

## 調査と研究②

# 日韓トンネル計画沈埋トンネル 概略施工検討概要報告

Report on Schematic Study of the Japan –  
Korea Tunnel on the Basis of Immersed  
Tube Tunnelling Method

第3部会委員会

とする。

## 1. 概 要

日韓トンネルは、いまだかってない大水深下で世界最長のトンネルとして計画されており、この施工法については、これまでいくつかの提案があり概略検討がなされてきた。

今回、沈埋トンネル工法による概略施工法の検討を行う。

検討する日韓トンネルの概要は以下に示す通りとする。

## ①沈埋トンネル区間

壱岐～対馬 L = 49.0km

対馬～巨済島 L = 64.4km

の海峡部を沈埋トンネルの概略施工検討区間とする。

## ②最大水深

沈埋トンネルを設置する最大水深は、150mとする。

## ③トンネル断面

道路・鉄道併用の場合

(道路2車線+鉄道単線) × 2本

鉄道複線の場合

(鉄道複線) × 1本

## ④換気トンネル

道路・鉄道併用の場合

換気トンネルを別途に設置する。

換気トンネル内径：約11m

鉄道複線の場合

換気トンネルを設置しない。

## ⑤避難・連絡通路

人専用 2kmにつき1か所

人・車共用 10kmにつき1か所

設けることとする。

## ⑥換気立坑

内径約11mの換気立坑を18km毎に1か所設けることとする。

## ⑦トンネルの勾配

標準勾配 1/1000

最急勾配 1/200

## 2. トンネルの内空断面

## 2.1 道路・鉄道併用の場合の標準断面

本坑：内径11.4mの円形断面を2断面設定する。

1断面当たりの構成

- ・道路2車線

- ・鉄道単線

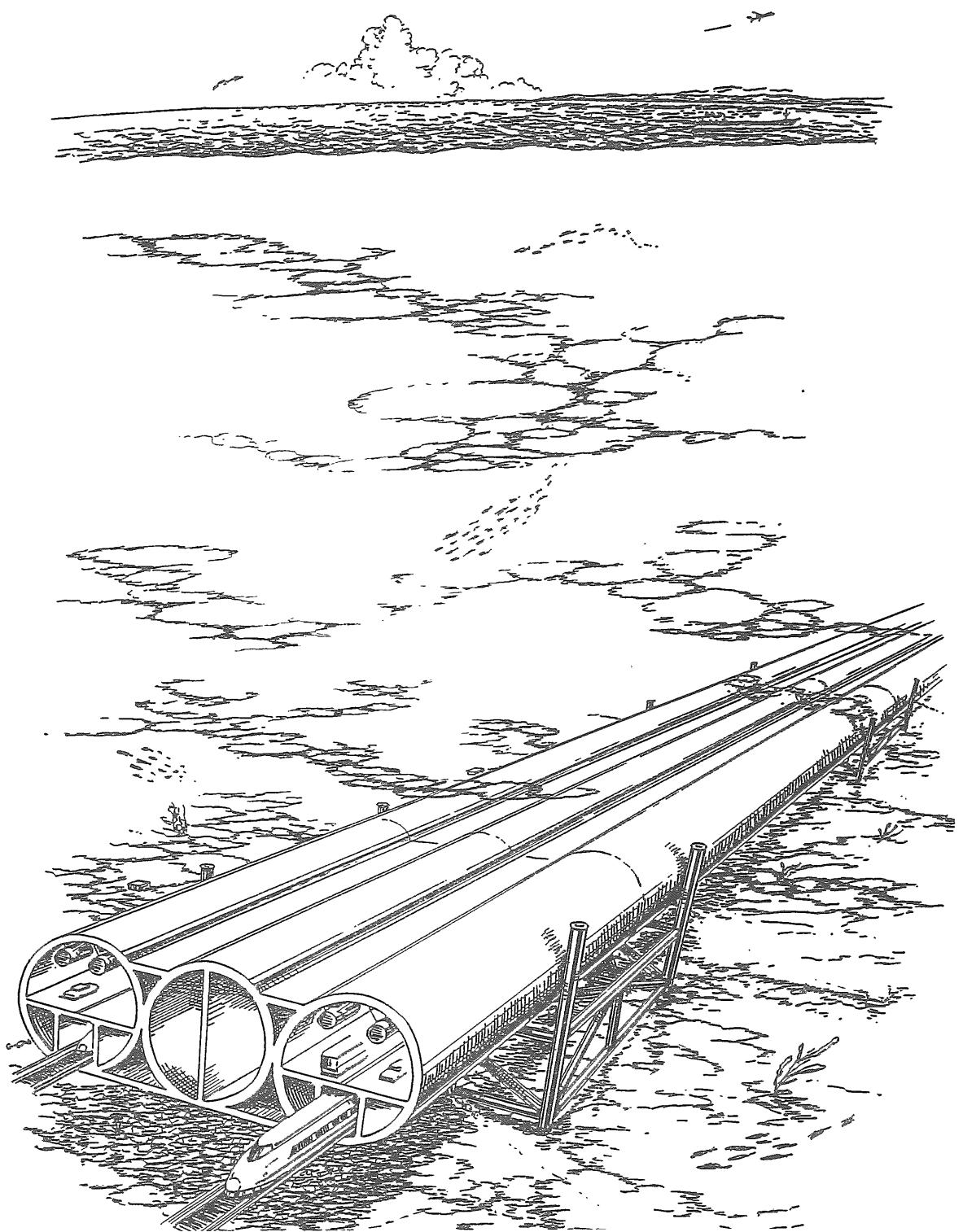


図-1 沈埋トンネル完成予想図

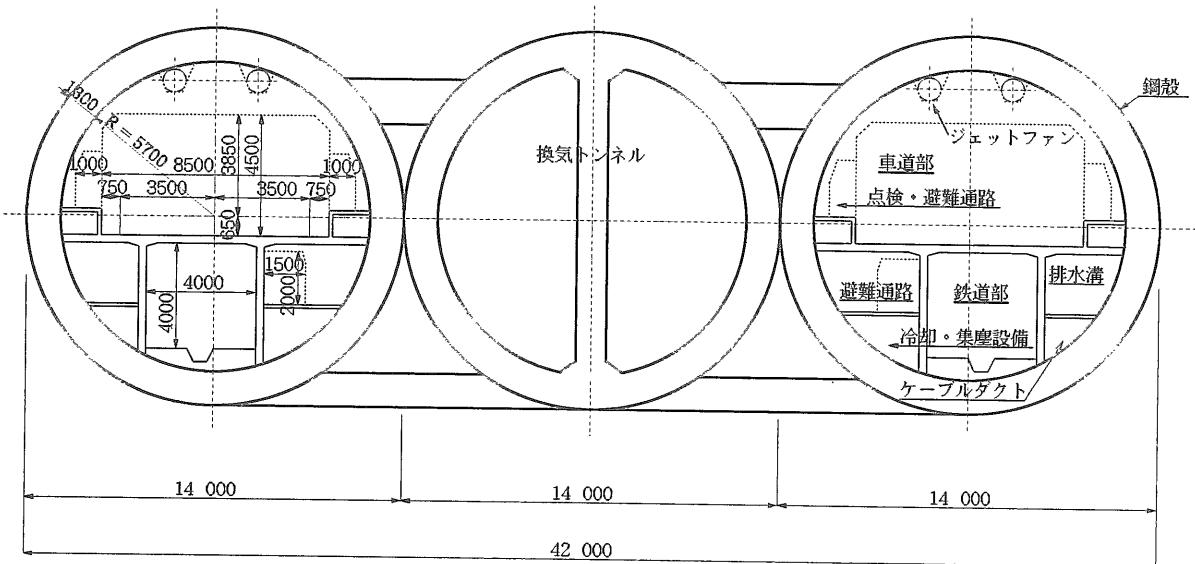


図-2 トンネル標準断面（道路・鉄道併用の場合）

設定する。

図-2に道路・鉄道併用の場合のトンネル標準断面を示す。

## 2.2 鉄道複線の場合の標準断面

本坑：内径11.4mの円形断面を1断面設定する。

### 1 断面当りの構成

- 鉄道複線
- 点検、避難通路
- 避難坑
- 冷却、集塵設備室
- 排水溝
- ケーブルダクト

図-3に鉄道複線の場合のトンネル標準断面を示す。

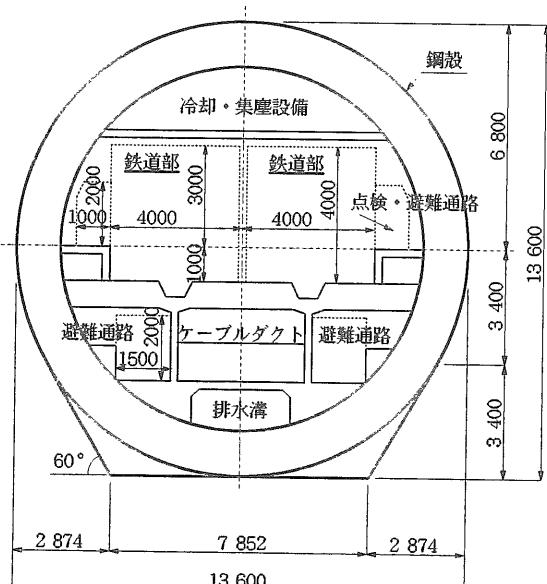


図-3 トンネル標準断面（鉄道複線の場合）

- 点検、避難通路
- 避難坑
- 冷却、集塵設備室
- 排水溝
- ケーブルダクト

換気トンネル：内径11.4mの円形断面を1断面

## 3. 断面の概略設計

### 3.1 横断面の設計

標準断面の設計は常時完成時の沈埋トンネルに働く荷重として水圧及び軸体重量を考え概略検討を行い、許容応力を満たす各部材の主鉄筋量を求めた。

①部材に発生する最大断面力

部材	軸力	せん断力	曲げモーメント
外周リング部材	972.4 t	68.3 t	175.9 tm
内周リング部材	1260.8 t	18.5 t	448.8 tm
底版スラブ部材	184.1 t	421.2 t	458.9 tm

## ②主鉄筋量

リング部材  $As = 603\text{cm}^2$  ( $Ac = 13,000\text{cm}^2$ )

スラブ部材  $As = 246\text{cm}^2$  ( $Ac = 15,000\text{cm}^2$ )

## 3.2 軸方向断面の設計

条件を仮定し建設省の新耐震設計法(案)昭和52年3月に示されている地中構造物の耐震設計法に従い、地盤の変位を考慮した静的計算法に基づき地震時の概略検討を行い、許容応力を満たす各部材の主鉄筋量を求めた。

## ①部材に発生する最大断面力

方向成分	軸力	せん断	曲げモーメント
水平面内断面力	2,144 t	612 t	11,684 tm
鉛直面内断面力	1,608 t	2,442 t	46,630 tm

## ②主鉄筋量

円筒形断面  $As = 3,470\text{cm}^2$  ( $Ac = 518,700\text{cm}^2$ )

## 4. 函体の安定性

建造ドックおよび海上ヤードで製作、諸設備が搭載された沈埋函体は現地まで曳航し、沈設される。ここでは、この過程における自重と沈埋函体に働く浮力のバランスを道路、鉄道併用の場合の断面で検討する。

### 4.1 検討条件

海水の単位体積重量	$\gamma_w = 1.03 \text{t/m}^3$
鋼殻の単位面積当りの重量	$W_s = 0.2 \text{t/m}^2$
鉄筋コンクリートの単位体積重量	$\gamma_{RC} = 2.45 \text{t/m}^3$
無筋コンクリートの単位体積重量	$\gamma_C = 2.35 \text{t/m}^3$
函体の重量／函体に働く浮力…曳航時	0.99 以下
函体の重量／函体に働く浮力…沈設時	1.025以上
函体の重量／函体に働く浮力…完成時	1.10 以上

## 4.2 函体の諸元

検討に使用する道路、鉄道併用の場合の函体の諸元は表-1に示す通りとする。

表-1 函体の諸元

項目	容積等	重量
函体の排水量	$516.4 \text{m}^3/\text{m}$	$531.9 \text{t/m}$
函体コンクリート(RC)	$199.8 \text{m}^3/\text{m}$	$489.5 \text{t/m}$
床版等コンクリート(RC)	$15.0 \text{m}^3/\text{m}$	$36.8 \text{t/m}$
バラストコンクリート(上部)	$4.1 \text{m}^3/\text{m}$	$9.6 \text{t/m}$
バラストコンクリート(下部)	$17.8 \text{m}^3/\text{m}$	$41.8 \text{t/m}$
鋼殻	$99.1 \text{m}^3/\text{m}$	$19.8 \text{t/m}$
バルクヘッド等		$0.3 \text{t/m}$

## 4.3 曳航時の検討

曳航時の函体の重量は函体コンクリート、鋼殻及びバルクヘッド等で

$$\text{函体の重量} = 509.6 \text{t/m}$$

である。

一方、函体の容積 =  $516.4 \text{m}^3/\text{m}$  であるので、海水の比重を  $\gamma_w = 1.015 \sim 1.03$  とすると、函体に働く浮力は

$$\text{浮力} = 524.1 \sim 531.9 \text{t/m}$$

となるので、曳航時の函体の比重は

函体の重量／浮力 =  $0.97 \sim 0.96 < 0.99$  となり、函体の重量は浮力に対して  $3 \sim 4\%$  の余裕があり曳航することが可能である。

## 4.4 沈設時の検討

沈設時の函体の重量は

$$\text{函体の重量} = 545.6 \text{t/m}$$

である。

沈設時に函体に働く浮力は  $531.9 \text{t/m}$  であるので、

$$\text{函体の重量／浮力} = 1.026 > 1.025$$

となり、沈設時に函体を安定させることが出来る。

## 4.5 完成時の安定性

完成時の函体の重量は

$$\text{函体の重量} = 597.5 \text{ t/m}$$

であり、このとき函体に働く浮力は531.9t/mであるので、函体の浮き上りに対する安全率fsは、

$$fs = \text{函体の重量} / \text{浮力} = 1.12 > 1.0$$

となり、完成時には、函体の浮き上りに対する安全率1.1より大きいことを満足する。

## 5. 施工フロー

施工フローは、図-4に示す通りである。

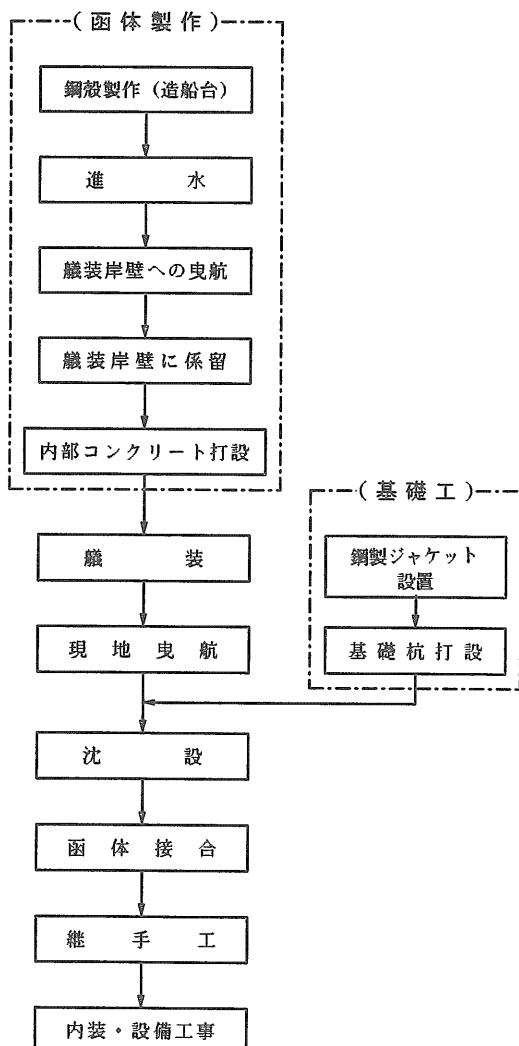


図-4 沈埋トンネル施工フロー

## 6. 函体の製作

造船ドックにて組み立てた函体の鋼殻部の両端に、バルクヘッドを取り付け艤装したのち、ドック内に注水して鋼殻を浮上させ、建設地点に比較的近い静穏な海域に設置した海上ヤードまで曳航し係留する。

海上ヤードに係留した状態でコンクリートプラント船により鋼殻内にコンクリートを打設し函体を製作する。製作した函体は別途に設置した仮置ヤードに係留し曳航、沈設に備える。

図-5に函体の製作手順、図-6に鋼殻製作の概要、図-7に函体コンクリートの打設概要を示す。

## 7. トンネル基礎の施工

### 7.1 基礎工法の概要

- ①トレーンチ掘削を基本とするスクリード方式、砂吹込み方式、あるいはモルタル注入方式では、膨大な掘削残土が発生する。
  - ②大水深の位置にトレーンチ掘削することにより、さらに水深が大きくなる。このため、沈埋トンネルに働く水圧が増加する結果となり合理性に欠ける。
- などの理由から、沈埋トンネルの基礎形式は杭基礎によるものとする。

### 7.2 基礎の施工

沈埋トンネル基礎の施工位置は、

- ①基礎の建設地点の水深が非常に深い。
  - ②基礎を設置する海域が、外海の海峡部に位置しているため、波浪、海流、潮汐などの海象が厳しいことが予想される。
- などの理由で、基礎の施工に際しては、プレハブ化を図るなど海上作業を極力簡易化する必要がある。

基礎形式は鋼管杭打込みによるジャケット式基礎とし、施工方法は、陸上のヤードで製作したジ

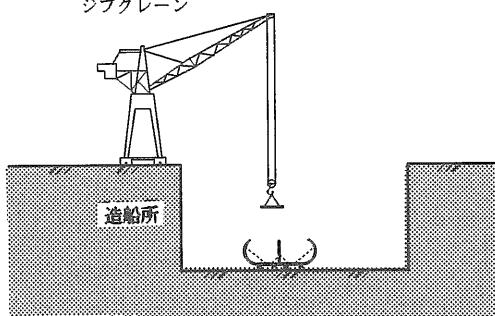
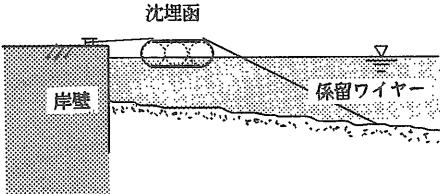
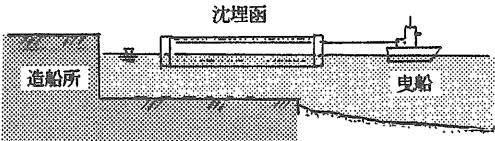
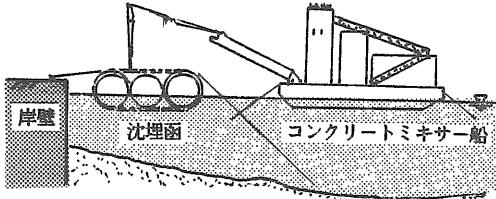
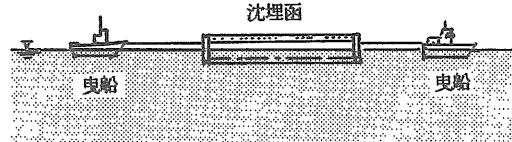
1. 鋼殻製作（造船台）	4. 係 留
 <p>鋼殻の製作は、工場内で鋼板とリブで部分毎のブロックを製作し、それを造船所の船台上で組立てるブロック建造方式とする。</p>	 <p>現地に到着した鋼殻は、艤装岸壁に係留する。</p>
2. 進 水	5. 内部コンクリートの打設
 <p>鋼殻の組立て後、ゴムガスケット・防蝕設備・沈設用の金具などの付属物の取付けを行って、満潮時に進水する。</p>	 <p>鋼殻を岸壁に浮上したままで、鉄筋の組立て・内部コンクリートの打設を行う。コンクリートの打設は、鋼殻の変形および応力が十分小さくなるよう分割して施工する。</p>
3. 曳 航	
 <p>進水後、曳船により艤装岸壁まで曳航する。</p>	

図 - 5 函体の製作手順

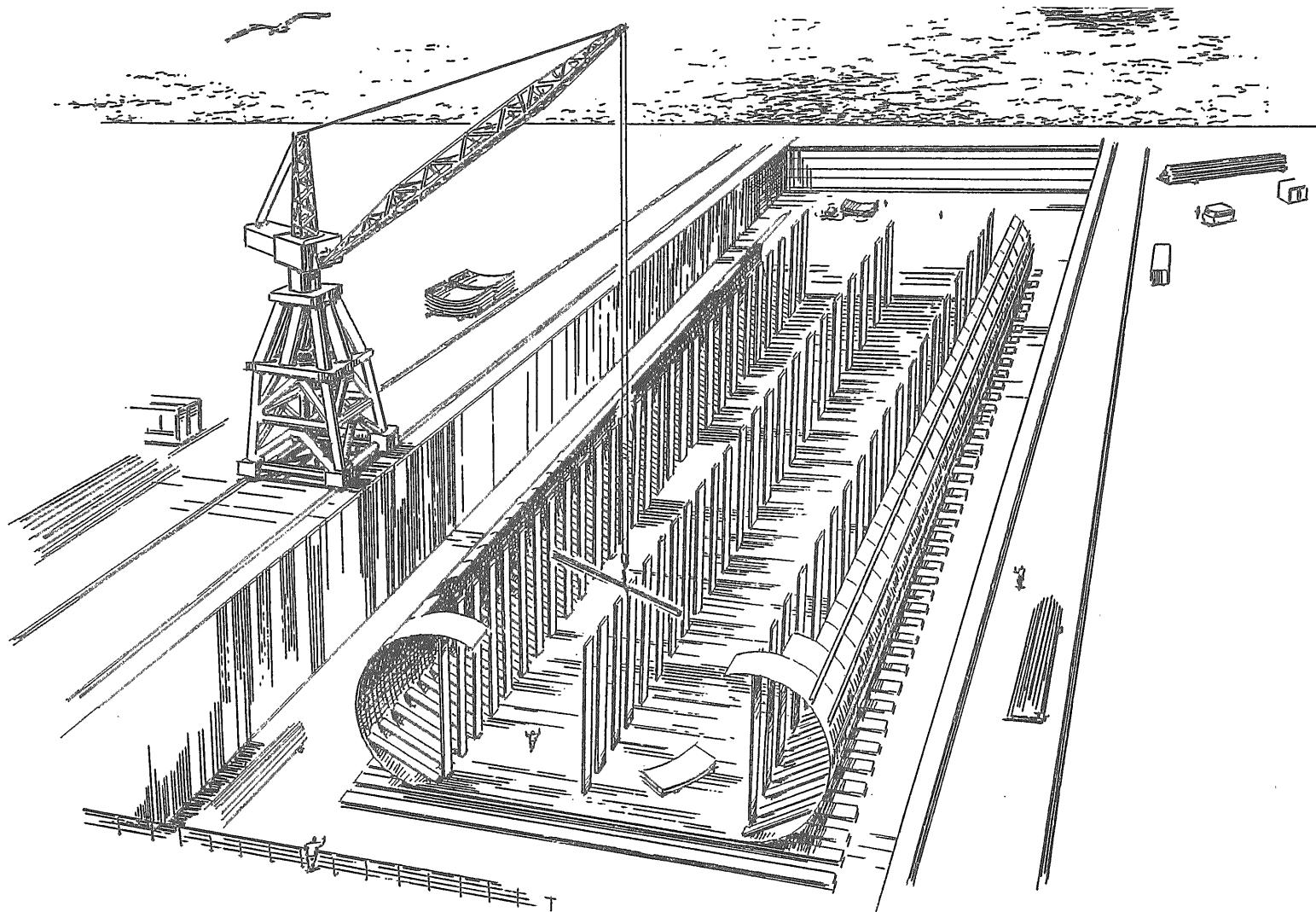


図-6 鋼殻製作概要図

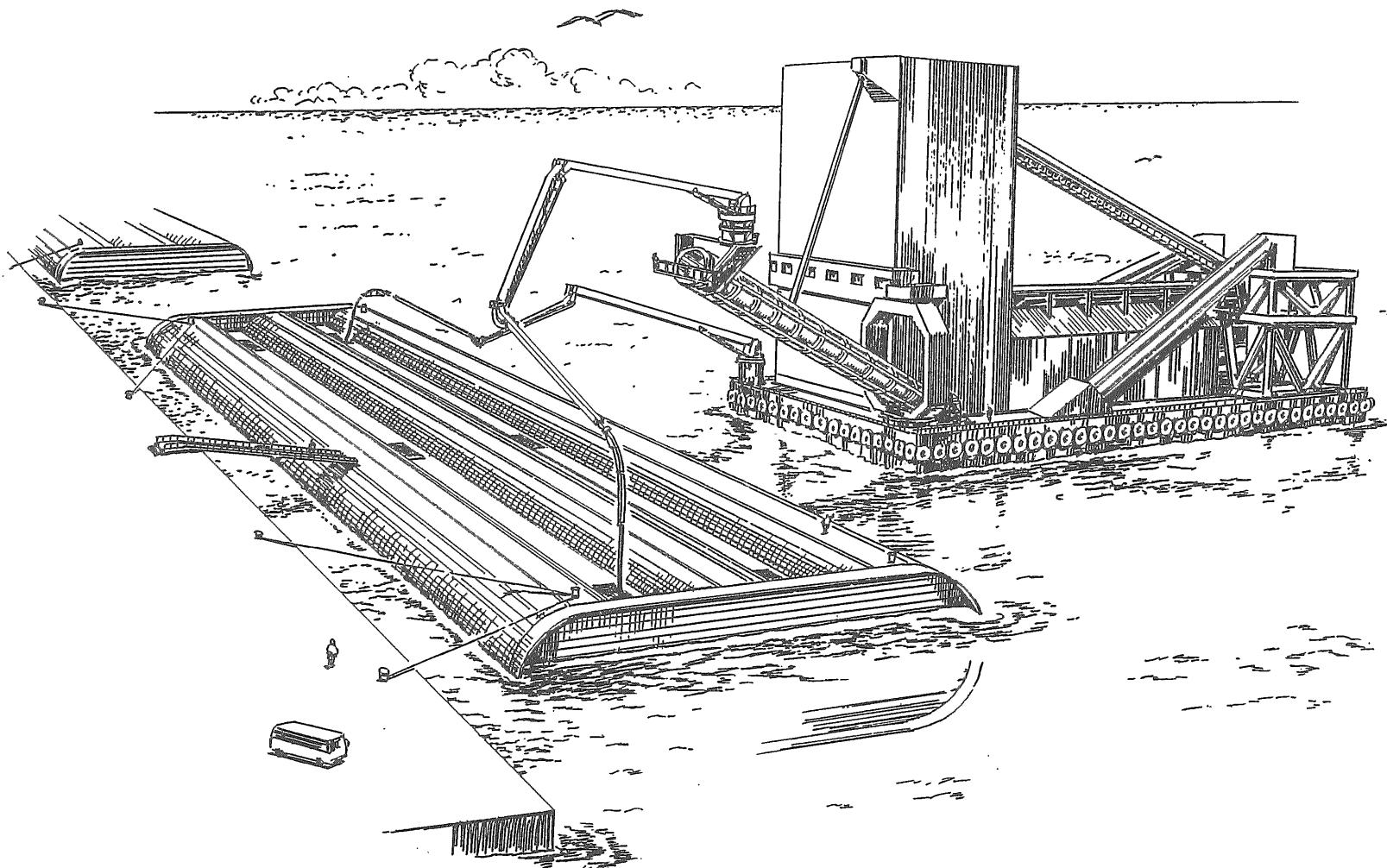


図-7 函体コンクリート打設概要図

<p><b>1. ジャケット製作</b></p> <p>陸上ヤードで、ジャケットを製作する。</p>	<p><b>2. ジャケット運搬</b></p> <p>ジャケットは、杭を抱え込んだまま起重機船で現地まで運搬する。</p>
<p><b>3. ジャケット据付（位置決め）</b></p> <p>ジャッキアップリグからの位置出しを受けながら、ジャケットを正規の位置に据え付ける。</p>	<p><b>4. 基礎杭打設</b></p> <p>杭は、ジャケット脚の鋼管を通して、水中ハンマーで打込む。</p>

図-8 沈埋トンネル基礎の施工手順

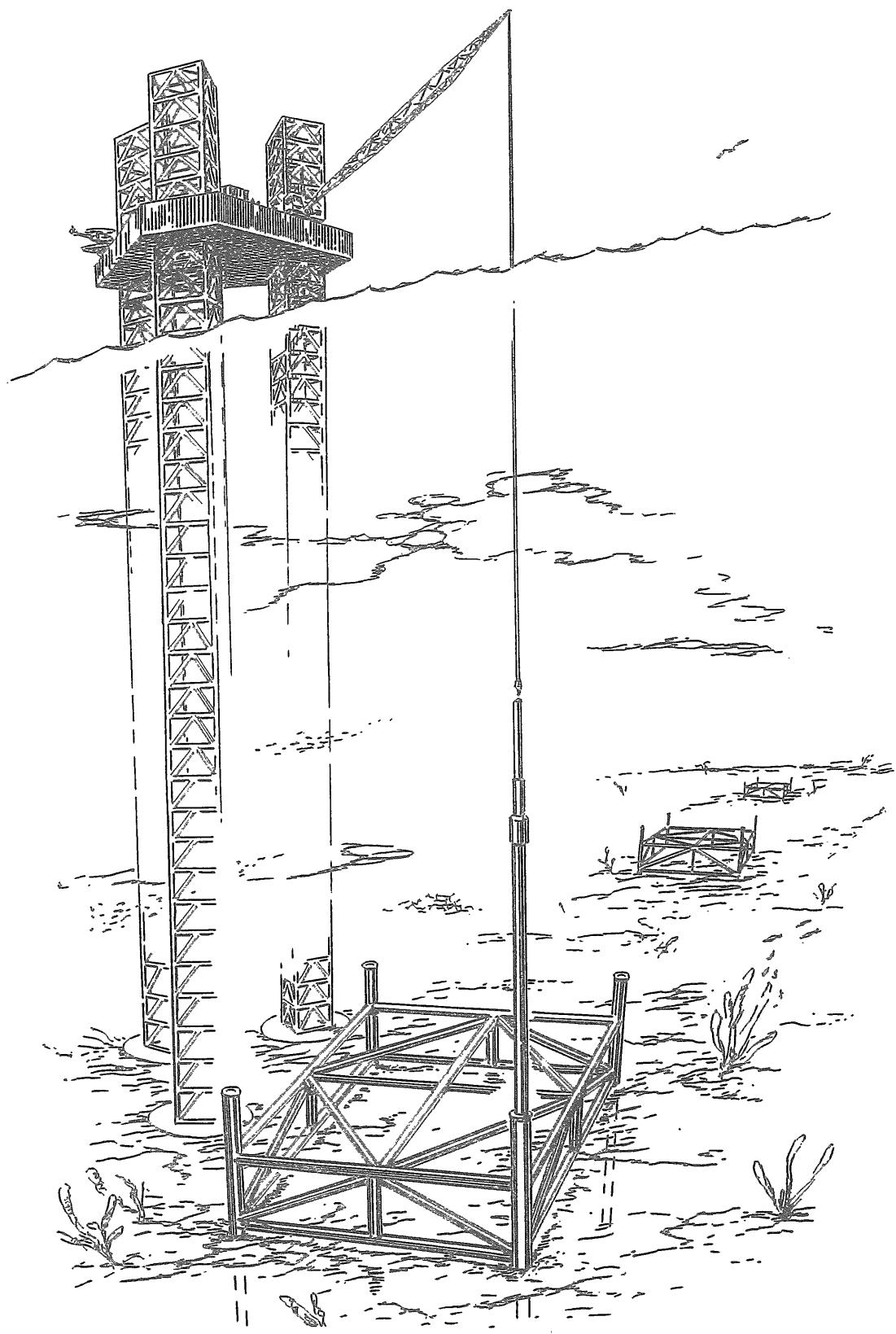


図-9 基礎施工概要図

ヤケットを起重機船で現地まで吊り曳航し、沈設する。次に、現地の大水深海域に据え付けたジャッキアップリグに搭載したクレーンにて位置決めを行い、水中ハンマーで予めジャケットの外管に建て込んである内管を打込むこととする。

基礎の施工手順は図-8に、施工の概要は図-9に示す通りとする。

## 8. 函体の曳航、沈設

### 8.1 曳航計画

#### 8.1-1 検討条件

##### ①被曳航物の概要

長さ : L = 100 m

幅 : B = 42 m

高さ : h = 14 m

乾舷 : h1 = 1.3m

吃水 : h2 = 12.7m

全断面積 : 546 m<sup>2</sup>

全浮力 : 562 ton/m

排水面積 : 495.5 m<sup>2</sup>/m

風圧正面積 : 50.5 m<sup>2</sup>

##### ②曳航時の気象、海象

- ・風速 : 10 m/sec (正面風)

- ・波高 : 1 m

- ・潮流 : 4 kt (向流)

- ・対水曳航速度 : 6 kt (対地曳航速度 2kt)

#### 8.1-2 曳航船団構成

主曳船	8,000 ps × 2隻
-----	---------------

	4,000 ps × 2隻
--	---------------

補助曳船	3,000 ps × 2隻
------	---------------

警戒船	1,000 ps × 5隻
-----	---------------

#### 8.1-3 曳航

造船ドックおよび海上ヤードで製作された函体に沈設に必要な設備を搭載した後、現地まで曳航する。

図-10に曳航の概要を示す。

### 8.2 沈設計画

函体の平面位置決めを行った後、水平に保ちつつ函体を沈設する。沈設の途中で海象が急変した場合、位置が狂うこととなる。

このため、気象・海象の予測可能な時間を1昼夜程度として、この間に沈設作業を終了させることが望ましい。

沈設方法は、建設地点が外海に位置しており、気象・海象等の条件が厳しいことが予想される。ここでは、沈設方法として、次に2つの方法を示す。

##### ①ジャッキアップリグ方式

函体沈設位置に作業水深150m仕様のジャッキアップリグを固定足場として2基セットし、リグにそって曳航した函体を引寄せ、固定足場上に搭載したクレーンおよびウインチにより函体を吊り下げ、函内に沈設荷重としてバラスト水を注水して沈設させる。

沈設にあたっては、センサー、計測機器、TVカメラ等を搭載した建設支援ロボットを函体に取り付け遠隔操作により函体を所定の位置まで誘導する。

図-11にジャッキアップリグによる沈設作業概念図を示す。

##### ②自航潜水着底方式

函体の船尾側に駆動用スクリューを、船首側に着脱式操作室を取り付けておき、沈設地点に曳航した函体を着脱式操作室から姿勢を制御しながらスクリューを駆動させ、沈設位置に自航潜水により沈設する。

図-12に自航潜水着底方式による沈設作業概念図を示す。

### 9. 換気塔の概要

沈埋トンネルの延長18kmにつき1か所設置される換気塔の建設位置は、水深が150mと非常に大きいため、予め盛土した人工島上に建設する

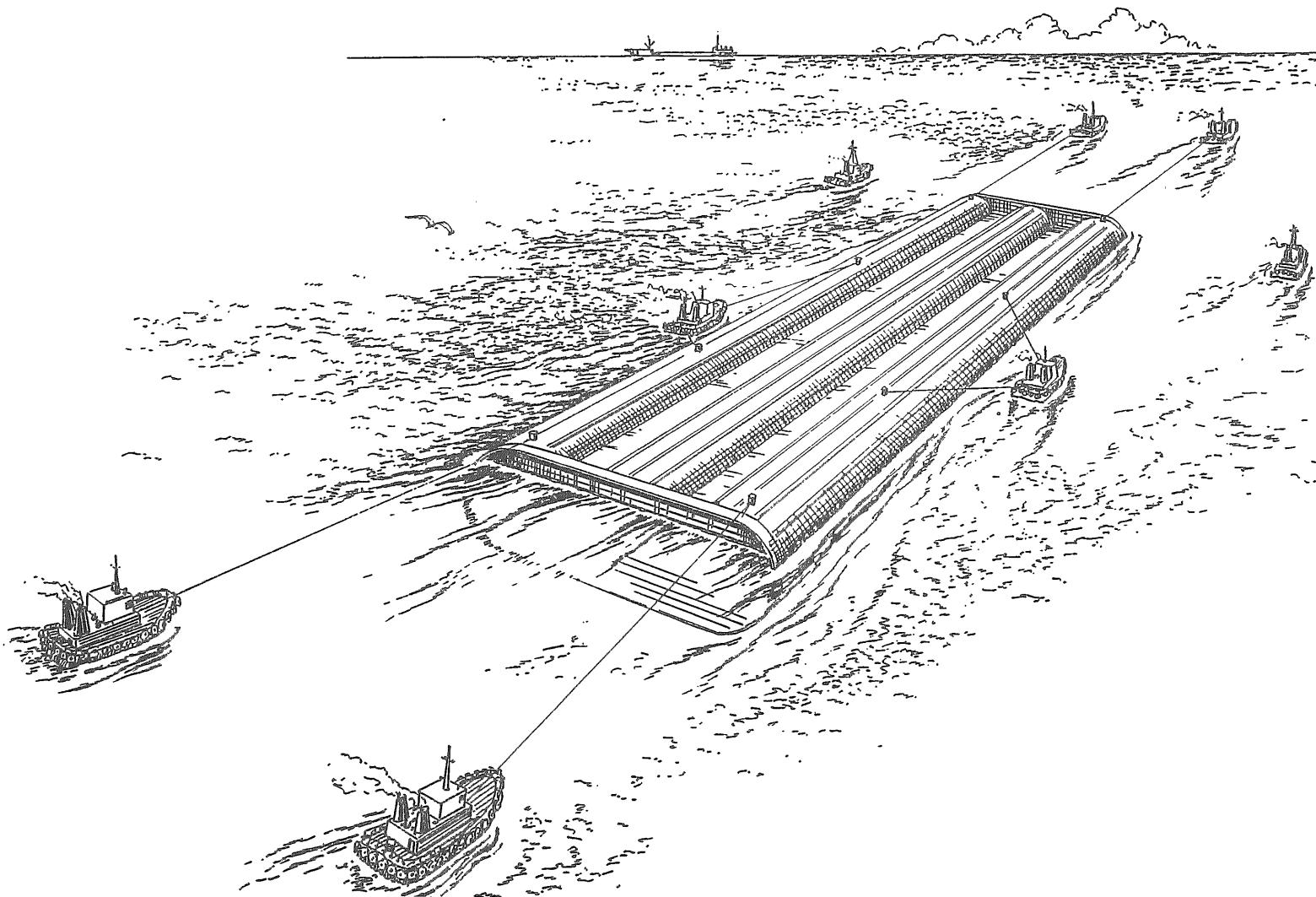


図-10 函体曳航概要図

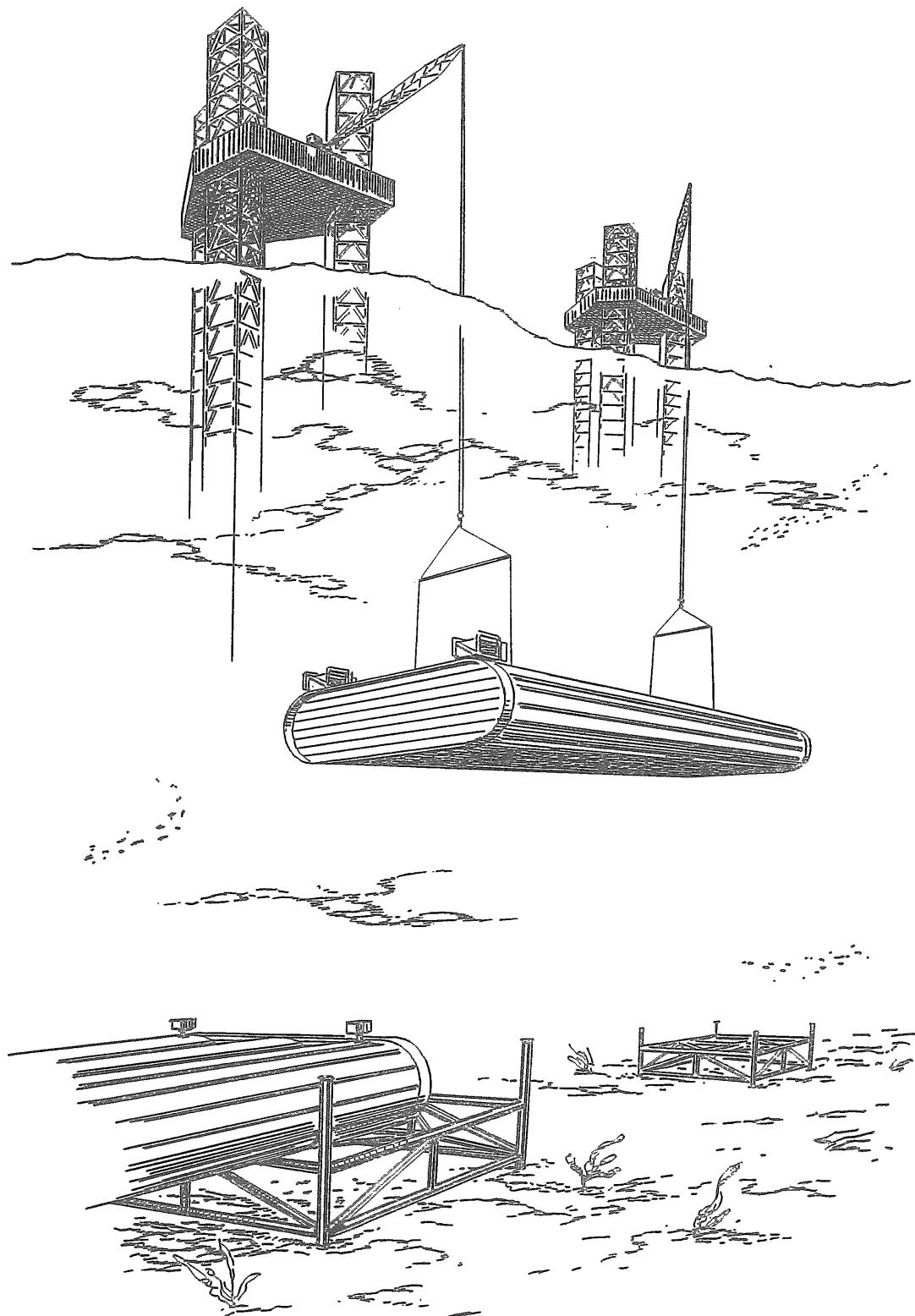


図-11 沈設概要図 (ジャッキアップリグ方式)

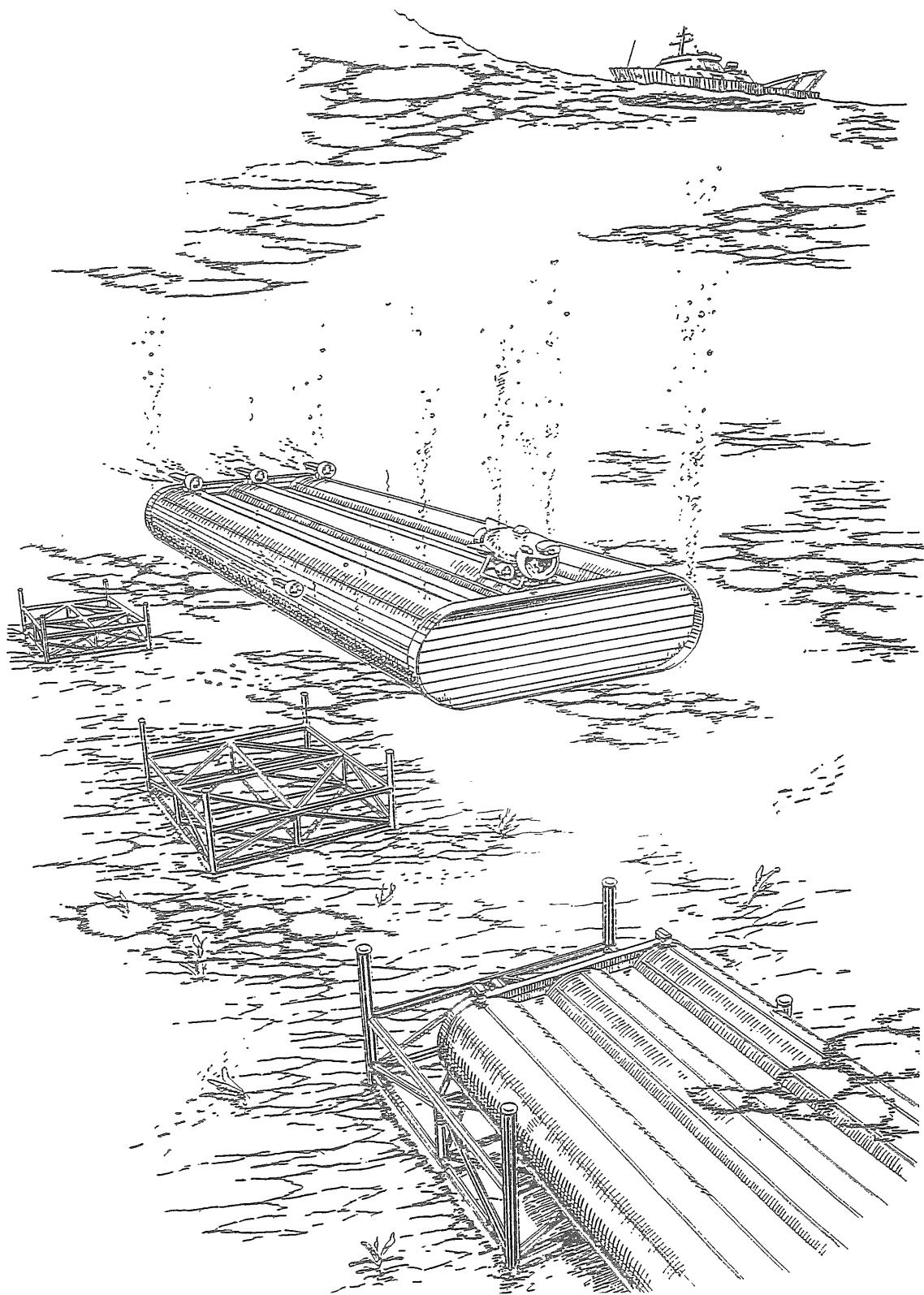


図-12 沈設概要図（自航潜水着底方式）

方法は難しい。そこで、換気塔の形式は海洋石油資源開発用のハイブリッド式海洋プラットフォームの4本の脚柱の中心部に設置するものとする。

ハイブリッド式海洋プラットフォームの概略構造は、コンクリート製(PC構造)の下部構造と鋼管部材を中心にした鋼製の上部構造から構成される。

換気塔の概要は図-13に示す通りである。

## 10. 地震動の推定

国内における過去の地震記録より、対馬豊玉村付近(東経129.34°、北緯34.40°を中心とした地域)における地震動の大きさを推定する。

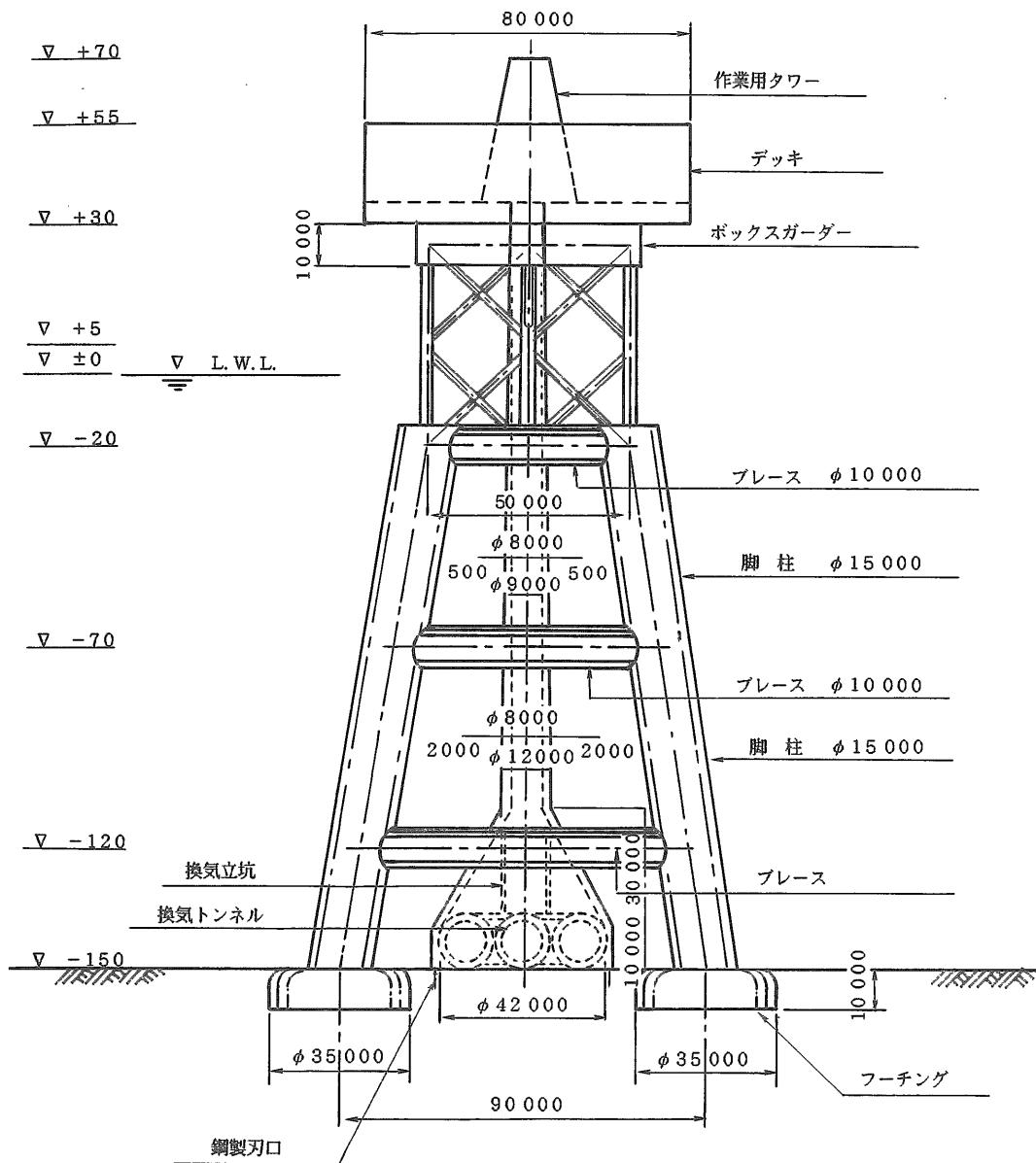


図-13 換気立坑

表-2 対馬豊玉村付近の被害地震波

マグニチュード7.0以上

地 震 暦		震 央		マグニチュード M	震 央 距 离 km	速 度 V max cm/sec	加速度 A max cm/s <sup>2</sup>
地震番号	発生年	東 経	北 緯				
2	679	130.5	33.0	7.0	188.97	2.5	26
81	1596	131.6	33.3	7.0	241.76	1.7	18
148	1700	129.6	33.9	7.0	60.49	12.6	132
379	1909	131.0	32.3	7.6	284.87	3.0	32

\* 地震番号 2 : 筑紫 (天武7年)

地震番号 81 : 豊後 (慶長1年)

地震番号148 : 倉崎・対馬 (元禄13年)

地震番号379 : 日向灘 (明治42年)

ると極めて低いものと思われる。

### 10.1 過去の被害地震記録

『新編日本被害地震総覧』1987年3月、宇佐美龍夫著を地震記録のデータとして使用し、西暦416年～1987年に発生した地震の中からマグニチュード7.0以上の地震波を抽出した。  
この結果を表-2に示す。

### 10.2 地震動の推定

当地域における地震動の大きさを推定すると、表-3に示す通りとなる。

表-3 地震動の大きさ推定値

項 目	地 震 动 の 大 き さ
100 年 レベル	50 gal
1000 年 レベル	100 gal
歴 史 最 大 地 震	150 gal

また、建設省告示第1621号によると、当該地域の地域係数は、

$$Z = 0.8$$

となっている。

地震活動度の平均値をみると関東地方等に比べ