

打音検査によるセグメント背面充填状況の確認

Confirmation to filling condition of tunnel segment lining back side by hammering test

キーワード

シールドトンネル, 裏込め注入, 空洞探査,
打音検査, 外れ値, 箱ひげ図

瀬谷 正巳*, 歌川 紀之*, 黒田 千歳*

研究概要

シールド工法における裏込め注入工は、地盤沈下や既設構造物への影響を防ぐ上で非常に重要である。裏込め注入にあたっては、通常、注入量を過不足ないように注入するが、掘削土の取込過多などの原因により注入量が足りず、空洞が完全に充填されない場合もあり得る。

そのため、今回、シールド施工の品質管理にあたり、健コン診断ポータブルを用いた打音検査により、セグメント背面の空洞の有無の確認を行った。

本論では、健コン診断ポータブルを用いた打音検査によるセグメント背面空洞の有無の確認手法について検討し、その手法の妥当性を示す。

ABSTRACT

Backfill injection method for shield tunnel lining is important to prevent above ground surface settlement and influence of neighborhood existing structures during shield tunnel construction. As for backfill injection, normally injection volume is controlled to avoid in proper quantities. But, some voids were not filled fully by the injection material due to excessive intake by shield construction machines, etc. So, hammering inspection by instrument which is called the KENKON-SHINDAN Portable was applied to inspect behind tunnel lining segments whether voids are there or not. In this paper, the result is shown by examination of this method and adequately.

1 研究目的

シールド工法では、掘削径がセグメント径よりわずかに大きく、セグメント組み立て後、セグメント外面と地山との間にテールボイドと呼ばれる空隙が残る。このテールボイドをそのままにしておくと地山の緩みが進行し、地盤沈下や既設構造物への影響が懸念されるため、裏込め注入工として、速やかに注入材で空隙を充填しなければならない。裏込め注入にあたっては、通常、注入量管理、注入圧管理を行うことで過不足のないような注入とするが、掘削土の取込過多などの原因により注入量が足りず、空洞が完全に充填されないような場合もあり得る。

今回、当該シールド工事において「掘進時における地盤変位（地盤沈下などの返上）の抑制に関する工夫」という技術提案項目があり、それに対して当初、電磁波レーダー探査によってセグメント背面の空洞の有無を把握するという提案を行った。しかし、今回工事は全区間で鋼製セグメントを使用することになっており、電磁波レーダーでは鋼製セグメントを透過して背面の空洞の有無を確認する

ことは出来ない。そのため、電磁波レーダー探査の代替として、健コン診断ポータブルを用いた打音検査により、セグメント背面の空洞の有無を提案し、その妥当性について検証することになった。

本報告では、打音検査の適用性を検証する予備計測と予備計測結果を元にして定めたセグメント背面空洞の有無についての確認手法について述べる。

2 計測の概要

2.1 「健コン診断ポータブル」について

今回、計測機器としては、打音検査用に当社で開発した健コン診断ポータブルを用いた。

コンクリート内部の欠陥などを調査する方法として、コンクリート表面をテストハンマーなどで叩いて音を聞く「叩き点検（打音調査）」が一般的に行われているが、健コン診断ポータブルは、叩き点検をシステム化したものである。

* 技術センター 土木研究部

健コン診断ポータブルは、打撃力を検出できるインパルスハンマ、フード付きマイクロフォン、ADコンバーター、解析用パソコンから成り（写真-1）、一人の計測担当者がマイクをセットし打撃することで、打撃箇所の計測結果（打撃力、発生音）がモニターに表示されるとともにパソコンに記録される。



写真-1 健コン診断ポータブルの構成

2.2 予備計測の計測方法

健コン診断ポータブルでは、フード付きマイクロフォンで打撃時に発生する振動を音として捉え、その音の波形を解析することで、コンクリート内部の欠陥の位置を把握する。今回、課題となっているセグメント背面の裏込めの充填状況、空洞の有無についても健コン診断ポータブルにて計測を行うことで評価できるものと考えた。

具体的な計測方法は以下の通りである。

- ・ 叩き位置を決める（セグメントの場合は基本的に天頂部とする）
- ・ 叩き位置のすぐ脇（約3cm以内）にマイクロフォンを当て、出来るだけ同一箇所です10回以上叩き、データ（打撃力、打撃音）を記録する（写真-2）



写真-2 健コン診断ポータブルの計測状況例

2.3 予備計測の計測条件および計測箇所

セグメント背面空洞の有無について確認する手法を検証するために予備計測は、計4回にわたり、それぞれ計測条件、計測箇所を変えて実施した。

第1回目の計測では、写真-3に示すように上に凸に置いたセグメントに木枠を被せた模擬試験体を用い、セグメント背面（セグメントの上部）の条件を表-1の通りに変えてセグメントの下側から打音計測した（写真-4）。

表-1 模擬試験体のセグメント背面の条件

セグメント背面の条件	実際の状況
空	セグメント背面に何も無い状況
水	水を入れた袋をセグメント背面に密着させる（写真-5）
裏込材固化前	裏込材を入れた袋をセグメント背面に当て、固化前に計測（写真-6）
裏込材固化後	裏込材を入れた袋をセグメント背面に当て、90分後に計測



写真-3 模擬試験体



写真-4 模擬試験体の打音計測状況



写真-5 「水」の設置状況



写真-6 「裏込材」の設置状況

第2回目から第4回目の計測では、施工済セグメントを対象として、裏込注入前のセグメントと裏込注入後のセグメントをそれぞれ計測した（写真-7）。



写真-7 セグメントの計測状況

2.4 計測データの処理

健コン診断ポータブルでは、インパルスハンマで計測した打撃力、フード付きマイクロフォンで計測した発生音（打撃音）が記録されるが、それに伴ってそれぞれに対し自動的に周波数解析（FFT 解析）を行い、その結果も記録される（図-1）。

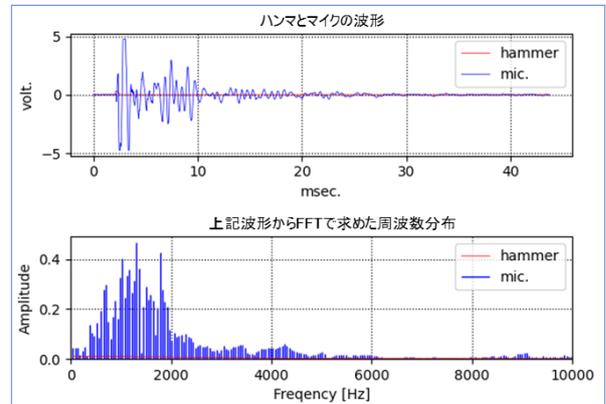


図-1 健コン診断ポータブルによる計測結果の例

今回の計測では、セグメント背面の充填性、空洞の有無を評価するために、振幅エネルギー量 E 、周波数重心 G という値を指標として用いた。

振幅エネルギー量 E は、打撃音のエネルギーの大きさ（総和）を表す。一般に背面に空洞がある場合には、打撃音の波形の振幅は大きく、また音自体長く継続するので E は大きく、一方で背面の充填が密だと E は小さくなる。

周波数重心 G は、周波数解析結果で最も卓越する周波数に対応する。一般に背面に空洞がある場合、音の減衰が小さいので G は大きく、背面の充填が密だと G は小さくなる。

以下に、第1回目の計測で測定した模擬試験体の「空」の測定結果例（図-2）と模擬試験体の「裏込材固化後」の測定結果例（図-3）を示す。

この2つの波形のグラフを比較した場合、明らかに振動の連続時間の異なっていることが分かる。

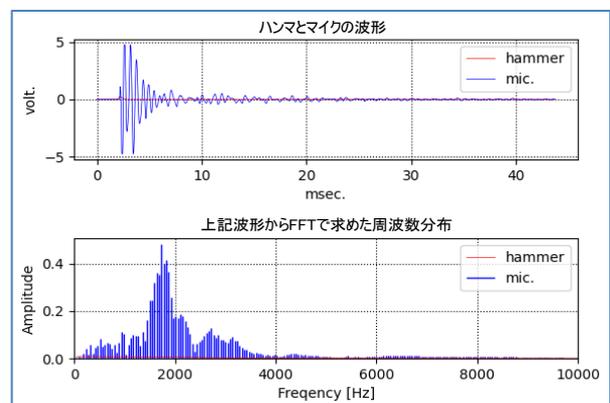


図-2 模擬試験体の「空」の測定結果の例

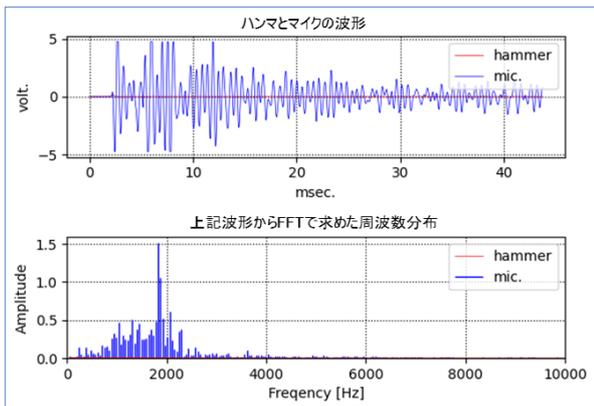


図-3 模擬試験体の「裏込材固化後」の測定結果の例

振幅エネルギー量 E 、周波数重心 G は、振動波形および周波数解析の結果から下記式でそれぞれ求める。

- ・振幅エネルギー量 E の算出

振幅エネルギー量 E は、振動波形のグラフでの振幅の二乗和として求める。

$$E = \sum_t V^2 \quad (1)$$

ここに、 E ：エネルギー量、 V ：振幅 (volt)

- ・周波数重心 G の算出

周波数重心 G は、周波数分布のグラフで、振幅と周波数の積和を振幅の和で割って求める。

$$G = \frac{\sum VHz}{\sum V} \quad (2)$$

ここに、 G ：周波数重心、 V ：振幅 (volt)、
Hz：周波数

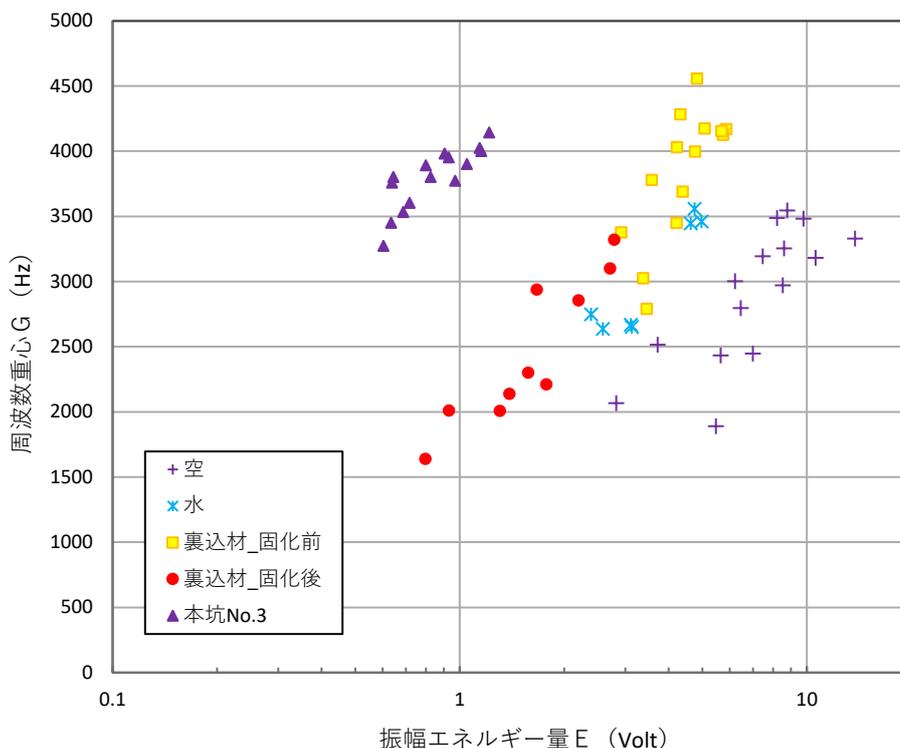


図-4 第1回目計測の計測結果 (振幅エネルギー量 E および周波数重心 G の分布)

3 予備計測の計測結果

3.1 第1回目計測

3.1.1 計測条件および計測箇所 (第1回目)

第1回目の計測として健コン診断ポータブルを使用し、表-2に示す条件、箇所について、それぞれ10回以上打音計測を行った。

なお、本坑 (実現場) 内のセグメントを計測する場合、天頂部付近が最も空洞が発生しやすいと思われるので、計測箇所は基本的に天頂部付近とする。

表-2 模擬試験体の打音計測条件、計測箇所

計測回	計測条件、計測箇所
第1回目	模擬試験体 (空、水、裏込材固化前・後) 裏込材注入済セグメント (No.3)

3.1.2 振幅エネルギー量および周波数重心 (第1回目)

計測結果から振幅エネルギー量 E 、周波数重心 G を求め、グラフに表す (図-4)。

3.1.3 計測結果の特徴 (第1回目)

第1回目計測結果の特徴を以下に示す。

- ・計測結果は、それぞれの計測条件、計測箇所ごとにある程度まとまりをもって異なる領域に分布する。特に振幅エネルギー E については、その傾向が比較的顕著である
- ・模擬試験体での計測結果と本坑 (実現場) についての計測結果とでは傾向が異なる

3.1.4 計測結果のまとめ(第1回目)

第1回目計測結果を以下にまとめる。

- ・ 模擬試験体で計測条件が異なると、打撃音の振幅エネルギー量 E および周波数重心 G が異なる傾向を示すことが分かった。このため、この値を求め比較することで、セグメント背面の裏込め充填状況、空洞の有無を判別できる可能性がある
- ・ 実際の施工区間における判別の閾値を求めるためには、本坑（実現場）での測定が必要である

3.2 第2回目～第4回目計測

第1回目の計測の結果から本坑（実現場）での計測が必要ということが分かったので、第2回目から第4回目において本坑の既掘削区間で条件、場所を変えて計測を行った。

3.2.1 計測条件および計測箇所(第2回目～第4回目)

第2回目から第4回目の計測ケース、計測箇所を表-3に示す。健コン診断ポータブルを用いて、計測対象のリングの天頂部付近で、それぞれ10回以上計測を行った。

3.2.2 振幅エネルギー量 E の平均および周波数重心 G の平均(第2回目～第4回目)

計測結果から振幅エネルギー量 E、周波数重心 G を求め、グラフに表す。ただし、データが多くて煩雑なので、各計測箇所（セグメント）ごとに平均を求め、その値を表示する（図-5）。

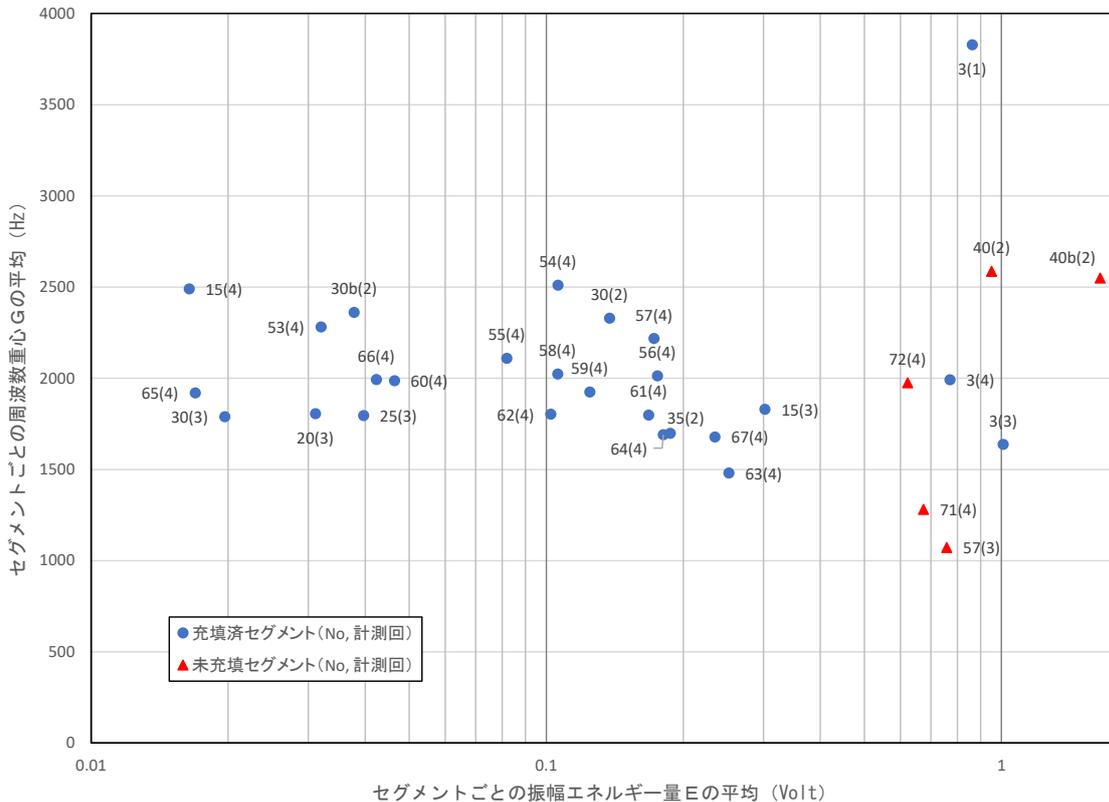


図-5 第2回目～第4回目計測の計測結果（振幅エネルギー量 E の平均および周波数重心 G の平均の分布）

表-3 第2～4回目計測の打音計測条件、計測箇所

計測回	計測条件、計測箇所
第2回目	裏込注入前セグメント (No.40) 裏込注入済セグメント (No.30, 35)
第3回目	裏込注入前セグメント (No.57) 裏込注入済セグメント (No.3, 15, 20, 25, 30)
第4回目	裏込注入前セグメント (No.71, 72) 裏込注入済セグメント (No.3, 15, 53~67)

3.2.3 計測結果の特徴(第2回目～第4回目)

第2回目から第4回目計測結果の特徴を以下に示す。

- ・ 計測結果は、それぞれの計測箇所ごとにある程度のもまりをもって異なる領域に分布する
- ・ 裏込の注入前と裏込の注入後では領域の位置が異なり、判別することができる。ただし、No.3の計測結果は、他のリングの計測結果と傾向が異なる
- ・ 周波数重心 Gave については、裏込注入前と裏込注入後とで、はっきりした傾向が見られない

3.2.4 計測結果のまとめ(第2回目～第4回目)

第2回目から第4回目の計測結果を以下にまとめる。

- ・ 裏込注入前と注入後については、振幅エネルギー量 Eave の結果に基づき、判別することができる
- ・ 周波数重心 Gave の結果では判別することが難しい
- ・ No.3については他のリングの計測結果と傾向が異なるため、十分に充填されていない可能性がある。再調査するか、再注入を検討した方がよい

4 判別のための閾値の検討

予備試験の結果に基づき、健コン診断ポータブルによる計測で得られる振幅エネルギー量 Eave の値と周波数重 Gave の値についてセグメント背面の裏込め充填状況、空洞の有無の判別についての適用性を確認した。その結果、周波数重心 Gave の値は適用できないが、振幅エネルギー量 Eave の値からセグメント背面の裏込め充填状況、空洞の有無を判別できることが分かった。すなわち、振幅エネルギー量 Eave が小さければ十分に充填されていると見なすことができ、振幅エネルギー量 Eave が一定の値より大きければ充填が不十分という懸念がある（図-6）。

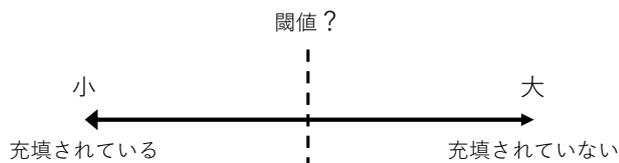


図-6 振幅エネルギー量 Eave と充填状況の関係

ただし、充填と未充填を明確に判別するにあたっては、判別のための閾値が必要となる。閾値については、図-5 に示した予備計測で求められた全ての充填されたセグメントと未充填のセグメントの振幅エネルギー量 Eave から求める。

今回、計測で得られた振幅エネルギー量 Eave のデータに基づき、充填されているセグメントと未充填セグメントを判別するにあたっては、四分位範囲を用いた外れ値の判定法（箱ひげ図を用いた方法）を用いて閾値を定めた²⁾。

四分位範囲を用いた外れ値の判定法とは、データの分布において、他の観測値から外れた値（外れ値）を判定する統計的な手法の一つである。

データを大きさ順に並び替え、データ数で四分等分した時の区切り値の値を四分位数と呼ぶが、この四分位数を用いて外れ値を判定する。四分位数は、小さい方から第1四分位数 Q1、第2四分位数 Q2（＝中央値 median）、第3四分位数 Q3 と呼ばれ、Q3-Q1 を四分位範囲 IQR と言う。この時、

$$\text{上限管理限界 UCL} = Q3 + 1.5 \times \text{IQR}$$

$$\text{下限管理限界 LCL} = Q1 - 1.5 \times \text{IQR}$$

として、一般に UCL を超えた値、LCL 未満の値を外れ値と判定し、逆に LCL～UCL のデータについては、所与のデータと同じ集合に含まれるとみなすことが出来る（図-7）。

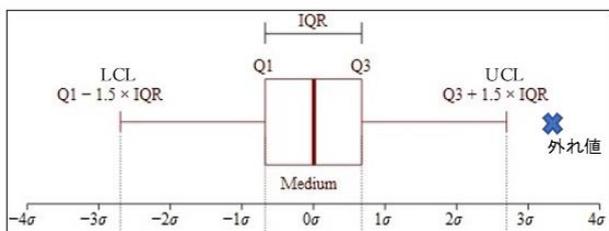


図-7 四分位範囲による外れ値の判定（箱ひげ図）

この判定手法を充填されたセグメントの振幅エネルギー量 Eave に適用する（表-4、表-5）。この結果、データが全て管理限界内（LCL～UCL）に収まっていることが分かる。なお、No.3と18日計測のN0.15の結果については、異常値として計算の対象からは削除した。

表-4 充填済セグメントの振幅エネルギー量 E の平均値

No	データ名	E ave	No	データ名	E ave
1	30(2)	0.137702648	12	57(4)	0.172502181
2	30b(2)	0.037796153	13	58(4)	0.105933628
3	35(2)	0.187144749	14	59(4)	0.124569366
4	20(3)	0.031117088	15	60(4)	0.046388236
5	25(3)	0.039683374	16	61(4)	0.167878642
6	30(3)	0.019655871	17	62(4)	0.102344259
7	15(4)	0.016416953	18	63(4)	0.251720078
8	53(4)	0.032013406	19	64(4)	0.180768032
9	54(4)	0.106090219	20	65(4)	0.016929476
10	55(4)	0.081924871	21	66(4)	0.042352798
11	56(4)	0.175517652	22	67(4)	0.234789166

※ データ名は、セグメントNo、()内は計測回

※ No.3、第3回計測のN0.15の結果は除く

表-5 表-4 の Eave に関する四分位範囲等の計算結果

第1四分位数 Q1	0.08836
第2四分位数 Q2	0.14622
第3四分位数 Q3	0.17683
四分位範囲 IQR	0.08847
上限管理限界 UCL	0.30954
下限管理限界 LCL	-0.04436

次に、未充填セグメントの振幅エネルギー量 Eave に適用する（表-6、表-7）。

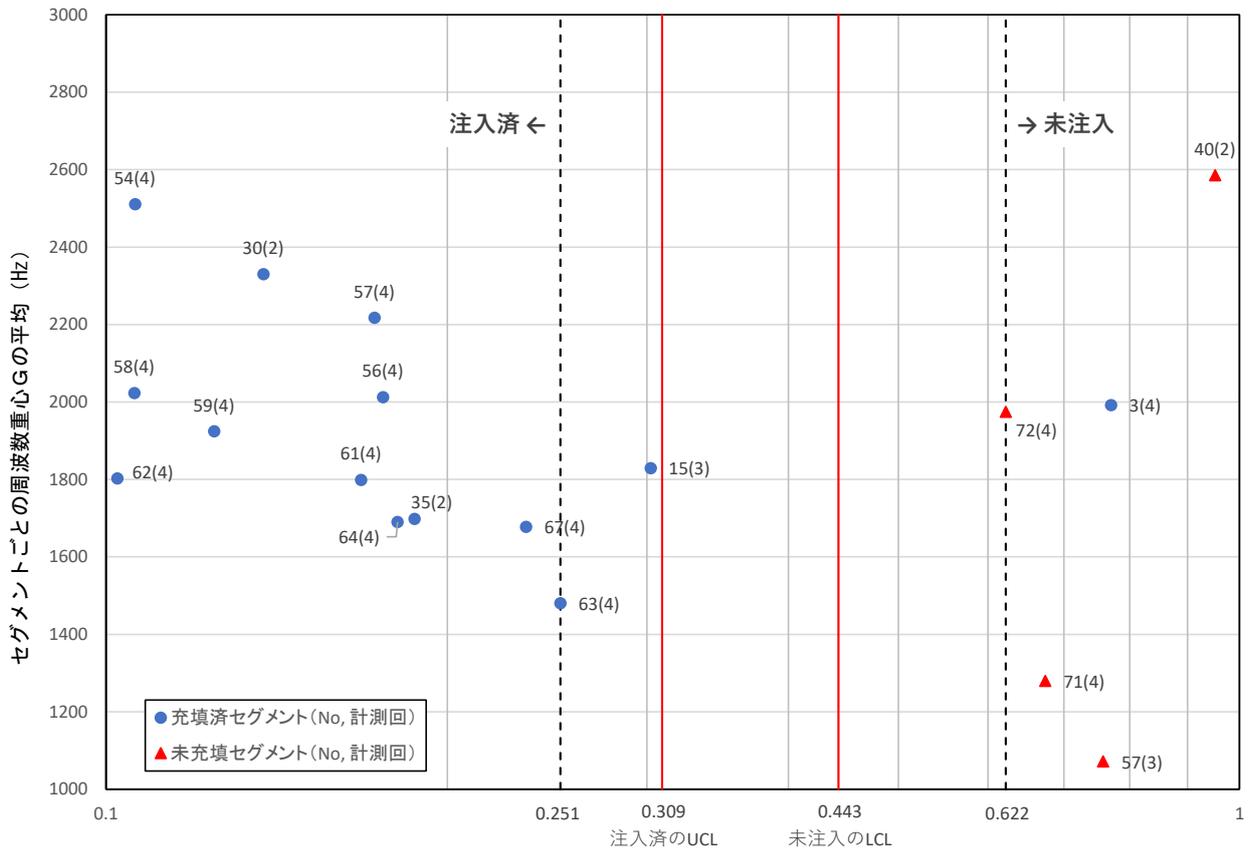
表-6 未充填セグメントの振幅エネルギー量 E の平均値一覧

No	データ名	E ave
1	40(2)	0.951631912
2	40b(2)	1.648248758
3	57(3)	0.758192489
4	71(4)	0.674125618
5	72(4)	0.621995269

表-7 表-4 の Eave に関する四分位範囲等の計算結果

第1四分位数 Q1	0.67413
第2四分位数 Q2	0.75819
第3四分位数 Q3	0.95163
四分位範囲 IQR	0.27751
上限管理限界 UCL	1.36789
下限管理限界 LCL	0.25787

この結果によると、「40b(2)」の値が上限管理限界を超えているため、「40b(2)」のデータは削除し、残りのデータ



セグメントごとの振幅エネルギー量Eの平均 (Volt) (0.1~1.0の範囲のデータに限定)
 図-8 振幅エネルギー量 E の平均および周波数重心 G の平均の分布と判別の区分

について、再度、四分位範囲を用いた外れ値の判定方法を適用する(表-8, 表-9)。その結果、データが全て管理限界内(LCL~UCL)に収まっていることが分かる。

表-8 未充填セグメントの
 振幅エネルギー量 E の平均値一覧

No	データ名	E ave
1	40(2)	0.951631912
2	57(3)	0.758192489
3	71(4)	0.674125618
4	72(4)	0.621995269

※ 第2回計測のNo.40bの結果は除く

表-9 表-8 の Eave に関する四分位範囲等の計算結果

第1四分位数 Q1	0.66109
第2四分位数 Q2	0.71616
第3四分位数 Q3	0.80655
四分位範囲 IQR	0.14546
上限管理限界 UCL	1.02474
下限管理限界 LCL	0.44290

ここで、上記の四分位範囲を用いて求めた上限および下限の管理限界値から、以下の通り、充填済セグメントと未充填セグメント(完全に充填されていないセグメントを含

む)を判別する閾値を決める(図-8, 図-9)。

- 充填済セグメントの上限管理限界 UCL は約0.30であり、この値を閾値として Eave がこの値未満となったセグメントについては「充填」と判定する
- 未充填セグメントの下限管理限界 LCL は、約0.44であり、この値を閾値として Eave がこの値以上となったセグメントについては「不完全充填」と判定する
- 充填済セグメントの UCL~未充填セグメントの LCL (0.30 ≤ < 0.44) の範囲の値となったセグメントについては、充填セグメントとも未充填セグメントとも判断できないので「不完全充填の疑い」と見なす

この内、判別結果が「不完全充填の疑い」の場合は再計測を行い、それでも「不完全充填の疑い」のままだったら「不完全充填」と同等に扱い、再注入を検討する。

なお、今後、計測を実施するに伴い、閾値の大きさが実状に合わない判断された時は、再度、閾値について検討を行うものとする。

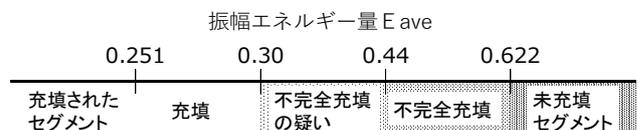


図-9 振幅エネルギー量 E の平均値を用いた
 充填状況判別の閾値

5 まとめ

以下に、今回の結果をまとめる。

- 予備調査の結果から、健コン診断ポータブルを用いた計測で得られる振幅エネルギー量 E の値からセグメント背面の裏込め充填状況、空洞の有無を判別できることが分かった
- 閾値の決定に際しては、四分位範囲を用いた外れ値の判定法（箱ひげ図を用いた方法）を用いた
- 計測箇所ごとの振幅エネルギー量 E の平均値 E_{ave} によって
 - $E_{ave} < 0.30$: 充填されている（空洞はない）
 - $0.30 \leq E_{ave} < 0.44$: 不完全充填の疑い
 - $0.44 \leq E_{ave}$: 不完全充填と判別する
- 今回、未充填セグメントの背面が完全に空洞か、水で満たされているかは必ずしも明らかではないので、空洞が水で満たされている場合は、「不完全充填の疑

い」と判定される可能性がある

- 判別の結果が、「不完全充填の疑い」「不完全充填」の場合は、再注入を検討する

今回の検討によって、シールドトンネルの裏込め注入工の充填確認、空洞の有無の確認として健コン診断ポータブルを用いた打音検査が有効であることが分かった。

今後は、今回、計測において異常値を示した箇所の調査なども行った上で、より確実な判別手法を確立し、施工の品質向上につなげたいと考えている。

参考文献

- 1) 北川真也，鍋谷雅司，歌川紀之，森山守，木村定雄：打音法を用いた道路橋鉄筋コンクリート床版の劣化検知について，佐藤工業技術研究所報 No.37，2012
- 2) 青木勇太，松田眞一：外れ値を検出する方法の特徴比較，南山大学紀要「アカデミア」理工学編 第21巻，pp.60-76，2021.03