

在来線用トンネル覆工検査車の 開発と導入

DEVELOPMENT OF TUNNEL LINING INSPECTION CAR FOR JR CONVENTIONAL RAILWAY LINES AND INTRODUCTION

菅藤 太郎^{1*}・浅田 章一²

Taro KANTO^{1*}, Shoichi ASADA²

Special whole inspections of tunnels on conventional railway lines are carried out with either close-in visual inspections or impact acoustic inspections as necessary. The impact acoustic inspection using an inspection hammer has to cover a wide range of inspections. It presses inspectors and its results depend on the judgment of inspectors. The acoustic inspections in Shinkansen tunnels have been reduced as introduction of tunnel lining inspection cars using electromagnetic wave but in tunnels on conventional railway line, it was essential to solve issues such as the improvement of obstacle avoidance performance and measurement speed before introduction of inspection cars, because the tunnel have differences in the lining materials or cross-sectional shape, many installations on tunnel lining and the much total length.

These issues were solved and the Conventional Railway Line Tunnel Concrete Lining Inspection Car (Conventional Railway Line CLIC) was introduced so this report contains an outline of the development up until now and the introduced car.

Key Words : tunnel lining , inspection , electromagnetic wave , obstacle , cross-sectional shape

1. はじめに

トンネルの検査は，覆工表面至近距離からの目視および必要に応じて打音検査により実施している．点検ハンマーを用いた打音検査は，膨大な範囲が対象であり負担が多く，判定も検査者の判断力に依存しているのが実態である．

JR東日本では，トンネルにおける打音検査の軽減，検査精度の向上を目的とし，新幹線トンネルにおいてはマルチパスリニアアレイレーダ（以下，MPAレーダ）を搭載したトンネル覆工検査車（Concrete Lining Inspection Car：以下CLIC）を3台導入し，打音検査の軽減を進めている¹⁾²⁾．在来線トンネルにおいても新幹線トンネルにて使用しているCLICの技術を基に，在来線トンネルで使用するための課題を抽出し，それぞれの課題を解決した上で，2013年4月に車両を導入した．

在来線CLIC導入に向けて進めた開発過程を以下に示す．

2. MPAレーダ原理

新幹線CLICで使用されているMPAレーダは，トンネル覆工内部の空洞等の欠陥を検出するため，送信アンテナ16個，受信アンテナ16個を用いてデータを測定しており， $16 \times 16 = 256$ 通りの電磁波を送受信することで，覆工内部の状態について三次元の画像データとして出力することができる．図-1にMPAレーダの測定原理を示す．

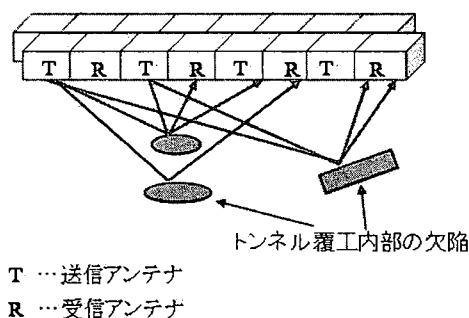


図-1 MPAレーダ測定原理

キーワード：トンネル覆工，検査，電磁波，障害物，断面形状

¹ 正会員 東日本旅客鉄道 East Japan Railway Company, (E-mail:kanto@jreast.co.jp)

² 正会員 東日本旅客鉄道 East Japan Railway Company,

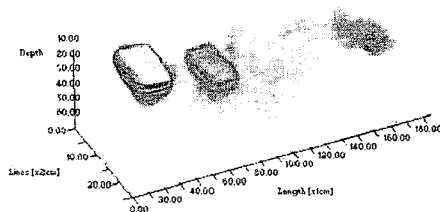


図-2 MPA レーダの探査画像例

電磁波は、トンネル覆工内部の電気的特性(誘電率)の異なる境界部分において反射する特性があり、この反射波をアンテナで受信し、送受信時間を演算することで、検知箇所や反射形状を特定することができる。新幹線CLICのMPAレーダは、トンネル覆工の内部400mm深さに位置する投影面積が100mm×100mm以上の空洞や豆板等を検知できる性能を有している¹⁾²⁾。図-2にMPAレーダの探査画像例を示す。

3. 在来線クリック開発に向けた課題

新幹線CLICで用いられた技術を在来線に適用するにあたり、課題を抽出し整理した。

(1) 計測速度

CLICは、特別全般検査の打音検査に替えることを想定しているため、将来的には特別全般検査の周期で運用することを考えている。そのため、在来線トンネルの特別検査周期である20年間³⁾で、全約1,000トンネル(延長約580km)を運用するためには、月ごとの稼働日数や一晩当りの作業時間を考慮すると、現行の新幹線CLICの最大測定速度3.5km/hの2倍の7.0km/h以上の測定速度が必要となることが確認された。

(2) 障害物乗り越え性能

新幹線CLICと同じようにMPAレーダと覆工面を可能な限り接近させて測定する場合¹⁾²⁾、レーダを的確に走査させるためには覆工面に設置された各種対策工等に接触した際に、必要以上の離隔が生じないよう障害物をスムーズに乗り越える能力が必要となる。在来線トンネルに設置されている主な対策工とその突出量を表-1に示す。MPAレーダが接触する危険性が高いものは、レーダ操作者から見えづらい当て板工法や導水樋の固定に用いられる小さなアンカー頭部等であり、内巻コンクリートやセントルは大きく視認性もよいことから、検討対象から外した。したがって、高さ50mmまでの障害物を乗り越える能力が必要であることが確認された。

なお、新幹線CLICは計測速度が3.5km/hのため、レーダ操作者の視認性、対策工の数量を考慮し、乗り越え能力は30mmまでとしている。

表-1 在来線トンネルにおける対策工

対策工法	トンネル覆工面からの突出量の目安 (mm)	対策工の例
繊維シート工	2	AAA 工法
防水工法	20	樹脂波板
ネット工法	20	トリカルネット
断熱工法	40	PG 板
当て板工法	50	L 形鋼
導水樋	50	SIS, 塩化ビニル
内巻コンクリート	100 以上	
セントル工法	150	鋼製支保工

(3) レーダ形状

在来線トンネルの断面形状は建設年代、電化・非電化の違い、地山条件等により変化しており、その曲率も多岐に亘る。図-3に形状の例⁴⁾を示す。在来線トンネルの覆工表面を的確に走査させるためには、レーダと覆工表面の間には適切な離隔を確保する必要がある。そのため、在来線トンネル用のMPAレーダを実用化するにあたっては、多種のトンネル曲率に適用できるアンテナが必要になる。トンネル形状毎にMPAレーダを製作することは不可能であるため、最適なMPAレーダの形状を検討する必要があることが確認された。そのため、新幹線CLICのMPAレーダを用いて、覆工面とレーダの離隔を拡大した場合の性能確認試験を実施し、新幹線CLICと同等の探査性能が得られる限界離隔距離を検証した。その結果、10mm以上の離隔では性能が低下することが確認された。

ここで、単線トンネルに適用する場合を想定し、MPAレーダ両端部および中央部と、覆工表面の間に出来る離隔を各断面において検証した。

その結果、レーダ半径2,400mmを採用することにより、単線トンネルの主な曲線半径範囲内(2,200~2,800mm)においてMPAレーダ両端部および中央部の離隔距離が10mm以内で収まる結果になった。

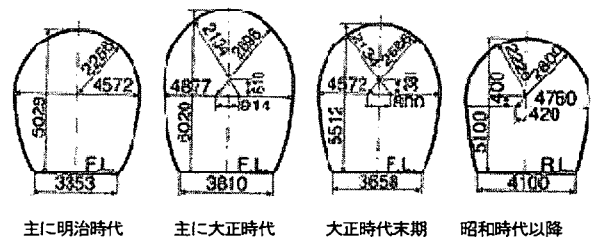


図-3 在来線トンネル形状例⁴⁾

(4) 覆工材質

トンネル覆工の材質の違いによる探査性能の差異を検証するため、在来線トンネルに使われているコンクリート造、レンガ造およびコンクリートブロック造を模擬した供試体を作製し試験を実施した。供試体の内部には空洞を模擬したモデルを用いて試験を行うことで、トンネル材質の違いによる影響を検証した。試験の結果、材質による探査性能に差異は確認されなかった。

しかし、レンガ造・コンクリートブロック造トンネルは施工上、空洞等の内部欠陥が出来る可能性が低いこと、目地部の劣化が進行した際、目地部が反応するおそれがあることから、在来線CLICを適用する効果が低いと判断し、対象はコンクリート造トンネルとした。

4. 在来線CLIC用MPAレーダ開発基礎試験

(1) 計測速度向上に向けた基礎試験

在来線CLICの目標測定速度である7.0km/hまで測定速度を向上させた場合の探査性能を確認するため、供試体を使用したレーダ基礎試験を実施した。

a) 試験の概要

新幹線CLICのMPAレーダの性能仕様である覆工表面から400mm深さまでの投影面積100×100mmの空洞検知性能¹⁾²⁾を検証できるように、空洞モデルを土槽内に埋設して探査試験を実施した。図-4に製作した半径2,400mmのMPAレーダ、図-5に供試体空洞モデル埋設状況を示す。土槽を使用したのは、在来線の様々なトンネル形状に簡易に対応するためである。

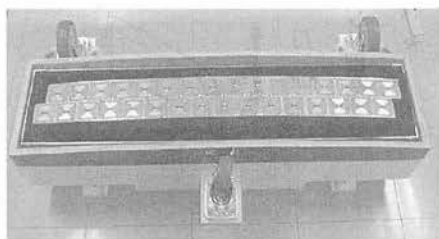


図-4 MPAレーダ(曲率2400mm)

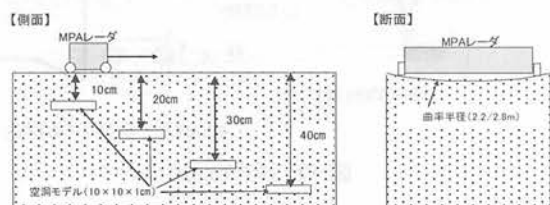


図-5 供試体空洞モデル埋設状況

b) 測定画像確認試験

MPAレーダは、電磁波レーダ等と比べて短時間で膨大なデータ処理を行う必要がある。新幹線CLICのMPAレーダの仕様は、3.5km/hの計測速度において測定ピッチ10mmで設定されている。この仕様を在来線CLICの目標速度7.0km/hに応用した場合、単位時間あたりのデータ処理数が膨大に増えてしまうため、単純な速度向上は不可能である。よって、測定速度を目標の7.0km/hに向上するためには、測定ピッチを拡大する必要性が生じた。そこで、測定ピッチを20、30、40mmと拡大した場合の探査能力、測定画像の検証を実施した。図-6(a)～(d)に測定画像を示す。

最も探査が難しい深さ400mmの空洞モデルに対する測定ピッチ20mmの場合では、空洞の形状が不明確になるものの、検知する性能は十分あることが分かった。しかし、測定ピッチが20mmより大きくなると、空洞の形状や検知自体が困難になった。

そのため、MPAレーダの性能面では、新幹線CLICと同等の性能を維持しながら高速化するには、測定ピッチ20mm(7.0km/h程度)が限度であることが判明した。

(2) 障害物乗り越え性能向上試験

在来線CLIC用MPAレーダの測定画像確認試験を実施した結果、7.0km/hまで高速化できることが確認された。しかし、現場で実際に測定した場合、MPAレーダを走査する時の接触や振動等により、測定可能な離隔を保持できない可能性があり、トンネル覆工面への適切な追従性の確保が必要であった。また、事前に目視等により障害物が確認できなかった場合、MPAレーダが障害物に直接衝突する危険があり、これを安全に回避できる機能が求められた。そのため、新幹線CLICのMPAレーダ支持装置(以下、支持装置)の課題を抽出し、在来線CLICに必要な性能を加味した支持装置の開発に取組んだ。

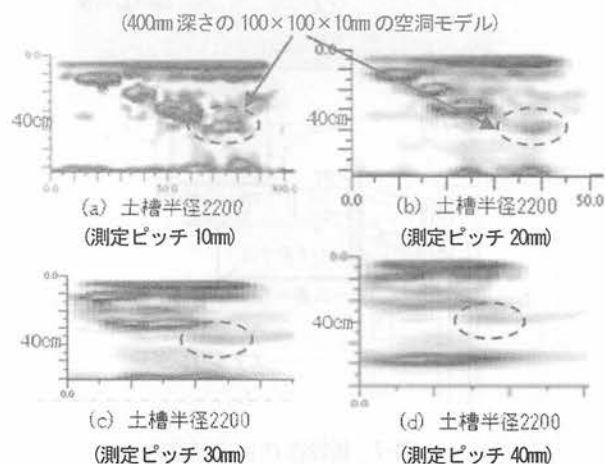


図-6 測定画像(断面)

a) 新幹線CLICの支持装置

新幹線CLICのMPAレーダの支持装置を図-7に示す。MPAレーダは、以下のようなメカニズムで作動する。

- ①エアシリンダーの空気圧により、MPAレーダをトンネル覆工面へ車輪を介し、接地させて保持する。
- ②新幹線CLICの支持装置は、二輪車等のサスペンションに適用されている平行リンク式が採用されている。走行の際、上下可動してトンネル覆工面の凹凸に追従する。
- ③測定方向のトンネル覆工面に高さ30mm以下の障害物がある場合、MPAレーダ外周にあるソリを介し、平行リンク式機能によりMPAレーダが下方にスライドしながら障害物を乗越えていく。
- ④測定方向のトンネル覆工面に高さ30mm以上の障害物がある場合、障害物回避センサが作動してエアシリンダーの空気を抜き、MPAレーダが下降して障害物を回避する。同時に車両のブレーキが作動して停止する。

b) 新幹線CLIC支持装置応用への課題

新幹線CLICに採用されている平行リンク式はブームからMPAレーダ部分までのアーム部が長く、MPAレーダをトンネル覆工面に接地するために0.8MPaと大きなエア圧を必要としている。また、新幹線CLIC支持装置全体として柔軟な可動性に乏しく、7.0km/hに速度向上した場合はトンネル覆工面への凹凸追従性が悪くなることが確認された。そのため、より動きに柔軟な可動性がある支持装置の開発が望まれた。

障害物回避センサは、走査時にセンサ部分で障害物を検知してからMPAレーダが正常に下降するまでの時間が必要である。障害物回避センサとMPAレーダ間の下降速度は、3.5km/hの測定速度に対応しているため、7.0km/hに向上させた場合は別途対応が必要である。以上の事項を考慮し、在来線CLIC用の支持装置の開発を進めることとした。

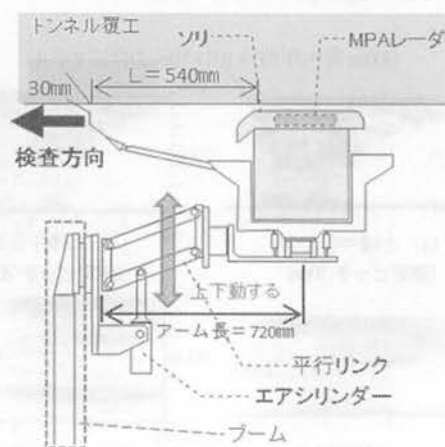


図-7 新幹線 CLIC 支持装置

c) 在来線CLICの支持装置試作

測定に要求される機能・性能を検討した結果、在来線CLIC支持装置は、平行リンク式と比較し可動性があるLM(Linear Motion)レール方式を採用することとした。図-8に在来線CLIC支持装置、図-9にソリ部詳細図、図-10に障害物回避センサを示す。MPAレーダの保持機能は、新幹線CLIC同様に空気圧で保持できる構造とした。LMレール方式を採用したことにより、シリンダー数を2個から1個に削減でき、支持装置の全体重量を30%削減することができた。また、アーム長も新幹線用の720mmから575mmと短くなり、空気圧も0.6MPaと小さくできた。ソリは障害物と直接衝突する先端部の形状を改良し、50mm以上を乗越えるためにソリの傾斜高さを新幹線用の50mmから73mmに高くした。障害物回避センサは新幹線CLICで用いているものと同等のものを使用し、最大400mmまで伸縮できる構造とした。

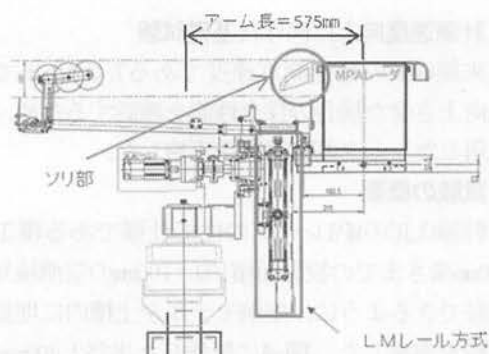


図-8 在来線 CLIC 支持装置

※新幹線ソリ部高さ=50mm



図-9 ソリ部詳細図

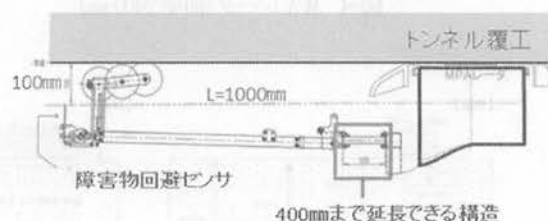


図-10 障害物回避センサ

5. 廃線トンネルでの実証試験

開発した支持装置を、3t軌陸ダンプの車両荷台に設置した油圧式ブーム装置の先端部に取付け、廃線トンネル内で走行試験を行った。図-11に試験車両と開発した支持装置を示す。

(1) 試験の目的

廃線トンネルにおける試験では、7.0km/hに速度向上させた場合のMPAレーダのトンネル覆工面の追従性、ソリの障害物乗り越え性能および障害物回避センサの性能を確認した。

(2) 試験概要

試験は、廃線トンネル内に全長約34mの仮設レールを敷設し、実際に試験車両を載線させて実施した。図-12に障害物乗り越え試験状況を示す。

トンネル覆工面の追従性については、エアシリンダの動きをレーダ式測距センサで測定し、速度による応答変化を確認した。

障害物乗り越え性能については、トンネル覆工面に障害物モデルを仮設して、MPAレーダを接触させて乗越えられるか確認した。障害物モデルは高さ10～80mmのものをを用いた。

障害物回避センサ性能は、7.0km/hで回避できると考えられる、高さ100～130mmの障害物モデルを用いて確認を行った。



図-11 試験車両と開発した支持装置



図-12 障害物乗り越え試験状況

(3) 試験結果

a) トンネル覆工面追従性

速度を変化させながら同じ区間を走行して、MPAレーダのトンネル覆工面追従性を測定した。その結果、7.0km/hに速度向上しても3.0km/hの時ほとんど違いはなく、速度向上による追従性の低下は起きないことを確認した。

b) 障害物乗り越え性能

障害物乗越え性能については、乗り越え速度を1.0km/h、3.0km/h、5.0km/h、7.0km/hの4段階とし、障害物モデルは10mm刻みで確認した。その結果、7.0km/hで高さ60mmの障害物モデルまで乗り越える性能を確認した。なお、障害物モデルが高くなるにつれてレーダの乗越え時の振動・衝撃が激しくなった。特に顕著に現れたのが高さ80mmからであり、5km/hでは乗越えたものの、危険と判断して7.0km/hは中止とした。

c) 障害物回避性能

障害物回避センサを用いた障害物回避性能については、7.0km/hでは高さ130mmの障害物モデルを回避できず衝突したものの、高さ100mmについては、回避性能は十分であった。

d) まとめ

在来線CLIC用に開発した支持装置を用いて、7.0km/hの速度で検証した結果、トンネル覆工面追従性は3.0km/hとほぼ同レベルであり、運用上問題ないことを確認した。また、障害物乗り越え能力は高さ60mmまで可能になり、目標値を上回った。さらに、高さ100mmの障害物回避性能も確認することができた。

なお、試験時にMPAレーダ測定も実施したが、廃線トンネルでは覆工コンクリート内部の欠陥が少なく、評価に値する測定データは得られなかった。したがって、速度向上した場合のMPAレーダの探査性能の評価は営業線トンネルにて実施することとした。

6. 営業線トンネルでの実証試験

(1) 試験の目的

実トンネルにおける、7.0km/hに速度向上させた場合のMPAレーダの探査性能、測定画像の確認を目的として試験を実施した。

(2) 試験概要

試験は、測定速度を測定ピッチ10mm(3.5km/h)と、測定ピッチ20mm(7.0km/h)の2種類とし、比較評価を行った。反応が確認された場合は、測定速度毎の測定画像の比較評価を行い、覆工内部の欠陥の判定が可能であるか確認を行った。

(3) 計測結果

計測は、覆工面の凹凸に追従し、7.0km/hであっても問題なくスムーズに測定することが可能であり、計測データとしても欠測することなく取得することができた。計測の結果、以下の変状と構造物が捕捉された。図-13に探查画像を示す。この計測区間内部には鋼製支保工が設置されている。この支保工がどのように反応するのか検証した。図-13に示すように、反応の形状を速度7.0km/hと3.0km/hを比べると、7.0km/hは若干不明確になるものの、検知性能の差異はほとんどなく、深さ300mmまで反射を捕捉できていることが分かる。

(4) まとめ

MPAレーダを用い、測定速度7.0km/hと3.0km/hの測定画像の比較評価を実施した。その結果、一部ではレーダ反射の形状が不明確になるが、変状の有無や位置等の検知性能は同等であることを確認した。

7. 在来線トンネル覆工検査車の導入

基礎試験から実トンネルにおける実証試験を通して、在来線CLICの開発目標を満足することができたため、車両を製作、2013年4月に導入した。

車両タイプは、軌陸車タイプを採用した。これは、在来線には踏切や軌陸搬入路が各所にあり、計測対象トンネルへの搬入出が容易であり、移動に機動性が要求されることを考慮し、軌陸車タイプを採用した。図-14に導入した車両の外観写真を示す。軌道走行時は定低速走行が可能な油圧駆動とし、最高速度は、回送時は30km/h、計測時は7.0km/hとした。

MPAレーダは2基搭載し、1機あたり1mの計測幅である。探查深度は新幹線CLICと同様に覆工表面から400mmである。計測時には、トンネル覆工面を単線は8分割(複線は新幹線と同様に14分割)し、4往復(複線は4往復×上下線=8往復)してアーチ部を計測する。図-15に単線トンネルの測線配置図を示す。

計測速度はトンネル延長(単線)当り80m/hを目標としている。

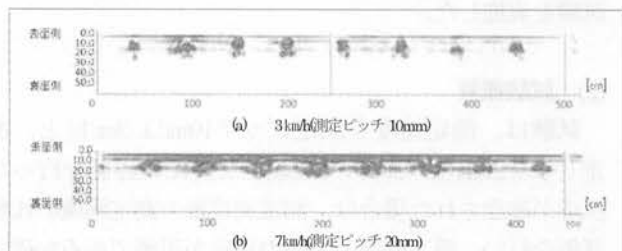


図-13 探查画像例



図-14 試験車両と開発した支持装置

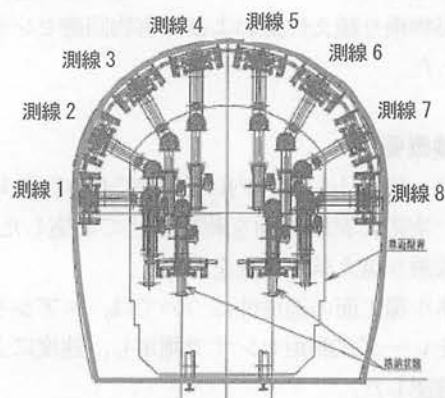


図-15 計測測線配置図(単線トンネル)

8. おわりに

今回開発した在来線CLICは、新幹線CLICの技術を最大限活用し、在来線トンネルの計測に必要な新たな技術を取り込んだ。

2013年4月に導入した在来線CLICは、営業線で初計測を実施し、トンネル延長(単線)あたり約90m/hで計測できることを確認した。

今後は解析結果を用いて、より精度の高いトンネルの健全性診断を行い、構造物の安全性を高める。また、在来線トンネル特別全般検査における打音作業等の軽減に寄与したい。

参考文献

- 1) 秋山保行, 田村隆志, 森島啓行: トンネル覆工検査車の開発, 土木学会年次学術講演演習概要集第V部 Vol.58, pp845-846, 2003.9
- 2) 三宅浩一郎: トンネル覆工検査車の導入, 新線路 Vol.59, No.12, pp8-10, 2005.12
- 3) 国土交通省鉄道局監修, 財団法人鉄道総合技術研究所: 鉄道構造物等維持管理標準・同解説(構造物編 トンネル), pp23-35, 丸善, 2009.1
- 4) 小野田滋: 鉄道構造物探見, P76-85, JTB, 2003.1