

超音波法によるコンクリートの健全性評価

Evaluation of Concrete Health Using Ultrasonic Waves

親 本 俊 憲 鈴 木 宏 一

要 約

本研究では、内部欠陥や仕上げなどに隠れたひび割れなど、目視観察が困難な場所に存在する欠陥を、広い範囲（数m～十数m）に渡って迅速に検査するための手段として超音波法に着目し、特にRC部材に生じたひび割れの幅や本数・位置を推定するための検討を行った。RC部材の実験で、変位比と振幅比と名付けた二つの指標を用いることで、ひび割れの量やこれと高い相関にある部材の変形量を推測することが可能であることを示した。また、超音波の伝搬シミュレーションがひび割れを有する壁部材の測定結果をよく模擬できることを確認した。最後に、遺伝的アルゴリズムとシミュレーションを組み合わせ、RC壁の測定波形からひび割れの本数や位置の推定を試みた。

目 次

- I. はじめに
- II. コンクリートの健全性評価の概要
- III. 柱試験体を用いた健全性評価
- IV. 超音波伝搬シミュレーション
- V. まとめ

I. はじめに

コンクリート構造物の耐久性や健全性が重要視されるに伴い、RC躯体の不具合を非破壊で安価かつ迅速に調査する手法に対するニーズが高まっている。

非破壊検査法には種々のものがあるが、広い範囲の内部欠陥や仕上げなどに隠れて目視観察ができないひび割れなどを迅速に検査する方法としては、赤外線法があげられる。しかし、赤外線法は天候などの条件に左右されやすく、また屋内では適用が難しい場合が多い。そこで本研究では、目視観察が不可能で、かつ赤外線法の適用が難しい欠陥を検査する方法として超音波に着目し、広範囲（数m～十数m）に存在する欠陥の位置や大きさを迅速に検査するための技術について検討を行った。

本報では、まずII章でコンクリート部材の健全性を評価するための大まかな流れを設定した。次に、柱を模擬したコンクリート試験体に曲げひび割れやせん断ひび割れを生じさせて超音波波形の測定を行い、ひび割れのない健全な状態で測定した波形との比較からひび割れの進展の程度を推測する方法について提案した。また、実験と並行して、超音波の伝搬解析を行い、ひび割れがあるコンクリート部材の超音波伝搬シミュレーションを行った。その上で、遺伝的アルゴリズム（GA）を使って、測定した波形からひび割れの本数や位置を推定するための方法について検討を行った。

II. コンクリートの健全性評価の概要

本研究では、コンクリート部材の「健全性」を低下させる要因をコンクリートのひび割れにしばって検討を進めている。詳細な開発内容を説明する前に、既存コンクリート部材の健全性を評価する流れについて簡単に述べる（Fig.1）。

まず、測定位置はコンクリート表面が露出するか、塗装仕上げの薄い場所を選ぶ。

測定にあたっては、受発信子を接触させる面の凹凸を取り除き、表面を清掃する。次に健全性を評価したい箇所の波形（以下、測定波形）を採取するとともに、近傍のひび割れや空隙などの欠陥がない、健全と思われる箇所の波形（以下、基準波形という）を採取する。基準波形は、後述する超音波の減衰係数を求めるため、距離を変えて3箇所以上から測定する。

以上の測定結果を比較することで、測定対象に欠陥が存在するかを評価する。

ただし、この方法だけでは欠陥の存在の有無については見当がつくが、欠陥の位置や大きさは測定波形だけでは分からない。超音波の伝搬シミュレーションを併用してこれらの推定を行う必要がある。

なお、超音波の受発信子を接触させる場合、密着性をよくするために水溶性のジェル状の接触媒体を用いることが多いが、測定の間接触媒体がコンクリート中に染み込み、跡が残ることがある。美観上問題のある箇所の測定には工夫が必要である。

III. 柱試験体を用いた健全性評価

柱を模擬したコンクリート試験体を対象に、ひび割れがない健全な状態で測定した超音波の波形と、曲げひび割れやせん断ひび割れが生じた後に測定した波形を比較して、ひび割れが超音波の波形に

キーワード：超音波、健全性、評価、解析、シミュレーション、遺伝的アルゴリズム

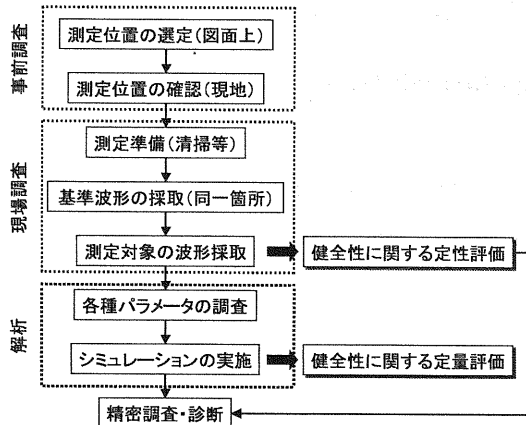


Fig.1 調査フローの概要
(Outline of Evaluation Flow)

与える影響について検討した。

1. 実験計画

(1) 試験体の概要と載荷方法

試験体は柱を想定して作製した。試験体の全長は4000mmであるが、実際の柱を模擬しているのは試験体中央の1500mmの部分である。試験体の概要をFig.2に示す。使用するコンクリートは設計基準強度 F_c が24N/mm²、目標スランブ18.0±2.5cm、目標空気量4.0%±1.5%のレディーミクストコンクリートである。

試験体には幅350mmの梁型を設け、応力やひずみの分布が実際の柱と同じになるように、載荷はこの梁型に対して行った。Fig.3に加力の模式図を示す。

超音波の測定は無載荷の状態、曲げひび割れの発生時、せん断ひび割れの発生時、鉄筋降伏および最大荷重時に行う計画とした。無載荷では部材の変形に伴うひび割れがなく、部材が健全な状態であると考えられる。載荷が進み変形に伴うひび割れの幅や本数が増すと、超音波の波形が変化することが予想される。

(2) 超音波試験装置の仕様および測定方法

実験で用いた装置の仕様をTable 1に示す。データは直接パソコンに取り込み、振幅の大きさの測定、周波数分析等はパソコン上で行った。また、超音波の測定はFig.2に示すA～Dの4点で行った。

2. 実験結果

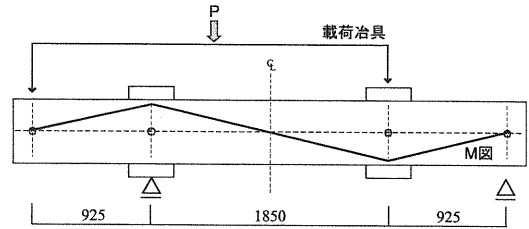


Fig.3 加力模式図
(Loading Pattern Diagrams)

Table 1 使用機器の概要
(Specification of Measuring Instrument)

使用機器	超音波試験装置	PUNDIT (C.N.S.Electronics製)
	探触子共振周波数	54kHz
測定条件	オシロスコープ	NR-350 (キーエンス製)
	接触媒体	ソニコート
	サンプリング周波数	1MHz
	超音波入力条件	1.2kV, 0.1秒間隔

(1) コンクリートの性状および強度試験結果

試験体の作製で用いたコンクリートの性状をTable 2に示す。また、JIS A 1108に準じて測定した超音波測定当日(材齢48日)の圧縮強度試験結果をTable 3に示す。

(2) 載荷結果

Fig.4に各載荷ステップ(①～⑤)の事象と荷重-変位関係を示す。Fig.4中の表は、各ステップの荷重、変位およびたわみ角を示す。なお、変位の列の括弧内の数字は、除荷後の変位を示す。また、載荷ステップ⑤(最大荷重)では受信された超音波の振幅が極めて小さかったため、以後の検討からは除外した。超音波は、鉄筋降伏前の部材の損傷が比較的小さい範囲であれば測定は可能であるが、それ以上に変形が進むと、減衰により受信子まで到達する波のエネルギーが小さくなり、波形の測定が不可能になった。

(3) 測定結果

Fig.5は無載荷時および載荷ステップ①～④における(最大振幅)/(無載荷時の最大振幅)(以下、振幅比とよぶ)と、(変位)/(鉄筋降伏時の変位)(以下、変位比とよぶ)の関係である。振幅比と変位比は、いずれも1.0以下である。ただし、測定位置C、Dについては載荷ステップ④のデータが取得できなかったため省略した。ま

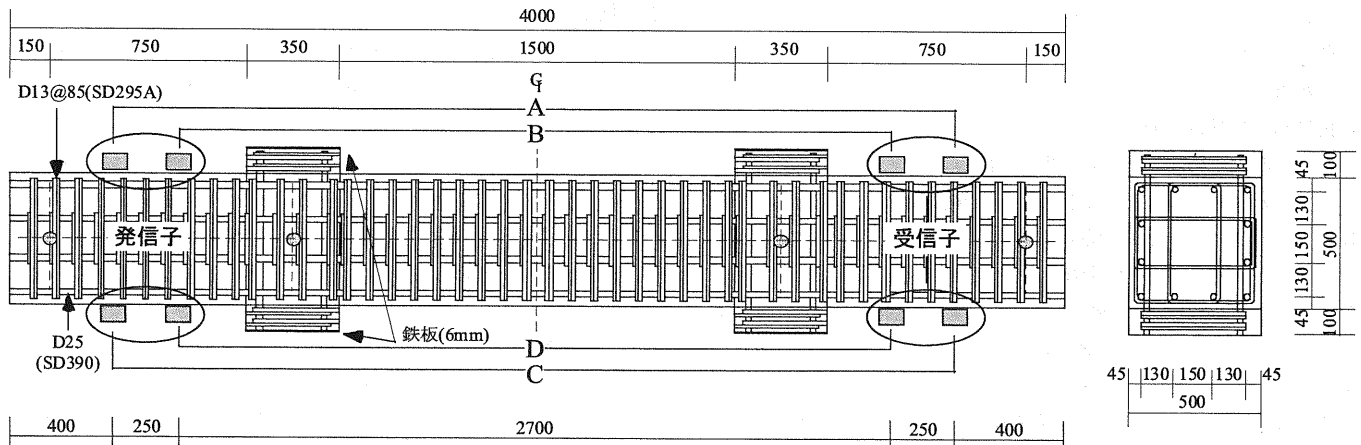


Fig.2 柱試験体図と測定位置
(Drawing of Column and Measuring Position)

た、荷重ステップ②および④は除荷後の測定結果であるため、変位についてはFig.4中の表の括弧内の数値を用いた。

振幅比と変位比の関係を指数関数により近似した場合、両者の間に強い相関 ($R^2=0.93$) が見られた。これは、部材の変形によりひび割れ量 (ひび割れ幅の合計や本数など) が増すと、ひび割れ部での波の反射・回折が頻繁となり、受信子に届く波のエネルギーが減少するためである。このように、部材が健全な状態での超音波波形を把握していれば、外力などによりひび割れが進展した場合の評価を定性的に行うことが可能である。

本章では、柱部材の変形量やひび割れの進展を超音波の振幅比を用いて推測できることを示した。ただし、Fig.5で示した推定式は今回の実験から導かれたものであり、測定対象が変われば異なる推定式を用意する必要がある。そこで次章では、超音波伝搬解析を併用してRC部材の健全性を評価するためのより汎用的な手法を提案する。

IV. 超音波伝搬シミュレーション

前章で述べたように、柱試験体では振幅比とひび割れ量を反映した変位比の間に強い相関が認められたが、任意のRC部材に対する両者の関係を推測するためには、超音波伝搬シミュレーションを併用することが有効である。そこで、本章では、超音波の伝搬解析を行うための基本的な考え方を示した。また、実建物のRC壁を対象に超音波測定の結果とシミュレーション結果を比較して、解析の妥当性を検討した。

1. 超音波伝搬解析の概要

(1) 基礎方程式

コンクリート中を伝わる超音波をはじめとする弾性波の二次元の波動方程式は式1で与えられる^{1)~3)}。

$$\begin{aligned}\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} &= \mu \nabla^2 u + (\lambda + \mu) \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial x \partial y} \right) + c \frac{\partial u}{\partial t} \\ \rho \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} &= \mu \nabla^2 v + (\lambda + \mu) \left(\frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial y} \right) + c \frac{\partial v}{\partial t}\end{aligned}\quad (1)$$

ここで、 u, v : x, y 方向の変位、 ρ : コンクリートの密度、 c : 減衰係数、 E : コンクリートの動弾性係数、 ν : ポアソン比である。

$$\text{また、} \lambda = \frac{E\nu}{(1-\nu)(1-2\nu)}, \quad \mu = \frac{E}{2(1+\nu)}$$

σ_{yy}, σ_{xy} を発信子を当てる面の法線および接線方向の応力とすると、自由境界面の境界条件は式2となる。

$$\begin{aligned}\sigma_{yy} &= \lambda \frac{\partial u}{\partial x} + (\lambda + 2\mu) \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \\ \sigma_{xy} &= \mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) = 0\end{aligned}\quad (2)$$

本研究では、式2の条件の下で式1を差分法により解いた。

(2) 減衰係数の求め方

コンクリート中を伝搬する超音波の減衰係数を理論的に求めることは困難である。そこで本研究では、RC部材の中から健全な場所を選び、探触子間距離を変えて収集した複数の波形を基準に減衰係

Table 2 フレッシュコンクリートの性状
(Test Result Fresh Concrete)

スランプ	空気量	単位容積質量	コンクリート温度	外気温
18.0cm	4.7%	2257kg/m ³	26.3℃	19.4℃

Table 3 圧縮強度試験の結果
(Compression Test Results)

No.	圧縮強度 (N/mm ²)	ヤング係数 ($\times 10^4$ N/mm ²)	ポアソン比	単位容積重量 (kg/m ³)
1	36.2	2.65	0.15	2289
2	34.7	2.37	0.15	2287
3	34.1	2.59	0.21	2286
平均	35.0	2.54	0.17	2287

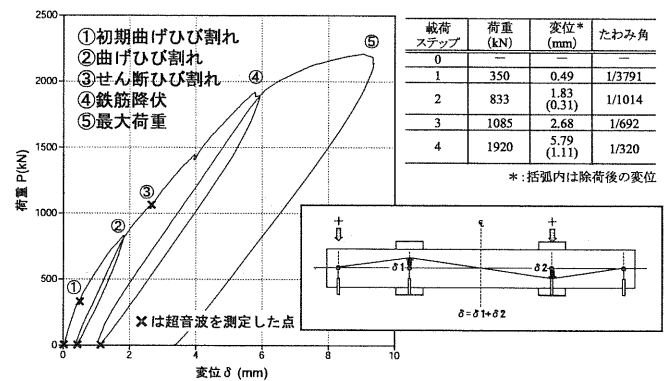


Fig.4 荷重－変位関係と事象
(Load Deformation Diagram and Events)

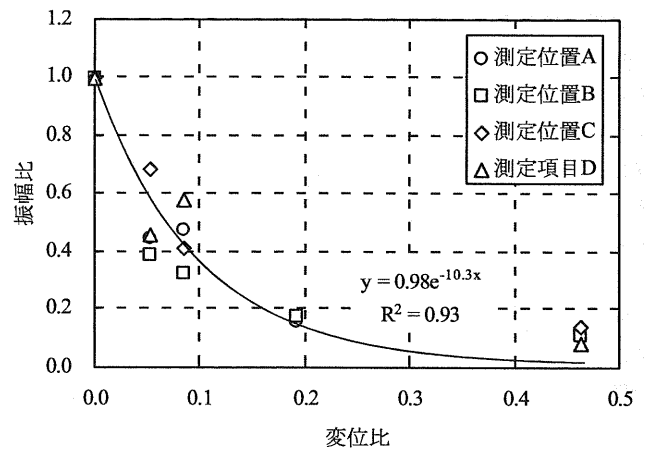


Fig.5 振幅比と変位比の関係

(Relation between Amplitude Ratio and Deformation Ratio)

数を求めた。減衰係数は、Fig.6に示すように基準波形の最大振幅を結ぶ近似曲線 (指数関数) とした⁴⁾。

(3) 欠陥の推定方法

部材の健全な場所を測定した波形に較べて、ひび割れなどの欠陥をはさんで測定した時の波形は振幅の大きさが低下する。今、健全でかつ受発信子間の距離が最も短い位置での最大振幅 (Fig.6の例では、aの波形のピーク) に対する、異なる測定位置 (Fig.6のb, cや欠陥をはさんだ位置) での最大振幅の比を、前章と同様に振幅比 (≤ 1.0) と名付け、この振幅比をひび割れ本数の推定に用いる。

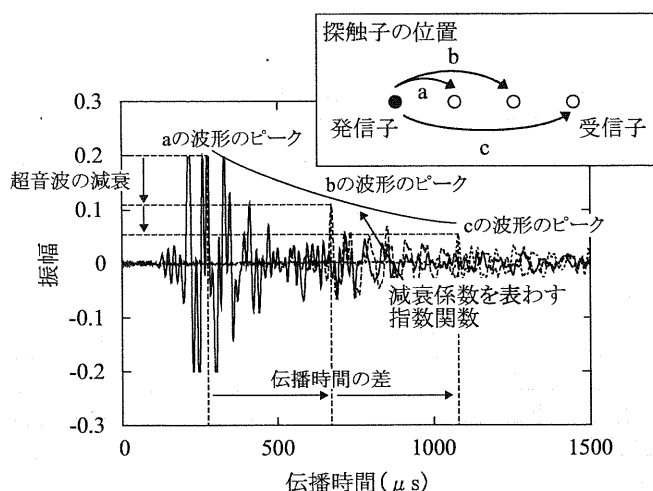


Fig.6 減衰係数の求め方
(Calculation method for Attenuation Coefficient)

(4) シミュレーションの適用範囲

試験体中央部に部材厚の10%の深さの断面欠損を有した試験体(低熱ポルトランドセメント使用, $F_c=60\text{N/mm}^2$)を対象に,断面欠損部を中心に受信子を500mm離して超音波の測定を行った。その結果をFig.7およびFig.8に示す。Fig.7は厚さ250mmの試験体, Fig.8は厚さ1000mmの試験体である。グラフは,縦軸が振幅比,横軸が時間(単位は μs)を表す。また, Table 4の条件のもと,試験体と同様の部材厚,ひび割れ深さをモデル化してシミュレーションを行った結果もFig.7, Fig.8に示している。

Fig.7では,最大振幅比が表れる時間は測定結果とシミュレーション結果で異なるが,最大振幅比の値自体は概ね合っている。一方, Fig.8では測定とシミュレーションの最大振幅比,表れる時間,値とも大きく異なることが分かる。これは受信子間距離が部材厚よりも小さい場合, 250 μs 付近に見られる, ひび割れを回折して受信子に到達する波が小さい一方, 600 μs 付近に表れるように, 入力面の反対側の面から反射して受信子に到達する波が卓越するためである。

このように,部材厚の大きい部材に対して本章で述べた手法を適用するには,ひび割れを回折する波の再現など,解析上の工夫が必要になる。したがって,現段階では,受発信子間の距離に比べて部材厚が小さく,かつ,ひび割れの深さが部材厚に近くなる薄い壁やスラブに適用が可能と考えられるが,具体的な適用範囲についてはより多くの調査・解析を重ねる必要がある。

2. RC壁のひび割れ評価例⁷⁾

竣工後31年および37年経過したRC造建物を対象に,測定した波形とシミュレーション波形の比較を行った。竣工後31年経過した建物の壁をNo.1,竣工後37年経過した建物の壁をNo.2と名付ける。

調査位置周辺のひび割れ状況をFig.9に示す。基準となる波形は丸印で示す場所で収集した。ひび割れをはさんでの測定は四角印で示す場所で行った。使用した機器はTable 1と同じである。

解析では, Table 5に示す値を用いた。RC壁のコンクリート物性が不明なため,使用材料, F_c が近いと思われる異なるコンクリートの試験結果を用いている。また,実際はひび割れはRC壁を貫通していたが,このままでは解析を行うことができないので,ひび割れ

Table 4 解析条件
(Analytic Parameter)

パラメータ		値	単位
解析用物性値	動弾性係数	36.16	kN/mm ²
	密度	2386	kg/m ³
	ポアソン比	0.18	—
解析条件	格子長さ	10	mm
	格子数(x)	350	—
	格子数(y)	25 or 100	—
	入力波の周波数	54	kHz
	超音波の入力座標	$148 \leq x \leq 152$	—
	超音波の出力座標	200	—
	時間間隔	1.0×10^{-6}	sec
	繰り返し数	2000	—

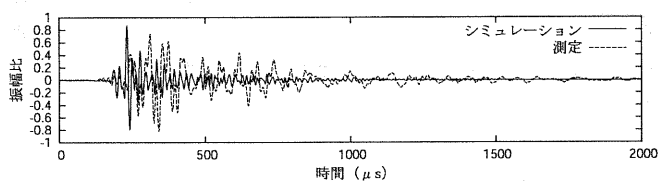


Fig.7 波形の比較(部材厚: 250mm)
(Comparison of Waves : 250mm)

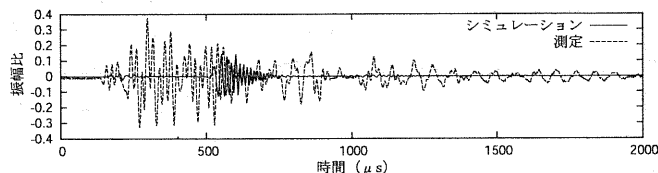


Fig.8 波形の比較(部材厚: 1000mm)
(Comparison of Waves : 1000mm)

深さは壁厚の80%と仮定して解析を行った。解析に使用した波は,周波数54kHzのサイン波を半周期分である。なお,ひび割れ幅は考慮していない。

Fig.10およびFig.11に,位置No.1とNo.2で測定した波形の振幅比と,探触子間距離やひび割れ位置を測定対象のRC壁と同じようにモデル化して解析を行った場合の振幅比を示す。なお,減衰係数は図中に示された指数関数を用いている。

実測結果と解析結果を比較すると,両者の振幅比に若干の差が見られるが(健全部の変動係数0.91,非健全部の変動係数0.86),ひび割れを1本または2本はさんだ場合に振幅比が大幅に低下する現象を,解析により再現できることを確認した。

3. ひび割れ量の推定に関する基礎検討

これまでは測定対象のRC部材と条件を合わせてシミュレーションを行い,適用性を検討してきたが,最終的には測定した波形をもとにひび割れなどの欠陥を推定する,逆解析的な評価を行うことが目標である。そこで本節では,測定波形からひび割れの本数と位置を予測するための基礎的な手法を検討する。具体的には,近似最適解を求める一手法の遺伝的アルゴリズム(Genetic Algorithm, 以下, GA)を使い,解析により生成した多数の波形の中から測定した波形にもっとも近いものを選択し,このときのひび割れ本数,位置を実構造物のひび割れ本数,位置とみなす。なお,紙面の都合上,GAの手法自体の説明は省略する⁸⁾。

(1) GAを用いたひび割れ本数,位置の予測

測定波形をもとに,コンクリートのひび割れ本数や位置を予測す

る方法の概要をFig.12に示す。適合度（測定した波形とシミュレーションの波形が似ているかどうか）の判定は、二つの波形のピークが表れた時間および振幅比を平面上にプロットして、両者の距離が近いほど適合度が大きいと考えた。したがって、振幅比とピークが現れた時間以外の情報はここでは考慮していない。

遺伝子の表現方法をFig.13に示す。遺伝子の表現方法をFig.13に示す。簡単のため、遺伝子は一次元の配列で表現した。ひび割れの深さは一律部材厚の80%と仮定し、ひび割れの位置を1、その他を0で表した。それぞれの遺伝子表現にもとづいて超音波の伝搬シミュレーションを行い、適合度を求めた。

(2) 解析条件

解析は前節のNo.1を対象に行った。解析条件等はTable 5に示したとおりである。また、GA用のパラメータをTable 6に示す。交叉は、Fig.12に示すように、遺伝子を表す配列の2点をランダムに選択し、その間の配列を二つの遺伝子間で交換することにした。

(3) 推定結果

Fig.14にひび割れの本数および位置を推定した結果を示す。なお、解析モデルは長辺方向の格子の数が400と多いため、図ではモデルの格子10個を1マスとして描いている。

実際のひび割れが2本であるのに対して、最終世代では中央に本来は存在しないはずのひび割れが3本存在することがわかる。Fig.14に示すように初期集団の中にはひび割れが3本だけの例もあったため、結果だけを見ると解が改悪されたともいえる。両端の2本のひび割れはほぼ実際のひび割れに近い位置に存在しており、この部分についてはよい推定結果が得られたといえるが、両端に挟まれたひび割れの存在は適合度に適切に反映されていないことが懸念される。よりよい適合度の計算方法の開発が必要である。

次に第10世代と第20世代では、両者に全く変化が見られない結果となった。GA固有の計算手続き（個体の選択、交叉、突然変異など）が有効に機能しておらず、よりよい解の探索が行われなかったことが原因と考えられる。

このように、GAを用いて測定波形からひび割れを予測するためには、現状では多くの課題が残されており、個体の選択、交叉、突然変異などの方法について今後改良の必要がある。

V. まとめ

本研究では、目視観察が困難なRC部材のひび割れを超音波を使って調査し、その結果からひび割れの本数や位置などを推定するための技術について検討した。以下に、本報で紹介した内容をまとめる。

- 柱試験体の載荷実験を行い、超音波波形やスペクトルの大きさに関係する振幅比と部材の変形量に關係する変位比という二つの指標を用いることで、両者の間に強い相関が見られた。このことから、超音波を使って部材の変形量を推定する見通しを得た。なお、この方法の適用が可能な範囲は鉄筋降伏までである。
- 超音波の伝搬解析にあたり、波の減衰係数を伝搬時間に依存する指数関数で表わすと、解析上良好な結果が得られる。
- 欠陥がなく、かつ、部材の厚さ（超音波の入力面から反射面までの距離）が受発信号間の距離よりも短い場合、実部材を

Table 5 解析条件

(Analytic Parameter)

パラメータ		値	単位
解析用物性値	動弾性係数	29.87	kN/mm ²
	密度	2263	kg/m ³
	ポアソン比	0.18	—
解析条件	格子長さ	10	mm
	格子数	300×15	—
	入力波の周波数	54	kHz
	超音波の入力座標	48 ≤ x ≤ 52	—
	時間間隔	1.0 × 10 ⁻⁶	sec
	繰り返し数	2000	—

Table 6 GA固有の解析条件

(GA Specific Analytic Parameter)

パラメータ	値	備考
個体数	30	—
世代数	20	—
交叉確率	90%	—
突然変異確率	0.1%	遺伝子を構成するビットごとに評価
個体選択数	8	適応度の高い上位8個体を選択
初期のひび割れ本数	1以上10以下	本数、位置ともにランダムに決定

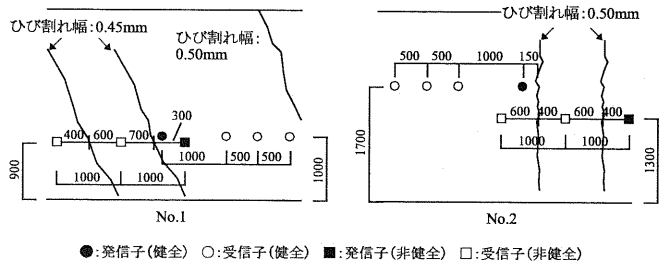


Fig.9 調査位置のひび割れ図

(Crack Sketches at Survey Positions)

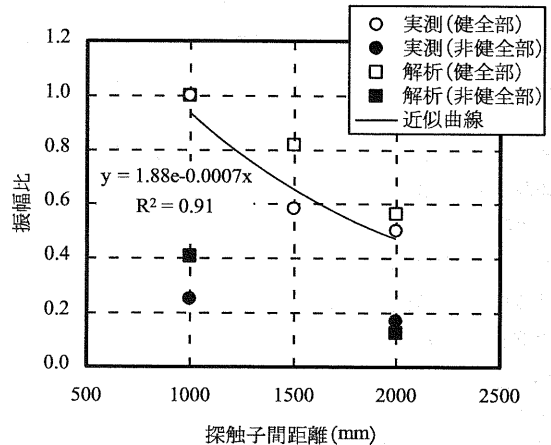


Fig.10 測定と解析の比較 (No.1)

(Comparison between Measurements and Calculations : No.1)

使った測定波形と解析から得られた波形は近い結果を示すが、部材の厚さが受発信号間の距離よりも長い場合は、解析結果は測定波形とは異なる。したがって、提案した解析手法の適用範囲は、壁やスラブなど、受発信号間距離が部材厚よりも大きい場合に限定されると考えられるが、詳細な適用範囲についてはさらに調査・解析を重ねる必要がある。

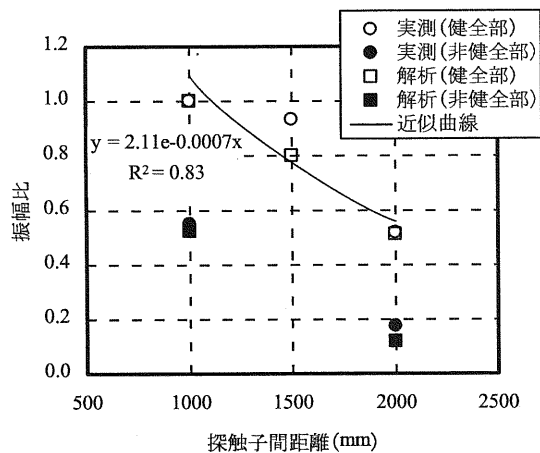


Fig.11 測定と解析の比較 (No.2)

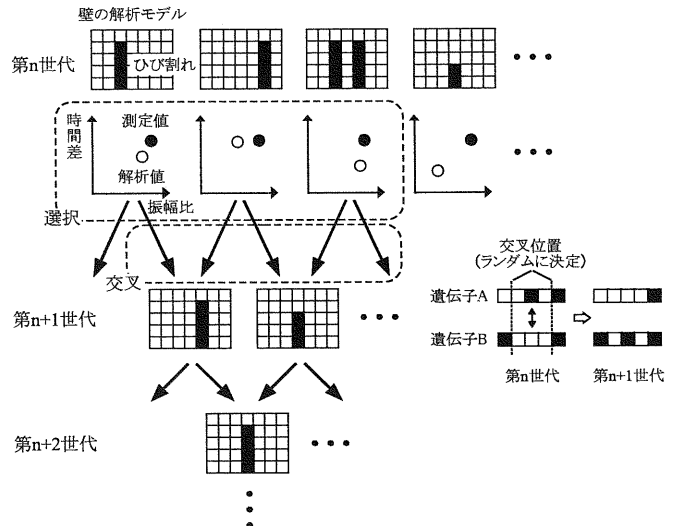
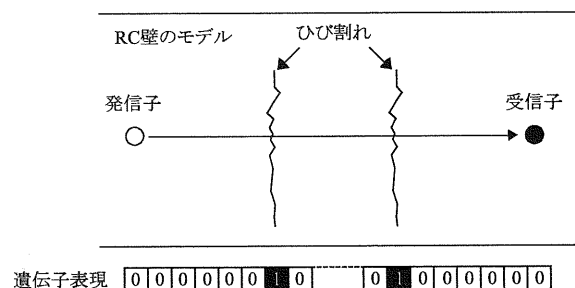
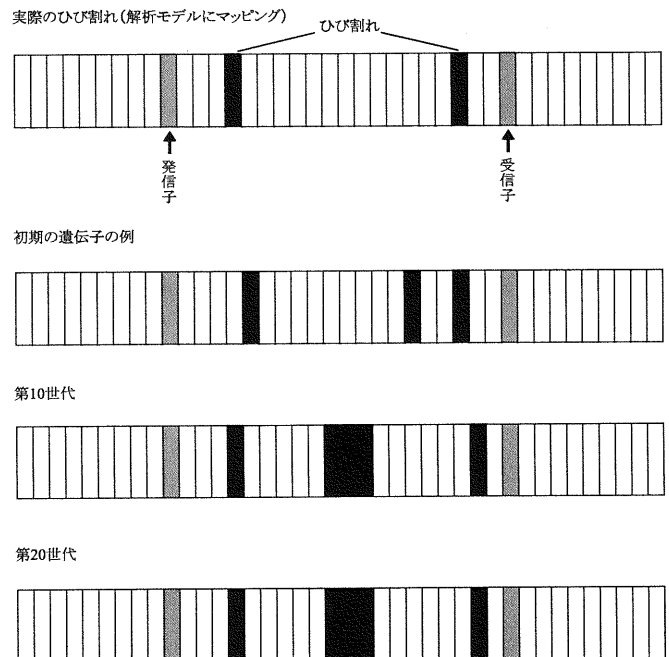
(Comparison between Measurements and Calculations : No.2)

- d. 実建物のRC壁についても、実際のひび割れ位置や本数をシミュレーションできることを確認した。シミュレーション技術を基礎に波形の逆解析を行うことにより、測定波形からひび割れの本数や位置を推定する可能性を得た。
- e. 測定波形から、遺伝的アルゴリズムによってひび割れ位置や本数を推定する試みを行ったが、結果を見ると改善の余地が残されている。測定した波形から逆解析的に欠陥の位置や大きさを推定する方法については、アルゴリズムを含めた見直しが必要である。

本研究ではRC部材に生じたひび割れを検討の対象としたが、今後は空隙などの内部欠陥に対象を広げてより実用的な手法へと改良する必要がある。

参考文献

- 1) 春海佳三郎, 五十嵐 高, 斉藤鉄夫; ポテンシャルを持つ質点系モデルによる弾性波の数値実験, 非破壊検査 Vol.27, No.12, (1978.12), pp.807-816.
- 2) 斉藤鉄夫, 藤盛紀明; 固体内弾性波の数値実験(その1), 清水建設研究所報第35号, (1982.4), pp.63-69.
- 3) 小坂義夫 他; 超音波スペクトロスコピーを適用したコンクリート構造物の劣化度評価に関する研究, 平成元年度科学研究費補助金(一般研究(B))研究成果報告書, (1990.3).
- 4) 高橋亮一, 棚町芳弘; 計算力学とCAEシリーズ3 差分法, 培風館, (1991.7).
- 5) 和泉正哲; 建築構造力学2, 培風館, (1989.1).
- 6) (社)日本建材産業協会; 超音波によるコンクリート強度の圧縮試験方法(案) JCMS-III B5704-2003, (2003.3).
- 7) 親本俊憲, 鈴木宏一; 超音波を用いたRC部材の健全性評価ー弾性波解析による欠陥部の定量評価ー, 日本建築学会学術講演梗概集, (2004.8), pp.205-206.
- 8) 遺伝的アルゴリズムについては, たとえば, 北野宏明 編; 遺伝的アルゴリズム, 産業図書, (1993).

Fig.12 GAによる推定方法の概要
(Outline of Estimation Method using GA)Fig.13 RC壁の遺伝子表現
(Gene Representation of RC Wall)Fig.14 推定結果
(Estimation Results)