

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

丸山 忠明* ・ 川村 幸男* ・ 武田 純男**
永田 修一*** ・ 吉田 尚史**** ・ 山瀬 晴義*****

1. 緒 言

夢洲～舞洲連絡橋（仮称）は、大阪市の埋立地である夢洲と舞洲間の水路を跨ぐ浮体式の可動橋として計画され、現在設計が行われている（丸山ら，1997）。本橋は上部工を2つのポンツーンで支持する構造となっており、また風や波の外力に対しては、浮体橋は橋体に取り付けられたゴム防舷材を介して係留橋脚で係留されている。通常、係留設計は浮体を剛体とし、風・波の不規則外力に対する浮体の運動や防舷材変位等を時々刻々計算する数値シミュレーションにより行われる。しかし、数値シミュレーションでは幾つかの仮定の下にモデル化がなされているために、現実の挙動とは若干の差異が予想される。ゴム防舷材を用いた浮体構造物の係留を考える場合、数値シミュレーション上の防舷材の歪－反力特性モデルは、軸圧縮変位とそこに到る変形履歴により一意的に決定されるものが用いられている。しかし実際の防舷材の歪－反力特性は、ヒステリシスや圧縮の繰返しおよび傾斜圧縮等の要因により変化するが、数値シミュレーションモデルでは、この実際の変動要因を加味できないため現実との差異が生じることから、モデル化の妥当性の評価が必要となる。一方、実際の防舷材の挙動・性能がほぼ現実的な形で再現可能なシミュレーション手法としてハイブリッドシミュレーションがある（小田ら，1985，1986）。ハイブリッドシミュレーションは二次元浮体の運動を対象とし、浮体動揺のシミュレーション計算を行いながら、同時に3軸圧縮試験機により防舷材模型の圧縮試験を実施し、防舷材の反力荷重をリアルタイムでシミュレーション計算にフィードバックしていく方法である。この方法との比較により、数値シミュレーションにおける防舷材反力特性のモデル化が適切かどうか評価できる。

本研究では、浮体橋の外力条件を与えたときの、数値シミュレーションとハイブリッドシミュレーションの比

較検討を実施し、数値シミュレーションモデルの妥当性を評価した。

2. ハイブリッドシミュレーション

2.1 係留シミュレータ

ハイブリッドシミュレーションに用いる係留シミュレータの概要を図-1に示す。本シミュレータは二次元係留浮体の運動を対象とするものである。外力として浮体に直角に沖側より入射する波および風を考え、波と風による外力はあらかじめ計算しておき、時系列を外力テーブルとしてコンピュータに蓄えておく。シミュレータが起動すると3軸圧縮試験機が外力テーブルを読み込んで動き始め、試験機が防舷材を圧縮することにより生じる反力を計測し、A/D変換してコンピュータに取り込み浮体重心回りの力に変換する。この反力と風・波による外力を加え合わせて、浮体の運動方程式は次式で示される。

$$M \cdot \begin{pmatrix} \ddot{y} \\ \ddot{z} \\ \ddot{\theta} \end{pmatrix} + N \cdot \begin{pmatrix} \dot{y} \\ \dot{z} \\ \dot{\theta} \end{pmatrix} + K \cdot \begin{pmatrix} y \\ z \\ \theta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} F_y \\ F_z \\ F_\theta \end{pmatrix} \quad \cdots (1)$$

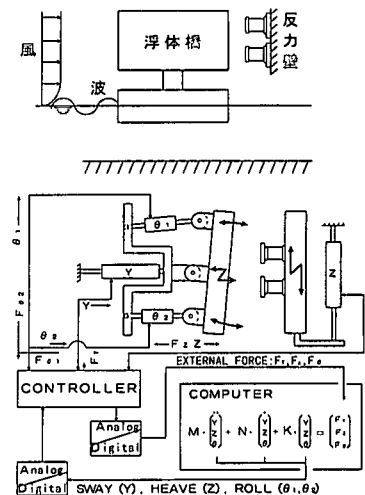


図-1 ハイブリッドシミュレータの概要

* 正会員 工修 大阪市建設局 土木橋梁課
** 正会員 工修 日立造船(株) 鉄構事業本部 橋梁設計部
*** 正会員 工博 日立造船(株) 技術・開発本部 技術研究所
**** 工博 日立造船(株) 技術・開発本部 技術研究所
***** 正会員 株式会社ブリヂストン 土木・海洋商品開発部

表-1 3軸圧縮試験機仕様

静的最大加振力	Y軸	±5300 kgf
	Z軸	±5300 kgf
	θ軸	±5300 kgf
動的最大加振力	Y軸	±4000 kgf
	Z軸	±4000 kgf
	θ軸	±4000 kgf
最大加速度	Y軸	±2.3 G×980 cm/sec ²
	Z軸	±2.3 G×980 cm/sec ²
	θ軸	±0.94 G×980 cm/sec ²
最大速度	Y軸	41.4 cm/sec.
	Z軸	42.6 cm/sec.
	θ軸	27.5 cm/sec.
最大ストローク	Y軸	±125 mm
	Z軸	±300 mm
	θ軸	±35 deg.

右辺の外力項とし、この運動方程式を数値的に解いて浮体重心の変位を求め、この値を各アクチュエータの変位に変換し、D/A変換を行って圧縮試験機に指令信号として出力する。これによりまた試験機が移動し、新たな反力が防舷材から発生する。上記手順の繰り返しを短時間で行うことにより、あたかも浮体が波および風の中で動揺しているような状態を再現できる。本シミュレーションで用いる3軸圧縮試験機の仕様は表-1に示すとおりである。入力する波および風外力の合力は3.で述べる数値シミュレーションで用いる外力の時系列を用いる。

2.2 試験方法

ハイブリッドシミュレーションでは、図-2の様に設置された可動橋の設計条件に対応させて、外力条件を表-2のように設定した。また、防舷材モデルは、実機をSUC2500RHと想定し、実機と同配合のゴム材料を用い形状の相似縮尺 $S=1/12.5$ としたSUC200RHを2個用いた。

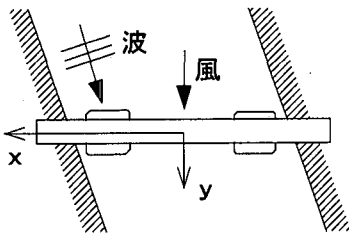


図-2 対象浮体（実機）の概要

表-2 外力条件設定

	外力条件1	外力条件2
風	$U_{10}=43$ m/sec 橋軸直角方向	$U_{10}=50$ m/sec. 橋軸直角方向
波	$H_{1/3}=1.4$ m $T_{1/3}=7.7$ sec. 水路平行方向	$H_{1/3}=1.4$ m $T_{1/3}=7.7$ sec. 水路平行方向

実験では30分×6回の連続3時間実験を行い、以下の項目について計測を行った。①動揺量、防舷材の変位量・反力 ②試験前および3時間試験終了直後の防舷材の歪-反力特性曲線 ③試験開始後、30分毎の防舷材の表面温度。

3. 数値シミュレーション

3.1 計算法

シミュレーション対象となる可動橋が3次元性を有するため、浮体の動揺を推定する数値シミュレーションは6自由度運動を対象とする。しかし、2次元実験であるハイブリッドシミュレーションに対応するため、数値シミュレーションでは、風は橋軸直角、波は水路平行方向と、それぞれの外力の方向性を考慮した上で、それぞれの外乱により橋体に働く力のうちSway, Heave, Roll方向の外力の時系列のみを与え、他のモードの外力を零として計算を行った。今回の数値シミュレーションでは運動方程式(1)式をRunge-Kutta法を用いて解いた。外力は、表-2の外力条件を用い、風はDavenportスペクトル、波はBretschneider-光易スペクトルから時系列を作成した。また、付加質量係数、造波減衰力係数といった周波数依存性をもつ流体力係数は、数値シミュレーションで得られた各モードの動揺時系列を統計処理し、動揺の平均周波数での係数値を用いて再びシミュレーション計算を実施するという手順を繰り返し、収束値を求めた。

3.2 防舷材ヒステリシスのモデル化

実機防舷材はゴム製であるため、歪-反力特性がヒステリシスをもつ。今回の数値シミュレーションでは、ヒステリシスを図-3に示す防舷材の歪-反力(ξ - R)曲線において、点 $P(\xi, R)$ が、①圧縮時：曲線 C_1 上にあるときは、曲線 C_1 上を移動(ケースA)、曲線 C_1 より下にあるときは、曲線 C_1 の最大傾斜の直線上を移動(ケースB)、②緩和時：曲線 C_2 上にあるときは、曲線 C_2 上を移動(ケースC)、曲線 C_2 より上にあるときは、曲線 C_1 の

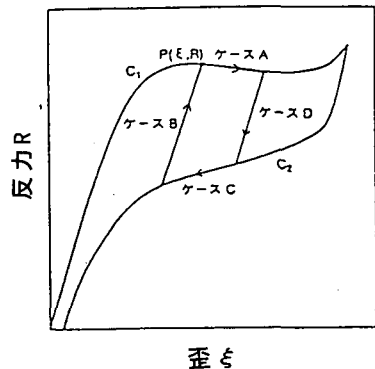


図-3 防舷材ヒステリシスのモデル化

最大傾斜の直線状を移動(ケース D), とモデル化し, これを係留シミュレーションプログラムに組み込んで計算を実施した。

4. 両シミュレーション結果の比較

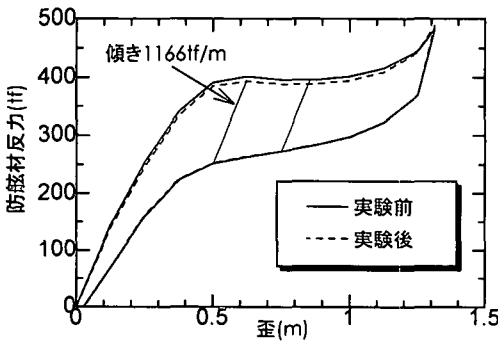
以下では, 表一2 の外力条件のうちで, より厳しい外力条件 2 の結果について述べる。

4.1 防舷材の経時変化

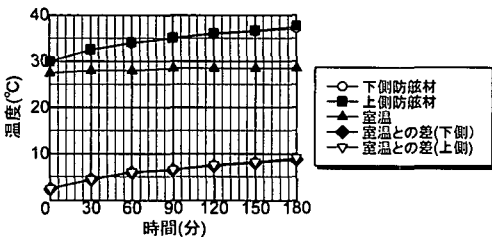
図一4 に, ハイブリッドシミュレーション開始前および 3 時間試験終了直後の防舷材歪一反力特性の計測結果を示す。圧縮側の曲線は試験開始前と比べて少しだけ反力特性の低下が見られる。一方, 緩和側については試験前後でほとんど特性の変化は見られない。

図一5 は, 試験時の上下 2 個の防舷材表面温度の変化を示したものである。同図には室温も示している。3 時間の試験により防舷材表面温度は室温より約 9 度高くなり, また試験開始前後で約 6.5 度の温度上昇が見られる。図では上下の防舷材の温度変化は重なっており, 上下防舷材での温度変化にはほとんど差がない。

表一3, 表一4 に 6 回の試験で計測された防舷材反力(上下 2 個分の和) および上下 2 個の防舷材変位の平均値, 標準偏差および振幅の 1/3 有義値を示す。また, 図一6, 図一7 に 6 回の試験での防舷材反力, 防舷材変位の各統計量を示す。6 回の計測での各統計値の変動は小さく, 今回のハイブリッドシミュレーションの再現性が良好なことがわかる。



図一4 防舷材歪一反力特性の計測値



図一5 3 時間試験時の防舷材表面温度変化

4.2 数値シミュレーションとの比較

次に, ハイブリッドシミュレーション試験結果と数値シミュレーションとの比較を行う。今回は, ハイブリッドシミュレーションに対応した数値シミュレーションを実施するために, 防舷材特性曲線としてハイブリッドシミュレーションで得られた試験開始前後の歪一反力特性曲線(図一4)を平均したものを用いた。

表一5 は, 浮体の運動および防舷材反力(上下 2 個分),

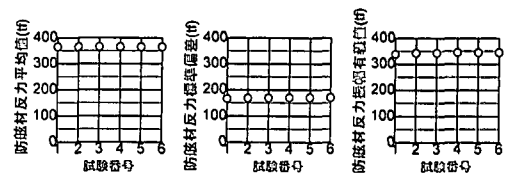
表一3 防舷材反力統計量

防舷材反力統計量				
試験番号 No.	平均値 η mean	標準偏差 $\eta(\sigma)$	振幅の有義値 ξ amp. (1/3)	η mean + ξ amp. (1/3)
1	365.025	165.943	337.625	544.755
2	365.000	168.070	342.050	547.325
3	364.950	168.960	342.375	548.500
4	364.975	169.548	344.350	548.750
5	365.025	169.983	343.675	550.075
6	364.975	170.280	344.550	549.000

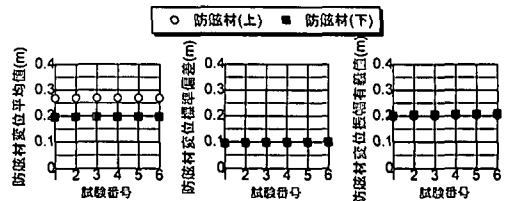
表一4 防舷材変位統計量

防舷材変位(上) 統計量				
試験番号 No.	平均値 η mean	標準偏差 $\eta(\sigma)$	振幅の有義値 ξ amp. (1/3)	η mean + ξ amp. (1/3)
1	0.268	0.092	0.196	0.464
2	0.269	0.094	0.199	0.468
3	0.269	0.095	0.199	0.468
4	0.269	0.095	0.201	0.470
5	0.269	0.096	0.202	0.472
6	0.269	0.096	0.202	0.472

防舷材変位(下) 統計量				
試験番号 No.	平均値 η mean	標準偏差 $\eta(\sigma)$	振幅の有義値 ξ amp. (1/3)	η mean + ξ amp. (1/3)
1	0.195	0.095	0.200	0.396
2	0.196	0.097	0.204	0.400
3	0.196	0.098	0.205	0.401
4	0.196	0.099	0.206	0.403
5	0.197	0.099	0.207	0.404
6	0.197	0.100	0.208	0.405



図一6 防舷材反力の統計値



図一7 防舷材変位の統計値

表-5 ハイブリッドシミュレーションと数値シミュレーションの統計値

ハイブリッドシミュレーション						
助揺モード	平均値 η mean (m, deg.)	標準偏差 $\eta(\sigma)$ (m, deg.)	振幅の有義値 ξ amp. (1/3) (m, deg.)	η mean + ξ amp. (1/3) (m, deg.)	振幅の最大値 ξ amp. (max.) (m, deg.)	η mean + ξ amp. (max.) (m, deg.)
sway	0.231	0.094	0.197	0.428	0.329	0.560
heave	0.204	0.122	0.241	0.445	0.475	0.679
roll	-1.118	0.790	-1.540	-2.658	-2.807	-3.925
数値シミュレーション						
助揺モード	平均値 η mean (m, deg.)	標準偏差 $\eta(\sigma)$ (m, deg.)	振幅の有義値 ξ amp. (1/3) (m, deg.)	η mean + ξ amp. (1/3) (m, deg.)	振幅の1/1000最大値 ξ amp. (max.) (m, deg.)	η mean + ξ amp. (1/1000) (m, deg.)
sway	0.265	0.097	0.182	0.447	0.375	0.640
heave	0.201	0.128	0.243	0.444	0.495	0.696
roll	-1.310	0.987	-1.877	-3.187	-3.820	-5.130
ハイブリッドシミュレーション						
防舷材反力	平均値 η mean (m, deg.)	標準偏差 $\eta(\sigma)$ (m, deg.)	振幅の有義値 ξ amp. (1/3) (m, deg.)	η mean + ξ amp. (1/3) (m, deg.)	振幅の最大値 ξ amp. (max.) (m, deg.)	η mean + ξ amp. (max.) (m, deg.)
	364.950	168.960	342.375	707.325	464.747	829.697
数値シミュレーション						
防舷材反力	平均値 η mean (m, deg.)	標準偏差 $\eta(\sigma)$ (m, deg.)	振幅の有義値 ξ amp. (1/3) (m, deg.)	η mean + ξ amp. (1/3) (m, deg.)	振幅の1/1000最大値 ξ amp. (max.) (m, deg.)	η mean + ξ amp. (1/1000) (m, deg.)
	366.058	182.499	317.079	683.137	706.271	1,072.329
ハイブリッドシミュレーション						
防舷材変位	平均値 η mean (m, deg.)	標準偏差 $\eta(\sigma)$ (m, deg.)	振幅の有義値 ξ amp. (1/3) (m, deg.)	η mean + ξ amp. (1/3) (m, deg.)	振幅の最大値 ξ amp. (max.) (m, deg.)	η mean + ξ amp. (max.) (m, deg.)
上	0.269	0.095	0.199	0.468	0.299	0.568
下	0.196	0.098	0.205	0.401	0.368	0.564
数値シミュレーション						
防舷材反力	平均値 η mean (m, deg.)	標準偏差 $\eta(\sigma)$ (m, deg.)	振幅の有義値 ξ amp. (1/3) (m, deg.)	η mean + ξ amp. (1/3) (m, deg.)	振幅の1/1000最大値 ξ amp. (max.) (m, deg.)	η mean + ξ amp. (1/1000) (m, deg.)
上	0.268	0.098	0.185	0.453	0.379	0.647
下	0.184	0.095	0.181	0.365	0.368	0.552

上下2個の防舷材の変位の統計値について、ハイブリッドシミュレーション結果と数値シミュレーション結果を比較したものである。なお表中で ξ amp. (max.)は時系列中の振幅の最大値、 ξ amp. (1/1000)は極値分布をRayleigh分布と仮定して、標準偏差より ξ amp. (1/1000)= 3.87σ として計算したものである。Heave, 防舷材反力, 防舷材変位の統計値については大略一致している。また, Swayについては数値シミュレーションの方が平均値, 標準偏差が大きく, 振幅の有義値 ξ amp. (1/3)

についてはほぼ同程度の値となっている。また Roll については, 数値シミュレーションの方がハイブリッドシミュレーションより値が少し大きくなっている。

図-8に, 防舷材歪の頻度分布の比較を示す。図中には対応したRayleigh分布も示す。ハイブリッドシミュレーションと数値シミュレーションは概ね一致している。また, Rayleigh分布は頻度分布を比較的良く説明しており, 今回のシミュレーションでは防舷材特性の非線型影響はあまり大きくなかったものと考えられる。

図-9～図-13には暴風時(2)における, Sway, Heave, Roll, 防舷材反力, 防舷材変位それぞれの, ハイ

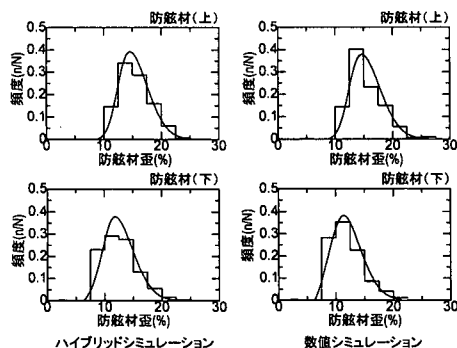


図-8 防舷材歪の頻度分布

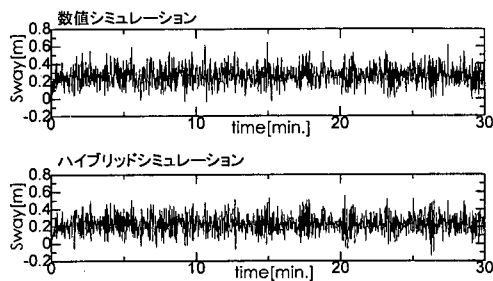


図-9 Sway運動の時系列

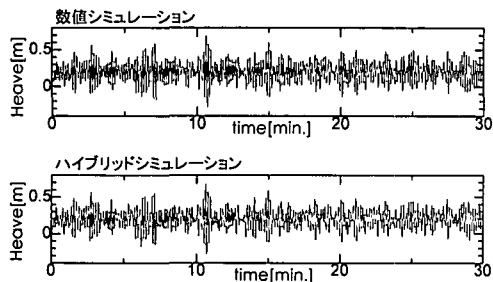


図-10 Heave 運動の時系列

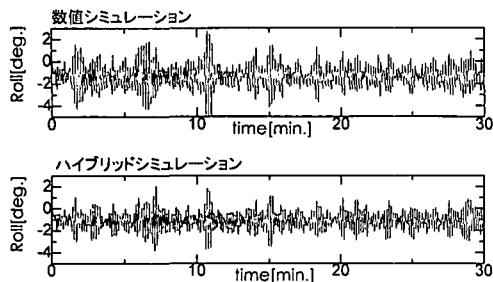


図-11 Roll 運動の時系列

ブリッドシミュレーションと数値シミュレーションの時系列を示す。時系列ベースで比較しても、両シミュレーション結果はよく合っている。

5. 結 言

浮体動揺の数値シミュレーション法の精度を検証するため、防舷材模型を用いたハイブリッドシミュレーションを実施し、両シミュレーション結果の比較、検討を行った。その結果をまとめると以下ようになる。

① 試験により防舷材表面温度は上昇したが、3時間試験経過後でも防舷材の特性変化はほとんど見られなかった。

② 防舷材は、動的特性や繰返し特性、クリープ特性など数値シミュレーションに取り入れることが難しい特性をもつが、数値シミュレーションと比較した結果、今回の荷重条件では、これらの特性がシミュレーション結果に及ぼす影響は小さかった。

③ 今回数値シミュレーションに用いた防舷材ヒステリシスモデルはほぼ妥当であったと評価できる。

以上のことより、ハイブリッドシミュレーションにより、現状の数値シミュレーションでの防舷材モデルの有効性が確認され、数値シミュレーションによる浮体動揺の推定法は十分な精度を有することが示された。

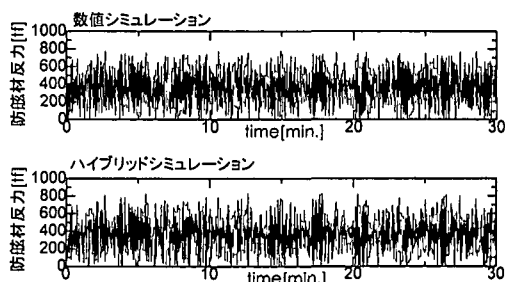


図-12 防舷材反力の時系列

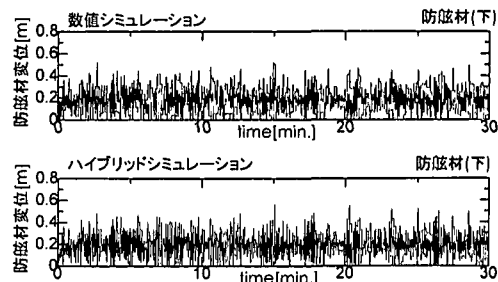
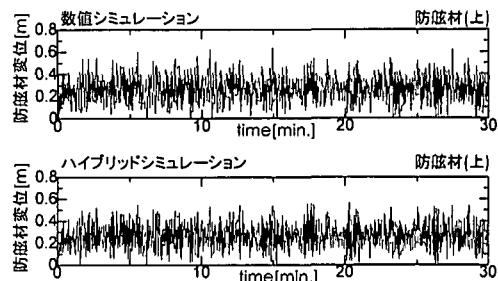


図-13 防舷材変位の時系列

本研究については、大阪市可動橋検討委員会(委員長：渡邊英一京都大学教授)及び動揺専門委員会(委員長：小田一紀大阪市立大学教授)の委員各位並びに運輸省関係者の方々から貴重なご意見を頂いた。ここに深甚なる謝意を表します。

参 考 文 献

- 小田一紀・石上昌男・秋山 斉 (1985): ハイブリッド型シミュレーション法による荒天時船体動揺解析, 第32回海岸工学講演会論文集, pp. 662-666.
- 小田一紀・秋山 斉・石上昌男 (1986): 不規則波・変動風下の係岸船舶の動揺解析—ハイブリッド型シミュレーション法による解析—, 第33回海岸工学講演会論文集, pp. 541-545.
- 丸山忠明・川村幸男・武田純男・永田修一・三宅成司郎・藤田 孝 (1997): 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巻, pp. 896-900.