

青函トンネル維持管理における内空断面測定

CONVERGENCE MEASUREMENT FOR MAINTENANCE IN SEIKAN TUNNEL

吉川大三* 坂井五郎** 高橋正義*** 木村裕俊*** 先山友康****

Daizo YOSHIKAWA, Goro SAKAI, Masayoshi TAKAHASHI, Hirotooshi KIMURA and Tomoyasu SAKIYAMA

After the completion of Seikan Tunnel, maintenance at the undersea portion has been carried out by Japan Railway Construction Public Corporation.

Long term monitoring for deformation of the lining and seepage water is being performed to assure the tunnel's safety. Three dimensional measuring system has been introduced for convergence measurement. The seepage volume that depends on pore water pressure is on the decrease since the tunnel's opening.

This paper mentions three dimensional measuring system by electro-optical distance meter, the convergence measuring results and the volume change of seepage water.

Keywords: maintenance of undersea tunnel, convergence measurement, three dimensional measuring system, volume change of seepage water

1. はじめに

青函トンネルは、1988年(昭和63年)3月開業以来9年目を迎えているが、その間本州と北海道を結ぶ大動脈としての社会的使命を果たし続けている。

鉄道公団は、トンネル海底部区間を含む24.2kmに関する構造物本体の維持管理業務を担当しており(図-1参照)、その内容としては内空断面測定、湧水量および湧水分析、注入材料とコンクリート物性の追跡調査、地震など防災データの収集・整理など多岐にわたるものとなっている。

トンネル内空変位は、地山の性状や支保パターンなどに応じて実測できる量であることから、内空断面測定は維持管理の上で最も重要な計測項目の一つとして、本坑、作業坑、先進導坑の各坑道において重点的に継続実施してきている。これら計測データの整理分析結果から、変位パターンの分別や変位の大きい箇所の特特定など、今後の維持管理を効率的に行っていくための技術的知見が得られつつある。また、測定手法として光波測距儀を用いた新たな三次元計測システムを導入している。

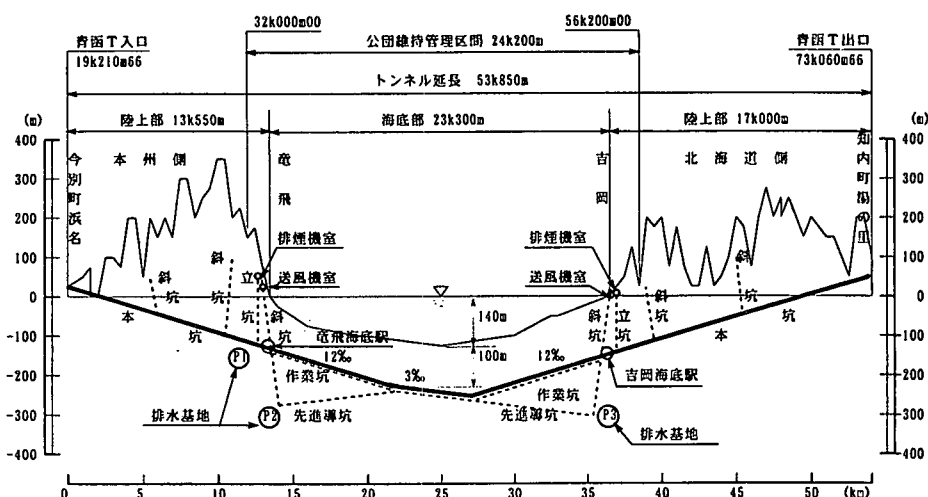
本稿においては、新たな内空断面測定システム、内空断面測定結果に基づく知見およびトンネル湧水量の変化に伴うトンネル本体への影響解析結果について述べる。

* 正会員 日本鉄道建設公団 札幌工事事務所

** 正会員 日本鉄道建設公団 札幌工事事務所 吉岡管理センター

*** 日本鉄道建設公団 札幌工事事務所 吉岡管理センター

**** 正会員 日本鉄道建設公団 計画部計画課



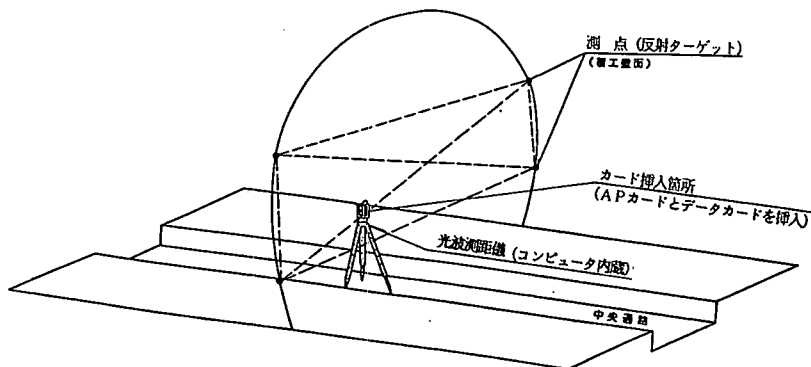
2. 三次元計測システム

内空断面測定は、トンネル壁面に設置された標点をインパル尺などを用いて直接測定するのが一般的である。しかし、青函トンネルの本坑では列車間合いの測定を余儀なくされること、軌道回路を短絡する事故の危険性が内在することなどから、中央通路上から測定可能な非接触による三次元計測システムを採用している。

開業時点からは、公団が開発・実用化した光学的手法による三次元計測システム（以下、従来型システムと呼ぶ）、すなわち2台のトランシットとラップトップ型パソコンを組み合わせたシステムを用いて、列車間合いで実施してきたところである。本システムは既に確立され、青函トンネルで数年来実績を積み重ねて多くの文献などに発表されているので、ここでは説明を省略する。

今後において列車の高速化と高密度化が想定されることから、一層安全で迅速に測定できる効率的なシステムの開発が要請されてきた。このため、ここ数年にわたり光波原理に基づく計測システム（以下、新型システムと呼ぶ）に関する検証試験を行ってきた結果、安全面・作業能率面などから新しいシステムを本格的に導入している。

新型システムは1台の光波測距儀を用いるもので、任意の2点間の測点を視準するだけで座標系が自動的に決定され、これに基づいて各測点の座標値が算出される。測定方法は図-2に示すように、測定断面近傍の中央通路上に光波測距儀を設置して実施するものである。



3. 内空断面測定結果

3・1 本坑の内空変位

本坑における測定位置は平均間隔 1 km を基本として、工事が難航した箇所を含めて海底部分では 77 断面を測定している。

各測定断面における測点は、図-3 に示すように路盤面から 0.8m 付近と 4.7m 付近の高さに 4 点設置し、測線数は 6 測線としている。

また、測定回数は当初年 4 回としていたが、その後計測データを吟味して年 2 回に見直している。

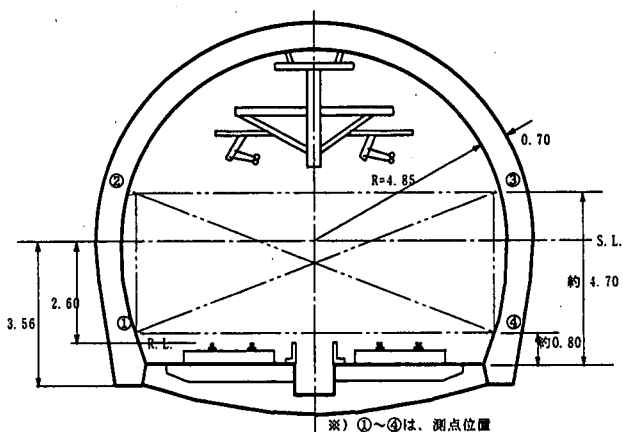


図-3 本坑内空断面測線標準

本坑における変位の測定値は全般的に小さくかつ急激な進行性も認められておらず、構造物として健全に機能している

と判断している。

測定結果として、変位の最も大きい箇所である海底中央部付近の不良地質区間における計測例を図-4 に示す。全体的にマイナス側(断面縮小側)に変位し、収束の傾向にあるといえる。

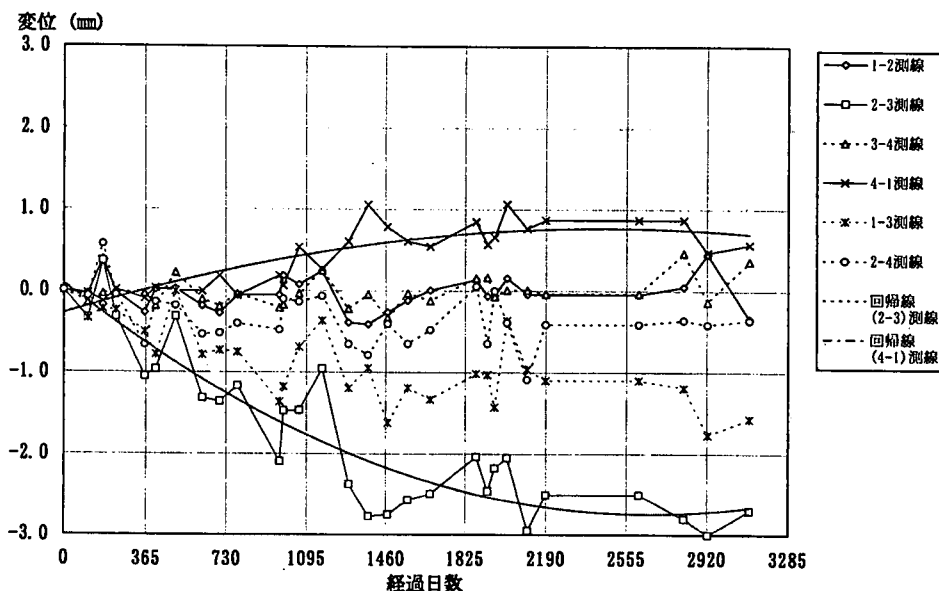


図-4 本坑内空変位の経時変化(不良地質区間 45k 付近)

表-1 本坑断面変形パターン

変形の種類	A タイプ	B タイプ	C タイプ	D タイプ
変形別数	断面数 15 測点	断面数 21 測点	断面数 34 測点	断面数 7 測点
割合	20%	27%	44%	9%
記事	・2-3, 4-1測線とも縮小	・2-3, 4-1測線とも拡大	・2-3測線は縮小 ・4-1測線は拡大	・2-3測線は拡大 ・4-1測線は縮小

次に、変形パターンを水平変位(2-3および4-1測線)に着目して4つのタイプに分類し、従来型システムによって得られた測線の伸縮状況を集約すると表-1を得る。

この表から、側壁上部(2-3測線)が縮み下部(4-1測線)が拡大する、Cタイプが多いことが判る。

また、両水平測線が1mm以上変位している断面の変形パターンは、いずれもCタイプに属している。

3・2 先進導坑、作業坑の内空変位

先進導坑、作業坑では列車が走行していないことから、コンバージェンス・メジャーを用いて測定を実施している。

測定位置は本坑と同様な考え方を基本とし、現在67断面を対象にしている。

測点は路盤面から0.5m付近と1.6m付近の高さに4点設置し、測線数は3測線としている（図-5参照）。年間の測定回数は、本坑同様測定開始当初の年4回から、現在は年1～2回を標準としている。

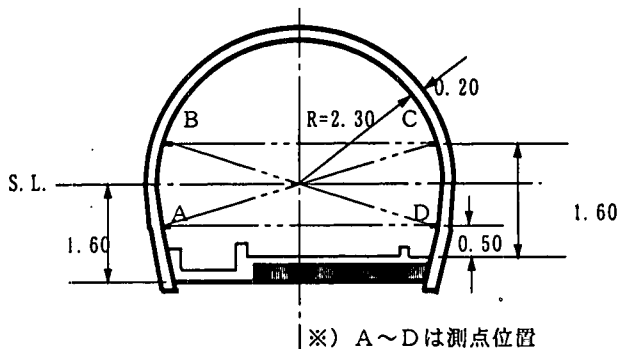


図-5 作業坑内空断面測線標準

作業坑の内空変位量の最大・最小値を図-6に、内空断面測定経時変化の計測例を図-7に示す。

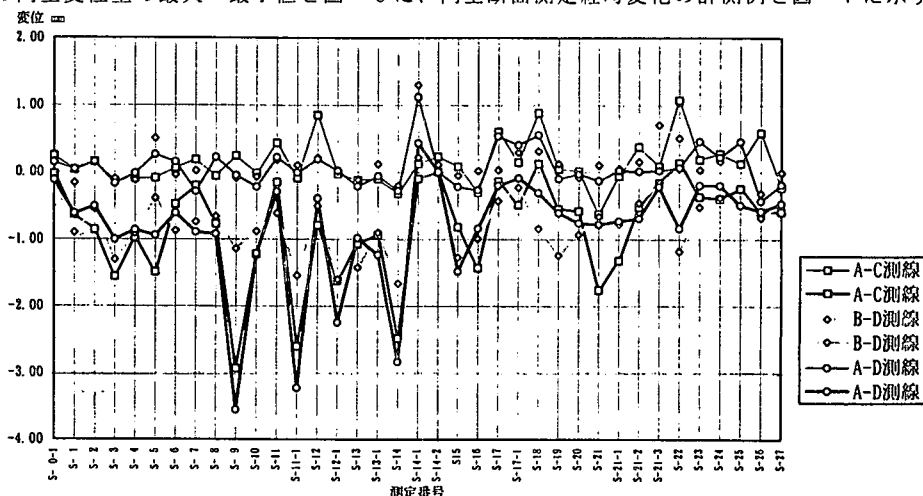


図-6 作業坑内空変位の最大・最小値（測定断面ごと）

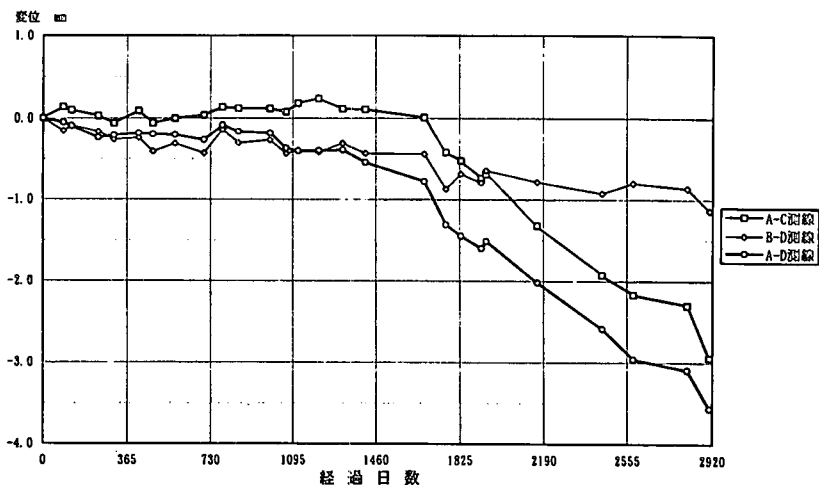


図-7 作業坑内空変位の経時変化（S-9 7k 800m付近）

測定結果から全体的に断面縮小側に変位しており、67断面のうち半数程度が初期値からの最大変位量が1mm以内となっている。作業坑4断面と先進導坑2断面の計6断面に関する変位が2mmを超えて、かつ進行性を示す傾向が認められている。しかし、覆工外観検査の結果では、吹付けコンクリートに顕著な変状などは観察されておらず、今後継続監視を必要とするが健全度は確保されていると判断している。

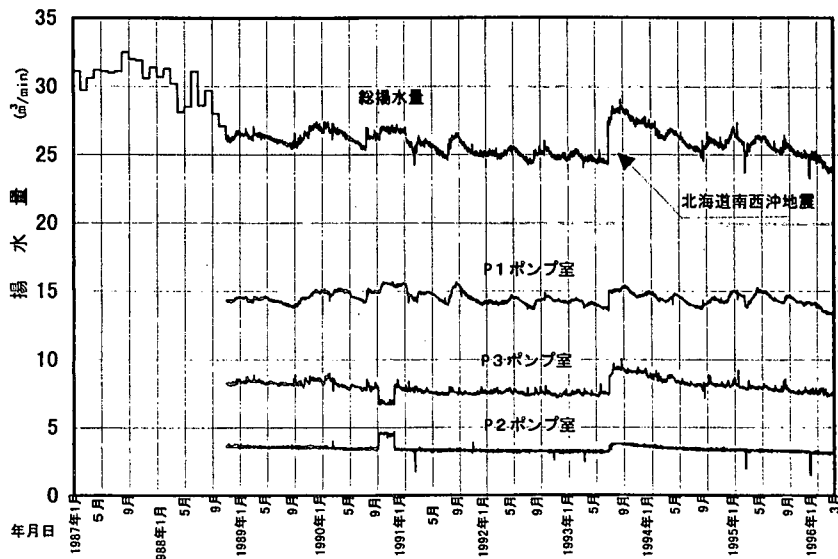
4. 湧水量変化に伴うトンネルへの影響解析

4・1 解析目的

トンネルが供用開始されてから、湧水量が全体的傾向として時間経過とともに漸次減少してきている（図－8参照）。

湧水量は間隙水圧に大きく依存するので、湧水量を減少させるような周辺地山の間隙水圧分布を様々に想定し、有限要素法を用いてトンネル本体への影響を弾塑性解析する。

そして、解析結果とトンネル内空変位の実測値とを比較検討して今後の維持管理業務に反映させる。



図－8 トンネル全体湧水量の経時変化

4・2 解析条件

湧水量の減少は、トンネル掘削後に何らかの理由で地山の間隙水圧分布に変動があつて浸透水が阻止されていると考えて、次の2ケースと想定する。

ケース1：覆工背面直後(ラインA)

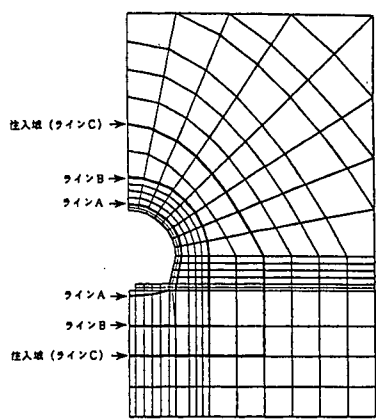
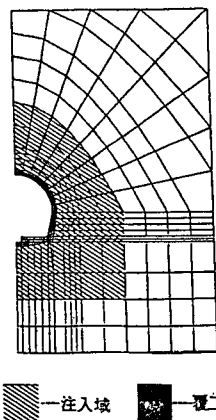
で浸透水が阻止されている場合

ケース2：注入の領域内(A－C間)

で浸透水が阻止されている場合

図－9、10に覆工と注入域部、浸透水が阻止されている想定ラインをそれぞれ示す。

解析にあたっては、覆工部は完全弾性体として水の浸透は考慮せず、注入ゾーン範囲は注入の効果として地山の透水係数のみを1/100に低減させる。



図－9 覆工部と注入域部 図－10 浸透水阻止の想定ライン

また解析法として、湧水量を減少させるような周辺地山の間隙水圧分布を想定して、その変化量に相当する物体力からトンネルの変形解析を行う。その際、水圧変化に伴う力に加えて土圧の除荷による応力解放力も考慮する。

解析に用いた地山および覆工材料の諸数値は、次のとおりである。

地山物性：	弾性係数	$E = 30,000 \text{ kgf/cm}^2$	覆工材料：	弾性係数	$E = 300,000 \text{ kgf/cm}^2$
	ポアソン比	$\nu = 1/3$		ポアソン比	$\nu = 1/3$
	粘着力	$c = 5 \text{ kgf/cm}^2$			
	内部摩擦角	$\phi = 30 \text{ 度}$			

4・3 解析結果

解析で得られた覆工内壁の変形モード(水平方向)のうち、代表的なものを図-11～13に示す。

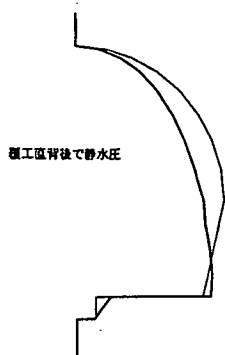


図-11 ケース1



図-12 ケース2-①



図-13 ケース2-②

(覆工直背後で静水圧が作用) (A-C間で透水係数が半減) (A-B間で透水係数が半減)

覆工直背後で静水圧を受ける場合(ケース1)は大きな変形を生じており、実測値と比較的類似したモードが見受けられる。また、応力としても覆工近傍に負の有効応力が発生している結果を得ている。

注入の領域内で浸透水が阻止されているケース2の場合、ケース1と比較して小さな値となっており、注入域全体で透水係数が減少しているときの方が変位が少なくなっている。

4・4 ま と め

トンネルの湧水量減について2ケースを想定して解析を実施した結果、各ケースによってトンネルの状態は全く異なることが判明した。

ケース1の場合、湧水の減少に伴ってトンネル覆工に大きな水圧が変位作用することになり、トンネルの安定に悪影響を及ぼす懸念がある。応力一方ケース2の場合、トンネル覆工に対する力学的状態は安定してひずみおり、揚水量も軽減され維持管理のうえで好ましい結果となる。

今回の解析結果から、湧水量減に伴い観測される諸量の変動傾向を図示すると図-14のようになる。すなわち、湧水が覆工背面で滞った場合、変位などの力学量は急激に増大する傾向をもつが、反対に湧水が覆工から離れたところで滞った場合、測定値の増加量は直線的あるいは一定値に収束する傾向をもつと想定される。現時点までの観測値のみからは図中の2つの曲線のいずれかであるかは断定はできないが、まだ2つの曲線が大きく離反していないものと判断される。

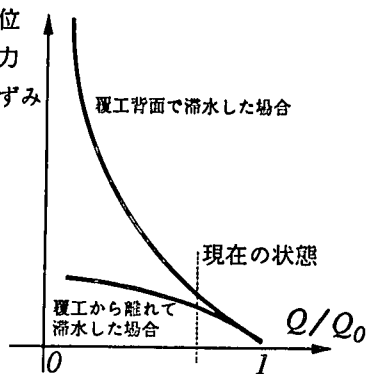


図-14 比湧水量と計測値との関係

5. おわりに

青函トンネルは開業後9年目を迎えている。この間、北海道南西沖地震(1993年7月発生)などの4回にわたる大地震に遭遇したが、構造物本体の健全度は維持されている。海底下に位置することから懸念されるトンネル湧水は、地震の影響で一時増加したものの漸減傾向にあることが特筆される。

本トンネルの維持管理手法として、将来の列車の高速化と高密度化を想定して光波測距儀を用いた三次元計測システムを新たに導入したが、坑内における作業性および安全性が一段と向上した。

今後は、新システムによる内空断面測定データの積み重ね、湧水データなど各種測定結果の整理分析による維持管理マニュアルの作成を通じて、本トンネルの機能が恒久的に確保されるように努めていきたい。