

## 論文 プレキャストセグメント工法による沈埋トンネルの地震応答解析

太鼓地敏夫\*<sup>1</sup>・大野晋也\*<sup>2</sup>・清宮理\*<sup>3</sup>・横田弘\*<sup>4</sup>

**要旨：**プレキャストセグメント構造方式による沈埋トンネルは、長さ 5m 程度のセグメントを陸上で製作して、これを PC ケーブルで連結して製作する沈埋函である。本構造は、大規模地震時にセグメント間の目開きを許容することにより断面力の低減効果が期待でき、合理的な設計が可能である。本検討ではレベル 1 地震動を対象に地震応答計算を実施し、断面力と目地の目開き量を算出した。解析の結果、セグメント間の目地部に 2~5mm の目開きを許容することにより、従来の RC 一体構造に比べて断面力は大きく低減することが示された。この目開きに対しては既存のゴム止水材で対応可能であることが分った。

**キーワード：**沈埋トンネル、プレキャストセグメント構造、地震応答解析、非線形解析

## 1. はじめに

プレキャストセグメント構造方式による沈埋函は、図-1に示すように矩形セグメントを長手方向に連結して PC 鋼材で一体化した構造の沈埋函である。工費低減・工期短縮が可能な構造形式・工法であり、海外においては施工実績が増えている。

本工法を我が国に適用するに当たり、地震時のセグメント間の変位を許容することにより免震効果が期待でき、合理的な設計が可能であると考えられる。ここでは、本工法の特徴、基本構造、設計の考え方について述べた後、大規模地震動に対する地震応答解析とその結果について報告する。

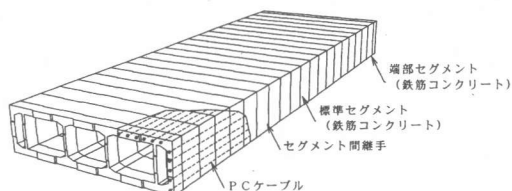


図-1 プレキャストセグメント構造沈埋函

## 2. プレキャストセグメント構造沈埋函の概要

## 2.1 特徴

図-2にプレキャストセグメント工法による沈埋函の組立・進水方法を示す。プレキャストヤードで長さ5m程度のセグメントを製作し、進水ヤードにセグメントを順次運搬、配置を行った後、軸方向に挿入した PC 鋼材にプレストレスリングを行い一体化し、全長100m程度の沈埋函を製作する。艀装完了後は、在来の沈埋函と同様に沈埋函を進水浮上させ、曳航、沈設を行う。

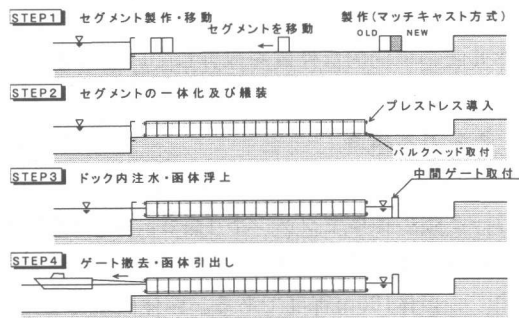


図-2 沈埋函の組立・進水方法(ドック使用の場合)

\*1 鹿島建設(株)土木設計本部プロジェクト設計部設計長 工修 (正会員)

\*2 鹿島建設(株)土木設計本部設計技術部 工修

\*3 早稲田大学教授 理工学部土木工学科 工博 (正会員)

\*4 港湾技術研究所構造強度研究室長 工博 (正会員)

プレキャストセグメント構造は、一般に以下の特徴を有している。

- ①プレキャスト方式のため、製作場所の省スペース化が図れる。
- ②合成式あるいは止水鋼板による鋼殻が不要であり、セグメントの製作、沈埋函への組立を並行に進めることができ、大幅な工程短縮が図れる。
- ③セグメント長を5m程度とすることにより、一回のコンクリートの打設で打ち継ぎなしに製作することができる。また、側壁コンクリート打設時における底版の拘束を少なくすることができ、コンクリート打設時の温度ひび割れ制御の面で大きな効果がある。
- ④函体軸方向にプレストレスを導入することにより水密性が確保でき、施工中および完成後の荷重に対し大きな強度をとれる。
- ⑤地震時には、セグメント間の目開きにより変形を吸収できるので、断面力を低減できる。
- ⑥本構造は柔構造であり、地盤沈下等による変位に対して適応性が高い。

海外においては本構造の採用実績が増えてきている。ただし、海外ではプレキャスト工法で製作するものの目地部での開きを許容させずに、本論文に示すような断面力を低減する構造的工夫は図られていない。本論文で示すトンネルの構造は、従来型の沈埋トンネルとシールドトンネルとの中間的な性質を保有しているのを特徴としている。

## 2.2 基本構造

プレキャストセグメント構造は、鉄筋コンクリート造の標準セグメント（長さ5.0m程度）および端部セグメント（長さ2.5m程度）で構成され、一函体100m程度である。函体両端部には、函体間接合用にゴムガスケットとバルクヘッドを装着し、この函体同士を接合することで、沈埋トンネルが構築される。

各部の基本構造について以下に示す。

### (1) セグメント

セグメント製作にはマッチキャスト方式を採

用する。マッチキャスト方式とは、既に製作されたセグメントの端面を型枠とし、新しいセグメントのコンクリートを打設・製作する方式で、新旧セグメントの継ぎ目形状が完全に一致した鉄筋コンクリート構造となる。

### (2) PCケーブル

PCケーブルは、コンクリートとの付着性からボンドタイプ、アンボンドタイプに分けられる。アンボンドタイプでは、セグメントに設置したシース管内に、ポリエチレン被覆タイプのアンボンドPCケーブルを挿入し、函体両端部にて定着する。シース内は防錆材を充填する。

### (3) セグメント間継手

セグメント間に生じる圧縮力はコンクリート、引張力はPCケーブルで負担し、せん断ずれに対してはコンクリートのせん断キーで抵抗する構造とする。またシールドトンネル同様に、止水ゴムをセグメント間に装填し止水性を確保する。

## 3. トンネル縦断方向の耐震検討

### 3.1 解析対象

比較的軟弱な表層地盤で構成されている区域に建設される沈埋トンネルを解析の対象とする。図-3に対象とする沈埋トンネルの断面図を、図-4に縦断面を各々示す。

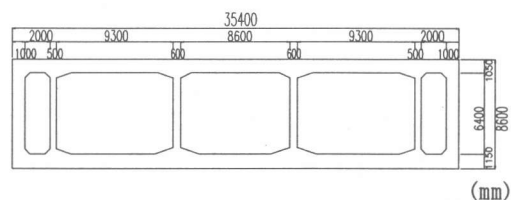


図-3 沈埋トンネル断面図

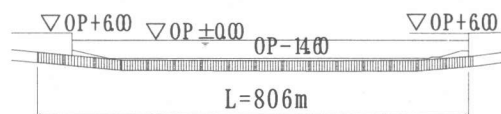


図-4 沈埋トンネル縦断面図

沈埋トンネル部の全長は 806mで、1 函 100 m位のエレメント 8 函で構成されており、沈埋部の両端には立坑が設置されている。

### 3.2 検討条件

#### (1) 地震動レベルと目標とする耐震性能

「港湾の施設の技術上の基準・同解説」<sup>1)</sup>に従って、再現期間を75年とするレベル1地震動に対して、施設の健全な機能を損なわないものとして検討する。重要な港湾施設に対してはレベル1およびレベル2地震動を対象に設計を行うが、ここではレベル1で断面が設定されたことから、レベル2の地震動の計算は省略する。レベル1地震動に対しては、従来の許容応力度法に準じて、部材への計算される応力度の制限によって設計を行う。具体的な照査方法を以降に示す。

また、レベル2地震動に対してはPCケーブルの破断、コンクリートの圧壊等を照査する。ただし、多少の漏水は許容するものと、目地の開き量は許容値を超えても良いものとする。地震後は、プレスト力により目地は再度閉じると考える。

#### (2) 使用材料

使用材料の仕様は以下のとおりとする。

コンクリート：

普通コンクリート

設計基準強度  $f'_{ck}=40 \text{ N/mm}^2$

曲げ圧縮応力度の制限値(常時)  $\sigma_{ca}=14 \text{ N/mm}^2$   
(地震時)  $\sigma_{ca}=21 \text{ N/mm}^2$

PC鋼材：

SWPR7B 12S15.2, 188 本

引張強度  $P_u=3,130 \text{ kN/本}$

降伏強度  $P_y=2,660 \text{ kN/本}$

引張力の制限値 (常時)  $P_a=1,878 \text{ kN}$   
(地震時)  $P_a=2,191 \text{ kN}$

有効プレストレス力  $1570\text{kN/本} \times 188 \text{ 本}$

#### (3) 照査方法

地震時における沈埋トンネルの縦断方向の耐震性照査は、函体コンクリート、セグメント間継手および函体間継手について行う。

函体コンクリートおよびセグメント間継手の照査は下式により行う。なお函体間継手の照査は、従来構造における方法と同様に行う。

函体コンクリート応力度の照査  $\sigma_c < \sigma_{ca}$

セグメント間目開き量の照査  $\delta < \delta_a$

PCケーブル引張力の照査  $P < P_a$

ここに、

$\sigma_c$  : コンクリートに生じる圧縮応力度

$\sigma_{ca}$  : コンクリートの圧縮応力度の制限値  
(設計圧縮強度の 1/3 程度)

$\delta$  : セグメント間の目開き量

$\delta_a$  : 止水材の性能から決まる目開き量の制限値(シールドトンネルに用いられる止水材の実績及び止水試験結果<sup>2)</sup>より 5mm 程度を設定)

$P$  : 初期緊張力と地震時引張力によって PC 鋼材 1 本当りに作用する引張力

$P_a$  : PC 鋼材の地震時引張力の制限値  
(降伏強度の 85% 程度)

### 3.3 解析手法および解析モデル

#### (1) 解析方法

トンネルの縦断方向の耐震検討は、トンネル軸線に沿った地盤の変形を構造物モデルに作用させる非線形時刻歴応答変位法により行う。解析フローを図-5に示す。

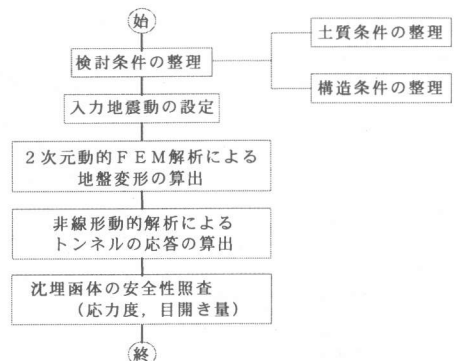


図-5 縦断方向の耐震解析フロー

#### (2) 入力地震動

入力地震動は港湾施設でレベル1の地震に用いられる、1968年十勝沖地震における八戸港

観測記録波形とする。入力基盤面での地震動波形を図-6に示す。

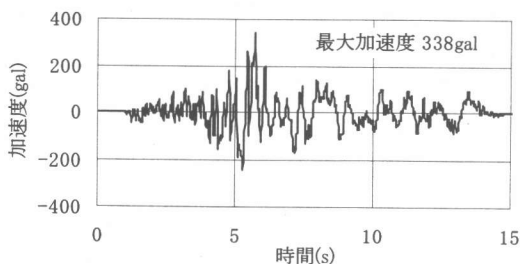


図-6 設計地震動

### (3) 表層地盤の解析モデル

表層地盤の等価線形動的FEM解析を行い、トンネル位置での時刻歴応答変位波形を算出する。図-7に解析モデル図を示す。表層地盤は軟弱な沖積粘土砂層の互層になっており、-78m以深が洪積層となり、この面を入力基盤面とした。

解析は、トンネル軸方向および軸直角方向の二方向に対してそれぞれ独立に行う。

### (4) トンネルの解析モデル

図-8に沈埋トンネル解析モデルを示す。表層地盤の応答解析より得られた、トンネル位置での地盤応答変位波形を、構造物・地盤をモデル化した二次元平面フレームモデルに地盤バネを介して作用させ、トンネル全体系の材料非線形動的解析を行う。解析コードは複合非線形フレーム解析システムSLAP<sup>3)</sup>である。

アンボンドタイプのプレキャストセグメント構造を想定し、コンクリート躯体はファイバーモデルを用いた梁要素、PC鋼材は軸力のみを受け持つトラス要素とする。コンクリートの非線形特性は引張強度をゼロとし、図-9に示す

プレストレス力はPC鋼材に初期ひずみを与

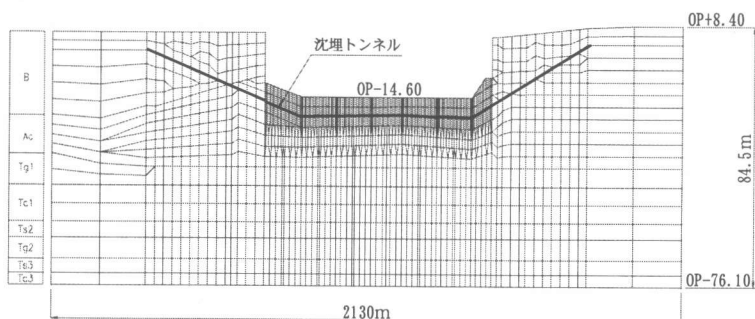
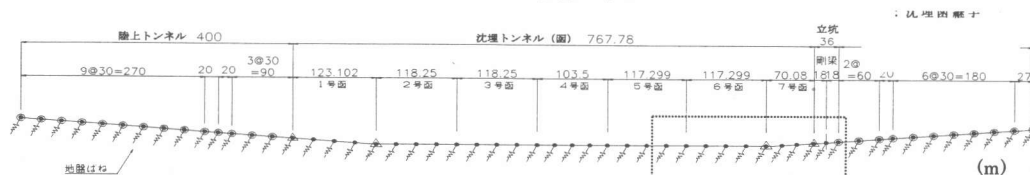
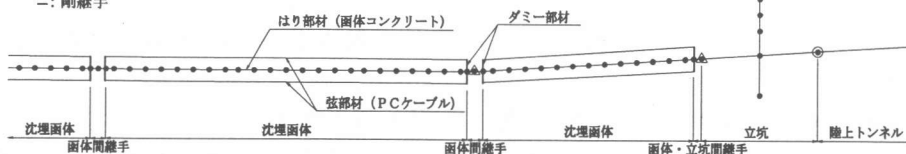


図-7 地盤解析モデル



- : 節点 (セグメント中心位置)
- : スリッパ継手
- △: 可撓継手
- : 剛継手



A部詳細図  
図-8 トンネルの解析モデル

えて評価する。外力によるセグメント間の目開きは、コンクリートのひび割れがセグメント間継手部に集中すると考えて、下式により算出する。

$$\delta = \varepsilon \times l \quad (1)$$

$\delta$  : セグメント間の目開き量

$\varepsilon$  : セグメント間に生じる引張ひずみ

$l$  : セグメント長(5.0m)

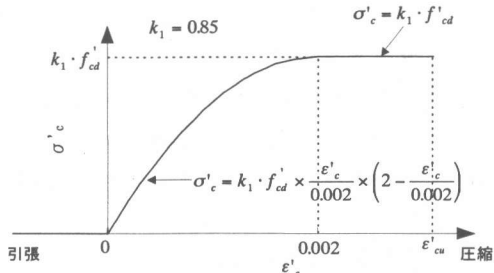


図-9 コンクリートの応力-ひずみ関係

陸上トンネル・立坑コンクリート躯体は、今回沈埋部を対象としていることから、全断面を有効とする線形の梁要素とする。

陸上トンネル部に用いる継手構造は、スリッパ方式の伸縮継手構造とし、線形のばね要素に置換する。

立坑部とトンネルの接続部、そして縦断勾配が大きく変化する1号函と2号函の間、6号函と7号函の間は、変形が大きくなるためゴムガasket+PCケーブル方式の可撓性継手とし、この継手を材料非線形ばね要素に置換する。

地盤ばねは等価線形ばねとし、各節点毎に設ける(陸上トンネル部: 20~30m間隔, 沈埋トンネル部5m間隔)。このばね定数は別途行った静的有限要素より計算した。

### 3.4 耐震解析結果

軸方向加振時の最大軸力分布を図-10 に示す。これにより、部材に作用する軸力が圧縮側にシフトしており、引張力が小さくコンクリートにとって有利な断面力の状況となっている。

最大曲げモーメント発生時の曲げモーメント図を図-11 に、最大曲げモーメントが発生して

いる部材での曲げモーメント(M)-曲率( $\phi$ )関係を図-12 に示す。これらの図には、比較のために従来のRC一体構造とした場合の結果も示してある。

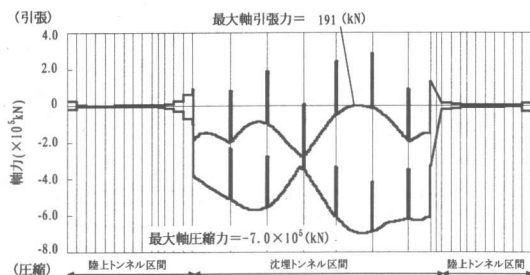


図-10 最大軸力分布(軸方向加振)

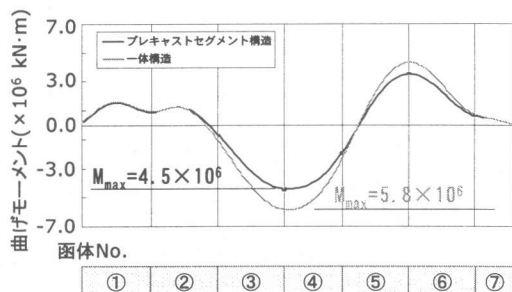


図-11 曲げモーメント図

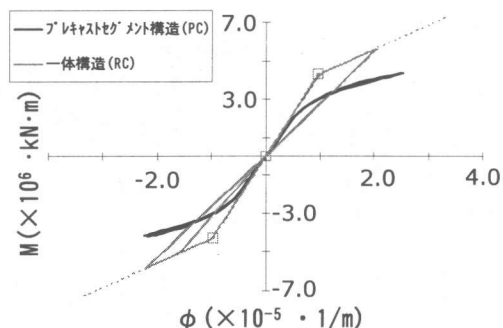
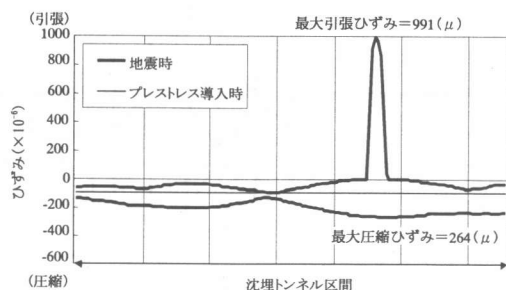


図-12 曲げモーメント(M)-曲率( $\phi$ )関係図

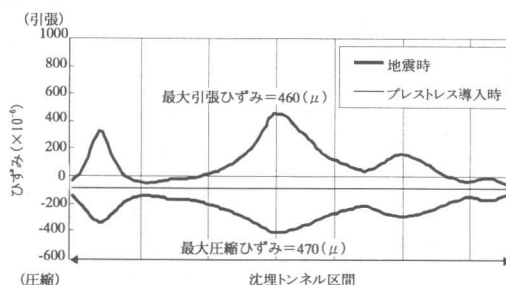
本構造形式は一体構造と比較した場合、従来のRC一体構造に比べて曲げモーメントが2割低減、曲率が2割増加していることが確認できる。

セグメント継手間に生じる最大ひずみ分布

を図-13に、耐震性の照査結果を表-1にそれぞれ示す。P C鋼材をアンボンドタイプとしているため、引張ひずみが一箇所に集中することが分かる。各応答値は3.2で設定した制限値内である。



(a) 軸方向加振



(b) 軸直角方向加振

図-13 最大ひずみ分布

表-1 照査結果

|                                              | 軸方向<br>加振 | 軸直角<br>方向加振 | 目標とする<br>制限値 |
|----------------------------------------------|-----------|-------------|--------------|
| コンクリート応力度<br>$\sigma_c$ (N/mm <sup>2</sup> ) | 8.0       | 12.3        | 21           |
| P C鋼材引張力<br>P (kN/本)                         | 1,657     | 1,687       | 2,192        |
| 目開き量<br>$\delta$ (mm)                        | 4.8       | 2.2         | 5.0          |

また、目開き量は2～5mm程度であり、大きな値とならず、既存のゴム止水材で対応可能であることが判った。

#### 4. まとめ

プレキャストセグメント構造沈埋函を対象に地震応答解析を実施した。その結果、セグメン

トのコンクリート応力度およびP C鋼材引張力は目標とする制限値以下となることが示された。また、セグメント間の目地の目開き量は2～5mm程度であり、既存のゴム止水材で十分対応可能な値であった。このことから、新しい構造コンセプトであるプレキャストセグメント構造沈埋函は、耐震性の上から充分採用可能であることが判明した。

今後、以下の課題について継続的に検討を進めていく予定である。

##### (1) セグメント長

セグメント長5mとして所定の安全性が満足できることを確認したが、現場での施工性・工期・工費の面から最適なセグメント長を設定する必要がある。

##### (2) P Cケーブルの仕様

ボンドタイプかアンボンドタイプかなど、耐震性・地盤沈下等の条件を考慮して、適切なP C鋼材の仕様を決定する必要がある。

##### (3) 地盤沈下およびレベル2地震動に対する検討

今回特に言及しなかったが、レベル2地震動で断面設定される沈埋トンネルも対象として、適切なセグメント間の可撓構造およびP C導入力について検討していく必要がある。

#### 参考文献

- 1) 日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説, pp. 257-280, 1999.
- 2) 植益啓一郎, 清宮理他：P Cセグメントトンネルの継手部における止水試験, 土木学会年次学術講演会講演概要集 Vol. 55, 第6部, pp. 66-67, 2000
- 3) 沖見芳秀, 右近八郎：複合非線形フレーム解析システムの開発, 土木学会誌, Vol. 80, pp. 14-17, 1995