

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時断面力の低減効果

大野晋也¹・太鼓地敏夫²・桑原泰之³・清宮理⁴・横田弘⁵

¹正会員 工修 鹿島土木設計本部 設計技術部 (〒107-8502 東京都港区赤坂6-5-30)

²正会員 工修 鹿島土木設計本部 第一設計部 (〒107-8502 東京都港区赤坂6-5-30)

³正会員 工修 鹿島情報システム部 (〒107-8502 東京都港区赤坂6-5-30)

⁴フェロー会員 工博 早稲田大学 理工学部 (〒169-8555 東京都新宿区大久保3-4-1)

⁵正会員 工博 運輸省港湾技術研究所 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1)

プレキャストセグメント構造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地震時の免震効果が期待でき、合理的な設計が可能である。ただし常時荷重に対してはセグメント間の目開きは許容しない。概念としてはシールドトンネルと通常の沈埋トンネルの中間である。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計算し試設計を行った。試設計の結果、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、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。

Key Words : Immersed tunnel, Precast segment structure, Seismic design, Non-linear analysis,

1. はじめに

プレキャストセグメント構造沈埋函は、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。プレキャストセグメント工法は、陸上で長さ5m程度のセグメントをPC鋼材で連結して沈埋函を製作し、在来の沈埋函と同様に進水浮上させ、曳航、沈設を行う工法である。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。

本工法を我国に適用するに当り、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。

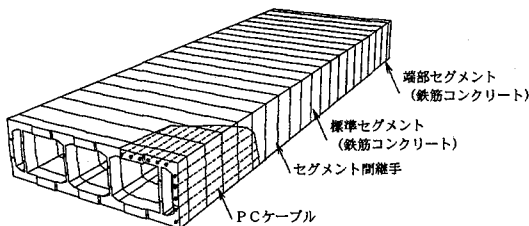


図-1 プレキャストセグメント構造沈埋函

2. プレキャストセグメント構造沈埋函の概要

(1) 特徴

プレキャストセグメント構造沈埋函とは、鉄筋コンクリート製のセグメントを、PC鋼材で一体化した構造の沈埋函である(図-1)。

プレキャストヤードでセグメントを製作し、進水ヤードにセグメントを必要個数運搬、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ングを行い一体化する。艀装完了後は、在来の沈埋函

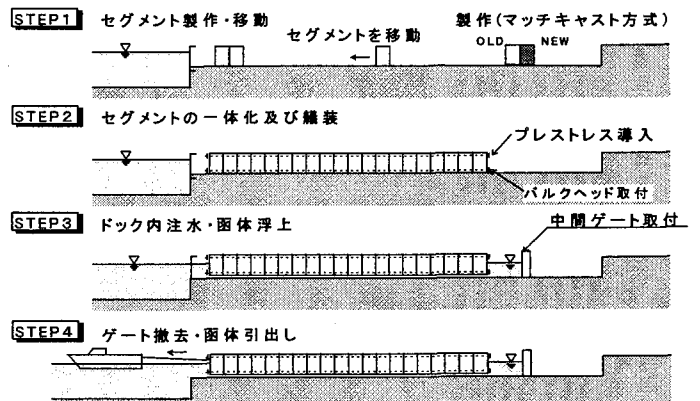


図-2 沈埋函の組立・進水方法(ドック使用の場合)

と同様に沈埋函を進水浮上させ、曳航、沈設を行う(図-2)。

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、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、施工中及び完成後の荷重に対して十分な耐力を有する。
- 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。
- ⑥本構造は柔構造であり、地盤沈下・変位に対して適応性が高い。

表-1に示すように、海外においては本構造による実績が増えている。ただし、本論文に示すような断面力を低減する構造的工夫にはなっていない。

(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)、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。

a) 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。

b) 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。

c) 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、止水ゴムを装填し止水性を確保する。

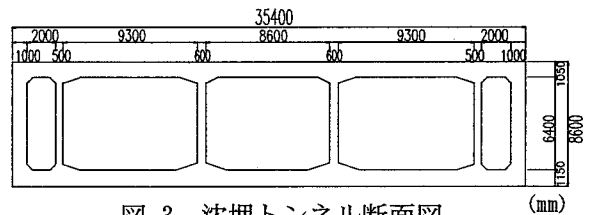


図-3 沈埋トンネル断面図 (mm)

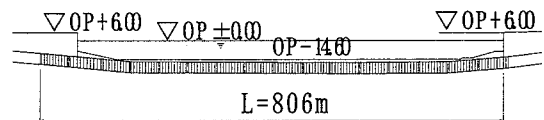


図-4 沈埋トンネル縦断面図

表-1 プレキャストセグメント構造沈埋函の実績

No.	トンネル名称	内空構成	国名/県名	断面形状			沈埋トンネル長			完成年
				形状	高さ(m)	幅(m)	エレメント長(m)	エレメント数(基)	沈埋区間長(m)	
1	Durban	下水道	南アフリカ	円形	4.6	4.6	43~52	5	237.3	1957
2	Syphon under the Nile	サイフォン	エジプト	長方形	4.4	3.8	41~57	9	464	1964
3	Marsden	取水路	ニュージーランド	円形	2.0	2.0	36	-	-	1967
4	Rhein	水路	オランダ	長方形	2.9	8.9	132	1	132	1973
5	Hollandsch Diep	ハイクライン	オランダ	円形	4.7	4.7	60	27	1,627	1973
6	Odense	温水トンネル	デンマーク	長方形	2.7	3.1	90	1	90	1974
7	Oude Mass	ハイクライン	オランダ	円形	4.7	4.7	60	8	485	1975
8	洞海湾	ガス管	福岡県	円形	3.2	3.2	45 27	9 1	434	1977
9	Pulau Seraya	電力ケーブル	シンガポール	長方形	3.7	6.5	100	26	2,600	1987
10	Tuas	送電線用	シンガポール	長方形	4.4	11.8	100	21	2,100	1998
11	Drogden	鉄道・道路	デンマーク スウェーデン	長方形	8.5	42.0	175.2	20	3,510	2000

3. トンネル縦断方向の耐震検討

(1) 解析対象

比較的軟弱な表層地盤で構成されている港湾区域に建設される沈埋トンネルを対象とする。図-3に対象とする沈埋トンネルの断面図を、図-4に縦断面を示す。

(2) 検討条件

a) 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」¹⁾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設計する。具体的な、許容値及び照査方法を以降に示す。

b) 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 $f'_{ck} = 40 \text{ N/mm}^2$

許容曲げ圧縮応力度(長期) $\sigma_{ca} = 14 \text{ N/mm}^2$

(短期) $\sigma_{ca} = 21 \text{ N/mm}^2$

P C鋼材：

SWPR7B 12S15.2, 188本

引張強度 $P_u = 3,130 \text{ kN}$

降伏強度 $P_y = 2,660 \text{ kN}$

許容引張力 (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 $1570 \text{ kN/本} \times 188 \text{ 本}$

c) 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、セグメント間継手及び函体間継手について行う。

函体コンクリート及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 $\delta < \delta_a$

P Cケーブル引張力の照査 $P < P_a$

ここに、

σ_c : コンクリートに生じる圧縮応力度

σ_{ca} : コンクリートの許容圧縮応力度

δ : セグメント間の目開き量

δ_a : 止水材の性能から決まる許容目開き量
(シールドトンネルの実績より5mm程度を設定)

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

P_a : P C鋼材の地震時許容引張力

(3) 解析手法及び解析モデル

a) 解析方法

トンネルの縦断方向の耐震検討は、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

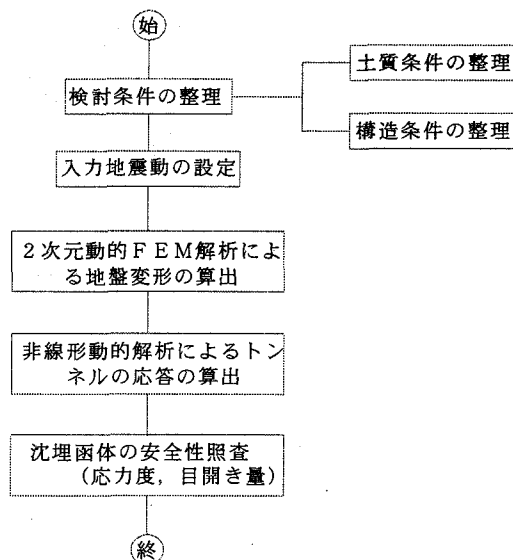


図-5 縦断方向の耐震解析フロー

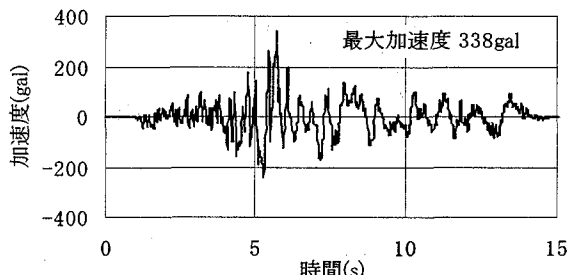


図-6 設計地震動

により行う。解析フローを図-5に示す。

b) 設計地震動

設計地震動は港湾施設での実績の多い、1968年十勝沖地震における八戸港観測記録を入力波形とする。設計地震動波形を図-6に示す。

c) 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。解析は、トンネル軸方向及び軸直角方向の二方向に対してそれぞれ独立に行う。

d) トンネルの解析モデル

図-8に解析モデル図を示す。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SLAP²⁾を用いる。

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、P C鋼材は軸力のみを受け持つ弦要素とする。コンクリートの非線形特性は図-9を考慮する。

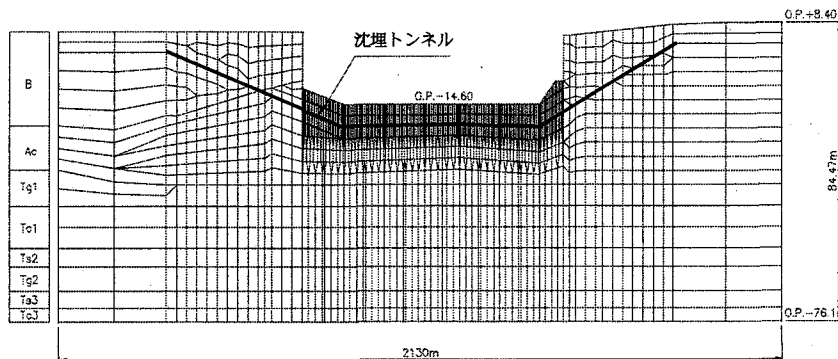


図-7 地盤解析モデル

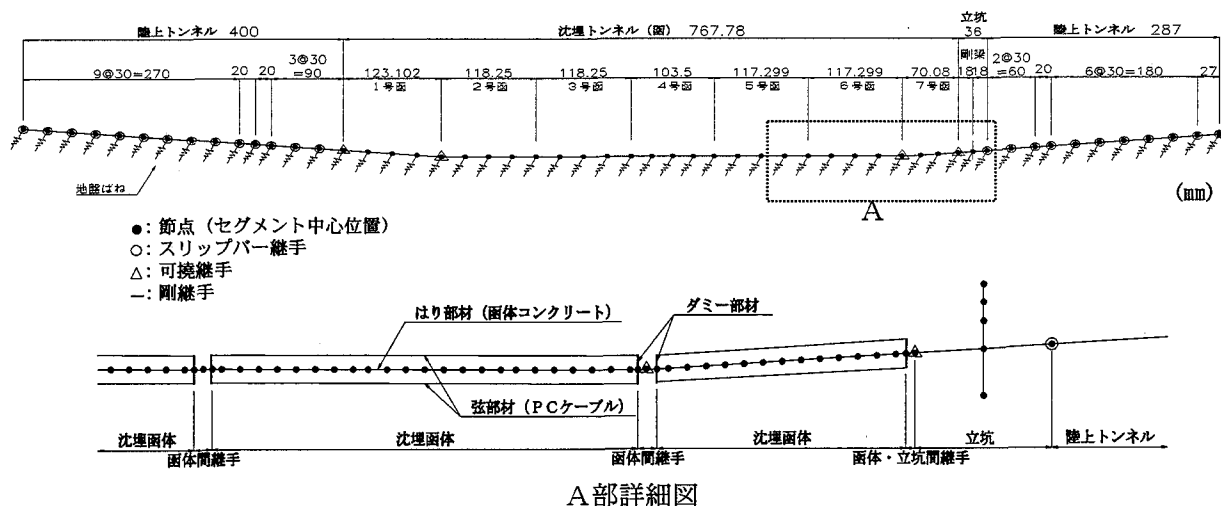


図-8 トンネルの解析モデル

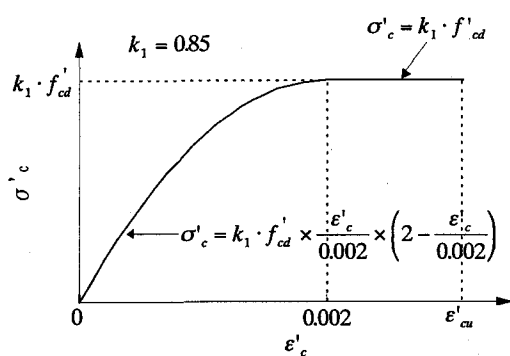


図-9 コンクリートの応力-ひずみ関係

プレストレス力はPC鋼材に初期ひずみを与えて評価する。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。

$$\delta = \varepsilon \times l$$

δ : セグメント間の目開き量

ε : セグメント間に生じる引張ひずみ

l : セグメント長 (5.0m)

陸上トンネル・立坑コンクリート躯体は、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、線形のばね要素とする。沈埋トンネル部、陸上トンネル部、及び立坑部の接続部、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スケット+PCケーブル方式の可撓性継手とし、非線形ばね要素とする。

地盤ばねは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)。

(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、本構造形式が非常に有効であることが確認できる。

軸直角方向加振時の最大曲げモーメント分布を図-11に示す。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。比較のために、従来のRC一体構造とした場合のM-phi関係を、断面解析から求めて併記した。本構造形式は一体構造と比較した場合、同一の曲げ曲率に対して、曲げモーメントが低減して

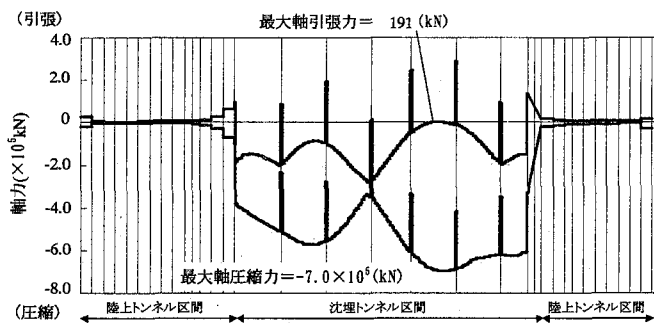


図-10 最大軸力分布
(軸方向加振)

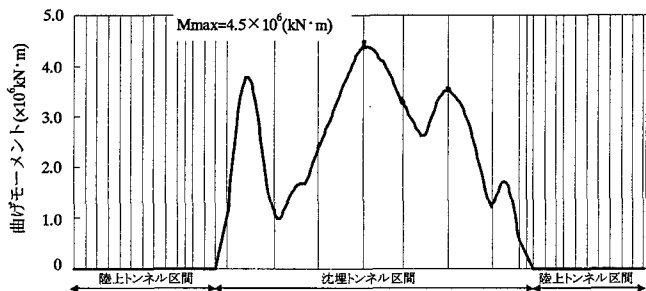


図-11 最大曲げモーメント分布
(軸直角方向加振)

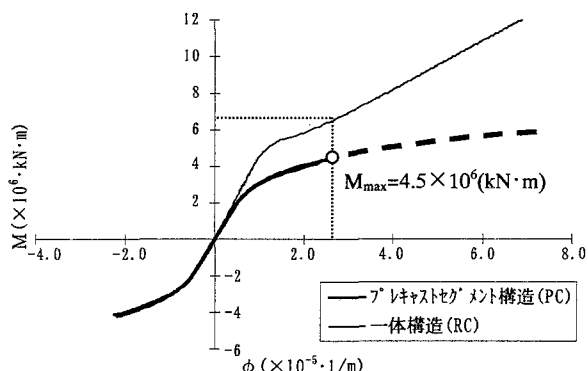


図-12 曲げモーメント(M)～曲率(phi)関係

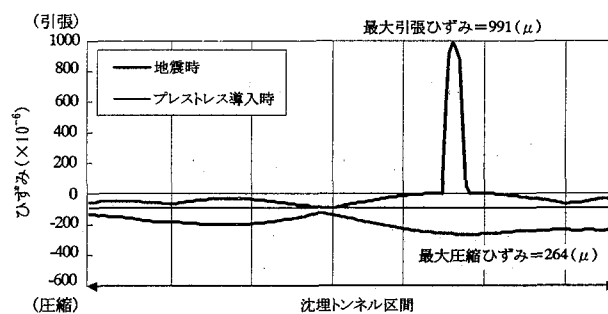
いることが確認できる。

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-2にそれぞれ示す。各応答値は設定した許容値内である。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。

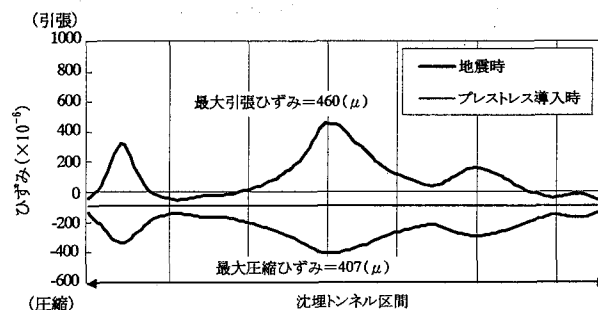
4. まとめ

プレキャストセグメント構造沈埋函の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及びPC鋼材引張力は許容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、大きな値とならず、既存のゴム止水材で対応可能である。

今後以下のように、課題について継続的に検討を進めていく予定である。



(a) 軸方向加振



(b) 軸直角方向加振

図-13 最大ひずみ分布

表-2 照査結果

	軸方向加振	軸直角方向加振	許容値
コンクリート 応力度 σ_c (N/mm ²)	8.0	12.3	21
PC鋼材引張力 P (kN/本)	1,657	1,687	2,192
目開き量 δ (mm)	4.8	2.2	5.0

(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、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) PC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PC鋼材の仕様を決定する必要がある。

(3) 地盤沈下及びレベル2地震動に対する検討

地盤沈下及びレベル2地震動に対して、適切なセグメント間の可撓構造、及びPC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，1999。
- 2) 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

Study on the structural safety of precast segment immersed tunnel during earthquake

Shinya Ohno, Toshio Taikoji, Yasuyuki Kuwahara, Osamu Kiyomiya, Hiroshi Yokota

Precast segment immersed tunnel comprises elements prestressed by PC tendons and each element consists of several precast segments. In this study, in order to reduce stress due to longitudinal ground motions during severe earthquakes, the joints between segments were allowed to open up. Non-linear seismic response analysis was conducted. The results show that segments and PC tendons are safe during severe earthquake and that openings of the joints are small enough to be resisted by using common rubber water stops.