

弾性波速度と線形走時内挿法を用いた コンクリート内部欠陥推定に関する一検討

山田 亮^{*1} 神保 晃良^{*1} 川久保 優^{*2} 中野 友裕^{*3}

A Study on Estimation of the Internal Defect in Concrete
using Elastic Wave Traveltime and Linear Traveltime Interpolation

by

Ryo YAMADA^{*1}, Akira JINBO^{*1}, Yu KAWAKUBO^{*2} and Tomohiro NAKANO^{*3}

(Received on Mar. 31, 2014 and accepted on Jul. 10, 2014)

Abstract

It is difficult to predict the conditions inside of a concrete structure, and therefore it is important to perform non-destructive tests to investigate these conditions. In this study, two concrete specimens were prepared. One was a filled concrete specimen, and the other included cubic rubber in its central part. We measured the traveltimes between pairs of shooting point and receiving point using vibration. Then we developed an algorithm to predict the inner part conditions from the traveltimes and applied it to the experimental results. From the analytical results using the elastic wave traveltimes, it will be possible to estimate conditions inside concrete.

Keywords: Linear traveltime interpolation, Slowness distribution, Concrete slab

1. はじめに

土木・建築構造物に多用されるコンクリートは、圧縮強度に比べて引張強度が極めて小さく、脆性的であるという特徴を有する。それゆえ、引張応力を生じる断面力（曲げ・せん断）に対してコンクリート単独で用いる場合には、非常に脆性的な破壊を生じる部材となる。しかし、コンクリート部材は靱性に富む鉄筋を内部に適切かつ合理的に配置することで、これらの欠点を克服し、型枠を組むことで任意の形状・寸法の構造物を現地で製造できることと相まって、多様な構造物に用いられてきた。

ところでコンクリート構造物は、建設後に内部の状態を確認することが極めて困難である。コンクリートを構造部材として用いる場合、コンクリート単独で用いられることはまれで、ほとんどの場合、鉄筋や PC 鋼材と組み合わせる。これは、鉄筋や PC 鋼材の配置によって、コンクリート部材が力学的に供用に耐えることができるようにするための技術であり、部材の設計において最も重要な点である。

1990 年代以降の大地震の被害を受けて、近年、コンクリート構造物の耐震設計は大幅に改訂がなされてきてい

る。道路橋を例にとると、1923 年の関東地震後に地震力の規定が「道路構造に関する細則案」¹⁾において盛り込まれ、その後長年に亘って 0.15 から 0.3 程度の設計震度が許容応力度設計法の体系の中で用いられてきた。1990 年に大地震を想定した 0.7 から 1.0 程度の設計震度が地震時保有水平耐力法の枠組みの中で用いられるようになり²⁾、1995 年の兵庫県南部地震後は 1.2 から 2.0 の設計水平震度が示された³⁾⁴⁾。その設計震度に対して構造物の要求性能を満たすために、鉄筋径の大きなものが必要とされ、さらに横拘束筋（帯鉄筋、中間帯鉄筋）によるコンクリート橋脚の変形性能向上、せん断耐力向上への期待から、太径鉄筋の密な配置が必要とされるようになった。これらの変遷による断面の具体例は、たとえば文献⁵⁾に見られるが、軸方向鉄筋・横拘束筋の断面積はほぼ 2 倍、帯鉄筋の間隔は 1/2、中間帯鉄筋の配置による鉄筋量の増加など、鉄筋が密になる傾向となっている。この問題は、定着長の確保や重ね継手長の設計基準を満たすべきであることを考え合わせると、柱一はり接合部や、主鉄筋端部などでは極めて過密な状態となる。実際、鉄筋同士が接する事例や、複数本の鉄筋が隙間なく並ぶ事例も存在する⁶⁾。

その結果、コンクリートを型枠内に流し込む際に、過密な鉄筋がコンクリート充填を妨げることが懸念される場合も多くなってきている。それと同時に、コンクリート内部に配置された鉄筋が適切に機能する為には、正し

*1 工学部土木工学科

*2 建装工業株式会社

*3 工学部土木工学科准教授

Table 1 Mix proportion of concrete

Gmax [mm]	W/C [%]	Air Content [%]	Unit content [kg/m ³]				
			W	C	S	G	AE
15	62.6	5	176.1	281.3	799.7	1012.0	0.563

Table 2 Material properties

Cement	Density [g/cm ³]	ig.loss [%]	Specific Surface Area [cm ² /g]	Setting		
				Quantity of Water [%]	Starting Time[h-m]	Termination Time [h-m]
Ordinary Portland Cement	3.14	2.00	3350	27.5	2-20	3-30
Aggregates	Type	Location	F.M.	Density [g/cm ³]	Absorption	
Fine Aggregate	Mountain sand	Gifu	2.75	2.56	1.8%	
Course Aggregate	Crushed stone	Gifu	6.82*	2.65	1.2%	
Concrete Admixture	Water Reducing Ratio [%]	Bleeding Rate Quantity [%]	Setting Time Difference			
			Starting Time[min]	Termination Time [min]		
AE Water Reducing Agent	13	57	+20	+10		

* Include grain diameter of 15-20mm

い位置に配置されていることが不可欠である。

以上を鑑みるに、コンクリート内部の状況を確認する事の重要性は増しているものの、実際問題としてコンクリートの一部分を撤去して内部を確認するなどの方法は現実的ではない。そこで著者らは、空洞のあるコンクリート板を対象にした空洞検出の可能性について検討し、振動測定を用いることで弾性波速度を予測することができることを示した⁷⁾。これは、たとえば過密鉄筋のために不完全なコンクリート充填が行われた結果として生じる空洞の検出に相当する。

弾性波は、ヤング係数・ポアソン比・密度によってその速度を決定できる⁸⁾が、弾性波速度を予測してこれらの材料特性を決定できれば、空洞だけでなく、内部に異物が入っている場合や、埋め込まれたボルト等の埋め込み長の確認などにもその用途は広がる。一方、広く用いられている超音波による方法⁹⁾では、異常検出可能な深さが限られているのが現状である。

本稿では、内部状態を推定するのに必要なアルゴリズムを構築し、コンクリート内部に物性の異なる物質が存在する場合にも適用が可能であるか否かについて検討を行い、空洞のみならず、異なる物質の検出についても適用が可能であるかについて、その可能性と問題点を抽出することとした。

2. 実験の概要

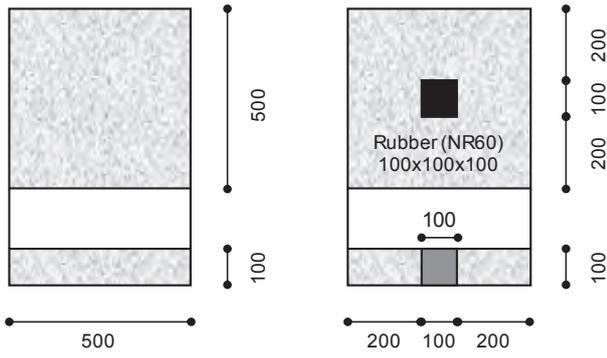
2. 1 供試体の概要

後述する解析手法がコンクリートに適用可能であるか否かを判断する資料とするために、コンクリート供試体を2体制作して実験を行う。コンクリートの配合をTable 1に示す。また、Table 2に使用材料の物性値などを示す。この表から、使用材料の物性値はいずれもコンクリート標準示方書の品質規格に適合している。

コンクリートの配合は水セメント比 W/C で 62.6%と設定した。供試体の養生は打設後1週間後で脱型し、水中養生は行わなかった。これは、供試体寸法が小さいため、極力弾性波速度を小さくするためである。

供試体の形状は、500mm×500mm、厚さ 100mm の正方形板である。1体は内部全体が詰まった中実供試体、他方は板の中央部に100mm×100mmの正方形のゴムを埋め込んだもの(中央ゴム供試体)としている (Fig.1)。

供試体作成と同時に圧縮強度試験用のφ100×200mmの円柱供試体を作成し、一軸圧縮試験を行った。供試体作成時にスランプ試験を行っている。ヤング係数を小さくするために意図的に水セメント比を大きくしたこともあり、その結果はSI=16[cm]であったが、圧縮強度は



a) Slab A
b) Slab B
Fig.1 Specimen dimensions (unit in [mm])

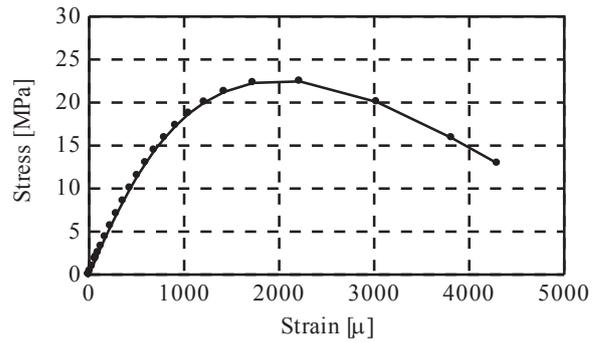


Fig.2 Stress-strain relation of concrete

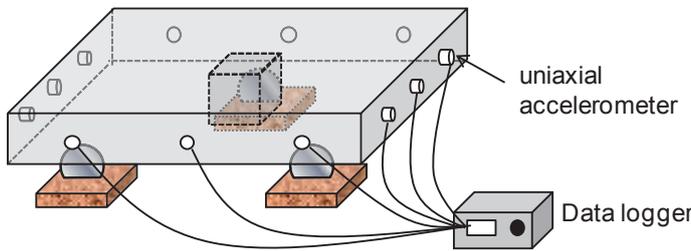


Fig.3 Traveltime observation system overview

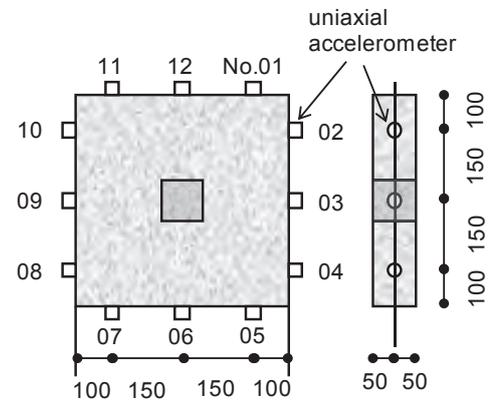


Fig.4 Arrangement of accelerometers (unit in [mm])

Table 3 Observed traveltimes [μ s] between No.6 and receiving points (Slab A)

No.	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12
10°	130	120	95	75	60	(SP)	80	80	100	135	125	135
	130	120	85	75	55	(SP)	60	75	85	125	125	130
20°	130	130	100	90	65	(SP)	65	90	95	140	145	150
	130	115	85	65	60	(SP)	55	70	90	110	120	130
30°	120	110	80	60	40	(SP)	60	70	90	110	120	130
	140	130	90	60	60	(SP)	80	90	100	130	130	140

22.5[MPa] ($\epsilon=2218\mu$ 時), 初期弾性係数は 24.14[GPa]が得られた (Fig.2). また, 空気量試験の結果は 4.5%であった.

2. 2 弾性波走時の測定方法

中実供試体・中央ゴム供試体ともに, 固定した 3 個の鉄球を支点として設置した (Fig.3). 走時の測定にあたっては, 計 12 箇所の加速度計を設置して, 起振点(以下 SP)ないし受振点(RP)とした. 測定は, Fig.4 の加速度計測点のうち NO.2,3,4,5,6,7 を SP とし, 各々の SP に対し, 残りの 11 箇所の受振点での加速度を測定した. 起振は SP の上部 1mm~2mm の部分を, 振り子を用いて打撃した. その際の振り子は, 鉛直から 10 度, 20 度, 30 度まで手で持ち上げた後, 手を離して打撃した. また各箇所

10 度 2 回, 20 度 2 回, 30 度 2 回と合計 6 個の走時データを測定した.

これらの条件で加速度を記録し, 中実供試体および中央ゴム供試体の二点間の弾性波走時の計測を行った.

なお, 振り子の角度を変化させることで, 衝撃エネルギーは変化するが, 異なる径および質量の鋼球衝突と弾性波速度を検討した文献¹⁰⁾によれば, 供試体の寸法が同一である場合, 鋼球径の異なる衝突による弾性波速度を比較してもほとんど差がないことが報告されている. このことおよび測定データから, 衝撃エネルギーによる弾性波速度の差は大きく影響していないと判断し, 6 個の走時データを平均化することとした. 参考のため, Table 3 に, 中実供試体で No.6 を起振した際の振り子の角度と走時の観測値を示す. 角度によらずおおむねどの走時も,

Table 4 Observed traveltimes [μs] between shooting points and receiving points (Slab A)

No.	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12
SP=02	38	(SP)	58	128	119	135	153	154	136	129	109	73
SP=03	80	72	(SP)	66	78	101	136	141	136	139	130	100
SP=04	113	120	61	(SP)	36	70	116	129	139	148	153	129
SP=05	133	123	85	48	(SP)	88	132	121	145	156	161	146
SP=06	145	139	101	90	81	(SP)	73	80	103	135	137	131
SP=07	156	153	136	126	131	64	(SP)	40	83	116	131	137

Table 5 Observed traveltimes [μs] between shooting points and receiving points (Slab B)

No.	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12
SP=02	40	(SP)	58	118	110	121	152	164	132	121	113	73
SP=03	68	52	(SP)	54	66	89	123	133	133	135	121	85
SP=04	107	119	55	(SP)	40	80	116	131	138	159	154	125
SP=05	126	112	67	35	(SP)	63	111	117	134	164	163	138
SP=06	130	123	89	67	60	(SP)	60	74	95	130	124	133
SP=07	156	152	123	111	108	56	(SP)	32	60	105	118	128

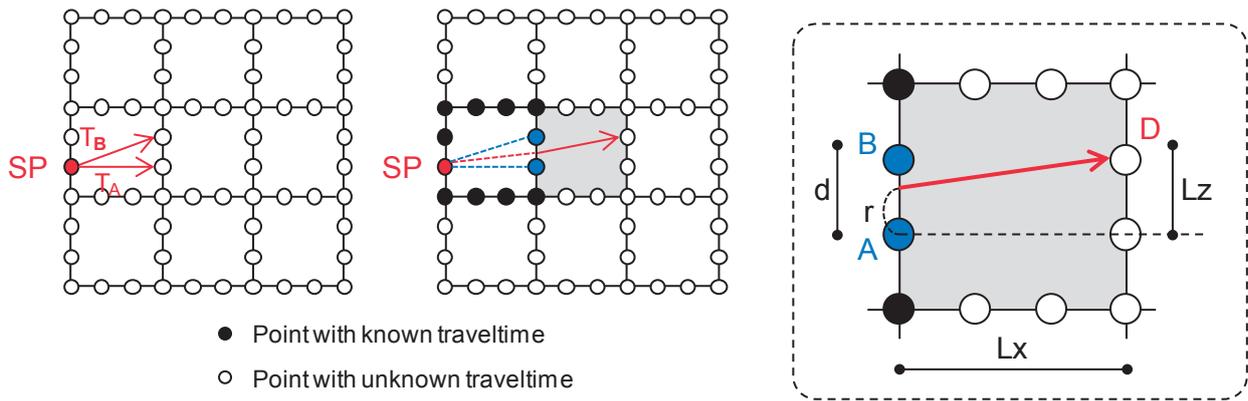


Fig.5 Outline of linear traveltimes interpolation method

時間の分解能 $\pm 10[\mu\text{s}]$ 程度の範囲に収まっている。なお、同表には $5[\mu\text{s}]$ 単位で数値が記録されているが、これは波形の立ち上がり $t_1[\mu\text{s}]$ と $t_1+10[\mu\text{s}]$ のいずれであるか判断が難しい場合に、その中間時刻 $t_1+5[\mu\text{s}]$ を立ち上がりとしみなしたためである。

2. 3 弾性波伝播時間(走時)の測定結果

中実供試体についての測定走時について、打点 2~7 を起振した場合における全測点までの走時を、Table 4 に示す。ここに記されている値は、各測点の 6 個の走時データについて、 $p=2.5\%$ とした t-検定を行い、誤差の大きなデータを除いたものについて求めた平均走時である。

Table 5 は、中央ゴム供試体について、中実供試体と同様の測定を行って得られた走時データをまとめたものである。t-検定についても、中実供試体と同様である。

3. 解析アルゴリズム

3. 1 レイトレーシングの概要

屈折弾性波解析において、2点間の弾性波の伝播時間ならびに伝播経路を予測する手法をレイトレーシングと呼ぶ。レイトレーシングの過程においては、対象物を微小なセルにメッシュ分割し、それぞれのセルの弾性波速度を設定することで、弾性波の伝播時間ならびに伝播経路を再現することができる。

レイトレーシング手法としていくつかの手法が提案されているが、本研究では Asakawa and Kwanaka (1993) による線形走時内挿法 (Linear Traveltimes Interpolation : LTI) ¹¹⁾ をレイトレーシング手法として採用した。

LTI 法では、Fig.5 のように解析領域をセル分割し、その境界上に節点を設ける。各セルには速度の逆数であるスローネスを与えることで、解析領域の弾性波速度の分

布状態（以下、弾性波速度構造）を表現する。

起振点 SP から各節点に弾性波が伝播するのに必要な時間 T は、SP を含むセル内のスローネス s と 2 点間の距離 l により決定できる。

$$T = sl \quad (1)$$

次に、得られたセルの周囲のセルに計算を展開するが、その際には隣り合った 2 点 A,B までの走時 T_A , T_B を用いて、SP から点 D までの伝播時間 T_D および SP から D に到達する際に波線が AB 間を横切る位置 r を得ることができる。セル内の A,B,D の相互の距離の関係を Fig.5 の L_x , L_z , d のようにとると、次式が得られる。

$$T_D = T_A + \Delta T \frac{L_z}{d} + \frac{L_x}{d} + \sqrt{s^2 d^2 - \Delta T^2} \quad (2)$$

$$\Delta T = T_A - T_B \quad (3)$$

$$r = \frac{\Delta T L_x}{\sqrt{s^2 d^2 - \Delta T^2}} - L_z \quad (4)$$

このとき T_D は、A,B の取り方によって複数得られるが、その中で最も小さくなるものを SP から D までの走時として採用する。このようにして SP から全節点までの到達時間を計算することができる。さらに詳細な線形走時内挿法の計算手順詳細は、文献¹¹⁾を参照されたい。

3. 2 解析アルゴリズム

前節の LTI 法を用いて伝播時間（走時）・伝播経路（走時曲線）が得られるわけであるが、当初仮定した構造物の弾性波速度構造から計算された走時と測定された走時の間には差が生じる。

最終的に速度構造を予測するためには、それらの間に生じる残差を小さくするためのアルゴリズムを構築する必要がある。本研究では、最適な速度構造の作成手法として、走時および走時曲線を用いた以下のアルゴリズムを構築した (Fig.6)。

- ① 構造物をメッシュ分割し、各セルに一樣なスローネスを割り当てる。
- ② LTI 法を用いて、仮定されたスローネスによって得られる走時を計算し、同時に走時曲線を決定する。
- ③ 各セルについて、実際に測定された走時 T_m と LTI 法で算定された走時 T_c との比 $R = T_m / T_c$ を計算する。
- ④ 残差の割合は $|1 - R|$ で計算できるので、この値がすべての SP および RP の組合せにおいて収束条件を満たす（十分小さい）ことを確認した段階で、内部構造のスローネス分布を確定する。
- ⑤ 収束条件を満たしていない場合、各セルについて、通過する走時曲線 k 本に対応する R について平均を求める。たとえば Fig.6 において、3 本の走時曲線が通過するセルであれば、その走時曲線に対応する 3 個の R について平均 R_A を求める。
- ⑥ すべてのセルについて、当初のスローネスに R_A を乗じ、速度構造を更新する。

⑦ ただし、セルを通過する走時曲線が存在しない場合には、決定できる周囲のセルの値から推測する（今回は隣接する複数セルの平均とした）。

⑧ 収束するまで②～⑦を繰り返す。

この手法を用いる場合の問題点ならびに考えられる改善策については後述する。

4. コンクリート内部状態推定解析¹²⁾

4. 1 収束条件の設定

Table 4 および Table 5 の測定結果に対し、3 章で示したアルゴリズムを適用して中実供試体・中央ゴム供試体の内部状態の推定を行った。

解析にあたって、走時の測定値と解析値の間に生じる残差の収束条件を事前に設定する。本実験において使用した加速度計の分解能は $10\mu\text{s}$ であることから、測定値 $150\mu\text{s}$ に対する $10\mu\text{s}$ の比として 0.0667 が得られる。このことから、収束条件は、全 SP および RP の組合せに対する走時に対して、7%以内の残差を満足した場合を収束として判定することとした。初期値として与える各セルのスローネスは、ヤング係数 $E=40\text{GPa}$ 、ポアソン比 $\nu=0.2$ 、密度 $\rho=2300\text{kg/m}^3$ とした場合に得られる弾性波速度

$$V = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad (5)$$

の逆数を用いている。

4. 2 解析結果

Fig.7 に、中実供試体の走時曲線およびスローネス分布の解析結果を示す。中実供試体は内部がコンクリートのみであることから、走時曲線は各 SP および RP を結ぶ最短経路に近い線分となっている。スローネスの分布は中央部付近で一樣な分布となっており、中央部付近には異物が存在していないことが示される。しかし、下側 1/3 領域を中心に、スローネスが大きくなる場所が見られる。考えられる原因として、供試体内部の粗骨材分布に偏りがある可能性、および解析における収束条件 7% が終了した時点では収束が不十分である可能性が考えられるが、この点については後述する。

次に、Fig.8 に、中央ゴム供試体での走時曲線およびスローネス分布の解析結果を示す。走時曲線はおおむねゴムの存在する中心付近を避けていることが分かる。スローネスの分布については、中央付近に明確な変化が得られており、異なるスローネスを有する物体が存在していることを示している。

Fig.9 には、中央ゴム供試体の解析において得られた、繰り返し計算ステップごとのスローネス分布の収束過程を抜粋して示している。この図から、3 章で示したアルゴリズムと LTI 法を組み合わせることで、計算ステップ

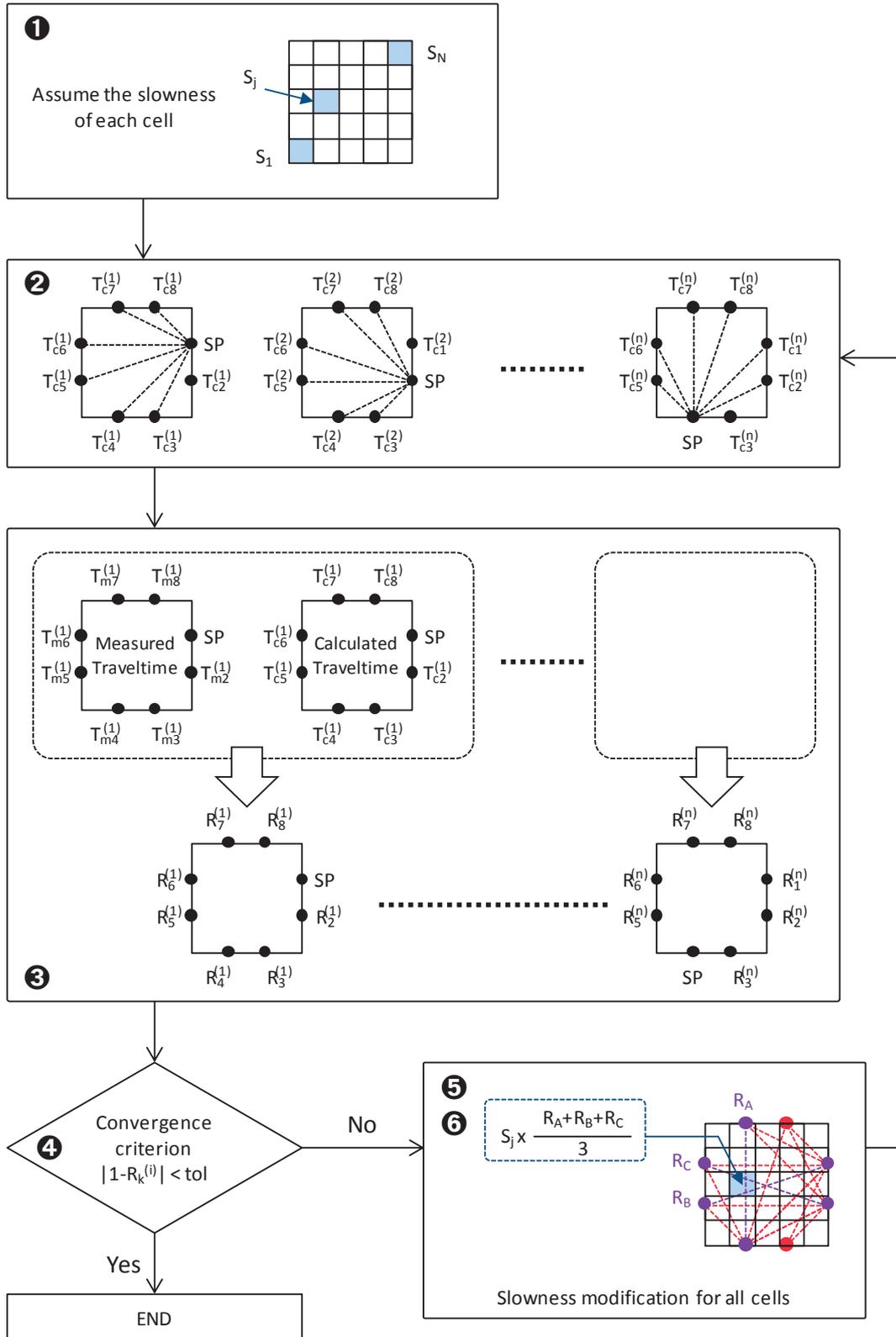


Fig.6 Algorithm of estimation of slowness distribution

ごとにゴムの存在を検出する形でスローネスが置き換わっていくことが分かる。

一方で、Fig.7, Fig.8 の結果をみると、一様なコンクリート板の内部に異なるスローネスが存在しているということも示されている。この原因としては、供試体内部の

粗骨材の分布が不均一であるなど、供試体に起因する可能性も否定できないが、提案したアルゴリズムでは走時曲線が存在しないセルについては、スローネスを決定するための一切の情報がなくなってしまうという問題があることも事実である。また、走時曲線が1本しか存在し

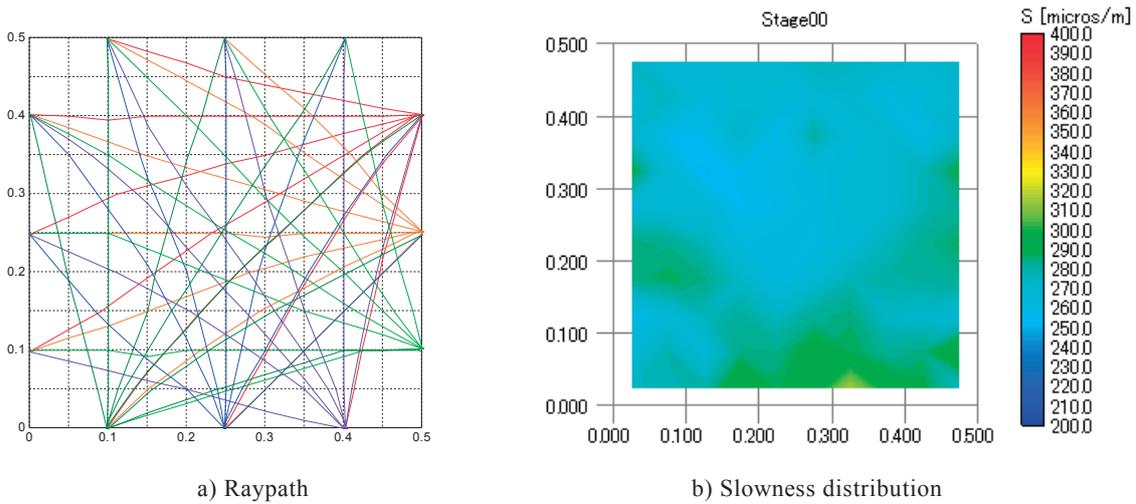


Fig.7 Analytical results of raypath and slowness distribution in the specimen (Slab A)

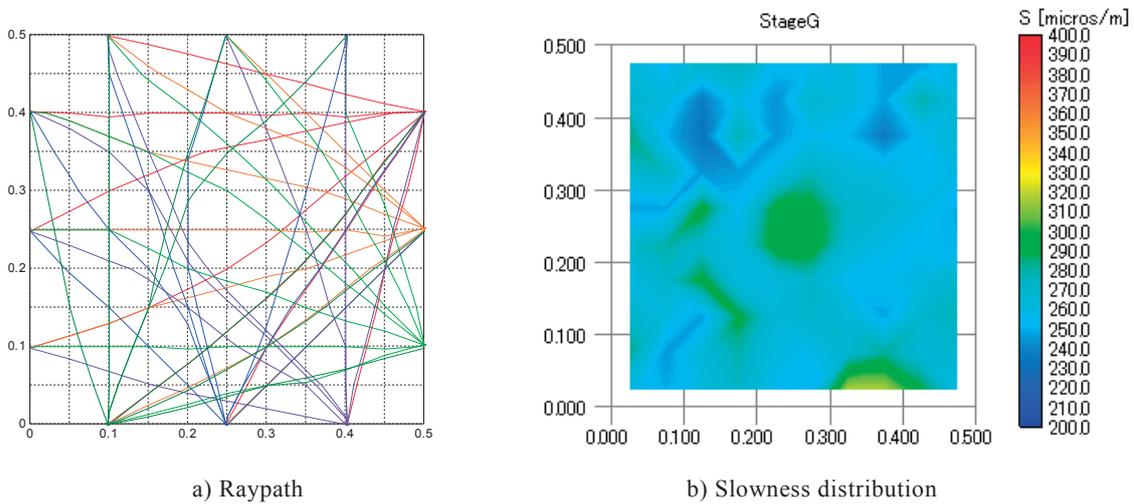


Fig.8 Analytical results of raypath and slowness distribution in the specimen (Slab B)

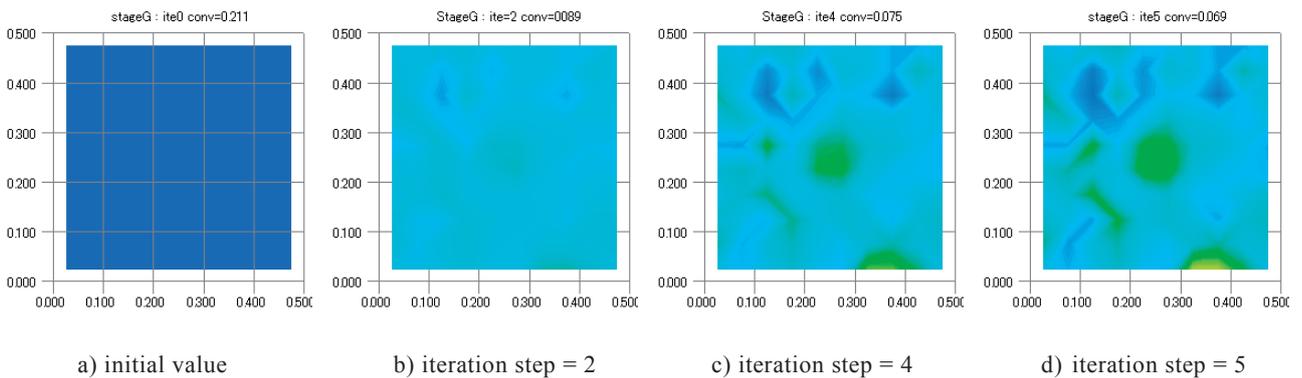


Fig.9 Analytical results of slowness distribution in each iteration step

ない場合も、そのセルのスローネスが走時曲線上の残差をすべて吸収するような収斂過程を取る可能性もある。

これらの点は、方程式の数が未知数の数よりも少ない場合に見られる問題と本質的に同一であることから、解の唯一性を保証するための力学的挙動（衝撃による振動モード）と組合せることで解決につながる可能性がある

と考える。

なお、今回の供試体はコンクリートであり、均一・等方性材料に近いモルタルで行うことで、上記不均一性の結果の生じた原因が供試体によるものか、アルゴリズムの限界によるものかを明確にできると考えられるが、この点は今後の検討課題としたい。

5. 結論および今後の課題

本研究では物質の種類によって弾性波速度が異なることを用いて、内部を確認できないコンクリートの内部状態を予測・可視化する手法を提案・検証し、その妥当性について検討した。得られた知見は以下のようである。

- ① 振動による弾性波の伝播時間を測定し、LTI法を利用したアルゴリズムに適用することで、供試体内部の状態をある程度把握する事が出来る可能性がある。
- ② 内部に明らかに性質の異なる物質が存在する場合、本研究で提案したアルゴリズムでその存在を把握できると考えられる。

一方で、解の唯一性を今回のような伝播時間（走時）のみによって保証することはできない。この点については、他の力学挙動を考慮する必要があると考えられるが、今後の課題とする。

謝辞

供試体の作成・実験の実施に際して、大同大学・木全博聖博士のご協力をいただきました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 内務省土木局：道路構造に関する細則案，1926
- 2) 日本道路協会：道路橋示方書V耐震設計編，1990

- 3) 大塚久哲：実践耐震工学，共立出版，pp.179-180，2004
- 4) 大内一：コンクリート系構造物の耐震設計法，森北出版，pp.2-9，2008
- 5) 堺淳一，川島一彦，武村浩志：試設計に基づく耐震技術基準の変遷に伴うRC橋脚の耐震性向上度の検討，構造工学論文集，Vol.43A，pp.833-842，1997
- 6) 組めない配筋図，日経コンストラクション 7月24日号，pp.36-56，2009.7
- 7) 川久保優：コンクリートの内部損傷状態の推定法に関する基礎的研究，2012年度東海大学修士論文，2013
- 8) 魚本 健人，広野 進，加藤 潔：コンクリート構造物の非破壊検査，森北出版株式会社，1990
- 9) 村瀬 豊・勝木 太・魚本 健人：超音波によるコンクリート内部空洞の可視化法，コンクリート工学年次論文集，Vol.26，No.1，2004
- 10) 野上茜，渡辺健，橋本親典，大津政康：弾性波伝播速度の計測における波長とコンクリート部材寸法の影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.28，No1，pp.1985-1990，2006
- 11) Asakawa,E. and Kawanaka,T.: Seismic ray tracing using linear travelttime inpolation, Geophysical Prospecting, Vol.44, pp.99-111,1993
- 12) Jinbo A., Yamada R., Kimata H. and Nakano T. : A study on estimation of inner part of concrete using elastic wave travelttime, 第41回土木学会関東支部技術研究発表会，V-39(CD-ROM)，2014.3