

沈埋トンネルに関する技術研究

Study for Immersed Tunnel

勝海 務*・立田 実**

KATSUUMI, Tsutomu and TATSUTA, Minoru

* (財) 沿岸開発技術研究センター 第二調査部長

** (財) 沿岸開発技術研究センター 調査部 主任研究員

Immersed tunnels are constructed across river or canal to connect separated areas as vehicles road or rails road. About thirty immersed tunnels have been constructed in Japan. New immersed tunnels are under construction at Niigata port, Kinuura port, Oosaka port, Dokai port and Naha port. Technologies of the immersed tunnels are mature and have high reliability as design and execution. However, new technologies are proposed for more easy and safety execution, rational design works on large scale earthquakes and counter-measure of un-uniform ground settlement. This paper describes on the manual for immersed tunnels, current topics on fabrication of tunnel element, joint structure, earthquake design and so on.

Key Words: Immersed tunnel, manual, tunnel element, joint structure, earthquake design

1. はじめに

沈埋トンネルが水底トンネル工法の一つとして世界で初めて19世紀末に建設されてから100年あまりが経過し、わが国においても1940年頃から30近くの沈埋トンネルが建設されている。この工法は、都市の臨海部における河川、運河、航路等を横断する際のトンネル工法として、建設費が低廉、用地が少ない、施工が容易などの理由から近年は採用されることが多い。

(財) 沿岸開発技術センターでは、新潟港、衣浦港、大阪港、北九州港、那覇港などで行われている沈埋トンネル事業に技術的な支援を行う一方で、平成6年に発行した「沈埋トンネル技術マニュアル」の改訂版を13年中に発行することとしている。本稿では、改訂版マニュアルの内容の一端と、安全で経済的な沈埋トンネル建設事業に関する最新の技術研究を紹介する。

2. 沈埋トンネルの計画

沈埋トンネル工法は、一般的には、水底にあらかじめ溝を掘削しておき、他の場所で分割して製作されたトンネル構造体(沈埋函)を水面に浮かべて現地まで曳航し、溝に沈埋函を据えて沈埋函相互を接合してトンネルを完成させる工法である。水底トンネル工法には、沈埋トンネル工法のほかに、シールド工法、開削工法、ケーソン工法などがあるが、沈埋トンネル工法は他の工法と比べて以下のようなメリットがある。

①土かぶりをほとんど必要とせず設置深度が浅いので、

シールド工法などと比ベトンネル全長が短縮できる。

②沈埋函はプレハブ方式で製作されるので高品質で水密性が高い。

③函体に浮力が働くため、大きな地盤支持力を必要とせず軟弱地盤にも適用可能である。

④断面形状はトンネルの用途に応じて自由に選択でき、広幅員も可能。

⑤プレハブ方式のため施工能率が高く、工期の短縮が可能。

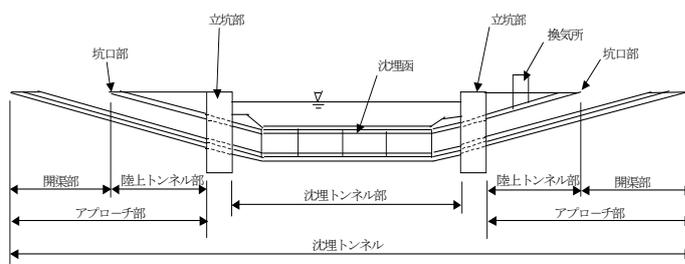


図-1 沈埋トンネルの構成

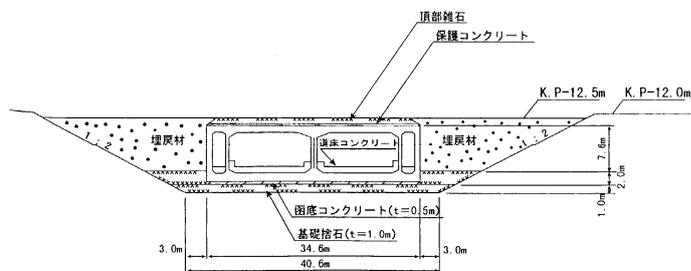


図-2 沈埋トンネルの横断面

水路等の横断形式として、橋梁方式や他のトンネル工法と比較した上で、沈埋トンネル工法が最も合理的であるか

どうか選定する。その際、立地条件、社会条件、横断する道路等の利用条件、施工上の制約条件等を踏まえて、ルート、線形、概略構造、工費、工期、施工性等を比較検討する必要がある。

2.1 線形計画

沈埋トンネルは沈埋函を浮上させるという施工特性から、沈埋トンネル部の平面線形は直線かできるだけ大きな平面曲線とするのがよい。縦断線形は函体の製作上沈埋トンネル部においては直線とし、継手部で所用の縦断勾配とするのがよい。

沈埋トンネル部の被覆については、土かぶり、被覆材料、船舶の投錨、沈埋函の浮き上がりに対する安全性等を勘案して1.5m以上の厚さが標準となる

2.2 構造計画

沈埋函を製作方法により分類すると、図-3 のようになる。

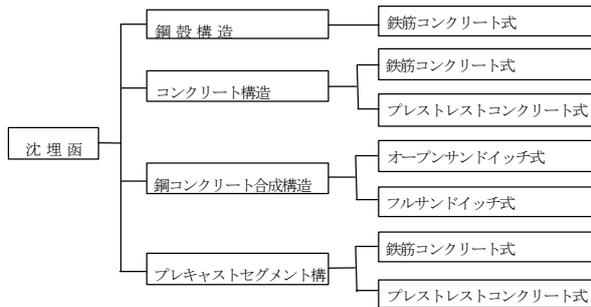


図-3 製作方法による沈埋函の分類

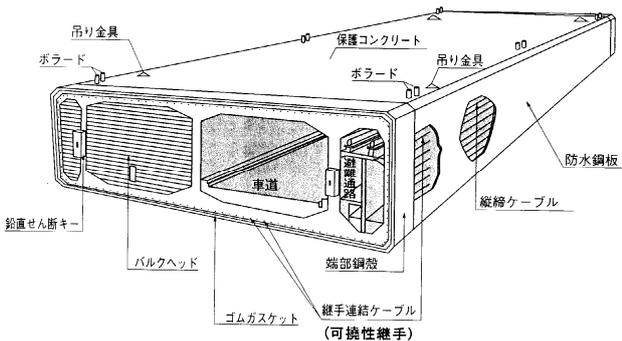


図-4 沈埋函の構造

いずれの形式もコンクリートの水密性を確保することによって表面を覆う防水鋼板を省略することができるが、セグメント間の止水性については十分に安全性を確認する必要がある。これら沈埋函の形式は種類が様々あり、設計施工上の特質がある。ちなみに、前述の新潟港（新潟みなとトンネル）はコンクリート構造（鉄筋コンクリート構造）、衣浦港（新衣浦海底トンネル）は鋼コンクリート

合成構造（オープンサンドイッチ式）、大阪港（夢洲トンネル）、北九州港（新若戸トンネル）、那覇港（臨港道路空港線）はいずれも鋼コンクリート合成構造（フルサンドイッチ式）である。

また、沈埋函の長さは耐震性、線形、製作ヤードの大きさ、航路の切り回し、沈設方法、工費等を考慮して決定される。国内では最大131.2m（川崎航路トンネル）、海外では268m（オランダHemトンネル）があるが、国内外ともに100m前後が多い。

立坑、換気所は同一構造物とするのが一般的であるが、両者を分離して設置されることもある。立坑の構造形式は、施工方式から図-5に分類される。

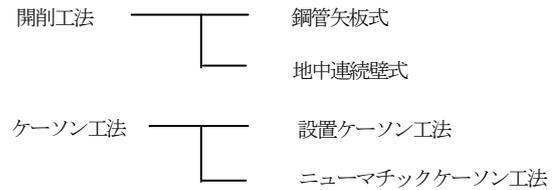


図-5 立坑構造の分類

3. 沈埋トンネルの設計・施工技術

3.1 性能設計の導入

沈埋トンネルの構造物の設計に際して、自然条件、社会条件、施工性、経済性、環境適合性などを考慮した個別の設計目的に応じて所要の性能を実現し、より具体的な構造物などの築造を図ることが必要である。このため各構造物の構造性能が求められる要求性能を満足するかどうかを数値解析、実験、あるいは限界状態設計法などで照査する。

沈埋トンネルの主な設計項目としては、沈埋函、継手、基礎、護岸処理、立坑・換気所、陸上トンネル等多くのものが挙げられる。

3.2 沈埋函

沈埋函の設計は、山岳トンネルやシールドトンネルなどの設計と異なって、函軸方向と函軸直角方向に関して行う。沈埋トンネルは函軸方向には弾性支承上の梁で函軸直角方向にはラーメン構造として設計する。

トンネルと周辺地盤の構造設計については表-1に示す性能照査型で表示し、構造部材については図-6の限界状態設計法をもとに行われる。

沈埋函を設計するうえで常時考慮する主な荷重は、土圧、静水圧及び自重であり、一般の橋梁とは異なって、自動車や鉄道車両による活荷重の影響はほとんど無視できる程度である。一般に沈埋函の設計上特に重要なのは、沈

埋函の耐震性の評価と軟弱地盤での不同沈下対策であり、従って沈埋函継手部の構造や立坑との取り付け方が問題となる。

表-1 構造設計での性能照査

項目	目標性能	照査
安定 地盤と構造物の	常時 (1)構造物の浮力に対する安定 (2)地盤の支持力に対する構造物の安定 (3)地盤の沈下に対する構造物の安定	(1)構造物の浮き上がり (2)地盤の支持力(地耐力) (3)地盤の弾性沈下、圧密沈下
	地震時 (4)地盤の収縮に対する安定 (5)地盤の変形と側方流動に対する安定	(4)過剰間隙水圧による構造物の浮き上がり (5)大変形に対する構造物の側面耐力
構造部材の性能	常時 (6)外荷重に対する耐荷性能、変形性能 (7)耐久性 (8)止水性(本本および継手) (9)トンネル管に対する安全性、復旧性	(6)発生側面力に対する側面耐力、曲り破壊先行モード、変形 (7)鋼材の腐食およびコンクリートのひび割れ、材料の劣化 (8)漏水 (9)雨水工
	地震時 (10)地震動に対する耐荷力 (11)止水性(本本および継手)	(10)発生側面力に対する側面耐力、曲り破壊先行モード (11)漏水の程度、復旧性
地盤と構造物の安定	施工時 (12)沈埋函の浮遊時～曳船時～沈設時の安定 (13)沈埋函の製作時～沈設時に作用する施工時荷重に対する耐荷性能、変形性能 (14)陸上トンネル部の施工時の安定 (15)沈埋函を陸上トンネル部に直接水圧接合する場合における施工時荷重に対する耐荷力および安定	(12)乾流流量、沈設時反支持岸の浮き上がり、曳船時の回転と沈みこみ (13)発生応力変および変形 (14)浮力が作用しない場合の地盤の支持力 (15)陸上トンネル部に発生する応力度および移動・沈下

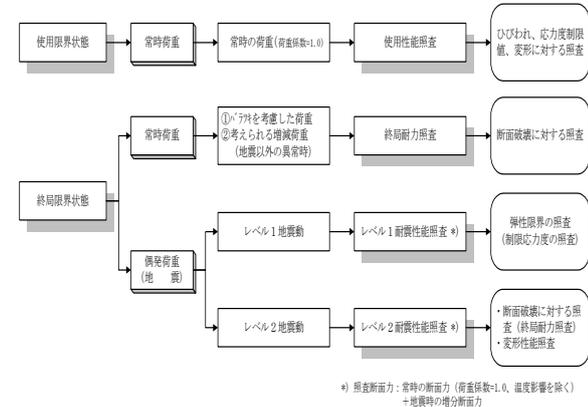


図-6 限界状態設計法での照査項目

沈埋函の製作には、従来は大規模なドライドックが必要であったが、近年は合成構造により鋼殻を既存の造船所や鋼構造物製作ヤードで組み立てられ、工費の削減や効率的な施工が図れるようになったため、我が国では合成構造による沈埋函の製作が多くなっている。

図-7 に示すような合成構造フルサンドイッチ式は、内外壁が鋼板で内部が充填コンクリートであり、鋼殻内部には鉄筋が配置されていない。

図-7 合成構造(フルサンドイッチ式)沈埋函横断面

高流動コンクリートは、スランプフローが 65cm 程度の非常に柔らかく流動性のよいコンクリートで、施工中に

材料分離が生じず鋼殻の隅々に充填できるものとしてフルサンドイッチ式沈埋函に採用されている。また、最近では、材料がより安価で、スランプフロー45cm 程度の補助的に加振により充填性を付与できる中流動コンクリートが開発されている。

3.3 継手構造

沈埋函の接合構造は、大別すると、剛継手と可撓性継手に分かれる。

剛継手は、沈埋函の鉄筋をつなぎ、コンクリートを施工して継手部の強度と剛性を確保するものである。

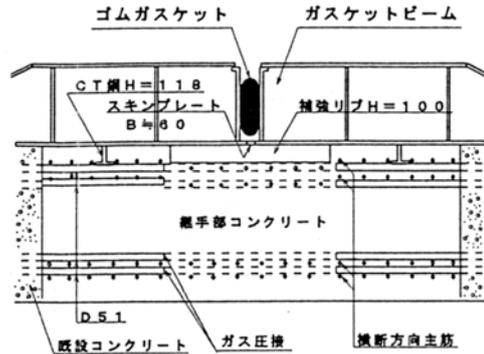


図-8 剛継手の例(川崎港海底トンネル)

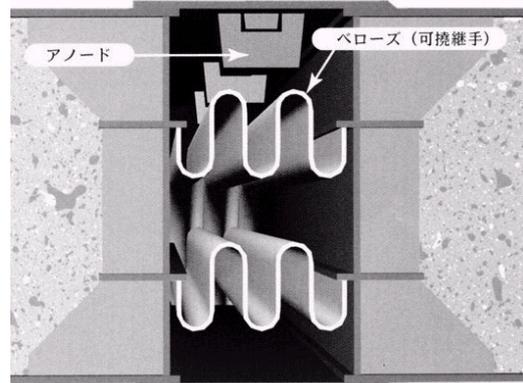


図-9 可撓性継手の例(那覇港・ベローズ継手)

可撓性継手は、回転あるいは変位を許容する継手方式で、種々の構造がある。耐震設計上や沈下対策としては理論的には可撓性継手が有利であるが、トンネル軸上の接合の場合、大きな地震時のせん断力に対し、継手部が充分耐えかつ水密性を保てるかどうか検討する必要がある。

従来からゴムガスケット等を用いて接合部で沈埋函の移動量を吸収している。那覇港では二重の波形鋼板(ベローズ)を採用し、せん断力にはベローズの高いせん断剛性で抵抗し一次止水は外側のベローズ、万一の漏水対策には内側のベローズで対処する。

また、最終函の端部では従来は水圧圧接が困難であり、水中コンクリート方式、止水パネル方式などが多く採用されてきた。近年では、新たにVブロック方式、ターミナルブロック方式などの水圧接合方式も実施されている。

3.4 大規模地震を想定した耐震設計法

一般に地中構造物は地上構造物に比して地震の影響は小さいが、沈埋トンネルは軟弱地盤下の表層の浅い位置に構築される例が多いため、地震時における地盤変位振幅の影響を大きく受ける状況下であり、また一旦被害を受けた場合の被災後の補修・補強は多大な投資が必要となる。1995年の兵庫県南部地震時においては、建設中の大阪港咲洲トンネルは換気塔と1~6号函が設置されていたが継手部のせん断キーにひび割れが生じ止水ゴムがねじれた程度で大きな変状や漏水は認められなかった。

本マニュアルにおいては、表-2に示すような考え方で地震力の作用に対して所定の耐震性能を確保できるような構造各部材の設計を行うこととしている。

レベル2に対応した設計に用いる地震応答解析法は、図-10に示すように表層地盤の地層変化や立坑と沈埋トンネルとの接合部といった構造変化箇所における応答性の違いが適切に評価できる多質点系モデルによるとしている。また、沈埋トンネル周囲が砂地盤の場合には地震時に液化化する可能性があり、液化化による沈埋函の浮き上がりや周辺地盤の移動に対する対策が必要である。

表-2 耐震設計の考え方

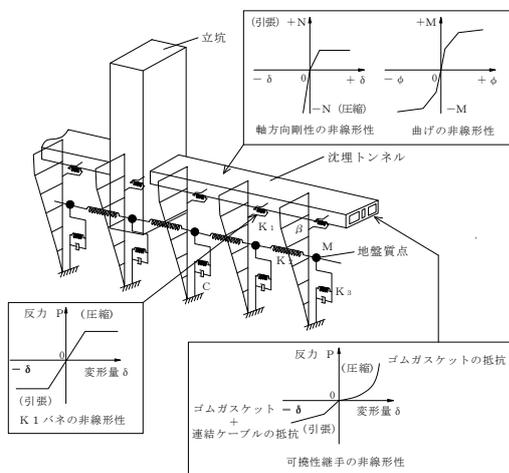


図-10 多質点系地震応答解析モデル

4. 維持管理

沈埋トンネルは、完成すると、橋梁の掛け替え工事のような大幅な改良工事は困難となる。従って、トンネル構造の安全を確認でき適切な措置が迅速にとれるよう、また交通施設として健全に機能するよう、常に監視し維持管理を行わなければいけない。このため、変位計、応力計、加速度計、沈下計などを設置して、沈埋函の位置・コンクリートのひび割れ、継手部の変形、継手部の挙動、沈下計測等を監視する必要がある。

また、沈埋トンネルの管理施設としては、換気設備、非常用設備、照明設備、排水設備、電力設備等の多くの設備が必要になり、これらの適正な管理が必要である。近年はこうした管理コストを効率化・省コスト化するために風力等自然エネルギーの活用、省エネルギーの検討も行われている。

5. おわりに

わが国における沈埋トンネル工法の技術は、本格的に採用されるようになったここ20年の短い期間に、独自の進歩を遂げてきた。上述してきたような、広大なドライドックでRCケーソン製の沈埋函を製作するドライドック方式と、鋼殻を浮上させて洋上打設する鋼殻方式がわが国の沈埋函の大きな2つの製作方法であり、両方式による沈埋トンネル工法はほぼ確立されてきた。しかし、これらは経過年数が浅いことや実際の大地震を経験していないことから、長期的な耐久性、大地震への耐震性について課題が残っている。

また、沈埋函の製作方式においても、欧州で行われているようなセグメント方式や当センターが民間企業と共同開発した押出沈埋トンネル方式（立坑付近で函体を製作し、縦断線形に沿って仮支承台上をスライドさせながら順次水中に函体を押し出して反対側の立坑に到達させ函体を完成させる方式）など、今後新たな方式による沈埋トンネルの建設も比較検討の余地がある。本年刊行される「沈埋トンネル技術マニュアル（改訂版）」を参考に、今後より経済的かつ効率的な沈埋トンネル事業が実施できるよう期待したい。

参考文献

- 1) (財) 沿岸開発技術研究センター：沈埋トンネル技術マニュアル，平成6年4月。
- 2) 清宮 理：早稲田大学構造設計清宮研究室研究報告，2001。