様　式　Ｃ－１９、Ｆ－１９－１、Ｚ－１９　（共通）

科学研究費助成事業　　研究成果報告書

令和　６ 年　５ 月 １９ 日現在

機関番号：１４３０１
研究種目：研究活動スタート支援
研究期間：2022～2023
課題番号：２２Ｋ２０４４６

研究課題名（和文）弾性波トモグラフィ法によるコンクリート構造物の定量的な健全性評価基準の構築

研究課題名（英文）Development of Quantitative Integrity Evaluation Criteria for Concrete Structures Using Seismic Tomography

研究代表者
小椋　紀彦（Ogura, Norihiko）

京都大学・工学研究科・特定助教

研究者番号：８０９０２９１５

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費）　　2,200,000円

研究成果の概要（和文）：国内外において社会インフラ（橋梁，トンネル等）の経年劣化、激甚化する自然災害による構造物の損傷等、構造物の機能低下に対して定量的な調査方法が求められている。コンクリート構造物内部のひび割れや施工不良に伴う空洞の劣化位置を調査する方法としては「弾性波トモグラフィ法」がある。本研究では、これまで損傷の寸法や範囲を定量的に評価するまでに至っていなかった課題に対して、供試体での実験と2次元の弾性波動方程式でのシミュレーション解析を行い、検出できる損傷は、センサ間隔と損傷の大きさ、モデルの分割数とそれを通る弾性波密度、センサ配置に起因することが示唆された。

研究成果の学術的意義や社会的意義
本研究は、弾性波トモグラフィ法によるコンクリート構造物の定量的な健全性評価基準を構築することを目指したものであり、国内外を問わず研究例が少なく先駆的であり、課題であった損傷の寸法や範囲に対して一定の知見が得られたことで学術的価値は高いと考えられる。特に定量的な評価の整備を行うことは、医療分野で災害発生時に使用される「トリアージ」のように、構造物の対策優先度を決める一助としての活用が期待でき、コンクリート構造物の定量的な診断・評価から社会貢献に繋がると期待できると考える。

研究成果の概要（英文）：In both domestic and international contexts, there is a growing demand for quantitative investigation methods to address the deterioration of social infrastructure (such as bridges and tunnels) due to aging, as well as damage to structures caused by increasingly severe natural disasters. One method for investigating the deterioration locations of cracks and voids caused by construction defects within concrete structures is the "elastic wave tomography method." In this study, to tackle the unresolved issue of quantitatively evaluating the size and extent of damage, we conducted experiments on test specimens and simulation analyses using two-dimensional elastic wave equations. The results suggest that the detectable damage depends on the sensor spacing, the size of the damage, the number of model divisions, the density of the elastic waves passing through, and the sensor arrangement.

研究分野：コンクリート工学、非破壊検査

キーワード：弾性波トモグラフィ　社会インフラ　コンクリート構造物　維持管理　健全性評価

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

１．研究開始当初の背景

現在、国内外において社会インフラ（橋梁、トンネル等）の経年劣化、激甚化する自然災害による構造物の損傷等、構造物の機能低下による社会基盤の大幅な低下がリスクとなっている。その中で、重要インフラの機能維持に関わる定量的な評価の整備を行うことは、医療分野で災害発生時に使用される「トリアージ」のように、構造物の対策優先度を決める一助としての活用が期待されており、コンクリート構造物の定量的な診断・評価から社会貢献に繋がると目されている。

評価手法の一つとして、コンクリート構造物内部のひび割れや施工不良に伴う空洞の劣化位置を計測する調査方法である「弾性波トモグラフィ法」(以下、TG)がある。TG の実施例を図 1 に示す。TG は、構造物表面に複数個の受信センサを設置した後、対面の構造物表面から弾性波を励起(入力)し、各センサに伝わる到達時間の差を利用して、構造物内部の空洞、ひび割れの劣化位置を計測する技術である。計測結果は、3 次元弾性波速度分布のコンター図で表すことができ、弾性波速度が遅い(赤色)領域は損傷の位置に相当する(青色は損傷なし)。TG は、大規模構造物の内部損傷が検出でき、また可視化での評価が明瞭であるため、土木、建築分野で新設・既設構造物の詳細調査、補修前後での施工評価などに導入されている。しかし、図 1 にあるように、実際にコンクリートを斫り内部を確認すると、損傷位置は一致しているものの、その範囲については更に拡大した領域であったことが分かる。つまり、TG では損傷の位置は正確に把握できているものの、速度の変化に応じた損傷範囲、寸法を示す定量的な評価が課題となっている。

２．研究の目的

本研究の目的は、TG でコンクリート構造物の定量的な健全性評価基準を構築することである。

TG 調査結果を評価する場合、日本コンクリート工学会の「超音波パルス伝播速度の標準測定方法(試案)」(表 1 参照)で提案されているコンクリートの品質基準(以下、JCI 基準)が参考とされる。しかし、ここでの品質とは主にコンクリートの密実性を指しており、弾性波が密実性の低い材料を伝搬すると、弾性波速度が低下することは既に知られている。一方、例えば内部に空洞がある場合では、弾性波は空洞を回避して伝搬し、弾性波経路が長くなることで弾性波速度が低下する。弾性波速度低下のメカニズムを図 2 に示す。このように、構造物内の空洞やひび割れ等の損傷が発生している場合、JCI 基準で示す低品質コンクリートの場合と弾性波速度の低下のメカニズムが明らかに異なる。つまり、弾性波の伝搬経路に着眼した定量的な評価指標の構築は、新たな独自性があり、実構造物の損傷により即したものになると考えられる。

３．研究の方法

図 3 に本研究のフローを示す。

空洞とひび割れの 2 つの損傷を対象に、シミュレーションと模擬供試体による計測を交えた検証を行った。

(1)シミュレーション

シミュレーションソフトは、2 次元の弾性波動方程式について近似値を計算する「Wave2000(Cyberlogic 社製)」

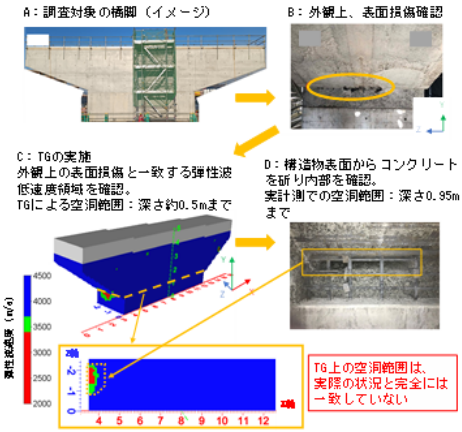

図 1　TG の実現場での実施例

表 1　コンクリートの品質基準

伝播速度(m/sec)	品質
4600 以上	優
3700～4600	良
3100～3700	やや良
2100～3100	不良
2100 以下	不可

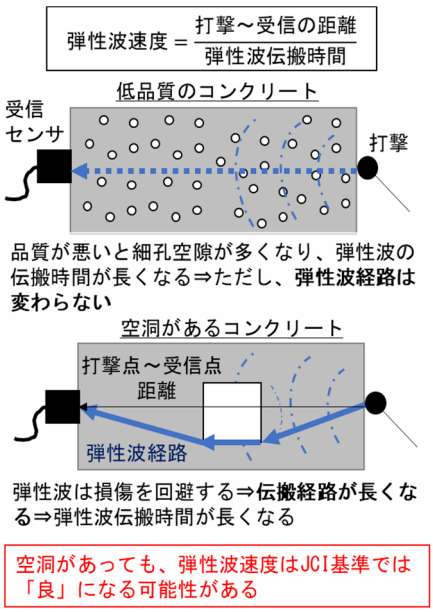

図 2　弾性波速度低下のメカニズム

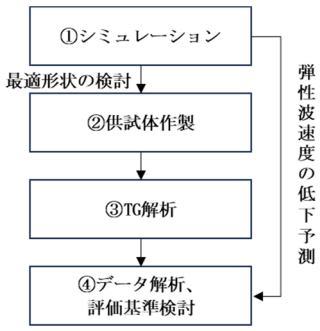

図 3　本研究のフロー

を使用した。供試体の最適形状を決定し、模擬損傷による弾性波速度の低下までを予測した。

(2)供試体作製

供試体は、ひび割れは鋼板で、空洞は発泡スチロールのブロックで模擬(大きさはシミュレーションを元に決定)することとし、大型コンクリート構造物での適用を見据え、一片 1m 以上の立方体で 2 体作製した。

(3)TG 計測

受信センサは、帯域の異なるセンサ(AE センサ、加速度センサ)を用意した。また、打撃点数やセンサ設置面数等をパラメータに加え、計測条件の影響を検討した。

(4)データ解析、評価基準検討

TG 計測から得られた弾性波速度の分布図と、シミュレーションで予測されたものを比較し、シミュレーションによる予測誤差、及び要因の特定を行った。その上で、再度シミュレーション上の構造物の形状と損傷の寸法を変化させ、弾性波速度の低下を算出し再現した。ここで、弾性波速度の低下を、予測誤差を含めた新規の評価基準で設定した。つまり、新規の評価基準では、対象構造物の寸法、損傷の種類や寸法、弾性波の伝搬経路の 3 つの要因から成り立つ。TG から得られた弾性波速度分布のコンター図に、新規の評価基準での評価を当てはめ、弾性波の低速度領域＝損傷範囲と一致させることを検討した。

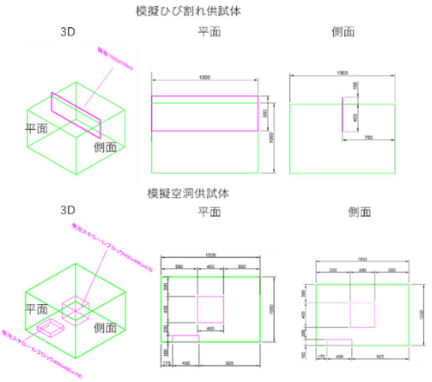

図 4　供試体寸法

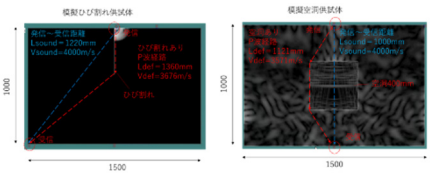

図 5　模擬損傷での速度低下予測

$$V_{def} = V_{sound} * \frac{L_{sound}}{L_{def}}$$

Vdef－損傷のある場合の P 波速度
Vsound－健全なコンクリートの P 波速度
(4000m/s が主に使われる)
L def－損傷のある場合の P 波経路
L sound－健全な場合の P 波経路
(受信～送信間の距離)

図 6　シミュレーション計算式

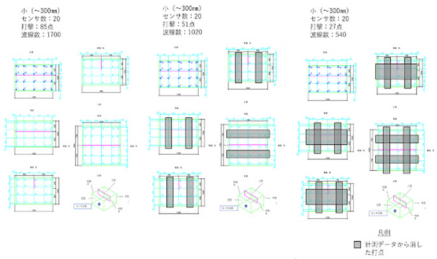

図 7　センサ配置例

4．研究成果

(1)シミュレーション結果

シミュレーションにより、模擬損傷による測定誤差以上の速度変化を得られる形状となる供試体寸法の特定を行った。供試体寸法を図 4 に示す。TG における P 波の測定誤差はサンプリング周期及び破線距離と関係があり、P 波の速度 4000m/s、破線距離 10cm で 160m/s の測定誤差となる。これに加え、現場での計測では、センサ位置、打点位置、及びトリガーセンサから打点位置までの距離による誤差が生じる。そのため、供試体模擬損傷の寸法は、P 波の測定誤差の 2 倍(320m/s)以上の速度低下を生じるように設定し、模擬ひび割れ深さを 400mm、大きい模擬空洞を 1 辺 400mm の立方体、小さい模擬空洞を 400×400×100 mm の直方体とした。

さらに、上記で設定した模擬損傷による速度低下を各供試体の代表断面で計算し、シミュレーションを行った。結果を図 5 に、計算式を図 6 に示す。P 波速度の減少は、損傷の影響による P 波経路の増加に比例することが判明した。

(2)供試体作製

シミュレーション結果をもとに供試体作製を行い、センサ間隔、打撃点数、打撃面数、センサの設置面(ひび割れ模擬供試体のみ実施)、センサの設置面数(空洞模擬供試体のみ実施)、センサの種類の計 6 個のパラメータ毎に、計測結果に与える影響を調査した。

また、これらの結果をもとに最適なセンサ配置及び打撃位置を推定し、定量的な評価に向けた検討を行った。なお、打撃に用いる鋼球径は事前検討の段階で計測結果への影響が少ないことが判明したためパラメータから除外し、D20 の鋼球径で打撃を 10 回実施し、スタッキング処理を行うことで統一した。TG 解析は分割 1 回、繰り返し 10 回、スタート速度 4600m/s(計測上の速度の中央値)とした。

(3)TG 計測結果

下記①～⑦の各パラメータに関する計測及び検討を行った。

なお、ひび割れ模擬供試体を用いる際は、ひび割れ開口のある面と無い面の両箇所にセンサを設置して計測を実施し、2 つの計測結果を合併させて TG 解析を行った。センサ配置例を図 7 に示す。

<u>①センサ間隔に関する検討</u>

センサ間隔を「小(～300mm)」、「中(～500mm)」、「大(～700mm)」とし、解析結果を比較した。その際、センサ間隔「大」の計測データは、センサ間隔「小」の計測データから打撃点及びセンサ点の一部を間引きすることでデータを作成することとした。波線数については、打撃点数×センサ数で求め、センサ間隔により打撃点数が変化することを考慮し、波線数が近いケースを選択して比較を行った。ひび割れ模擬供試体での計測時は、波線数～500(「小」～27 打点、「中・大」

～85 打点)、波線数～300(「中」～26 打点、「大」～51 打点)とした。

TG 結果を図 8 に示す。センサ間隔及び打点数の減少に伴い、TG 結果の精度が荒くなることが確認された。波線数に着目すると、波線数が～1020 では空洞を特定できたものの、～540 では特定できなかった。そのため、今回の供試体と同等の 1.5×1.5×1m^3 程度のコンクリート部材において 1 辺 400mm の立方体の空洞を特定するためには、波線数～1020、かつ波線密度～455 波線/ m^3 が必要となることが明確になり、これは TG 計測の計画段階において今後の目安の一つとなり得るものである。ただし波線密度は、部材寸法、空洞寸法、及びモデルのノード間隔に対しても影響を受けるものであり、波線密度は絶対値ではなく、本実験と類似条件下で調査を実施した場合の参考値程度の位置づけとして扱うべきと考えられる。

②打撃点数に関する検討

センサ間隔「小」のデータから、打撃点数：27 点、51 点、85 点の 3 ケースで計測を行い、結果を比較した。TG 結果を図 9 に示す。センサ間隔に関する検討と同様に、打撃点数の減少に伴い、TG 結果の精度が荒くなることが確認された。また、波線数～1020 では空洞を特定することはできたが、～540 では特定ができず、①での検討と同様の結果であった。

③打撃面数に関する検討

センサ間隔「小」のデータを使用し、センサ面を除く各打撃面数が計測結果に与える影響について検討した(全面「4 面」、上面以外「3 面」、背面＋左側面「2 面」、左右側面「2 面」、背面のみ「1 面」、左側面のみ「1 面」)。TG 結果を図 10 に示す。打撃面数の低下に伴い、TG 結果の精度が荒くなることが確認された。また、ひび割れに対しては、弾性波の経路の長さに強く関係すると考えられた。今回、ひび割れ開口の近辺で打撃を行った際には、波線経路が長くなることで、弾性波速度が低下するケースが見られた。

空洞の検出については、波線数が～400 である背面のみ、及び左側面のみの 1 面での打撃面数では、空洞の特定ができなかった。

④センサ設置面に関する検討

ひび割れ模擬供試体を用いて、センサ設置面が計測結果に与える影響について検討した。センサ設置面は、ひび割れ開口のある面、及び開口の無い面の 2 ケースで実施している。TG 結果を図 11 に示す。ひび割れ開口の無い面の TG 結果からは、ひび割れをはっきりと捉えることが確認できた。一方、ひび割れ開口のある面では、ひび割れの特定ができなかった。これは弾性波速度がひび割れ開口付近で著しく低下したことが原因と考えられ、打撃面数の検討時と同様に、弾性波速度の低下程度が TG の結果に大きく影響したと考えられる。また、センサの設置ついては、ひび割れ開口に対して波線が直角方向となるように計測を行うことで、ひび割れを正確に特定できることも確認できた。

⑤センサ設置面数に関する検討

センサを、空洞模擬供試体の 3 面(正面、左側面、右側面)に設置した後、上面及び背面を打撃し計測を行った。計測条件としては、センサ間隔を「大(～700mm)」、センサ数は 18 点、打撃点数を 45 回とした。またその後、センサを 1 面（正面）のみに設置し、センサ間隔を「大(～700mm)」、及び「小(～300mm)」の 2 ケースとした計測を行い、先の結果と比較することで、センサ設置面数の与える影響について検討した。なお、波線数は精度に影響を及ぼすため、波線数を合わせた上で複数回の計測を行った。

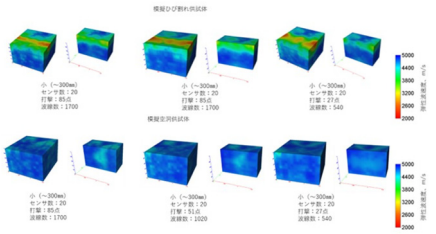

図 8　センサ間隔検討結果

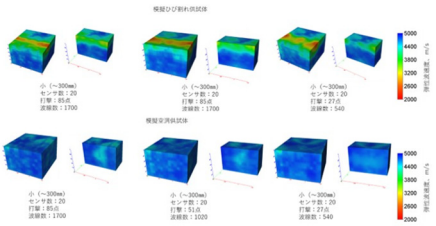

図 9　打撃点数検討結果

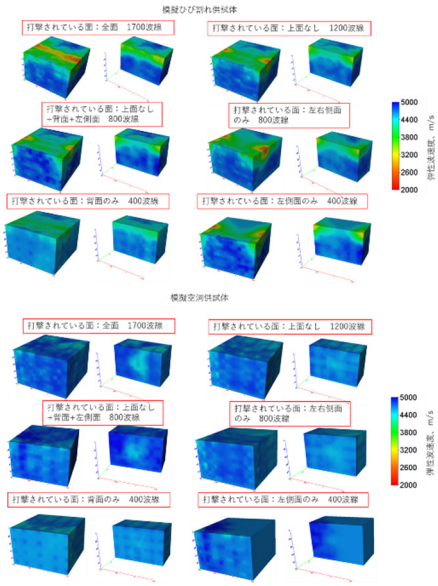

図 10　打撃面数検討結果

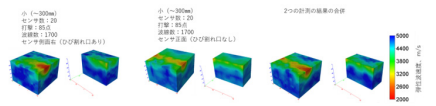

図 11　センサ設置面検討結果

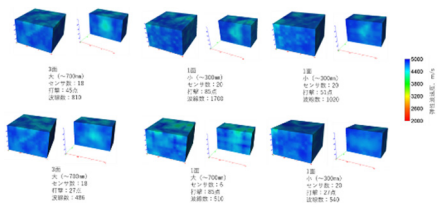

図 12　センサ設置面数検討結果

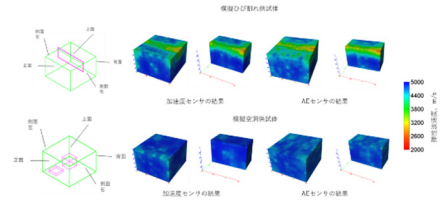

図 13　センサの種類検討結果

TG 結果を図 12 に示す。1 面のみの設置より 3 面に配置したケースの方が、波線数量に関わらず、明瞭な TG 結果が得られた。また、打撃点数の増加より、センサ設置面数を増やす方が、効果的な計測結果が得られることが分かった。

⑥センサの種類に関する検討

センサ間隔を同じとして、加速度センサ、及び AE センサの 2 種類を使用し、センサの種類による影響について検討を行った。TG 結果を図 13 に示す。TG 解析の処理段階において、加速度センサは AE センサと比較して、自動初動波到達時間の読取り(AIC)時のエラーが少ない傾向が認められた。TG 解析結果を比較すると、加速度センサを使用した場合の方が、伝搬速度が全体的にやや速く、ばらつきが少なくなる傾向にあった。しかし一方で、SNR が非常に高いものの、サンプリングレートについては、比較的低いという特徴が見られた。そのため、加速度センサは、大型構造物を対象とした計測での使用には問題は生じないが、部材が小さい構造物を対象とした計測では、速度誤差が生じやすくなる傾向にあると考えられた。

⑦損傷箇所の位置の検討

空洞模擬供試体下面に設定した小さい模擬空洞(100×100×400mm)検出の可否を検討するため、供試体の設置方向を変更した。概要を図 14 に示す。①～⑥の各パラメータでの検討を踏まえ、先の検討成果に基づき、センサを 3 面に設置し、打撃面数を 2 面とした再計測を行うこととした。センサ設置面 3 面は、正面及び両側面の場合と背面及び両側面の場合の 2 ケースで行い、センサには加速度センサ及び AE センサを用いた。TG 結果を図 15 に示す。センサに着目すると、これまでの検討結果と同様に、加速度センサの方が速度の値はやや高く、ばらつきは少ない傾向にあった。また、供試体内部中央に設置した大きい模擬空洞は特定できたものの、下面に設置した小さい模擬空洞については、加速度センサ、及び AE センサとも弾性波速度の速度差は僅かであり、明確な検出には至らなかった。このことから、構造物等の表面側にある浅い損傷は、TG 計測では検出しにくいことが明らかとなった。表面部の浅い損傷は、波線長の変化が少なくなるため、損傷に伴う弾性波速度の低下が顕著に表れないためと考えられる。

(4)データ解析、評価基準検討

シミュレーション、及び供試体試験で得られた弾性波速度の変化を比較するとともに、センサ毎の速度についても同様に比較した。なお、測定結果は各ケースで 3 回のデータを取得し、その平均を計測値とした。比較結果を表 2 に示す。比較の結果、弾性波速度に着目すると、供試体で計測した速度はシミュレーション値より全体的に速い値を示した。シミュレーションで設定した弾性波速度が一律 4000m/s であったことから、供試体はこれより速い弾性波速度の領域があったと考えられる。弾性波速度はコンクリートの品質で変化するが、加速度センサでの健全な範囲のコンクリートの弾性波速度は～5300m/s、同条件における AE センサで用いた際の計測結果は～4800m/s であった。センサによる違いもシミュレーションでの結果との差に影響を及ぼしていると考えられる。健全と損傷を通過した場合の速度変化について着目すると、個々の計測値は異なっているものの、速度変化は概ねシミュレーション通りであり、予測誤差は 4%以内であった。

図 14　供試体向き変更

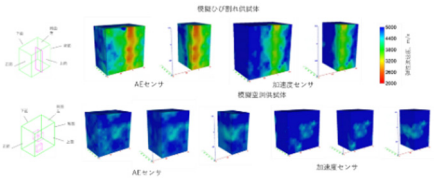

図 15　損傷箇所位置の検討結果

表 2　解析値と計測値の比較結果

項目			Vdef, m/s	Vsound, m/s	速度変化 Vdef/Vsound	Ldef, m	Lsound, m	波長変化 Lsound/Ldef	速度変化と波長変化の比率
シミュレーション	模擬ひび割れ		3576	4000	0.92	1.33	1.22	0.92	1.00
	模擬空洞		3571	4000	0.89	1.12	1.00	0.89	1.00
供試体(AEセンサ)	模擬ひび割れ	①	4069	4743	0.86	1.33	1.22	0.92	0.94
		②	3969	4585	0.87	1.39	1.15	0.83	1.05
		③	3902	4787	0.82	1.39	1.15	0.83	0.99
		平均	3980	4705	0.85	1.37	1.17	0.86	0.99
	模擬空洞	①	4659	4908	0.95	1.80	1.73	0.96	0.99
		②	4586	4882	0.94	1.80	1.73	0.96	0.98
		③	4520	4878	0.93	1.52	1.49	0.98	0.95
		平均	4588	4889	0.94	1.71	1.65	0.97	0.97
供試体(加速度センサ)	模擬ひび割れ	①	5086	5730	0.89	1.33	1.22	0.92	0.97
		②	4427	5628	0.79	1.39	1.15	0.83	0.95
		③	4263	5388	0.79	1.39	1.15	0.83	0.96
		平均	4592	5582	0.82	1.37	1.17	0.86	0.96
	模擬空洞	①	4815	5246	0.92	1.80	1.73	0.96	0.98
		②	4953	5227	0.95	1.80	1.73	0.96	0.99
		③	4661	5125	0.91	1.52	1.49	0.98	0.93
		平均	4810	5199	0.93	1.71	1.65	0.97	0.96

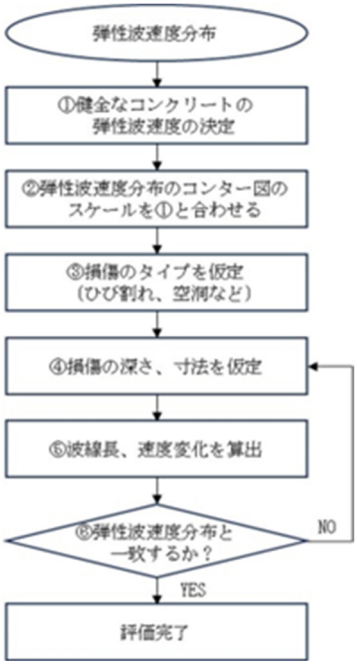

図 16　TG 評価の流れ

最後に、本研究の結果に基づき制定した TG による評価の流れを図 16 に示す。今後はさらに実構造物を対象とした TG 計測を行い、更なる実用性の検討を目指していく。

５．主な発表論文等

〔雑誌論文〕　計1件（うち査読付論文　1件／うち国際共著　0件／うちオープンアクセス　1件）

１．著者名 Sagradyan Artur、Ogura Norihiko、Shiotani Tomoki	４．巻 14
２．論文標題 Application of elastic wave tomography method for damage evaluation in a large-scale reinforced concrete structure	５．発行年 2023年
３．雑誌名 Developments in the Built Environment	６．最初と最後の頁 100127～100127
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.dibe.2023.100127	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 －

〔学会発表〕　計0件

〔図書〕　計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

－

６．研究組織

	氏名 （ローマ字氏名） （研究者番号）	所属研究機関・部局・職 （機関番号）	備考

７．科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕　計0件

８．本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関