

## 短尺函体を用いた沈埋トンネル工法の検討

伊藤 一教\* ・片倉 徳男\*\* ・渡辺 和明\*・東江 隆夫\*\*\*  
外山 雅昭\*\*\*\*・高久 雅喜\*\*\*\*・居駒 智樹\*\*\*\*\*

従来の沈埋トンネルは、臨港部の航路横断トンネルとして数多くの実績がある。しかし、広大な函体製作ヤードが必要になること、トレンチ浚渫に伴い多量の残土処理が必要なこと、トレンチの同時浚渫範囲が広くなるため既設構造物への影響が懸念される場合があるなどの課題も有する。本研究では、短尺函体を用いることで上述の課題を克服する工法を提案する。本研究では短尺化に伴う特徴を整理し、その技術的な課題を抽出した。技術課題として水中接合方法、耐震性および施工時の波浪による動揺に着目し、実験および数値解析によって検討した。その結果、短尺函体を用いた沈埋トンネルは十分な実現性を有することが示された。

### 1. 緒 言

沈埋トンネル工法は、臨港部の航路横断海底トンネルに適用されることが多い。これは、沈埋トンネル工法が海底面下の極めて浅い部分に建設できるため、橋梁やシールドトンネルなどの工法に比べ、地上部分とのアプローチが極めて短く、背後地の利用性に優れることによる。従来の沈埋トンネル工法は、100 m 程度の鉄筋コンクリート構造やハイブリッド構造の函体を函体製作ヤードにて製作し、函体の両端部に鋼製の蓋（バルクヘッド）を設置した後、浮上させた状態で建設場所まで曳航し、事前に浚渫したトレンチに沈設し、既に沈設した函体と水圧接合することにより建設するトンネルである。この従来工法は、実績が多く一般的な工法であるが、現在の社会環境において以下の課題を有している。

1. 函体製作ヤードの縮減：広大な函体製作ヤード（ドック）を必要とするが、国内の多くの場所ではそれに適した用地の確保が困難である。
2. 環境負荷の軽減：一般に函体設置用のトレンチの浚渫土量が多い。その土砂の物性や施工上の制約から土砂の再利用が困難なことや、残土処分地を確保する必要があるなど、環境負荷が大きい場合がある。
3. 近接構造物への影響度合いの軽減：100 m 程度の函体を沈設するため、一度に浚渫する範囲が大きい。そのため、近接構造物への防護構造を必要とする場合があり、そのコスト縮減が求められる。

そこで本研究では、短尺函体を用いることで製作ヤードの縮小化、同時浚渫範囲の縮小化による浚渫残土の再利用効率の向上と近接構造物への影響軽減をはかる工法を提案する。そして、短尺化に伴う技術上の特徴を整理し、その実現性を実験および解析によって検討した。

### 2. 短尺函体を用いた沈埋トンネル工法の概要

#### (1) 本工法の特徴と施工手順

本工法は、図-1 の概念図に示すように両端のバルクヘッドが無い長さ 10~30 m の短尺函体を用いるため、広大な製作ヤードを必要としない。図-2 の施工手順に示すように、起重機船などを用いて海底のトレンチへ沈設し、ジャッキおよび接合ボルトにより既設函体と水中接合する。この工程を繰り返し、トンネル全体もしくは複数函体接合後に内部を排水して建設する。この手順において、トレンチを浚渫した後、直ちに函体を沈設、埋戻すことで、同時浚渫範囲を最小化し近接構造物への影響を低減する。また、水中接合に水圧を利用する一般的な水圧接合方式を採用しない点は、上述の施工手順とともに施工上の特徴である。さらに、浚渫土砂が仮置きに適さない物性であっても、浚渫後直ちに改良を施し埋戻すことで、残土の発生を低減することができる。また、函体内部に浮体を備えて函体の水中重量を制御するとともに、起重機船の大型化を回避することが可能である。

次に、本工法の構造上の特徴は以下のとおりである。  
縦断線形および断面形状：本工法は従来の沈埋トンネル工法と基本的に同じ縦断線形および断面形状が確保できる（図-3）。また、従来工法で函体の浮力を相殺するために必要であったバラストコンクリートが削減できる。  
継手構造：函体の短尺化により継手箇所が増加するため、継手の簡素化を図り経済性を確保する必要がある。  
耐震設計上、地盤歪の影響は複数の継手に分散され、従

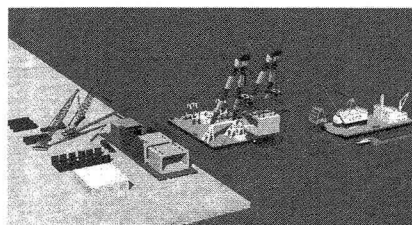


図-1 短尺函体を用いた沈埋トンネル工法概念図

\* 正会員 工 修 大成建設(株) 技術センター土木技術研究所  
\*\* 正会員 大成建設(株) 技術センター土木技術研究所  
\*\*\* 正会員 M.S 大成建設(株) 技術センター土木技術研究所  
\*\*\*\* 正会員 工 修 大成建設(株) 土木本部海洋設計技術室  
\*\*\*\*\* 博(工) 日本大学理工学部海洋建築工学科

来沈埋トンネルの止水ゴムに比べて簡素な止水ゴムで対応できる。本工法に関する一連の研究では、本工法に適した低反力高目開き追従性を有する止水ゴムの開発を実

施している。その例は図-4に示すU型止水ゴムであり、これについては別の機会に報告する。また、もう一つの継手構造として複数函体間をアンボンドPC鋼材で結合した継手構造を想定し、地震時目開きに対応する。

## (2) 技術的課題の抽出

本工法を実現するために必要な設計・施工技術を、従来の沈埋トンネルおよび海洋土木工事の設計・施工技術と照らし合せて整理した。その結果、次の技術的な課題が挙げた。①水压接合によらない水中接合技術の確立と確認。②低反力高目開き量に対応した止水ゴムと、アンボンドPC鋼材で結合することを前提とした多継手構造における継手の耐震検討と継手構造の具体化。③実施工における起重機船の動揺を考慮した沈設時の函体安定性の確認。

ここでは、水中接合技術、耐震解析技術および沈設時の函体安定性について検討した。

## 3. 水中接合方法の確認実験

本実験では、水中接合技術を確認することを目的とした大型水槽実験を実施した。実験は縮尺が約1/6の函体を使用し、実際の施工を模擬した手順で函体の沈設・接合を行い、函体の水中誘導、函体の荷重調整(浮力調整)、ジャッキ及び接合ボルトによる水中接合の各工程について安全性・確実性を確認した。

### (1) 実験方法

実験に用いた函体はマッチキャスト方式で製作した。縦横6m、深さ4mの大型水槽には、既設函体を模擬した先行函体をあらかじめ設置した。先行函体の寸法は縦1.2m×横3.0m×高さ1.7mで、沈設を試みる沈設函体は縦3.0m×横3.0m×高さ1.7mである。沈設函体の接合面にはU型止水ゴムを模擬した止水ゴムを装着した。沈設函体内部には写真-1に示す膜構造の浮体を装着し水中重量(荷重)を調整した。

計測項目は、水中重量(荷重)、水中誘導状況(両函体の相対距離)および函体間距離である。水中重量はロードセル(荷重変換器)を用い、水中誘導状況は超音波式3次元位置計測装置により函体相対距離をモニタリングした。函体間距離はジャッキ引寄せから仮連結鋼材締結までを3台の水中距離計で詳細に計測した。

実験手順を図-5に示す。先行函体と沈設函体の相対位置は超音波式3次元位置計測装置で計測し、その結果を確認しながらクレーン操作で沈設函体を誘導し、写真-1に示したガイドロッドを先行函体に装備した仮受けガイドに落とし込んだ。次に両函体をジャッキで連結し、沈設函体を先行函体側に引寄せた。そして、仮連結鋼材と呼ぶ6本の鋼材(接合ボルト)を函体側面に3本ずつ設置し、このボルトを締結することで止水ゴムを圧縮し

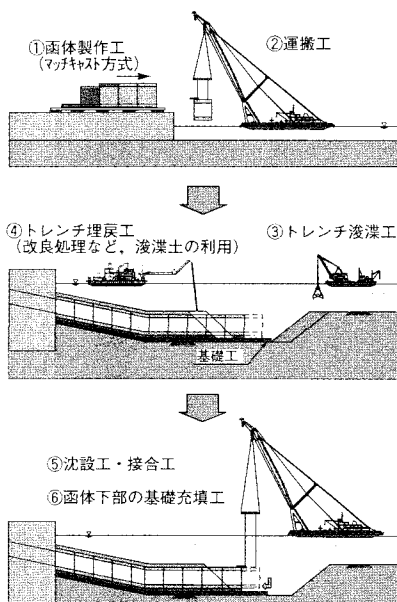
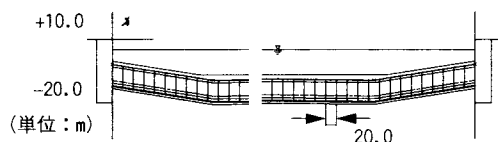
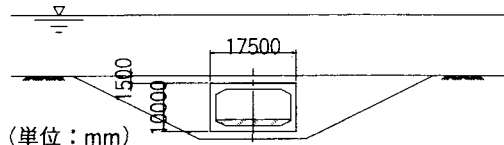


図-2 施工手順の概要



(a) 縦断面図の例



(b) 断面図の例

図-3 トンネル構造図

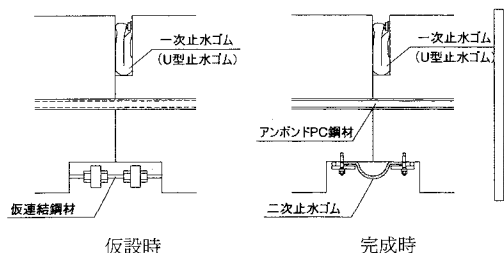


図-4 継手構造概念図

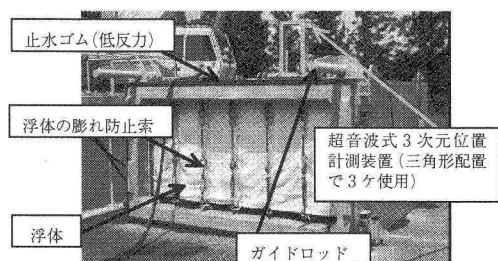


写真-1 沈設函体（浮体・計測機器儀装済）

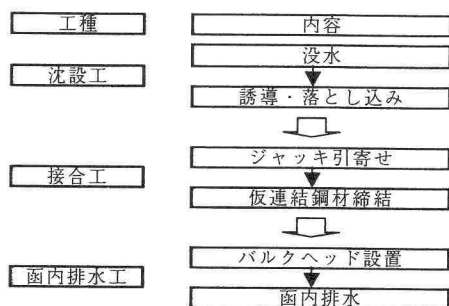


図-5 実験手順

接合した。沈設函体の誘導から接合までの過程では、沈設函体内部の浮体を制御し水中重量（荷重）を調整した。なお、図-5のバルクヘッド設置以降の手順は、仮連結鋼材による接合の確実性を確認する目的で函体内を排水するための手順である。バルクヘッドを設置し函体内を排水すると水圧接合状態になるため、締結したボルト間にスペーサーを設置し、水圧接合による影響を除去した。

## (2) 実験結果

まず、水中誘導状況を図-6に示す。図は函体の没水から誘導・落とし込みまでを対象とし、両函体の向かい合う四隅の相対距離のうちトンネル軌軸方向成分( $\Delta X$ )の変化を示す。クレーンによる誘導は超音波式3次元位置計測装置によって得られる $\Delta X$ などの情報をモニターで把握し、水槽内の状況を見ることなく実施した。図より、時間0～150sの間に沈設函体は徐々に先行函体に近づき、ガイドロッドが仮受けガイドに落とし込まれた時点(250s)で $\Delta X$ は0.37～0.39mの位置に到達した。軸直角方向( $\Delta Y$ )および鉛直方向( $\Delta Z$ )はガイドロッドに落とし込まれた時点でほぼ0mの位置に到達し、遠隔操作による水中誘導が確実に行われることを確認した。

本実験では、沈設函体に設置した膜構造の浮体により水中重量を制御した。実際の施工でも膜構造の浮体を利用することも考えられ、設計上の観点からは写真-1にある膨れ防止索から膜構造の浮体が膨らむ程度を確認する必要がある。そこで、有限要素法で膜構造浮体の膨ら

みを解析し、浮力の予測値を算出した。そして、実測した水中重量から浮力を算定し比較した。両者の誤差は1.1%以内と小さく、浮体の膨らみを含めた事前設計が可能であることを確認した。

次に、ジャッキによる引寄せ時から仮連結鋼材締結に至るまでの函体間の距離を図-7に示す。ジャッキ装着時には平均277mmの距離であるが、ジャッキ引寄せ後には平均2.6mmまで接近した。次に止水ゴムが止水性を発揮する設計全反力は40kNであるため、仮連結鋼材6本に各7kNの張力が発生するまで締結した。その結果、0.1mm以下の距離まで函体は接近し、先行函体および沈設函体のコンクリート端面が密着したと判断した。ここで、両函体の端面の構造は、図-4と同様に矩体端面が密着した時点で止水ゴムの圧縮量が最大になる構造とした。

本工法では、接合後の沈設函体は函体直下の基礎充填工（例えばモルタル充填など）が完了するまでの間、先行函体と鋼材で連結された片持状態になる。函体端面の密着度や止水性の観点からは、この状況が構造的に最も厳しい。この状況を考慮し、沈設函体の浮力を調整して函体に働く有効荷重を、気中における函体重量の10%まで変化させたが、函体間の距離に変化は生じなかった（変化が小さく計測できる範囲ではなかった）。また、函体内部を排水し、函体内側の状況を確認したが、その接合状況はマッチキャストで施工した出来形とほぼ一致しており、同時に止水も確保されていた。したがって、本方式による接合のレベルは、水圧接合と同等と判断できた。

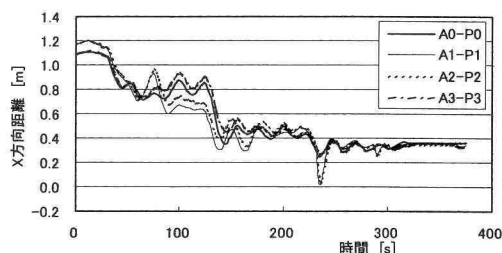


図-6 函体端面距離の経時変化

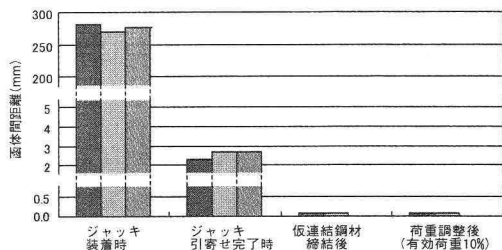


図-7 函体間距離の変化

#### 4. 地震時挙動に関する耐震検討

##### (1) 検討目的

本検討では、短尺函体による沈埋トンネル（以下、短尺トンネルと略す）の耐震性に着目し、レベル2地震動に対する従来の長尺函体を用いた沈埋トンネルとの比較解析を行い、その地震時挙動の特徴を明らかにした。

##### (2) 検討条件

過去の施工実績を参考に、図-8に示すような地盤条件、表-1に示すような各層の地盤物性値を設定した。

レベル2入力地震動は、最近の港湾空港施設の検討事例を参考とした渡辺ら（2004）の研究と同様に、八戸基盤入射波を補正最大基盤加速度  $4.86 \text{ m/s}^2$  とした。

まず周辺地盤のみを2次元FEMでモデル化し、動的変形に伴う非線形特性を修正R-Oモデルで考慮した逐次非線形解析を実施した。この解析結果より、トンネル応答解析に用いる入力地盤変位と地盤ばね値算定用の地震時地盤剛性を評価した。時刻歴応答変位法によるトンネルの応答解析では、函体連結用のPC鋼線や一次止水ゴムの配置等、短尺トンネルの構造的な特徴を考慮した図-9に示す梁-ばねモデルを用いた。なお解析では両側立坑の影響を考慮していない。これに対して従来トンネルの場合は、地盤条件や断面諸元は短尺トンネルの場合と同一とし、図-9においてPC鋼線や一次止水ゴムの要素を取り除いた梁-ばねモデル（函体長100m）を解析に用いた。また従来トンネルの継手部ばね定数は、既往の施工実績に基づいて設定した。

##### (3) 検討結果

耐震設計において重要な照査項目となる継手部目開き量の最大値分布を図-10に示す。参考としてトンネル中

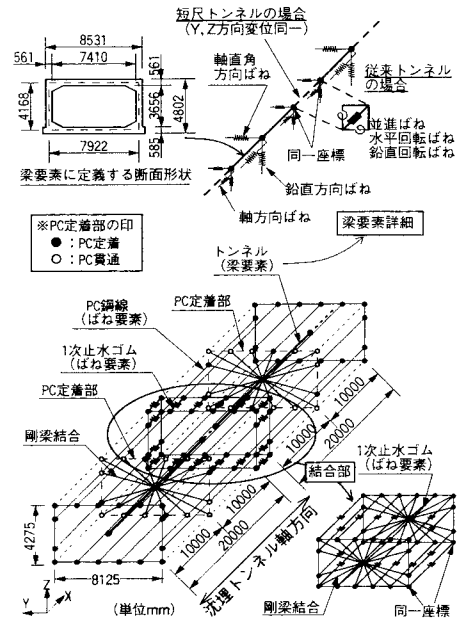


図-9 トンネル応答解析モデル

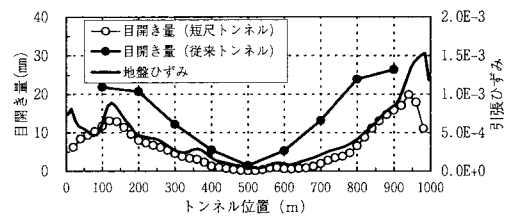


図-10 解析結果の比較

表-1 地盤物性値

| 地層   | 単位体積重量: $\gamma_s$ (kN/m <sup>3</sup> ) | せん断波速度: $V_s$ (m/sec) | ポアソン比 | 修正 R-O モデル諸元     |        |
|------|-----------------------------------------|-----------------------|-------|------------------|--------|
|      |                                         |                       |       | 基準ひずみ            | 最大減衰定数 |
| 粘性土1 | 14                                      | 100                   | 0.495 | $1.0\text{E}-03$ | 0.22   |
| 砂礫   | 17                                      | 180                   | 0.495 | $3.0\text{E}-04$ | 0.25   |
| 粘性土2 | 15                                      | 130                   | 0.495 | $1.0\text{E}-03$ | 0.22   |

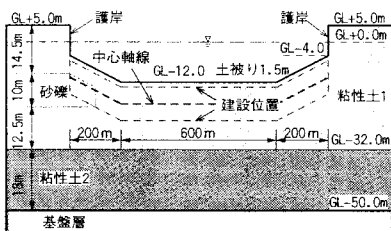


図-8 検討対象の地質縦断面図

心軸位置に生じる地盤ひずみの最大値も示す。ここで横軸はトンネル左端部を基点とした位置を表している。

周辺地盤に生じる軸ひずみ分布は、比較的整層に近い中央部で小さく、海底地形や護岸の影響を受ける両端で増加する傾向となっている。このような地盤ひずみ分布の影響を受け、各トンネルの継手部目開き量は、いずれも護岸付近の傾斜部で増加する傾向となっている。短尺トンネルの目開き量は、周辺地盤のひずみとほぼ同じ分布傾向となり、その値は従来トンネルに比べて小さくなっている。これは短尺トンネルがトンネル全体として柔構造であるため、周辺地盤に追従した地震時変形挙動となり、結果的に周辺地盤からの作用する地震荷重が小さくなるためと考えられる。

#### 5. 施工時の函体およびクレーン船の動揺解析

##### (1) 解析方法

ここでは、施工時の函体およびクレーン船の波による動揺を検討した。施工時は来襲波が小さいため、線形理

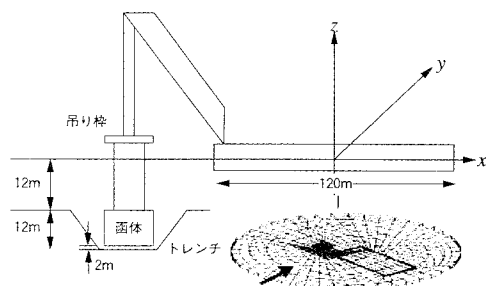


図-11 クレーン船と函体の関係および流体力算定時の計算格子

論を用いて解析した。波強制力やラディエーション流体力の解析には増田ら (1994) のハイブリッド型境界要素法を適用し周波数領域で解析した。波強制力およびラディエーション流体力の係数は2浮体の連成問題として相互干渉の影響を考慮した (居駒ら (2004))。

図-11 はクレーン船と函体の関係および流体力算定時の計算格子を示す。解析対象は、クレーン船がワイヤー、フックおよび吊杵を介して没水函体を吊っており、函体はトレンチ内に配置された状態とした。また、没水函体の内部は海水で満たされた状態とした。クレーン船は長さ 120m×幅 55m×喫水 4m で、無係留とした。没水函体は長さ 17.5m×幅 20m×高さ 10m である。吊ワイヤーおよびフックの諸元は紙面の都合上省略するが、居駒ら (2004) を参照されたい。

不規則波に対する動揺量は、クレーン船および函体の周波数応答関数に波のスペクトルを乗じて算定した。ここで、不規則波はブレッグシュナイダー・光易型スペクトルを用いた。

## (2) 解析結果

動揺解析は波の周期、波向きを変化させて検討した。その結果、クレーン船が横波を受ける条件の動揺量が大きかった。函体とクレーン船の応答関数を比較した結果、函体の動揺量はクレーン船の 1/2 以下と小さかった。これは、トレンチ内の函体は付加質量が大きく、あたかもシーアンカーのような役割を担ったためと考えられる。

図-12 は検討条件の中で函体の動揺量が最も大きい SWAY モードの動揺量を示す。このときの波向きはクレーン船に対し横波の条件である。結果は有義波高 1m 当りの値である。有義周期 9 秒までは、有義周期の増加に伴って動揺量も増加する。しかし、湾内や港内などの施工条件と想定される有義周期 4~5s までの動揺量は 0.05m 以下と十分小さい。クレーン船の動揺量を 2 倍と

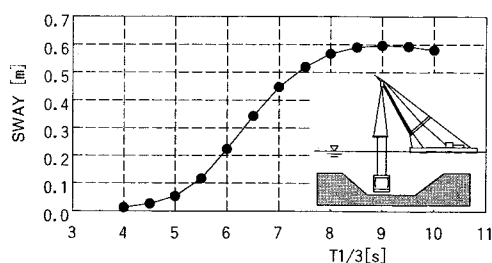


図-12 単位有義波高当たりの函体の動揺量

考えても、実海域で想定される有義周期 4~5s の条件下では小さい。したがって、湾内や港内などを想定した実際の施工において、函体およびクレーン船の波による動揺は十分小さく施工上問題ないと判断できる。

## 6. 結 論

本論では、短尺函体を用いる沈埋トンネル工法についてその特徴や位置付けを整理し、その結果から抽出した技術的課題のうち水中接合の適用性、耐震性および施工時の波による動揺に着目し、実験および数値解析により検討した。その結果、以下の結論を得た。

- ① 両端が解放された短尺函体に対し、低反力止水ゴム、ジャッキおよびボルトによって接合する方法は、水圧接合同程度の性能を発揮することを実験により確認した。
- ② 短尺函体によるトンネルは長尺函体を用いる場合に比べ、地震時の目開き量が半減し、高い耐震性能を有することが示された。
- ③ 施工時を対象にした函体およびクレーン船の波による動揺解析の結果、湾内や港内など低波浪の条件下において動揺量は小さく、施工上問題ないと判断できた。

以上のように、短尺函体を用いた沈埋トンネルは十分な実現性を有することが示された。

## 参 考 文 献

- 居駒智樹・増田光一・小林昭男 (2004): クレーン船と没水函体の波浪中連成運動方程式, 日本建築学会大会学術講演梗概集, A-2, (印刷中)
- 増田光一・居駒智樹・永井孝志 (1994): コラム・フーティング型緊張係留浮体のスプリングング応答に関する基礎的研究, 日本造船学会論文集, 第 175 号, pp. 153-173.
- 渡辺和明・上野恭宏・高久雅喜・外山雅昭・原田 慎 (2004): 短尺函体を用いた沈埋トンネルの地震時挙動に関する研究, 第 59 回土木学会年次学術講演会 (印刷中)。