

參考資料

1. 設計風速の設定方法（本編 5.2.6 の参考資料）

浮体橋の風荷重の設定例として夢舞大橋の例を紹介する¹⁾。

1.1 設定方法

1.1.1 設計基本風速 (V_{10})

設計基本風速は高度 10m での 10 分間の平均風速である。架橋地点での風速データを使用するのが理想的であるが、そのようなデータがない場合は最寄りの気象台の記録を代用する。

夢舞大橋の場合、北港ヨットハーバー（架橋地点より北へ約 2km）での風観測記録（1987～1995）と大阪管区気象台（以下管区と呼ぶ）との相関係数（16 方位・4 方位・全方位）を求めた（図-1.1.1）。

管区での年最大風速（1931～1995）から現地の記録に換算した。これらのデータを極値 I 型分布に当てはめて確率風速を求めた。なお、観測データの補正法は後述する。

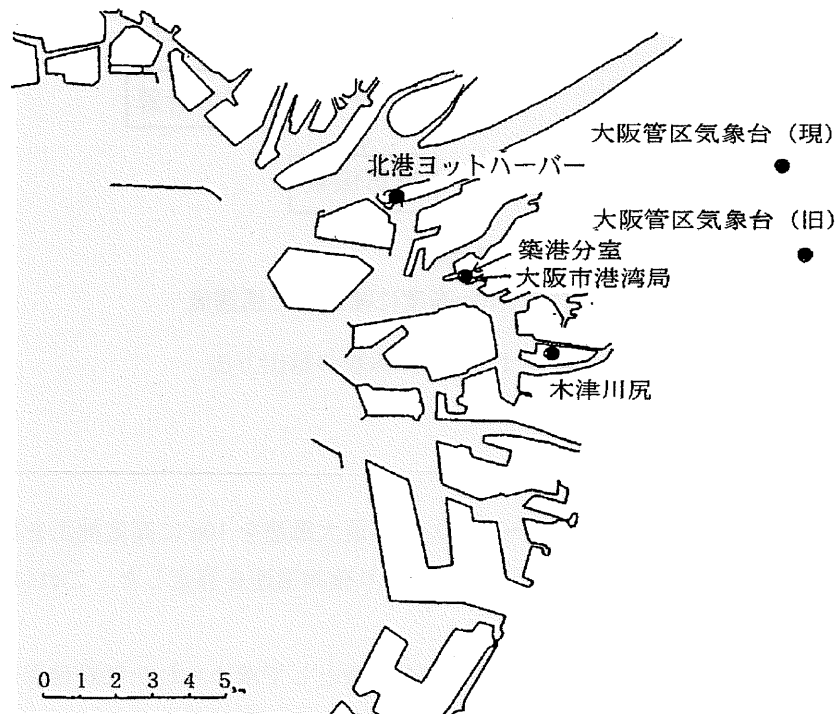


図-1.1.1 観測地点位置

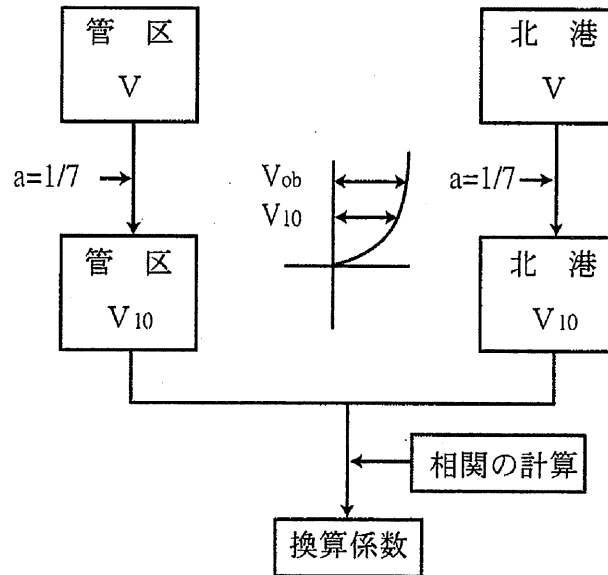
1.1.2 スペクトル

スペクトルは現地風速から得られた形状をダavenportや日野スペクトルで当てはめ近似の良いものを選ぶことにした。しかし、両者にあまり差がないことから、動揺シミュレーションおよびガスト応答解析で構造設計上不利になり、国内でよく使用されるなどの総合的な観点から日野スペクトルを選んだ。最近、海洋関係では Ochi&Shin、加藤らは海上風に対して低周波数側で

実測に合うようなスペクトル表示を提案している²⁾。

1.1.3 観測データの補正

観測点の高度補正は、 $1/7$ 乗則で行い高度10mでの風速に補正した。管区は古くは20分間平均風速であったので、それらの記録は α （換算係数） $=1.1$ 倍して10分間平均風速に平準化した(図-1.1.2)。



- ※ V : 実測風速値
 V_{10} : 地上10m高度に補正した風速値

図-1.1.2 換算係数の算出方法

1.1.4 確率風速

大阪管区気象台の年最大風速（1931～1995）の年最大風速を10mに高度補正を行った後、北港の風に換算して、Petruaskas-Aagaardの方法により確率風速を算定した。これにより得られた確率風速分布図を（図-1.1.3）に示す。

この結果から、比較的高風速（17m/s以上）を対象として求められた架設地点における100年期待値（耐用年数50年，非超過確率：0.605）として、数値をまるめて $V_{10}=42\text{m/s}$ とした。

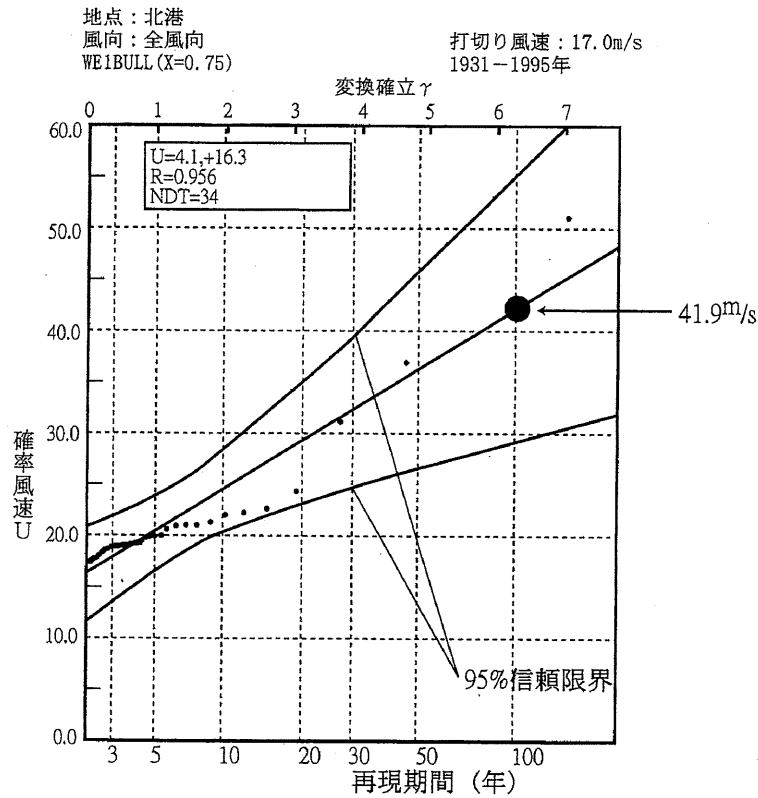


図-1.1.3 全方位による確率風速

1.2 台風シミュレーション

Myers の式を用いたシミュレーションにより、架設地点に最も被害を与えるモデル台風を想定した。このシミュレーションは気圧の計算を行い、気圧差から風速を算出する。波高は風の吹き寄せの効果も勘案して決定した。

1.2.1 モデル台風の設定

- ① 仮想台風 A………第 2 室戸台風 (6118 号) 規模で、コースは第 2 室戸 (ケース 0) とそれより経度で 0.1° ずつ東へずらした計 5 ケース (ケース 1 ~ 5) (図-1.2.1)
- ② 仮想台風 B………伊勢湾台風 (5915 号) 規模で、コースは室戸台風 (3412 号) のケース (図-1.2.2)

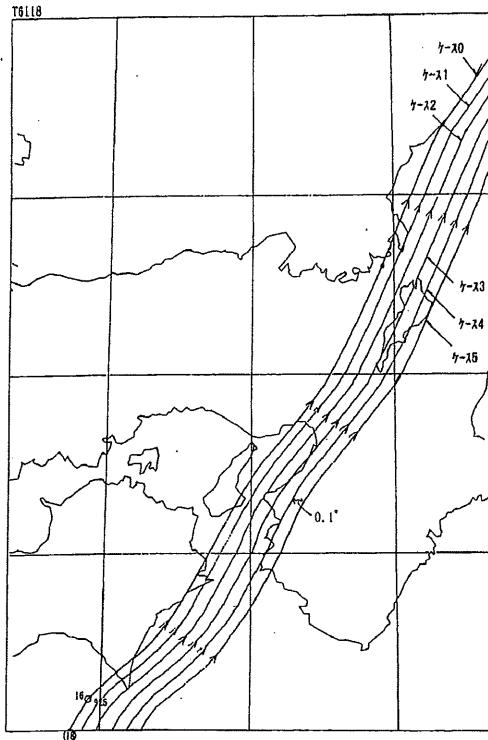


図-1.2.1 仮想台風 A の経路図

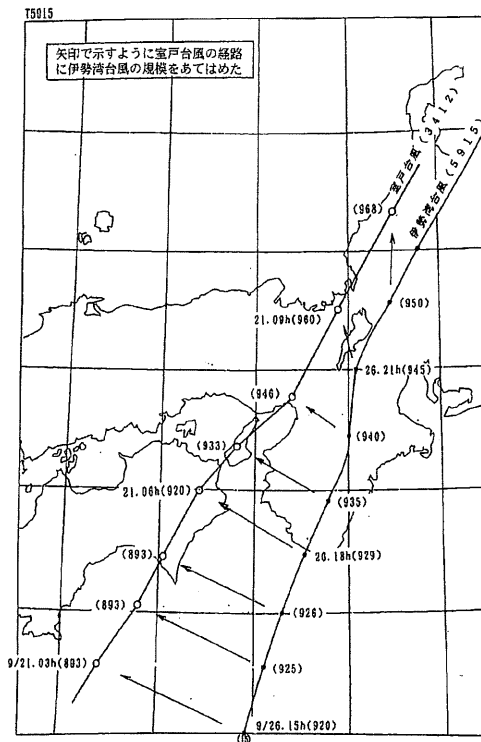


図-1.2.2 仮想台風 B の経路図

1.2.2 計算結果

計算結果を表-1.2.1, 表-1.2.2 に示す。風速の最大値は 46.6 m/s であるが, 台風シミュレーションでは地表の粗度を考慮しておらず高く計算されることから, $V_{10}=42\text{m/s}$ は妥当な値であることが分かった。

また, 風速と波高の経時変化には位相のずれがある(図-1.2.3)。よって, 荷重として最大風速と最大波高の重ね合わせで設計することは安全側になっていることがわかる。

表-1.2.1 仮想台風の計算結果 (仮想台風 A)

	経路	ピーク の 値			
		波高(m)	周期(s)	風向	風速(m/s)
ケース0	第2室戸 (T6118号)	3.67	5.8	WSW	46.6
ケース1	第2室戸 +0.1 'E ^{注)}	3.42	5.6	WSW	45.0
ケース2	第2室戸 +0.2 'E	3.23	5.4	WSW	43.3
ケース3	第2室戸 +0.3 'E	3.06	5.3	W	41.6
ケース4	第2室戸 +0.4 'E	2.89	5.1	W	39.5
ケース5	第2室戸 +0.5 'E	2.78	5.1	W	37.2

注) : 経路に例えば 0.1 'E とあるのは, 第2室戸台風の経路を東に 0.1° 移動させることである。

表-1.2.2 仮想台風の計算結果 (仮想台風 B)

	経路	ピーク の 値			
		波高(m)	周期(s)	風向	風速(m/s)
ケース0	室戸台風	2.95	5.3	WSW	39.4

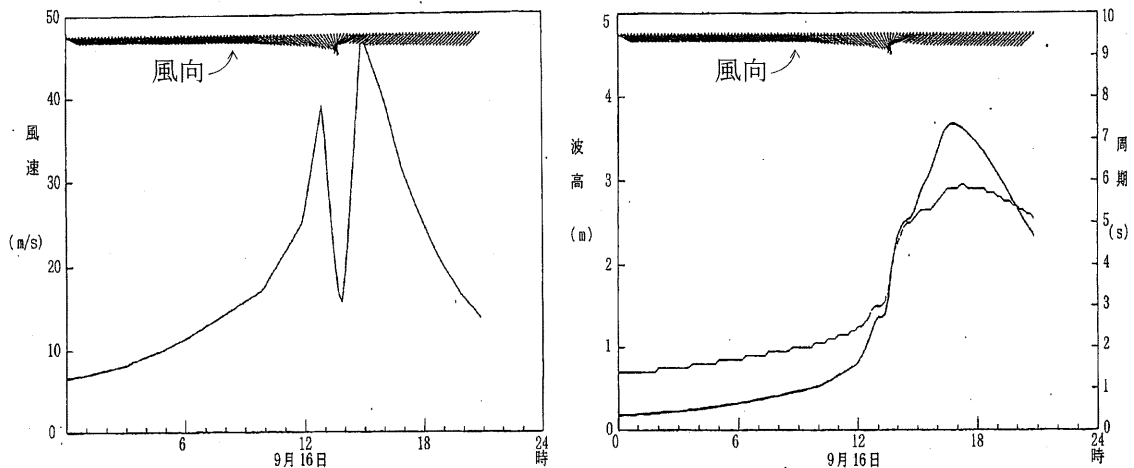


図-1.2.3 風・波浪経時変化図 ケース0

1.3 まとめ

1) 大阪地域の強風特性は、極値 I 型または II 型いずれにも適合しないと指摘されているが、標準的に用いられる極値 I 型への当てはめから、 $V_{10}=42\text{m/s}$ とした。

(本編 表-5.2.1 の最右欄の極値 I 型を適用したものに相当する)

2) 台風シミュレーションによっても、その値の妥当性が支持された。参考までに大阪港付近の代表的な橋梁の設計基本風速を表-1.3.1 に示す。

表-1.3.1 大阪港付近の代表的橋梁の設計基本風速データ

橋梁名		設計基本風速	基本風速の定義	
阪神高速道路 公団設計基準	湾岸部	42 m/s	高度 10mにおける 10 分間平均風速	再現期間：100 年 非超過確率 0.605 (耐用年数：50 年)
	内陸部	30 m/s	同 上	
天保山大橋		50 m/s	同 上	再現期間：100 年 非超過確率 0.495 (耐用年数：70 年)
東神戸大橋		40 m/s	同 上	再現期間：100 年 非超過確率 0.605 (耐用年数：50 年)
明石海峡大橋		46 m/s	同 上	再現期間：150 年 非超過確率 0.605 (耐用年数：75 年)
道路橋示方書		40 m/s	同 上	再現期間：100 年 非超過確率 0.605 (耐用年数：50 年)

参考文献

- 1) 大阪市：夢舞大橋工事誌，2002.3
- 2) (社)日本造船学会海洋工学委員会性能部会編：超大型浮体構造物，成山堂書店，1995.8

2. 鋼の防食工法（本編 6.3.5 の参考資料）

2.1 電気防食工法

電気防食工法には、次の2つがある¹⁾。

- (1) 流電陽極方式
- (2) 外部電源方式

港湾構造物に適用される電気防食工法は、海水中、海底土中での防食効果は高く、経済性に優れており、対象施設の新設、既設を問わず防食できるなどの利点があり、また防食システムの寿命を幅広く選択できるなど総合的に優れた信頼性の高い防食工法であるといえる。写真-2.1.1に、海水中に暴露した無防食および電気防食実施杭から切り取った試験片を示す。無防食試験片（上側）には腐食による凸凹が認められるが、電気防食実施試験片（下側）には腐食は認められないことが分かる²⁾。

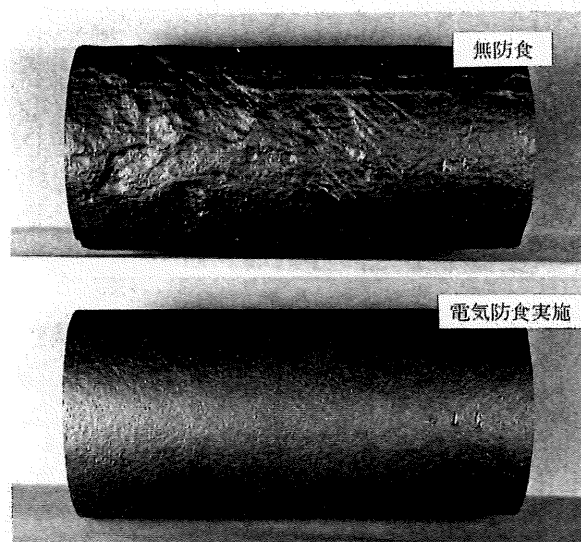


写真-2.1.1 無防食と電気防食適用との鋼材表面の比較

表-2.1.1 に両方式の特徴を示す¹⁾。

維持管理については、定期点検や長期にわたる補修、部品交換などを必要とする外部電源方式に比べ、流電陽極方式では故障する部品もないため、はるかに容易である。経済性についても、初期の建設費は両方式に大きな差はなく、維持電力費および長期間のメンテナンス費用を考慮に入れると、流電陽極方式が経済的であることが多い。わが国では、港湾鋼構造物の電気防食としてはほとんどが流電陽極方式を用いている。

防食効果は、両方式とも同等の効果が得られるが、外部電源方式による電気防食装置では、入念な維持管理が必要である。過去に建設された外部電源方式による電気防食装置でも、十分に管理されている施設では現在も良好な防食効果が得られている。

表-2.1.1 防食方式の特徴

方 式	特 徴
流電陽極方式	1) メンテナンスが容易である 2) 長期的な防食に適している 3) 施工が容易である 4) 陽極寿命を自由に設定できる 5) 小規模，独立した設備にも適用できる 6) 交流電源のない場所でも適用できる
外部電源方式	1) 出力電圧を自由に調節できる 2) 高流速下，河川水混入下等，変化の激しい特殊な環境にも対応できる

2.2 塗覆装工法

塗覆装工法には，次の種類がある¹⁾。

- (1) 塗装
- (2) 有機ライニング
- (3) ペトラタムライニング
- (4) 無機ライニング

2.2.1 塗装

塗装は，元来半永久的なものではなく適当な周期で塗り替えることを前提とした防食法である。海洋環境に位置する鋼構造物への塗装仕様は，表-2.2.1に示すものである。一般に下塗り塗料として無機，有機ジンクリッチペイントが用いられ，中塗り塗料には，タール・エポキシ樹脂塗料等が用いられ，また美観の面からはチョーキングを防止するためには，耐候性の良いポリウレタン樹脂塗料，シリコン樹脂塗料およびフッ素樹脂塗料が上塗りとして効果的である³⁾。

表-2.2.1 海洋環境へ適用される塗装系

塗装系		
下塗り	中塗り	上塗り
ジンクリッチペイント	タールエポキシ樹脂塗料	フッ素樹脂塗料, シリコン樹脂塗料, ポリウレタン樹脂塗料のいずれかを用いる
ジンクリッチペイント	エポキシ樹脂塗料	
ジンクリッチペイント	ガラスフレーク入り エポキシ樹脂塗料	
ジンクリッチペイント	超厚膜型エポキシ樹脂塗料	

塗装は、下記の特長がある。

- ①大型構造物や複雑な形状にも施工が可能である。
- ②新規、補修とも施工が容易であり、また塗り替えによって適時に、比較的簡単に塗面を更生することができる。
- ③膜厚が薄く軽量で、防食、美装ができる。
- ④環境条件に応じて塗料の種類や膜厚を選択し、いろいろの塗装系で施工できる。
- ⑤耐用年数は、塗装系によって数年から10数年であるが、比較的安い費用で防食できる。

2.2.2 有機ライニング

有機ライニングには、次の種類がある¹⁾。

- (1) ポリエチレンライニング
- (2) ウレタンエラストマーライニング
- (3) 超厚膜型ライニング
- (4) 水中施工形ライニング
- (5) 防食テープライニング
- (6) FRP ライニング
- (7) ゴムライニング

1) 有機ライニングは、塗装に比して膜厚が2~10mmと厚く、防食性、耐衝撃性、耐摩耗性が特に優れており、一般に保護カバーを必要としないことや、電気防食との併用が可能である等の特長を持っている。

①有機ライニングは、施工場所によって下記のように分類される。

工場で被覆し、プレ防食鋼材として供給されるもの……ポリエチレンライニング、ウレタンエラストマーライニング

②主に現地ヤード等で施工されるもの……超厚膜形ライニング、ゴムライニング、FRPライニング

③主に現地で施工するもの……水中施工形ライニング，防食テープライニング

表-2.2.2に，各種有機ライニング工法の特徴について示す¹⁾。

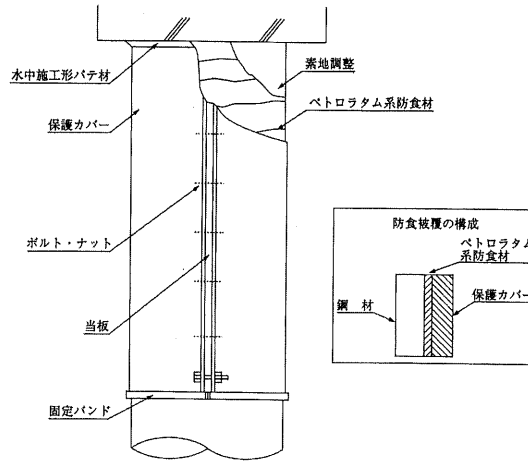
表-2.2.2 有機ライニング工法の特徴

防食工法	標準膜厚 (mm)	標準施工法	施工場所			特徴
			工場	現地 ヤード*	現地	
ポリエチレン ライニング	2~3	押出し 張付け	○			工場生産で品質安定 大量生産可能で安価
ウレタンエラスト マーライニング	2~3	塗布	○			工場生産で品質安定 大量生産可能で安価
超厚膜形 ライニング	1~5	塗布	○	○		特殊塗装機によるス プレーが可能
水中施工形 ライニング	1~10	ハンドワーク		○	○	水中で施工が可能で ある
	0.1~1	ハケ，ローラ				
防食テープ ライニング	0.3~5	粘着		○	○	水中で施工が可能で ある
FRPライニング	2~5	ハンドレイアップ		○		耐摩耗性がよい 複雑な形状も可能
ゴムライニング	3~15	シート張付け +加硫	○	○		耐衝撃，耐摩耗性がよ い

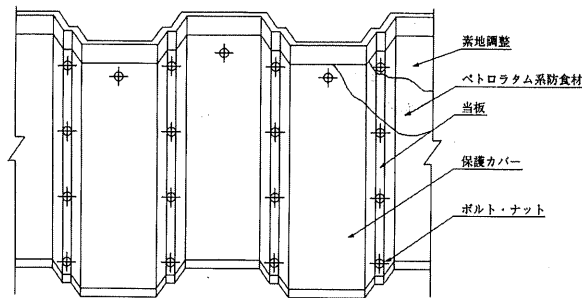
2.2.3 ペトラタムライニング

ペトラタムライニングは，ペトラタム系防食材と保護層の組み合わせからなるものとする¹⁾。

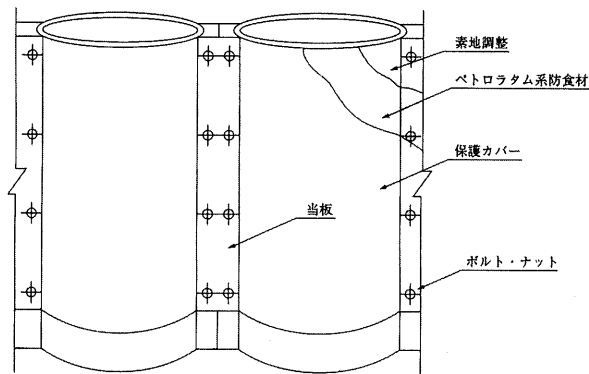
- 1) ペトラタムライニングとは，ペトラタムを主成分とするペトラタム系防食材料により鋼材を被覆する防食法である。被覆した防食材を波浪や漂流物の衝突などの外力から守るとともに，さらに腐食環境から遮断して耐久性を増すため保護層として保護カバーを設ける。保護カバーの下に発泡材等の緩衝材を入れて保護層とすることもある。
- 2) この工法は，新設，既設を問わず適用でき，水中での施工も可能である。また，素地調整が比較的簡単で施工後の養生期間も必要としない。
- 3) 図-2.2.1に港湾鋼構造物に適用した例を示す。



(a) 鋼管杭の例



(b) 鋼矢板の例



(c) 鋼管矢板の例

図-2.2.1 ペトロラタムライニングの例

2.2.4 無機ライニング

無機ライニングには、次の種類がある¹⁾。

- (1) モルタルライニング
 - (a) 型枠を取り外す方法
 - (b) 型枠を保護カバーとしてそのまま残す方法
- (2) 金属ライニング
 - (a) 鋼板巻
 - (b) 耐食性金属ライニング
 - (c) 厚板クラッド鋼
 - (d) 金属溶射
- (3) 電着ライニング

- 1) モルタルライニングとは、セメントモルタルやコンクリートによる被覆を総称したもので、型枠を取り外す方法と型枠を保護カバーとしてそのまま残す方法がある。この工法の防食性は、セメントの高アルカリ性により鋼材表面の不動態化と、酸素や水の侵入を防止することにより鋼材を腐食から守る方法である。防食層の厚さは工法により異なるが30～150mm程度であり、ある程度厚い防食層は鋼材の補強効果も期待できる¹⁾。

最近では、コンクリートやモルタルが直接露出する型枠を外しての工法は、塩分がコンクリート中へ浸透することにより鉄筋の腐食や流木等の衝突によりひび割れが発生し、最終的にはコンクリートの剥離、剥落を伴うので適用されなくなっている。型枠を保護カバーとしてそのまま残す方法は、衝撃による損傷や海水による中性化からモルタルを保護する目的で強固で水密性が高く耐食性のすぐれた材料で作った型枠を使用し、モルタル打設後もそのまま残すものである。その型枠材料は、FRP、FRVのプラスチックやGFRCおよび金属が使用されている¹⁾。

- 2) 金属ライニングとは、金属を鋼の表面に取り付けて防食する方法である。この方法は、他の防食被覆に比べ、機械的強度が大きく、耐衝撃性、耐磨耗性にも優れているため、鋼材の運搬時や施工中に損傷を受けにくく、また、塗装や電気防食との併用も可能であることから、長期メンテナンスフリーで使用できる。その一方で材料費を含めた初期投資が比較的大きくなる傾向にある。しかし、構造的に要求される耐用年数やメンテナンスコスト等から近年使用が増えつつある¹⁾。

①鋼板巻（犠牲鋼板，耐食性鋼）

構造用の鋼材に防食層として鋼板を巻いて溶接する方法である。鋼板として普通鋼を使用する犠牲鋼板巻，耐食性鋼として飛沫帯から海中部にかけて低合金系耐海水鋼を使用する耐食性鋼板巻がある。

②耐食性金属（モネルメタル，ステンレス鋼，チタン）

低合金系耐食性鋼よりさらに優れた耐食性を有する金属材料を用いてライニングする方法で，金属材料としてモネルメタル，ステンレス鋼，チタン等があり，被覆の方法にも金属板巻，薄板クラッド鋼ライニング等がある。

モネルメタルは，ニッケルをベースとするニッケル銅合金のことで，石油掘削用ジャケット等広く使用されている。

ステンレス鋼は，一般にSUS304が使用されているが，海水環境に強いオーステナイト系ステンレス鋼（SUS316L）や二相系ステンレス鋼（SUS329J4）等もある。最近では，耐海水性に優れたスーパーステンレス鋼（高Cr－高Ni－高Mo－高Nを含有するオーステナイト系ステンレス鋼）も開発され，防食材料として1997年頃から用いられている。

チタンは，モネルメタル，耐海水性ステンレス鋼よりさらに優れた耐食性を有する金属材料である。チタン材料は，高価であるが，構造物に要求される耐用年数，メンテナンスコスト等を考慮したライフサイクルコストを最小にする観点から近年使用が増えつつある。

③厚板クラッド鋼（ステンレス鋼，チタン）

耐食性金属であるステンレス鋼，チタンを利用した厚板のクラッド鋼をそのまま構造物として使用する防食法である。

④金属溶射

金属溶射は，熔融状態の金属をガスまたは空気です素地に吹き付け金属被覆を形成させる方法で，犠牲防食効果を兼ねている。溶射金属には，亜鉛，アルミニウム，アルミニウム合金および亜鉛・アルミニウム擬合金が代表的であり，施工実績はAl溶射が最も多い。溶射の厚さは，100～200 μm である。金属溶射は，表面改質技術としてとらえるべきものであり，表面塗装とは基本的に異なる。

- 3) 電着ライニングは，被防食体である鋼材とそれに対向して海中に設置した電極との間に直流電流を通じ，海水中に Ca^{2+} や Mg^{2+} を陰極となる鋼材面に CaCO_3 や $\text{Mg}(\text{OH})_2$ として析出させ，鋼材の表面に被覆させたものである。防食対象範囲は，主として海中部である。図-2.2.2に，電着ライニングの概念図を示す¹⁾。

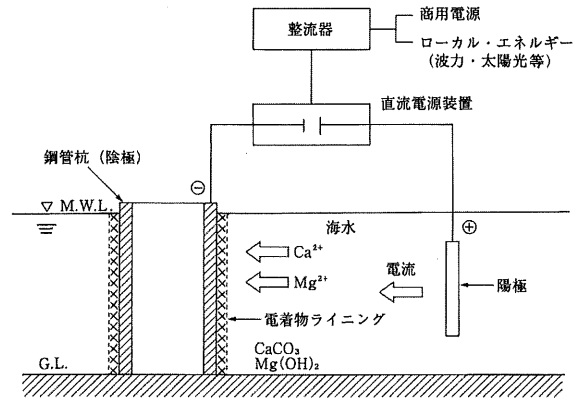


図-2.2.2 電着ライニングの概念図

参考文献

- 1) (財)沿岸技術研究センター：港湾鋼構造物防食・補修マニュアル（改訂版），平成9年4月
- 2) 阿部正美：港湾施設の防錆防食（その4），防錆管理，pp.287-297，2001
- 3) 阿部正美：港湾施設の防錆防食（その6），防錆管理，pp.410-419，2001

付録 国内鉄鋼各社における耐海水鋼の規格 その1 (港湾鋼構造物防食・補修マニユアル (改訂版) 抜粋)

社名	規格記号	耐食性が 良好な環境	主な用途	引張強さ N/mm ²	適用厚さ mm	化学成分 (%)								
						C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	その他
JFE	MARIWELR490M	飛沫帯 海中部	鋼矢板	490以上	—	0.15 以下	1.00 以下	1.50 以下	0.030 以下	0.030 以下	0.20 ~0.60	0.50 以下	0.80 ~1.58	*
	MARIWELH490 A. B. C	飛沫帯	ケーソン, ブイ	490~610	6~40	0.15 以下	1.00 以下	1.50 以下	0.030 以下	0.030 以下	0.20 ~0.60	0.50 以下	—	Mo0.50以下 *
	MARIWELK400 A. B. C	海中部	海中構造物 海水配管	400~510	6~40	0.15 以下	1.00 以下	1.20 以下	0.030 以下	0.030 以下	—	—	0.80 ~1.50	Mo0.50以下 *
	MARIWELK490 A. B. C			490~610	6~40	0.15 以下	1.00 以下	1.50 以下	0.030 以下	0.030 以下	—	—	0.80 ~1.50	Mo0.50以下 *
	MARIWELR400 A. B. C	飛沫帯 海中部	海洋構造物	400~510	6~40	0.15 以下	1.00 以下	1.20 以下	0.030 以下	0.030 以下	0.20 ~0.60	0.50 以下	0.80 ~1.50	*
	MARIWELR490 A. B. C			490~610	6~40	0.15 以下	1.00 以下	1.50 以下	0.030 以下	0.030 以下	0.20 ~0.60	0.50 以下	0.80 ~1.50	*

付録 国内鉄鋼各社における耐海水鋼の規格 その2 (港湾鋼構造物防食・補修マニユアル (改訂版) 抜粋)

社名	規格記号	耐食性が 良好な環境	主な用途	引張強さ N/mm ²	適用厚さ mm	化学成分(%)								
						C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	その他
新 日 本 製 鉄	MARINER	飛沫帯	鋼矢板	490 以上	—	0.22 以下	0.10 以下	0.60 ~0.90	0.08 ~0.15	0.040 以下	0.50 以下	0.40 ~0.65	—	
	MARILOYP490 A. B. C		ケーンソン, ブイ	490 以上	6~25	0.14 以下	1.00 以下	1.50 以下	0.030 以下	0.030 以下	0.15 ~0.40	—	0.30 ~0.80	*
	MARILOYS400 A. B. C	海中部	海中構造物 海水配管	400 以上	3.2~32	0.14 以下	0.55 以下	1.50 以下	0.030 以下	0.033 以下	—	—	0.80 ~1.30	*
	MARILOYS490 A. B. C			490 以上	6~25	0.14 以下	0.55 以下	1.50 以下	0.030 以下	0.030 以下	—	—	0.80 ~1.30	*
	MARILOYG400 A. B. C	飛沫帯 海中部	海洋構造物	400 以上	3.2~32	0.14 以下	0.55 以下	1.50 以下	0.030 以下	0.030 以下	0.15 ~0.40	—	0.80 ~1.30	Mo0.30 以下 Nb0.10 以下
	MARILOYG490 A. B. C			490 以上	6~50	0.14 以下	1.00 以下	1.50 以下	0.030 以下	0.030 以下	0.15 ~0.40	—	0.80 ~1.30	Mo0.30 以下 *
	MARILOYT490 A. B. C		タンカー 荷油管	490 以上	6~25	0.10 以下	1.00 以下	0.50 ~0.90	0.030 以下	0.030 以下	0.15 ~0.40	—	1.70 ~2.20	Mo0.30 以下 *

3. 風・波浪作用下での剛体浮体橋の動揺解析（本編 7.4.3 の参考資料）

3.1 解析の目的

浮体橋の設計においては、風や波浪等の外力作用下での橋体動揺特性や係留系の挙動を把握する必要がある。このため、浮体橋の動揺計算が実施される。浮体橋の挙動には、剛体挙動の他に、曲げ・ねじり等の弾性挙動も現れるが、通常サイズの浮体の場合、剛体挙動が弾性挙動よりも卓越すること、係留系も橋体の剛体挙動に大きく影響されること、等の理由から、浮体橋を剛体と見なした動揺計算が基本となる。浮体橋の係留には、通常、ゴム防舷材、チェーン、ケーブルが用いられるが、これらの係留系の変位-反力関係は、非線形特性を持つため、浮体橋の動揺計算には、時系列計算が用いられる。

このような浮体橋の動揺計算を行うことによって、例えば、我が国で建設された夢舞大橋のように、緩衝桁が存在し、ゴム防舷材で係留された浮体橋形式の場合、以下のような基本設計項目の検討及び確認が可能となる。

1) ゴム防舷材の選定

暴風時でのゴム防舷材の変形、反力評価によるゴム防舷材の安全性確認

2) 暴風時の浮体橋動揺の動揺確認

係留点の位置選定、緩衝桁のねじれ角評価、緩衝桁支承・伸縮装置移動量評価

3) 通常時の走行性、歩行性の確認

以下では、浮体橋を剛体とした場合について、浮体橋の時系列動揺計算法の概略について述べる。

3.2 浮体橋の動揺計算法

3.2.1 浮体の運動方程式

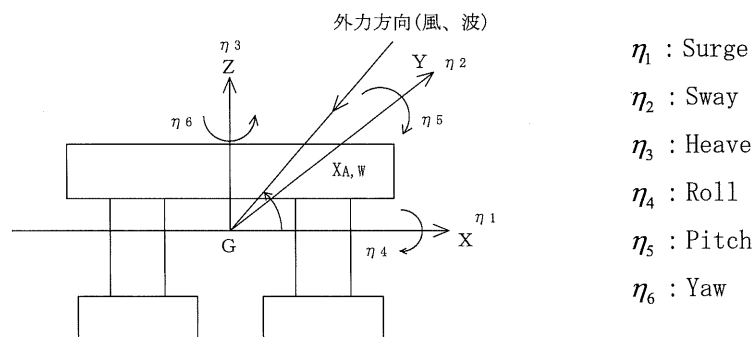


図-3.2.1 座標系と運動モードの定義図

図-3.2.1 に示すような浮体に風、波等の外力が作用した時の浮体の動揺について考える。浮体は、ゴム防舷材、チェーン等で係留されているものとする。浮体は剛体運動をするものとし、重心周りの6自由度運動を η_i ($i=1, \dots, 6$) で表す。各運動モードを図-3.2.1 に示す。

浮体の運動方程式の表示法としては、Convolution Integral Method(CI法)と Constant Coefficients Method(C.C法)の2種類がある。この2種類について以下に概説する。

(1) Convolution Integral Method(CI法)

浮体の非定常運動を計算する場合、浮体に働く非定常流体力が必要となるが、浮体のインパルス運動に関する流体力とその畳み込み積分(Convolution Integral)を用いることによって、この非定常流体力を、浮体が周期的に運動する場合の流体力から求めることができる。この考えの基ついて得られた浮体の運動方程式は次のようになる。

$$\sum_{j=1}^6 \left[\{M_{ij} + \mu_{ij}(\infty)\} \ddot{\eta}_j(t) + \int_{-\infty}^t L_{ij}(t-\tau) \dot{\eta}_j(\tau) d\tau + C_{ij} \dot{\eta}_j(t) + B_{ij} \eta_j(t) \right] \\ = D_i(t) + F_{wi}(t) + F_{Di}(t) + F_{Ai}(t) + F_{Ci}(t) \quad \text{----- (1)}$$

$$L_{ij}(\tau) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} \sin \omega \tau \frac{\lambda_{ij}(\omega)}{\omega} d\omega, \quad \mu_{ij}(\infty) = \mu_{ij}(\omega) + \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} \lambda_{ij}(\omega') \frac{d\omega'}{\omega'^2 - \omega^2} \quad \text{----- (2)}$$

ここで、

η_j : 浮体橋の変位

$j=1$: Surge, $j=2$: Sway, $j=3$: Heave,

$j=4$: Roll, $j=5$: Pitch, $j=6$: Yaw

M_{ij} : 浮体橋の質量及び慣性モーメント

μ_{ij} : 付加質量, $\mu_{ij}(\infty)$: 周波数無限大のときの付加質量

L_{ij} : メモリー影響関数, λ_{ij} : 造波減衰係数

B_{ij} : 静的復元力係数, C_{ij} : 非線形減衰係数

$D_i(t)$: 係留力, $F_{wi}(t)$: 波強制力, $F_{Di}(t)$: 変動波漂流力, $F_{Ai}(t)$: 風圧力, $F_{Ci}(t)$: 潮流力
 t, τ : 時間, ω, ω' : 角周波数

式(1)において、 $i=1\sim 6$ で、波強制時系列 $F_{wi}(t)$ は、周波数領域で求められた波強制力係数から計算される。

(2) Constant Coefficients Method(C.C法)

式(1)によって浮体の運動を計算する方法は、浮体の動揺に伴う流体反力を厳密に考慮することができるが、メモリー影響関数等を計算する必要があり計算が煩雑である。このため、実際の設計では、代表角周波数 ω の流体力係数を用いる場合が多い。この場合の浮体の運動方程式は次のようになる。

$$\sum_{j=1}^6 \left[\left\{ M_{ij} + \mu_{ij}(\omega) \right\} \ddot{\eta}_j(t) + \lambda_{ij}(\omega) \dot{\eta}_j(\tau) + C_{ij} \dot{\eta}_j(t) \left| \dot{\eta}_j(t) \right| + B_{ij} \dot{\eta}_j(t) \right] \\ = D_i(t) + F_{wi}(t) + F_{Di}(t) + F_{Ai}(t) + F_{Ci}(t) \quad \text{----- (3)}$$

白島石油備蓄基地の貯蔵船¹⁾や夢舞大橋²⁾の設計の際に行われた動揺計算では、式(3)が用いられているが、式(3)を解く操作を複数回繰り返すことにより、計算精度を高める工夫がなされている。具体的には、第1回目の計算では波の有義周期に対応した流体力係数 μ_{ij}, λ_{ij} を入力し、2回目以降では、前ステップで得られた浮体の平均動揺周期に対応した流体力係数を入力し、動揺周期が収束するまで計算が繰り返されている。得られた計算結果と水槽実験結果との比較から、この方法は実用的には問題が無いことが示されている^{1), 2)}。

3.2.2 流体力計算法

式(1)、式(2)に用いる周波数領域の付加質量 μ_{ij} 、造波減衰力係数 λ_{ij} 及び波強制力等の流体力係数は、線形のポテンシャル理論を用いて求めることができる。具体的な流体力の数値計算には、特異点分布法、領域分割法、有限要素法等が用いられるが、任意形状の浮体に適用可能な特異点分布法が多用されるので、以下では、この方法による流体力計算法の概略について述べる。

(1) 基礎方程式^{3), 4)}

今、流体を非圧縮・非粘性の完全流体と考えると、速度ポテンシャル ϕ が存在する。各周波数 ω 、波向 β の波が浮体に入射する場合を考える。この時、速度ポテンシャル ϕ は、次のように表される。

$$\phi = \phi_0 e^{-i\omega t} + \phi_7 e^{-i\omega t} + \sum_{j=1}^6 \phi_j \dot{\eta}_j \quad \text{----- (4)}$$

ここで、 $i=1\sim 6$ は、浮体の6モードに対応する。 ϕ_j は、静止した水域で浮体が動揺する場合の速度ポテンシャルに対応し、ラディエーションポテンシャルと呼ばれる。 $\phi_0 e^{-i\omega t}$ は、入射波の速度ポテンシャルであり、次のように表される。

$$\phi_0 e^{-i\omega t} = \frac{g \zeta_a \cosh k(z+h)}{\omega \cosh kh} e^{i(kx \cos \beta + ky \sin \beta - \omega t)} \quad \text{----- (5)}$$

ここで、 ζ_a は入射波振幅、 k は波数であるが、 g を重力加速度、 β を波の入射角、 h を水深とすると、 k と ω の間には、次の分散関係がある。

$$\frac{\omega^2}{g} = k \tanh kh \quad \text{----- (6)}$$

また、 $\phi_7 e^{-i\omega t}$ は、拘束されて静止している浮体に、規則波が入射した場合の進行散乱波に対応するもので、ディフラクションポテンシャルと呼ばれる。

$\phi_j, (j=1\sim 7)$ と考えると、 ϕ_j は、次のような境界値問題の解である。

$$\frac{\partial^2 \phi_j}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi_j}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \phi_j}{\partial z^2} = 0 \quad (\text{流体の内部}) \quad \text{-----} (7)$$

$$-\omega^2 \phi_j + g \frac{\partial \phi_j}{\partial z} = 0 \quad (z=0 \text{ 位置での水面条件}) \quad \text{-----} (8)$$

$$\frac{\partial \phi_j}{\partial z} = 0 \quad (z=-h \text{ 位置での水底条件}) \quad \text{-----} (9)$$

さらに、 ϕ_j ($j=1\sim 6$) と $\phi_7 e^{-i\omega t}$ は、 $R = \sqrt{x^2 + y^2}$ とすると、無限遠で進行波の特性を持つという次の放射条件を満足する必要がある。

$$\sqrt{R}(\partial \phi_j / \partial R + ik \phi_j) \rightarrow 0 \quad (R \rightarrow \infty \text{ で}) \quad \text{-----} (10)$$

浮体の没水表面での境界条件は以下のようになる。

$$\frac{\partial \phi_j}{\partial z} = n_j, \quad (j=1, \dots, 6) \quad \text{-----} (11)$$

$$\frac{\partial \phi_7}{\partial z} = -\frac{\partial \phi_0}{\partial n} \quad \text{-----} (12)$$

ここで、 $\partial / \partial n$ は、浮体の没水表面での外向き法線 n 方向の法線微分を意味する。

n_j ($j=1, \dots, 6$) は、次式によって定義される。

$$n = (n_1, n_2, n_3) \quad \text{-----} (13)$$

$$r \times n = (n_4, n_5, n_6) \quad \text{-----} (14)$$

ここで、 r は位置ベクトルである。

(2) 数値計算法

式(4)～式(14)の境界値問題を、特異点分布法を用いて計算する方法について述べる。

ϕ_j ($j=1, \dots, 7$) の解は、次のように表される。

$$\phi_j = \iint_S Q_j(\xi, \eta, \zeta) G(x, y, z; \xi, \eta, \zeta) ds \quad \text{-----} (15)$$

ここで、 S は、浮体の没水表面である。 (x, y, z) 及び (ξ, η, ζ) は、 S 上の点である。 Q_j は、ソース強さで、未知量である。 $G(x, y, z; \xi, \eta, \zeta)$ は、グリーン関数で、次式で表される。

1) $k r_1 \geq 0.1$

$$G(x, y, z; \xi, \eta, \zeta) = \frac{2\pi(\nu^2 - k^2)}{k^2 h - \nu^2 h + \nu} \cosh k(z+h) \cdot \cosh k(\zeta+h) (Y_0(kr_1) - iJ_0(kr_1)) \\ + 4 \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\mu_k^2 + \nu^2}{\mu_k^2 h + \nu^2 h - \nu} \cos(\mu_k(z+h)) \cdot \cos(\mu_k(\zeta+h)) K_0(\mu_k r_1) \quad \text{-----} (16)$$

2) $kr_1 < 0.1$

$$G(x, y, z; \xi, \eta, \zeta) = \frac{1}{R} + \frac{1}{R'} + 2PV \int_0^\infty \frac{(\mu + \nu)e^{-\mu h} \cosh \mu(\zeta + h) \cosh \mu(z + h) J_0(\mu r_1) d\mu}{\mu \sinh \mu h - \nu \cosh \mu h} + i \frac{2\pi(k^2 - \nu^2) \cosh k(\zeta + h) \cosh k(z + h)}{k^2 h - \nu^2 h + \nu} J_0(kr_1) \quad (17)$$

ここで,

$$\nu = \omega^2 / g, \quad R = \sqrt{[(x - \xi)^2 + (y - \eta)^2 + (z - \zeta)^2]} \\ R = \sqrt{[(x - \xi)^2 + (y - \eta)^2 + (z + 2h + \zeta)^2]}, \quad r_1 = \sqrt{[(x - \xi)^2 + (y - \eta)^2]} \quad (18)$$

式(16)で, μ_k は次式の解である。

$$\mu_k \tan \mu_k h + \nu = 0 \quad (19)$$

また, J_0 は 0 次の第 1 種ベッセル関数, Y_0 は 0 次の第 2 種ベッセル関数, K_0 は 0 次の第 2 種変形ベッセル関数である。式(17)の PV は主値積分である。

式(15)のソース密度 Q_j は, 浮体の没水表面での境界条件式(11), (12)を満足するように決定される。従って, 次の第 2 種 Fredholm 型積分方程式が得られる。

$$-2\pi Q_j(x, y, z) + \iint_S Q_j(\xi, \eta, \zeta) \frac{\partial}{\partial n} (G(x, y, z; \xi, \eta, \zeta)) ds = \begin{cases} n_j & (j = 1 \sim 6 \text{ の時}) \\ -\frac{\partial \phi_0}{\partial n} & (j = 7 \text{ の時}) \end{cases} \quad (20)$$

浮体の没水表面を多くの矩形パネルに分割し, 例えば, 各パネル上で, ソース密度が一定とすると, 式(20)から, 各パネルのソース密度 Q_j を未知量とする連立一次方程式が得られる。この連立一次方程式を解くことによって得られたソース密度 Q_j を, 式(20)と同様に離散化された式(15)に代入すると, 流体内部及び浮体の没水表面上のポテンシャル ϕ_j が求められる。

求められた ϕ_j を式(4)に代入することにより, ϕ を求めることができる。浮体没水表面に作用する流体圧力 p は, $p = -\rho \partial(\phi e^{-i\omega t}) / \partial t$ で表されるので, 流体圧力を浮体没水表面に渡って積分することにより, 最終的に, 浮体全体に働く i 方向の流体力 F_i が次のように得られる。

$$F_i = -\sum_{j=1}^6 \mu_{ij} \ddot{X}_j - \sum_{j=1}^6 \lambda_{ij} \dot{X}_j + F_{wi} \quad (21)$$

ここで,

$$\mu_{ij} = -\rho \iint_S \text{Re} \phi_j n_i ds, \quad \lambda_{ij} = -\rho \omega \iint_S \text{Im} \phi_j n_i ds, \quad F_{wi} = -i\rho\omega \iint_S (\phi_0 + \phi_7) e^{-i\omega t} n_i ds \quad (22)$$

上式で, Re , Im は, それぞれ複素数の実数部, 虚部を示す。式(22)から, 付加質量 μ_{ij} , 造波減衰係数 λ_{ij} , 波強制力 F_{wi} が求められることになる。従って, 浮体を 1 質点と考えた 6 自由度の運動方程式の外力として, 式(21)を考えると, 最終的な浮体の運動方程式は, 式(3)のような形になる。

3.2.3 波浪荷重

ここでは、式(1)、式(3)の右辺の波強制力 $F_{wi}(t)$ 及び変動波漂流力 $F_{Di}(t)$ の具体的な計算法について述べる。

(1) 波スペクトル^{5),6)}

不規則波な水面波は波スペクトルで表される。ここでは、代表的な2種類の波スペクトルについて示す。波スペクトルは one-sided spectrum として表示する。

a) Bretschneider-光易型スペクトル

$$S_{wave}(f) = 0.257 H_{1/3}^2 \cdot T_{1/3} \cdot (T_{1/3} \cdot f)^{-5} \cdot \exp[-1.03(T_{1/3} \cdot f)^{-4}] \quad (23)$$

ここで、

$S_{wave}(f)$: 波のスペクトル, $H_{1/3}$: 有義波高, $T_{1/3}$: 有義波周期, f : 周波数

b) JONSWAP スペクトル

$$S_{wave}(f) = \alpha g^2 (2\pi)^{-4} f^{-5} \exp\left\{-\frac{5}{4}\left(\frac{f}{f_p}\right)^{-4}\right\} \exp\left\{-\frac{(f-f_p)^2}{2\sigma^2 f_p^2}\right\} \quad (24)$$

ここで、

$\sigma = \sigma_a$ (for $f \leq f_p$), $\sigma = \sigma_b$ (for $f \geq f_p$)

α : Phillips の平衡領域における定数に相当する値

f_p : スペクトルのピーク周波数

上記の値は、計測結果から、以下の値が得られている。

$$\alpha = 0.076 \left(\frac{gF}{U_{10}^2}\right)^{-0.22}, \quad f_p = 3.5 \left(\frac{gF}{U_{10}^2}\right)^{-0.33} \left(\frac{g}{U_{10}}\right), \quad \gamma = 3.3$$

$$\sigma_a = 0.07, \quad \sigma_b = 0.09$$

ここで、

U_{10} : 高さ 10m 位置での風速, F : 吹送距離, g : 重力加速度

(2) 波強制力の時系列計算法⁷⁾

上述のスペクトルを持つ不規則波が浮体に入射した場合、水面の上下変位 $\zeta(t)$ と、浮体に働く波強制力 $F_{wi}(t)$ は次のようになる。

a) 長波頂波 (一方向から入射する不規則波) の場合

$$\zeta(t) = \sum_{j=1}^N \sqrt{2S_{wave}(f_j) \cdot \Delta f_j} \cdot \cos(2\pi f_j t + \varepsilon_j) \quad (25)$$

$$F_{wi}(t) = \sum_{j=1}^N \sqrt{2S_{wave}(f_j) \{F_{wi}(f_j) / \zeta_a(f_j)\}^2 \Delta f_j} \cos(2\pi f_j t + \varepsilon_i(f_j) + \varepsilon_j) \quad (26)$$

ここで、

$F_{wi}(f_j)/\zeta_a(f_j)$: j 番目の成分波による i 番目の浮体運動モード方向に作用する波強制力係数

$\varepsilon_i(f_j)$: i 番目の浮体運動モード方向に作用する波強制力係数の、 j 番目の成分波に関する位相差

ε_j : 乱数によって与えられた j 番目の成分波の位相差

N : 成分波の個数

b) 短波頂波 (多方向から入射する不規則波) の場合

$$\zeta(t) = \sum_{k=1}^n \sum_{j=1}^N \sqrt{2a_k \cdot S_{wave}(f_j) \cdot \Delta f_j} \cdot \cos(2\pi f_j t + \varepsilon_{jk}) \quad (27)$$

$$F_{wi}(t) = \sum_{k=1}^n \sum_{j=1}^N \left\{ \sqrt{2a_k \cdot S_{wave}(f_j) \{F_{wi}(f_j)/\zeta_a(f_j)\}^2 \Delta f_j} \cdot \cos(2\pi f_j t + \varepsilon_{ik}(f_j) + \varepsilon_{jk}) \right\} \quad (28)$$

ここで、 a_k は、波の方向分布に関する係数、 n は、方向波の個数である。

(3) 波漂流力計算法^{8),9)}

a) 定常波漂流力

浮体に規則波を作用させた場合、浮体には、波の伝搬方向に 2 次のオーダーで微小であるが定常的な力が作用する。この力が波漂流力である。この定常的な波漂流力 F_D は単位幅の 2 次元浮体の場合、浮体から遠く離れた領域の運動量の変化を考え、時間変化をとることにより、以下のように、浮体からの反射波 ζ_r の自乗に比例することが、丸尾¹⁰⁾ によって示されている。

$$F_D = 0.5 \rho g \zeta_r^2 \quad (29)$$

3 次元浮体についても丸尾が水平方向の波漂流力を求めているが、Newman¹¹⁾ が、同様な方法により、Yaw モーメントも含めた以下の式を与えている。

$$\left. \begin{aligned} F_{DX} &= \frac{\rho k^2}{8\pi} \int_0^{2\pi} |H(k, \theta)|^2 (\cos \beta - \cos \theta) d\theta \\ F_{DY} &= \frac{\rho k^2}{8\pi} \int_0^{2\pi} |H(k, \theta)|^2 (\sin \beta - \sin \theta) d\theta \\ M_Z &= -\frac{\rho k}{8\pi} \text{Im} \int_0^{2\pi} H^*(k, \theta) \cdot H_\theta(k, \theta) d\theta - \frac{1}{2k} \rho \omega \zeta_a \text{Re} H_\theta(k, \beta) \end{aligned} \right\} \quad (30)$$

ここで、 F_{DX}, F_{DY}, M_Z はそれぞれ、Surge 方向、Sway 方向、Yaw 方向の波漂流力を示す。 $H(k, \theta)$ は Kochin 関数、 $H^*(k, \theta)$ はその共役複素数を示す。また、 H_θ は θ に関する微分値、 k は波数、 ω は角周波数、 ζ_a は入射波の振幅、 β は波の入射角である。

b) 変動波漂流力

規則波中で定常であった波漂流力は、不規則波中では緩やかに変動する成分を有する力となる。この成分を変動波漂流力という。この力は、係留浮体の水平面内における長周期運動を誘発させる重要な力で、浮体の運動方程式を示す式(1)、式(3)の右辺の $F_{Di}(t)$ である。変動波漂流力の算定には、Hsu and Blenkarn の方法や Pinkster-Newman の方法がよく用いられる。以下、これらについて紹介する。

1) Hsu and Blenkarn の方法

Hsu and Blenkarn は、不規則波の連なりを半波長ごとに波高と周期が異なる規則波の連なりと見なし、半波長ごとの規則波の波漂流力を求める方法により、係留浮体の長周期運動をよく計算できることを示した。ただし、この方法によると、波漂流力はステップ状の波形となるために、実際の計算では、なめらかな波形に直して用いる方が良い。

2) Pinkster-Newman の方法

流体を理想流体（非圧縮、非粘性）で非回転運動とすると速度ポテンシャルが存在する。水面に浮いた浮体に働く力を求めるために、速度ポテンシャルに関する境界値問題を解く場合、自由表面条件は本来、非線形の形をしているので、通常は、摂動法を用いて、速度ポテンシャル ϕ 、水面変位 ζ 及び浮体に働く圧力 p を、微少パラメータ ε を用いて、次のように ε のべき乗の形に展開し線形化する。

$$\left. \begin{aligned} \phi(x, y, z; t) &= \varepsilon \phi^{(1)}(x, y, z; t) + \varepsilon^2 \phi^{(2)} + \dots \\ \zeta(x, y; t) &= \varepsilon \zeta^{(1)}(x, y; t) + \varepsilon^2 \zeta^{(2)} + \dots \\ p(x, y, z; t) &= \varepsilon p^{(1)}(x, y, z; t) + \varepsilon^2 p^{(2)} + \dots \end{aligned} \right\} \text{----- (31)}$$

波漂流力は2次のオーダーの波力である。ベルヌーイの式から圧力の2次オーダーは次のようになる。

$$p^{(2)} = \varepsilon^2 \rho \left[-\phi_t^{(2)} - \frac{1}{2} \left\{ (\phi_x^{(1)})^2 + (\phi_y^{(1)})^2 + (\phi_z^{(1)})^2 \right\} \right] \text{----- (32)}$$

入射不規則波 ζ_i を正弦波の重ね合わせ

$$\zeta_i = \sum_{m=1}^{\infty} \zeta_m \cos(\omega_m t + \varepsilon_m) \text{----- (33)}$$

で与えると、圧力 p を浮体表面で積分して得られる力は、1次及び2次の力をそれぞれ $F^{(1)}, F^{(2)}$ とすると次式のようなになる。

$$F^{(1)} = \sum_{m=1}^{\infty} \zeta_m \cdot f_m^{(1)} \cos(\omega_m t + \varepsilon_m + \delta_m) \text{----- (34)}$$

$$\begin{aligned} F^{(2)} &= \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \zeta_m \zeta_n f_{mn}^{+(2)} \cos[(\omega_m + \omega_n)t + (\varepsilon_m + \varepsilon_n) + \delta_{mn}^+] \\ &\quad + \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \zeta_m \zeta_n f_{mn}^{-(2)} \cos[(\omega_m - \omega_n)t + (\varepsilon_m - \varepsilon_n) + \delta_{mn}^-] \text{----- (35)} \end{aligned}$$

ここで、 f, δ は、それぞれ振幅関数と位相関数である。式(35)の右辺第2項は、低周波数の変動漂流力成分で、Newman は、波のスペクトルが狭帯域であるとき $f_{mn}^{-(2)}$ が、

$$f_{mn}^{-(2)}(\omega_m, \omega_n) = f_{mn}^{-(2)} \left[\frac{1}{2}(\omega_m + \omega_n) \right] + O(\omega_m - \omega_n) \quad (36)$$

であるとして、上式の右辺第2項を無視できると考え、変動漂流力を次式で与えている。

$$F^{(2)} = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \zeta_m \zeta_n f_{mn}^{-(2)} \cos[(\omega_m - \omega_n)t + (\varepsilon_m - \varepsilon_n)] \quad (37)$$

一方、Pinkster は、Newman と同じ年に、これと同様な考え方にに基づき波漂流力のスペクトルを与えている。

3.2.4 風荷重^{12),13)}

(1) 風のスペクトル

日野スペクトル、ダベンポートスペクトル、Ochi & Shin のスペクトルを、one-side スペクトルの形で示す。

a) 日野スペクトル

$$S_{wind}(f) = 0.4751 \times \frac{\bar{u}^2}{\beta} \left\{ 1 + \left(\frac{f}{\beta} \right)^2 \right\}^{-\frac{5}{6}} \quad (38)$$

$$\beta = 1.169 \times 10^{-2} \times \frac{\alpha U_{10}}{\sqrt{K_r} \cdot z_1} \left(\frac{z}{z_1} \right)^{2m\alpha-1}, \quad \bar{u}^2 = 6.0 \times K_r U_{10}^2$$

ここで、 $S_{wind}(f)$: 変動風の (one-sided) パワースペクトル (m^2/s)、 f : 周波数、 U_{10} : 高度 10m での平均風速、 K_r : 平均高さ 10m で定義した表面摩擦係数で水面では、0.001~0.003 程度の値を用いる。また、 z : 高度 (m)、 z_1 : 基準高度、 α : 平均風速の鉛直分布をベキ乗則で表すための指数、 m : 気層の安定度を表す修正係数 (1.0~2.0) で、 z_1, α の値としては、それぞれ 10m、1/7 を用いることが多い。

b) ダベンポートスペクトル

$$S_{wind}(f)f = 4K_r U_{10}^2 \frac{\chi^2}{(1+\chi^2)^{5/2}} \quad (39)$$

ここで、 $\chi = fL/U_{10}$ 、 $L = 1200m$ 、 K_r は高さ 10m の風速で定義した表面摩擦係数で、 $K_r = 0.001 \sim 0.003$ (開けた海上) である。

c) Ochi & Shin のスペクトル¹⁴⁾

日野、ダベンポートの式は、主として、陸上での観測データに基づくものであるが、Ochi & Shin は海上風の観測データに基づいて、以下のスペクトルを導いている。

$$\begin{aligned}
 S_{wind}(f_*) &= 583 f_* & 0 \leq f_* \leq 0.003 \\
 &= \frac{420 f_*^{0.70}}{(1 + f_*^{0.38})^{11.5}} & 0.003 \leq f_* \leq 0.1 \\
 &= \frac{838 f_*}{(1 + f_*^{0.35})^{11.5}} & f_* \geq 0.1
 \end{aligned}
 \quad \left. \vphantom{\begin{aligned} S_{wind}(f_*) &= 583 f_* \\ &= \frac{420 f_*^{0.70}}{(1 + f_*^{0.38})^{11.5}} \\ &= \frac{838 f_*}{(1 + f_*^{0.35})^{11.5}} \end{aligned}} \right\} \text{----- (40)}$$

ここで、 $f_* = fz/U_z$ 、 $S(f_*) = fS_u(f)/u_*^2$ 、 u_* ：摩擦速度(m/s) = $\sqrt{C_{10}U_{10}}$ 、 z ：海面からの高さ(m)、 U_z ：高度 z での平均風速(m/s)、 U_{10} ：高度10mでの平均風速(m/s)、 C_{10} ：高度10mの風速により評価された摩擦係数 = $(0.65 + 0.067U_{10}) \times 10^{-3}$

(2) 風荷重計算法

a) 風速の時系列計算法

$$u(t) = V_1 + \sum_{j=1}^N \sqrt{2S(f_j)df_j} \cos(2\pi f_j t + \varepsilon_j) \quad \text{----- (41)}$$

ここで、 $u(t)$ ：風速、 V_1 ：平均風速、 ε_j ： j 番目の成分風の位相差

b) 風荷重時系列計算法

$$F_{Ai}(t) = \frac{1}{2} \rho_A \cdot u^2(t) \cdot C_{Ai} \cdot A \quad (i=1,2,3) \quad \text{----- (42)}$$

$$F_{Ai}(t) = \frac{1}{2} \rho_A \cdot u^2(t) \cdot C_{Ai} \cdot A \cdot L \quad (i=4,5,6) \quad \text{----- (43)}$$

ここで、 $F_{Ai}(t)$ ：浮体の i 番目運動モード方向の風荷重、 ρ_A ：空気密度、 C_{Ai} ： i 方向の風抗力係数、 L ：代表長、 A ：風圧面積である。

3.2.5 係留力

(1) ドルフィン・フェンダー係留の場合

ドルフィン・フェンダー係留で用いられる実機防舷材はゴム製であるため、歪一反力特性は、図-3.2.2に示すようなヒステリシスを持つ。このヒステリシスのモデル化には、防舷材の圧縮時曲線 C_1 と緩和時曲線 C_2 を用いた、以下の方法が有効であることが確認されている¹⁵⁾。

a) 圧縮時

ケースA：曲線 C_1 上にある時は、曲線 C_1 上を移動する。

ケースB：曲線 C_1 より下にある時は、曲線 C_1 の最大傾斜の直線上を移動する。

b) 緩和時

ケースC：曲線 C_2 上にある時は、曲線 C_2 を移動する。

ケースD：曲線 C_2 より上にある時は、曲線 C_1 の最大傾斜の直線上を移動する。

この計算モデルによる防舷材の歪一反力関係を、式(1)及び式(3)の右辺における係留力 $D_i(t)$ に代入する。

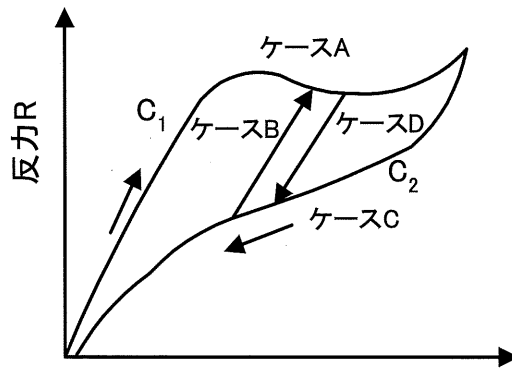


図-3.2.2 防舷材ヒステリシスのモデル化

(2) カテナリー係留の場合

図-3.2.3 に示すように、浮体がチェーンやワイヤー等でカテナリー係留される場合、浮体側係留点の水平及び鉛直方向の移動に関する係留力の水平、鉛直成分（係留特性カーブ）を前もって計算しておく。実際の時系列浮体運動計算では、実際の浮体側係留点の移動にともなって生じる係留力を係留特性カーブから内挿して求める。係留特性カーブの計算には、チェーンやワイヤーの変位と張力に関するカテナリー理論式¹⁶⁾や数値計算法¹⁷⁾が用いられる。

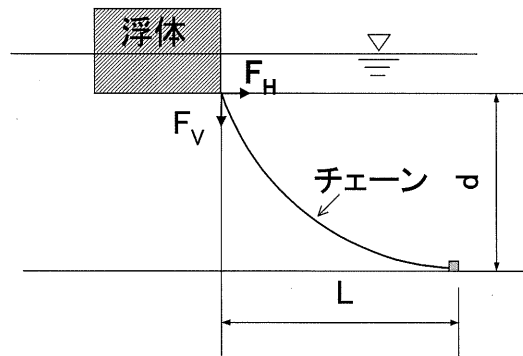


図-3.2.3 カテナリー係留

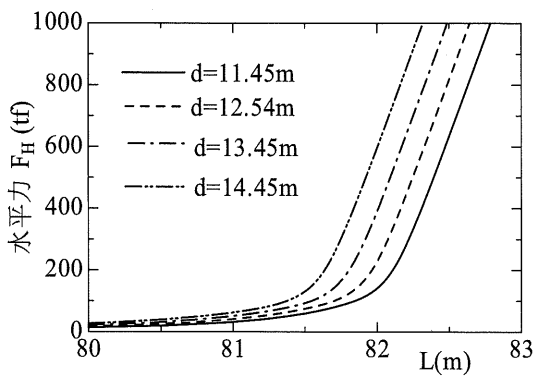


図-3.2.4(a) 水平力

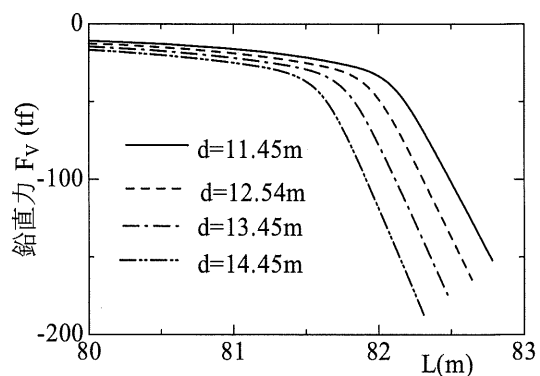


図-3.2.4(b) 鉛直力

図-3.2.4(a), (b)は、チェーンにより、浮体に作用する係留力の水平、鉛直成分を示したものである。

3.3 夢舞大橋への適用例¹⁸⁾

大阪市の埋立地である夢洲と舞州間の水路を跨ぐ浮体式の可動橋として建設された夢舞大橋の設計に、上記の浮体橋の動揺計算法が用いられている。以下では、計算結果等を含めた計算の概略について述べる。

3.3.1 計算条件

(1) 浮体諸元

図-3.3.1に、夢舞大橋の寸法を示す。また、表-3.3.1に浮体橋の諸元を示す。

表-3.3.1 浮体諸元

排水量	31537	(ton)
喫水	4.81	(m)
KG (重心高さ)	25.59	(m)
KB (浮心高さ)	2.41	(m)
(KM) _L (縦メタセンター)	4127.82	(m)
(G ₀ M) _L (縦メタセンター高さ)	4102.24	(m)
(KM) _T	56.31	(m)
(G ₀ M) _T	30.72	(m)
傾斜 (橋軸方向)	0.00	(%)
傾斜 (橋軸直角方向)	0.00	(%)

(2) 自然条件

a) 波浪条件

以下の波浪条件で計算を行った。

- 1) 暴風時 : 風波 : 波高 $H_{1/3} = 1.4m$, 周期 $T_{1/3} = 5.7, 7.7sec$
うねり : 波高 $H_{1/3} = 0.3m$, 周期 $T_{1/3} = 17sec$
- 2) 交通規制時 : 風波 : 波高 $H_{1/3} = 1.0m$, 周期 $T_{1/3} = 5.7sec$
- 3) 常時 : 風波 : 波高 $H_{1/3} = 0.5m$, 周期 $T_{1/3} = 3.5sec$

波のスペクトルには Bretschneider-光易型スペクトルを用いた。

b) 潮位 (水深 h)

EX. L : $h = 13.30m$, H. W. L : $h = 11.70m$, L. W. L : $h = 10.05m$

c) 潮流

暴風時 : $U = 0.5m/s$

d) 風の条件

- 1) 暴風時 : 風速 $V_{10} = 42m/s$
- 2) 交通規制時 : 風速 $V_{10} = 20m/s$
- 3) 常時 : 風速 $V_{10} = 10m/s$

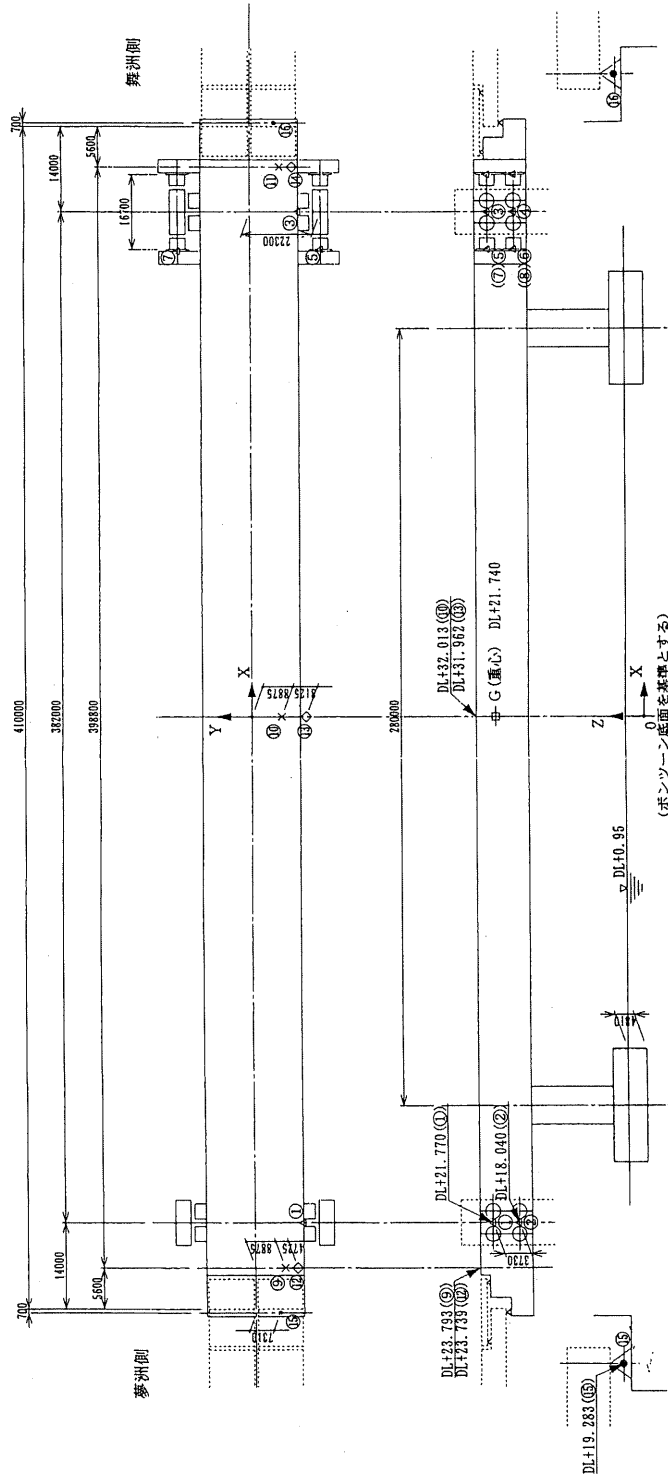


図-3.3.1 夢舞大橋の寸法

変動風スペクトルには日野スペクトルを用いた。

風は、浮体橋の Surge, Sway, Roll, Yaw 方向へ作用させた。風抗力係数は、風洞実験から得られた値を用いた (表-3.3.2)。また、風向の定義を図-3.3.2 に示す。

表-3.3.2 風抗力係数

風向 XA (deg)	Surge CA1	Sway CA2	Roll CA4	Yaw CA6
0	0.000	2.450	-0.084	0.000
10	-0.220	2.440	-0.084	0.000
20	-0.440	2.420	-0.084	0.000
30	-0.800	2.330	-0.080	0.000
40	-1.020	1.950	-0.070	0.000
50	-1.240	1.570	-0.056	0.000
60	-1.310	1.120	-0.038	0.000
70	-1.250	0.670	-0.019	0.000
80	-1.040	0.290	-0.004	0.000
90	-0.840	0.000	0.000	0.000

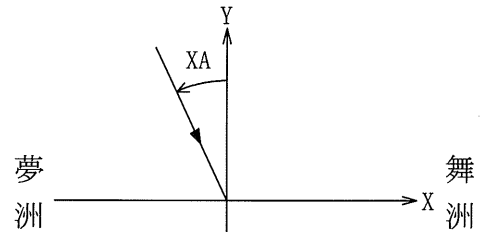


図-3.3.2 風向の定義

(3) 係留用防舷材

実際に用いられた防舷材 2500RH の寸法を図-3.3.3 に示す。図-3.3.4 に、この防舷材の反力-歪特性を示す。表-3.3.3 に、防舷材の性能表を示す。防舷材の持つ特性 (製作, 温度, 傾斜圧縮, 繰り返し, 変位速度等) を総合的に考慮して、標準反力-歪特性の 80~115% の範囲で解析を行った。

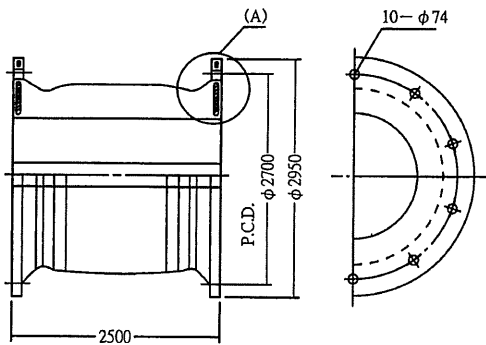


図-3.3.3 防舷材寸法 (2500RH)

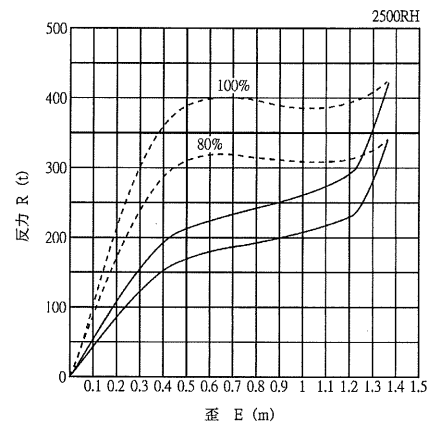


図-3.3.4 防舷材反力-歪特性

表-3.3.3 防舷材の性能表

ゴムNo.	反力 (1on)		吸収エネルギー (1on-m)	
	設計標準歪	設計限界歪	設計標準歪	設計限界歪
RE	522.0	554.9	573.0	606.7
RS	463.3	492.5	508.6	538.5
RH	401.5	426.3	440.8	466.7
RO	308.8	328.3	339.1	359.0
R1	262.5	279.1	288.2	305.1

設計標準歪: 52.5%

性能公差: ±10%

設計限界歪: 55%

(4) 計算ケース及び計算結果

表-3.3.4, 表-3.3.5 に, 暴風時と交通規制時/通常時に関する計算ケースを示す。表-3.3.6, 表-3.3.7 に, 暴風時と交通規制時/通常時における浮体橋の6自由度運動に関する計算結果を示す。

表-3.3.4 暴風時計算ケース

析 ケー ス	自然条件				防眩材				結果出力項目 (総計値)			
	風向θ (deg)	波周期T _{1/3} (sec)	潮位		硬度 (%)	クリアランス	動揺量	防眩材		路面変位・速度・加速度	水平固定管	
			H.W.L	L.W.L				変位	反力		変位	加速度※
0	60	5.7	7.7	EX.L	有	無	◎	◎	◎	◎	◎	◎
1	0	0	0	0	0	0	◎	◎	◎	◎	◎	◎
2	0	0	0	0	0	0	◎	◎	◎	◎	◎	◎
3	0	0	0	0	0	0	◎	◎	◎	◎	◎	◎
4	0	0	0	0	0	0	◎	◎	◎	◎	◎	◎
5	0	0	0	0	0	0	◎	◎	◎	◎	◎	◎
6	0	0	0	0	0	0	◎	◎	◎	◎	◎	◎
7	0	0	0	0	0	0	◎	◎	◎	◎	◎	◎
8	0	0	0	0	0	0	◎	◎	◎	◎	◎	◎
9	0	0	0	0	0	0	◎	◎	◎	◎	◎	◎
10	0	0	0	0	0	0	◎	◎	◎	◎	◎	◎
11	0	0	0	0	0	0	◎	◎	◎	◎	◎	◎
12	0	0	0	0	0	0	◎	◎	◎	◎	◎	◎

・左記に記載していない自然条件については下記のとおりとする。

風速 : $V_{10} = 42m/s$

波高 : $H_{1/3} = 1.4m$

うねり : $H_{1/3} = 0.9m/s, T_{1/3} = 17.0sec$

・防眩材クリアランス量は下記のとおりとする。

橋脚方向 : 200mm、橋直方向 : 150mm

・各潮位における水深は下記のとおりとする。

EX.L : $h = 13.30m$

H.W.L : $h = 11.70m$

L.W.L : $h = 10.05m$

※印の変位・加速度出力は各方向最大に対し、他の2方向変位を対象とする。

X方向最大・最小変位時のY、Z方向変位

Y方向最大変位時のX、Z方向変位

Z方向最大・最小変位時のX、Y方向変位

表-3.3.5 交通規制時/通常時計算ケース

解 ケー ス	自然条件												防眩材				結果出力項目 (総計値)			
	風速V ₁₀ (m/s)	風向θ(deg)	波高H _{1/3} (m)	波高H _{1/3} (m)			波周期T _{1/3} (sec)	硬度 (%)	クリアランス	動揺量	防眩材		路面変位・速度・加速度	水平固定管						
				H.W.L	L.W.L	変位					反力	変位		位置変位						
1	20	10	1.0	0.5	0.2	3.5	5.7	11.0	H.W.L	L.W.L	◎	◎	◎	◎	◎	◎				
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	◎	◎	◎	◎	◎	◎				
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	◎	◎	◎	◎	◎	◎				
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	◎	◎	◎	◎	◎	◎				
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	◎	◎	◎	◎	◎	◎				
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	◎	◎	◎	◎	◎	◎				
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	◎	◎	◎	◎	◎	◎				
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	◎	◎	◎	◎	◎	◎				
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	◎	◎	◎	◎	◎	◎				
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	◎	◎	◎	◎	◎	◎				
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	◎	◎	◎	◎	◎	◎				
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	◎	◎	◎	◎	◎	◎				

注) 自然条件において、潮流は全ケース0.2m/sとする。

表-3.3.6 運動の最大値 (暴風時)

ケース	SURGE (m)			SWAY (m)			HEAVE (m)			ROLL (deg)			PITCH (deg)			YAW (deg)		
	統計値		時系列 最大値	統計値		時系列 最大値	統計値		時系列 最大値	統計値		時系列 最大値	統計値		時系列 最大値	統計値		時系列 最大値
	有義値	1/1000 最大値		有義値	1/1000 最大値		有義値	1/1000 最大値		有義値	1/1000 最大値		有義値	1/1000 最大値		有義値	1/1000 最大値	
1	0.463	0.834	0.637	0.543	0.731	0.845	0.361	0.583	0.491	2.724	4.496	3.550	0.067	0.134	0.101	0.023	0.046	0.102
2	0.460	0.818	0.630	0.537	0.708	0.743	0.347	0.555	0.470	2.587	4.206	3.243	0.064	0.126	0.104	0.023	0.046	0.084
3	0.368	0.521	0.435	0.526	0.694	0.656	0.323	0.505	0.430	2.405	3.842	3.170	0.059	0.114	0.095	0.023	0.042	0.076
4	0.406	0.714	0.502	0.432	0.565	0.606	0.355	0.567	0.481	2.755	4.581	3.586	0.067	0.134	0.102	0.016	0.029	0.049
5	0.295	0.370	0.345	0.418	0.536	0.520	0.234	0.315	0.280	2.109	3.179	2.488	0.049	0.099	0.081	0.013	0.025	0.034
6	0.284	0.345	0.315	0.416	0.536	0.508	0.224	0.304	0.258	2.044	3.093	2.629	0.048	0.095	0.076	0.013	0.025	0.032
7	0.570	0.737	0.666	0.417	0.651	0.667	0.274	0.491	0.399	1.815	3.249	2.503	0.073	0.143	0.113	0.047	0.093	0.103
8	0.569	0.734	0.686	0.403	0.628	0.534	0.256	0.456	0.368	1.693	3.016	2.195	0.066	0.128	0.107	0.047	0.089	0.096
9	0.555	0.712	0.661	0.402	0.623	0.519	0.221	0.382	0.311	1.529	2.671	1.991	0.061	0.120	0.099	0.049	0.094	0.091
10	0.416	0.514	0.474	0.331	0.527	0.425	0.278	0.502	0.407	1.831	3.286	2.658	0.072	0.143	0.110	0.037	0.073	0.073
11	0.423	0.521	0.482	0.322	0.503	0.435	0.138	0.216	0.190	1.088	1.705	1.376	0.050	0.097	0.082	0.037	0.074	0.077
12	0.446	0.590	0.524	0.318	0.507	0.454	0.131	0.196	0.173	1.055	1.674	1.380	0.051	0.101	0.079	0.040	0.074	0.082

表-3.3.7 運動の最大値 (交通規制時/通常時)

ケース	SURGE (m)			SWAY (m)			HEAVE (m)			ROLL (deg)			PITCH (deg)			YAW (deg)		
	統計値		時系列 最大値	統計値		時系列 最大値	統計値		時系列 最大値	統計値		時系列 最大値	統計値		時系列 最大値	統計値		時系列 最大値
	有義値	1/1000 最大値		有義値	1/1000 最大値		有義値	1/1000 最大値		有義値	1/1000 最大値		有義値	1/1000 最大値		有義値	1/1000 最大値	
1	0.243	0.307	0.259	0.289	0.487	0.366	0.067	0.102	0.085	0.470	0.714	0.609	0.013	0.027	0.023	0.052	0.102	0.083
2	0.240	0.327	0.264	0.255	0.427	0.316	0.067	0.102	0.085	0.482	0.729	0.612	0.013	0.027	0.024	0.040	0.079	0.075
3	0.241	0.299	0.253	0.285	0.467	0.355	0.060	0.090	0.073	0.462	0.707	0.619	0.011	0.023	0.022	0.051	0.103	0.085
4	0.239	0.317	0.248	0.250	0.423	0.292	0.060	0.090	0.073	0.452	0.679	0.612	0.012	0.023	0.022	0.043	0.087	0.072
5	0.292	0.368	0.334	0.259	0.477	0.323	0.047	0.080	0.063	0.280	0.453	0.410	0.015	0.028	0.026	0.063	0.125	0.088
6	0.303	0.400	0.367	0.241	0.435	0.315	0.041	0.068	0.055	0.251	0.395	0.344	0.013	0.024	0.021	0.064	0.124	0.086
7	0.207	0.214	0.210	0.174	0.202	0.180	0.013	0.016	0.016	0.107	0.156	0.134	0.001	0.000	0.001	0.008	0.015	0.018
8	0.206	0.210	0.210	0.173	0.198	0.186	0.013	0.016	0.016	0.108	0.159	0.131	0.001	0.000	0.001	0.009	0.016	0.017
9	0.215	0.223	0.221	0.166	0.215	0.178	0.005	0.007	0.007	0.074	0.117	0.108	0.001	0.000	0.001	0.011	0.025	0.041
10	0.215	0.223	0.220	0.165	0.199	0.174	0.005	0.007	0.008	0.063	0.098	0.100	0.001	0.000	0.001	0.009	0.020	0.019
11	0.223	0.461	0.241	0.153	0.282	0.186	0.033	0.066	0.049	0.256	0.542	0.403	0.019	0.039	0.030	0.052	0.097	0.062
12	0.245	0.516	0.266	0.156	0.289	0.213	0.037	0.074	0.051	0.347	0.693	0.561	0.019	0.039	0.031	0.052	0.101	0.061

参 考 文 献

- 1) 卷幡敏秋, 安成陽彦, 与口正敏, 三宅成司郎, 金子慎一: 実海域における係留浮体構造物の動揺特性に関する実証観測, 海岸工学論文集, 第 44 卷, pp. 871-875, 1997
- 2) 丸山忠明, 川村幸男, 武田純男, 永田修一, 三宅成司郎, 藤田孝: 浮体式橋梁の波浪中動揺に関する水理実験, 海岸工学論文集, 第 44 卷, pp. 896-900, 1997
- 3) Faltinsen, O. M. and Michelsen, F. C.: Motions of Large Structures in Waves at Zero Froude Numbers, International Symposium on the Dynamics of Marine Vehicles and Structures in Waves, pp. 3-18, 1974
- 4) Mei, C. C.: The Applied Dynamics of Ocean Surface Waves, John Wiley & Sons, pp. 282-383, 1983
- 5) 合田良實: 港湾構造物の耐波設計, 鹿島出版会, 1990
- 6) 日根野元裕, 山之内保文: 海洋波のスペクトル, 日本造船学会誌, 第 609 号, 1980
- 7) 日野幹雄: スペクトル解析, 朝倉書店, 1977
- 8) 経塚雄策, 新井信一, 肥後靖, 増田光一: 浮体に働く非線形流体力とその応答, 日本造船学会誌, 第 699 号, pp. 464-498
- 9) (社)国際海洋科学技術協会振動部会編: 海洋構造物の振動問題, pp. 228-230, 1988
- 10) Maruo, H.: The drift of a Body Floating on Waves, Journal of Ship Research, Vol. 4, No. 3, pp. 1-10, 1960
- 11) Newman J. N.: The Drift Force and Moment on Ship in Waves, Journal of Ship Research, Vol. 11, No. 1, pp. 51-60, 1967
- 12) (社)日本鋼構造協会編: 構造物の耐風工学, 東京電気大学出版局, pp. 390-394, 1997
- 13) 山之内保文監修: 船舶・海洋技術者のための不規則現象論, 海文堂, pp. 117-127, 1986
- 14) (財)沿岸開発技術研究センター, メガフロート技術研究組合: 超大型浮体式構造物技術基準案・同解説, pp. 4. 4. 11-4. 4. 12, 1999
- 15) 丸山忠明, 川村幸男, 武田純男, 永田修一, 吉田尚史, 山瀬晴義: ハイブリッドシミュレーションによる数値係留シミュレーション手法の検証, 海岸工学論文集, 第 44 卷, pp. 876-880, 1997
- 16) 日本海事協会: 係留システム設計指針, pp. 201-217, 1983
- 17) 井上義行, 中川静七: 海底影響を考慮した係留ライン特性と係留設計図表, 日本造船学会論文集, 第 151 号, pp. 147-156, 1982
- 18) 大阪市: 夢舞大橋工事誌, pp. 2-67 - 2-75, 2002

4. 地震応答解析の事例（本編 7.7.3 の参考資料）

4.1 地震動の選定

(1) 地震動選定の考え方

地震動選定には、主に次のような考え方がある。

- 経験的手法：大規模な地震歴や活断層特性などを含む多くの観測記録を統計的な扱い方をして、地震特性を評価する方法である。この手法の場合、今後の想定地震を検討するのに十分なデータが、観測された記録の中に含まれているかの課題がある。
- 理論的手法：震源から放射された地震波の波動伝播性を理論的に検討する方法である。この手法の場合、結果は、断層モデル、地下構造、地震波の減衰特性等の精度に影響を受ける。
- 半経験的手法：当該近傍で記録された地震波形（小地震波）を経験的グリーン関数として設定し、地震動スペクトルの相似性や断層破壊メカニズムを利用した重ね合わせにより、大規模地震時の地震波形（大規模地震波）を評価する方法である。この方法は、過去の地震波形を利用したグリーン関数を用いるので、経験的グリーン関数法とも呼ばれる。この手法の場合、グリーン関数を設定するに足る観測波形が入手できない場合には適用が難しいが、過去の記録、地下構造の特性、想定地震規模等を反映できるので、採用される事例が多い。

浮体橋の水平方向の1次固有周期は、5～10数sの長周期になることが多いので、前記の地震動選定においては、長周期成分を含むように留意する必要がある。上記の手法による現行基準や想定設計地震動は、一般橋梁の固有周期（長周期構造でも3～5s）を想定して検定されており、長周期成分の大きい地震波の取り扱いについては、多くの波形による応答を総合的に判断する必要がある。

(2) 基盤面

地震動を設定する基盤面（工学的基盤面、解放面）は、砂質土ではN値が50以上、粘性土ではN値が25以上の連続した地層、もしくは、せん断弾性波速度300m/s以上の連続した地層の上面と考えてよい。

(3) 地表近傍の地震波

(1)において設定した地震動は、十分堅固な地盤上（工学的基盤面）の値であるので、この地震動を浮体橋基礎の設置深さの地震動に変換する必要がある。この変換には、地層構成、ひずみの大きさ、液状化の程度、地盤改良された場合にはその地盤特性等が反映されなければならない。これを検討する代表的なプログラムとしては、下記のものが挙げられる。

- SHAKE (シェイク) : 等価線形法による 1 次元解析
 FLUSH (フラッシュ) : 等価線形法による 2 次元解析
 FLIP (フリップ) : 液状化の特性も考慮できる 2 次元解析

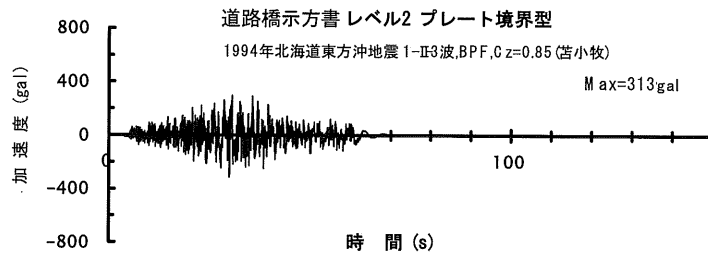
ただし、堆積層の厚い軟弱地盤においては、土のせん断ひずみが大きくなる場合があることに留意する必要がある。

(4) 地震動の例

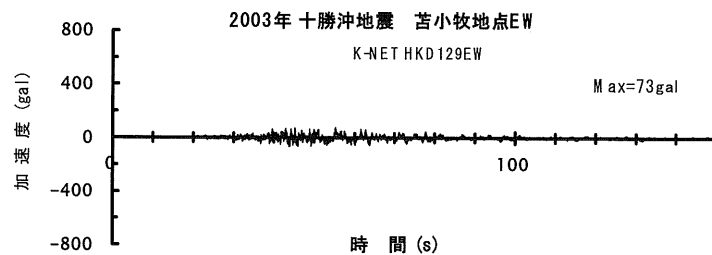
前述した(1)の考え方は最も望ましい取り扱いであるが、可能性検討や形式選定の段階では(1)のような手順を取るのが難しいことがある。そのような場合には、図-4.1.1のような実測波形を参考にして浮体橋の地震応答¹⁾を調べることができる。



(a) 短周期成分が卓越する地震波の例



(b) 中間的周期成分が卓越する地震波の例



(c) 長周期成分が卓越する地震波の例

図-4.1.1 入力地震波形の例¹⁾

図-4.1.1 は入力地震波の時刻歴波形であり、
 図-4.1.2 は各地震波のフーリエスペクトル図
 である。フーリエスペクトルでは、各地震波が、
 どのような周期成分を多く含んでいるかを知る
 ことができる。

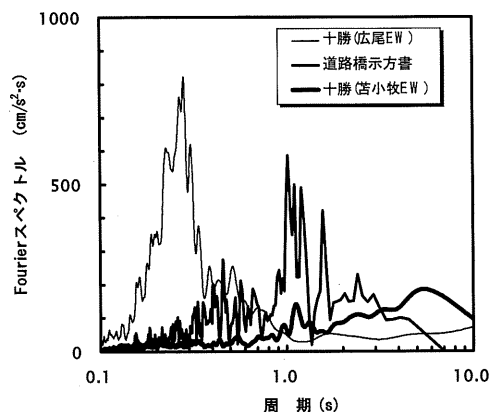


図-4.1.2 フーリエスペクトル¹⁾

4.2 浮体橋の地震応答解析の方法

(1) 解析方法

地震応答解析では、その目的によって解析方法を選定することが重要である。レベル1地震動に対しては弾性応答解析でもよいが、レベル2地震動に対しては非線形応答解析を行うことが必要となる。

一般に、弾性応答解析では、応答スペクトル法、モード解析法や直接積分法を使用することが多い。応答スペクトル法は応答の周波数成分毎に、モード解析法は振動モード毎に分解して応答を求め、それらの結果を合成して構造物の応答を求める方法である。非線形応答解析では一般的に直接積分法を使用することが多い。また、最大応答値を知りたい場合は応答スペクトル法、最大応答値とともに時刻歴応答も知りたい場合はモード解析法や直接積分法による時刻歴応答解析法が用いられる。

下表は、以上の解析法を簡単にまとめたものである。

項目	応答スペクトル法	モード解析法	直接積分法
解析法の略記	各モードでの応答値を応答スペクトルにより求めて、全モードについての最大応答を2乗和平方根により求める。	固有値解析を前提として、全体の応答を1自由度系の応答の重ね合わせとして表現する。	多自由度系の運動方程式を、時間軸上で直接的に数値積分する。固有値解析を必要としない。
線形/非線形	線形系に適用できる。	線形系に適用できる。	非線形系に適用できる。
出力	最大応答値を求める。	時刻歴応答が得られる。その値の最大を読み取れば、線形系の最大応答値が得られる。	時刻歴応答が得られる。その値の最大を読み取れば、非線形系の最大応答値が得られる。
長所	<ul style="list-style-type: none"> ・演算時間が短い ・入力地震波の特性を把握しやすい 	<ul style="list-style-type: none"> ・線形なので、直接積分法ほどの演算時間を必要としない 	<ul style="list-style-type: none"> ・非線形系を検討できる
短所	<ul style="list-style-type: none"> ・最大応答のみである ・時刻歴応答は得られない 	<ul style="list-style-type: none"> ・非線形系には適用できない 	<ul style="list-style-type: none"> ・演算時間が長い ・積分の仕方によっては、解が不安定になる。

(2) 解析事例

1) 事例その1：橋長400m級の例²⁾

i) 解析モデル

橋長400m級の浮体橋例としては、図-4.2.1のものを想定する。この解析には、図-4.2.2に示すはり・ばね要素モデルと図-4.2.3に示す有限要素モデルを用いた。はり・ばね要素モデルは、質点、はり、ばねで構造と地盤を3次元近似したものであり、全体の挙動を比較的容易に把握できる特徴がある。一方の有限要素モデルは、橋脚と地盤の相互作用を調べるために橋脚付近を2次元でより詳しくしたものである。このように解析の目的や求める精度によって、地盤や上部工の構造モデルを適切に選定することが重要である。

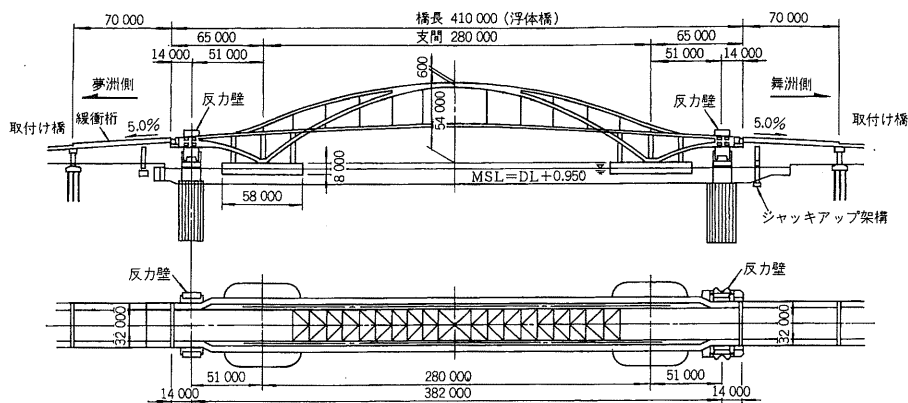


図-4.2.1 浮体橋の事例(単位: mm)²⁾

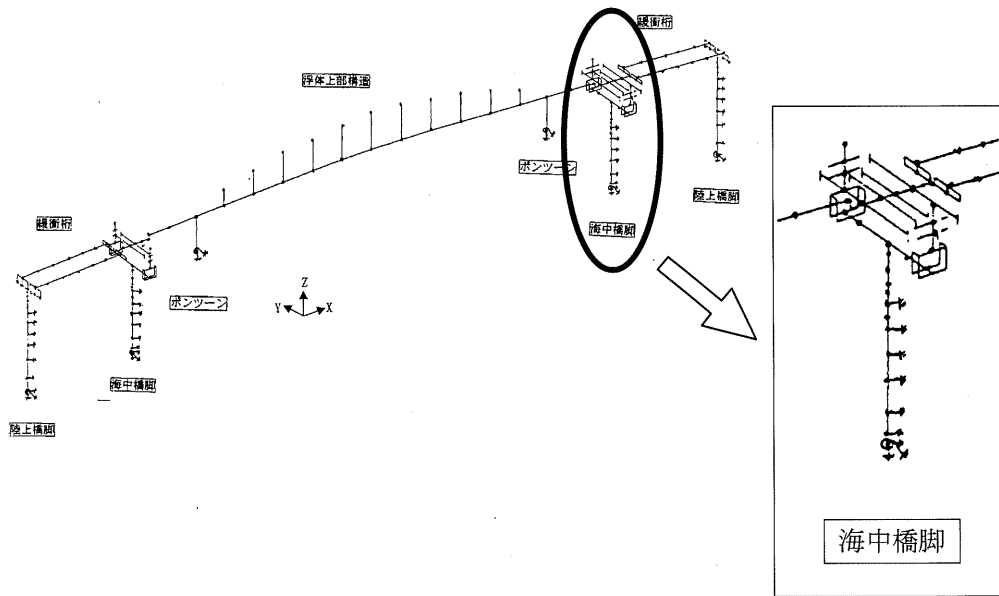


図-4.2.2 はり・ばね要素モデル

より詳細な解析

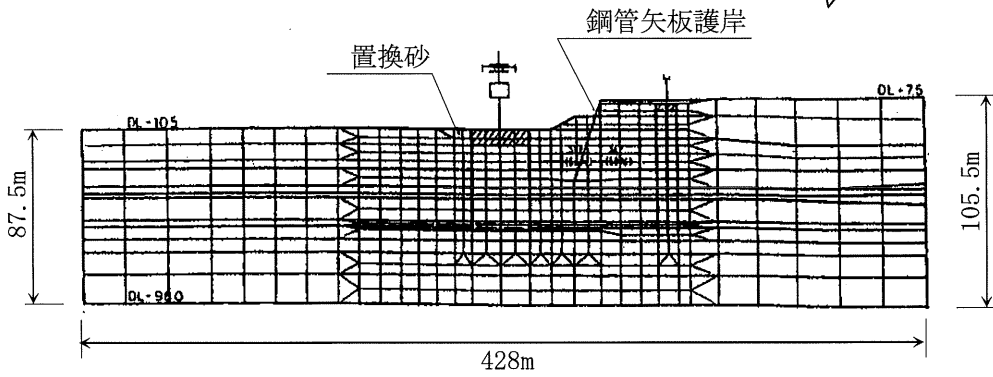


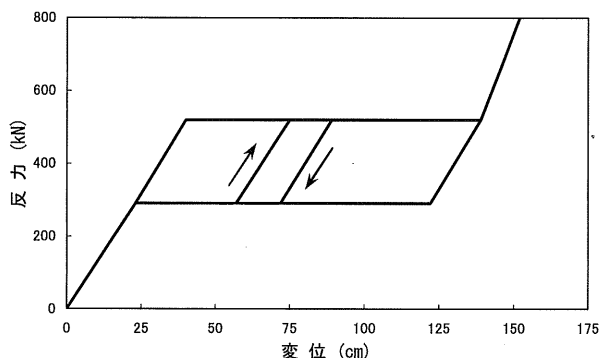
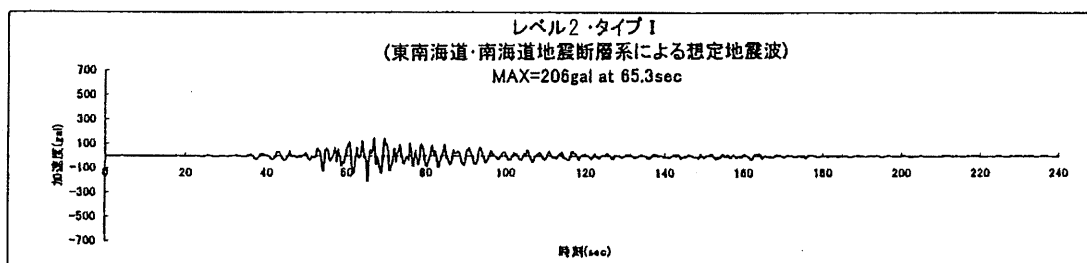
図-4.2.3 有限要素モデル (橋軸方向)²⁾

ii) 解析条件

浮体橋は近海域に設置されるものとして、表-4.2.1 に示す諸元を想定した。係留装置には、過去の実績の多い定反力型防舷材を使用したドルフィン係留を用いた。この定反力型防舷材の圧縮特性を図-4.2.4 に示す。解析のための入力地震波には、レベル1地震動、レベル2・タイプI（プレート境界型）地震動、レベル2・タイプII（内陸直下型）地震動などの多くのものを用いたが、ここでは、レベル2・タイプIの地震波形を図-4.2.5 に示す。

表-4.2.1 基本諸元²⁾

上部構造	橋長 400m×幅 32m: 鋼製ダブルアーチ形式
浮力体	58m×58m×8m(乾舷 3.6m)
係留システム	防舷材(定反力型): 3000H
全体重量	216,000kN(上部工 80,000kN, 浮力体 136,000kN)
付加重量	Surge: 17,000kN, Sway: 12,000kN
造波減衰	Surge: 6.9%, Sway: 6.0%
固有周期	Surge: 6.0 s, Sway: 5.0 s

図-4.2.4 防舷材の圧縮特性²⁾図-4.2.5 解析に使用した地震波の1例²⁾

iii) 解析結果と考察

図-4.2.2 のはり・ばね要素モデルの解析には、係留系の非線形性を考慮した有限要素法を用いた。図-4.2.3 の有限要素モデルの解析には、地盤の非線形性を考慮するた

めに、地盤を双曲線モデル (Hardin-Drnevich モデル) で近似した有限要素法を用いた。はり・ばね要素モデルの場合の解析結果について、その一部を図-4.2.6 に示す。各節点毎の変位 (この例では変位だが、速度、加速度も出力可能) が出力されるので、安全性の検討、使用性の検討などに用いられる。有限要素モデルの解析事例を図-4.2.7 に示す。この解析では橋脚基礎と地盤の相互作用を検討でき、杭体の安全性検討に適している。ただし、多大な労力を必要とするため、このような解析は詳細設計の段階で実施されることが多い。

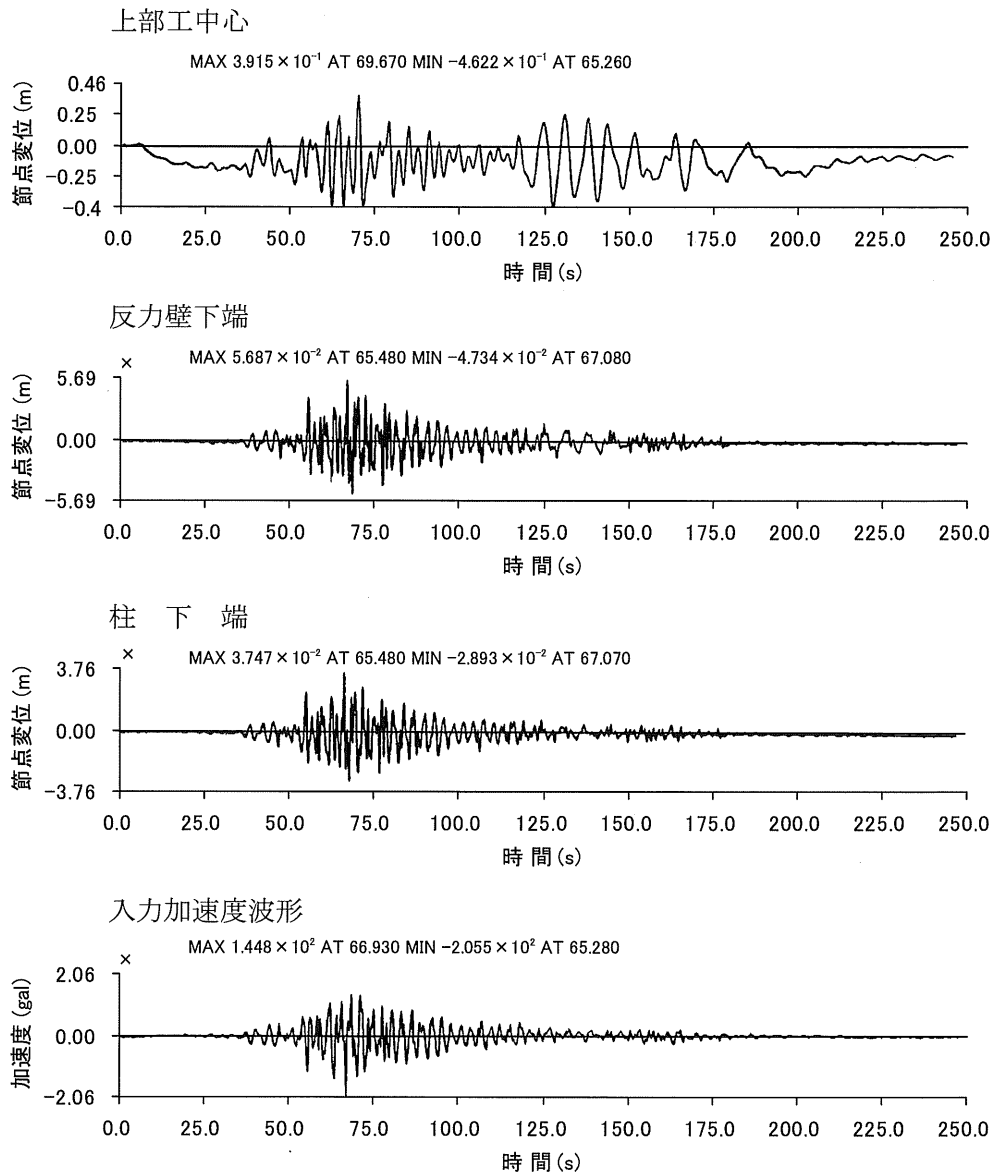


図-4.2.6 多質点モデルの解析結果の例²⁾

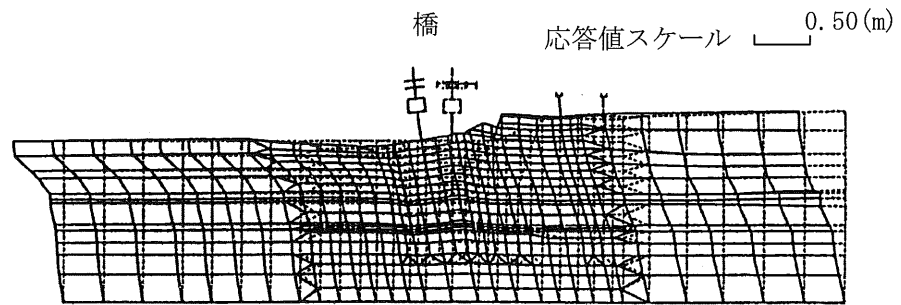


図-4.2.7 有限要素モデルの解析結果の例²⁾

2) 事例その2：橋長 200m級の例¹⁾

i) 解析モデル

浮体橋としては、島と島を連絡する図-4.2.8のようなケーブルで係留された浮体橋を想定する。そのうちの1ユニットの200m級の浮体橋を取り出した概念図が、図-4.2.9である。

全体系の解析は実施していないが、1ユニットの解析により地震応答特性の概略を把握したものである。解析においては、図-4.2.10のようなはり・ばね要素モデルを用いた。

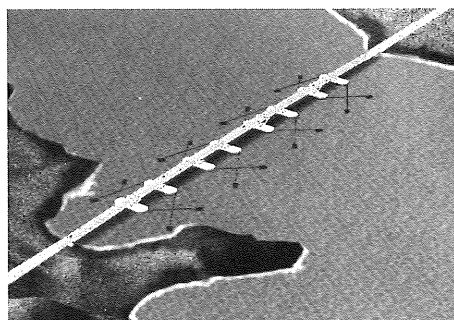


図-4.2.8 浮体橋の概念図

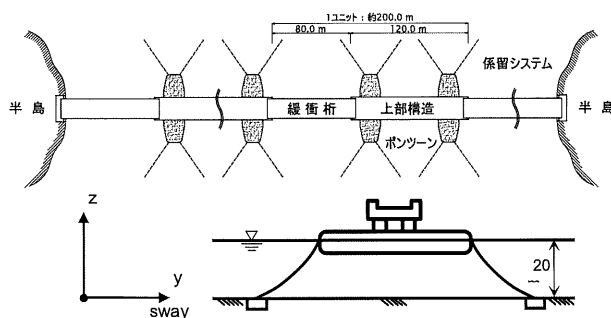


図-4.2.9 1ユニットの概念図¹⁾

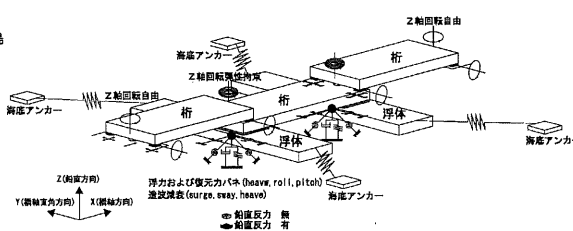


図-4.2.10 はり・ばね要素モデル

ii) 解析条件

浮体橋は比較的静穏な海域に設置されるものとして、表-4.2.2に示す諸元を想定した。係留装置には、水深変化や地盤変動に容易に対応できる構造として、ケーブルと定反力型防舷材を直列にしたハイブリッド型を用いた。この係留特性を図-4.2.11に示す。この係留装置の採用理由は、潮位変動や波・風に対しては比較的ばね定数が固い状態で拘束係留とし、地震時は水平方向変位を大きくすることにより地震力の影響を小さくするためである。入力地震波には、道路橋示方書に示すレベル2地震動相当の図-4.2.12を用いた。

表-4.2.2 基本諸元

上部構造	長さ 200m×幅 20m(1ユニット):鋼製箱桁
浮力体	60m×20m×5m(乾舷 2m)
係留システム	ケーブル:PWS187, 防舷材(定反力型):2500H
全体重量	69,000kN(上部工 29,000kN, 浮力体 40,000kN)
付加重量	Surge:30,900kN, Sway:9,800kN
造波減衰	Surge:12.4%, Sway:1.9%
固有周期	Surge: 8.6 s, Sway:7.1 s

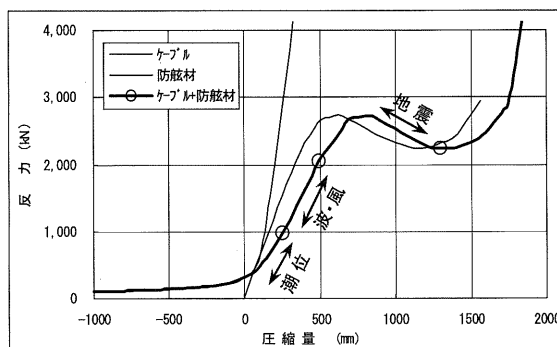
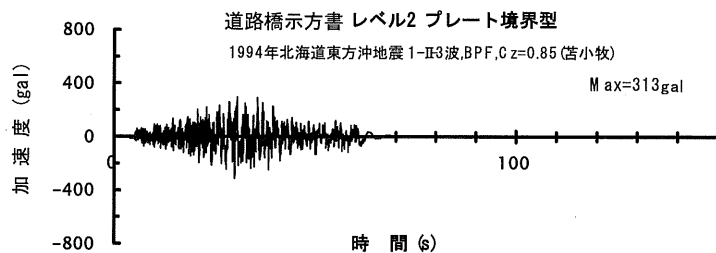
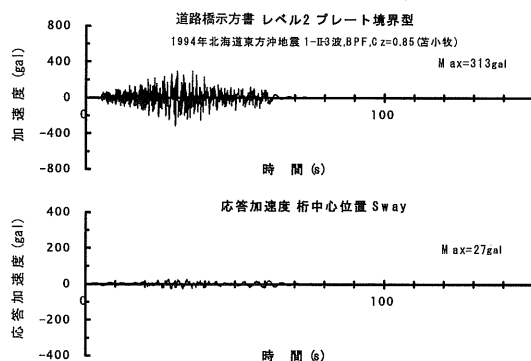


図-4.2.11 係留特性

図-4.2.12 解析に使用した地震波¹⁾

iii) 解析結果と考察

解析には、係留系の非線形性を考慮するために、直接積分法を用いた。解析結果の一例として、橋軸直角方向の応答加速度を入力加速度と合わせて図-4.2.13に示す。この図によると、橋台および係留装置から入力した加速度の最大値 313gal が、橋軸直角方向では 27gal に減少していることが分かる。応答加速度の減少が、免震性が高いとされる浮体橋のメリットの一つである。

図-4.2.13 解析結果の例¹⁾

4.3 浮体橋と固定橋の比較

浮体橋は、免震性の高い構造物とされているが、一般的な固定橋との相違を簡単に調べる。

(1) 想定したモデル

浮体橋：表-4.2.2 に示した長さ 200m×幅 20m×全高 12m 相当の橋

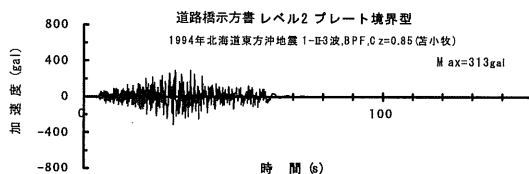
橋軸直角方向の固有周期：7.1s

固定橋：浮体橋と同等な長さ 200m×幅 20m×橋脚高 20m 相当の橋

橋軸直角方向の固有周期：1.25s

(2) 入力地震波

図-4.3.1 に示す道路橋示方書記載のレベル 2・タイプ I（プレート境界型）相当の地震波を、橋軸直角方向に作用させた。

図-4.3.1 解析に使用した地震波¹⁾

(3) 応答加速度と応答変位の比較

応答加速度と応答変位に関する浮体橋と固定橋の比較を表-4.3.1と図-4.3.2に示す。表-4.3.1によると、安全性（強度）に関する応答加速度は、浮体橋の方が固定橋よりかなり小さい。使用性に関する応答変位は、この事例ではほぼ同じである。

表-4.3.1 浮体橋と固定橋の応答値比較

項目	①入力値	②浮体橋	③固定橋	②/③
応答加速度 (gal)	313	27 (②/①) =0.09	726 (③/①) =2.31	0.04
応答変位 (cm)	—	28	29	0.96

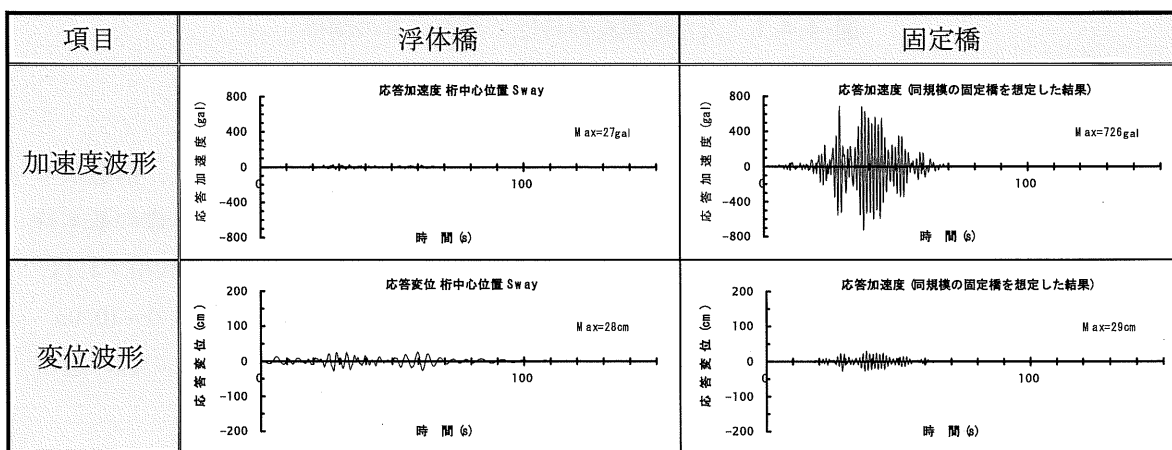


図-4.3.2 浮体橋と固定橋の応答波形¹⁾

4.4 入力地震波と地震応答の関係

(1) 入力地震波の特性と地震応答の関係

前述の4.1(4)において、地震波として、それぞれ短周期成分、中間的周期成分、長周期成分が卓越する3種類の地震波を示した。図-4.4.1は、これらの地震波を図-4.2.10モデルの橋軸直角方向に入力させた場合の応答値である。この結果によると、浮体橋の地震応答解析を行う場合、入力地震波の中にどのような周期成分を含むかによって、浮体橋の応答加速度、応答変位が大きく異なることが分かる。

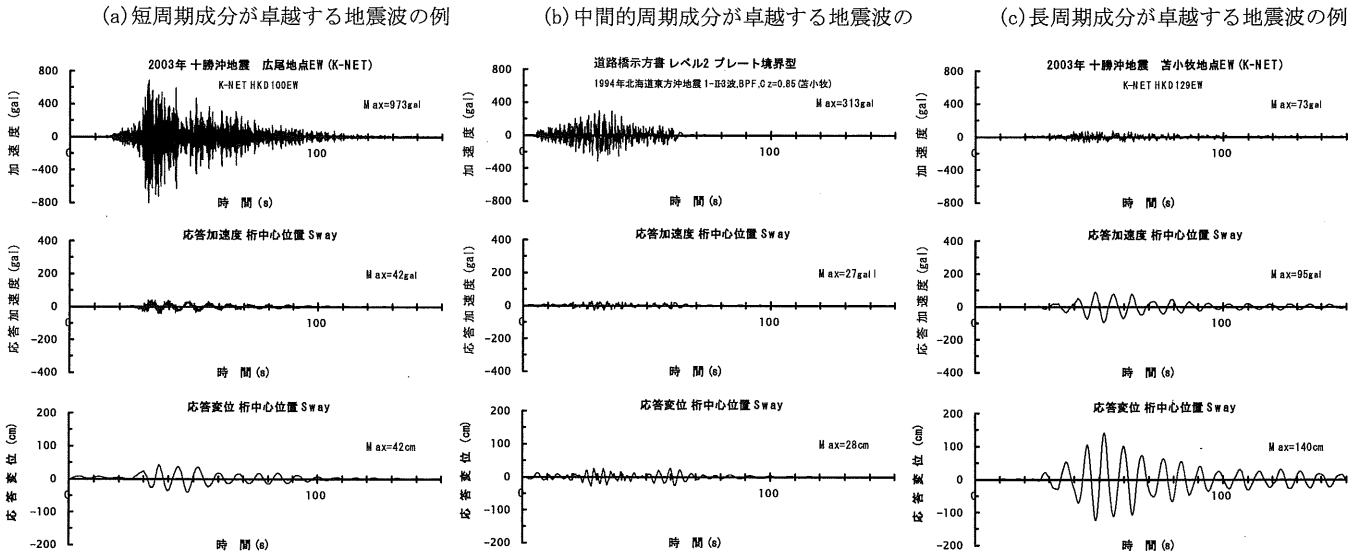


図-4.4.1 入力地震波の特性と地震応答の関係

(2) 応答スペクトル

浮体橋の基本計画の段階においては、入力地震波が確定していなかったり、構造系の振動特性・非線形特性が決まっていないことが多い。このような場合の浮体橋の基本特性は、図-4.4.2の応答スペクトルを利用して調べることができる。この図を利用すれば、短周期成分、中間周期成分、長周期成分を含む地震波の場合や固有周期が5.0~10.0sにある場合でも、浮体橋応答の概略値を把握することができる。ただし、この図の適用は構造系が線形であること、減衰係数が5%であることなどの制限がある。

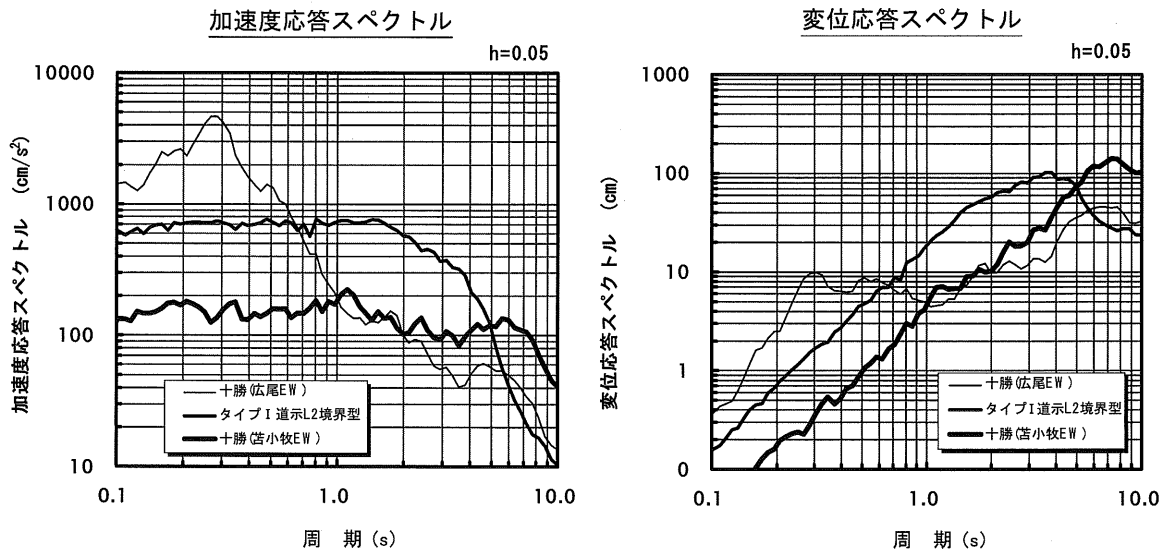


図-4.3.4 浮体橋の応答スペクトル¹⁾

参 考 文 献

- 1) 小鴨竜智, 日下理, 大輝聡: 入力地震特性が与える浮体式構造物 (浮体橋) の地震時応答, 土木学会中国支部研究発表会発表概要集, pp. 67-68, 2004
- 2) 大阪市: 夢舞大橋工事誌, 2002

5. 維持管理事例（本編 12.1.3, 12.1.4 の参考資料）

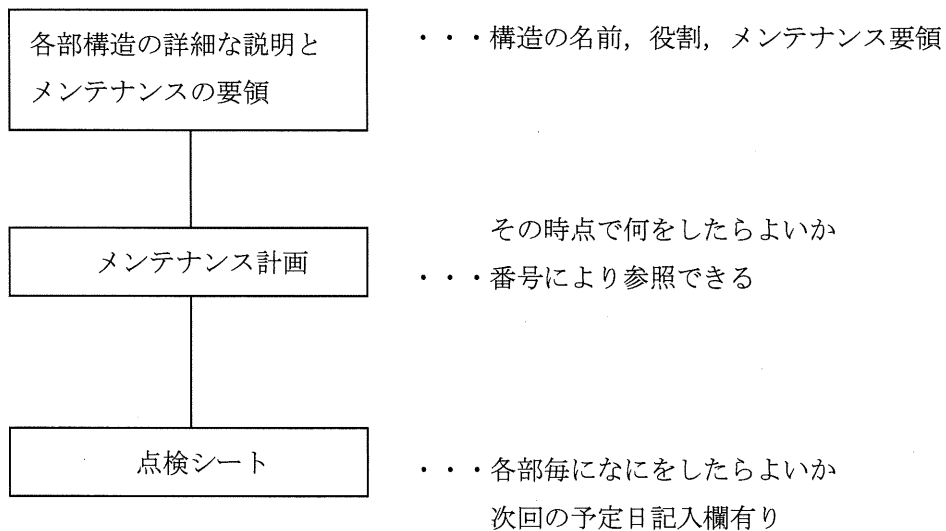
(1) 夢舞大橋の浮体橋部の点検シート例

大項目	点検箇所		点検シート	設置場所	点検部位	点検項目	点検方法	点検種別			備考						
	中項目	小項目						年次	開橋時	随時							
上部工	①桁内全般 ②桁外全般	2-1	桁内	排水管、電気設備	・損傷の有無	目視	○										
		2-2	桁外	高欄・防護柵	・損傷の有無	目視	○		○								
	③係留フェンダー	2-3	桁端部側面	防舷材本体	排水溝	・損傷の有無	目視	○		○		点検要領詳細は別紙参照のこと					
					リブ、吊材部外壁	・落書きの有無	目視	○		○							
					防舷材本体	・ゴム表面の割れ	目視・計測	○	○	○							
					受衝板	・錆の有無	目視	○	○	○							
						・塗装剥離の有無	目視	○	○	○							
						・損傷の有無	目視	○	○	○							
					吊り上げチェーン	・錆の有無	目視	○	○	○							
						・メッキ剥離の有無	目視	○	○	○							
						・磨耗量	目視・計測	○	○	○							
						・損傷の有無	目視	○	○	○							
下部工	①丸型防舷材	2-4	側壁外面	防舷材本体	・ゴム表面の割れ	目視・計測	○		○	点検要領詳細は別紙参照のこと							
					・亀裂の有無	目視	○	○									
					チェーン・シャックル	・錆の有無	目視	○	○								
	②クランク鋼	2-5	側壁外面	クランク鋼全面	・錆の有無	目視	○		○	年次点検は稼動後1年、3年とし、それ以降は5年毎とする。点検要領詳細は別紙参照のこと							
					・損傷の有無	目視	○		○								
					・溶接部の亀裂の有無	目視	○		○								
					電気防食	2-6	底板外面	本体	・防食性能の確認		電位計測	○		○	点検要領詳細は別紙参照のこと		
					③喫水計	2-7	側壁外面	検出器	・損傷、変形の有無		目視・計測	○		○			
								電気室内	信号増幅ユニット		・作動状況の確認	目視	○		○		
					浮体橋	ボトソン	④喫水計	2-7	側壁外面		中央制御室内	喫水表示ユニット	目視	○	△	○	点検要領詳細は別紙参照のこと △；数値確認を行うこと
											⑤ボート	2-8	デッキ上面	本体	・塗装剥離の有無	目視	
							⑥ガガ押し板	2-9	デッキ上面		本体	・損傷、変形の有無	目視	○		○	
・塗装剥離の有無	目視	○		○													
⑦重防食塗装	2-10	側壁外面上部	本体	・塗膜損傷の有無			目視	○		○							
				・劣化状況の有無			目視	○		○							
⑧内部全般	2-11	内面	本体	・損傷、変形の有無			目視			○							
				・浸水の有無			目視			○							
⑨デッキ面全般	2-12	デッキ上面	本体	・損傷、変形の有無			目視	○		○							
				・塗膜損傷の有無			目視	○		○							
反力壁	①受衝面	2-13	側面	本体			・損傷、変形の有無	目視	○		○						
							②倒立ピン部	2-14	受梁端部	ピン	・損傷、変形の有無	目視	○		○		
	ストップ取付ボルト	・緩み	目視・打診	○	○	○	点検要領詳細は別紙参照のこと										
	球面軸受	・異音の有無	聴診	○	○	○											
	③固定ピン部	2-15	受梁端部	ピン	・損傷、変形の有無	目視	○		○								
					ライク取付ボルト	・緩み	目視・打診	○	○	○							
	受梁	①倒立ピン付水平ストッパー	2-16	受梁端部	ストッパー	・損傷、変形の有無	目視	○	○	○	点検要領詳細は別紙参照のこと						
						・シール材の劣化状況	目視	○	○	○							
		②倒伏時受台	2-17	受梁端部	緩衝材	取付ボルト	・損傷、劣化の有無	目視	○	○	○						
						取付ボルト	・緩み	目視・打診	○	○	○						
		③RC境界部	2-18	受梁下端	本体	・損傷、変形の有無	目視	○	○	○							
						・シール材の劣化状況	目視	○	○	○							
④内部		2-19	内面	本体	・浸水、結露の有無	目視	○		○								
					RCアンカーボルト	・緩み	目視・打診	○		○							

(2) ワシントン湖の浮き橋 (Ever Green Floating Bridge) の点検シート例

ワシントン湖の浮き橋（橋長 1,767m, 標準ポンツーン 10 個, 高架橋ポンツーン 8 個, アンカーケーブルにて固定）の維持管理計画書の構成は, 各部の詳細な説明が図と写真をおりませながら箇条書きで述べられ, 最後にまとめて, 日間調査, 月間調査, 異常時点検, 及び, 各部の点検シートが付けられている。最後のまとめ項目は, 全て本文の項目番号により管理されており, 使用者に使い易いものとなっているので参考として紹介する。

(概略の構成)



(以下, 抜粋)

メンテナンススケジュール

- ・「項目番号」は本文の段落番号を示しており, 詳細については本文を参照すること。
- ・維持管理に必要と思われる追加項目, 手順は本部に報告すること。
- ・本計画書に記載されている項目を照合し, 条件を満たさない事柄を, シートの裏か, シートを新たに作成・追加して, 状況の記録を残すものとする。
- ・全ての報告書には日付と署名を入れる。
- ・間違いなければ, 直ちに橋梁管理者へ口頭で報告する。
- ・維持管理業務の結果は標準フォームに記録し報告するものとする。

日間調査 (Daily Maintenance Schedule)

調査項目
高架構造支間の動き具合について一般的な調査，観察を行い異常が無いか。
ポンツーンの外面に異常が無いか。
垂直ガイドローラーの受動板のローラー跡について異常が無いか。

週間調査 (Weekly Maintenance Schedule)

調査項目
ポンツーンの外壁面に異常が無いか。
LL と 00 (端支点部) のポンツーンの防舷材に異常は無いか。
作動ユニットへの潤滑油の塗布，及び，大まかな調査を行う。
端部反力壁構造の潤滑油給油，及び，調査。
水平ガイドローラー構造の調査と潤滑油塗布。
水平ガイドローラーの受動板とローラー跡について異常が無いか。
垂直ガイドローラー構造の調査と潤滑油塗布。
三角錐構造，反力梁構造に異常は無いか。
センターロック構造に異常は無いか。
水圧ポンプユニットに異常は無いか。
緩衝工に異常は無いか。

異常時点検 (Inspection after major storms and earthquakes)

調査項目
トラス桁，縦桁，鋼製橋脚部が移動していないか
ポンツーンの外壁面に異常が無いか。
ポンツーン A, LL, 00, AA の横ケーブルのアンカーケーブル張力，及び，8つの縦のアンカーケーブルに異常は無いか
駆動装置に異常は無いか。
反力壁に異常は無いか
水平ガイドローラー構造に異常は無いか。
水平ガイドローラーの受動板とローラー跡について異常が無いか。
垂直ガイドローラー構造に異常は無いか。
垂直ガイドローラーの受動板のローラー跡について異常が無いか。
三角錐構造，反力梁構造に異常は無いか。
センターロック構造に異常は無いか。
水圧ポンプユニットに異常は無いか。
緩衝工に異常は無いか。

19年間の維持管理要領

M: Monthly (月)

・「項目番号」は本文の段落番号を示しており、詳細については本文を参照すること。

・各項目の作業完了時に、下記の空欄へ状態を記入すること。

↓

維持管理の作業内容	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	間隔	次回予定
高架構造支間														
可動部給油													1/2M	
東側伸縮装置に異常は無いか													M	
喫水調査													M	
塗装のタッチアップ補修													A	
塗装塗り替え													8Y	
高架支柱の貯水槽													6M	
ポンツーン セル内面														
喫水													A	
水密区画と水中部構造の調査													4M	
ポンツーンMとNの水バラスト量調査													6M	
ボルト継ぎ手部の保護グリース再塗布													必要に応じ	
全マンホールのタッチアップ													A	
外側マンホールの塗装塗り替え													5Y	
水中支柱内マンホール塗り替え													10Y	
水中セル調査													6M	
ポンツーン セル外面														
デッキ上面調査													3M	