

柔構造式プレキャストセグメント構造沈埋函, PPST

岩村 栄世

沈埋工法とは、海底トンネル等を建設する工法の一つで、ドック等の陸上製作ヤードにて製作された長さ100m前後の函体を、基礎工事の終了した計画地点まで曳航し、沈設・接合を繰返ししながらトンネルを構築していく技術である。

沈埋工法のなかの柔構造式プレキャストセグメント構造沈埋函(PPST)とは、工場製作された長さ5m前後の矩形セグメントを、長手方向に複数個連結・一体化して沈埋函の函体を製作する技術で、地震や軟弱地盤に伴う変位・沈下・ねじれという我が国独自の自然条件に対応するため、セグメント間が自由に変形するように開発された新しいタイプの沈埋函製作技術である。ここでは、この柔構造式プレキャストセグメント構造沈埋函(PPST)の概要について紹介する。

キーワード：沈埋トンネル、プレキャストセグメント構造沈埋函、柔構造、PC鋼材、地震、変位、沈下、不等沈下、ねじれ

1. はじめに

世界初の沈埋工法による工事は、1906年米国ミシガンセントラル鉄道のデトロイト河底トンネルといわれ、我が国初の本格的工事は、1964年に建設された首都高速道路海老取川トンネル工事とされている。

沈埋函の函体構造は、時代のニーズと技術の進歩に伴い鋼殻構造、コンクリート構造、鋼コンクリート合成構造等さまざまな構造形式に発展し、最近、海外では工場製作された矩形セグメントを、長手方向に複数個連結・一体化して函体とす

るプレキャストセグメント構造も大型沈埋トンネルに採用されるようになってきた(表-1参照)。

一般に、プレキャストセグメント構造沈埋函は、陸上製作ヤードで製作された鉄筋コンクリート製セグメントを、ドック等の進水ヤードに搬入し、そこで軸方向に挿入したPC鋼材にてプレストレスを導入し一体化する(図-1参照)。

艀装完了後は、従来の沈埋函と同様に進水ヤードに海水を注水し、函体を浮上させた後曳航、沈設・接合を繰返ししながら沈埋トンネルを構築していく(図-2参照)。

しかし、ドック等の進水ヤードのない地域においては、半潜水式台船上にセグメントを搬入し、

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)	函体長(m)	函体数	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	パイプライン	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	パイプライン	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

*175.2 m/函=22 m/セグメント×8 セグメント

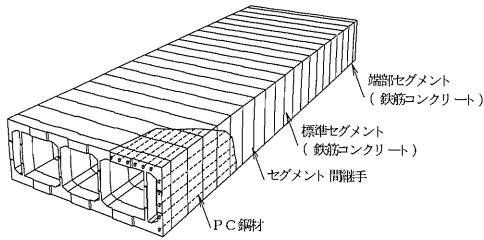


図-1 プレキャストセグメント構造沈埋函

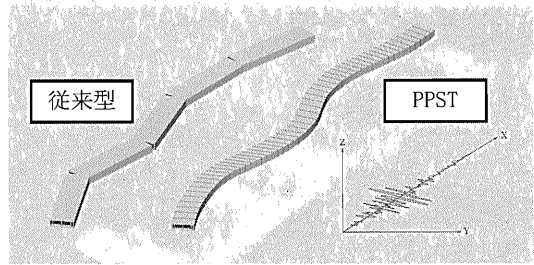


図-3 沈埋函の変形特性

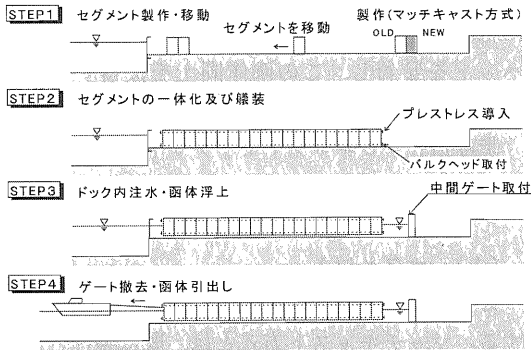


図-2 沈埋函の組立て・進水方法 (ドック使用の場合)

そこで組立て、そのまま沖合いまで曳航し進水させる方法も考えられている (後掲, 図-4 参照)。

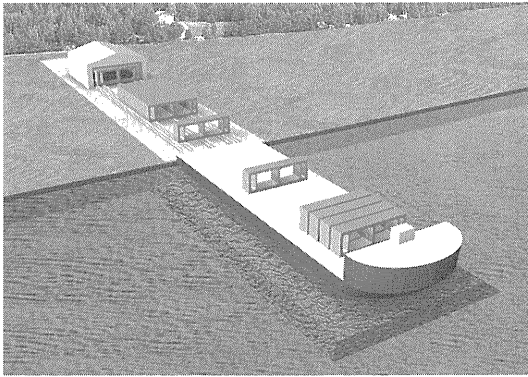
2. 柔構造式プレキャストセグメント構造沈埋函 (PPST; Partially Prestressed Pre-cast Segmental Structure for Immersed Tunnel Element) の特長

柔構造式プレキャストセグメント構造沈埋函は、鉄筋コンクリート製の標準セグメント (長さ約 5.0 m) 及び端部セグメント (長さ約 2.5 m) を組合せて、長手方向に PC 鋼材で連結、一体化した構造であり、函体の長さは通常の 100 m/函前後はもちろんのこと、設計、施工条件に応じて任意の長さに設定できる。

また、従来の沈埋函は、函体両端部に大きな変形が集中し、躯体に大きな断面力が発生するのに対し、柔構造式プレキャストセグメント構造沈埋函は、軸方向に細かくセグメント化された構造となるため、変形を分散、吸収し、発生断面力を低減することができる (図-3 参照)。

柔構造式プレキャストセグメント構造沈埋函の特長は以下のとおりである。

- ① 耐震性・地盤沈下追随性の向上
 - ・従来型では、函体両端部に大きな変形が集中し、躯体に大きな断面力が発生する。
 - ・軸方向に細かくセグメント化された柔構造となるため、沈下、ねじれ等の変形を分散・吸収し、発生断面力を低減する。
- ② 函体の品質向上
 - ・セグメント長が 5 m 程度であることから、打継ぎなしの 1 回のコンクリート打設で製作可能であり、側壁コンクリート打設時の底版拘束力も少なく、打継ぎ目、ひび割れの少ない良質なセグメントが製作できる。
 - ・函体軸方向にプレストレスを導入することにより、水密性と耐久性が向上する。
 - ・プレキャスト化により工場製作と同様な良質な環境のもとで、止水性、耐久性の優れた良質なセグメントを製作することができる。
- ③ コスト低減、工期短縮
 - ・良質なセグメントを製作することで函体外部を覆う防水鋼板を不要にすることができ、大幅なコストダウンが可能となる。
 - ・函体間継手部を剛構造とすることで従来型の沈埋函のような端部鋼殻が不要となる。
 - ・PC 橋梁と同様なプレキャストセグメント工法の導入により、セグメント製作と沈埋函組立てが並行作業となり、函体製作工期の短縮が図れる。
 - ・シールドトンネルと同様な設計手法を導入することにより、セグメント間の目開きを許容し、発生断面力を小さくして必要鋼材量を低減することができる。
- ④ 製作場所の省スペース化、ドックの不要化
 - ・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。



図—4 沈埋函の組立て、進水方法（半潜水式台船使用の場合）

- 陸上製作ヤードにて製作したセグメントを半潜水式台船上に搬入し、そこで組立てと艀装を行った後、沖合にて進水させることでドックがなくても製作可能となる（図—4 参照）。
- 函体がセグメントに分割されているため、現地の状況に合わせて様々な施工方法が適用できる。

3. 基本構造

柔構造式プレキャストセグメント構造沈埋函と合成構造沈埋函の比較を表—2 に示す。

1 函体 100 m の柔構造式プレキャストセグメント構造沈埋函の場合には、鉄筋コンクリート造の標準セグメント（長さ 5.0 m）19 個と端部セグメント（長さ 2.5 m）2 個から構成される。函体両端部には、函体間接合用の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できる。

柔構造式プレキャストセグメント構造沈埋函の各部の基本構造は以下のとおりである。

（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(OLD)の端面を型枠とし、新しいセグ

表—2 沈埋函体の構造形式の比較

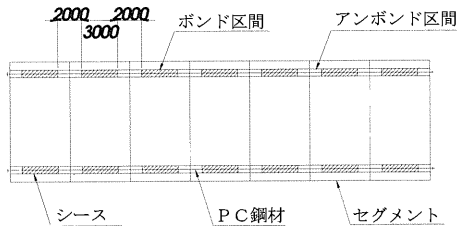
（単位：mm）

	合成構造	柔構造式プレキャストセグメント構造
函体構造	<p>断面図</p> <p>側面図</p>	<p>断面図</p> <p>側面図</p>
函体間継手	<p>可換性継手</p>	<p>剛継手（函体接合後）</p>
セグメント間継手	—	<p>マッチキャスト方式 ドライジョイント</p> <p>a 部</p> <p>a 部詳細</p>

メント(NEW)のコンクリートを打設する方式で、新旧セグメントの継目形状が完全に一致した鉄筋コンクリート構造となる(後記、図—6 参照)。

(2) PC 鋼材

PC 鋼材は、コンクリートとの付着性からボンドタイプとアンボンドタイプがある。アンボンドタイプは、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 鋼材を挿入し、函体両端部で定着する。この場合は、ある部分に目開きが集中するので注意を要する。目開きを分散させたい場合には、ボンドタイプとし、部分的にアンボンド区間を設けて自由長を確保し、目開きを分散させる(図—5 参照)。



図—5 アンボンド区間の配置

(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、

引張り力は PC 鋼材で負担し、せん断ずれに対してはコンクリートのせん断キーにて抵抗する。またシールドトンネルと同様に、止水ゴムを装填し止水性を確保する。

(4) 函体間継手

変形性能を持つセグメント間継手により、函体自体が柔構造化されるため、函体間継手は場所打ち鉄筋コンクリートにより剛構造とする。トンネル線形、地盤条件の急変部、立坑接続部のような大きな相対変位が生じる箇所には、必要に応じて可撓性継手を用いる。

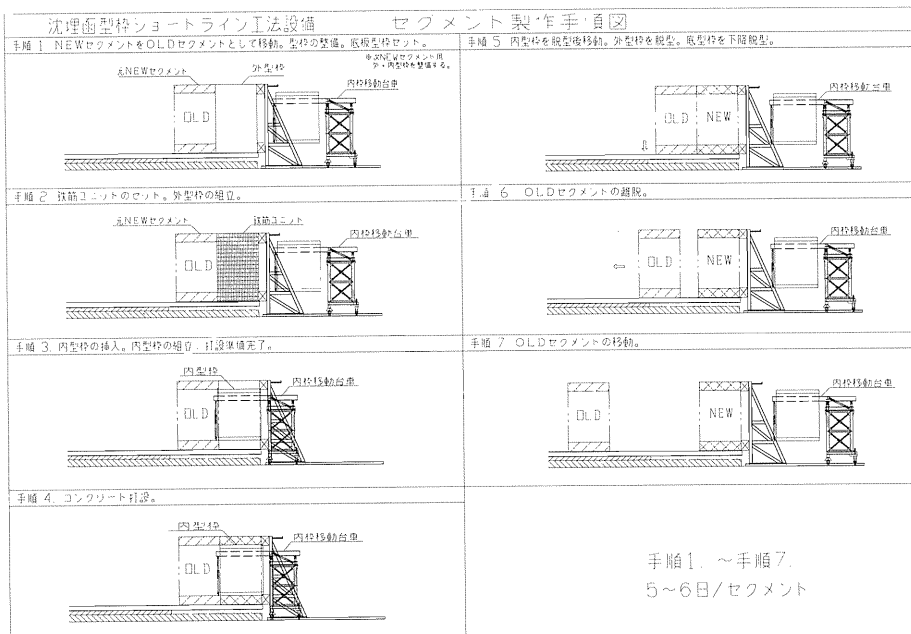
4. 施工方法

柔構造式プレキャストセグメント構造沈埋函の施工方法を以下に示す。

ここでは、プレキャストセグメントの製作は、造船ドック等の陸上製作ヤードを、また、組立て、進水については、造船ドックを念頭に説明を行う。

(1) プレキャストセグメントの製作

マッチキャスト方式によるプレキャストセグメントの製作手順を図—6 に示す。



図—6 プレキャストセグメント製作手順

手順 1. ~手順 7.
5~6日/セグメント

プレキャストセグメントは①～⑦の手順で、5～6日/セグメントのサイクルで製作される。

- ① NEWセグメントをOLDセグメントとして移動、型枠の整備、底型枠セット。
- ② 鉄筋ユニットのセット、外型枠の組立て。
- ③ 内型枠の挿入、内型枠の組立て、打設準備完了。
- ④ コンクリート打設。
- ⑤ 内型枠を脱型後移動、外型枠を脱型、底型枠を下降脱型。
- ⑥ OLDセグメントの離脱。
- ⑦ OLDセグメントの移動。

(2) 沈埋函組立て、進水

プレキャストセグメントをセグメント間継手により接合、PC鋼材により連結、一体化する。シーす内には防錆のため充填剤を充填する。各函体端部に止水用ガスケットとバルクヘッドを設けた後、ドック内に注水して進水させる。

(3) 曳航、沈設

従来の沈埋函と同様、函体を曳航、沈設し、引寄せジャッキによりガスケットを既設函に圧着させる(図-7参照)。

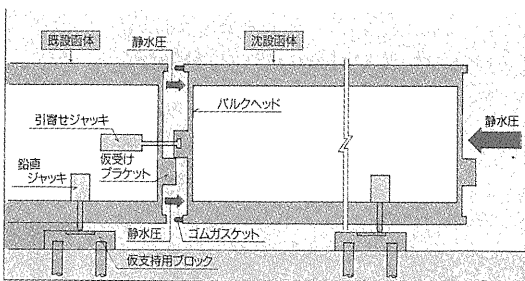


図-7 水圧接合

(4) 函体間継手

上下ガスケット間に挟まれた空間に止水グラウトを注入し、硬化後、バルクヘッド間の水を抜くことにより最終的に水圧接合する。グラウトが硬化した後であるため、水圧は全てグラウトが分担し、ガスケットには大きな荷重は作用しない。このため、ガスケット材としては安価なものが使用できる。

最後に、バルクヘッドを撤去し、函体内部をド

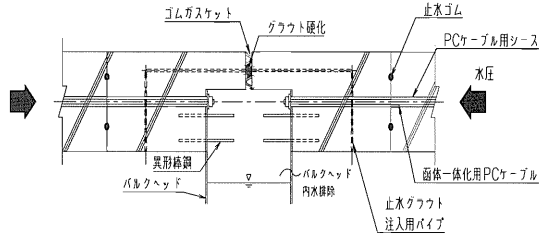


図-8 函体間継手構造

ライにし、内部から継手を剛構造として施工する(図-8参照)。

5. 従来工法との比較

以下に示すY沈埋トンネル(沈埋トンネル部806m)をモデルに、鉄筋コンクリート構造、合成構造、柔構造式プレキャストセグメント構造について函体製作費、工期を比較しその結果を表-3

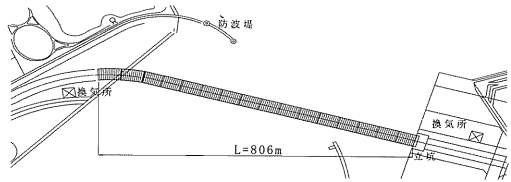


図-9 Y沈埋トンネル平面図

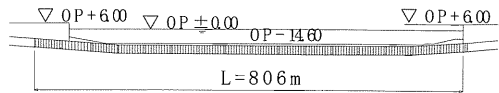


図-10 Y沈埋トンネル縦断図

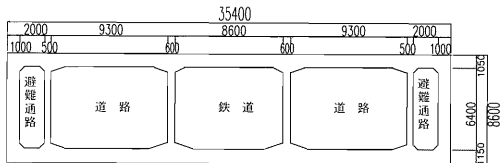
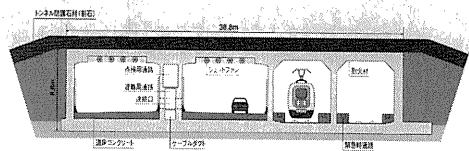


図-11 Y沈埋トンネル断面図(単位:mm)

■世界最大級の沈埋トンネルがプレキャストセグメント工法で建設されています。



場 所: オレスンド海峡(デンマーク-スウェーデン間)
 企業名: オレスンドコンソーシアム(Øresundskonsernet)
 施工者: オレスンドトンネル共同企業体(Øresund Tunnel Contractors)

図-12 Drogden (オレスンド) トンネル

に示す(図—9, 図—10, 図—11 参照)。

表—3 従来工法との函体製作費・工期の比較
(100m/函×8 函製作時の1 函当たりの製作費・工期)

	鉄筋コンクリート 構造	合成構造 (セミフルサンドイッチ)	柔構造式プレキャスト セグメント構造
工費	1.0	1.0	0.8~0.85
工期	27月/函	17.5月/函	15.5月/函

備考：製作・組立ては造船ドックを使用

合成構造(セミフルサンドイッチ構造)に比べ函体製作費については15~20%, 工期については10%程度低減することが可能である。

また, 日本の沈埋トンネルは, 鉄筋コンクリート構造沈埋函といえども函体の外側には防水鋼板が函体全体を覆っている。比較のため海外の沈埋トン

表—4 海外の沈埋トンネルの防水仕様

(出典:「トンネルと地下」第30巻, 5号, 1999年5月)

国名 トンネル名	下床版下面	側壁 外周	上床版 上面	備 考
香港 東部海底トンネル	防水鋼板	吹付け 防水	吹付け 防水	ロードコート
オーストラリア シドニーハーバー	PVCシート	吹付け 防水	吹付け 防水	ポリウレタン エポキシタール
香港 西部海底トンネル	PVCシート	吹付け 防水	吹付け 防水	ケミカル系
香港 MTR 502	仕様書に規定 防水鋼板	吹付け 防水	吹付け 防水	ケミカル系
デンマーク・スウェーデン Drogden トンネル	なし	なし	なし	コンクリート 自体で防水

* 香港東部海底トンネルの場合には, 契約仕様書で防水鋼板使用という規定があり, 代案として防水鋼板をPVCシートに置換える提案をしたが, エンジニアが認めなかったという理由で防水鋼板が使用されている。

ネルの防水仕様を表—4に示す。柔構造式プレキャストセグメント構造沈埋函では, 基本的にDrogden(オレスンド)トンネル(図—12参照)と同様, 防水鋼板, 防水塗装等は不要と考えている。

6. おわりに

海外では実績のあるプレキャストセグメント構造沈埋函も国内では実績がなく, 今後の採用が期待されるわけであるが, 耐震性, 沈下, ねじれに優れた本構造は, 地震, 軟弱地盤の多いわが国にとって, その特長を十分発揮できる場であると考えている。

最後に, 本研究は国土交通省港湾技術研究所(現・独立行政法人港湾空港技術研究所), 早稲田大学, 鹿島建設の共同研究で実施したものであり, ご指導, ご協力をいただいた関係各位に対し, 心より感謝の意を表するものである。 J C M A

【筆者紹介】

岩村 栄世(いわむら えいせ)
鹿島建設株式会社
土木技術本部
工務部
次長



大深度地下空間を拓く建設機械と施工技術

最近の大深度空間施工技術について取りまとめました。主な内容は鉛直掘削工、単円水平掘削工、複心円水平掘削工、曲線掘削工等実施例を解説、分類、整理したものです。工事の調査、計画、施工管理にご利用ください。

頒 価 2,310円(本体価格2,200円) 送料500円

申込先 本部：FAX.03-3432-0289

社団法人 日本建設機械化協会

東京都港区芝公園3-5-8(機械振興会館) TEL03-3433-1501 FAX03-3432-0289