

那覇港沈埋トンネルの維持管理計画について

金正富雄*・松井 創**・糸永克彦***・津田修一****

* (財) 沿岸技術研究センター 調査役

** 前 (財) 沿岸技術研究センター 理事

*** 前 (財) 沿岸技術研究センター 調査部 主任研究員

**** 内閣府 沖縄総合事務局 那覇港湾・空港整備事務所 所長

那覇港沈埋トンネルについては、フルサンドイッチ構造やベローズ継手の採用、片側3車線と断面が大きいこと、基盤層に起伏があり、表層地盤の強度にバラツキが大きいこと、台風の常襲地帯であることなどの特徴がある。100年間の供用期間を良好な状態で維持管理するため、予防保全の観点から維持管理マニュアルを作成した。計測管理を含む内容について概説する。

キーワード：維持管理，計測管理，点検レベル，管理基準値

1. はじめに

本トンネルは、那覇ふ頭港口部を海底トンネルで横断し、波の上地区と那覇空港を8函の沈埋函で直結させる延長約1.1kmの自動車専用道路トンネルであり、県内初の海底トンネルとなる。また、国内初の新工法も積極的に導入している。構造や施工の詳細は省略するが、点検管理にあたっては、本沈埋トンネルの特徴を十分理解する必要がある。

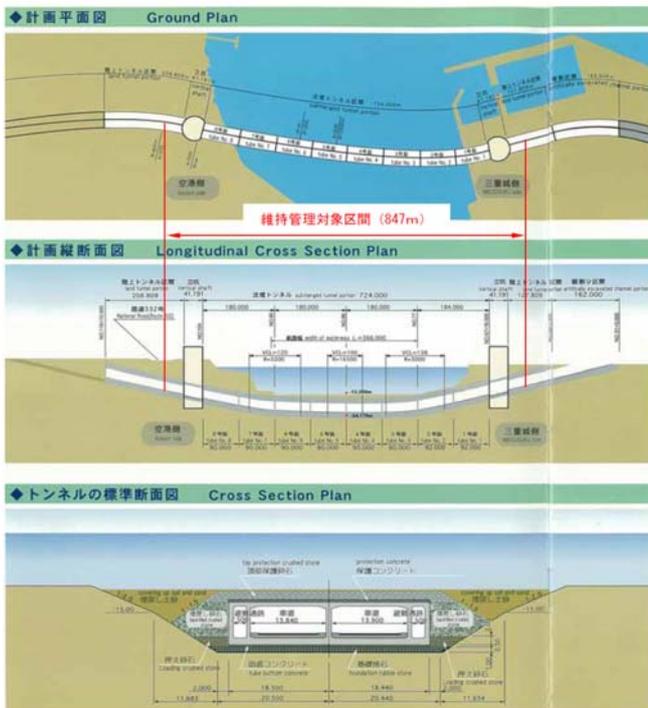


図-1 沈埋トンネル概要図

2. 沈埋トンネルの変状について

維持管理マニュアルの作成にあたり、沖縄で最初の沈埋トンネルであることを考えると、点検診断業務を

実施する者は、その資格は規定するが、必ずしもその道の熟練者ではないことを想定した。そこで、図や表、写真を多用して沈埋トンネルの変状原因、特徴、対応などを詳述した。また、点検結果から劣化度を判定するため、参考となる写真も収集し例示した。

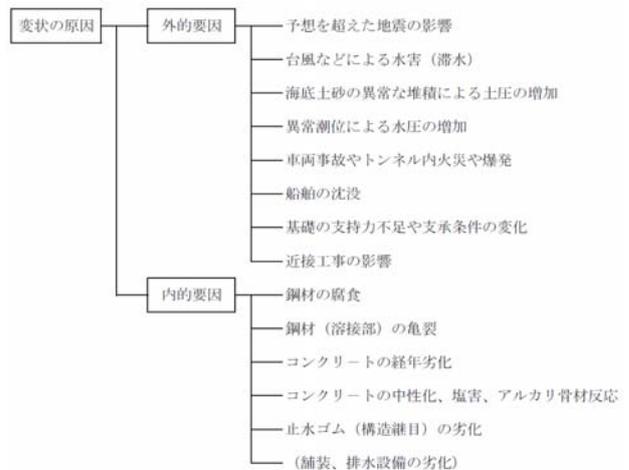


図-2 沈埋トンネルの変状原因

表-1 沈埋トンネルの変状の概要と特徴

原因	概要	特徴
外的要因		
地震の影響	・予測を超えた地震の発生により、主に継手部（剛継手、ベローズ継ぎ）の応力や変位、横断方向では側壁の応力に過大な変化が発生する。 ・地盤の側方流動による立坑変状の影響の伝播も考えられる。 ・立坑とトンネルの地震時挙動が異なるため、その周辺に被害が集中することが予想される。	・予測を超えた地震は、地震観測による実測値（計測データ）で確認できる。気象庁が発表する震度階も施設の損傷程度予測する一指標となる。 ・変位が大きい継手部周辺の化粧板や耐火版の破損が発生する可能性がある。 ・コンクリート部材では、新たなひび割れが発生する。 ・継手部からの漏水が考えられる。 ・付属設備の落下による第三者被害に注意が必要である。
台風の影響	・トンネル部は、台風などによる影響を直接受けることはないが、雨水の滞水により、交通機能を阻害することが考えられる。	・排水設備の能力を超えた雨水の流入がある。 ・雨水の排出が遅れると、鋼材の防食機能に影響を与える。
海底土砂の堆積	・海底土砂の異常な堆積で設計土圧を超える荷重が作用して、トンネル上床版並びに下床版がたわむ。 ・堆積土砂の減少は、沈埋函の安定性（浮き上がり）や、投錨による面体への影響がある。	・上下床版中央付近の変位が大きくなるため、これに伴い、縦断方向に、天井部では耐火工の割れ、舗装部ではひび割れが生じる可能性がある。 ・土砂の減少による応力的影響は、ほとんどないが、安定性や投錨に注意が必要である。

外的要因	異常潮位	・異常潮位により設計水圧を超える水圧が作用し、トンネル上床版並びに下床版がたわむ。	・土砂の堆積と同様な現象が起こる。
	車両事故・火災・爆発	・通行車両の事故による火災や爆発によってトンネル内面が高温にさらされ、材料の力学的性質が低下や、部材の損傷が発生する。	・耐火被覆されていない範囲では、コンクリートの表面の爆裂現象やひび割れ、鋼材や止水ゴムの溶解などが生じることが考えられる。 ・縦断線形の変化、継手や函体歪みの増加、漏水などが生じることが考えられる。
	船舶の沈没	・船舶の沈没の影響では、トンネルが縦方向あるいは横断方向に不等沈下することが考えられる。	・船舶の大きさによっては、重大な損傷につながる可能性がある。
	基礎の支持力不足	・基礎の支持力不足や沈下による支保条の形の変化を生じることにより、トンネルが縦断方向に不等沈下する。	・主に継手の変位、函体歪みの増加、縦断線形の変化が考えられる。 ・縦断測量（水準測量）で確認できる。
内的要因	近接工事の影響	・近接工事により、本トンネルに偏圧が作用し、縦断方向あるいは横断方向に変形する。 ・新たな護岸構築によっても上載荷重増加による影響がある。	・縦断線形の変化、継手変位や函体歪みの増加がある。 ・影響が大きい場合には、漏水が生じることが考えられる。
	鋼板の腐食	・沈埋部の外鋼板（海水と接する側）は、流電陽極方式によって防食されている。 ・沈埋部の鋼板や端部鋼筋の腐食は、発生形態により全面腐食と局部腐食に大別される。特に局部腐食は、部分的に電極を持った腐食形態であり、全面腐食に対して速い速度で進行する。	・外鋼板の防食は、亜鉛重合電極の電圧を計測することによって、健全性を確認できる。 ・近接目視で確認できる。 ・局部的な腐食を予防保全的に修復することが重要である。
	鋼板の亀裂	・亀裂は溶接部に発生することが予想される。 ・要因は、想定外の荷重、施工不良、応力腐食割れなどがある。	・塗膜の割れで見えることができる。 ・錆汁や塗膜の浮きがあった場合には注意が必要である。
	鉄筋の腐食	・鉄筋の腐食は、コンクリートの中性化及び塩害による腐食であり、断面欠損により力学的性質が低下する。	・鉄筋に沿って規則的なひび割れとして確認されることが多い。 ・打音検査によって確認できる。
内的要因	経年劣化（中性化）	・経年変化は、コンクリートの中性化を主たる内容とする。コンクリートの中性化はコンクリート中の水酸化カルシウムが、大気中の炭酸ガスと反応してアルカリ性を失い、中性化する現象を言う。 ・沈埋トンネル部は、鋼板で密封されているので、中性化は起こらない。	・コンクリートによる鉄筋の防食効果が失われる。 ・供用から10年以後に規則的なひび割れとして確認されることが多い。 ・排気ガスによる影響を受けて、中性化が促進される。
	塩害	・コンクリート中に進入した塩分により、鉄筋腐食が促進される。 ・付着塩分によって、鋼板腐食が促進される。塗膜劣化が生じた後の腐食進行が通常より早い。	・規則的なひび割れ及び版剥離として確認されることが多い。 ・供用から10年以後に規則的なひび割れとして確認されることが多い。 ・港湾区域では、飛来塩分による影響が多々である。
構造的要素	構造継手	・構造継手の止水ゴムの材質劣化をいう。	・継手部からの漏水が生じることが考えられる。
	ゴムの劣化	・取り付け金具の劣化（腐食）による止水性能低下もある。	・劣化が進行すると、漏水に錆汁が混ざる。
	舗装排水設備	・舗装部は経年劣化で、ひび割れや段差などが生じ、走行性に影響を及ぼす。	・舗装や排水設備などは、トンネルの耐用年数（100年）内で、数回の改修が必要である。
	その他	・通行車両の排気ガスや煤塵に含まれる窒素酸化物などが漏水中の水分と化合して、強い酸性水を育成する可能性がある。 ・これまで煙害による直接的な変状例は少ない。	・化粧版や耐火版が排気ガスで汚れ、視認性が悪くなる。

表-2 各部位の維持管理レベル

対象部位	設計仕様	設計耐用年数	維持管理レベル	耐用期間内の補修
ベローズ継手	鋼製	100年	I	地震や地盤沈下などの影響により耐用年数以内で補修する場合も有り得る。
剛継手	合成構造	100年	I	同上
沈埋面	合成構造	100年	I	同上
避難通路床版	PC構造	100年	II	ひび割れ発生時の補修を想定する。
立坑 陸上トンネル	RC構造	100年	II	ひび割れ対策に加え、剥落防止工を想定する。
電気防食	流電陽極方式	100年	II	水質変化など想定外の要因で消費量が増大した場合を想定する。
内面塗装	F10仕様	30年	II	部分補修を想定する。
内装板 耐火被覆		30年 (目安)	III	耐用年数は、国内道路トンネルの実績。
舗装	アスファルト 舗装(80mm)	10年 (目安)	III	耐用年数期間内の補修工事を想定する。
排水装置	鋼製	20年 (目安)	III	同上
付属設備	ITVカメラ 消火設備 案内表示板	10年 (目安)	III	本マニュアル対象外
計測システム		15年 (目安)	III	原則年一回のメンテナンスを行い、故障した機器は必要に応じて修理/交換する。

鋼部材



写真-1 劣化度判定参考写真例

3. 各部位の耐用年数について

施設本体の供用期間は100年で設計している。各部位の維持管理レベルは「港湾の施設の維持管理技術マニュアル」¹⁾に準拠して表-2のように設定した（紙面の都合で各レベルの意味を要約例示する）。

レベルⅠ：初期対応のみで性能を保持（無補修）

レベルⅡ：予防保全的な対策で性能低下に対処

レベルⅢ：事後保全的な対策で性能低下に対処

100年以下の耐用年数を想定している部位については、供用期間中に数回の改修工事（補修工事）が予測される。維持管理レベルⅡとⅢの設計耐用年数については、目安として示したものである。耐火被覆は、30年以上使うことも可能であり、状況を見て判断することとした。

4. 点検のレベル、内容

点検の種類とその内容は、表-3に示すとおりとした。点検のレベルは、点検の重要度に応じて表-4のように定めた。点検の基本は目視確認であるが、レベルⅢ以上は近接目視を実施することとした。

専門家とは、「技術基準対象施設の維持に関し必要な事項を定める告示」第三条に示される者を言う。

点検レベルⅢ以上の点検における、専門的知識及び

技術又は技能を有する点検員とは、土木構造物に関する実務経験を以下の期間有している者が望ましいとした。

- ①大学卒業後3年以上。
- ②短大・高専卒業後5年以上。
- ③高校卒業後8年以上。
- ④前項①～③と同等以上の能力を有する者。

点検結果は、点検員の判断によるところが大きいいため、上記のような実務経験を積み、かつ、道路トンネルおよび点検に関する専門的な知識を有した1名以上の点検員と、土木構造物および点検に関する基本的な知識を有する複数の点検補助員によって構成されたチームで作業を行うことが望ましい。

点検レベルIV以上(詳細定期点検、詳細地震時点検、詳細臨時点検)において、非破壊検査を用いた点検、測量調査、構造解析を実施する場合には、その資格を有している専門家が実施する。調査結果や安全性の判定において、高度な判断を要する場合は、学識経験者の指導を受ける。

表-3 点検の種類とその内容

点検の種類	点検頻度	点検部位	点検方法	点検レベル
日常点検	1ヶ月間隔	車道部(排水溝) 避難通路	歩行目視 車中目視	II
一般定期点検	1年間隔	車道部(排水溝) 避難通路 立坑 耐火被覆、内装板 継手	計測値 近接目視、打音	III
詳細定期点検	5年間隔	同上	計測値 近接目視、打音 測量 (非破壊検査)	IV
一般臨時点検	火災 爆発 異常潮位 車両事故 船舶沈没 滞水 凌襲	同上	計測値 近接目視、打音	III
詳細臨時点検	特段の異常	同上	同上 (非破壊検査) (構造解析) (測量)	V
一般地震時点検	震度IV以上	同上	計測値 近接目視、打音	III
詳細地震時点検	震度V(弱)以上	同上	同上 (非破壊検査) 構造解析 測量	V

注記：点検方法の()は、状況に応じて実施する。

5. 点検の流れ, 点検項目

表-3に示す点検の種類ごとに点検のフローを作成した。フロー図では、点検者が判断する部分と管理者が判断する部分、管理者と協議して専門家に委託する場合など、それぞれの責任範囲を明示した。

表-5に沈埋トンネル区間(7φノドイッ構造)の「日常点検」、「定期点検」、「地震時点検」、および「臨時

表-4 点検レベルの分類

点検レベル	点検人数	点検方法	点検内容	点検員の資格等
I	1人程度	歩行巡回	目視観察	資格は問わない。
II	2人程度	歩行目視、車中目視	目視観察	有資格者が望ましい。
III	3人程度	計測値 近接目視、打音検査	計測結果の判定 目視観察	専門家の意見や指導を受ける。
IV	3人以上	計測値 近接目視、打音検査 測量、非破壊検査	計測結果の判定 目視観察 調査結果考察	専門家及び学識経験者の指導を受ける。
V	3人以上	計測値 近接目視、打音検査 測量、非破壊検査 構造解析	計測結果の判定 目視観察 調査結果考察 安全性判定	同上

点検」の点検項目を示す。立坑・陸上トンネル・擁壁区間(RC構造)も同様の表を作成した。なお、黄色の網掛け部は計測管理システム(後述)により判定できる項目である。

各部位ごとの点検方法、着目点などは割愛する。

表-5 沈埋トンネル区間の点検項目

点検箇所	点検項目	日常点検	定期点検	地震点検	
		1回/月	1回/年	震度IV以上	
本体	路床コンクリート	ひび割れ	○	○	○
		劣化	○	○	○
	耐火被覆・内装板	損傷・落下危険	○	○	○
		鋼板	応力	×	○
継手	継手部	腐食	×	○	×
		漏水	○	○	○
		剛継手応力	×	○	○
		ベローズ伸縮量	×	○	○
縦断線形	縦断測量	×	△	△	
		トラバース測量	×	△	△
坑内温度	温度	×	○	○	

点検箇所	点検項目	日常点検	定期点検	地震点検	
		1回/月	1回/年	震度IV以上	
本体	本体および路床コンクリート	ひび割れ	○	○	○
		漏水	×	○	○
	内装板	劣化	○	○	○
		損傷・落下危険	○	○	○
端部鋼殻	腐食	×	○	○	
	漏水	○	○	○	
継手	継手部	漏水	○	○	○
		止水部材	×	○	○
縦断線形	縦断測量	×	△	△	
		トラバース測量	×	△	△

○：実施する。 ×：実施しない。 △：必要に応じて実施する。

6. 点検結果の診断

各点検診断における判定は、「港湾の施設の維持管理技術マニュアル」¹⁾に準拠し、表-6に示すようにa, b, c, dに分け、更にQのランクを追加した。判定区分Q

は、点検者だけでは変状の程度が明確に判断できないが、重要な損傷と思われる場合、および通常見られない異常な変状があるため、別途調査をしないと判定区分にそった判定ができない場合に適用するものとした。総合評価などの際に詳細調査など次のステップへ進むかどうか判断するため、Qの判定をした場合は、必ずその理由などを明記することとした。

表-6 点検診断の判定基準

判定	状況
a	<ul style="list-style-type: none"> 部材の性能が著しく低下している状態。 交通への支障や第三者への影響が大きいため、緊急の補修が必要な場合。
b	<ul style="list-style-type: none"> 部材の性能が低下している状態。 変状はあるが交通への支障や第三者への影響が小さいため緊急ではないものの補修が必要と考えられる場合。
c	<ul style="list-style-type: none"> 部材の性能低下はないが、変状が発生している状態。 現在のところ交通への支障や第三者に与える影響や機能の低下もなく、以後の日常点検においてその進行に着目する必要がある場合。
d	<ul style="list-style-type: none"> 変状が認められない状態。
Q	<ul style="list-style-type: none"> 変状はあるものの判定が出来ないため、別途詳細な調査を要する場合。

7. 計測管理

沈埋函が損傷した場合は大量の水がトンネル内に流入し非常に危険な状態になる。かつ、重大な損傷・変状が発生してから補修を行うのでは作業性、費用面において非常に困難となる。また、本沈埋トンネルは鋼コンクリート合成構造であることから目視点検によるトンネル変状確認は難しく、剛継手およびベローズ継手も目視による変状確認も困難である。このため、沈埋トンネル部では、点検や調査に加えて、事前の変状等を把握する予防保全型維持管理のための計測を行うこととした。図-3に計測機器の配置検討例、表-7に計測値の利用方法を示す。

継手変位（ベローズ継手）、函体応力（剛継手応力）などに管理基準値を設定した。継手変位と函体応力が管理基準値を超えることは、設計で想定している耐力が不足することになり、想定地震に遭遇した場合、復旧が不可能な被害をこうむる可能性がある。

この管理値を超えるような場合には、縦断測量で沈埋函の変形を測定し、設計時のモデル解析と比較するなど現況を正確に把握し、地震遭遇時の予測解析を実施する必要がある。

8. 謝辞

本業務は、沖縄総合事務局 那覇港湾・空港整備事務所発注の平成20年度那覇港（那覇ふ頭地区）道路（空港線）技術検討調査業務の成果を取りまとめたものである。技術検討委員会委員長の琉球大学矢吹哲哉教授をはじめ関係各位から貴重なご意見、御指導をいただきました。ここに記して厚く御礼申し上げます。

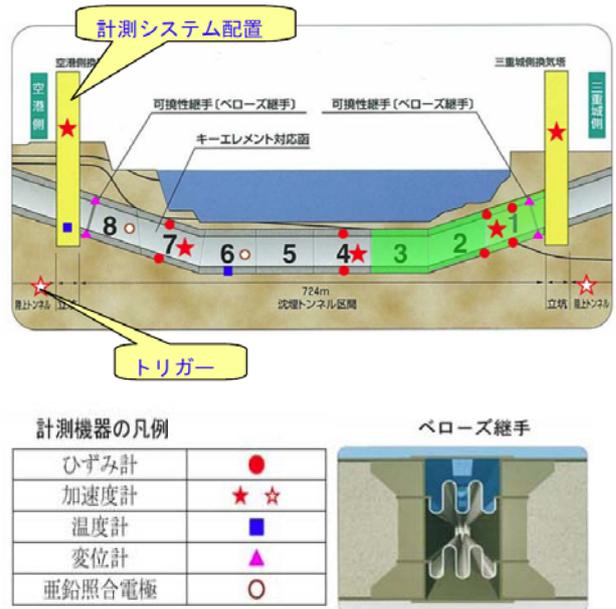


図-3 計測機器配置図（検討中の例）

表-7 計測値の利用方法

計測区分	計測項目	計測値の利用方法	計測目的	
静的計測	函体応力 継手応力	ひずみ計	<ul style="list-style-type: none"> 函体や継手の健全性を確認する。 管理基準値を定め、それを越えないことと監視する。 	維持管理
	継手変位	変位計	<ul style="list-style-type: none"> ベローズ継手の健全性を確認する。 管理基準値を定め、それを越えないことと監視する。 年間変動量（温度や潮位変動による動き）や経年変化量が確認（設計検証は温度との相関性を確認）できれば、計測目的を終える。 	設計検証
		亜鉛照合電極	<ul style="list-style-type: none"> 鋼板の防食効果を確認する。 長期的に継続する必要がある。 定期的な手動計測で管理を継続する。 	維持管理
	函内温度	温度計	<ul style="list-style-type: none"> 温度変化と他の計測機器との関連性を把握する。 函内温度と外気温の関係を確認できれば、計測目的を終える。 	設計検証
動的計測	函体振動 立坑振動	加速度計	<ul style="list-style-type: none"> 施設の健全性を確認する一指標とする。 収集されたデータは設計の妥当性評価（設計検証）に用いる。 加速度（または震度階）は、交通規制に用いる。 	維持管理
		加速度計	<ul style="list-style-type: none"> 記録データのトリガーの役目を果たす。 収集されたデータは設計の妥当性評価（設計検証）に用いる。 	設計検証
	函体応力 継手応力	ひずみ計	<ul style="list-style-type: none"> 地震時の函体挙動を確認する。 管理基準値を定め、それを越えないことと監視する。 設計値との照合により、大地震遭遇時の安全性を評価する。 	維持管理
		変位計	<ul style="list-style-type: none"> 地震時のベローズ継手の挙動を確認する。 管理基準値を定め、それを越えないことと監視する。 設計値との照合により、大地震遭遇時の安全性を評価する。 	設計検証

参考文献

1) (独) 港湾空港技術研究所編著、港湾の施設の維持管理技術マニュアル、(財) 沿岸技術研究センター、2007.10