

海中ケーブルで係留された浮体橋の 地震応答特性

SEISMIC RESPONSE CHARACTERISTICS OF FLOATING BRIDGE ANCHORED WITH SUBMARINE CABLE

福田功¹・上田茂²・菅野高弘³・中野則夫⁴・小嶋竜智⁵・平尾壽雄⁶

Isao FUKUDA, Shigeru UEDA, Takahiro SUGANO
Norio NAKANO, Tatsunori OGAMO and Hisao HIRAO

- ¹正会員 工修 関西国際空港(株) 施設整備本部 (〒549-8501 大阪府泉佐野市泉州空港北1番地)
²フェロー会員 工博 鳥取大学 工学部土木工学科 (〒680-8552 鳥取市湖山町南四丁目101)
³正会員 工博 (独)港湾空港技術研究所 地盤・構造部 (〒239-0826 横須賀市長瀬三丁目1-1)
⁴正会員 工修 (財)沿岸技術研究センター (〒102-0092 東京都千代田区隼町三丁目16)
⁵正会員 中電技術コンサルタント(株) 道路部 (〒734-8510 広島市南区出汐二丁目3-30)
⁶正会員 工博 (社)日本海洋開発建設協会 (〒104-0032 東京都中央区八丁堀二丁目5-1)

Floating structures in water generally have better characteristics in respect to seismic resistance. Because of the few studies on actual floating bridges, there are still some aspects concerning seismic response characteristics that remain unclear. This report studied structural behavior under seismic conditions of a floating bridge that was anchored with submarine cable, a newly conceived system, by conducting underwater vibration experiments and numerical analysis.

As the floating bridge used in the research was comparatively flexibly anchored with submarine cable it has a long-period structure. When the behavior under seismic conditions of this structure was investigated and analyzed, the floating bridge with long-period structure and with submarine cable had less of a response acceleration than a conventional short-period type fixed bridge, and therefore had better seismic resistance characteristics.

Key Words : *Floating bridge, submarine cable, seismic response*

1. はじめに

浮体式構造物(浮体橋)は、一般に、耐震性において優れているとされている。これは、質量が大きい割には係留ばねが柔らかいことにより、長周期構造系になる場合が多いためである。同じような特徴を持つ長周期構造系として、陸上構造物であれば、長大吊橋、高層ビルなどが挙げられる。しかし、浮体橋は国内での事例が少なく、地震時応答特性について十分には解明されていない部分がある。今回の浮体橋は、海中ケーブルで係留する方式であり、ばねが柔らかいことから長周期構造系になる。これは通常の固定橋(陸上橋)と

異なる周波数域での振動となるので、本研究は、水中振動実験により浮体橋の地震時の応答や安全性を確かめ、浮体橋の耐震性が高いことを確認したものである。

最初に、入力地震動について説明する。今回の研究では、従来の内陸直下型のものに加え、海底軟弱層が厚いような地点、盆地に軟弱層が堆積するような地点などで考えられる、長周期成分が多く含まれる地震動も検討に加えた。次に、対象が浮体構造物であるため、水中振動実験により、地震時の振動特性や安全性を確認する。その後、今回の浮体橋は幾何学的にも材料的にも非線形なばねに係留された構造系であるため、直接積分法により応答を数値解析した事例を示す。

2. 浮体構造の概要

本研究で想定した浮体橋の概要を以下に述べる。

図-1に浮体橋の鳥瞰図を示す。

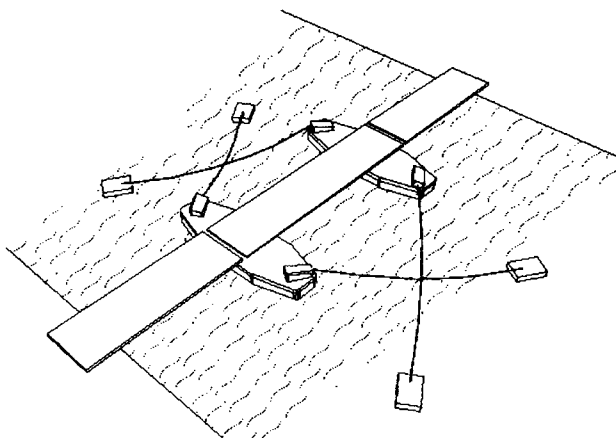


図-1 浮体橋の鳥瞰図

(1) 設計条件

想定した設計条件を表-1に、架橋地点の断面図を図-2に示す。

表-1 設計条件

項目	要求性能
道路規格	第4種第1級
活荷重	B活荷重
潮位	C.D.L.+3.20 m~C.D.L.-0.5 m
暴風時の波	有義波高0.8 m, 有義波周期5.7 s
基本風速	42 m/s(高度10 mの位置)

地形は、水路幅が200m、水深が16mの静穏な海域を想定した。地盤は、沖積層が25m堆積する軟弱地盤を想定し、工学的基盤は深度C.D.L.-160mとした。

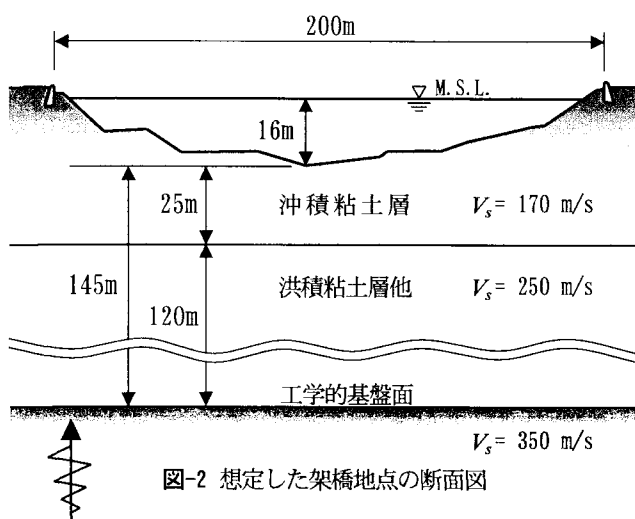


図-2 想定した架橋地点の断面図

(2) 構造形式

今回の浮体橋の概略を図-3、図-4に示す。上部構造は、3径間単純鋼床版箱桁、水中部の下部構造は

RCハイブリッド製のポンツーンとした。係留は、浮体中央は海中ケーブルによりシンカーブロックに繋ぎ、端支点は鋼製のピン支承によりポンツーンに留めた。

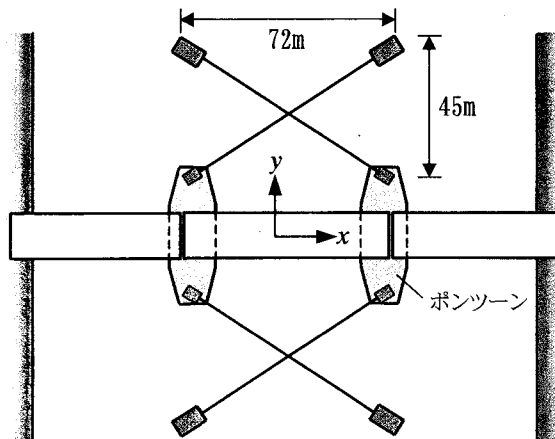


図-3 平面図

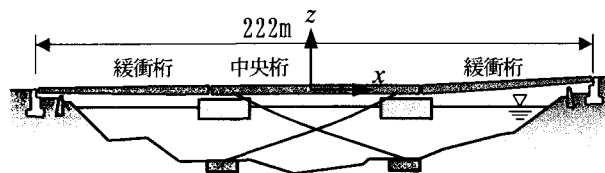


図-4 側面図

(3) 主要諸元

構造の主要諸元を表-2に示す。

表-2 主要諸元

項目	諸元
桁高	中央桁: 2.5 m(橋長/桁高=1/25)
総重量	70,000 kN
浮力体寸法	幅20 m×長さ60 m×高さ5 m
喫水	3.0 m

今回の係留は、ケーブル(外径130mm)と防舷材(高さ2500mm)を直列に繋いだ構造である。係留索1本当たりの反力(P)と変形量(δ)の関係を図-5に示す。

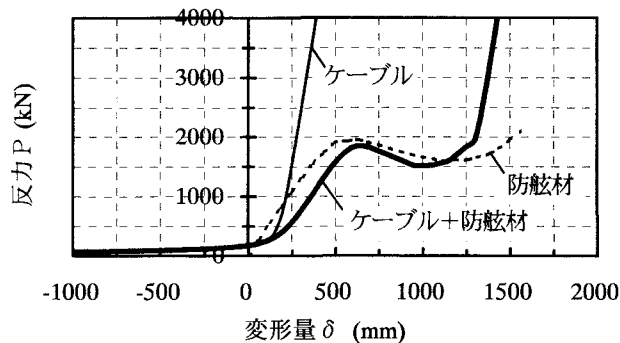
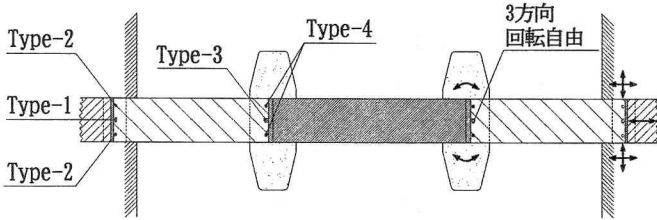


図-5 係留索のP- δ 特性

係留を除く拘束条件を図-6に示す。浮体全体としては、橋軸方向には自由であり、橋軸直角方向において

は、桁間で弾性支持され、全体としては両支点のピン支承で固定されている。



項目	橋軸サジ	橋直Y効イ	鉛直Zヒブ	回転 α_x ロール	回転 α_y ピッチ	回転 α_z め
緩衝桁と橋台の間	Type-1	free	fix	Free	free	free
	Type-2	free	free	Fix	free	free
緩衝桁と中央桁の間	Type-3	fix	fix	Free	free	free
	Type-4	elas	elas	Elas	free	free

中央桁とボーンソーは剛結

図-6 支承および境界の条件

3. 入力地震動

(1) 一般的な入力地震動の長周期成分

表-3に、今回の検討に用いる入力地震波を示す。図-7は橋梁の設計に一般的に用いられている設計地震波と、石油タンクのスロッシング現象が問題となった十勝沖地震(2003年)の観測波の特性を示す。この図から、陸上構造物の設計においては、従来、固有周期が5秒前後までのエネルギーを持つ入力地震波を想定してきたが、10秒程度までエネルギーを持つ場合があることがわかる。そこで、今回の研究では、従来から用いられて来た設計地震波に加え、長周期の成分も持つような入力地震波も想定した。

表-3 入力地震波

レベル	基盤面波形	基盤加速度
レベル1	八戸波	308 cm/s^2
レベル2	ポートアイランド波	514 cm/s^2
	シナリオ波	302 cm/s^2

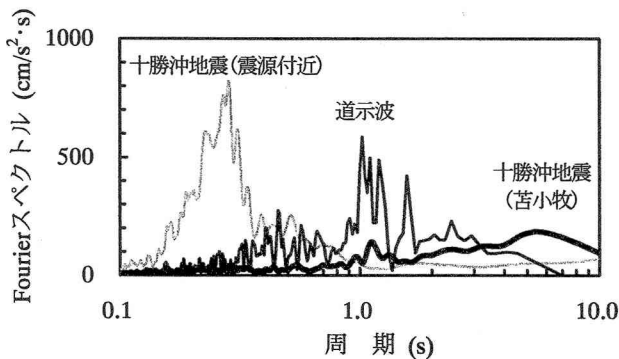


図-7 Fourierスペクトル

(2) 今回の検討に用いるシナリオ地震

本研究では浮体橋の建設地点として、軟弱層の厚い、

堆積盆地状の湾内を想定した。これは、このような建設地点では、地震波が短周期からなる実体波と、長周期の表面波の2つの特徴を持つためである。なお、今回の研究においては、このような特徴を有する地震動を想定するため、ハイブリッドグリーン関数法によりシナリオ地震動を想定した。基盤波形を図-8に示す。また、SHAKEにより入力深度で応答計算した波の周期特性を図-9に示す。

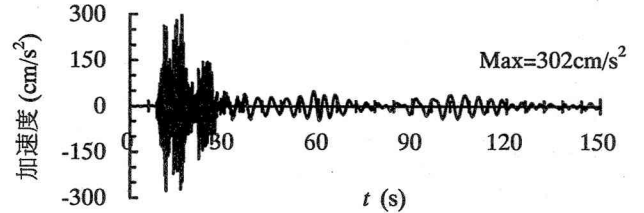


図-8 入力の基盤面波形

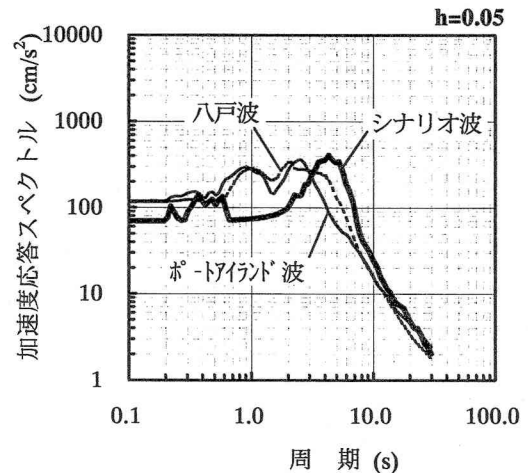


図-9 加速度応答スペクトル

4. 水中振動実験

(1) 実験の目的

地震時における浮体橋の安全性を確認するために、水中振動実験を行った。

(2) 実験の方法

実験には、写真-1に示す独立行政法人港湾空港技術研究所の3次元水中振動台を用いた。

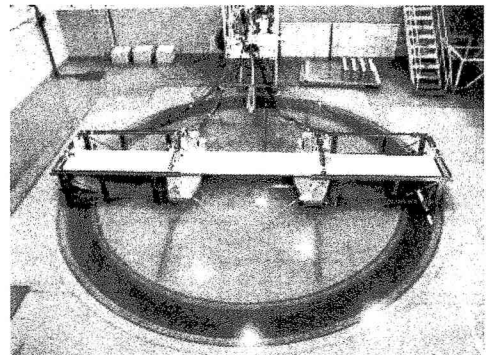


写真-1 3次元水中振動台

水中で作動する振動台は、直径が6mの円形で、水平方向や鉛直方向に加振できる。水平方向の最大加速度では20m/s²、最大変位で±0.3mが再現できる。

模型は、振動台の大きさから縮尺を1/30とし、フルード則に準じて製作した。桁は、アクリルを用いた剛体とする一方、桁のねじり剛性は、支承の鉛直方向にばねを設けることで表現した。固定支承は軸受けにより拘束する構造とし、可動支承はポールキャスターとローラーを用いた。係留の防舷材に相当する機構は、コイルばねとウエイトを組み合わせて定反力特性を模擬し、ケーブルは剛性よりもカテナリーが整合するように重量を重視してワイヤーロープを用いた。

実験の手順を次に示す。

- ①自由振動実験：振動曲線から対数減衰率を確認する。
- ②正弦波加振実験：周波数を変えた複数の正弦波により固有周期を確認する。
- ③不規則波加振実験：設計入力地震動を用いて非線形振動特性や反力を確認する。

実験では、中央桁および緩衝桁の中央に加速度計とレーザー式変位計を設置して、3方向成分の変位と加速度を計測した。また、支承や係留の反力は、分力計で測り、係留ロープの変位はポテンションメータで計測した。なお、水の振動は、波高計による計測である。

(3) 実験条件

実験条件を表-4に示す。入力地震波は、特性の異なる地震動で、入力の方向は、水平2方向に加え斜め方向について実施する。これは、係留索が斜め方向に配置されており、片効きの影響を調べるためである。

表-4 実験条件

項目	内容	備考
入力波	不規則波4波形	鉛直は、シナリオのみ。
加振方向	X, Y, XY, Z	XY, Zは、シナリオのみ。
加振時間	30秒	(実機：160秒)
潮位	M. S. L.	
初期張力	7.4N	(実機：200kN)

(4) 実験結果と考察

a) 自由振動実験による計測値

図-10に自由振動による振動曲線を示す。このような図から対数減衰率を読み取った結果、橋軸方向で $h=0.14$ 、直角方向で $h=0.06$ 相当であることがわかった。

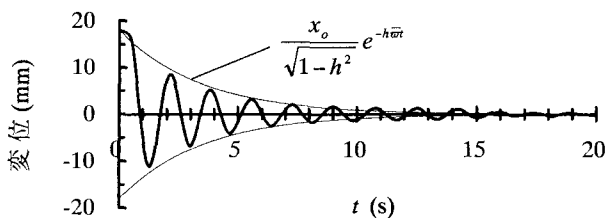


図-10 振動曲線(模型値)

b) 不規則波加振による計測値

表-5に浮体中心での実験による計測値を示す。次に時刻歴の代表例としてシナリオ波の結果を図-11～図-14に示す。図-11は模型換算した入力加速度波形で、図-12に示す中央桁の応答加速度時刻歴(模型値=計測値)と比較しやすいように、縦軸のスケールをそろえて表示している。図-13は中央桁の変位応答時刻歴(模型値)を示す。図-14は橋台部の支承(Type-1)の反力(模型値)である。

表-5 実験による計測結果 ()は実機換算値

ケース	入力加速度 (cm/s ²)	応答加速度 (cm/s ²)	応答変位 (mm)	支承反力(N)	防舷材反力(N)
八戸波	105.9	13.4	10.5 (31.5cm)	21.0 (567.0kN)	18.7 (504.9kN)
ポ-ト71 ランド波	115.2	14.6	12.8 (38.4cm)	23.3 (629.1kN)	23.7 (639.9kN)
シナ リオ波	69.3	19.8	24.4 (73.2cm)	22.2 (599.4kN)	67.5 (1822.5kN)

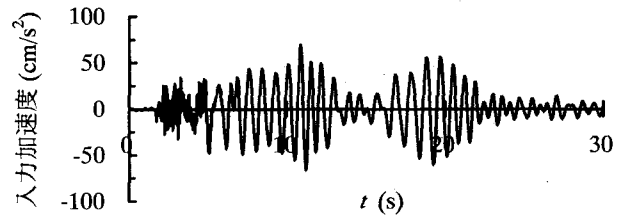


図-11 換算した入力加速度(模型値)

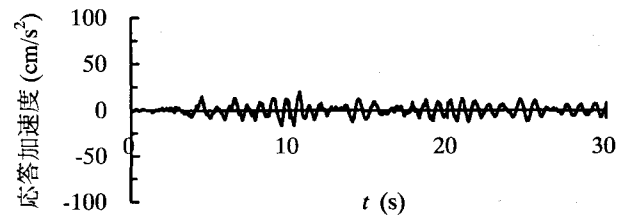


図-12 応答加速度の時刻歴(模型値)

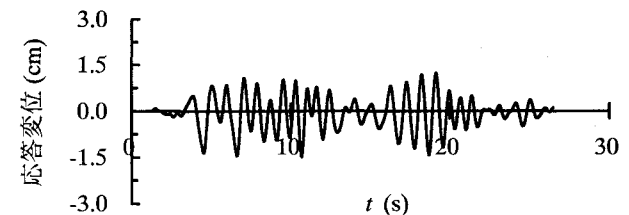


図-13 応答変位の時刻歴(模型値)

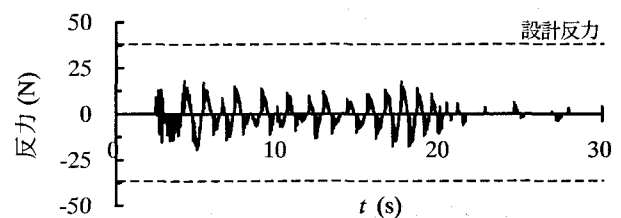


図-14 Type-1支承の反力(模型値)

c) 安全性に関する考察

・応答加速度：表-5や図-11と図-12によると、浮体橋の応答加速度は入力加速度の約1/3～1/7となっており、浮体橋は免震性が高いことがわかる。

・支承および係留の反力：図-14は浮体橋と橋台を繋ぐ支承反力の時刻歴で、この図から模型値での最大反力は22.2Nであることが読み取れる。これを実機換算すると599.4kNとなるが、今回の浮体橋では支承の設計反力が980kN相当の値を想定しているため、落橋に対して安全であることが確かめられた。また、表-5に示す防舷材反力の模型値を実機換算のひずみで整理すると24%となる。防舷材の許容ひずみはクリープや速度依存性を考慮すると36%以下であるが、十分に安全なひずみレベルにある。このことから、直列に繋いでいるケーブルの破断や浮体が漂流しないことを確認した。

・桁の移動量について：図-13の最大応答変位を実機換算すると±75cm程度になる。これは一般の陸上橋が±30cm程度であることに比べれば大き目の値であるが、長大橋などに用いられる大変形対応の伸縮装置などにより十分に対応できる。

5. 地震応答解析

(1) 解析の目的

水中振動実験結果の再現性を数値解析で確認し、さらに実験以外のケースについても検討するため、地震応答解析を実施した。

(2) 解析方法の説明

a) 係留ばねの計算方法

今回の浮体橋で採用している係留は、海中ケーブルと防舷材を直列に繋いだ構造である。この方式は、供用時の振動はカテナリーとケーブル張力で制御し、異常時には、防舷材の定反力域を活用し、大変形により力を吸収する特徴がある。今回は、このような、幾何学的にも材料的にも非線形な特性を持つ係留について、図-15に示すようなケーブル要素と非線形ばねからなる部分的なモデルを用いて静的な幾何学的非線形解析を行い、係留の反力と変形量の関係を求めた。なお、解析コードはDLANA²⁾を用いた。

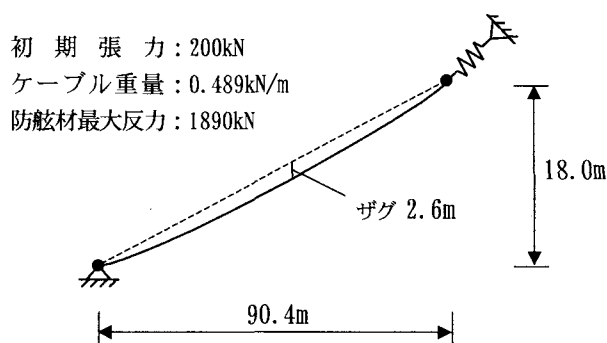


図-15 係留ばねの特性

b) 計算方法

浮体橋の地震時応答は、係留の非線形な復元力特性を再現するため、モード法ではなく、次に示す運動方程式を時間領域で直接積分して求める。

$$[M + Ma(\bar{\omega})]\{\ddot{x}\} + [C + Ca(\bar{\omega})]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = -[M + Ma(\bar{\omega})]\{\ddot{y}\}$$

M , C , K は構造の質量、減衰、剛性行列を示し $M_a(\bar{\omega})$, $C_a(\bar{\omega})$ は付加質量、造波減衰行列を示す。 \ddot{y} は入力加速度である。

c) 解析モデル

浮体橋の地震応答解析に用いるモデルを図-16に示す。解析モデルは、陸上橋梁の解析などで用いられる、一般的なはり-質点系の骨組みでモデル化した。

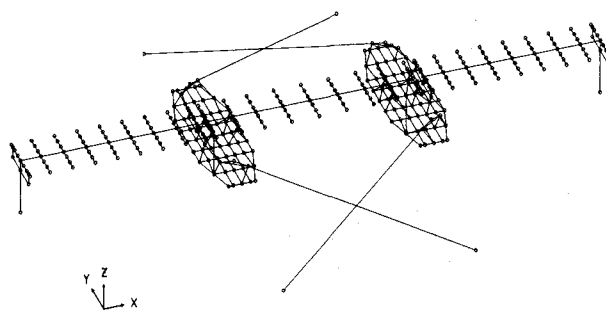


図-16 解析モデル図

(3) 解析結果と考察

a) 実験と解析の固有周期の比較

表-6に固有周期を示す。表は、自由振動実験による結果を実機換算したものと、実機相当の解析値を整理したものである。また、表中の等価剛性とは、係留のP-δ関係における割線剛性を意味する。この表から、係留の剛性に比べ支承の剛性が大きい橋軸直角方向の場合は、解析モデルは模型を再現できていることがわかる。しかし、橋軸方向のように係留による非線形性の影響が著しい場合には、初期剛性に基づく固有周期は実現象と整合しにくい結果となった。この点について、設計においては等価剛性で解析することにより、固有周期を近似想定できることがわかった。

表-6 固有周期の整理

項目	実験模型値	実機換算値	
		初期剛性	等価剛性
橋軸方向	11.06	43.25	10.86
直角方向	9.31	9.29	8.80

b) 実験と解析の応答値の比較

解析結果の代表例として、シナリオ波による橋軸方向の結果を図-17～図-19に示す。図は、実機換算した解析値と模型実験値を重ねて表示したものである。図-

18は中央桁の応答変位を示す。この図の振動周期や振幅から、今回の解析方法でほぼ不規則な応答が再現できていることがわかる。図-17は中央桁の応答加速度を示す。次に図-19は、防舷材の応答反力を示している。これらの図から、加速度や反力などの力に関しては、解析の方が高い傾向になった。これは、実機や模型において、発生が予想される支承の摩擦抵抗による影響が考えられる。

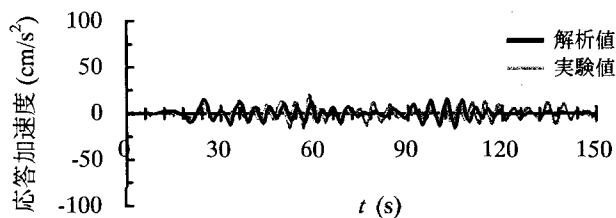


図-17 応答加速度の時刻歴(実機換算値)

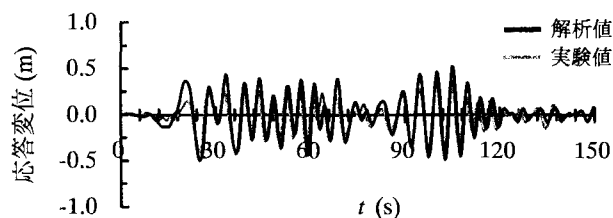


図-18 応答変位の時刻歴(実機換算値)

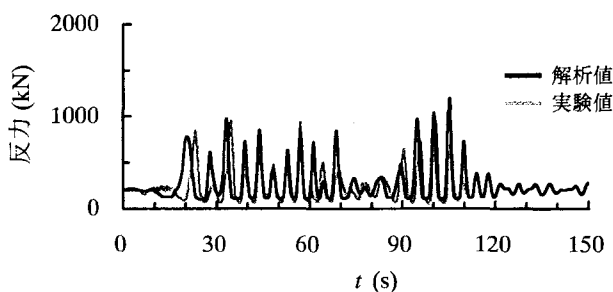


図-19 応答反力の時刻歴(実機換算値)

c) 入力位相差に関する検討

想定のような軟弱地盤から地震動入力される場合、実体波と表面波に位相差が生じる。今回の実験では装置の制約からこれらを同時入力したので、入力地震の位相差の影響は、表面波伝播速度の分散性を考慮した位相差入力による数値解析により検討を行った。解析は、1質点が2つのばねで係留されるモデルで行った。結果を表-7に示す。これは、ばねの反力について、位相差有/位相差無の比を整理したものである。入力はシナリオ波を用い、位相は、次の方法で想定した。

$$\Delta t = L/V \quad (L: \text{橋長} \approx 200\text{m}, V: \text{地表面波の伝播速度})$$

結果は1波形に関する概略値であるが、今回の浮体橋のような固有周期の構造物においては、位相差の影響は少ないとみなすことができる。

表-7 入力位相差によるばね反力の比

位相(s)	伝播速度 V (m/s)	ばね反力の比 $T=10.0$ s(浮体橋)
0.05	4000	1.00
0.25	800	0.99
2.00	100	0.94

6. まとめ

浮体橋について、水中振動台実験と数値解析により地震時応答特性を検討した。今回の検討から得られた主な内容を次に示す。

- ①水中振動台を用いた模型実験により、支承の破損やケーブル、防舷材の破断がないことを確かめた。また、想定外の大変位や振動が生じないことも確認できた。
- ②係留系の非線形性を考慮した応答解析により、浮体橋の地震応答がほぼ再現できた。今回は解析結果の方が実験値より大きかったことから、今後、支承など摺動部の摩擦抵抗や流体力を振動数に応じて変化させること、防舷材の減衰を履歴減衰として扱うことに取り組むことで、さらに精度よく応答を再現できると考える。
- ③数値解析により入力位相差を考慮した検討を実施し、間接的であるが今回の浮体橋においては、表面波による位相遅れは、安全性において影響が少ないことを確認した。

謝辞: 本研究を進めるにあたり、(社)日本海洋開発建設協会の中に、石原謙治様、大久保寛様、杉本達彦様、高野光史様、田中洋様で構成される浮体橋作業部会が設置されました。作業部会から貴重なご意見を賜ったことに対し、深甚な謝意を表します。

参考文献

- 1) 野津厚, 井合進: 経験的サイト増幅特性に基づくシナリオ地震の地震動算定, 港湾技術資料, No. 991, 2001.
- 2) TNO DIANA BV.: DIANA Version 7.2 Users Manual, 1999.
- 3) 福田功, 上田茂, 白石悟, 中野則夫, 日下理, 平尾壽雄: 海中ケーブルで係留された浮体橋の波浪中動揺特性, 海洋開発論文集, Vol. 21, 2005.