二層屋根型円筒ラチスシェルの自由振動実験

FREE VIBRATION TESTS OF DOUBLE-LAYER CYLINDRICAL LATTICED ROOFS

谷口 与史也*, 坂 壽二**

Yoshiya TANIGUCHI and Toshitsugu SAKA

Double-layer cylindrical latticed shells are widely used into a sports hall and convention hall, etc as a roof structure. The structural characteristics of them have been investigated theoretically and experimentally to grasp the buckling strength or dynamic behavior for seismic design. However, the free vibration behavior, in particular, the relation of damping ratios and frequencies has not been sufficiently investigated, yet. Then, in this paper, model experiments were carried out in order to make clear the free vibration behavior, that is, natural frequencies, damping ratios and the relations among them. It was consequently made clear that the damping ratios were inversely proportional to the natural frequencies for the latticed structures.

Keywords: *damping ratio, natural frequency, model experiment, impulse method, double-layer latticed structure*

減衰定数, 固有振動数, 模型実験, 打撃試験, 二層立体ラチス構造

1. はじめに

学校体育館や公共スポーツ施設などの空間構造物は災害時の避難場所として利用される場合が多く, その耐震性能の重要性は広く認知されている。建築構造物の動的応答を検討する上で, 固有周期と減衰定数は重要な振動特性である。通常のラーメン構造による重層建築物の固有振動数と減衰定数については, 数多くの実測および実験データがあり, 明らかにされつつある¹⁾。例えば鉄骨造建物の場合, 1次固有周期と軒高は明瞭な相関関係が得られている。1次減衰定数は概ね慣用値2%以下の範囲に分布しているが高次減衰定数は1次減衰定数より大きくなる傾向がみられ, 振動数比例型の傾向が確認されているといえる。

一方, 空間構造物の動的応答評価でも, 数種類の地震波について弾性地震応答解析, 弾塑性地震応答解析などを行い同様に建物の安全性が検討されている。その場合, 減衰は振動数比例型で1次のモードに対して減衰定数を2%とすることが多い²⁾。しかしこれは前述の鉄骨系重層建築物の設計時に使用されている慣用値を援用しているに過ぎなく, 空間構造物の地震応答解析で減衰定数を振動数比例型とすることは, 減衰を過大評価する恐れがあると指摘されている³⁾。そこで空間構造物においてもより信頼性の高い耐震設計を実現するためには, 固有振動数や減衰定数などの振動性状をまず実験的に明

らかにしていくことは重要と言える。

空間構造物の振動実験は数少ないが, 早くは又木, 木下らは平面直径134mの部分球殻を形成する二層ラチスドームの強制振動実験を実施している。ドームはアングル材と鋼棒を用いて溶接接合で組み立てられている。加力方法は水平方向は起振器, 上下方向はロープ切断方式によっている。実験結果として減衰定数は次数に関係なく一定(2.7~4%)に近いことが示されている⁴⁾。その後, 斎藤, 黒木らによってシステムトラスによるフレームのみの二層立体ラチスシェルの同様の強制振動実験が実施されており, 1次減衰定数は1.3~1.5%の結果が得られている⁵⁾。また常時微動と人力加振による自由振動波形を用いた実験方法としては文献(6,7)などがあり, 複層ラチスドーム1次減衰定数は2.1~6.5%の範囲にあり, 設計慣用値より大きい値を得ている。また, 平面ラチス梁による剛節二層立体ラチス平板や二層立体システムトラス平板の振動実験には文献(8,9)などが挙げられる。前者は支承部に粘性ダンパーが設置されており1次, 2次減衰定数はそれぞれ約2,3%が得られている。これに対して後者は一方向ローラー支持で約0.5%の減衰となっている。単層ラチスドームについてはシステムトラス構造の振動実験が文献(10)で実施されており, ロープ切断方式で減衰定数は平均0.2%となっており, システムトラスの減衰は比較的小さいと言える。以上の結果は

本論文の一部は参考文献(13), (14)で発表している。

* 大阪市立大学大学院工学研究科都市系専攻
助教授・博士(工学)

** 大阪市立大学大学院工学研究科都市系専攻 教授・工博

Assoc. Prof., Dept. of Urban Engineering, Graduate School of Engineering, Osaka City University, Dr. Eng.

Prof., Dept. of Urban Engineering, Graduate School of Engineering, Osaka City University, Dr. Eng.

いずれも実構造物の実測例である。

次に模型による振動実験として例えば、山田、田口らが打撃加振法でPVC材料の3角形網目の球形単層ラチスドームの固有振動数と振動モードを調べており、打撃ハンマーの適切な選定により精度良く実験結果が得られるとしている¹¹⁾。大家、國枝らは平板と丸鋼で組み立てた単層ラチスシリンドラーの振動特性を振動台による水平加振と打撃加振により調べており、得られた減衰定数が非常に小さいことを示している¹²⁾。このように立体ラチスによる空間構造物の低次の減衰定数は明らかにされつつあると言えるが、減衰定数と振動数の関係は未だ十分に解明されていない。

そこで本研究は、空間骨組構造物の固有振動数と減衰定数の関係を明らかにするための実験データの蓄積として、まず仕上げ材などが取り付けられていないフレームのみの二層屋根型円筒ラチスシェルの自由振動性状を打撃加振法によって調べる。

2. 試験体形状および部材特性

試験体はFig. 1に示すようなねじ込み接合形式で組み立てられている。接合部は直径25.4mmの鋼製球で、部材は外径8mmの鋼管であり、M6のボルトで接続されている。試験体は2×6ユニットと5×5ユニットから成る2種類の二層屋根型円筒ラチスシェルであり、その全体形状寸法をFig. 2に示す。また、試験体に用いた部材の緒元をTable 1に示す。試験体の重量は2×6ユニットが約9.5kgf、5×5ユニットが約19.6kgfであり、1節点当たりの重さは平均約0.3kgfである。

Fig. 1 Jointing System

Table 1 Mechanical Properties of Members

Diameter of ball joints ;	2.54	(cm)
Rotational connecting rigidity C_f ;	3.48×10^3	(kgf·cm)
Tubular member	$\phi 8.0 \times 1.6$	(cm)
section area A ;	0.27	(cm ²)
moment inertia I ;	0.0183	(cm ⁴)
Weight of a ball joint ;	0.049	(kgf)
Weight of a tubular member (Length=29.5cm) ;	0.069	(kgf)
Modulus of elasticity E ;	2.10×10^6	(kgf/cm ²)

3. 振動実験方法

境界条件として、試験体のみの自由振動を実現するために支持剛性を小さくかつ明確な値に設定でき、減衰をできるだけ小さくするために、試験体の4隅の節点ABCDを蔓巻ばねで吊るす方法を採用する。その結果、2×6ユニットの試験体で剛体移動の振動数はx方向0.18Hz、y方向0.71Hz、z方向1.71Hzとなる。5×5ユニットの場合、x方向0.34Hz、y方向0.40Hz、z方向1.08Hzである。振動実験には打撃加振法を用いる。打撃はFig. 2に番号で示す各節点にラチスシェル面に対して法線方向に行う。振動応答は各節点毎に母線方向、アーチ接線方向、法線方向の加速度を同時に測定する。実験は同一試験体で異なる日時に合計2回実施する。実験システムはエーアンドデイ製の加振1チャンネル、応答3チャンネルのインパルスハンマセット(AD-1228)であり、インパクトチップには硬質プラスチックを用いる。加速度センサは電圧出力型で重量7.5gで応答周波数は2～10000Hzで、1節点当たりの試験体重量に対する比率は約2%となっている。またセンサの取り付けには両面テープを用いている。インパルスハンマによる入力信号と加速度センサによる応答出力信号とより、FFTアナライザ(AD3921)を用いて周波数応答関数を測定する。本実験でのFFTの周波数レンジは最大500Hzとし、分解能は0.625Hzである。各実験では5回以上の打撃加振を実施し、測定した際にコピー

Fig. 2 Double-Layer Cylindrical Latticed Model

レンズの良好なものを5個選び、その平均として周波数応答関数を算出する。また標本時間(1.6秒)で95%減衰する指数関数型の窓関数を用いる。測定した周波数応答関数を用いて、各モードピークについて関数を当てはめ、固有振動数と減衰定数を算出する。カーブフィットには市販のモード解析システム(日本サーク社StarSystem)を用いる。そこでは部分分数型の多項式を最小2乗残差法によって求めている。

4. 実験結果

実験で得られた各試験体の節点番号1の加振入力による周波数応答曲線の一部をFig. 3とFig. 4に示す。図中の周波数応答曲線の明瞭な峰の内、▽印付近の周波数の振動モードを、 2×6 ユニットの場合には2個、 5×5 ユニットの場合には5個、それぞれFig. 5とFig. 6に示す。周波数応答曲線について、Fig. 3に示す 2×6 ユニットの場合、図中に示す3点a, b, cの峰が大きく現れ、しかも互いに一致している振動数は約122Hz, 144Hz, 270Hz, 435Hz前後である。振動数が120Hzから450Hz全域に渡ってもある程度明瞭な峰が現れていると言える。特に振動数200Hzから400Hz間は各固有振動数は接近している。

次にFig. 4の 5×5 ユニットの場合、振動数が約169Hzと487Hz付近に明瞭な峰が複数見られたが、200Hzから400Hzまでの振動数領域では 2×6 ユニットの場合ほど大きく一致するような明瞭な峰は現れていない。この領域では同様に固有振動数が非常に接近しており、モードが連成していると思われる峰が多数現れている。

次にFig. 5とFig. 6の振動モードについて概説する。図中の矢印は試験体中央部の変形の様子を示している。Fig. 5の(a)はアーチ方向の曲げ変形モードで、(b)は四角錐ユニットの下弦材が伸縮するような変形で全体的には曲げ変形モードと類似している。Fig. 6の(a)は母線方向(x方向)の曲げ変形が大きいモードであり、(b)はアーチ方向(y方向)の曲げ変形と母線方向(x方向)の比較的小さい曲げ変形モードが混ざったものである。(c)は曲率の符号が互いに異なる2方向の曲げ変形モードとなっている。また(d)は支持部周辺が大きく上下に振動し、全体的には曲率の符号が等しい2方向の曲げ変形モードである。(e)は中央部付近と境界辺付近が反対方向に上下に振動する変形モードである。

最後にモード解析によって得られた固有振動数と減衰定数の関係をFig. 7とFig. 8にそれぞれ示す。図中の黒丸と白丸は実験日が異なるデータをプロットしたものである。 2×6 ユニット試験体の場合は減衰定数は最大で0.61%であり、周波数応答曲線で峰の高い122Hzで0.55%となっている。その他の高い峰の減衰定数はその値よりも小さくなっている。全体平均は0.26%である。また 5×5 ユニット試験体の場合には、減衰定数は最大で0.70%であり、周波数応答曲線で峰の高い169Hzで約0.30%、全体の平均では0.23%となっている。いずれの試験体でも、周波数応答関数で高い峰が現れた振動モードの減衰定数は平均値より若干高い傾向にあるといえる。

次に減衰定数と振動数の関係について、図中の一点鎖線は最小2乗法で回帰直線を求めたものである。その結果、周波数が高いほど減衰定数が小さい傾向となっている。また相関関係が強くないことから減衰定数は振動数に大きく依存しているとは言えない。

Fig. 3 Frequency Response Curves of 2×6 Units

Fig. 4 Frequency Response Curves of 5×5 Units

Fig. 5 Free Vibration Modes of Impact No. 2

Fig.6 Free Vibration Modes of Impact No.1

Fig.7 Frequency-damping relation of 2×6 units

Fig.8 Frequency-damping relation of 5×5 units

5. 考察

実験結果と比較検討するために非減衰自由振動解析を行う。試験体の部材と接合部をFig. 9に示すようにモデル化する。ボルトとナットの質量は節点への集中質量とし、パイプ材の質量は整合質量とする。また本試験体はねじ込み接合形式で組立てられているので、部材のねじり剛性率を0.01とした。解析では振動数500Hzを超えるまでの固有振動数と固有モード、刺激係数を算定する。ここでの刺激

Fig.9 Numerical Model for Member and Joint

係数は剛性行列で正規化した固有モードより算出したものである。

各試験体の固有振動数と刺激係数の分布をFig. 10に示す。また鉛直方向の刺激係数の絶対値が大きい順から並べ替えたものの内上位10個をTable2とTable3に示す。

Fig. 10より高次の振動モードでも刺激係数の大きい場合があり、モードの次数と刺激係数に相関関係が見られないことが分かる。

Table 2,3で剛体振動モードを除いた上位2つの振動モードをそれぞれFig. 11,12に示す。これら鉛直方向の刺激係数の大きくなっているモードの振動数は2×6ユニット試験体の場合146.5Hzと424.5Hzであり、振動モードはFig. 11(a)でアーチ方向の曲げ変形モードとなっており、実験結果と振動数、モードともほぼ一致している。Fig. 11(b)では同様の曲げ変形が卓越しているが、下面の網目が菱形に変形するモードが混ざっている。実験では振動数が解析値より約3%高いところで明瞭な峰が現れて、類似の曲げ変形振動モードが見られている。

5×5ユニット試験体では173.7Hzと396.9Hzであり、Fig. 12(a)はx方向の曲げ変形モードが卓越しており、実験で得られたモード(Fig. 6(b))と振動数、モードともほぼ一致している。Fig. 12(b)はシリンドラ中央部と境界辺付近が互いに反対方向に上下に変形する振動モードとなっている。実験ではこの振動数付近において周波数応答関数に明瞭な峰が現れずモード同定には至らなかったが、類似の振動モードは487.8Hzで現れている。

最後に、実験で得られた周波数応答関数に明瞭な峰を示す振動モードはラチスシェルの1方向あるいは2方向の曲げ変形モードであ

Table 2 Numerical Results of 2 × 6 Units

Number of Mode	Participation Factor			Natural Frequency (Hz)
	x	y	z	
4	8.442E-05	9.214E-04	-9.547E-01	1.565E+00
9	-3.035E-06	-1.320E-05	-1.390E-02	1.465E+02
6	2.668E-04	-5.440E-02	-1.360E-02	2.519E+00
5	-8.240E-03	-1.812E-03	-1.016E-02	2.168E+00
91	2.425E-07	3.588E-06	-3.969E-03	4.245E+02
95	-2.785E-06	3.592E-05	-2.290E-03	4.628E+02
7	-3.906E-06	-3.045E-04	1.758E-03	8.371E+00
83	-1.551E-06	1.550E-05	-1.355E-03	3.808E+02
63	1.308E-07	3.128E-07	-1.165E-03	2.960E+02
53	7.310E-09	-3.557E-05	-1.083E-03	2.783E+02

Table 3 Numerical Results of 5 × 5 Units

Number of Mode	Participation Factor			Natural Frequency (Hz)
	x	y	Z	
4	-2.684E-11	1.391E-11	9.590E-01	1.080E+00
9	2.037E-08	-1.549E-10	-1.280E-02	1.737E+02
158	1.224E-08	1.578E-09	-7.866E-03	3.969E+02
16	-2.786E-09	2.032E-10	-4.094E-03	1.935E+02
185	2.858E-08	-9.159E-09	-3.442E-03	5.438E+02
133	-8.130E-09	5.179E-10	3.010E-03	3.314E+02
63	-2.241E-09	4.823E-06	2.687E-03	2.473E+02
101	1.365E-09	-1.901E-08	-2.356E-03	2.827E+02
151	2.512E-08	-8.555E-09	2.132E-03	3.771E+02
15	-1.279E-09	1.094E-10	2.101E-03	1.878E+02

(a) 2 × 6 Units

(b) 5 × 5 Units

Fig. 10 Natural Frequency and Participation Factor of Vibration Mode in the Vertical Direction

(a) 146.5 Hz

(b) 424.5 Hz

Fig. 11 Free Vibration Mode obtained by Numerical Analysis

(a) 173.7Hz

(b) 396.9Hz

Fig. 12 Free Vibration Mode obtained by Numerical Analysis

る。振動数を見ると、1方向の曲げ変形振動モードが一番小さく、次いで曲率の互いに異なる2方向曲げ変形振動モードの順に大きくなっている。

6. 結び

構造体のみ二層屋根型円筒ラチスシェルの自由振動実験を打撃加振法により実施し、固有振動数と減衰定数を調べた。その結果、本研究の範囲では減衰定数は振動数に反比例する傾向にあり、減衰定数はほぼ1%より小さいことが分かった。

また、鉛直方向に刺激係数の大きい曲げ変形振動モードは振動実験において大きな応答を示した。なお、一方向的な2×6ユニット試験体では、高次の振動数領域までモードの同定は行えたが、面的広がりを持つ5×5ユニット試験体の場合には、高次振動数領域でモードが非常に接近し、モード同定が明瞭に行えない領域があった。

今後は、屋根仕上材などを取り付けた場合の振動実験を実施する。そのことによって実構造物の固有振動数と減衰定数の関係の解明、および減衰定数の設定法に有用な資料を提供できる。

謝辞

本研究の一部は平成10年度東京工業大学特定共同研究（代表新宮清志）の援助によった。実験は岩木宜憲君に多大な協力を得たことに感謝します。

参考文献

- 1) 建築物の減衰, 日本建築学会, 丸善, 2000年10月
- 2) 空間構造の耐震設計と設計例, 日本建築学会, 丸善, 2001年1月
- 3) 立道郁生: 既往の振動計測に基づく空間構造の減衰性能に関する一考察, 平成12年度京都大学防災研究所共同研究集会, 大空間構造に想定し得る被災の原因と対策, pp. 67~77, 平成12年11月
- 4) 又木義浩, 木下勝弘, 相沢覚, 吉田啓喜: 球殻ドーム(名古屋国際展示場)の強制振動実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集(北陸), pp. 603~604, 昭和49年10月
- 5) 斎藤公男, 黒木二三夫, 岡田章: 立体トラスシェルの振動実験および振動解析(ポートピア'81国際広場大屋根構造の研究報告-2), 日本建築学会大会学術講演梗概集(九州), pp. 1191-1192, 昭和56年9月
- 6) 高木政美, 細沢治, 山田正明, 島村高平, 久野雅祥: ドーム屋根の減衰定数, 日本建築学会大会学術講演梗概集(九州), pp. 997~998, 1998年9月
- 7) 安間由倫, 立道郁生, 藤原智, 藤岡敏雄, 嶋登志男, 八木敏行, 田中宏幸: 低ライズ複層トラスドームの振動実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集(中国), pp. 911~912, 1999年9月
- 8) 奥野智久, 小野徹郎, 岡田章, 木村衛, 相沢覚, 犬飼伴幸, 最上公彦, 畑中公樹: 大スパントラス屋根の実挙動に関する研究(その2)静的載荷実験および自由振動実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集(中国), pp. 1329~1330, 1990年10月
- 9) 関本宏幸, 藤田正則, 富本淳, 岩田衛: 制振ダンパーを有する平面システムトラスの研究(その2制振ダンパーの適用例), 日本建築学会大会学術講演梗概集(関東), pp. 841~842, 2001年9月
- 10) 田波徹行, 黒木二三夫, 奥原剛彦, 大矢俊治, 半谷裕彦, 戸田郁也: 単層スペースフレーム(EXPO'85南ゲートドーム)の自由振動実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集(北海道), pp. 279~280, 1986年8月
- 11) 山田聖志, 田口孝, 河相成樹, 山田大彦, 楠達明: インパルスハンマ法によるラチスシェルの振動実験(その2球形ラチスシェルの自由振動性状), 日本建築学会大会学術講演梗概集(東海), pp. 1899~1900, 1994年9月
- 12) 大家貴徳, 國枝治郎: 屋根型円筒単層ラチスシェルの地震応答測定実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集(九州), pp. 909~910, 1998年9月
- 13) 谷口与史也, 坂壽二, 岩木宜憲: 二層屋根型円筒ラチスシェルの固有振動数と減衰定数, 日本建築学会近畿支部研究報告集第39号構造系, pp. 141~144, 平成11年6月
- 14) 谷口与史也, 坂壽二: 二層屋根型円筒ラチスシェルの自由振動性状, 平成11年度京都大学防災研究所共同研究集会, シェル・空間構造の耐震, 耐風, 耐雪, 耐火を考えた性能設計と解析, pp. 155~162, 平成11年11月

(2002年11月5日原稿受理, 2003年5月28日採用決定)