

特殊形状をした単層ラチスシェルの振動特性

小山 傑* 都祭 弘幸*
小田 康弘* 淵上 勝志**

要 旨

「下関水族館」の大屋根⁽¹⁾は、特殊な形状をした単層のラチスシェルである。この構造物の振動特性と仕上材が振動特性に及ぼす影響を把握することを目的として固有値解析と振動測定を行ったので、本報ではその結果を報告する。また測定結果を基に、実挙動と整合するモデル化についての検討も行ったので、併せて報告する。

振動測定は、屋根仕上げ工事前と仕上げ完了後に行った。屋根仕上げ完了後の測定結果から推定した減衰定数は、1%より小さい値であったが仕上げ工事前に比べて数値が大きくなっており、屋根仕上げ材の減衰への寄与を確認することができた。

測定結果を基に行ったモデル化についての検討では、節点に剛域を設定して剛性の高い接合部を評価したモデルが実際の挙動とよく整合することがわかった。

1. はじめに

2001年4月オープンの下関水族館(図-1)には、水族館本館からイルカプール上に連続して架かる独特な曲面形状の大屋根がある。図-2は、その曲面形状の切出し方法を示しており、ドーナツ曲面外周部分を2つの円筒形で切り取る形で屋根の形状が大きく定まる。この大屋根は南北2つに大きく分けられ、北側の半分はSRC

造4F建て上部の置き屋根であり、南側半分は単層ラチスシェルによる屋根である(図-3)

ラチスシェルは、主にH形鋼を採用し基準材はH-404×201×9×15、各節点間隔は約3.4mである(図-4)。接合部は、3次元的に取り付くH形鋼に対応するために所定の肉厚を持たせて剛性を高めており、ほとんどが鋳鋼によるものである。



図 - 1 下関水族館模型写真

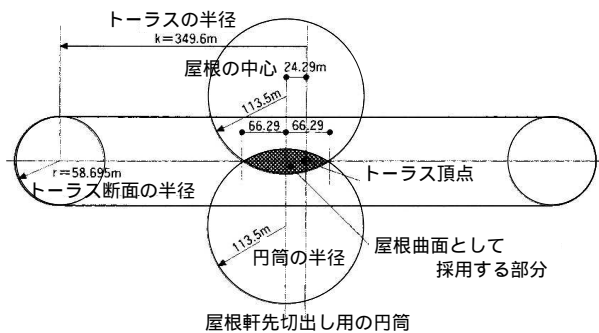


図 - 2 屋根曲面切出し方法

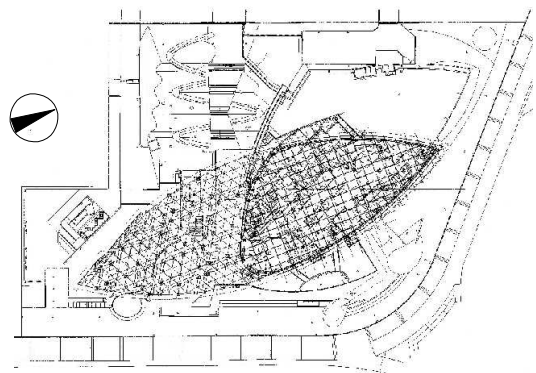


図 - 3 配置図

*技術研究所 **建築本部建築設計部

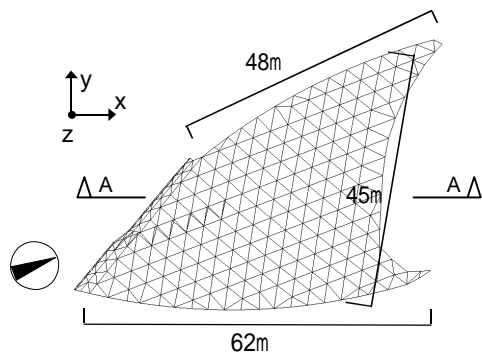


図 - 4 平面図

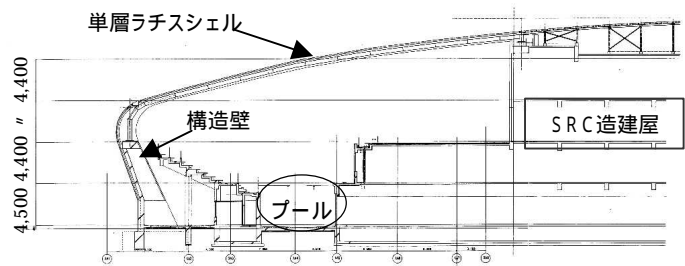


図 - 5 A - A断面図

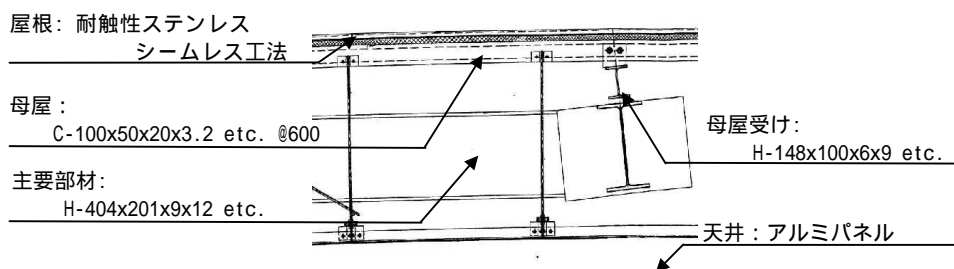


図 - 6 仕上げ概要

シェル屋根は、南側では斜めに配置された構造壁に、北側では水族館 S R C 建屋の曲線状外周部分の柱上で支持されており、変則的な非対称の支持条件である（図 - 5）。東側、西側に面する長手方向 2 辺はフリーで、50m ~ 60m ほどのスパンである。

2 章で固有値解析、3 章で振動測定について述べ、4 章でモデル化に関する検討を行う。

2. 固有値解析

振動特性を予測することを目的として、2 つの荷重状態（屋根仕上げ工事前と仕上げ完了後；以下、「仕上前」「仕上後」と呼ぶこととする）で固有値解析を行った。解法は Lanczos 法を採用し、汎用構造解析プログラム：ADINA を使用した。

2.1 解析モデル

解析モデルの質量は節点集中質量とし、仕上前を想定したモデルでは、接合部間部材長さと同接合部質量データを基に、構造部材全体の質量を正確に設定した。仕上後を想定したモデルでは、屋根仕上材重量を $700\text{N}/\text{m}^2$ として各節点の支配面積分重量を質量に換算したものを各節点に加えた。仕上げの概要を図 - 6 に示す。

境界条件は、支承部ベースプレート位置においてピンとし、北側 S R C 建屋および南側構造壁など、下部構造

のモデル化は行わなかった。

2.2 解析結果

(1) 固有振動数

求めた固有振動数を表 - 1 に示す。

表 - 1 固有振動数（解析値）

| モード 次数 | 仕上前 (Hz) | 仕上後 (Hz) | 仕上後 / 仕上前 |
|-----------|-------------|-------------|-----------------|
| 1 次 | 1.50 | 1.19 | 0.79 |
| 2 次 | 2.07 | 1.61 | 0.78 |
| 3 次 | 2.53 | 2.02 | 0.80 |
| 4 次 | 3.14 | 2.43 | 0.77 |
| 5 次 | 3.88 | 2.98 | 0.77 |
| 平均 | | | 0.78 |

(2) 固有モード

図 - 7 に仕上前モデルの固有モードの形状（1 次 ~ 5 次）を示す。固有モードに関しては、仕上前後のモデルで顕著な違いは現れなかった。図 - 7 には参考として X Y Z 方向の刺激係数 も併せて示す。

3. 振動測定

基本振動特性である固有振動数、固有モード形状、

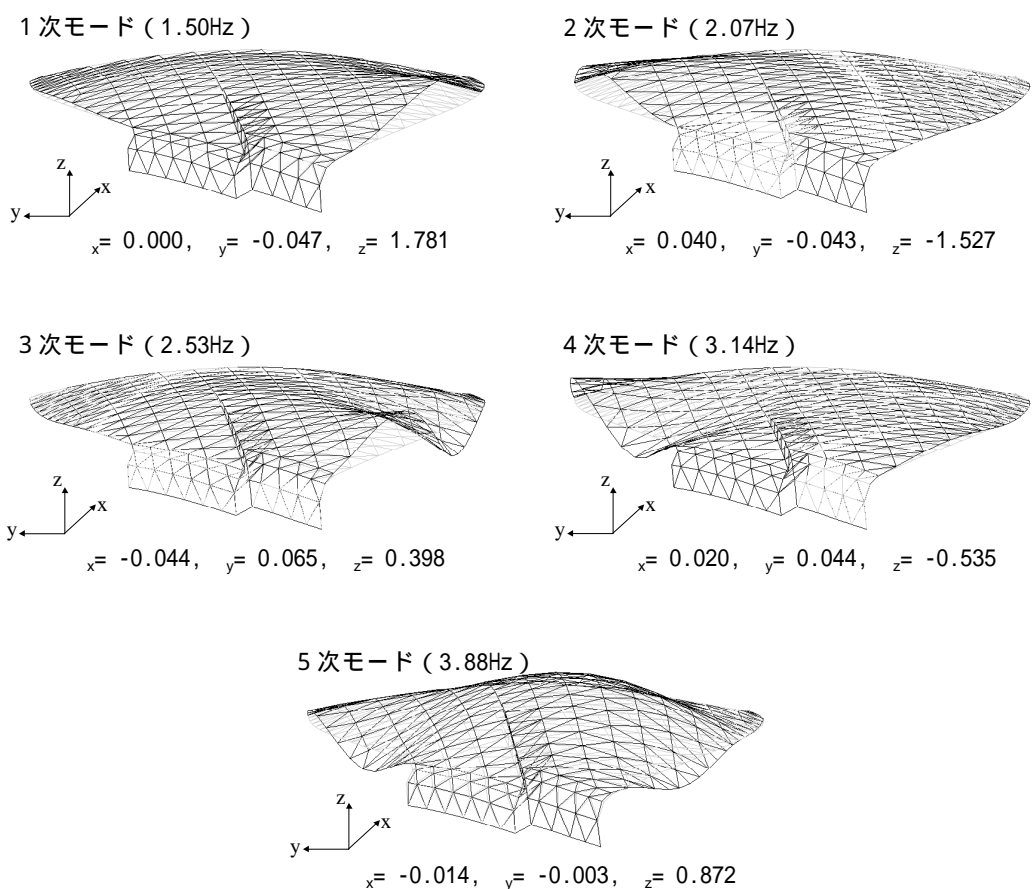


図 - 7 固有モード

減衰定数と、屋根仕上げ材の与える影響を把握することを目的として振動測定を行った。振動測定は屋根仕上げ工事前と仕上げ完了後に行い、それぞれにおいて、常時微動測定および強制加振後の自由振動測定を行った。なお、工事の工程の都合により、屋根仕上げ工事前の測定が、一部仕上げ材が取り付けられた状態で行われることになった。

3.1 測定方法概要

測定点は図 - 8 に示す7ヶ所 (A~G) とした。これら

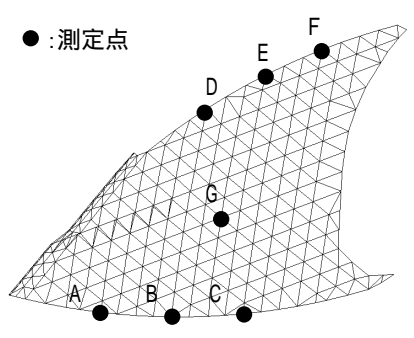


図 - 8 測定点

の測定点は、1次~5次の固有モード (図 - 7 参照) において振幅の大きな位置と推測された位置である。測定は、圧電型ピックアップ (PV-81 リオン社製) を用いて行い、測定方向は各測定点の屋根面法線方向、サンプリング周波数は200Hzとした。

はじめに、固有振動数を把握するため常時微動を測定した。これを基に、自由振動測定の際の強制加振の振動数を決定した。

次に人力屈伸運動による強制加振を行い、加振停止後の自由振動を測定した。対象とする固有モードと加振位置の関係を表 - 2 に示す。

表 - 2 加振点

| 励起するモード次数 | 加振点 |
|-----------|-----|
| 1次 | B |
| 2次 | E |
| 3次 | C |
| 4次 | F |
| 5次 | G |

3.2 測定結果

(1) 固有振動数

各測定点における常時微動のフーリエスペクトルから卓越振動数を読み取り、固有振動数を評価した。1次から5次モードまでの固有振動数を表-3に示す。また、測定値と解析値を比較するために、測定値に対する解析値の比を各固有モード次数についてプロットしたものを図-9に示す。

表-3 固有振動数(測定値)

| モード次数 | 仕上前 (Hz) | 仕上後 (Hz) | 仕上後 / 仕上前 |
|-------|----------|-------------|-----------|
| 1次 | 1.68 | 1.42 | 0.85 |
| 2次 | 2.12 | 1.74 | 0.82 |
| 3次 | 2.73 | 2.38 | 0.87 |
| 4次 | 3.23 | 2.76 | 0.85 |
| 5次 | 3.88 | 3.25 | 0.84 |
| | | 平均 | 0.85 |

各モード次数で多少バラツキが見られるものの、全体的に解析による固有振動数の方が小さく、測定値に対して概ね0.8~1.0の比となっている。実際の質量と解析モデルの質量設定に大きな相違があるとは考えにくい。固有振動数の解析値と測定値の違いは、解析モデルの剛性の評価に起因するものと推測される。解析モデルにおいて、接合部の剛域や支承部の回転剛性を評価していないこと、仕上後のモデルについては仕上げ材の全体剛性

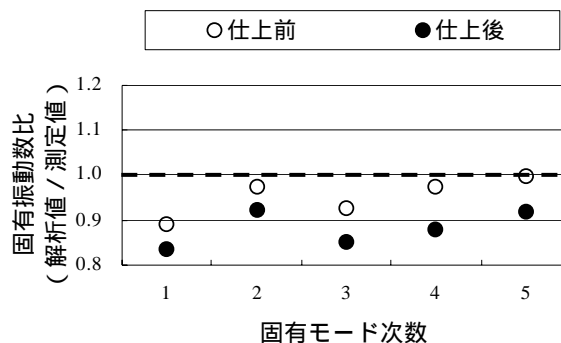


図-9 固有振動数比較(解析値/測定値)

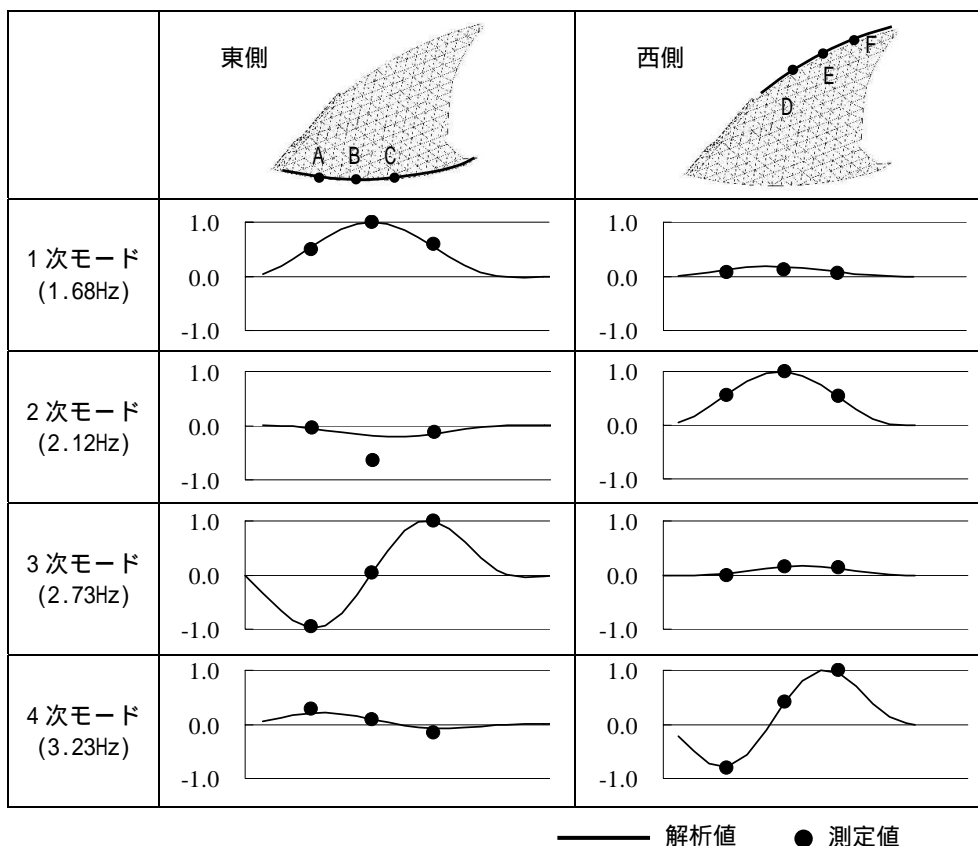


図-10 解析値と測定値による固有モード形状の比較

への寄与を考慮していないことなどが要因として挙げられる。これらの要因については次章で検証する。

(2) 固有モード

自由振動の測定波形から固有モード形状を推定した。推定に当たっては、各測定点の測定データに対して、卓越振動数を中心とした $\pm 0.15 \sim 0.3\text{Hz}$ のバンドパスフィルターをかけ、フィルター処理後の自由振動波形の振幅を用いることとした。

推定した固有モード形状(仕上前)と解析値を比較したものを図-10に示す。測定値は7測定点中最大振幅値を1、解析値は全節点中最大振幅値を1とする基準化を行った。

2次モードの東側で測定値が解析値より大きくなっている他は、両者はよく対応している。また、推定した固有モードの形状には、解析値と同様に、屋根仕上げ工事前と仕上げ完了後の比較で大きな相違は見られなかった。

(3) モード減衰定数

モード減衰定数(加振位置)は、前述のバンドパスフィルター後の自由振動波形(加振位置)の正側ピーク値に対し、粘性減衰を仮定した1自由度系の減衰曲線($y = Ae^{-\gamma t}$)を最小自乗近似させて推定した。測定結果から得たモード減衰定数を表-4に示す。

表-4 モード減衰定数(測定値)

| モード次数 | 仕上前 (%) | 仕上後 (%) | 仕上後 / 仕上前 |
|-------|---------|-------------|-----------|
| 1次 | 0.22 | 0.72 | 3.27 |
| 2次 | 0.16 | 0.54 | 3.38 |
| 3次 | 0.17 | 0.48 | 2.82 |
| 4次 | 0.32 | 1.10 | 3.44 |
| 平均 | 0.22 | 0.71 | 3.23 |

屋根仕上げ材が取り付け前は約0.2%~約0.3%と非常に小さな値を示している。一方、屋根仕上げ材の取り付け後は約0.5%~約1.1%となっており、仕前に比べ約3倍前後の値となっている。これより、減衰量は屋根仕上げ材による影響が大きいことが確認できる。なお表-4を見るかぎり、推定したモード減衰定数には、剛性比例型のように高次ほど値が大きくなるなどの傾向は仕上前後ともに見受けられない。

4. モデル化についての検討

事前に行った固有値解析結果と測定結果との比較では、固有モードはよく対応しているものの、固有振動数の評価には相違があった(図-9)。これは解析モデルの剛性

の評価に起因するもので、それらの要因としては、屋根仕上げ材の全体剛性への寄与のほか、接合部の剛域や支承部の回転剛性を評価していないこと、などが考えられる。

この章では、境界条件や接合部の剛域が固有振動数に及ぼす影響を把握するとともに、これら进行评估することによって実挙動と整合する解析値が得られるかどうかを測定結果を基に確認した。

4.1 境界条件

支承部ベースプレートにおける固定度の評価が固有振動数へ与える影響を概略把握するために、境界条件を固定支持として固有値解析を行い、ピン支持で求めた前出の解析値と比較した。固有振動数の測定値に対する比を各固有モード次数についてそれぞれプロットした結果を図-11に示す。

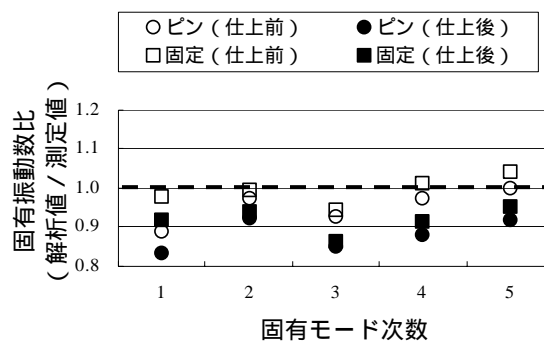


図-11 固有振動数比較(解析値/測定値)

境界条件の相違が固有振動数に及ぼす影響は、1次モードで特に大きく、固定支持とすることによって、全体的に固有振動数が上がって測定値に近づいている。この結果から、境界条件をピン支持とした場合の解析結果には注意が必要であり、境界条件を固定支持とした場合の解析結果と比較するなどの検討が必要である、ということが出来る。

4.2 接合部

接合部の高い剛性が全体剛性に及ぼす影響を把握するために、接合部節点に剛域を設定し、固有振動数を求めた。接合部は、その一例を写真-1に示すように、取り付く部材に比べると剛性の高い接合部となっている。

剛域の設定長さにより、3タイプのモデル化を行った。

- ・TYPE1 0(剛域を設定しない)
- ・TYPE2 接合部中心から接合部端までの長さの半分
- ・TYPE3 接合部中心から接合部端までの長さ



写真 - 1 接合部

これらの条件で求めた固有振動数の測定値に対する比を図 - 1 2 に示す。境界条件は全て固定支持とした。

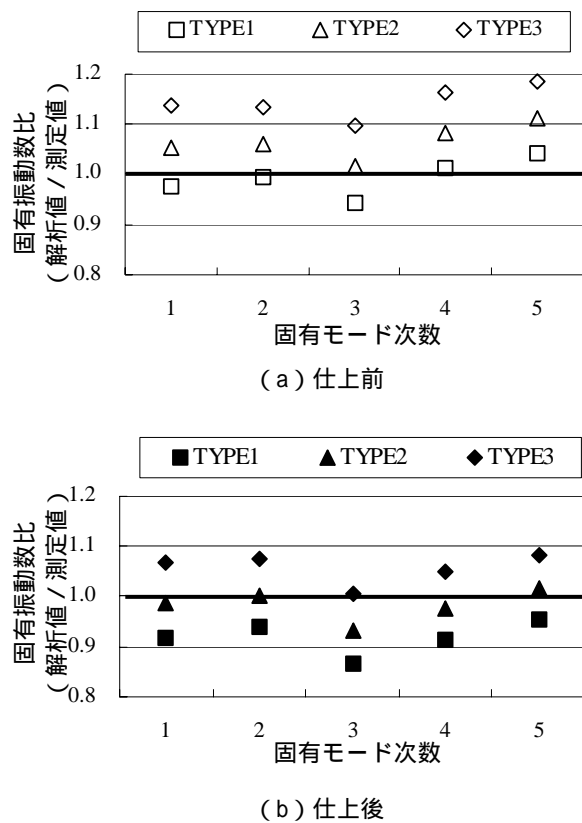


図 - 1 2 固有振動数比較 (解析値 / 測定値)

設定する剛域長さによって、全体的に固有振動数が高い方向へ大きく変動しており、接合部の剛域の存在が全体剛性へ強く影響を及ぼしているのがわかる。

仕上前後の比較にあたり、以下の2点が予測される。

仕上前モデルにおいて、一部取り付いた仕上げ材を考慮していないという荷重条件の相違があるため、仕上前の比較では、解析値の方が測定値より大きい

固有振動数を示す (図 - 1 2 (a))。

解析で評価していない仕上げ材の全体剛性への寄与を考慮すれば、仕上後の比較では、測定値の方が解析値より大きい固有振動数を示す (図 - 1 2 (b))。

これらの点を考慮し仕上げ前後の比較をすると、測定値とよく合う適度な接合部剛域の領域が存在することが推測される。ここでは、仕上げ材の全体剛性への寄与を検討していないものの、これを無視すれば (解析上これを接合部剛域の影響へ含めば)、TYPE2 のモデル化が3タイプの中では実挙動ともっとも整合するようである。

5. まとめ

特殊な形状をした単層ラチスシェルである「下関水族館」大屋根を対象に振動測定と固有値解析を行い、次のことが明らかになった。

1. 屋根仕上げ工事完了後の測定結果から推定した減衰定数は約 0.5% ~ 約 1.1% と小さかったが、仕上げ工事前に比べると3倍程度になっており、屋根仕上げ材の減衰への寄与を振動測定から定量的に確認できた。
2. 解析による固有モードの形状は、測定結果から推定した形状ともよく対応する。
3. 固有振動数の解析値と測定値の差異は、接合部の剛域・支承部の回転剛性の評価によって解消することができた。
4. 支承部ベースプレートのモデル化については、ピン支持より固定支持として求めた解析値の方が測定値に近い。
5. 剛性の高い接合部をもつ今回の構造物の場合、接合部に適度な剛域を設定したモデルで求めた固有振動数が測定値とよく整合する。

「謝辞」

模型写真をご提供頂きました株式会社日本設計の関係各位にお礼申し上げます。

参考文献

- 1) Fujita, M., Xu Lei, Oda, Y., Ninakawa, T. and Konomi, S.: Design and Construction of Single-layer Reticular Structure of Shimonoseki Aquarium, IASS-2001