

シールド工事における弾性波および放射線を 用いたトンネル位置の確認方法について

Alignment survey of tunnel using high-frequency seismic wave or radiation transport method.

花見和則* ・後藤和生** ・後藤克寛*** ・笠 博義**** ・山村正俊*****

Kazunori HANAMI, Kazuo GOTOH, Katsuhiko GOTOH, Hiroyoshi KASA, Masatoshi YAMAMURA

This report explains the principle and the results of measurement method, using high-frequency seismic wave and radiation transport method for making sure the position of shield tunnel under construction.

In tunnel construction with shield machine, tunnel survey with a gyrocompass, laser beams or an optical transit is generally done to measure the alignment.

In addition to them, during a construction, we correct the difference between the alignment by tunnel survey and the alignment by surface survey. So we have to make a boring and break the lining for check the alignment with a pendulum directly. We hope that instead of breaking the lining or changing the material in that place, generally exchanging concrete segment for steel segment, we can check the alignment.

Then, we adopted source location method (using high-frequency seismic wave) and radiation transport method for the survey at a power cable tunnel in KISARAZU CHIBA and estimated the precision of them. In this trial the both precision were about 20mm.

Keywords: the precision of survey, source location method, high-frequency seismic wave, radiation transport method,

1. まえがき

近年、シールド坑内の測量については、ジャイロコンパスや光波測距儀等が適用されているが、シールドトンネル掘進の長距離化に伴い、坑内測量の精度向上が課題としてあげられる。

従来より、坑内測量の精度を確保する目的で、チェックボーリングが実施されているが、RCセグメント部（特に二次覆工なしの場合）では、鉄筋の欠損等による構造的弱点を作ってしまう点や、チェックボーリング実施後の貫通孔補修部の止水対策といった解決しなければならない問題が生じる。そこで覆工部材の変更（STセグメント等）や特殊な覆工構造を設けずに、トンネル位置を高精度で計測する方法として、高周波弾性波透過法および放射線透過法に着目し、現場実験により各々の精度について検証したものである。

-
- * 正会員 東京電力㈱ 送変電建設本部
 - ** 正会員 東京電力㈱ 地中線建設所
 - *** 正会員 東京電力㈱ 地中線建設所 木更津工事事務所
 - **** 正会員 ハザマ 技術研究所 技術研究部
 - ***** 正会員 ハザマ 東関東支店

2. 概 要

今回、トンネル位置の確認方法を検証したシールドトンネルは、東京電力㈱において実施した千葉県木更津市における内径 $\phi 3.3\text{m}$ の電力洞道で、二次覆工を省略したRCセグメントによって行われている。

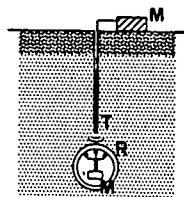
この現場において、従来のトンネル位置確認方法における問題点を解消する方法として、非破壊型の物理探査について着目し、現場での検証を行った。

3. 非破壊型の物理探査方法の選定

現在、物理探査は埋設物の位置探査や地盤調査等に用いられており、その方法として電磁誘導、音波、弾性波、磁気、電波、放射線等によるものがある。また、トンネルなどの探査方法として、従来のチェックボーリングによる「直接手法」と、物理探査により地表面から探査を行う「間接手法」、さらにボーリング孔等を利用して探査を行う「直接手法と間接手法の併用」があるが、過去の実績から、最も精度の期待できる「直接手法と間接手法の併用」について検討を進めた。

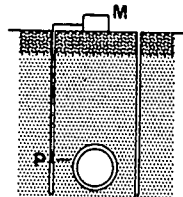
ここで、「直接手法と間接手法の併用」では、図-1に示す二つの測定方法が考えられる。

< 透過法による探査法 >



T : 振源・線源
R : 受信装置
M : 計測装置

< 磁気を用いた探査法 >



P : 磁力計
M : 計測装置

図-1 直接手法と間接手法の併用による探査方法

まず、透過法による探査法は、ボーリングをセグメント上部まで削孔し、セグメントの桁厚分を放射線や弾性波等の物理探査方法によって探査する方法であり、磁気を用いた探査法は、トンネルの両側にボーリングを行い、ボーリング孔内から磁力計等を挿入しトンネルによる磁場の变化から位置を求める方法である。

この二つの方法について、過去の測定実績より精度を調査してみると、透過法による探査法は5cmオーダーが期待できるが、磁気を用いた探査法は10cm程度の精度しか期待できず、ボーリング孔も2本以上必要となること等から、コスト面も考慮し、今回「透過法による探査法」を採用した。

4. ボーリング併用のセグメント透過方法の概要

4・1. 透過媒体の選定

セグメント部のみを透過する方法について検討した結果、前述の物理探査手段より、実用性、精度等から従来、岩盤計測等に広く用いられAE (acoustic-emission)観測で用いられる高い周波数の弾性波（高周波弾性波）や直進性の極めて高い放射線を媒体として用いる方法を選定した。

4・2. 高周波弾性波透過法

本手法は、ボーリング孔底に振源を設置し、それを取り囲むようにトンネル坑内のセグメント内壁面へ設置された複数の検出器で高周波弾性波を検出し、各検出器間の高周波弾性波とセグメントを透過する高周波弾性波の速度から、振源の位置を求めるものである。この弾性波速度計測による振源決定の求め方は図-2に示すとおり、振源(X_0, Y_0, Z_0)、振源発生時刻を t_0 とし、各計測点の位置を(x_i, y_i, z_i)、弾

性波（P波）到達時刻 t_i とする。ただし $i = 1 \sim n$ （ n ：4点以上とする）振源と各計測点の距離は、 $\sqrt{(x_i - X_0)^2 + (y_i - Y_0)^2 + (z_i - Z_0)^2}$ となり、弾性波の到達時間差から求められる振源と各計測点の間の距離は、 $V_p(t_i - t_0)$ とするが、この V_p （弾性波速度）は、室内試験等により事前に測定しておくものとする。

次に、各測点における距離は等しいので、

$$(x_i - X_0)^2 + (y_i - Y_0)^2 + (z_i - Z_0)^2 = V_p^2(t_i - t_0)^2$$

が成立し、この式の未知数は X_0, Y_0, Z_0 の3個あり、4箇所計測された弾性波の値があれば $i = 1 \sim 4$ として、四つの連立方程式を解くことによってその振源を求めることができる。

この位置決定の原理は、A Eを用いた岩盤計測などで広く用いられており、観測装置や振源決定の方法も従来のA E観測用のものを利用できる。受信点は、30～60cmの正方形に4点配置し、高周波の弾性波動を発振・受信するために、各センサーには電圧素子を用い、それらに対応できる装置を用いた。また、測定範囲は、1回目（60cm間隔）の測定で得られたデータから振源を仮定し、2回目（30cm間隔）で受信点（4点）の正方形を絞り込んで行く。図-2に概要を示す。

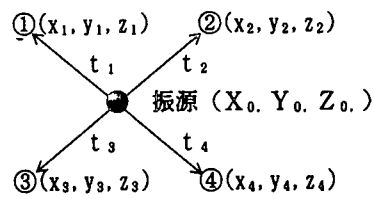


図-2 振源決定の原理

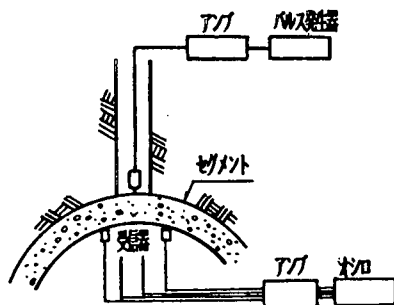


図-3 高周波弾性波透過法の概要

4・3. 放射線透過法

本手法は、放射線が一定以上の強度を有していれば、コンクリート等を透過するという性質を利用したものでボーリング孔底に放射線源を設置し、これから発生される放射線強度をトンネル坑内に貼り付けた測定メッシュに沿って計測し、その放射線強度分布（図-9参照）から線源の位置を求めるものであり、図-4に概要を示す。また、今回使用する放射線源は法的規制も考慮して、97 μ Ci(マイクロキュリー)のカリフォルニウム 252をステンレスの円筒に二重封入した密封小線源を使用した。これは、自発核分裂によって高いエネルギーの中性子線を放出する上、他の線源と比較して経済的で取扱いも容易である。さらに、線源より発生した中性子線はコンクリート中を透過する途中で γ 線を放出するため、計測は γ 線計測装置を用いることにより、放射線源の位置を短時間に推定することができる。

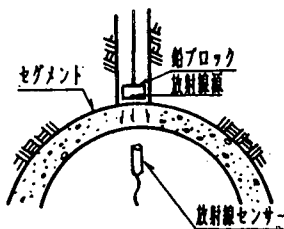


図-4 放射線透過法の概要

5. 室内での予備実験の実施

高周波弾性波透過法ならびに放射線透過法の、現場測定に先立ち、コンクリートブロックの供試体を用いて、振源・線源の強度および測定精度について確認を行った。

【高周波弾性波透過法】

一辺100cm、厚み10cmのコンクリートブロックを用いて高周波弾性波の透過を確認し、図-5に示すとおり測定した精度は20mmであった。

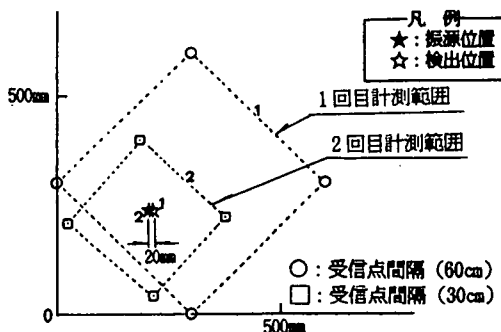


図-5 高周波弾性波透過法の室内試験結果

【放射線透過法】

一辺20cm、厚み10cmのコンクリートブロックを用いて放射線の透過確認を行ったが、この厚み10cmのコンクリートブロックから得られた測定結果は、 γ 線で3000cps程度の放射線強度を検出し、その精度は3mmであった。また、中性子線については15000cps程度の放射線強度を検出し、測定精度は γ 線同様3mmという結果が得られた。図-6と図-7にそれぞれの測定表示を示す。

しかし、放射線透過強度は図-8に示すとおり、透過距離の2乗に反比例して減衰する性質をもち、実際のセグメント桁高(225mm)を考慮すると、

γ 線 : $3000 / (225/100)^2 \approx 3000/5 = 600\text{cps}$

中性子線 : $15000 / (225/100)^2 \approx 15000/5 = 3000\text{cps}$

程度の強度となる。また、室内予備実験を数回実施して得られた測定値の誤差は、 γ 線で3.0~7.5mm、中性子線で3.0~5.0mmの値であったことなどを考慮すると、

γ 線 : 最大誤差7.5mmより、 $7.5 \times 5 = 37.5\text{mm}$

中性子線 : 最大誤差3.0mmより、 $5.0 \times 5 = 25.0\text{mm}$

程度の誤差が予想される。

6. 現場計測

6・1. 測定精度の確認方法

現場計測に先立ち、立坑内にて実際に使用するRCセグメントを利用して透過実験を行い、高周波弾性波透過法および放射線透過法が、十分にセグメントを透過し測定機器の精度で十分読み取れることを確認した。

また、高周波弾性波透過法ならびに放射線透過法によるトンネル位置確認の現場適用が始めてであることから、計測精度を確認する目的で、従来のチェックボーリング(削孔径 $\phi 300\text{mm}$)により、坑内測量と下げ振りによる直接視準を行った。これは、両測定法の精度確認とシールド線形を測定するための基線を確保する目的も含めて2点(地点A、地点B)実施した。

なお、このチェックボーリングは、シールド洞道の土被りが浅かったため、グラウトホールを狙ったボーリング実施することにより、セグメントを破壊せずに貫通孔を設け、両測定法における誤差の確認を行うことができた。

6・2. 現場測定結果

A. 高周波弾性波透過法の測定結果

直接視準した値を基準としたときに、地点Aでは受信点間隔が60cmと30cmでは算定結果の誤差が大きい。この原因としては、地点Aでは振源がグラウトホールのキャップ上となったことから、グラウトホールが弾性波の伝播経路や速度に影響を与えたことが考えられる。従って、この付近で最も受振波動の到達が早い位置を振源とした。図-9に振源測定位置、図-10に直接視準と測定値との誤差を示す。

今回の測定値の誤差は、地点Aで6mm、地点Bで9mmであった。

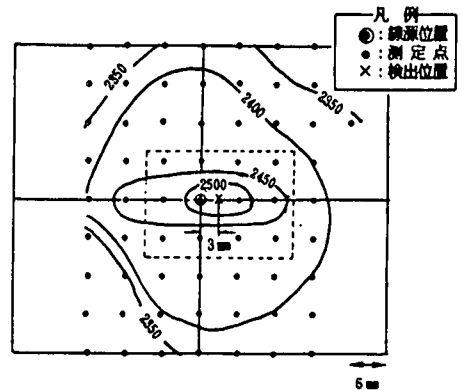


図-6 γ 線室内試験結果(測定誤差)

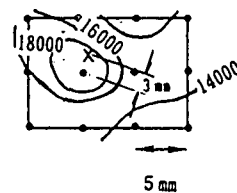


図-7 中性子線室内試験結果(測定誤差)

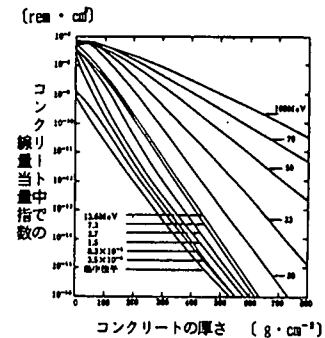
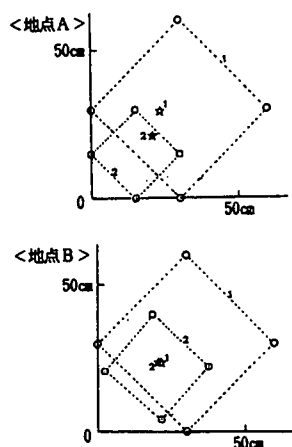
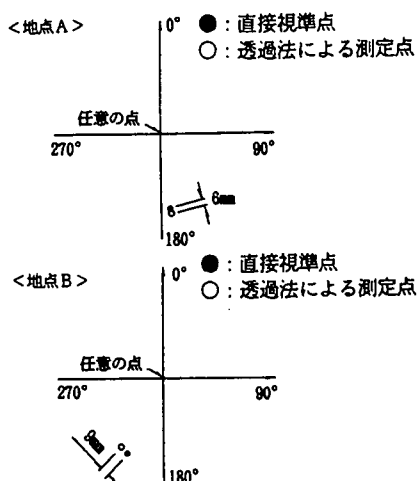


図-8 γ 線・中性子線の減衰状況



○：受信点間隔（60cm） □：受信点間隔（30cm）
☆：60cm間隔の計測位置 ★：30cm間隔の計測位置

図-9 振源測定位置



・シールド掘進方向を 0° とする
・直接視準点を真の値と仮定する。

図-10 高周波弾性波透過法の測定誤差

B. 放射線透過法の測定結果

図-11に γ 線測定における振源測定位置と、図-12では直接視準と測定値との誤差を示す。今回の測定値の誤差は、地点Aで34mm、地点Bでは17mmであった。

中性子線の測定値については、坑内の湿度が影響を与えていると思われ、データのバラツキが大きく有意な情報を得ることが出来なかった。

なお、高周波弾性波透過法と同様に、直接視準した値を基準としたときに、地点Aでは計測位置がグラウトホールのキャップ上となったため、直接マーキング出来ず誤差が大きくなったと考えられる。また、鉄筋部での γ 線強度減少や、反対にグラウトホール部では γ 線が減衰せずに透過していること等も考えられる。

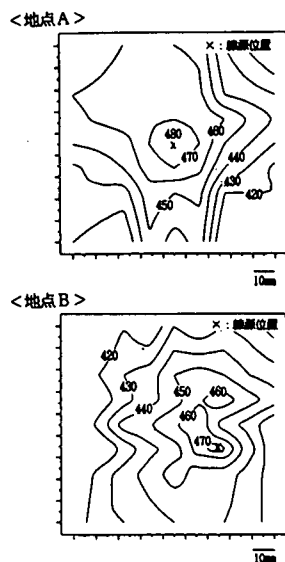
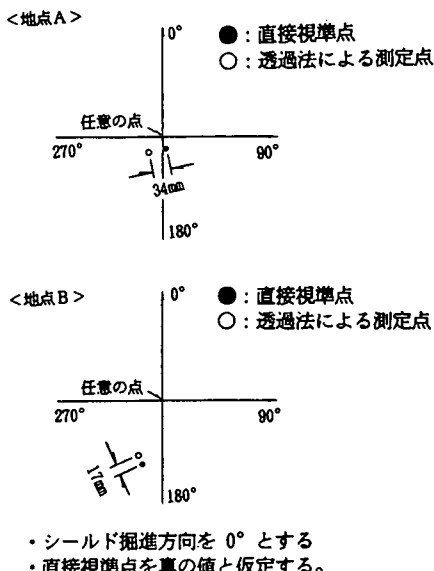


図-11 放射線源（ γ 線）測定位置



・シールド掘進方向を 0° とする
・直接視準点を真の値と仮定する。

図-12 放射線透過法（ γ 線）の測定誤差

7. 考察ならびに問題点の整理・改善方法の検討

現場計測より得られた結果では、高周波弾性波透過法で 6mm～9mm、放射線透過法（ γ 線）については、17mm～34mmであり、いずれも下げ振りによる直接視準を真の測定位置とすると、測定の精度としては、まだまだ大きい値である。しかし、今回の計測方法は、まだ改良の余地が充分に残されており、以下の改良をすることにより、測定精度の向上を図ることは可能と思われる。

- ①. 高周波弾性波透過法については、専用治具の改良により、振源投下精度の向上を図ることやセンサー受信部をピンのように「点」で測定できるように小型化する。
- ②. 放射線透過法についても専用治具の改良により、線源投下精度の向上を図る。また、遮へい容器の改良やセンサー受信部の小型化、防湿対策の充実による中性子線透過時のノイズ低減を図る。
- ③. 精度を上げるために放射線強度の増大も考えられるが、 $100\mu\text{Ci}$ 以下の線源強度のものは法規制の対象外となり、手続きや取扱いを考えると、今回用いたカリフォルニウム 252の線源強度 $97\mu\text{Ci}$ の使用が適当と思われる。
- ④. 今後の課題として鉄筋、グラウトホール等の影響が考えられ、これらの影響除去、補正方法の検討等を施せば、利用範囲拡大が期待される。

8. あ と が き

現状の精度では、そのまま単独でトンネル位置確認方法として適用できる段階にはないが、上記の諸課題を解決し、測定精度の向上が図れれば両計測方法ともに比較的短時間で計測が可能であることや、計測結果が即時に結果算出が可能な点など、シールド到達時における誤差確認やチェックボーリングの補完的な適用効果が期待でき、トンネル（RCセグメント）を破壊することなく、トンネル位置を検出する方法としての効果は、期待できるものと思われる。

9. 参考文献

- 1) 勝山邦久：現場技術者のためのAE技術の応用（アイピーシー）
- 2) 尾上守夫 他著：アコースティック・エミッションの基礎と応用（コロナ社）
- 3) 東京電力株式会社：埋設物探査業務の実務（昭和63年8月 埋設物探査技術研究会）