

打撃法による覆工型枠脱型時期の推定

Evaluation of removable time of tunnel lining formworks using impact methods

キーワード

覆工型枠, 脱型, 覆工コンクリート, 表面波,
SASW 法

加藤 謙吾*, 黒田 千歳*, 歌川 紀之*

研究概要

打撃法を用いてトンネル覆工型枠の脱型時期を推定した。以下に、知見をまとめる。(1) 表面波の伝播を計測することにより若材齢覆工コンクリートの剛性変化を捉えることができ、さらに、SASW 法を用いることによりレイリー波速度の平均速度、 V_{R-avg} 、を算定することができる。(2) V_{R-avg} に基づき一軸圧縮強度を推定できる。この推定を行うために、動的ポアソン比を用いて V_{R-avg} を疎密波速度に変換する。また、テストピース結果より得られる疎密波速度と一軸圧縮強度との関係を用いる。くわえて、 V_{R-avg} に基づく一軸圧縮強度の評価精度を向上させるために、材齢経過と動的ポアソン比との関係を予め求める。(3) 本方法を行うための計測システム要件を、試験結果および既往文献に基づき整理した。

ABSTRACT

The removable time of tunnel lining formworks was evaluated using impact methods. Our findings are as follows: (1) *Stiffness evaluation*: The change in the stiffness of early-age lining concrete can be assessed by measuring the propagation of surface wave, and the Rayleigh wave (R-wave) velocity is estimated using the spectral analysis of surface waves method. (2) *Uniaxial Compressive Strength (UCS) Evaluation*: UCS can be determined based on the R-wave velocity. To achieve this, the R-wave velocity is converted to the primary wave (P-wave) velocity using a dynamic Poisson's ratio, and the results from test piece result (i.e., the relationship between P-wave velocity and UCS) are utilized. It is crucial to measure a time-dependent dynamic Poisson's ratio to ensure accuracy. (3) *Measurement system requirements*: We have provided the necessary requirements for the measurement system based on the test results.

1 はじめに

トンネル覆工型枠の脱型時期の判断は、主に、若材齢覆工コンクリートの一軸圧縮強度に基づき行われる¹⁾。覆工コンクリートの一軸圧縮強度の推定方法として、同材料および同配合を用いて作製されたテストピースの値に基づき評価する方法などが考えられる。一方、若材齢コンクリートの硬化による強度や剛性などの発達程度は、養生環境に影響されるため、覆工コンクリートの状態を直接測定することにより一軸圧縮強度を推定することが施工管理上望ましい。

本報では、打撃法を用いた覆工型枠脱型時期の推定方法を提示する。最初に、Spectral Analysis of Surface Waves (SASW) 法、および、レイリー波速度、 V_R 、の疎密波速度、 V_P 、への変換方法について説明する。つづいて、提案する覆工型枠脱型時期推定方法のフローについて説明する。その後、実物大覆工自動化施工実験の一環として実施した本

方法について、試験方法および試験結果について報告する。最後に、本方法を実施するためのシステム要件について記述する。

2 Spectral Analysis of Surface Waves

表面波を用いた検査・探査技術は、舗装厚さや地盤剛性の調査などを目的に1960年前後から研究・開発²⁾されており、1980年代頃には、打撃により発生した表面波の波長と速度構造との関係を調査する技術³⁾として用いられている。この手法はSASW法として知られており、地盤工学分野で広く使われている⁴⁾。また、コンクリート工学分野でも、コンクリート舗装の厚さ検出や欠陥箇所の検出などに利用されている⁵⁾。

SASW法において、打撃により生じる振動は、表面波として対象とする層全体に伝播する。Richartら⁶⁾によると、表面波の到達深度は、深さと波長との比(到達深度=深さ

* 技術センター 土木研究部

/波長)により決定される。波長は対象層の位相速度と周波数との比(波長=位相速度/周波数)であることから、SASW法では、打撃により発生する波の周波数帯を制御することにより、調査深さをある程度決定することができる。また、Nazarian and Stokoe^{7, 8)} は、SASW法の理論基礎について次の通りにまとめている。

レイリー波の位相速度、 $V_{R(f)}$ は、打撃により発生する表面波の加速度計間の伝播に要する時間、 $\Delta t(f)$ 、および、加速度計間の距離 L により算定される。

$$V_{R(f)} = \frac{L}{\Delta t(f)} \quad (1)$$

ここに、 $V_{R(f)}$ は各周波数でのレイリー波速度、 f は周波数、 L は加速度計間の距離である。波の1周期と等しい位相角が360度であることから、各周波数での $\Delta t(f)$ は下記式により求まる。

$$\Delta t(f) = \frac{\phi(f)}{360 \cdot f} \quad (2)$$

ここに、 $\phi(f)$ は各周波数での位相角である。波長、 $\lambda(f)$ 、は下記式により算定できる。

$$\lambda(f) = \frac{V_{R(f)}}{f} \quad (3)$$

ここに、 $\lambda(f)$ は各周波数における波長である。伝播時間、 $\Delta t(f)$ 、は Cross power spectrum を用いて算定される⁶⁾。下記式により Cross power spectrum を算定する。

$$G_{yx(f)} = S_y(f) \cdot S_x^*(f) \quad (4)$$

ここに、 S_y は出力信号の線形スペクトラムの実部、 S_x^* は入力信号の線形スペクトラムの虚部である。以下の解析では、Cross power spectrum の位相角度を用いて伝播時間を算定する。

3 レイリー波速度の疎密波速度への変換

Richart ら⁸⁾によると、レイリー波速度は疎密波速度と下記式の関係を持つ。

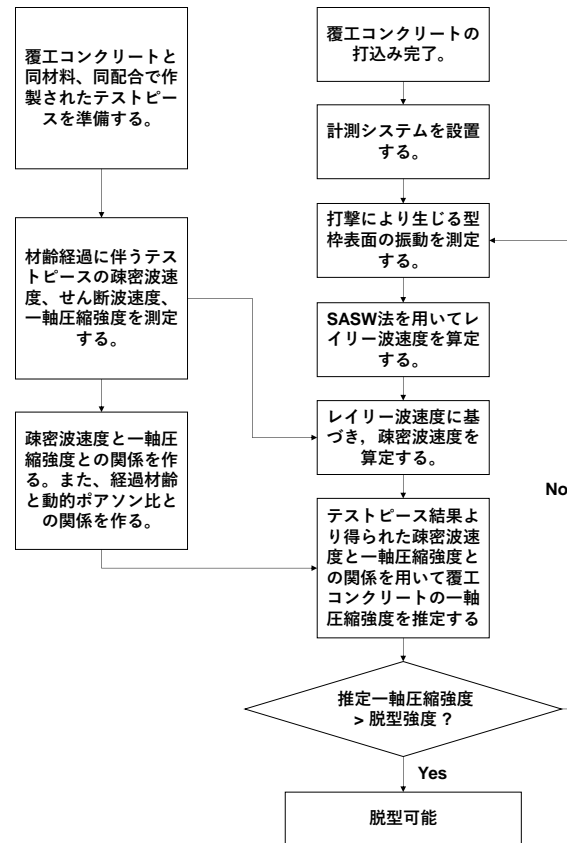
$$\frac{V_R}{V_P} = \alpha \cdot K_R \quad (5)$$

ここに、 V_R はレイリー波速度、 V_P は疎密波速度、 K_R および α は動的ポアソン比の関数である。また、 α および K_R は下記式により算定される。

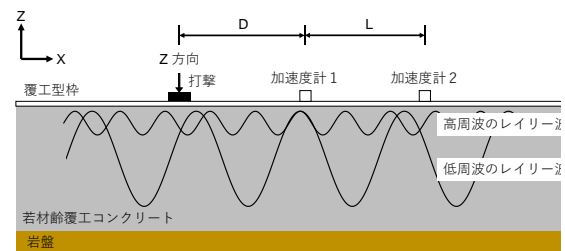
$$\alpha = \sqrt{\frac{1-2\nu}{2-2\nu}} \quad (6)$$

$$K_{R_s} - 8K_{R_s}^4 + (24-16\alpha^2)K_{R_s}^2 + 16(\alpha^2-1) = 0 \quad (7)$$

Byfors⁹⁾は若材齢コンクリートの動的ポアソン比の変化値を計測しており、打込み後直後の若材齢コンクリートの動的ポアソン比が0.4以上あることを示している。また、



図—1 覆工型枠脱型時期推定フロー



図—2 計測システム構成

FHWA¹⁰⁾は若材齢のコンクリートの動的ポアソン比の予測式として、下記式を提案している。

$$v_{dynamic} = -a \cdot \ln(t+1.1) + 0.425 \quad (8)$$

ここに、 a はフィッティングパラメータ、 t は打込み後からの経過材齢(単位は時間)である。以下の解析では、動的ポアソン比の予測に式(8)を用いる。式(8)は特定のコンクリートに対して得られた経験式であり、すべてのコンクリートに適用できるかどうかについては、別途検討が必要である。

4 覆工型枠脱型時期推定方法のフロー

図—1に、提案する覆工型枠脱型時期推定方法のフローを示す。

覆工コンクリートに用いられる材料および配合を用いてテストピースを作製し、一定の時間間隔を置いて一軸圧縮強度、疎密波速度、および、せん断波速度を計測する。

そして、材齢経過に伴う一軸圧縮強度と疎密波速度との関係、および、動的ポアソン比を求める。

覆工コンクリートの打込み終了後、計測装置を覆工型枠に取り付ける。覆工型枠表面に打撃を加えることで、型枠表面を伝播する表面波を発生させる。表面波伝播による振動を測定し、SASW法を用いて $V_{R(f)}$ の平均値 V_{R-avg} 算定する。テストピースの試験結果から得られる動的ポアソン比と打込み開始時からの経過材齢との関係を用いて、 V_{R-avg} を V_P に変換する。そして、テストピースの試験結果を用いて覆工コンクリートの一軸圧縮強度を推定する。 V_{R-avg} をから推定された V_P が脱型に必要な値に達したときに、脱型可能と判断する。

上記の推定方法を用いるために、下記の仮定を設けた。

- 1) 若材齢覆工コンクリートの性状は、均一である。
- 2) 覆工コンクリートの強度や剛性などの物理的性質は、テストピースのそれと同一である、
- 3) 覆工型枠は十分に重たく、打撃により移動しない。

5 試験方法

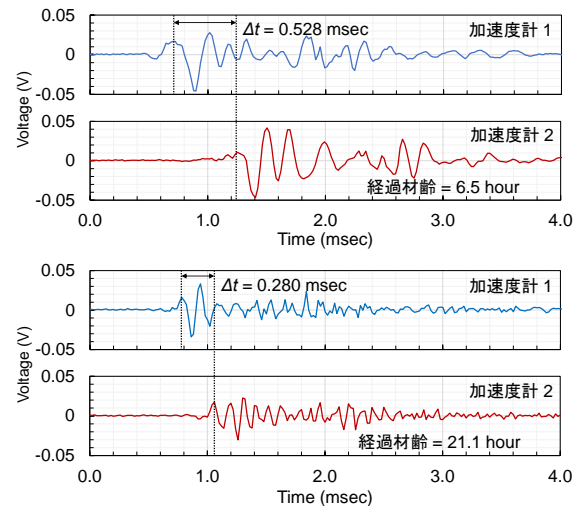
2022年7月に実施された実物大覆工自動化施工実験¹⁾の一環として、本打撃方法を実施した。本施工実験では、自己充填コンクリートを覆工型枠下部に設けられた圧入孔から圧入した。なお、打込み完了に要した時間は、約3時間であった。

図—2に、本打撃法で用いた計測システムの配置を示す。打撃により生じる振動を計測するために、2つの3軸加速度計を圧入孔側の型枠表面に配置した。打撃箇所と直線上に加速度計を配置するようにした。加速度計はPCB Piezotronics, Incのモデル356B21であり、最大加速度 $\pm 4.9g$ 、y軸およびz軸方向の周波数は10,000 Hz、x軸方向の周波数は7,000 Hzまで計測可能である。データ収録には、National instruments社製のデータロガーNI-9234を使用した。このロガーの計測範囲は、サンプリング周波数50 kHz/ch、計測可能電圧域 $\pm 5V$ である。打撃には、PCB Piezotronics社製のモデル086C04のインパルスハンマーを使用した。加速度計間の距離 L は500 mmで、打撃位置と加速度計との距離 D は、500, 1,000, 1,500 mmの3パターンを試した。

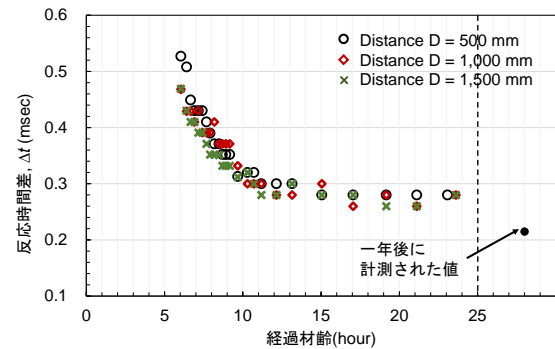
自己充填コンクリートの打込み開始から6.5時間後に覆工型枠表面の打撃を開始した。打撃開始から最初の3時間は15分間隔で、3.0時間から6.0時間の間は30分間隔で、6.0時間から10.5時間の間は1時間間隔で、そして、15.0時間から21.0時間の間は2時間間隔で打撃した。また、平均値を算出するために、計測ごとに型枠表面を5回打撃した。

6 試験結果

図—3に、打込み開始時からの経過材齢6.5時間および21.1時間におけるZ軸方向(打撃方向)の計測波形を示す。なお、打撃位置と加速度計との距離 D は1,000mmである。加速度計の反応時間差 Δt は、6.5時間経過時では0.528msec、21.1時間経過時には0.280msecであり、時間経過に伴い加速度計の反応時間差が短くなった。図—4に、打撃開始後か



図—3 経過材齢6.5時間および21.1時間における加速度計の応答

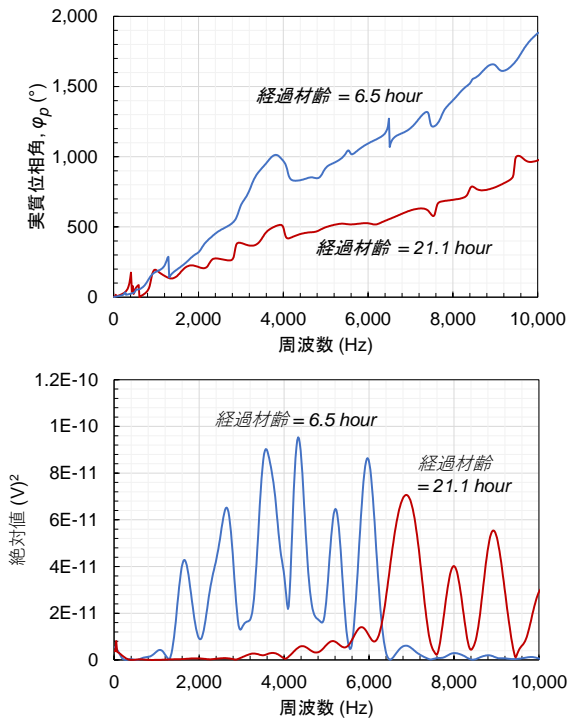


図—4 加速度計の反応時間差, Δt

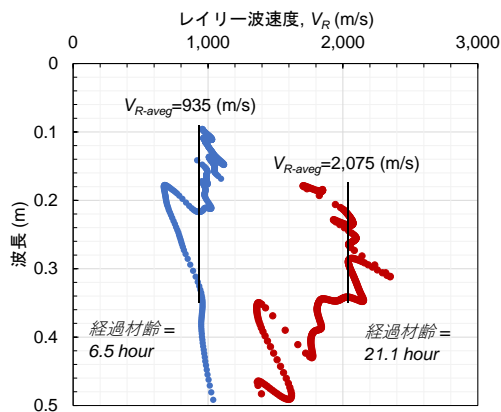
らの加速度計の反応時間差を示す。打撃位置と加速度計との距離 D が異なる場合でも、反応時間差が概ね同じであり、また、時間経過に伴う反応時間差は一貫して短くなった。さらに、施工実験の一年後に計測した反応時間差を同図に示す。一年後における加速度計の反応時間差は0.215msecであり、打込み開始後24時間以内の値と比較して速くなった。

SASW法を用いて $V_{P(f)}$ の算定を行った。図—5に、打込み開始時からの経過材齢6.5時間および21.1時間におけるCross Power Spectrumの絶対値および位相角を比較する。6.5時間経過時における主要な周波数帯域は3,670Hzから5,950 Hzであり、一方、21.1時間においては6,970 Hzから9,010 Hzであった。主要な周波数帯域は、時間経過に伴い、低周波数帯域から高周波数帯域に移行した。実質位相角については、周波数が約1,800Hz未満では、経過材齢の違いによる顕著な差は見られなかったが、1,800 Hz以上では、その差は約2倍となり、経過材齢の違いにより実質位相角に差が生じた。図—6に、経過材齢の違いによる $\lambda_{(f)}$ と $V_{R(f)}$ との関係を示す。 $\lambda_{(f)} = 0.35m$ 以下での V_{R-avg} の平均値は、6.5時間経過時では935 m/s、21.1時間経過時では2,075 m/sであり、経過材齢が異なると、 V_{R-avg} に明確な差が生じた。

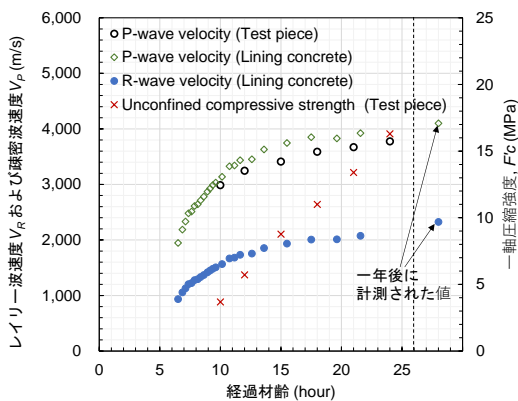
図—7に、SASW法を用いて算定した V_{R-avg} および式(4)を用いて変換した疎密波速度を示す。なお、 $\lambda_{(f)} = 0.40m$ よ



図—5 経過材齢 6.5 時間および 21.1 時間経過時の Cross power spectrum による実質位相角および絶対値



図—6 打込みから 6.5 時間および 21.1 時間経過時における $\lambda(f)$ と $V_R(f)$ と関係



図—7 V_{R-aveg} , V_P 及および一軸圧縮強度 F_c の比較

り大きい場合 (i.e., 波長 $> 1.0 \times$ 覆工巻厚) における $V_{R(f)}$ にばらつきが多かったため、ばらつきの大きい部分のデータを除く目的で、波長 0.35m 以下 (i.e., 波長 $\leq 0.85 \times$ 覆工巻厚) における $V_{R(f)}$ の平均値をプロットした。6.5時間経過時の V_{R-aveg} は 935m/s 、9.4時間経過時は $1,482\text{m/s}$ 、そして21.1時間経過時は $2,075\text{m/s}$ であった。くわえて、 V_P について、6.5時間経過時では $1,947\text{m/s}$ 、9.4時間経過時では $2,988\text{m/s}$ 、そして、21.1時間経過時では、 $3,922\text{m/s}$ であった。また、テストピースの V_P との差は、5-10%であった。 V_{R-aveg} および V_P は、材齢経過に伴い速くなった。

覆工コンクリートに用いた配合および材料を用いて作製したテストピースの V_P を計測した。計測は、A410 Pulsar (ACS, Acoustic control systems) を用いて走査法により行った。くわえて、JIS A 1108 に従い、一軸圧縮強度を計測した。試験結果を図—7 に示す。試験結果の一例として、10.0時間経過時の疎密波速度は $2,987\text{m/s}$ 、24.0時間経過時は $3,776\text{m/s}$ であった。また、一年後に計測した値は、 $4,150\text{m/s}$ であり、テストピースの V_P は時間経過に伴い増加し、また、作製から24.0時間経過で最大値の約91%に達した。一軸圧縮強度について、作製から10.0時間経過時の強度は 3.69MPa 、24.0時間経過時は 16.3MPa であった。材齢28日の強度の平均値は約 60MPa であり¹⁾、一軸圧縮強度は、作製から24.0時間経過で最大値の約27%に達した。

図—8 に、テストピースの V_P と一軸圧縮強度との関係を示す。覆工型枠の脱型に必要な強度を 4.0MPa と仮定すると、 V_P が約 $3,000\text{m/s}$ に達したときに脱型可能と判断される。

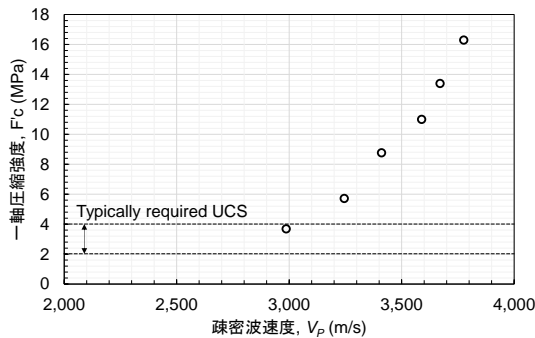
7 考察

図—9 に、テストピースの疎密波速度を用いて逆算した覆工コンクリートの動的ポアソン比と式 (8) との比較を示す。覆工コンクリートの動的ポアソン比は、 $0.287-0.214$ の範囲にあり、打込み開始時からの経過材齢に伴い小さくなった。また、これらの値は式 (8) の値より小さかった。本手法により算定した覆工コンクリートの疎密波速度がテストピースの値より5-10%大きかった理由として、動的ポアソン比が過大に算定されたことが考えられる。回帰分析に基づく式 (8) のフィッティングパラメータ a の最適値は 0.066 であった。フィッティングパラメータに差が生じた理由として、施工実験が真夏に行われことにより自己充填コンクリートの硬化速度が速かったこと、および材料と配合が異なっていたことなどが考えられる。本手法において、施工に用いられるコンクリートの動的ポアソン比を把握することは、覆工型枠脱型時期の推定に極めて重要である。

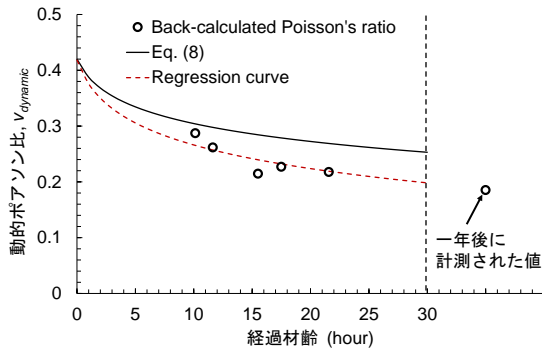
8 計測システム要件

8.1 加速度計

SASW 法では、打撃方向の振動を利用してレイリー波速度を算定する。そのため、1 軸加速度計を用いれば十分で



図—8 テストピースにおける V_p と F_c との関係



図—9 動的ポアソン比の逆算値と予測式との比較

ある。また、図—5に示す解析結果から分かるように、打撃により生じる覆工型枠表面の振動の主要な周波数帯域は、10,000Hz以下である。一方、加速度計の計測可能な周波数帯域はマウント方法に依存する。磁石マウントや接着剤を用いて覆工型枠に加速度計をマウントさせる場合には、その実効値が低下する可能性がある。筆者らが販売元に確認した限りでは、上記のマウント方法の場合、実効値は性能の7割程度である。したがって、推奨する1軸加速度計の要求性能は、周波数範囲15,000Hz以上である。

8.2 データロガー

一般的に、計測精度を確保するためのサンプリング周波数の範囲は、計測対象範囲の10倍以上である。硬化コンクリートの V_{R-avg} が2,300m/sであることから、加速度計間の距離を500mmとすると、レイリー波の伝播時間は約0.2msecとなる。したがって、データロガーの要求サンプリング周波数は50 kHz以上となる。

一方、伝播時間は加速度計間の距離に依存するため、距離を考慮してサンプリング周波数を決定する必要がある。式(8)に示す通り、要求される加速度計間の距離は表面波の波長に応じて決定される。本解析結果に基づくと、打撃により生じる表面波の波長は覆工巻厚の0.85倍より短くあることが望ましい。したがって、本施工実験では、加速度計間の距離が約100mmより長くある必要がある。この距離に対応するサンプリング周波数は250kHzである。データロガーのサンプリング周波数は、加速度計間の距離に応じて決定することを推奨する。

8.3 ハンマ

図—7に示す通り、若弱材齢覆工コンクリートの打込み開始時から24時間以内における V_{R-avg} は、約900-2,100m/s およびトンネル覆工の標準的な巻厚が300mmであること、さらに、式(3)の関係を考慮すると、3,600Hz-8,400Hzの周波数帯域の波を打撃により生じさせる必要がある。図—6に示す通り、本試験に用いたインパルスハンマーは、上記の周波数帯域の波を生じさせることができる。

8.4 打撃位置と加速度計との距離 D

Sanchez-Saliner¹²⁾ は、数値解析に基づき、打撃位置と加速度計間の距離 D について、 $D/L=1.0$ とすることを推奨している。一方、図—4に示す通り、トンネル覆工コンクリートにおいては、 D/L が1.0-3.0の範囲内ではデータの傾向や精度に影響しない。よって、打撃位置と加速度計間の距離について、下記式を満たす範囲とすることを推奨する。

$$1.0 \leq \frac{D}{L} \leq 3.0 \quad (9)$$

8.5 加速度計間の距離 L

Sheu ら¹³⁾ は、 $D/L=1.0$ の場合において、精度のよい波長が得られる加速度計間の距離が下記式により得られることを示した。

$$\frac{1}{3} \lambda_R \leq L \leq 2 \lambda_R \quad (10)$$

覆工巻厚が0.3 mの場合に要求される波長を0.25 mと仮定すると、加速度計間の最小距離は約90 mmとなる。一方、加速度計間の距離は要求されるデータロガーのサンプリング周波数に影響することから、両方を考慮して決定することが望ましい。

9 おわりに

本報では、打撃法による覆工型枠脱型時期の推定を行った。以下に結論をまとめる。

- 1) 表面波の伝播時間を測定することにより、若材齢覆工コンクリートの剛性の発達を捉えることができる。さらに、SASW法を用いることにより、若材齢覆工コンクリートのレイリー波速度を算定できる。
- 2) 本方法を実行するための計測システム要件を示した。表面波の伝播を正確にとらえるためには、覆工巻厚や打撃位置などを考慮してシステム構成を決定する必要がある。実測値や既往研究結果に基づき、推奨する要件を提示した。
- 3) 覆工型枠の脱型時期は、主に一軸圧縮強度に基づき判断される。本方法は、SASW法を用いて若材齢覆工コンクリートの剛性の発達を捉え、疎密波速度と一軸圧縮強度との関係から脱型時期を推定する方法である。

参考文献

- 1) 土木学会：トンネルコンクリート施工指針（トンネルコンクリート施工指針（案）），コンクリートライブラリー102，2000.7.
- 2) Jones, R: In situ measurement of dynamic properties of soil by vibration methods, *Geotechnique* III, No. 1.
- 3) Nazarian, S and Stokoe. II. 1984. Nondestructive testing of pavements using surface waves. *Transportation Research Record*, No. 993, ISSN, 0361-1981, pp. 67-79.
- 4) Nazarian, S., Stokoe II., H., Briggs, R. C., and Rogers, R. Determination of pavement layer thicknesses and moduli by SASW method. *Transportation Research Record* 1196, pp. 133-150, 1988.
- 5) Cho, Y. S.: Non-destructive testing of high strength concrete using spectral analysis of surface waves. *NDT & E International*, Volume 36, Issue 4, June 2003, pp. 229-235. 2006.
- 6) Richart Jr, F. E., Hall Jr, J. R., and Woods, R. D. *Vibrations of soils and foundations*. Prentice Hall. pp.414. 1970.
- 7) Nazarian, S., and Stokoe, K. H., II. 1985. In situ determination of elastic moduli of pavement systems by Spectral-Analysis-of-Surface-Waves method (Practical Aspects). Research report 3681-IF. Center for Transportation Research, The University of Texas at Austin, 1985.
- 8) Nazarian, S., and Stokoe, K. H., II. 1986. In situ determination of elastic moduli of pavement systems by Spectral-Analysis-of-Surface-Waves method (Theoretical Aspects). Research report 3681-IF. Center for Transportation Research, The University of Texas at Austin, 1986.
- 9) Byfors, J. 1980.: Plain concrete at early-ages. Swedish cement and concrete institute, Stockholm, Sweden, Technical report, pp. 345.
- 10) Federal highway administration. The high performance paving (HIPERPAV) software. <https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/pavements/pccp/execsumm/valtm18.pdf>
- 11) Kato, K., Koyama, H., Hiromitsu, T., Fujiwara, S., Kuroda, C., Utagawa, N., Ono, T., Uno, Y. 2022. Automation of tunnel lining construction with Self-Compacting Concrete: full-scale experiment and numerical simulation. *World Tunnel Congress 2022*, DOI: 10.1201/9781003348030-293.
- 12) Sue, J. C., Sanchez-Salinero, I, Roesset, J. M., and Hudson, W. R. 1986. Investigation of variables affecting in situ determination of elastic moduli of pavement systems by surface wave method. Report 437-3F. Center for Transportation Research, The University of Texas at Austin, November 1986.
- 13) Sue, J. C., Sanchez-Salinero, I, Roesset, J. M., and Hudson, W. R. 1986. Investigation of variables affecting in situ determination of elastic moduli of pavement systems by surface wave method. Report 437-3F. Center for Transportation Research, The University of Texas at Austin, November 1986.