唱する鋼球接触時間の数値解を用いて、鋼球接触時間と入力周波数の関係式から定めた。また、DVA の測定条件は、多重反射法の厚さ測定に基づいて定めている。このため、同じ測定波形を用いて従来の周波数を用いた内部欠陥評価手法を実施することが可能である。このため、本検討では、DVA と周波数によって未充填シースを評価した結果から、両手法の評価能力を比較した。

表 5.9 測定条件

Diameter of steel ball	d_s	20.0mm	Measurement time	t	2.00ms
Contact time	T_c	0.086ms	Sampling time	Δt	$0.50\mu\text{s}$
Input frequency	F_{inp}	11.6kHz	Measurement data	N_m	4,000

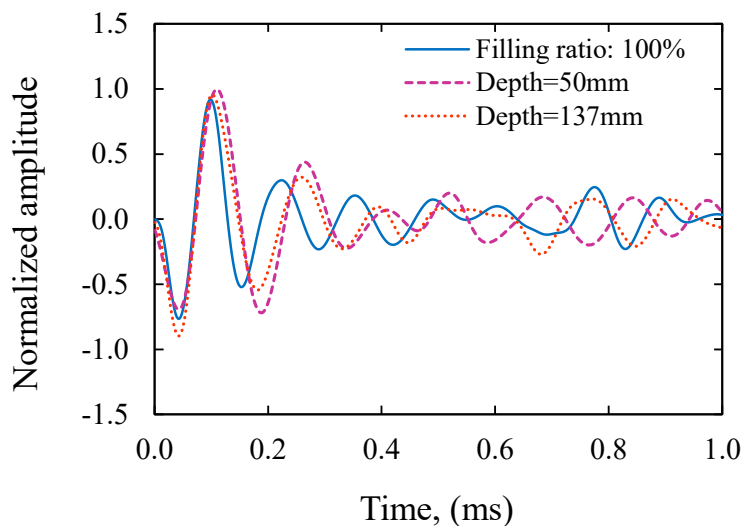


図 5.21 正規後の測定波形の比較例 ($\phi_s=63.0\text{mm}$)

多重反射法は、測定面と反射面間を多重反射する弾性波の周波数に基づいて欠陥を評価する。このため、反射が十分に繰り返された測定波形を用いて周波数解析を行う。一方、DVAに使用する算出データ数 N は、測定データ数 N_m から任意に定めることができる。3章において、差分値を用いた内部欠陥評価における適切な算出条件は、反射波が測定面に戻ってくるまでの時間を満たす算出データ数の設定が必要であると述べた。本検討では、この条件を十分に満たす測定時間が設けられている。一方で、測定面に平面的な広がりがある場合、全ての測定データ数を用いて差分値を算出すると、結果的に離れた場所に存在する内部欠陥によって測定点の差分値に影響を与える恐れがある。このため、算出データ数の設定については慎重に検討する必要がある。また、前節の単純な板状試験体を用いた実験的検討の結果においても、算出データ数の変動によって差分値の大きさと分布に変化が生じた。このことから本検討においても、算出データ数を段階的に変更することで、算出データ数が差分値に与える影響について検討した。表 5.10 は、本検討で用いた算出データ数の大きさによって変化する弾性波の伝搬時間と距離について縦弾性波速度を 4,000m/s と仮定して算出した一覧である。

表 5.10 算出データ数の変化による弾性波の伝搬時間と距離

Number of data: N	Propagation time (μ s)	Propagation distance (mm)
100	50	200
250	125	500
500	250	1,000
1,000	500	2,000
1,500	750	3,000
2,000	1,000	4,000

5.3.4 実験結果

① 算出データ数別の差分値

図 5.22(a)-(f)～5.24(a)-(f)は、表 5.10 に示した算出データ数 N 別における Case_1～Case_3 の DVA の結果を個別に示したものである。横軸は入力点の Y 座標の位置、縦軸は差分値、凡例は入力点の X 座標の位置を示している。いずれの結果においても、算出データ数の変動によって差分値の大きさと分布に変化が生じており、算出データ数が大きくなることで、差分値は相対的に減少している。弾性波の振幅は、幾何学的な減衰と物質的な減衰によってエネルギーが失われる。その結果、入力によって生じるエネルギー影響は、弾性波の到達から時間領域の後半に掛けて減衰する。つまり算出データ数が多い場合、入力の影響が減衰の影響を受けた時間領域の波形によって平均化されるため、算出データ数が大きくなることで差分値は相対的に減少することが考えられる。対照的に算出データ数が少ない場合は、時間

領域に対して入力の影響が大きくなるため差分値は大きくなる。一方、 $N=100$ と $N=250$ の結果を比較すると、いずれの結果においても $N=100$ で差分値が小さくなった。本検討に用いた鋼球の接触時間は $86.0\mu\text{s}$ と算出されるが、 $N=100$ の場合、測定波形が示す時間幅は $50.0\mu\text{s}$ となり、鋼球接触時間と比べ短い。このため測定波形は、入力信号を示しているといえる。したがって、算出データ数が鋼球接触時間と比べて小さいと差分値が小さくなることだが、この結果からも明らかになった。これは、4章の数値シミュレーションの結果と同様の結果を示している。

他方で、図 5.22(a)～(f)では、いずれの結果においてもシース位置の近傍で差分値が相対的に増加している。また、図 5.22(a)の $50.0\mu\text{s}(N=100)$ においては、伝搬時間が背面からの反射波の到達時刻を満足していないにもかかわらず、シース位置で差分値が増加した。Case_1では、シースによって生じた境界面による反射波の計算上の到達時間は $25.0\mu\text{s}$ となり、伝搬時間よりも短い。つまり、欠陥の深さが浅い場合は、厚さに対して少ない算出データ数であっても欠陥を検出できる場合があることがわかった。しかし、通常の実務的な現場では、内部欠陥の位置や大きさは不明であるため、弾性波が反射面から戻ってくる時間領域を満足していない場合、反射区間を正しく評価しているとは言い難い。そのため、図 5.23(a)では、図 5.22(a)と差分値の分布が異なる。図 5.23(a)の場合、シースの深さ位置の変化によって、反射波の到達時間は $69.0\mu\text{s}$ となり、 $N=100$ の $50.0\mu\text{s}$ を超えている。その結果、シースからの反射波は測定面に到達しない。このため、差分値の増加が見受けられない。さらに、図 5.24(a)では、算出データ数がシースからの反射波が到達時刻を満足しているにもかかわらず、シース近傍で差分値の増加が確認できない。衝撃弾性波法を用いた入力周波数は、測定対象を共振させることを目的として十分な波長を入力する。通常、入力周波数は、厚さに基づいて設定するため、測定面と欠陥の距離に対して波長が大きくなる。その結果、必然的に欠陥位置を検出することを目的とした場合の波長に比べて大きくなる。このような入力条件では、欠陥が小さい場合、欠陥と測定面の間に反射波を成立させることが難しいことが報告されている[5.13]。このため Sansalone らは、小さな欠陥を検出するためには、波長短い高周波を励振する必要があることを提唱している[5.14]。DVA は、厚さ測定に基づき入力周波数を設定しているため、算出データ数が短い場合に同様の傾向が生じたものだと考えられる。これらの結果から、本検討の実験ケースでは、 $N=100$ の算出条件による差分値を用いた評価結果は適切でないことがわかった。同様に、図 5.23(b), (c) および、図 5.24(b), (c) に示すように、 $N=750$ 以下の場合、差分値の分布からシースの位置を評価することは容易ではない。一方、 $N=1000$ 以上では、シース近傍で特徴的に差分値が増加した。測定面と欠陥の間で弾性波が多重反射することで、繰り返し欠陥の影響を受けた結果、差分値の増加がシース近傍で強調されたと考えられる。特に、 $N=1000$ では、シース近傍で明瞭に差分値が大きくなった。また、測定点近傍の内部欠陥を評価する場合においては、算出データ数を少なく設定した差分値を

用いることで、欠陥の影響が広範囲に伝搬しなくなると考えられる。このため本検討においてはこれらの結果を踏まえて、シース位置を評価する算出データ数として $N=1000$ が適切であると判断した。以降の検討結果については $N=1000$ の DVA の結果を用いて検討した。

以上の結果から、DVA は適切なデータ数を選択することで、シースの位置を正しく評価できることが示された。

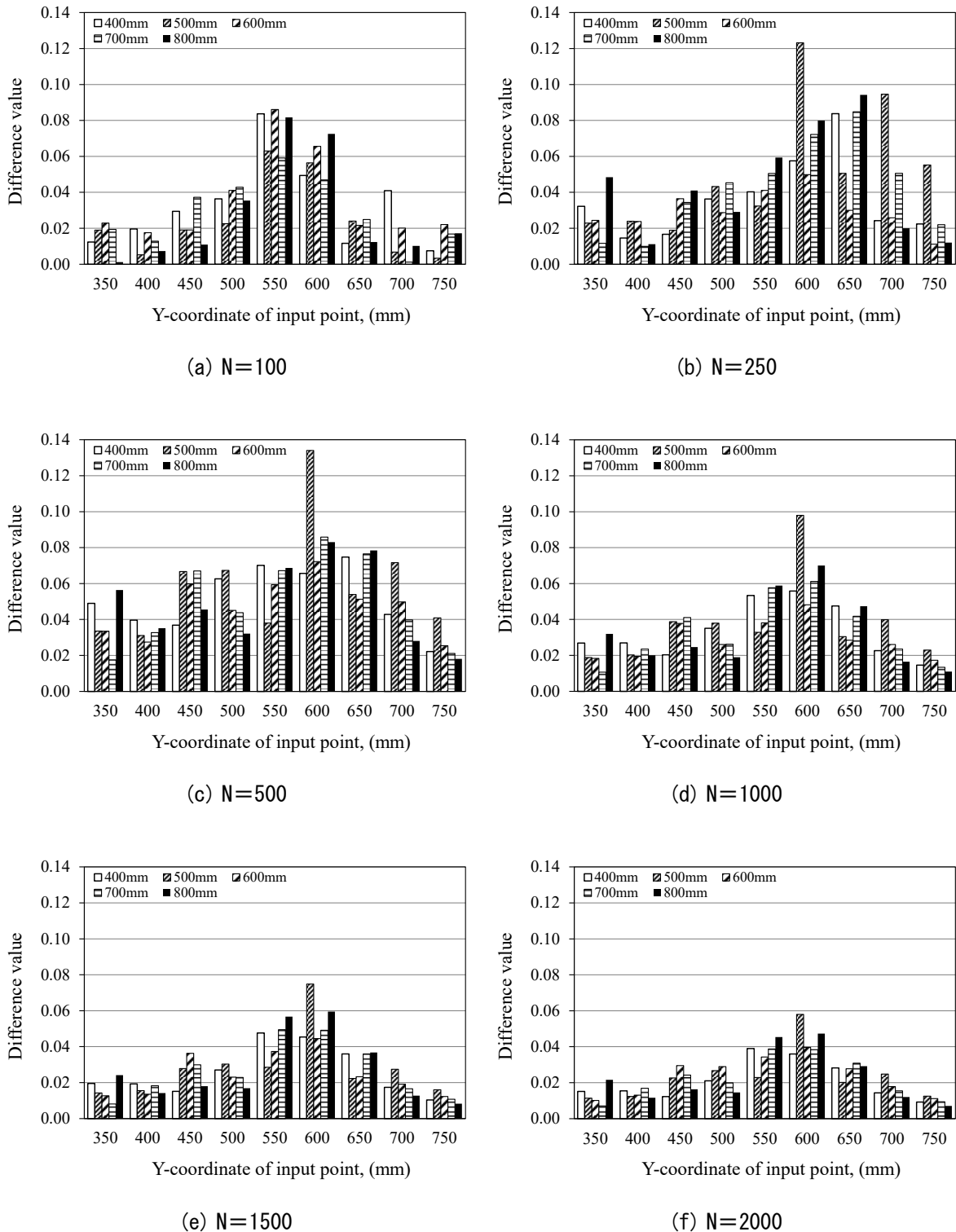
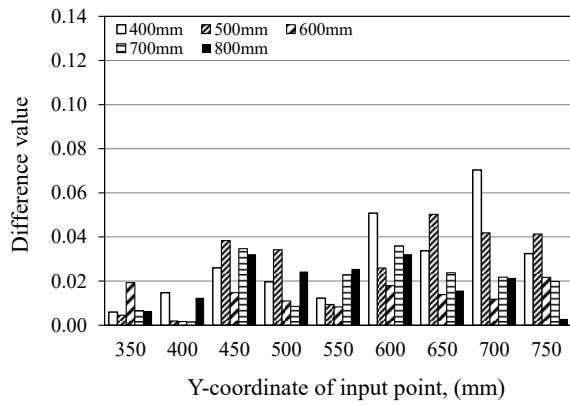
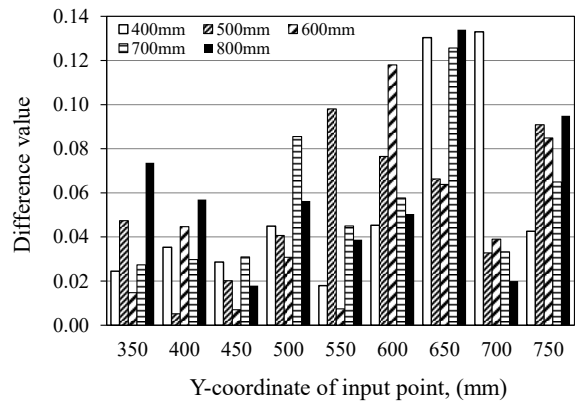


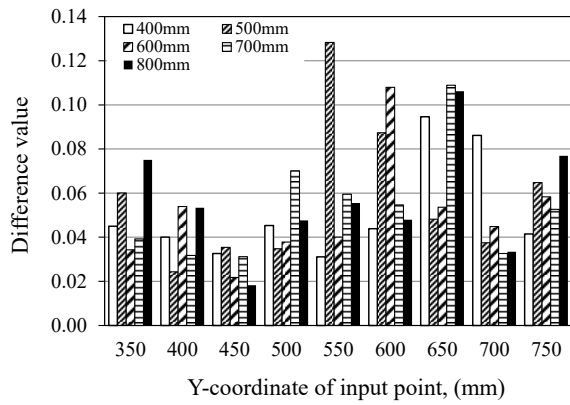
図 5.22 算出データ数別の DVA の結果 : Case_1 ($\phi_s=63\text{mm}$, Depth=50mm)



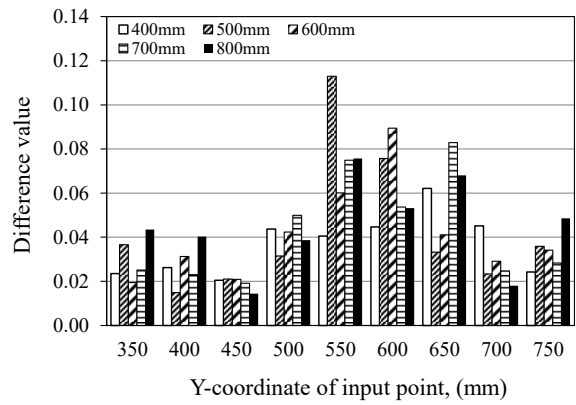
(a) N=100



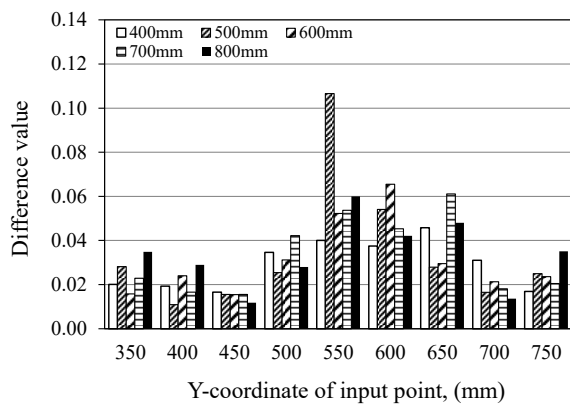
(b) N=250



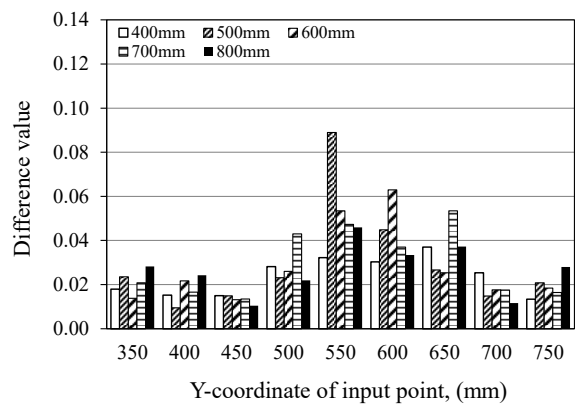
(c) N=500



(d) N=1000



(e) N=1500



(f) N=2000

図 5.23 算出データ数別の DVA の結果 : Case_2 ($\phi_s=63\text{mm}$, Depth=137mm)

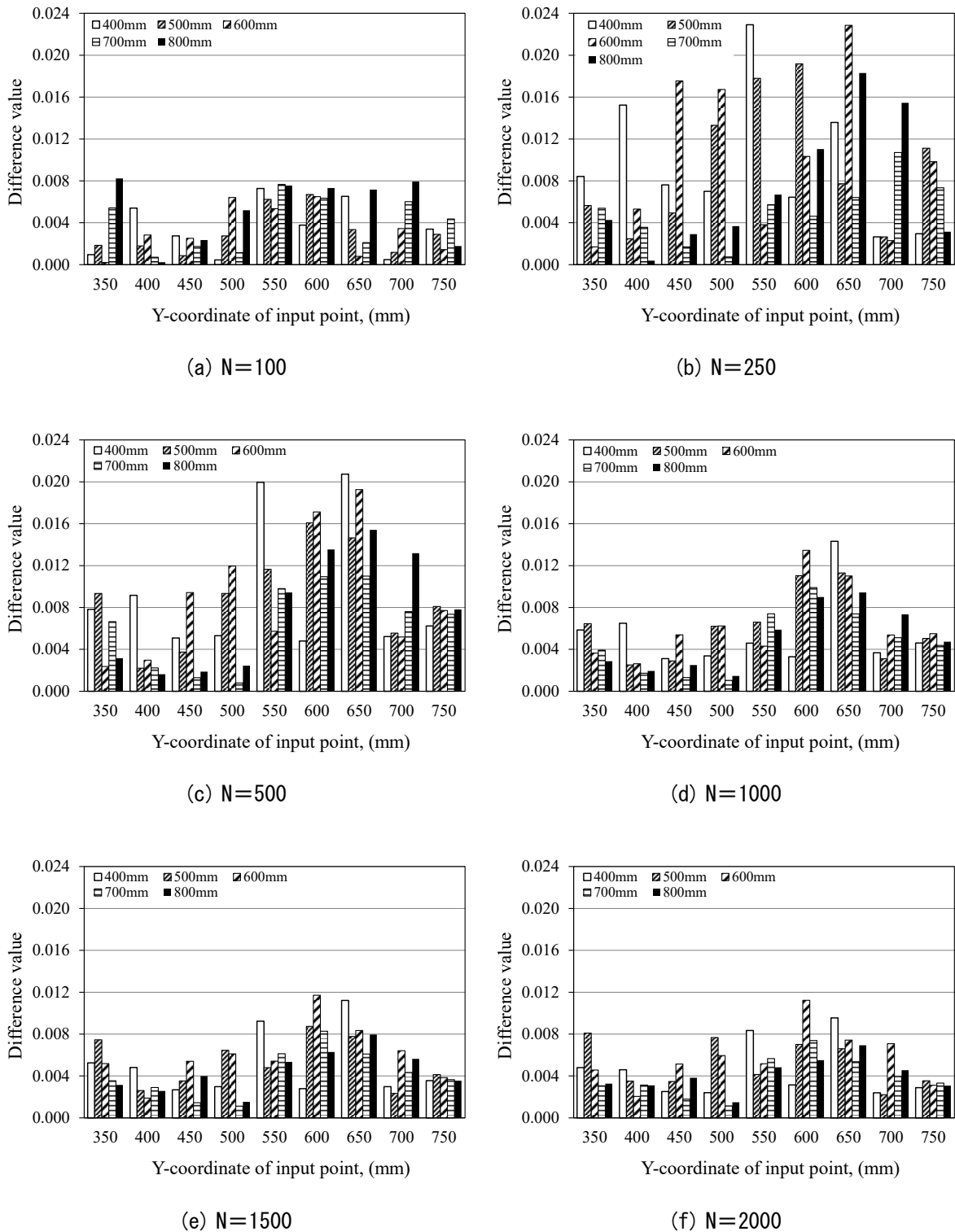


図 5.24 算出データ数別の DVA の結果 : Case_3 ($\phi_s=33\text{mm}$, Depth=50mm)

② シースの深さ位置と大きさによる差分値

図 5. 25 は、Specimen_2 と Specimen_4 のシース近傍の断面図を示す。また、図 5. 26 (a), (b) は、図 5. 25 に示す Specimen_2 と Specimen_4 の測定面における差分値の分布をシースの深さと直径別に比較したものである。両図の結果は、入力点の X 座標が 800mm のときに得られたものである。図 5. 26 (a) の横軸は差分値、縦軸は入力点の Y 座標の位置、凡例はシースの深さである。シースの深さ位置：Depth=50.0mm では、Y 座標上の 550mm から 650mm の区間で差分値が増加し、シース直上 600mm で差分値が最大を示した。一方、Depth=137mm においては、500mm から 700mm の区間で差分値が増加したため、増加範囲が広がったことが確認できる。弾性波は弾性体内部を三次元的に同心円状に広がって伝搬するため、伝搬領域は時間経過とともに広がる。そのため、シースの位置が深い場合では、シースの反射波が測定面に到達するまでの時間を要することから、広い範囲に反射波が伝搬することが考えられる。図 5. 27 (a), (b) は、空洞の存在するモデル内を伝搬する反射波のイメージを図で示したものである。図 5. 27 (a) の場合、測定面と空洞の距離が短いため伝搬範囲が狭くなる。一方、図 5. 27 (b) の場合では、測定面とシースの距離が長いため、反射波の伝搬範囲が広がる。つまり、同じ差分値の算出データ数の場合、空洞の位置が深く空洞からの反射の影響は測定面に大きく影響する可能性がある。言い換えれば、DVA は差分値の分布に基づいて欠陥の深さを評価できる可能性がある。この内部欠陥の深さ位置による差分値の分布傾向の変化は、4 章 2 節の数値実験と概ね同じ傾向を示しており、数値実験においても欠陥位置が深くなることで、最大差分値と比較して相対的な影響範囲が広がっている。一方、差分値の大きさについては、数値実験と大きく異なった傾向を示した。数値実験においては、欠陥の深さ位置が深くなることで差分値は減少しているが、本検討の結果においては、数値実験と比較すると減少が少ない。また、前節の結果と比較しても差分値の減少傾向が異なる。このため、測定面が三次元的な広がりを持つ場合、空洞深さの影響による差分値の変化は少ない可能性があることを確認した。一方、このような現象は、試験体の形状や内部欠陥の状態によって変化すると考えられるため、今後、検討する必要がある。しかしながら、未充填シース近傍で相対的に差分値が増加していることから、未充填シースの平面位置を評価可能であることが示された。

図 5. 26 (b) は、横軸に差分値、縦軸に入力点の Y 座標の位置、凡例にシースの直径を示す。 $\phi_s=33.0\text{mm}$ の場合、Y 座標上の 550mm から 750mm の区間で差分値が増加し、650mm で最大となった。同様に、シース位置の 600mm においても高い差分値を示している。この結果は、DVA が小さな欠陥も評価できることを示唆している。また、差分値の大きさに着目すると、シース位置の 600mm で約 8 倍程度の差異が確認できる。

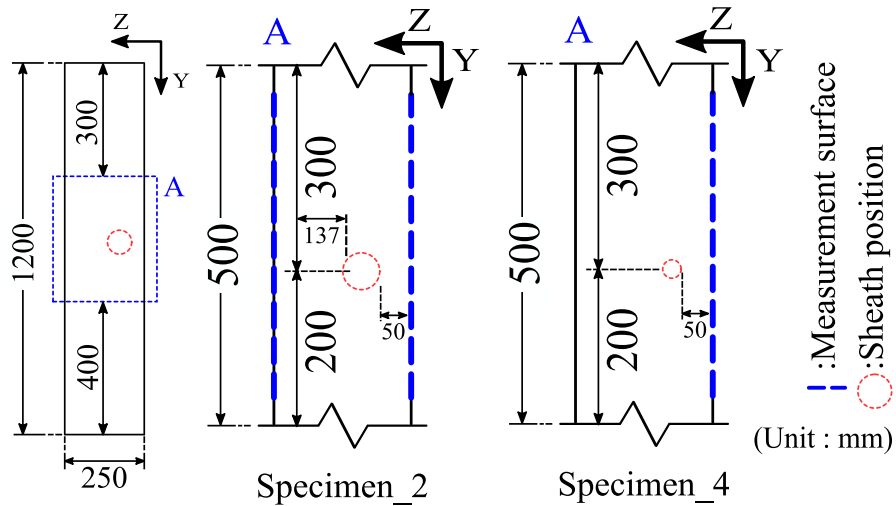
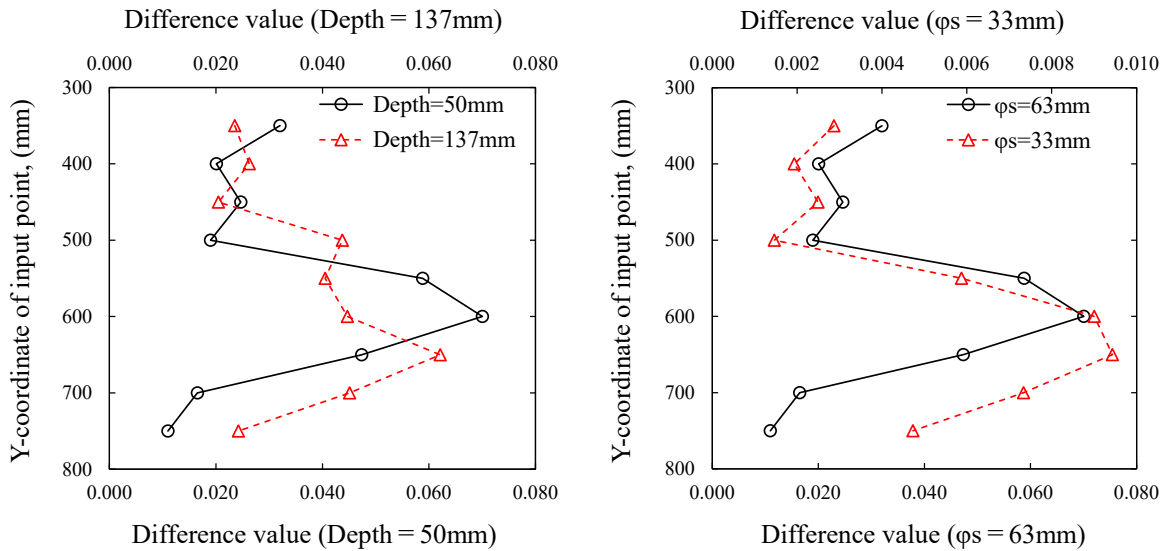


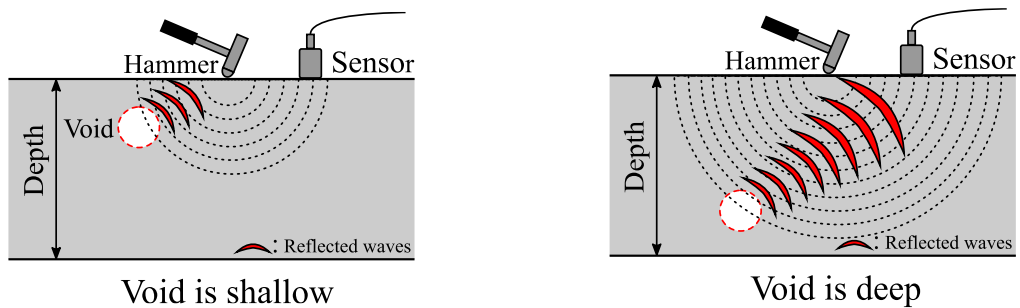
図 5.25 試験体別のシース近傍の断面図



(a) 深さ位置別の差分値の比較

(b) シース径別の差分値の比較

図 5.26 DVA 結果；差分値の分布図（入力点：X=800mm）



(a) 空洞位置が浅い場合

(b) 空洞位置が深い場合

図 5.27 空洞深さ位置の違いによる反射波の伝搬イメージ図

図 5.28 は、シース直上を入力点(Y=600mm)とした場合に得られた 5 つの測定点の平均差分値の大きさを示したものである。横軸は Case_No, 縦軸は差分値を示す。Case_1 と Case_2 を比較すると, Case_1 の平均化した差分値に対して, 差分値の相対誤差は 5.9%と小さく, 差分値の深さに関する変動は小さい。一方, Case_1 と Case_3 を比較すると, 相対誤差は 86.6%と大きく, 深さ変化と比較して大きく, 欠陥サイズの変化が差分値に与える影響が大きいことが示された。この結果は, これまで得られた検討結果と同じであり, 内部欠陥のサイズが差分値に与える影響は大きいことが本検討からも明らかとなった。

以上の結果から, 本検討の測定上においては, 差分値の大きさを用いて欠陥の深さを評価することは難しいことを確認した。しかしながら, 欠陥の位置が深い場合には, 差分値が増加する領域が広がるため, 差分値の分布から欠陥の深さを評価できる可能性がある。また, 欠陥サイズの変化が差分値に与える影響は深さの位置変化と比較して大きく, 差分値の大きさから欠陥のサイズを評価できる可能性が示された。

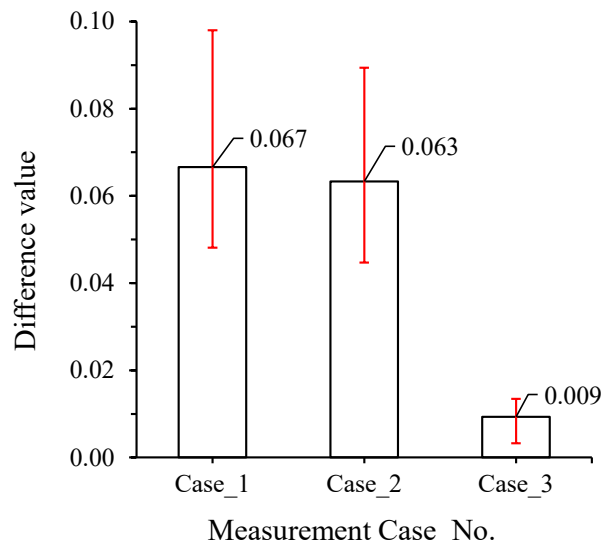


図 5.28 シース直上を入力点とした場合における差分値の平均値；入力点：Y=600mm

③ 差分値と周波数を用いた未充填シースの評価結果の比較

周波数を用いた内部欠陥評価手法は、厚さ方向の一次振動モードの固有周波数に基づいて、固有周波数と卓越周波数の比較によって内部欠陥を評価する。固有周波数は、縦弾性波速度と測定対象の厚さの関係から[固有周波数]=[弾性波速度]/[2×厚さ]によって導かれ、本検討の厚さは、試験体の厚さを測定面から反射面までの距離として定め 250mm とした。また、縦弾性波速度は不明であるため、一般的なコンクリートの物性値として用いられることが多い 4,000m/s と仮定した。これらの定数から、試験体の固有周波数は 8.0kHz と求められる。本検討では、この固有周波数 8.0 kHz を評価基準値として、未充填シースの評価を行った。

図 5.29 (a), (b) は、測定波形を周波数解析した周波数スペクトルから、最も卓越した周波数を抽出した結果を示す。横軸は入力点の Y 座標の位置、縦軸は周波数、凡例は入力点の X 座標の位置である。内部欠陥によって生じる卓越周波数の変動は、測定面と欠陥の間で多重反射が成立し卓越周波数が高くなる場合と、見かけの伝搬距離が変化によって低くなる場合がある。図 5.29 (a) では、入力点の Y 座標が 550mm から 650mm の区間の周波数が異なっている。その他の区間では、試験体の固有周波数と同等の周波数を確認できる。このため、未充填シースの位置を評価可能である。一方、図 5.29 (b) では、すべての測定点において卓越周波数が 8.0kHz に近い値を示している。この結果から、本測定条件および試験体の条件においては、周波数を用いて直径 33.0mm の未充填シースを評価することは困難であるがわかる。他方で、周波数を用いた評価手法においては、入力周波数や入力点と測定点の間隔といった測定条件をいくつか設けることで、比較的小さな欠陥を検出できる可能性がある。しかし、複数の測定条件の設定が必要となれば、測定点の増加、それに伴う解析件数の増加によって測定と解析に時間を要する。これに対し、DVA は 1 回の測定結果で、比較的小さな欠陥を検出できる可能性がある。以上の結果から、DVA は、従来の卓越周波数を用いた評価手法と同等以上の内部欠陥評価能力を発揮していることが期待される。

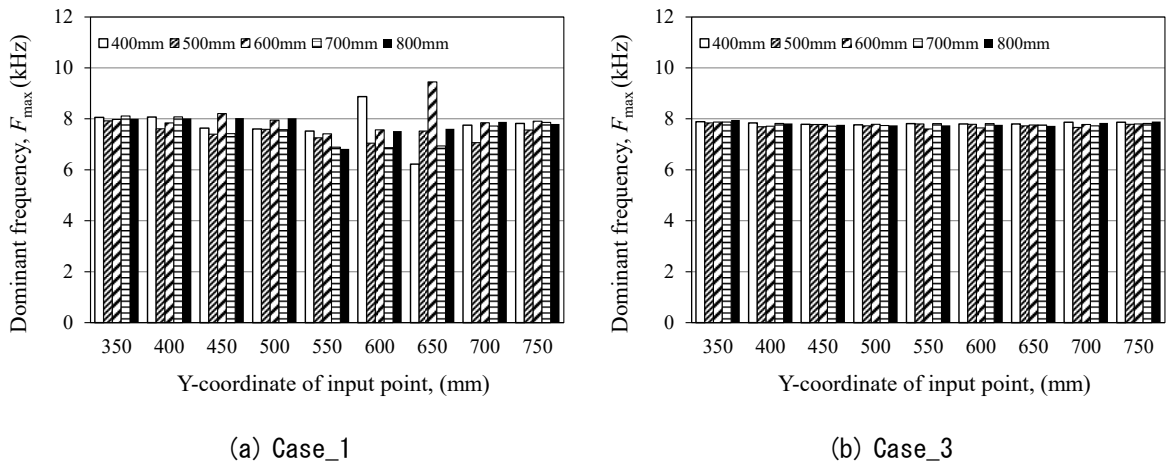


図 5.29 測定点別の卓越周波数

図 5.30(a), (b)～図 5.32(a), (b)は、算出した差分値と卓越周波数を平面的に可視化したコンタ図である。全図の横軸と縦軸は、測定面上の入力点のXY座標である。図の(a)が示す凡例は、各試験体で得られた差分値の最大値で正規化した差分値の強度、(b)の凡例は、周波数(kHz)を示している。図 5.30(a), (b)は、いずれの評価結果もシースの位置を境に変化が生じている。また、図 5.31(a), (b)においても同様の変化を確認できる。これらの結果から、両手法とも Specimen_2 に埋設された未充填シースの平面位置の評価が可能であることが示された。一方、図 5.32(Specimen_4)の結果において、図 5.32(b)の結果から未充填シースを評価することは難しい。一方で、図 5.32(a)では、シース近傍で差分値が高い強度を示していることから、卓越周波数では評価の難しい比較的小さな欠陥を、DVA を用いることで平面的に可視化できる可能性が示された。

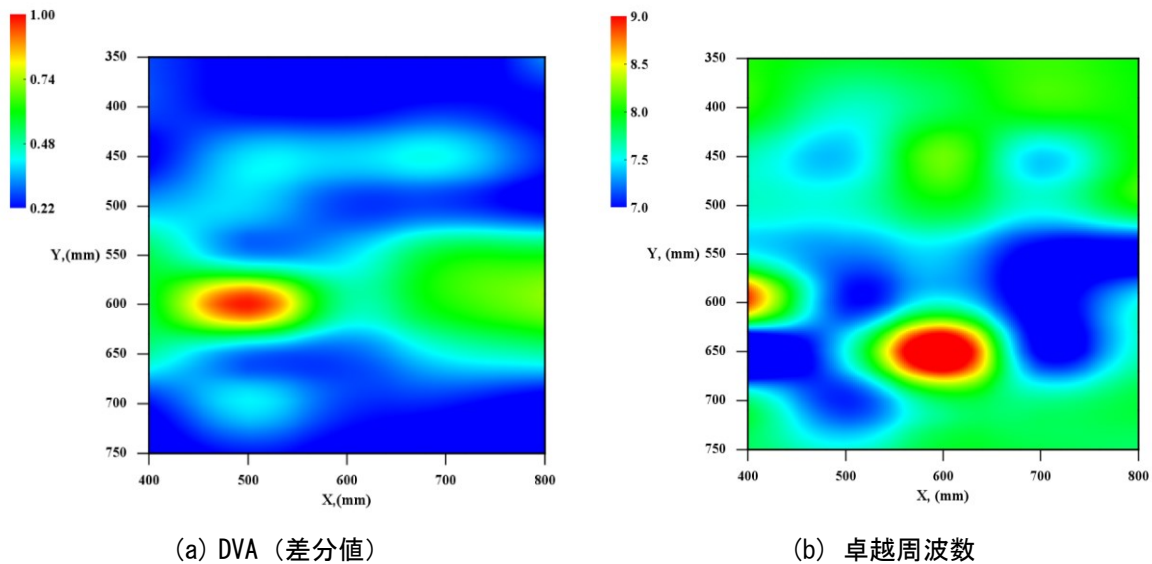


図 5.30 未充填シースの平面可視化結果 ; Case_1 : $\phi_s=63\text{mm}$, Depth=50mm

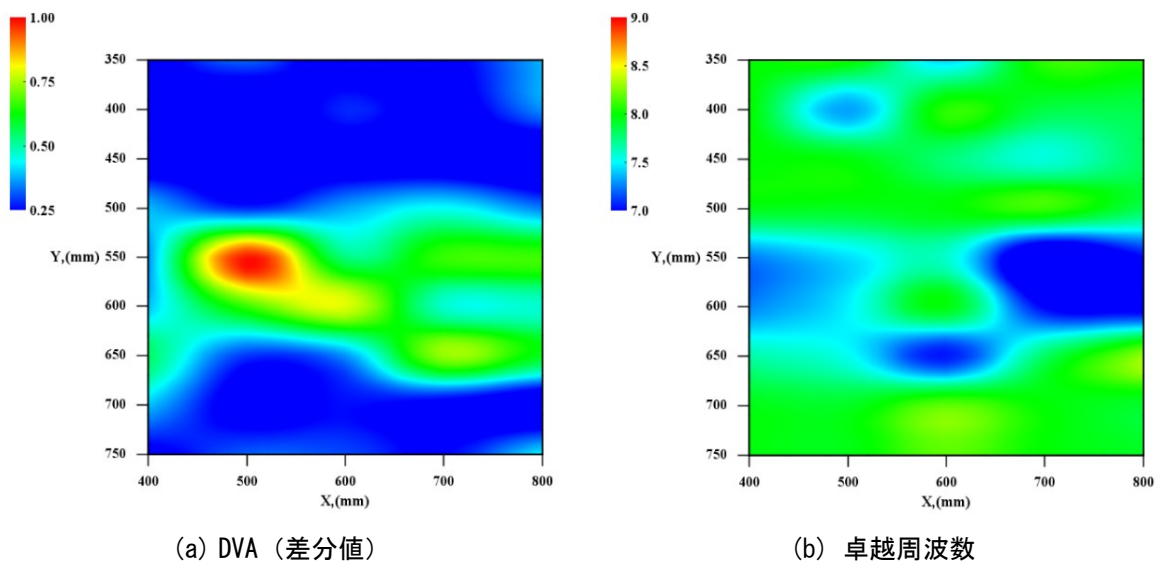


図 5.31 未充填シースの平面可視化結果 ; Case_2 : $\phi_s=63\text{mm}$, Depth=137mm

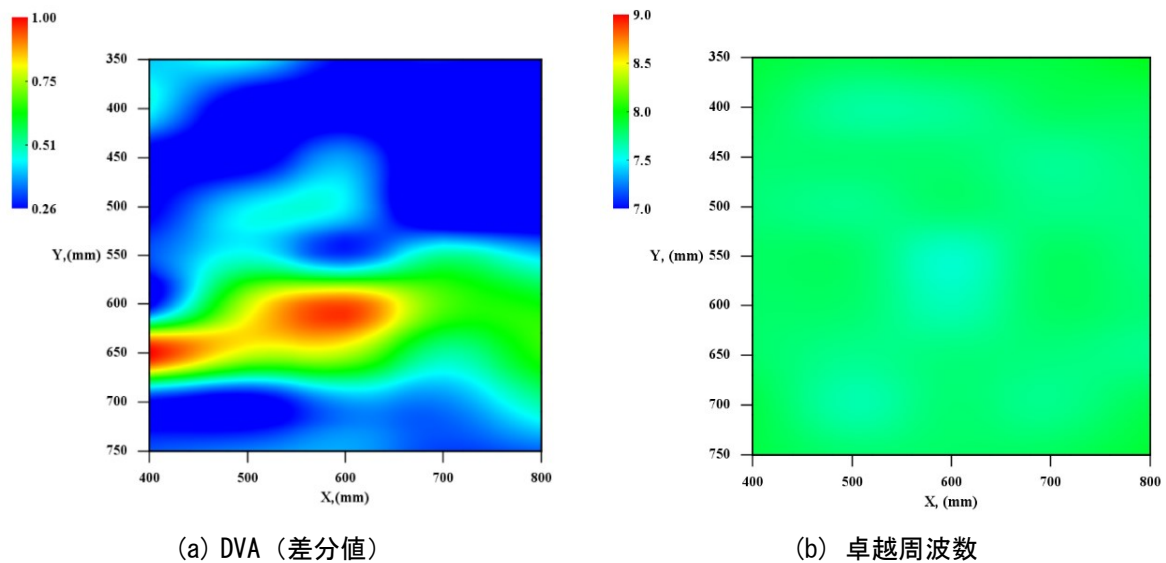


図 5.32 未充填シースの平面可視化結果 ; Case_3 : $\phi_s=33\text{mm}$, Depth=50mm

5.3.5 未充填シース試験体を用いた実験のまとめ

本検討では、差分値を評価指標とした内部欠陥評価手法である DVA の実用性と評価能力を検証することを目的とした模型実験を行った。実験は、未充填シースを埋設したコンクリート試験体を用いて実施し、従来の卓越周波数の評価結果と比較することで DVA の優位性を確認した。その結果、DVA は卓越周波数を指標とした評価手法と同様に、未充填シースを評価することができ、さらに、従来の評価手法では評価が困難であった、比較的に小さなシース管においても定性的な差分値の比較から評価できる可能性が示された。本検討で得られた結果を以下にまとめる。

- 算出データ数の変動によって、入力エネルギーが弾性波の伝搬によって減衰することから、算出データ数が大きい場合、時間領域の減衰の影響を受けた振幅の影響が大きくなることで、入力の振幅の影響が平均化されることから差分値は相対的に小さくなる。対照的に、算出データ数が小さい場合は、時間領域の測定波形に対して入力波長が占める割合が大きくなるため、その影響が強調されることで差分値は大きくなる事を確認した。一方、算出データ数が鋼球の接触時間を満足せず、欠陥（未充填シース）からの反射波が時間領域内の波形に影響を与えない場合、測定波形が入力波（入力信号）そのものを示すことから、算出データ数が小さい場合でも差分値は小さくなることを確認した。
- 算出データ数が欠陥の深さ位置や鋼球接触時間および、測定対象の厚さに基づいた算出データ数の条件を満足しない場合は、内部欠陥を適切に評価することは困難となった。
- 算出データ数が厚さの条件を満足している場合であっても、欠陥部の差分値が特徴的に大きくならないため、内部欠陥の評価が難しくなる場合があることを確認した。一方、算出データ数を増加させると、測定面と欠陥部によって生じる反射波や見かけの伝搬経

路の変化の影響が多重反射することで欠陥位置の差分値が強調され、評価が容易となった。これらの結果から、DVA は適切な算出データ数を選択することで、未充填シースの位置を正しく評価できることが示された。

- 内部欠陥の深さ変化が差分値の大きさに与える影響は小さく、差分値の大きさに基づいて同一径の欠陥の深さを評価することは困難であることを確認した。しかし、欠陥位置が深い場合、差分値の増加領域が広くなることを確認した。このため、差分値の分布傾向から欠陥の深さを評価できる可能性が示された。
- 欠陥の大きさが差分値に与える影響は大きいことを確認した。この結果、差分値の大小関係によって内部欠陥の大きさを評価できる可能性が示された。
- 従来の周波数を用いた内部欠陥評価手法と DVA の評価結果を比較した結果、DVA は従来手法と同等の評価能力を有していることが明らかとなった。また、従来手法では、評価が困難であった比較的小さな未充填のシース管の平面位置を評価できることを示唆した。

5.1 矩形断面を有する試験体を用いた実験

5.1.1 概説

本検討では、差分値を指標とした提案手法が断面形状に左右されることなく、内部欠陥を評価可能であることを確認することを目的とした模型実験を行った。従来の周波数を用いた内部欠陥評価手法の適用が困難とされている矩形断面を有するコンクリート試験体を用いて、提案手法である DVA の実用性と優位性を明確にする。

5.1.2 試験体の概要

図 5.33 に実験に用いたコンクリート試験体の写真を示す。試験体はコンクリート製の正六面体試験体で一辺の長さは 800mm となっている。図 5.34 (a), (b) に試験体の概略図、表 5.11 に試験体の配合条件を示す。試験体には、吊り上げ用の鉄筋と型枠止め用のセバ材が図のように配置されているだけで、その他に鉄筋等は配置されていない。本検討では、この試験体に対して内部欠陥を模擬した空洞を設置し、空洞の存在しない健全時と空洞の存在する非健全時の測定波形から差分値を算出した。測定面は、Z 軸原点側の X-Y 面(Z=0mm)とし、空洞を設置する前の健全時状態を測定した後、表 5.12 の条件で 2 回に分けて空洞を設置した。空洞は、外径 56.0mm のコアビットを使用した削孔機を用いて、図のように試験体の X 軸終点側の Y-Z 面 (X=800mm) から X 軸の起点側に向かって垂直に削孔した。測定面から空洞までのかぶり (空洞の始端面と測定面までの距離) は 100mm とした。最初に設けた空洞を Void_01, 増設した後の空洞を Void_02 として、空洞サイズの増加による差分値を比較した。図 5.35 (a), (b) は空洞設置後の側面 (Y-Z 平面) 写真を示す。

表 5.11 試験体の配合条件

コンクリートの種類による記号	普通
呼び強度 (N/mm ²)	24.0
スランプ (cm)	18.0
粗骨材の最大寸法 (mm)	20.0
セメントの種類による記号	N

表 5.12 削孔した空洞のサイズ

Void size (mm)	X	Y	Z
Void_01	400	56.0	56.0
Void_02	400	95.0	56.0



図 5.33 試験体の写真

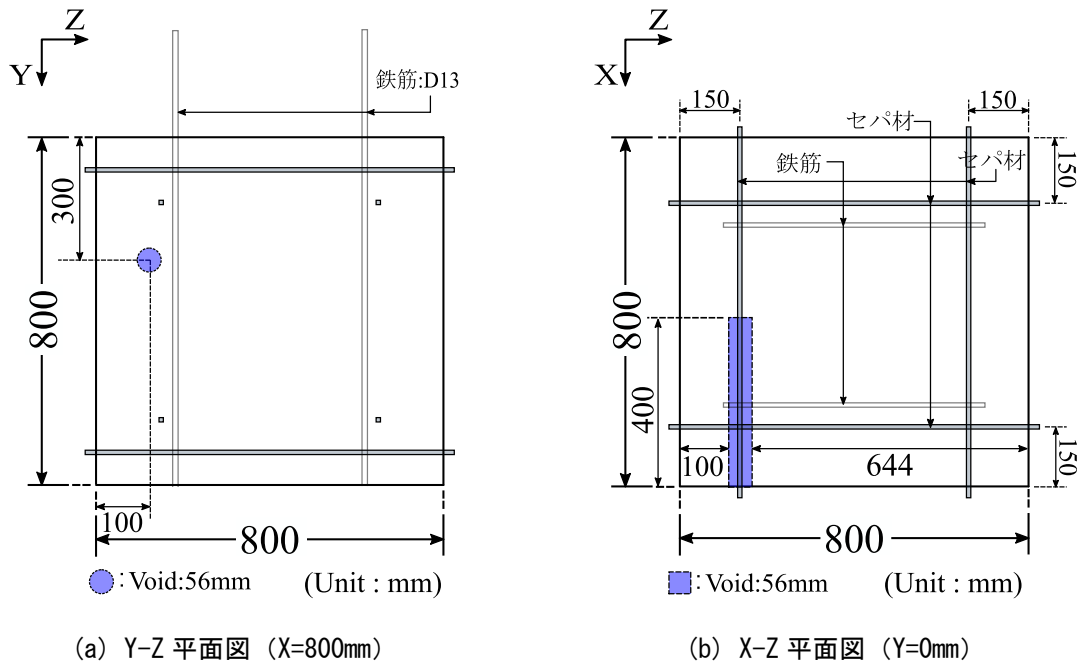


図 5.34 試験体の概略図



図 5.35 空洞削孔後の側面写真 (X=800mm における Y-Z 平面)

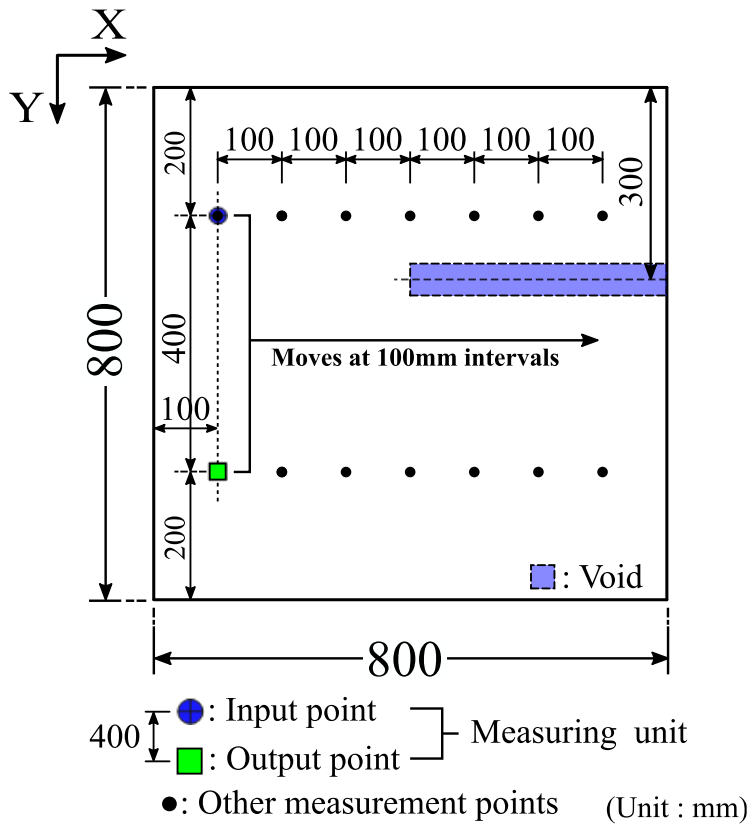
5.1.3 測定の概要

本検討では、DVA の実用性を確認することを目的として、異なる測定条件を設けたふたつの測定ケースによって内部空洞の評価を行った。表 5.13 は、測定ケース別に設けた X-Y 平面上の入力点と出力点の座標値、図 5.36 (a), (b) には表 5.13 の条件で設置した入出力点の位置図と測定の概略図を示す。

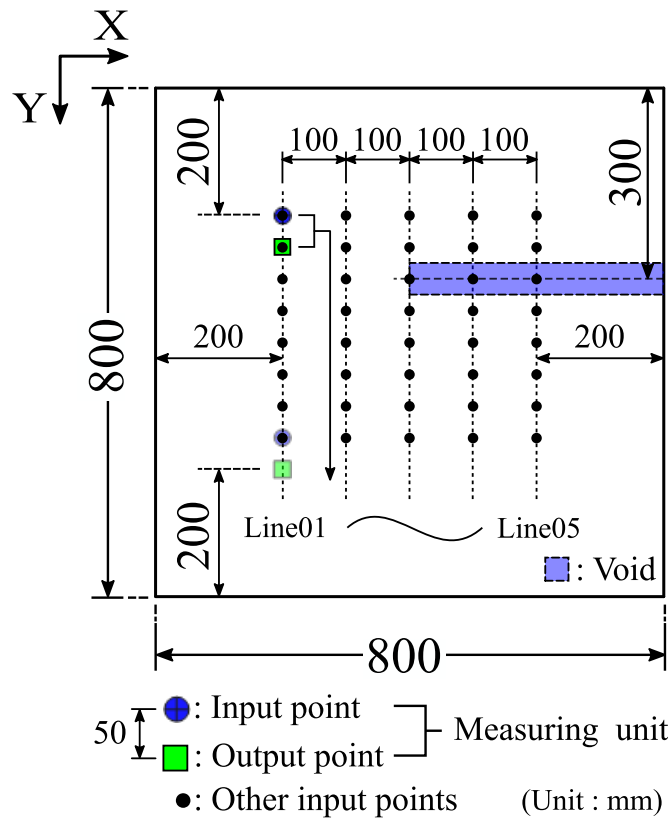
表 5.13 入力点と出力点の座標値

Case		Input point(mm)	Output point(mm)
Case01	X	100~700 @100	100~700 @100
	Y	200	600
Case02	X	200~600 @100	200~600 @100
	Y	200~550 @50	250~600 @50

- Case01 は、空洞位置を簡易的に評価することを目的として測定条件を設定した。このため、入力点と出力点の間隔である測定ユニットを 400mm と広く設定し、1 回の測定で評価可能な範囲を拡張した。これによって、測定時間の短縮や測定範囲の削減を図った。測定範囲は図 5.36 (a) のように設定し、測定ユニットを X 軸方向に 100mm 間隔で順次移動をさせた。この測定条件で得られた結果から、X 軸上の空洞位置の評価を行った。
- Case02 は、空洞の平面的な位置や大きさを詳細に評価することを目的として測定条件を設定した。そのため、Case01 とは対照的に測定ユニットの幅を 50.0mm と狭く設定した。測定範囲は図 5.36 (b) のように試験体の外周から 200mm 内に Line01~Line 05 の 100mm 間隔で 5 測線設けた。測定ユニットは、測線上 (Y 軸方向) に 50.0mm 間隔で移動し、測線上の測定が完了すると、X 軸方向へ 100mm 間隔で移動し、同様の測定を再度実行した。これを表 5.13 示す座標位置の条件で順次測定を行った。



(a) Case01



(b) Case02

図 5.36 測定ケース別の測定手順と入力点と出力点の位置の概略図

測定条件と鋼球接触時間を表 5.14 に示す。受信センサは高感度加速度センサ(352C66-PCB: 100mV/G)を使用し、入力には鋼球直径 32.0mm を用いて同一測点で 5 回測定を行った。測定した波形は差分値の算出フローに従い正規化を行った。なお、表 5.14 に示した各条件は Case01 と Case02 で変化しない。本検討で用いた試験体の縦弾性波速度は、試験体と同配合で作製した円柱試験体(直径: 100mm, 高さ: 200mm)を用いて決定した。円柱試験体に対して、衝撃弾性波法を用いた厚さ測定を実施し、卓越周波数と厚さの関係式 $V_p = 2D_C \times F_{max}$ から縦弾性波速度は 4,200m/s と定めた。表 5.15 は算出データ数別の伝搬時間と伝搬距離の一覧である。差分値の算出に用いた算出データ数 N は正規化後の波形の立ち上がり時刻から表 5.15 に示す条件で段階的に変化させ、算出データ数の変化による差分値を確認した。

表 5.14 測定条件と鋼球接触時間

サンプリング時間間隔	1.00 μ s
測定時間	10.0ms
鋼球直径	32.0mm
鋼球接触時間	144 μ s

表 5.15 算出データ数別の伝搬時間と伝搬距離

算出データ数:N	伝搬時間(μ s)	伝搬距離(mm) [※]
100	100	420
250	250	1,050
500	500	2,100
750	750	3,150
1,000	1,000	4,200
1,250	1,250	5,250
1,500	1,500	6,300
1,750	1,750	7,350
2,000	2,000	8,400

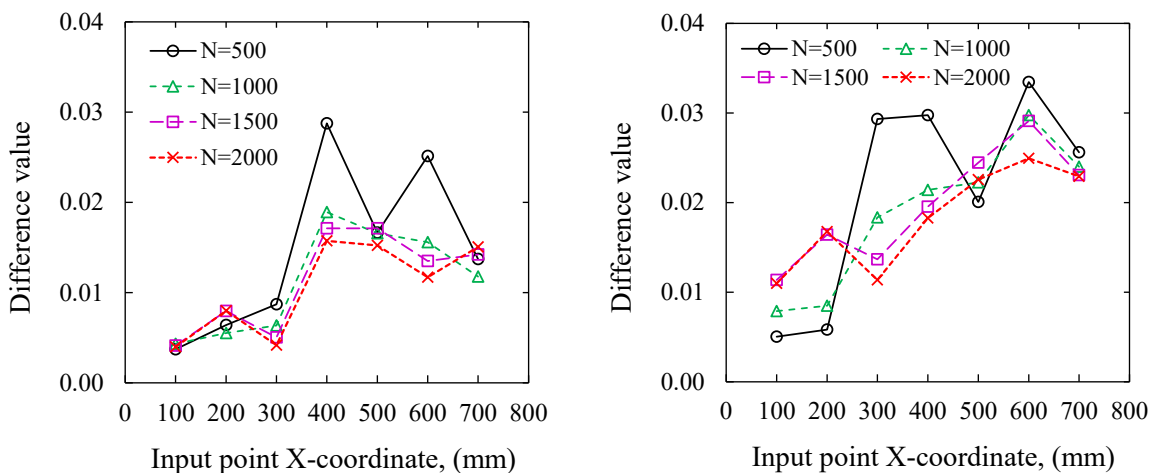
※縦弾性波速度は 4200m/s と仮定して算出

5.1.4 Case01 実験結果

① 算出データ数別の差分値

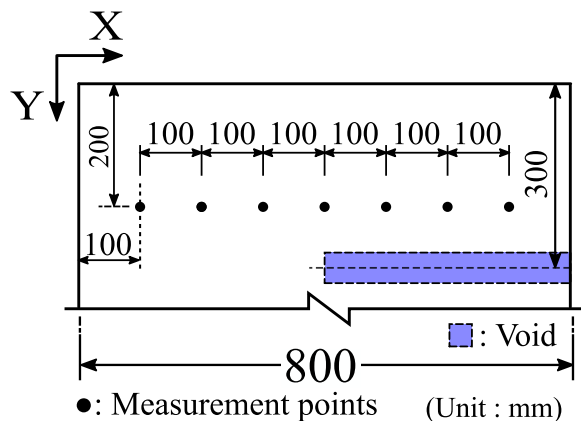
図 5.37 (a), (b) に Case01 における空洞サイズ別の差分値の分布, 図 5.37 (c) に空洞近傍の試験体の X-Y 平面図を示す. 図 5.37 (a), (b) の横軸は測定点の X 座標の位置, 縦軸は差分値, 凡例は算出データ数 N の大きさを示す. いずれのケースにおいても内部空洞の影響によって, 測定点 400mm~700mm 区間で差分値が増加した. 一方, 空洞の存在する区間と比較して, 空洞の存在しない 100mm~300mm 区間で差分値は小さくなり, その差は明瞭に示された. この結果, 差分値の分布から空洞位置を簡易的に評価可能であることが示された.

他方で, 算出データ数の変動によって差分値の分布に変化が生じている. 算出データ数が $N=1000$ 以上では, 差分値の分布変化は小さく安定した分布を示しているが, $N=500$ においては, それらと比べて差分値の分布に変化が生じている. Case01 の測定条件では, 空洞を直交するように入力点と出力点の間隔を設けている. そのため, 測定波形は出力点に到達する前から内部空洞の影響を受けていると考えられる.



(a) Void_01

(b) Void_02



(c) X-Y 平面図 (Z=0mm)

図 5.37 Case01 における差分値の分布図と空洞近傍の X-Y 平面図

図 5.38 (a) ~ (c) に算出に用いた測定波形の一例を示す。図 5.38 (a) および (b) は、図 5.38 (c) の測定波形を切り出した図であり、(a) は切り出し時間 0.0ms~0.5ms、(b) は 0.50m~1.00ms である。図 5.38 (a)、(b) の波形を比較すると、(a) の時間領域における波形の変化は大きく、(b) では小さいことが確認できる。これら切り出し時間別に算出した差分値を図 5.38 (d) に示す。図の横軸は空洞サイズ、縦軸は差分値、凡例は切り出し時間である。Void_01 および Void_02 の条件であっても、時間領域別の差分値から図 5.38 (a) の時間領域における変化が大きいことが明らかとなった。この結果から、入力点と出力点が空洞を直交している場合、弾性波の到達時点で波形に変化が生じており、その影響は時間領域の前半で大きくなることがわかった。そのため、算出データ数が少ない場合であっても差分値が大きくなったと考えられる。しかしながら、いずれの分布においても、差分値が増加した区間と空洞の存在する区間が概ね一致している。以上の結果から、測定ユニットの間隔を比較的に離れた場合においても、差分値の分布から測定ユニットの掃引方向上の空洞位置を評価できる可能性が示された。また、これらの結果は、数値実験によって得られた差分値の分布傾向と概ね一致した。

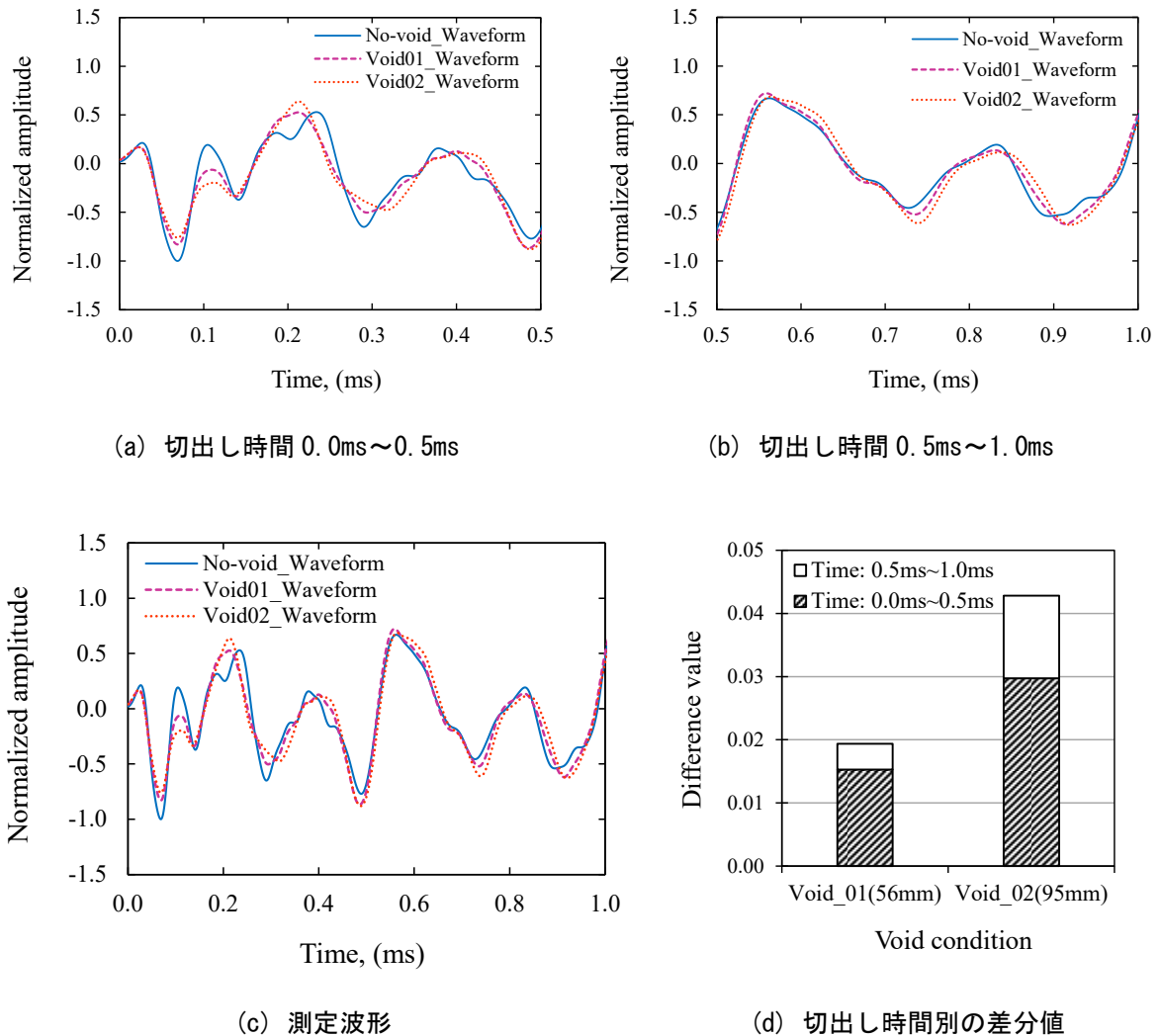
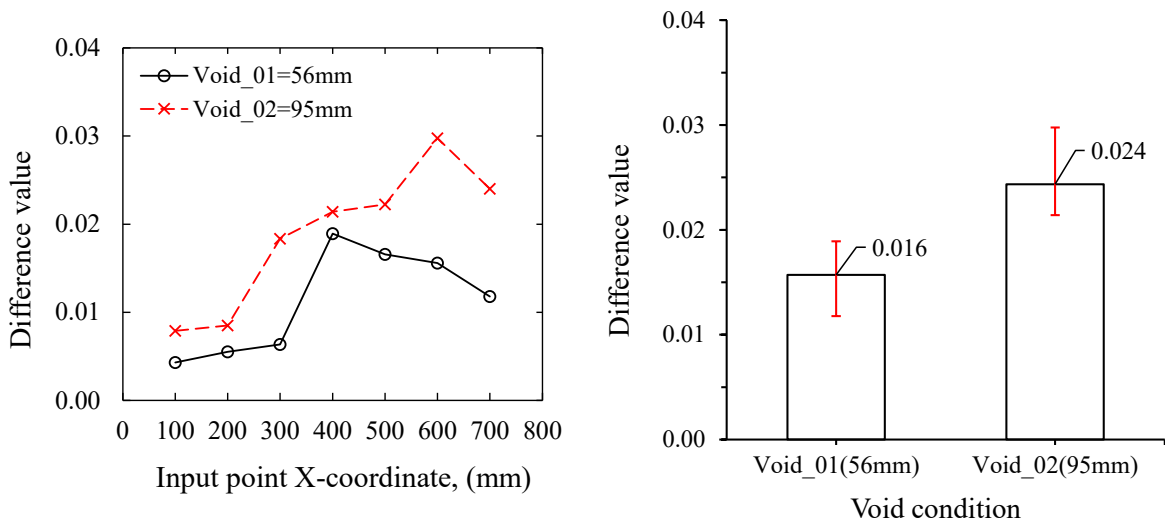


図 5.38 差分値の算出に用いた測定波形；測定ライン：X=400mm

② 空洞サイズと差分値

図 5.39 (a) に、空洞サイズ別に比較した差分値の分布を示す。算出データ数は 1000 個、凡例は空洞サイズである。空洞サイズの増加によって全測点で差分値が増加した。空洞サイズが大きくなることで、空洞による反射波や見かけの伝搬距離の増加によって弾性波の伝搬に与える影響が大きくなる。この結果、弾性波の伝搬変化が広範囲に伝わり、差分値が増加したものだと考えられる。また、空洞を直交する 400mm~700mm 間の 4 つの測線上における差分値に着目し、その区間の差分値を空洞サイズ別に平均化した値を図 5.39 (b) に示す。差分値の平均は Void_01 \approx 0.016, Void_02 \approx 0.024 となり、空洞サイズの増加によって差分値は約 1.5 倍増加した。空洞の平面サイズ比は約 1.7 倍と空洞の増加量に対して少し小さいものの、この差分値の増加は空洞サイズの増加によって生じたものであるため、差分値の大きさから内部空洞の大きさを簡易的に評価できることを示唆している。

以上、Case01 の実験結果から、DVA は簡易的な測定条件においても空洞位置を評価できることを確認した。また、差分値の大きさから空洞サイズの大小を評価可能であることが示唆された。このため、DVA は内部欠陥評価を目的としたスクリーニング手法としての適用性があることが本検討の結果から明らかとなった。



(a) 空洞サイズ別の差分値の比較

(b) 空洞を直交する測線上の平均差分値

図 5.39 Case01 における DVA の結果 (算出データ数 : N=1000)

5. 1. 5 Case02 実験結果

① 算出データ数別の差分値

図 5.40 (a), (b) に Line05 (X=600mm)における算出データ数 N 別の差分値の分布を空洞サイズ別に示す。図の横軸は差分値、縦軸は入力点の Y 座標の位置、凡例は算出データ数の大きさを示す。いずれの空洞サイズにおいても空洞近傍で差分値が増加した。Case02 の測定条件においても算出データ数の変動によって差分値の増減が確認できる。差分値は $N=250$ のときに、ほぼ全ての入力点上で最大を示した。 $N=250$ 以降は、算出データ数の増加に伴い段階的に差分値は減少し概ね同じ分布を示した。一方、 $N=100$ の差分値は $N=250$ と比較して小さく、さらに、差分値の分布傾向が他と異なっている。 $N=100$ のとき伝搬時間 $100\mu\text{s}$ に対して鋼球接触時間は $144\mu\text{s}$ である。また、測定ユニットの距離が近い場合、入力の影響が大きくなることから、測定波形は鋼球の接触状況を表している。このため、入力の影響が算出データ数の大半を占めることから差分値の分布傾向に変化が生じたと考えられる。さらに、 $N=250$ においては伝搬距離が厚さに対して十分ではないが、空洞近傍で差分値が大きく増加している。これは、算出データ数が鋼球接触時間および、空洞の深さ位置を満足しているため、空洞からの反射によって増加したものだと考えられる。これら算出データ数の変動に伴う差分値の分布傾向は、前節の未充填シースの実験結果と概ね同じ結果を示している。また、 $N=2,000$ の差分値の分布からは内部空洞の評価は難しくなる。

以上の結果から、矩形断面の場合においても算出データ数は鋼球接触時間を満足する必要がある。段階的な算出データ数の差分値の分布から欠陥を評価する必要がある。また、算出データ数が過度に大きくなることで内部空洞の評価が難しくなることがわかった。

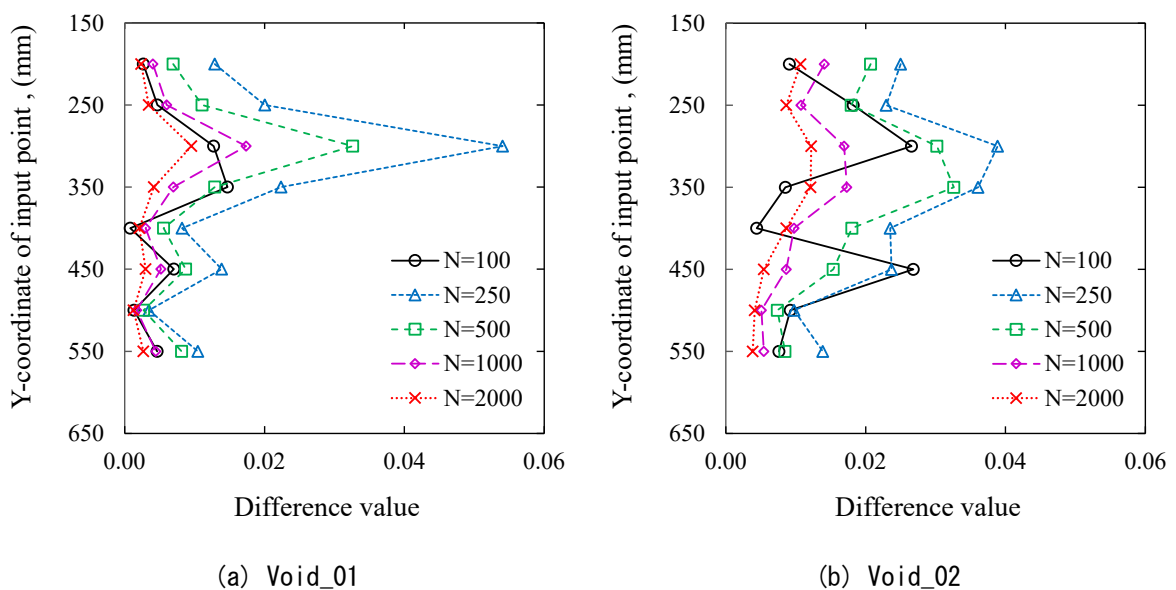


図 5.40 算出データ数別の差分値の分布図 (Line05, X=600mm)

② DVA による空洞位置評価結果

図 5.41 (a), (b) は、試験体の空洞位置と測定面の位置関係を示す概略図、図 5.42 (a) は測定ライン別に算出した Void_01 における差分値、図 5.42 (b) は、Line05 で得られた差分値を空洞サイズ別に示す。差分値の算出データ数 N は $N=1000$ 個である。図 5.42 の横軸は差分値、縦軸は入力点の Y 座標の位置である。図 5.42 (a) において、空洞を直交していない Line01 と空洞を直交する Line05 を比較すると、空洞直上 300mm で明確に差分値が増加した。また、空洞直上以外の差分値は、Line01 の差分値と比較的同じ値で分布していることから、差分値の増加は空洞の影響によって生じたものであるといえる。この結果、相対的な差分値の比較によって内部空洞の位置を評価できることが示された。また、図 5.42 (b) においては、空洞サイズの増加によって全測点で差分値の増加した。特に空洞サイズの増加範囲である入力点 350mm 地点の差分値が顕著に増加した。この結果から、差分値の分布が空洞の平面的な増加範囲を捉えている。

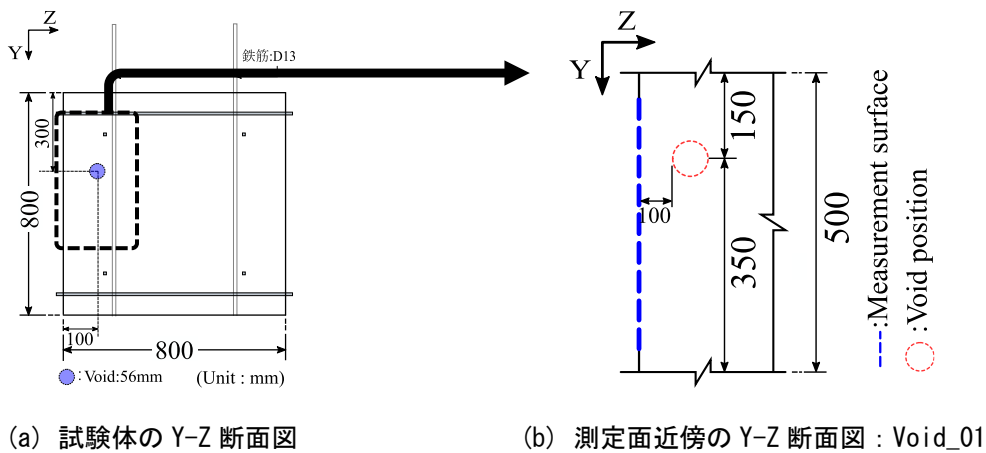


図 5.41 試験体の空洞位置と測定面の位置関係

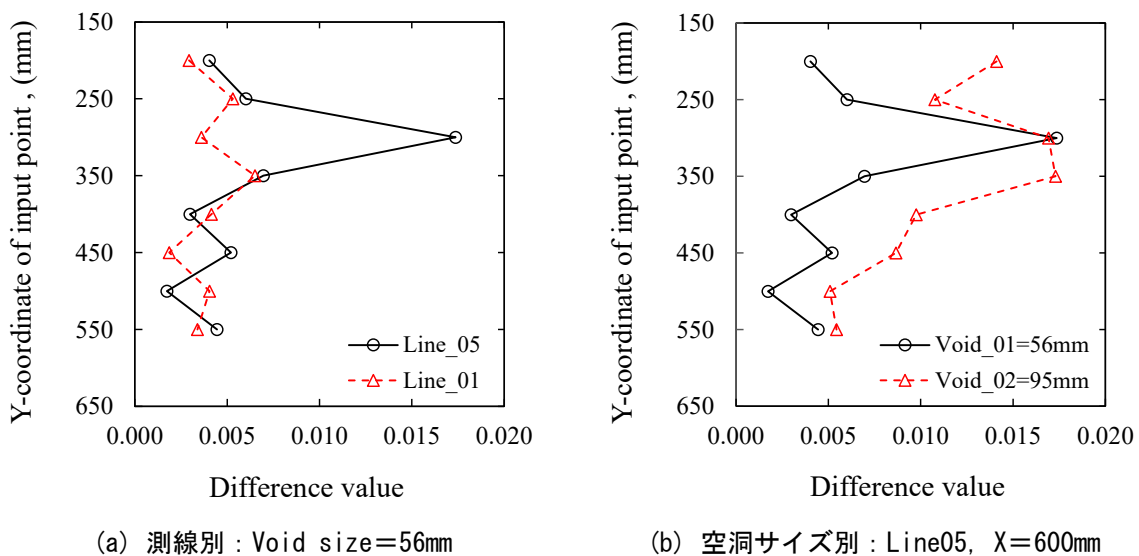
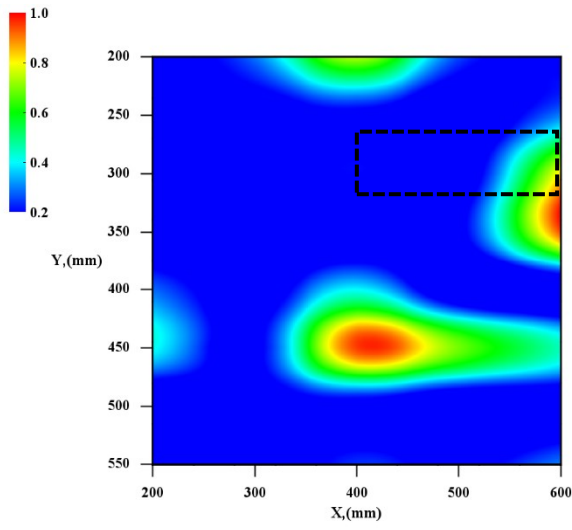


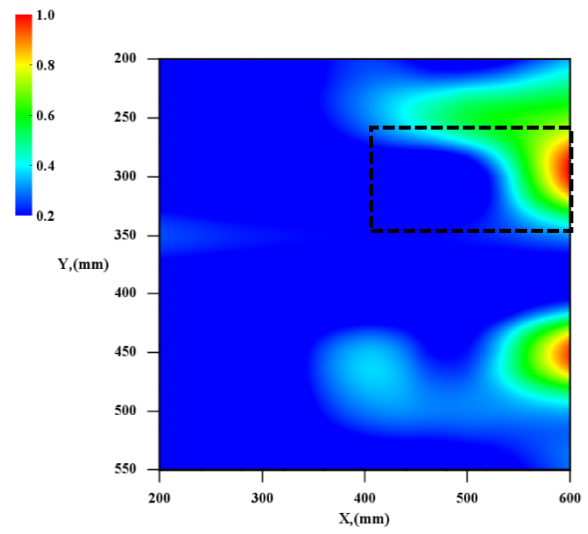
図 5.42 条件別の差分値の比較図

全ての測定ライン上の差分値を、平面的に並べて可視化した結果を図 5.43(a)～(d)に示す。図 5.43(a), (b)は、算出データ数の違いにおける評価結果と比較するため $N=100$ における差分値の分布を用いて可視化した結果である。図 5.43(c), (d)は、 $N=1000$ によって可視化した結果である。図の横軸は X 軸方向の距離、縦軸は入力点を基準とした Y 軸方向の距離、凡例は最大差分値を基準として正規化した差分値の強度である。平面コンタ図内の破線部は内部空洞の位置を示している。図 5.43(a), (b)の結果から差分値は、空洞近傍で高い強度を示しているものの平面的な位置と大きさに差異が生じている。また空洞位置と離れた別の測点に、高い強度を示す領域が存在している。このため、平面的な位置や大きさを適切に評価することは難しい。一方、図 5.43(c), (d)では、空洞位置近傍で高い強度を示し、その領域が空洞位置と概ね一致した。また、空洞サイズの増加によって、高強度を示す領域が増加していることが確認できる。この結果からも、空洞の大きさは差分値の大きさと分布に大きく影響していることがわかった。

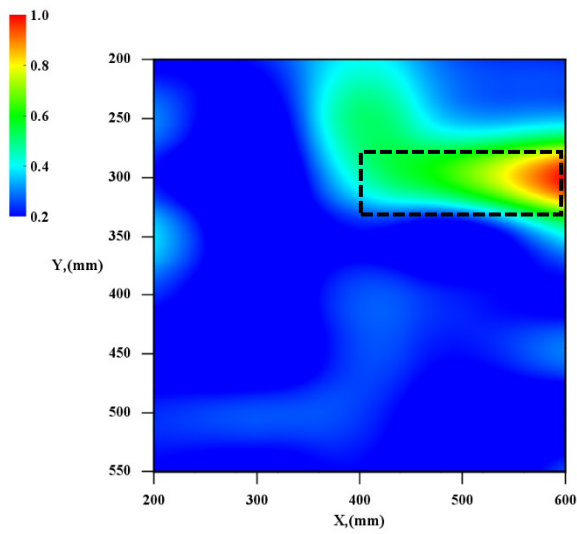
他方で、差分値の相対強度の解釈によっては、空洞と評価される領域に変化が生じることが懸念される。本検討の結果についても、相対強度の判定値が 0.8 を基準として評価した場合、空洞の大きさは過少に評価される。今後、判定値の取り扱いについて検討が必要だと考えられる。しかしながら、空洞近傍で差分値は増加し、相対的な差分値の強度から平面的な大きさと位置は概ね一致することが示された。これらの結果から、差分値を指標とした、DVA は測定対象の形状に左右されることなく、内部欠陥を評価可能であることが示された。



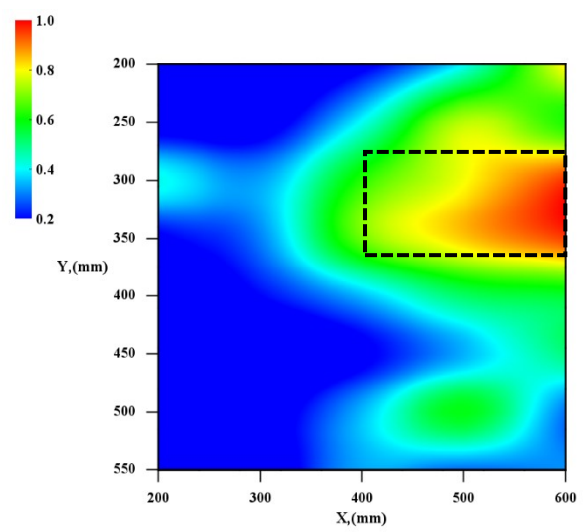
(a) Void_01: N=100



(b) Void_02: N=100



(c) Void_01: N=1000



(d) Void_02: N=1000

図 5.43 DVA による平面可視化結果

5.1.6 実験結果の考察

① 算出データ数と鋼球直径が差分値に与える影響

算出データ数の変化に伴う差分値の増減傾向を把握するため、各測定点における算出データ数別の差分値を $D_N(N=100\sim 2000)$ とし、このときの最大差分値を D_{Nmax} として差分値の大きさを正規化し、平均的な差分値の比率を求めた結果を図 5.44 に示す。差分値は、 $N=250$ で最大となり、 $N=750$ 以上から差分値の減少率が緩やかになっている。これは前節で述べたとおり、算出データ数の増加に伴う減衰の影響と入力波長が占める割合によって生じたものと推察される。図 5.45 (a) に測定波形($N=2000$)、図 5.45 (b) には、(a) の波形の立ち上り時刻から $N=500$ を切り出したものを示す。図 5.45 (a) から、測定波形の初動振幅に対して、時間領域の後半では減衰の影響によって振幅が減少している。つまり、算出データ数が多くなることで差分値が相対的に減少することは明らかである。対照的に、図 5.45 (b) のように算出データ数が少ない場合は、初動振幅の影響が時間領域に対して増加することから差分値は大きくなる。

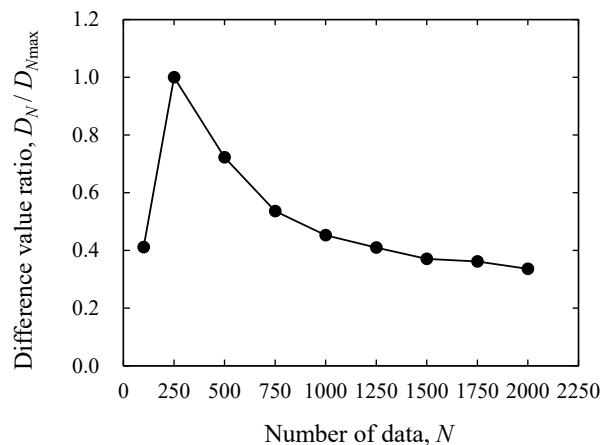
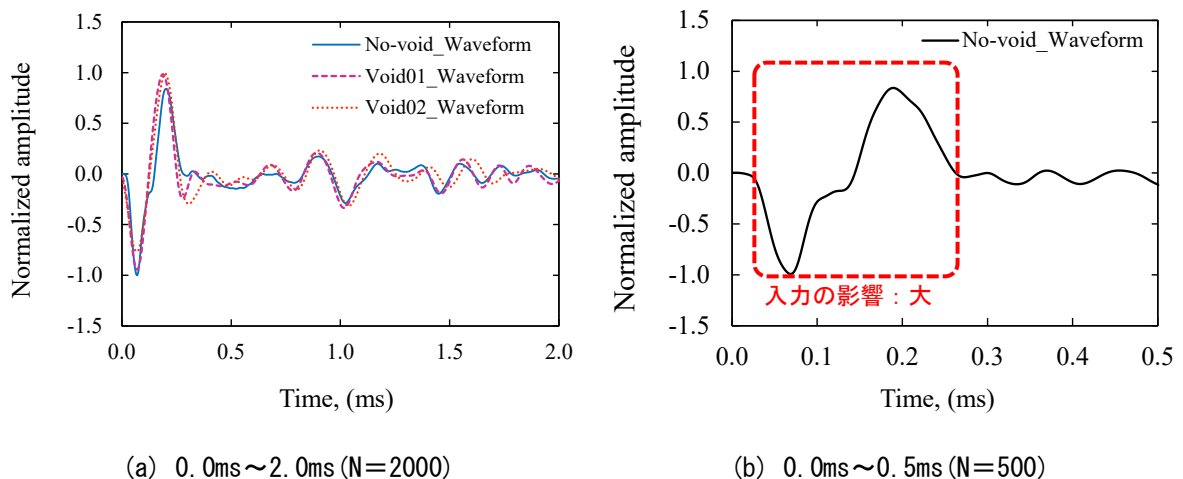


図 5.44 最大差分値と算出データ数別の差分値の比率



(a) 0.0ms~2.0ms (N=2000)

(b) 0.0ms~0.5ms (N=500)

図 5.45 測定波形 (Line05 : X=600mm)

② DVA を用いた定量的な内部欠陥評価の課題

測定波形の初動振幅が占める時間は、入力波長である鋼球接触時間 T_C に依存することが知られている[5.11]。この鋼球接触時間は図 5.46 に示すように測定波形の立ち上がり部の初動振幅に影響する。また、この鋼球接触時間の長さは、入力に用いた鋼球の直径によって変化する。したがって、立ち上がり時刻を基準として差分値を算出する DVA では、算出データ数を統一したとしても、入力に用いた鋼球の直径によって算出データ数内を占める割合が変動することから、差分値の大きさも変動する。つまり、鋼球直径が異なる場合は、差分値の大きさから定量的に内部空洞の大きさや深さを評価することは現時点では難しい。一方、図 5.44 において $N=750$ 以上から差分値の減少率が緩やかになったことを確認した。この結果、算出データ数の増加によって差分値の大きさが安定するものだと判断できる。このため、同じ鋼球直径を用いて測定した場合、差分値が安定する算出データ数を確認し設定することで、差分値の大きさから内部空洞の大きさを定量的に評価できる可能性がある。また、鋼球接触時間が算出データ数を占める割合と差分値の大きさに与える影響を明らかにすることで、差分値を用いた定量的な内部欠陥評価が可能になるものだと考えられる。以上のことから DVA の評価指標である差分値の大きさから単純に内部欠陥の大きさを評価することは難しい。また、入力条件が異なる場合、定量的な評価には上述した課題が残っている。

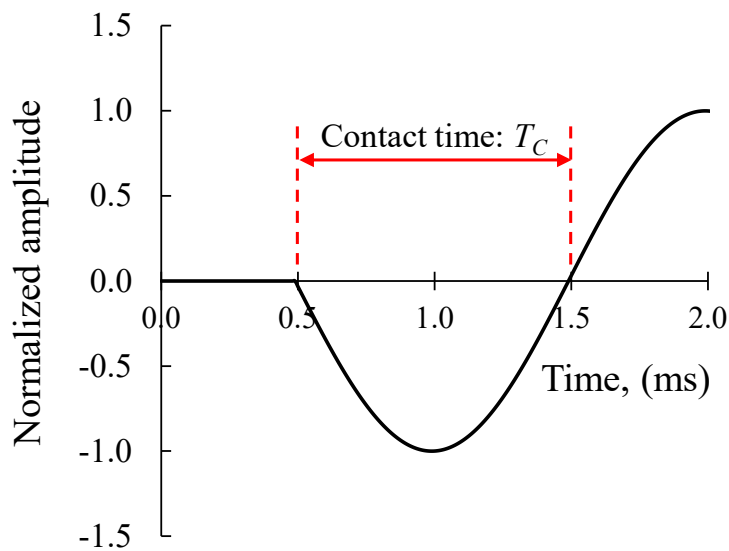


図 5.46 測定波形の立ち上がり部と鋼球接触時間の関係

5.1.7 矩形断面を有するコンクリート試験体を用いた実験のまとめ

本検討は、従来の周波数を指標とした内部欠陥評価手法の課題である断面形状の制約を満足していることを確認することを目的として、矩形断面を有する正六面体のコンクリート試験体を用いて、DVAの実用性を検討することを目的とした実験を行った。試験体に内部欠陥を模擬した空洞を設け、衝撃弾性波法によって得られた測定波形から差分値を算出し、内部空洞の評価を行った。以下に結果をまとめる。

➤ Case01：簡易測定結果のまとめ

- 測定ユニットが離れた場合においても、算出データ数 N の変動によって差分値の大きさと分布に影響を与えることを確認した。また、差分値の大きさは、算出データ数の増加に伴い減少し、その分布は $N=1000$ 以降で安定することがわかった。
- 測定ユニットの間隔を 400mm に設定し測定した結果、空洞を直交する測定線上で差分値が増加することを確認した。この結果、本検討の測定条件であれば掃引方向の空洞位置を簡易的に評価できることがわかった。
- 空洞を直交する測線上の差分値は、空洞サイズが大きくなることで増加することを確認した。この結果、差分値の大きさから空洞の平面的な大きさを簡易的に評価可能であることが示唆された。

➤ Case02：詳細測定結果のまとめ

- 算出データ数 N の変動によって差分値の大きさと分布に影響を与えることを確認した。また差分値は、算出データ数の増加に伴い段階的に減少することを確認した。
- 矩形断面を有する試験体においても、鋼球接触時間を満足しない算出データ数 N の差分値から、内部空洞の平面的な位置を評価することは難しいことがわかった。
- 算出データ数 N が厚さの条件を満足しない場合であっても、空洞深さ位置と鋼球接触時間を満足した場合は空洞位置で差分値が増加した。
- 矩形断面を有する試験体の場合、算出データ数が厚さに対して過度に大きい場合、内部欠陥の平面位置を評価することは難しくなる場合があることを確認した。
- 差分値の相対的な強度分布から内部空洞の平面的な位置を可視化できることを確認した。また DVA は、空洞増加に伴う差分値の平面的な広がりをつまえることが可能であった。この結果、DVA は空洞の平面的な位置と大きさを評価可能であることが示された。

以上の結果から、応答波形の時系列変化量である差分値を指標値とした DVA は、測定対象の形状に左右されることなく、内部欠陥を評価できることが実験的検討から示された。また、簡易的なスクリーニング調査手法としても適用できる可能性が示されたことから、DVA は、実用的な非破壊検査手法として有効である。

第5章の参考文献

- [5.1] 池端宏太, 小林義和, 小田憲一, 中村勝哉: 時系列応答波形を用いたコンクリート板の内部空洞評価の実験的検討, 日本非破壊検査協会秋季講演大会講演概要集, pp.93-96, 2019.
- [5.2] 池端宏太, 小林義和, 小田憲一, 中村勝哉: 時系列応答波形の変化量(差分値)を指標としたコンクリート構造物の内部欠陥評価, 「超音波テクノ」特集 超音波等を適用したプラントの保守検査, 日本工業出版株式会社, 2021. (投稿済, 掲載予定)
- [5.3] Ikebata, K.; Kobayashi, Y.; Oda, K.; Nakamura, K.: Evaluation of Unfilled Sheath in Concrete Structures Using Response Waveform in Time Domain. *Appl. Sci.*, Vol.11, 2021, 11402.
- [5.4] 国土交通省, 基本問題小委員会: 建設工事への工場製品の一層の活用に向けた環境整備について, 国土交通省配布資料, 2018.
- [5.5] JISA5365:プレキャストコンクリート製品—検査方法通則, *Japanese Industrial Standards*, 2016.
- [5.6] 玉越隆史, 平賀和文, 木村嘉富土木技術資料: PC 鋼材の腐食損傷への対応事例—妙高大橋のグラウト未充填と鋼材腐食の調査—, 現場に学ぶメンテナンス; 土木技術資料 Vol.54-5, 2012.
- [5.7] 横田敏広, 睦好宏史, Isuru WIJAYAWARDANE: PC 鋼材が破断した PC 桁の力学的性状に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.38, No.2, pp.487-492, 2016.
- [5.8] 横田敏広, Isuru WIJAYAWARDANE, 睦好宏史: 腐食した PC 鋼材を有する PC 梁の耐荷力特性と解析的性能評価手法の検討, 土木学会論文集 E2(材料・コンクリート構造), Vol.74, No.4, pp.218-233, 2018.
- [5.9] Zou, C.; Chen, Z.; Dong, P.; Chen, C.; Cheng, Y.: Experimental and Numerical Studies on Nondestructive Evaluation of Grout Quality in Tendon Ducts Using Impact-Echo Method, *J. Bridge Eng.* Vol.21, 2014, 04015040.
- [5.10] 渡辺健, 大津政康, 友田祐一: インパクトエコー法による PC グラウト充てん度評価に関する考察, 「材料」J.Soc. Mat. Sci. Japan, Vol.48, No.8, pp.870-875, 1999.
- [5.11] 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コンクリートの未充填グラウト部検出の改良, 土木学会論文集 E2(材料・コンクリート構造), Vol.65, No.2, pp.208-215, 2009.
- [5.12] 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(材料・コンクリート構造), Vol.73, No.2, pp.239-250, 2017.
- [5.13] Carino, N.J.: THE IMPACT-ECHO METHOD: AN OVERVIEW, Reprinted from the Proceedings of the 2001 Structures Congress & Exposition, 18 p, May 21-23, 2001.
- [5.14] Carino, N.J.: Impact Echo: The Fundamentals, NDT.net, 2015.

第6章 結論

本論文では、コンクリート構造物を対象とした非破壊検査手法である衝撃弾性波法によって得られる応答波形の周波数を指標とした内部欠陥評価手法の課題を克服することを目的として、新しい評価指標として差分値を提案した。差分値は、衝撃弾性波法における測定方法固有の測定誤差について検討を行い、測定方法および測定波形の正規化に関する手順を定め、差分値の算出方法を明確に示した。また、評価指標である差分値の有用性と実用性を検討することを目的として、数値実験およびコンクリート試験体を用いた実験を行い、算出条件、測定条件、内部欠陥が差分値に与える影響について精査した。この結果、差分値を指標とした新しい内部欠陥評価手法である DVA の評価能力と優位性が明らかとなった。以下に本研究で得られた結果を要約した結論を示す。

① 数値実験による基礎検討

➤ 算出データ数と差分値

- 差分値は、算出データ数の変動に伴い変化することを確認した。また、その増減傾向は算出データ数が多くなることで増加した後、特定の算出データ数以降から差分値の変動が少なくなることを確認した。
- 算出データ数の変動による差分値の分布変化と増減から、算出データ数が入力波長の時間幅を満たさない場合、入力点近傍で差分値が大きく減少することを確認した。この結果、算出データ数は入力波長以上の時間を満たす条件を設定する必要があることがわかった。
- 内部欠陥の直上を入力点とした場合、欠陥の影響を受けた弾性波が広範囲に伝搬することから、欠陥と離れた出力点の差分値は算出データ数の増加に伴い大きくなることを確認した。また、入力点と内部欠陥が離れた場合であっても、算出データ数の増加によって差分値が広範囲で増加し、欠陥位置の評価が難しくなることがわかった。

以上の結果から、数値実験によって差分値の算出データ数は、入力点と出力点の関係および評価対象の領域、入力波長等の条件から適切に設定する必要があることが示された。

➤ 入力点条件と差分値

- 入力点と内部欠陥の位置関係が変化することで、欠陥近傍の差分値の大きさと差分値の分布に変化が生じることを確認した。差分値は入力点と内部欠陥が離れた場合、欠陥近傍の出力点から差分値の増加が始まり、入力点を基準とした出力点が欠陥を越えた場合に大きく増加した。一方、欠陥の手前側の出力点では差分値の増加が生じないことを確認した。この結果、差分値の増加開始点や分布傾向から欠陥位置を簡易的に評価できる可能性が示された。このため、差分値を用いた内部欠陥評価手法は入力点と出力点の間隔を広げることで、広範囲の内部欠陥評価手法として利用できることが示唆された。
- 三次元モデルでは、欠陥直上を入力点とした場合、弾性波が同心円状に広がりながら伝搬することから、得られる差分値が欠陥から離れた出力点で最大となり、二次元モデルと異なる傾向を示した。一方、入力点が欠陥から離れた場合は、欠陥近傍で差分値が最大となった。この結果から、三次元モデルにおいて内部欠陥の位置を評価する際は、欠陥から離れた入力点から得られる差分値の分布から、内部欠陥の平面位置を評価することが有効であることを確認した。

以上の結果から、二次元モデルおよび三次元モデル共通して、入力点が内部欠陥から離れた条件であっても、欠陥近傍の出力点の差分値から内部欠陥の位置を評価できる可能性が示された。一方、欠陥近傍を入力点とした場合は、異なった差分値の傾向を示した。このため、測定対象の形状によって差分値の増減傾向に変化が生じる可能性があることを確認した。

➤ 内部欠陥の状態と差分値

- 入力点が内部欠陥近傍の場合、差分値は、欠陥の幅（入力面と平行な面の長さ）が大きくなることで増加した。また、幅の増減が差分値に与える影響は大きく、差分値と欠陥幅には良好な増減関係があることを確認した。一方、欠陥の高さ（入力面と垂直な面の長さ）の変化は、差分値の大きさに与える影響は小さい。しかし、差分値の分布に対しては、相対的に大きく影響することを確認した。これらの結果から、差分値の大きさから欠陥の平面的なサイズを評価できる可能性が示され、差分値の分布から欠陥の高さを評価できる可能性があることを示唆した。
- 欠陥高さの増加によって生じる差分値の変化は、欠陥直上を入力点とした場合、欠陥近傍の出力点の影響は小さく、欠陥高さとの相関は小さいことを確認した。一方、欠陥直上以外を入力点とした場合、複数の出力点において差分値は一定の増加傾向があることを確認した。特に、入力点と出力点が欠陥に近づき、それらが欠陥を直交しない測定点の条件では、欠陥高さとの間に良好な相関関係が示された。この結果から、入力点と出力点の設定によって欠陥高さを評価できる可能性が示された。
- 欠陥深さ位置の変化が差分値に与える影響は大きく、欠陥近傍の差分値は入力面と欠陥

の距離が浅い場合に増加し、深くなることで大きく減少した。また、差分値と欠陥深さには良好な増減関係があることが示された。

- 差分値は、三次元の場合においても、欠陥サイズや欠陥深さ位置の条件変化によって変化した。欠陥サイズが大きく欠陥深さ位置が浅い場合に最大となり、欠陥サイズが小さく深い場合に最小となった。この結果、差分値の大きさから、内部欠陥のサイズと深さを簡易的に絞ることが可能であることが示唆された。
- 欠陥サイズの変化は、差分値の分布に対する影響は小さいことを確認した。一方、欠陥深さ位置の変化は、欠陥サイズと比較して差分値の分布に与える影響が大きいことを確認した。この結果から、三次元モデルにおいては、差分値の分布傾向から欠陥深さ位置を評価できる可能性が示された。

数値実験による基礎検討によって内部欠陥の状態が差分値に与える影響は以下のようにまとめられる。

- I. 内部欠陥の幅が差分値に与える影響は大きく、差分値と良好な増減関係がある
- II. 内部欠陥の高さが差分値に与える影響は小さいが、差分値の分布に与える影響は相対的に大きい
- III. 内部欠陥の高さは、入力点が欠陥直上から離れた場合に欠陥近傍の出力点で良好な増減関係ある
- IV. 内部欠陥の深さ位置が差分値とその分布に与える影響は大きく、さらに差分値と良好な増減関係がある

以上、数値実験の検討から、内部欠陥の条件変化による差分値の傾向と増減関係が明らかとなり、この関係から内部欠陥の評価が可能であることが示唆された。このため、応答波形の時系列変化量である差分値は、内部欠陥を評価する指標として有用であることが数値実験によって示された。

② コンクリート試験体を用いた実験的検討

➤ 製品の違いによるばらつきと測定波形の変化

- コンクリート二次製品である既製品土止め板を用いた実験によって、同一製品を測定した正規化後の波形のばらつきは小さく、差分値に与える影響は小さいことを確認した。また、時間領域の測定波形は、入力点と出力点の関係が左右対称である場合、同じ波形の形状を示すことを実験的に確認した。これらの結果から、製品が同じで同一の測定条件であれば、平均化したひとつの健全時応答波形を用いて複数の試験体を評価できる可能性が示された。

➤ 算出データ数と差分値

- 実際の測定波形を用いた場合においても、算出データ数の変動によって、差分値の大きさと分布に変化が生じることを確認した。既製品土止め板を用いた実験結果では、算出データ数の増加に伴い、差分値は相対的に増加する傾向があることを確認した。対照的に、算出データ数が少ない場合に差分値は大きく減少した。この算出データ数の変動に伴う差分値の変化は、二次元モデルを用いた数値実験と概ね同じ傾向を示した。また、試験体が板状であることから減衰の影響が小さく試験体のサイズも小さいため、算出データ数の増加によって差分値が試験体の端部で大きくなることを確認した。特に内部欠陥が深くなることで端部への影響は大きくなった。これに対して、欠陥深さ位置が浅い場合は、差分値の分布傾向は算出データ数の増加に伴い安定することを確認した。この結果、比較的浅い内部欠陥の評価は容易であることを確認した。一方、未充填シーす試験体および矩形断面を有する試験体においては、測定面が三次元的な広がりを持っていることから、入力のエネルギーが弾性波の伝搬によって減衰した。このため、算出データ数が多い場合、時間領域の減衰の影響を受けた振幅の影響が大きくなることで、入力の振幅の影響が平均化されることから差分値は相対的に小さくなった。対照的に、算出データ数が少ない場合は、時間領域の測定波形に対して入力波長が占める割合が大きくなるため、その影響が強調されることで差分値は大きくなる事を確認した。以上の結果、算出データ数の変動は、板状と平面的な広がりを持つ平面上の測定面に違いによって異なる傾向を示すことがわかった。
- 算出データ数が入力に使用した鋼球接触時間（入力波長の時間幅）を満足しない場合、差分値は増加しないことを確認した。また、この算出データ数では、内部欠陥の評価は困難になることが実験によって示された。さらに、欠陥からの反射波などが時間領域内の波形に影響を与えない算出データ数の場合も、同様に差分値から内部欠陥を評価することは難しいことを確認した。この結果、算出データ数が厚さに対して適切ではない場

合、内部欠陥を評価することは困難になることが示された。一方、欠陥位置が浅く大きい場合は、算出データ数が厚さに対して満足していない場合であっても評価可能であることを確認した。

- 算出データ数が厚さの条件を満足している場合であっても、欠陥部の差分値が特徴的に大きくならない場合、内部欠陥の評価が難しくなることを確認した。この場合、厚さに対して算出データ数を段階的に多くすることで、欠陥部によって生じる反射波や見かけの伝搬経路の変化の影響が多重反射することで欠陥位置の差分値が強調された結果、評価が容易となった。しかし、算出データ数を厚さに対して過度に多くした場合は、内部欠陥の影響が広範囲に広がりことにくわえて減衰の影響が大きくなることから、内部欠陥を評価することは難しくなることを確認した。以上の結果から、内部欠陥の位置を正しく評価するには、厚さの条件を満たす算出データ数を段階的に増加させ、適切な算出データ数を選定する必要があることがわかった。
- 入力点と出力点の距離が通常の測定条件より離れた場合においても、算出データ数の変動によって差分値の大きさと分布が変化することを確認した。この場合に、入力点と出力点が内部欠陥を直交すると差分値の大きさは、算出データ数が多くなることで減少し、その後、一定の大きさから安定した分布を示すことを確認した。

以上の結果をまとめると、コンクリート試験体を用いた実験的検討においても、算出データ数の変動によって差分値の大きさと分布が変化した。また、測定対象の形状によって、減衰の影響が異なることから算出データ数の設定に留意する必要があることを確認した。

➤ 入力点の条件と差分値

- 既製品土止め板を用いた実験では、入力点と欠陥の深さ位置の関係によっては、欠陥近傍で明確に差分値が増加しない場合があることを確認した。しかし、その他の入力点では、差分値が欠陥近傍で増加した。また、入力点が欠陥から離れた場合、差分値が増加するケースが多いことを確認した。加えて、入力点の位置によっては差分値の増加量と欠陥サイズの大きさに良好な関係があることを示された。さらに、矩形断面を有する試験体の場合においても、欠陥を直交する測定線上で差分値が増加することを確認した。また、欠陥を直交する測線上の差分値は、欠陥サイズが大きくなることで増加することを確認した。この結果、差分値を指標とした内部欠陥評価手法は、測定対象の断面形状にかかわらず掃引方向の欠陥位置を簡易的に評価可能で、さらに差分値の大きさから欠陥の平面的な大きさを簡易的に評価可能であることが示された。

この結果から、提案手法は簡易的なスクリーニング調査手法としても適用できる可能性が明らかとなった。

➤ 内部欠陥の状態と差分値

- 差分値は、健全時状態の試験体および欠陥の存在しない健全な領域においては、測定手法固有のばらつきによって生じる一定の分布を示すことを確認した。一方、内部欠陥部では、健全部と比較して差分値は相対的に大きくなった。このことから、内部欠陥によって差分値が増加することが実験によって示された。この結果、差分値が評価指標として有用であることがコンクリート試験体を用いた実験によって明らかとなった。
- 差分値は、実験的検討においても欠陥サイズの増加に伴い相対的に増加した。特に、欠陥近傍を入力点として場合に増加した。
- 既製品土止め板を用いた実験では、欠陥深さ位置が浅くなる事で差分値は増加した。この欠陥サイズと欠陥深さ位置の変化に伴う差分値の増加傾向は二次元モデルの数値実験と同じである。さらに、これら欠陥によって変化する差分値と内部欠陥の間には、高い相関関係があることが示された。
- 未充填シーす試験体を用いた実験では、内部欠陥の深さ変化が差分値に与える影響は小さく、差分値に基づいて同じ大きさの欠陥の深さを評価することは困難であることを確認した。これは、数値実験の結果と真逆である。しかし、欠陥位置が深い場合、差分値の増加領域が広がることを確認した。このため、差分値の分布傾向から欠陥の深さを評価できる可能性を確認した。一方、欠陥の大きさが差分値に与える影響は大きく、差分値の大小関係によって内部欠陥の大きさを評価できる可能性が示された。また、従来の周波数を用いた内部欠陥評価手法と比較した結果、提案手法は従来手法と同等の評価能力を有していることが示された。さらに、従来手法では、評価が困難であった比較的小さな欠陥の平面位置を評価できることが示された。加えて、矩形断面を有する試験体であっても内部欠陥の位置を評価可能であることが示され、相対的な差分値の強度分布を用いて可視化した結果から、欠陥の増加に伴う差分値の平面的な広がりを確認することが可能となった。

これまでに示した結果から、応答波形の時系列変化量である差分値を指標値とした内部欠陥評価手法は、測定対象の形状に左右されることなく、内部欠陥を評価できることが実験的検討から示された。また、簡易的なスクリーニング調査手法としても適用できる可能性が示されたことから、実用的な非破壊検査手法として力を発揮することが期待される。

以上、本研究の成果は、従来の周波数を用いた内部欠陥手法の課題を満足するものであり、実務的なコンクリート構造物の新しい内部欠陥評価手法として、コンクリート構造物の維持管理に寄与するものであると考えられる。

③ 今後の展望と課題

差分値を評価指標とした内部欠陥評価手法である DVA は、新設構造物やコンクリート二次製品等を利用した構造物に対しては、適用可能な構造形状や設置環境の制約等が少ないことから、活躍できる場面が多いと考えられる。このため、今後建設される構造物の品質管理および維持管理に寄与することが期待される。また、評価手法の特徴である「測定条件の不変性」と「評価の単純化」によって技術の標準化が容易であることから、技術者の能力に依存せずに安定した評価結果を提示することが可能であると考えられる。この結果、多く技術者に利用され、健全時応答波形および評価結果の蓄積を期待している。一方、評価手法固有の検討課題と適用課題が残っている。以下に、考えられる課題を示す。

➤ 入力方法と測定波形の情報精査

衝撃弾性波法は打音法（計測器を用いた打音法）と同じく簡便な測定手法であり、構造物内部を伝搬する弾性波を用いることで比較的深い位置を評価可能である。しかし、2章で述べたとおり、衝撃弾性波法は安定した測定手法だとは言い難い。また、コンクリートそのものも鉄やアルミなどと比較して材料の不均質性が大きく、安定した材料とは言い難い。このため、測定波形の再現性について課題があると考えられる。その一方で測定が単純で、時間あたりの検査範囲が広く、さらには、長距離を伝搬する弾性波を励起することが可能であるため、コンクリート構造物の測定に適している。しかし、入力方法が安定していないが故に、差分値の算出時に実施する測定波形の正規化によって、入力に対する振幅など有益だと考えられる情報が失われている。そのため、安定した入力装置の開発や適用によって、応答振幅を踏まえた内部欠陥評価が可能になるものだと考えられる。また、本研究では、応答波形の時系列変化量に限定して検討しており、その他の周波数成分等の変化について検討していない。測定波形から得られる情報（指標）は、差分値だけではなく、振幅、周波数など、有益な情報が存在するため、これらの変化量を定量的に健全時応答波形から求めることで、内部欠陥評価の検出精度の向上につながることを期待できる。そのため、これらの物理情報について、今後、精査する必要がある。

➤ 既設構造物に対する評価手法の適用限界

評価指標である差分値は、構造物の完成直後あるいは出荷前を健全時として、予め測定した応答波形に基づいて算出される応答波形の時系列変化量である。そのため、健全時応答波形の取得が困難である既設構造物に対して適用することができない。この課題を克服することが、提案手法の大きな課題であると認識している。一方、土木構造物に限らず、構造物の形状は類似したものが存在する場合が多い。また、5章の既製品土止め板を用いた実験で示したように、形状が同じであれば製品の違いによるばらつきは小さいことを確認している。そのため、構造物の材料強度に大きな違いがなければ、同一形状を有する健全時応答波形を用いることで内部欠陥を評価できる可能性がある。このことを明らかにするには、既設構造物と同一形状を有する試験体を作成する実証実験等の検討が必要である。これと他に、本研究で用いた数値シミュレーション等を利用した健全時応答波形の生成にも期待ができる。数値実験における二次元モデルについては、実験値と概ね同じ傾向を示していることが本研究成果から示されている。しかし、三次元モデルにおいては、数値実験値とコンクリート試験体を用いた実験値に差異が生じている。このため、計算結果と実現象になにかしらの差異が生じていることがわかる。数値シミュレーションによって物理現象を完全に再現することは難しいものだと考えられるが、仮に、数値シミュレーションによって、健全時応答波形の生成が可能となれば、提案手法のみならず衝撃弾性波法を用いた内部欠陥評価手法の大きな飛躍につながると考えられる。今後、検討を進める必要がある。

以上、提案手法には、入力装置の課題、これに付随して取得した波形の周波数や振幅等に着目し、それらの変化量を評価指標とした情報精査が必要である。特に、評価技術としての適用範囲に課題が残っている。しかしながら、一連の検討結果から、差分値はコンクリート構造物を対象とした内部欠陥評価指標として有用であることが示された。今後、新設するコンクリート構造物やコンクリート二次製品の品質管理および維持管理に用いられ、評価手法の進歩および普及に期待したい。

謝辞

本博士論文は、筆者が日本大学大学院博士前期課程から後期課程の在学中に行った研究成果をまとめたものです。筆者は、2010年に熊本の建設コンサルタントへ入社し、本研究の測定手法である衝撃弾性波法を用いたコンクリート構造物の維持管理業務に携わっていました。一年後、当該技術の研究と技術普及を目的として設立された一般社団法人へ出向し、研究補助と学会発表の経験と、当時の恩師と上司のご助言とご指導を通じて、体系的な学問の修得が必要だと考え、2013年に日本大学理工学部へ入学しました。入学当時から既に妻子がいたことから、筆者の周りの方々には、多くのご支援を賜りました。また、本研究に取り組み博士論文を進めるにあたり、暖かいご指導を賜りました。末筆ではございますが、ここに感謝の意を表します。

指導教員である日本大学理工学部土木工学科の小林義和教授には、学部時代の研究室配属から博士課程の7年間と長きにわたってご指導を賜りました。本研究は修士課程から進めたもので、修士課程進学ときに研究テーマを相談した際には快諾していただき、博士後期課程に筆者を受け入れ、研究を行う環境をご提供していただきました。こうして3年間で博士課程の論文を提出することができました。小林先生のご支援と懇切丁寧なご指導のおかげだと存じます。ここに感謝の意を表します。

副査である野村卓志特任教授、梅村靖弘教授には、博士論文の内容および発表内容について、懇切丁寧なご指導ご鞭撻を賜りました。専攻内説明会や公聴会の発表に自信を持って臨むことができました。ここに感謝の意を表します。

同じ研究グループの小田憲一准教授、中村勝哉助手には、査読論文の添削や提案手法について、多くの時間を割いてご指導いただきました。深く御礼申し上げます。

一般社団法人 iTECS 技術協会 極壇邦夫様、アプライドリサーチ (株) 境友昭様、(株) 東洋計測リサーチ 山下健太郎様には、筆者が大学進学以前に衝撃弾性波法を用いた研究と学術活動の場をご提供いただきました。皆様方の出会いと iTECS 技術協会への受け入れがなければ、いまの私は存在しません。また、博士論文を進めるにあたり、暖かいご支援とご指導を賜りました。ここに感謝の意を表します。

岩手大学システム創成工学科知能メディアコースの藤岡豊太助教には、本研究に用いた数値シミュレーションのアプリケーションをご提供いただきました。心より感謝申し上げます。

父と母、今は亡き祖父母、妻の家族、そして姉弟には、筆者の大学進学を暖かく見守っていただきました。また、大学進学後の学生期間である9年間は、様々な側面でご支援いただきました。家族のご協力がなければ、博士課程まで進むことは不可能であったと思います。心より感謝申し上げます。最後に、妻、長女、長男には、不便で不安な思いをさせたにもかかわらず、明るく元気に筆者を支えてくれたことに感謝の気持ちで胸がいっぱいです。妻は、

地元を離れ不安が募る一方だったと思います。家事や子育てを任せきりで家族行事にあまり参加できずに苦勞を掛けました。私が安心して学業に専念できたことは、家庭を支えてくれた妻の協力と存在のおかげです。心より感謝します。本当にありがとうございました。

2022年1月 池端 宏太