

4. 試設計条件

4. 1 紀淡海峡（由良瀬戸）の自然条件

4. 1. 1 地盤条件

(1) 地形・地質分布

紀伊水道より北西部、淡路島の両側にはそれぞれ海峡が存在している。四国側が渦潮で有名な鳴門海峡であり、もう一方の和歌山側が紀淡海峡である。

紀淡海峡は和歌山市と洲本市（淡路島）の間約 11km の海峡である。その中には地ノ島、沖ノ島の2つの島が点在しており、それぞれの島の間に加太ノ瀬戸（約 800m：和歌山ー地ノ島間）、中ノ瀬戸（約 500m：地ノ島ー沖ノ島間）、由良瀬戸（約 4500m：沖ノ島ー淡路島間）がある。今回の検討対象とするのはこの中で最も長い由良瀬戸である。

由良瀬戸の海底地形は、沖ノ島側の海底勾配が急であり、およそ 800m 沖合で水深が 100m を越える。更に沖に向かって水深は深くなり、沖合約 1km で最も深い 130m 程度に達する。淡路島側からは比較的緩やかな勾配で、途中の約 1km 沖合の成ヶ島を経て約 2.5km 沖合で水深が 100m 程度となっている。

由良瀬戸の地質構成は基盤岩（和泉層）の上に堆積層（大阪層群等）が厚く分布している。和泉層は主に砂岩・泥岩の互層であり、大阪層群は主に粘性土・砂質土・砂礫から成っている。

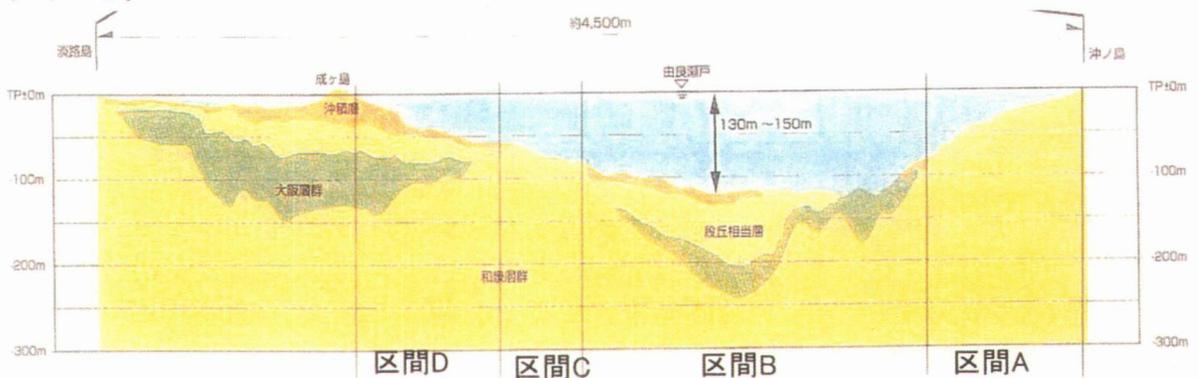


図-4. 1 由良瀬戸地質縦断図（出典①）

(2) 地盤定数

紀淡連絡道路の計画に当たり、平成3年度より海上・陸上ボーリングが行われている。しかし、現段階ではこれらの調査結果は一般に公表されていないため、今回の検討では推定値として明石海峡大橋架橋地点での地盤モデルを参考に設定することとする。

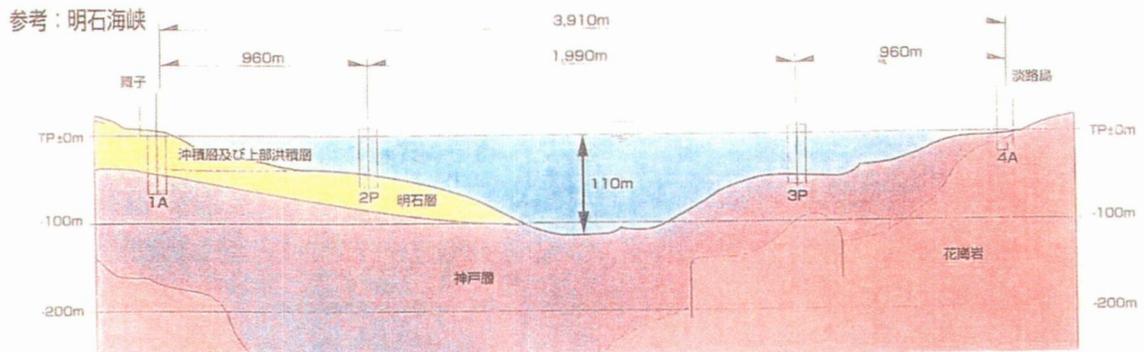


図-4. 2 明石海峡地質縦断図（出典①）

表-4.2 由良瀬戸地盤定数モデル

地層	物理特性				強度定数		変形特性
	γ (tf/m ³)	V_s (m/s)	V_p (m/s)	νD	c (tf/m ²)	ϕ (度)	E_s (tf/m ²)
沖積層	1.76	180	1,300	0.49	0.0	0	8,400
段丘相当層	1.96	360	1,700	0.48	0.0	30	11,000
大阪層群	2.15	450	1,800	0.47	5.0	35	46,000
和泉層群	2.35	1,200	4,000	0.45	10.0	37	90,000

4.1.2 波浪条件

紀淡連絡道路計画にあたり、平成6年度より波浪観測調査が行われている。その結果、平成9年度の観測結果より最大波高5.26m(有義波)が記録されている。現位置での観測開始から今までの観測結果の中ではこの値は最大であるが、既存資料と比べると小さな値を示している。従ってここでは既存資料を参考に波浪条件を設定する。

既存資料によると、大阪湾の波浪は風速と非常によい相関があることが示されており、大阪湾付近を通過する台風による波浪分布図が作成されている。その中で最も由良瀬戸付近の波高が高くなっている波浪分布図を下図に示す。

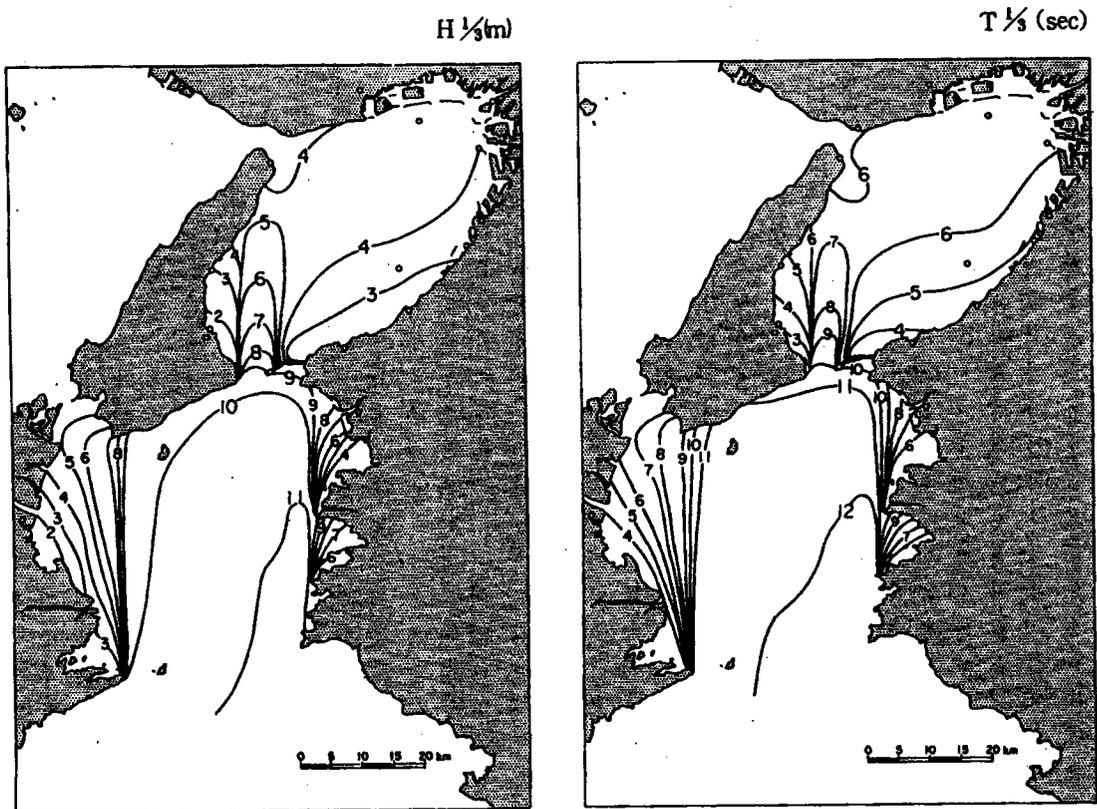


図-4.3 T・W・NE・AM 台風による特性(波高と周期)(出典③)

よって検討には以下の値を用いる。

有義波高 $H_{1/3}=9.0\text{m}$

周期 $T_{1/3}=10.0\text{sec}$

4. 1. 3 潮 流

平成5年度より現位置での潮流観測が行われている。今までの観測結果での最大流速は約4.5ノットと示されている。これに対し、既存資料によると由良瀬戸の最大で3.6ノットとなっている。これらと明石海峡との比較を下表に示す。

表－4. 3 由良瀬戸と明石海峡の潮流比較

資 料	由良瀬戸	明石海峡
現位置調査結果(出典①)	4.5ノット	9ノット
既存資料(出典③)	3.6ノット	7.1ノット (9ノット以上が観測されたことがある)

両海峡とも現位置調査結果の値の方が大きい値を示している。由良瀬戸に対して明石海峡はおよそ2倍の流速となっている。

今回検討に用いる潮流速は現位置の調査結果を基に設定する。ここで、既存資料(出典③)によると「大阪湾内の潮流は明石海峡、紀淡海峡で強く、・・・」との記述があり、また、水中橋梁に対しては潮流の影響が大きいと考えられることから、調査結果の値を割り増しして用いることとする。明石海峡ほど大きな値とはならないと考え1.5倍程度とし、検討に用いる値は以下の通りとする。

$$\text{設定潮流速} = 4.5 \times 1.5 = 6.75 \approx 7.0 \text{ ノット } (=3.5\text{m/sec})$$

4. 1. 4 地 震

地象調査は平成5年度より行われている。これまでに観測された地震回数と最大加速度は以下の通りである。

表－4. 4 年度別観測地震回数(出典①)

単位：回

場所	平成6年度	平成7年度	平成8年度
成ヶ島	55 [108]	20[12.1]	5[2.3]
沖ノ島	70 [-]	25[14.5]	11[5.8]

[]内は最大加速度(gal)

特に大規模構造物(長支間の橋梁等)の設計に対しては地震動の設定が非常に重要な検討課題である。しかし、ここで改めて地震動を設定する事は困難であることから、道路橋示方書の地震動を用いることとする。

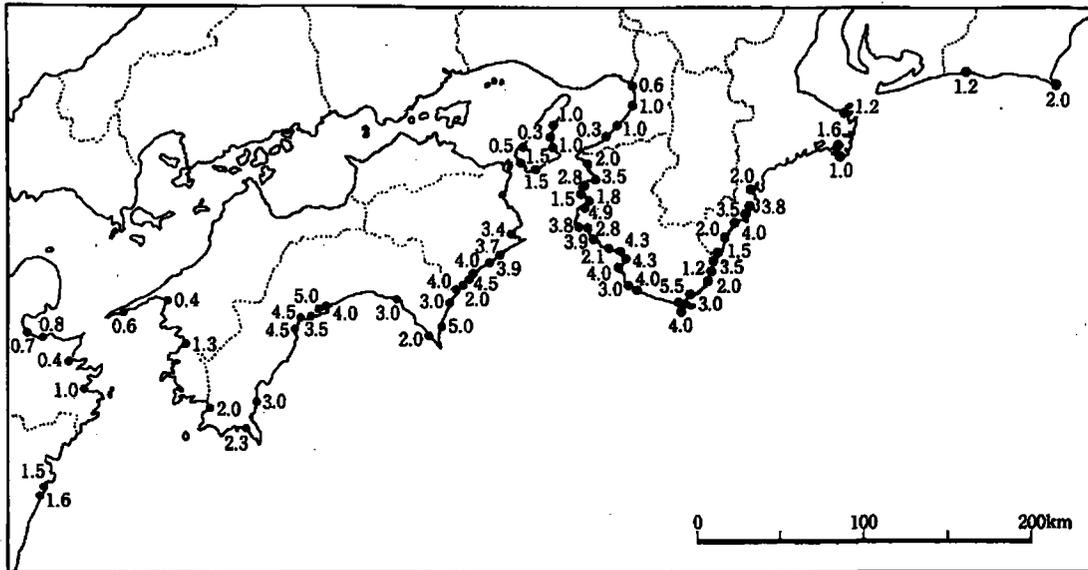


図-4.6 南海津波の高さ (単位 m) (出典③)

これらの図より由良瀬戸付近での津波高は2.0~4.0m程度と推定される。ここで宝永津波に着目すると、大阪湾奥部(大阪港付近)で2.5m~3mの津波高となっている。湾内に3mの津波が達しているとするれば由良瀬戸付近ではそれ以上の高さを持っていたと考え、推定値の最大4.0mを検討に用いることとする。

4.1.6 水位

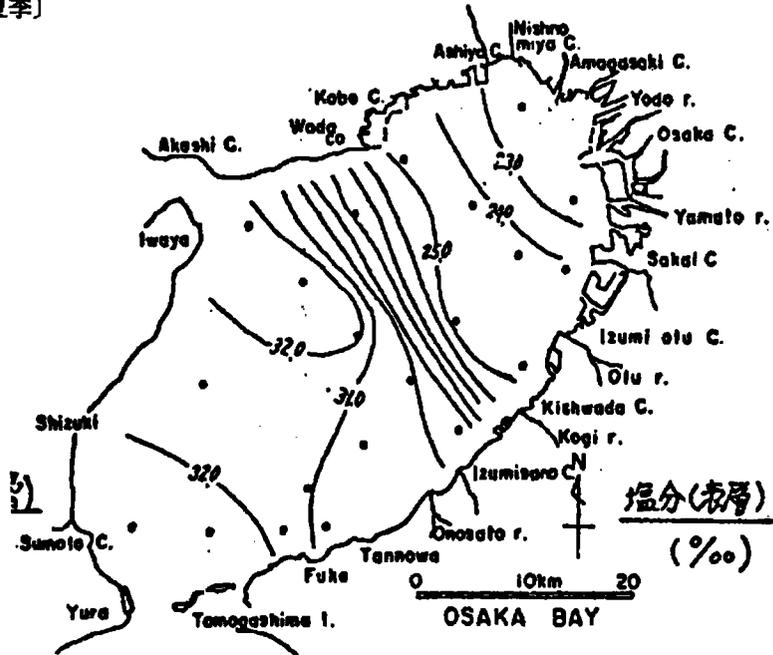
既存資料(出典③)によると、洲本検潮所の潮位記録は以下の通りである。

平均潮位	T.P.+0.096m
朔望平均満潮位	T.P.+0.728m
朔望平均干潮位	T.P.-0.752m
満潮位-干潮位	1.480m

4. 1. 7 塩分分布

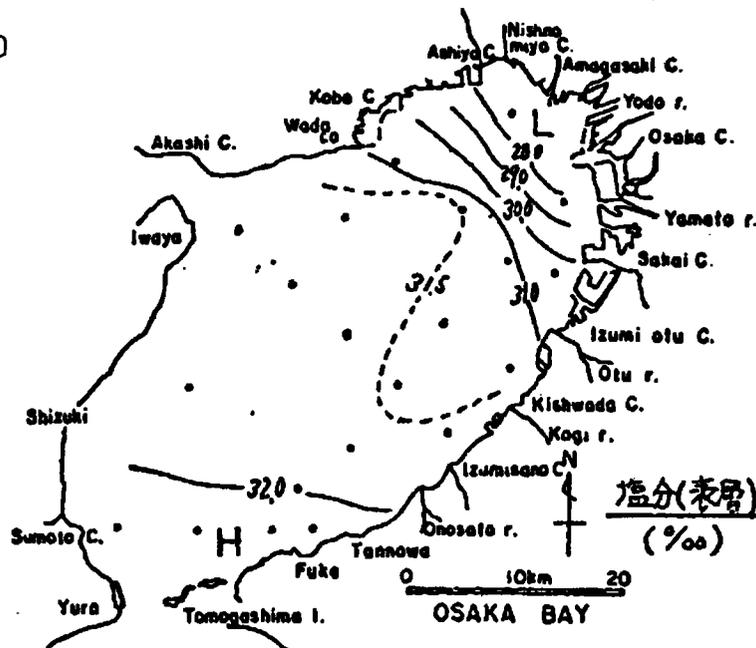
塩分の観測は神戸海洋気象台によって定期的に行われている。塩分の分布状況を支配する要因は、沿岸からの河川水の供給等が考えられる。大阪湾奥部の表層については河川水の供給が多き時期等に変化が見られるが、由良瀬戸付近では年間を通じて塩分の分布に大きな変化は見られない。大阪湾の塩分分布を下図に示す。

〔夏季〕



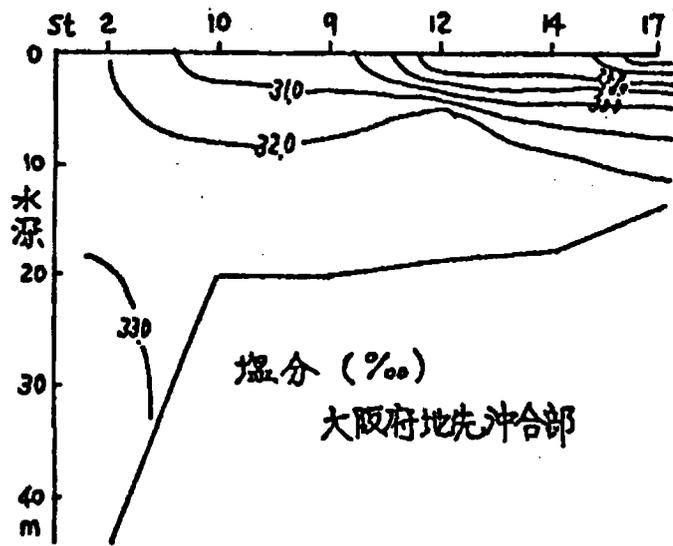
塩分の水平分布(表層) (1973年7月2~3日)

〔冬季〕

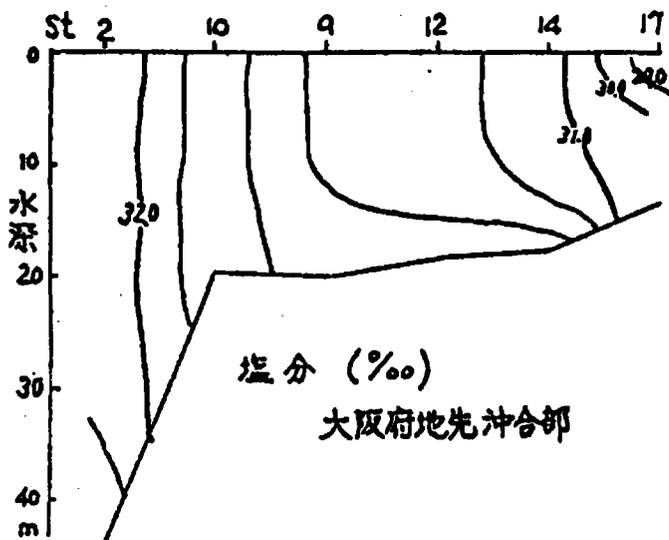


塩分の水平分布(表層) (1976年1月7~8日)

図2.6.7 塩分の水平分布



塩分の断面分布 (1973年7月2~3日)



塩分の断面分布 (1976年1月7~8日)

図2.6.8 塩分の断面分布

4. 1. 8 水 温

水温の観測は塩分と同様に神戸海洋気象台によって定期的に行われている。断面位置図より紀淡海峡部に最も近い位置は No.10 である。水温断面図の No.10 の水深 30m 付近を見ると、冬季が 9~10℃、夏期は 23℃ 程度となっており、温度差は 14deg 程度である。

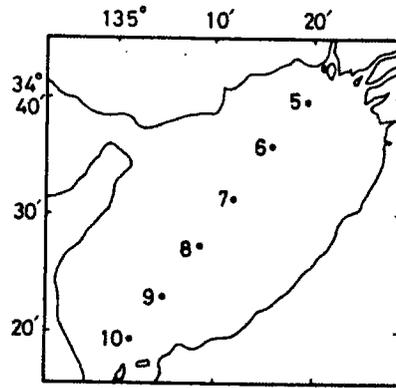
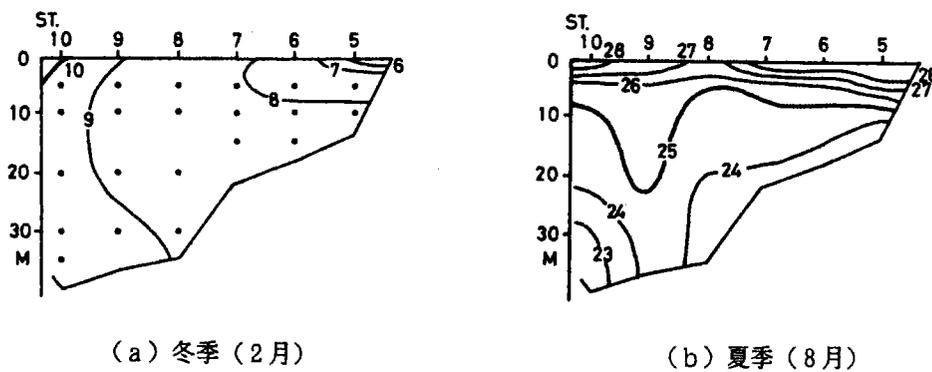


図2.6.6 断 面 の 位 置



(a) 冬季 (2月)

(b) 夏季 (8月)

図2.6.5 大阪湾の水温断面図

— 参考文献 —

出典①：紀淡連絡道路の調査 建設省近畿地方建設局近畿幹線道路調査事務所

出典②：岩盤上の大型構造物基礎 土木学会

出典③：気象海象要覧 大阪湾 財団法人日本気象協会

4. 2 道路条件

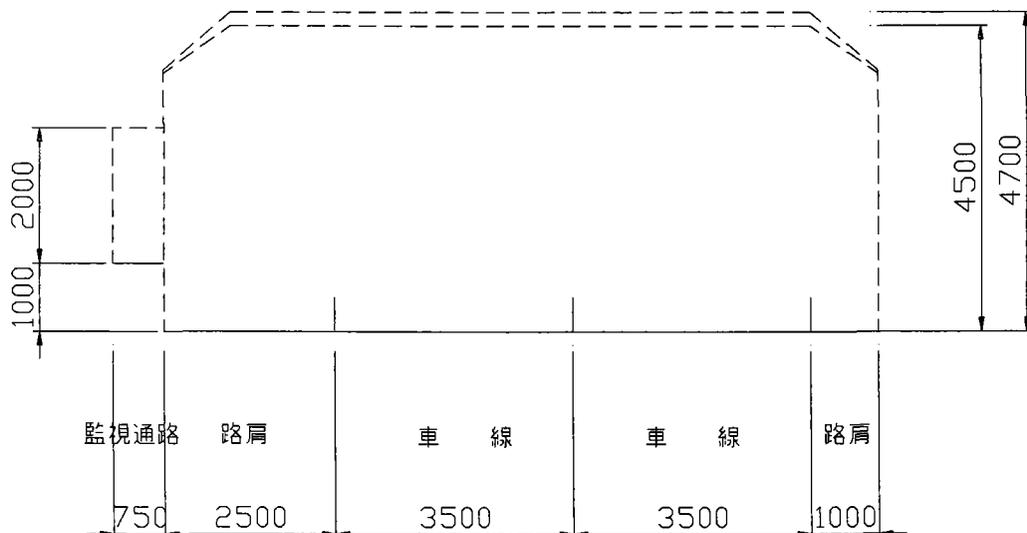
4. 2. 1 道路構造

道路構造は明石海峡大橋や「高規格幹線道路 幾何構造基準（案） 平成元年9月 建設省道路局」を基に設定する。

紀淡海峡（友ヶ島水道）に計画する水中橋梁は以下の通りと想定する。

- 道路区分 : 第1種第2級（明石海峡大橋と同様）
- 設計速度 : V=100km/h（明石海峡大橋と同様）
- 車線数 : 4車線
- 幅員構成, 建築限界 : 片側あたりの幅員構成は下図の通りとする。

左路肩の2.5mは非常駐車帯を設けなくてもよい幅を選定した。

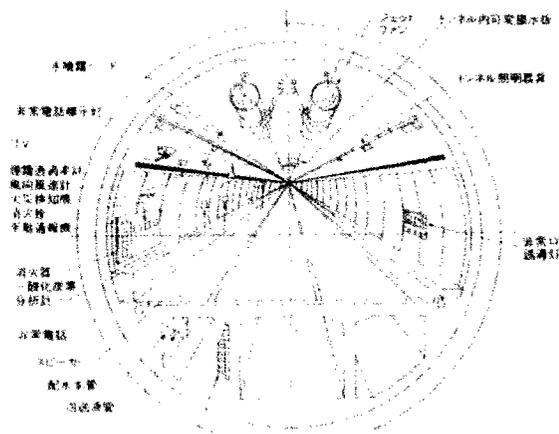


4. 2. 2 非常用設備・換気設備等

函体内部には標識や換気用設備, 非常用設備等が設置される。これらは建築限界外側のスペースを活用することとなる。特に換気設備については次頁以降の参考資料（出典：近畿地方建設局設計便覧第5編機械編）に示す余裕幅を考慮する。

〈トンネル非常用設備概要〉

- 通報・警報設備＝非常電話
 押ボタン式通報装置・火災検知器 非常警報装置●消火設備＝消火器 消火栓●避難誘導設備＝誘導表示板 排煙設備 避難通路(昇降設備) 避難口●その他＝給水栓 無線通信補助設備 ラジオ再放送設備 拡声放送設備 水噴霧設備 監視装置 床版下非常電話 停電時照明設備 非常用電源設備

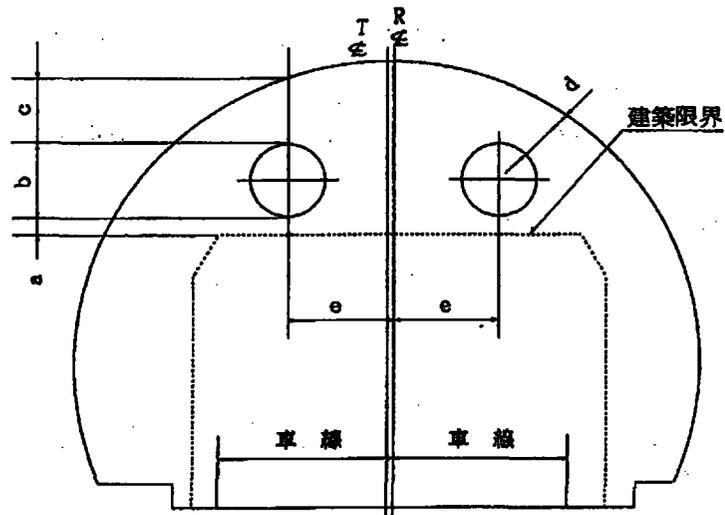


図一4. 7 東京湾横断道路トンネル非常用設備概要図

(資料)

表 3 - 5 - 1(c) 取付寸法

形 式	a	b	d
J F 400	200	550	250
J F 600	200	800	250
J F 1000	200	1,200	250
J F 1250	200	1,450	250
J F 1500	200	1,750	250



- a : 200mmは最少寸法である。(オーバーレイ寸法は含まない)
- b : 表 3 - 5 - 1(c)による。
- c : 250 ~ 500mmが一般的であり 250mmは最小寸法である。
- d : 250mmは最小寸法である。
- e : 保守管理時にリフト車等の車両が隣車線に入り、交通障害にならぬ様にする。
一般に車線幅の1/2以上必要である。

— 参考資料② 非常用設備一覧 —

参考資料 非常用施設の設置基準

通路トンネルには、トンネルの等級に応じ表10-1-1に示す施設を設けるものとする。

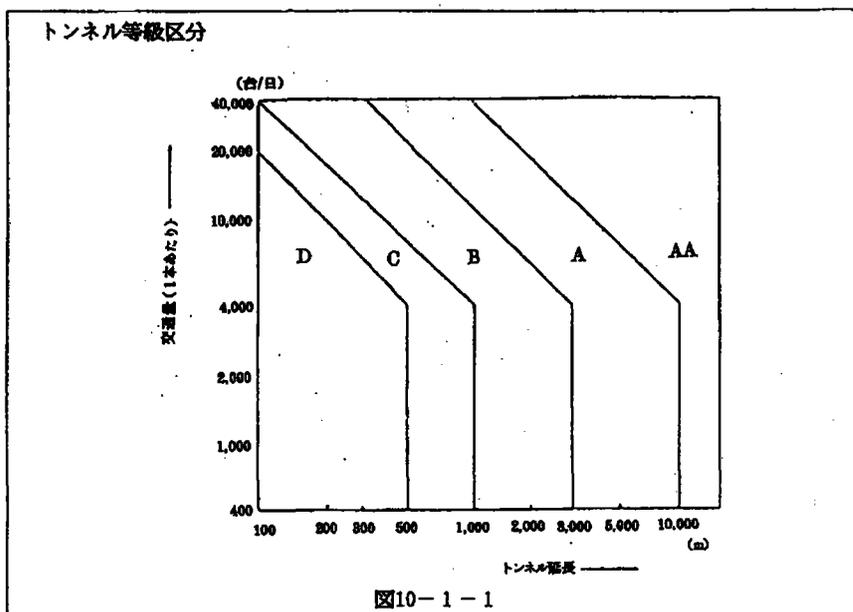
表10-1-1 非常用施設

非常用施設		トンネル等級				
		AA	A	B	C	D
通報・警報設備	非常電話	○	○	○	○	
	押ボタン式通報装置	○	○	○	○	
	火災報知器	○	△			
	非常警報装置	○	○	○	○	
消火装置	消火器	○	○	○	(※)	
	消火栓	○	○			
避難誘導設備	誘導標示板	○	○	○		
	排煙設備または避難通路	○	△			
その他の設備	給水栓	○	△			
	無線通信補助設備	○	△			
	ラジオ再放送設備 または拡声放送設備	○	△			
	水噴射設備	○	△			
	監視装置	○	△			

(注) 上表中「○印は原則として設置する」、「△印は必要に応じて設置する」ことを示す。

(解説)

※ C等級のトンネルについては、原則として消火器を設置するものとする。



4. 3 検討条件

4. 3. 1 使用材料

使用が可能と考えられる新素材として、アラミド FRP が挙げられる。

[アラミド FRP について]

アラミドのロッドは、以下の利点があり、海洋構造物には適している素材である。

- ・ 引っ張り強度が鋼以上ある
- ・ 破断時の伸びが大きくじん性が期待できる
- ・ 錆びない、酸アルカリに強い
- ・ 非伝導体である

しかし、曲げに弱い（ねじったり曲げたりするとすぐ破断する）、弾性率が鋼の 1 / 3 なのでたわみやすい等の欠点もあり、テンションレグとして採用するには以下のような注意が必要である。

- ・ 定着部においてアラミドに曲げがかからない構造とする
- ・ 変位をどの程度まで許容するか 等

アラミドシートを脚に巻き付けて補強することは実際行われており、外鋼板の代わりに防錆と引張力に抵抗するため、アラミドシートを函体に貼り付けることは考えられる。

使用材料は、その特性や耐食性、経済性等を考慮し、その部材に適したものを選定する必要がある。

今回の検討では、使用材料は基本的に現在において使用されている材料を用いることとする。

4. 3. 2 荷 重

(1) 死荷重

検討に用いる材料の単位体積重量は以下の通りとする。

単位体積重量	コンクリート	・・・24.5kN/m ³
	鋼殻	・・・0.5kN/m ³ （コンクリートの m ³ あたり）
	海水	・・・10.0kN/m ³

この他ハンチ部や付属物の合計として函体死荷重の 5%程度を見込む。

(2) 活荷重

活荷重は道路橋示方書および本州四国連絡橋公団の上部構造設計基準に従う。

(3) 温 度

前述の「2. 紀淡海峡の自然条件」に示してあるように、水中では季節による温度差は小さい。また、設置位置が海面より 30m 辺りとなっており、温度差が生じるような状況とは考えにくい。よって完成後の温度荷重は考慮しないこととする。

(4) 潮流力

潮流力は水平方向の抗力とそれに直行する鉛直方向の揚力があり、以下の式によって算出される。

$$\text{抗力(tf/m)} \quad F_D = \frac{1}{2} \cdot \frac{w}{g} \cdot C_D \cdot u(z)^2 \cdot A$$

$$\text{揚力(tf/m)} \quad F_L = \frac{1}{2} \cdot \frac{w}{g} \cdot C_L \cdot u(z)^2 \cdot A$$

w : 海水の単位体積重量 (tf/m³)

g : 重力加速度 (9.8m/sec²)

C_L : 揚力係数

C_D : 抗力係数

u(z) : 海底面から z(m)の位置での流速 (m/sec)

$$u(z) = u_s \left(\frac{z}{h} \right)^{\frac{1}{7}}$$

z : 海底面からの高さ (m)

u_s : 海面における流速 (m/sec)

h : 水深 (m)

A : 投影面積 (m²/m)

(5) 波力

小口径水中部材に作用する波力として、以下のモリソン式により算出する。

$$\text{波力(tf/m)} \quad F = \frac{1}{2} \cdot \frac{w}{g} \cdot C_D \cdot u \cdot |u| A + \frac{w}{g} \cdot C_M \cdot \dot{u} V$$

w : 海水の単位体積重量 (=1.03tf/m³)

g : 重力加速度 (=9.8m/sec²)

C_D : 抗力係数 (円柱の場合 1.0)

C_M : 慣性力係数 (円柱の場合 2.0)

u : 波による水粒子速度 (m/sec)

\dot{u} : 波による水粒子加速度 (m/sec²)

A : 投影面積 (m²/m)

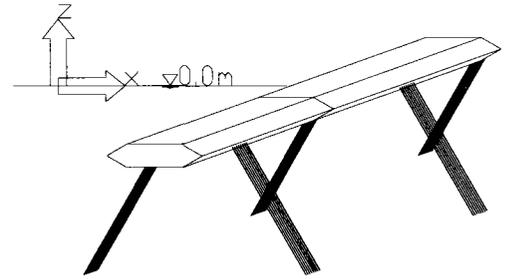
V : 単位長さあたりの体積 (m³/m)

水粒子速度、水粒子加速度は以下の式より算出される。

水粒子速度(m/s)

$$u = \frac{\pi H}{T} \frac{\cosh \frac{2\pi(z+h)}{L}}{\sinh \frac{2\pi h}{L}} \sin\left(\frac{2\pi}{L}x - \frac{2\pi}{T}t\right)$$

$$w = \frac{\pi H}{T} \frac{\sinh \frac{2\pi(z+h)}{L}}{\sinh \frac{2\pi h}{L}} \cos\left(\frac{2\pi}{L}x - \frac{2\pi}{T}t\right)$$



水粒子加速度(m/sec²)

$$\dot{u} = -\frac{2\pi^2 H}{T^2} \frac{\cosh \frac{2\pi(z+h)}{L}}{\sinh \frac{2\pi h}{L}} \cos\left(\frac{2\pi}{L}x - \frac{2\pi}{T}t\right)$$

$$\dot{w} = -\frac{2\pi^2 H}{T^2} \frac{\sinh \frac{2\pi(z+h)}{L}}{\sinh \frac{2\pi h}{L}} \sin\left(\frac{2\pi}{L}x - \frac{2\pi}{T}t\right)$$

ここに、 u : x 軸方向の水粒子速度 (m/s)

w : z 軸方向の水粒子速度 (m/s)

\dot{u} : x 軸方向の水粒子加速度 (m/sec²)

\dot{w} : z 軸方向の水粒子加速度 (m/sec²)

z : 鉛直方向部材中心位置 (m)

h : 水深 (m)

L : 波長 (周期、水深より求まる)

T : 周期 (sec)

x : 波の進行方向 (水平方向) の座標

t : 時間

表-4.5 抗力係数 C_D 一覧 (出典: 海の構造物と基礎 土質工学会編)

表-4.6 単一部分材の抗力係数の標準値⁹⁾

風向	断面形	C_D	風向	断面形	C_D
→	平板	2.0	→	ウェブが風向に直角なT形断面	1.8
→	一辺を地に接した平板	1.2	→	フランジを風下にしたT形断面	1.5
→	ウェブが風向に直角なI形断面	2.0	→	風向に平行におかれた正方形断面	2.0 (1.2)
→	風向に45°に傾斜したI形断面	1.6	→	風向に45°傾斜した正方形断面	1.5 (1.5)
→	フランジが風向に直角なI形断面	1.8	→	長辺が風向に平行な長方形断面	1.4 (0.6)
→	風向に45°傾斜した山形断面	1.1	→	短辺が風向に平行な長方形断面	2.2 (1.6)
→	一辺を風下に立てた山形断面	1.8	→	頂点を風上にした正三角形断面	1.2 (1.1)
→	頂点を風下に立てた山形断面	1.7	→	頂点を風下にした正三角形断面	2.0 (1.3)
→	頂点を風上にした山形断面	1.5	→	円形断面	1.2 (0.7)
→	下フランジを風上にしたT形断面	2.0	→	十二角形断面	1.3 (1.0)

(注) ()は1辺のみの径をもって切り取った場合、()は限界レイノルズ数以上における数値。

表-4.6 揚力係数 C_L 一覧 (出典: 海の構造物と基礎 土質工学会編)

表-4.12 揚力係数の標準値¹⁰⁾

物体形状と流向	C_L	→	C_L
→ □	0	→	2.07
→	0	→	-0.09
→ I	0	→	-0.48
→ T	0	→	0
→ T	0	→	-1.19
→ L	0.3	→	0

表-4.7 慣性力係数 C_M 一覧 (出典: 海の構造物と基礎 土質工学会編)

表-4.14 質量係数 C_M の値

物体の形状 (柱の場合、軸方 向は紙面に直角)	基準体積 (柱の場合 は単位長)	質量係数 (l : 柱の長さ)
円柱	$\frac{\pi}{4}d^2$	$2.0(l > d)$
正角形	d^2	$2.19(l > d)$
長方形板	$\frac{\pi}{4}d^2$	$1.0(l > d)$
球	$\frac{\pi}{6}d^3$	1.5
立方体	d^3	1.67

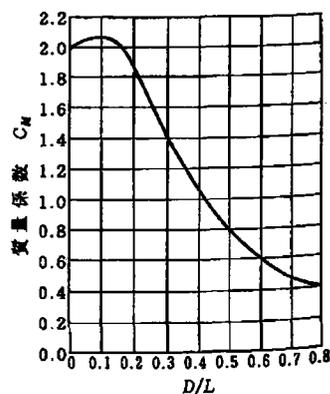


図-4.15 円柱の質量係数

4. 3. 4 設置水深

設置水深は航行船舶の吃水が主な要因で決定される。しかし、計画地点の航行船舶が不明であることから、現段階では最大級の大型船の吃水を 20m 程度とみなし、5m の余裕を見込んで、25m のクリアランスを確保するものとする。

— 参考資料 日本財団ホームページより抜粋 —

<http://lib1.nippon->

[foundation.or.jp/1997/1187/contents/132htm](http://lib1.nippon-foundation.or.jp/1997/1187/contents/132htm)

(3) 航路の水深

航路の水深は設計水準面(Design Water Level)から通航させようとする最大船舶の最大喫水 D に、図 3.5-5 の諸量を加えた水深を確保する。ここで、各項の意味は次のとおりである。

- T_1 : 航路航行中の潮高変化
- T_2 : 未知の気象学的理由による水深変化量
- z_1 : 喫水計測の誤差
- z_2 : 海水密度の変化による誤差
- z_3 : スコット(例えば Tuck-Taylor の推定式から推定)
- z_4 : 波による船体応答上下量(例えば $0.3 \sim 0.5H_d$ ここで H_d は設計波)
- z_5 : キール下余裕量 50cm から 1m、ただし堅い浅瀬があるときは 1.5m
- z_6 : 海底のレベルの不確かさ(測量誤差)約 15cm から 20cm
- z_7 : 浚渫後の海底変化(約 50cm から 2m)
- z_8 : 浚渫工事の誤差

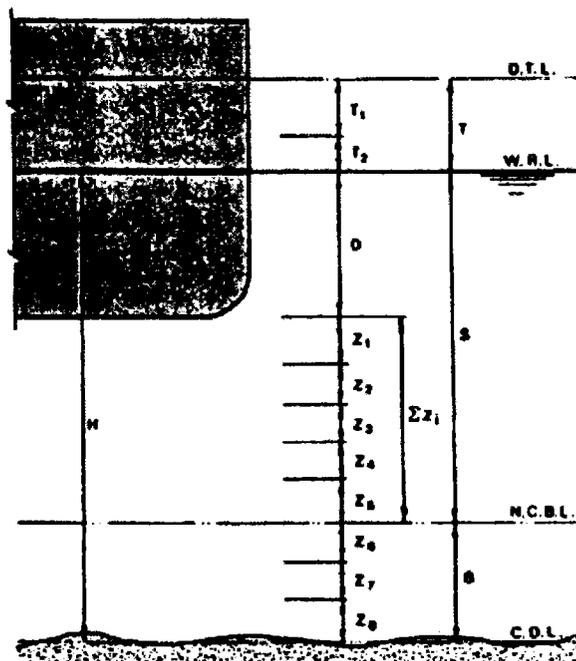


図3.5-5 水深余裕量(UKC)の決定

以上は諸外国の文献からの推奨値であるが、わが国では海難防止協会で検討された同種の資料がある(海難防止協会[25])。

4. 3. 5 函体の長さ

沈埋函の1セグメント長さは、製作・積み込みは無理をすれば200m位までは可能だが、その場合輸送が問題となる。現在、国内最大級の船はオーシャンオルカ(深田 S、24000t、積み込み可能長さ約100m、セミサブ方式)ぐらいしかなく、それ以上の長さを輸送しようとするれば全て特注となり経済的に高くなる。技術的には現地で継ぎ足すことも可能(水中溶接等)だが品質、経済性、工期の面で問題が有る。よって、製作・積み込み・輸送、その他を考慮し、なおかつ品質、経済性、工期の面で無理のないのは100mぐらいが妥当と思われる。重量が軽くFCでの吊り上げが可能な場合はもう少し長くてもよいが、その場合は現地までFCを連れて行くことになる。

以上は沈埋トンネルの例であるが、水中橋梁の函体も製作・施工面では沈埋函とほぼ同様と考えられることから、今回の検討においては水中橋梁の1セグメント長を100mとする。