

各種二層立体ラチス屋根の弾性地震応答性状とその算定法に関する研究

建築構造学分野 中野 崇

1. はじめに

二層立体ラチス屋根は平板だけでなく、シリンダーやドームなどのさまざまな形状のものがある。この二層立体ラチス屋根に採用されている代表的な網目模様としては、上下面に正方形を構造単位として持つ「正方形+正方形」型ラチス屋根（以後 SS 型とする）、上面に正方形、下面に菱形を持つ「正方形+菱形」型ラチス屋根（以後 SD 型とする）、上面に菱形、下面に正方形を持つ「菱形+正方形」型ラチス屋根（以後 DS 型とする）などがある。二層立体ラチス構造は、形状や網目の違いにより有効強度、有効剛性、座屈特性が異なることは既に示されており、振動特性についても同様にそれぞれ特徴的な性質を持つことが予想される。

そこで本論では複数の網目、形状による二層立体ラチス屋根の基本的な振動性状を明らかにし、またこういった空間構造物の動的応答を知るためにはこういった方法が効果的かを形状による違いにより比較検討する。

2. 解析対象と解析条件

今回取り扱うモデルの網目を図 1 に、形状を図 2 に示す。形状は、平板(FP)、シリンダー(CL)、ドーム(DM)、推動形シェル(TS)で、CL については半開角が 30 度(CL30)、45 度(CL45)、60 度(CL60)の 3 種類取り上げるものとする。網目と形状の組み合わせのより計 18 種類のモデルとする。これらのモデルの網目 1 ユニットごとの寸法は同じである。解析モデルの寸法を表 1 に、部材特性を表 2 に示す。

境界条件は、フレームの外周節点を全てピン支持とローラー支持とする。ローラー支持は、外周節点の Z 方向の変位を拘束し、水平方向は外周節点のうち X 軸方向並びのものを X 方向に変位拘束し、Y 軸方向並びのものを Y 方向に変位拘束する。

作用荷重は、ラチス屋根の部材重量及び屋根面の仕上げ材などを考慮した上で $1470(N/m^2)(=150(kgf/m^2))$ を上面に鉛直下向きに等分布載荷することを想定し、屋根が受ける総荷重を上面の支持点以外の節点に等分割したものとする。

質量は屋根が受ける総荷重を重力加速度 $9.8(m/s^2)$ で除したものを総質量とし、これを全節点に等分割したものを節点集中形の質量として扱うものとする。

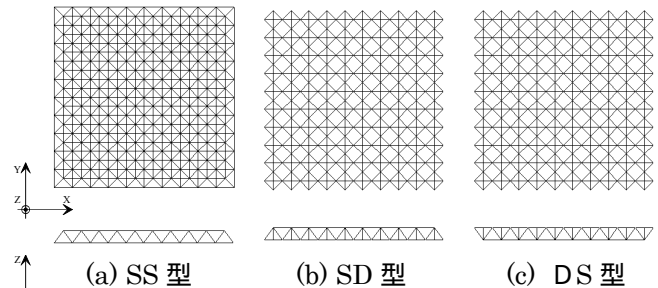


図 1 モデル網目

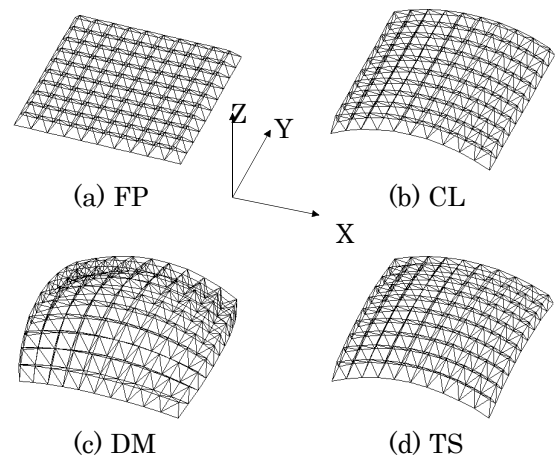


図 2 モデル形状

| | FP | CL30 | CL45 | CL60 | DM | TS |
|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| X方向スパン(cm) | 3000 | 2654 | 2404 | 2118 | 2279 | 2654 |
| X方向半開角(度) | — | 30 | 45 | 60 | 30 | 30 |
| Y方向スパン(cm) | 3000 | 3000 | 3000 | 3000 | 2279 | 3000 |
| Y方向半開角(度) | — | — | — | — | 30 | 15 |
| デプス (cm) | 212.1 | 212.1 | 212.1 | 212.1 | 212.1 | 212.1 |

(a) SS 型、SD 型

| | FP | CL30 | CL45 | CL60 | DM | TS |
|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| X方向スパン(cm) | 3000 | 2866 | 2704 | 2489 | 2514 | 2866 |
| X方向半開角(度) | — | 30 | 45 | 60 | 30 | 30 |
| Y方向スパン(cm) | 3000 | 3000 | 3000 | 3000 | 2514 | 3000 |
| Y方向半開角(度) | — | — | — | — | 30 | 15 |
| デプス (cm) | 212.1 | 212.1 | 212.1 | 212.1 | 212.1 | 212.1 |

(b) DS 型

表 1 解析モデルの寸法

| 部材 | 円形鋼管 | 断面二次モーメント(mm ⁴) | 1.775×10^6 |
|-----------------------|-------------------------|-----------------------------|---------------------|
| 断面の寸法(mm) | $\phi 101.6 \times 5.0$ | ヤング係数(N/mm ²) | 2.059×10^5 |
| 断面積(mm ²) | 1.517×10^3 | ポワソン比 | 0.3 |

表 2 部材特性

3. 算定法

3.1 応答スペクトル法のモード選定¹⁾

応答スペクトルを用いたモーダルアナリシスをする場合の各モードの重ね合わせ手法として、SRSS法が一般的によく使用されている。CQC法はSRSS法の基本的な考えの上に、さらに各固有振動数の相関を組み込むことによって、モードの相関が高い場合、つまり刺激係数や等価質量が卓越したモードの各固有振動数が互いに接近している場合に良い近似を与えるとされている。

CQC法における最大応答の変位成分 u_k は

$$u_k = \sqrt{\sum_i \sum_j u_{ki} \rho_{ij} u_{kj}} \quad \text{と表される。}$$

ここで、 u_{ki} は i 次モードの変位応答ベクトルの成分で、 ρ_{ij} はモードの相関係数を示し、減衰 γ が一定ならば、

$$\rho_{ij} = \frac{8\zeta^2(1+r)r^{3/2}}{(1-r^2)^2 + 4\zeta^2r(1+r)^2}, \quad r = \omega_j / \omega_i \quad \text{となる。}$$

本論では、スペクトル法としてCQC法を用いる。モード選定としては1次から300次全てのモードを抽出する場合と、各方向において等価質量が最大のモード計3つを抽出した場合、大きいものから3つのモード計9つを抽出した場合の3通りの方法について考察する。減衰は各振動数一律で2%とする。

また、各方向による応答の合成法は、最大応答の絶対値和と各次応答成分の2乗和平方との平均をとったものを基本とする。しかし、この方法で過少な結果が出た場合のみ最大値の絶対値和を合成法として考察する。

3.2 時刻歴地震応答解析の取り扱いについて

時刻歴地震応答解析により、地震波を線形補完して求めた地動加速度を入力し、直接積分法によって節点における相対変位応答を求める。直接積分法はNewmark法($\alpha=1/4$, $\beta=1/2$)を用いる。

減衰はレ-リ型とする。対象とする振動数は、各方向の等価質量が最も高い3つのモード次数から最小のものと最大のものの振動数とし、これらに対する減衰定数とともに2%とする。

また、解析での時間刻みを0.005秒とする。

3.3 入力地震波について

地震応答解析は、1995年兵庫県南部地震神戸海洋気象台データの地震記録の28秒から43秒までの15秒間を用いることにより求めた。地震波のNS成分をモデルのX方向に、EW成分をY方向に、UD成分をZ方向にそれぞれ入力する。それぞれの応答スペクトルを図3に示す。減衰定数は2%とする。

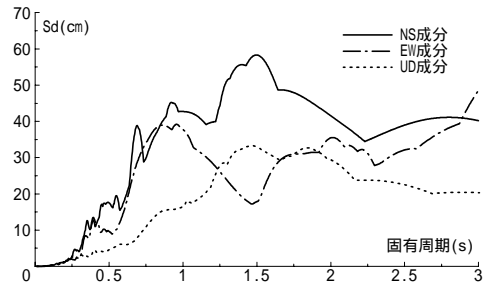


図3 変位応答スペクトル

4. 解析結果

4.1 「SS」型モデルに関する結果

等価質量比に関しては、各モデル各方向で両支持条件とも、等価質量比の順位で1位から3位までのモードが40次以内におさまっている。また、等価質量比の合計は全てのものにおいて95パーセントを超えていることから、形状がもつ卓越する振動モードの殆どが300次のなかに含まれていると言える。

表3に時刻歴地震応答解析とCQCで300モード抽出したときの結果の比較を示す。周辺ピン支持のとき、SSFP、SSCL60、SSTSは、各方向とも上下10%以内の範囲におさまっているため、数値計算上は良い近似を示しているといえる。一方、SSCL45とSSTSに時刻歴に対する比が100パーセントを下回っているものがある。この2モデルについて、重ね合わせの方法を各方向最大応答の絶対値和としたときの表を表4に示す。これによってすべての方向に対して安全側に設計することができるが、計算精度が著しく落ちる。

周辺ローラー支持のとき、SSFP、SSCL45、SSDMは、各方向とも上下10%以内の範囲におさまっているため、数値計算上は良い近似を示している。一方、SSFP、CL45、SSDM、SSTSに時刻歴に対する比が100パーセントを下回っているものがある。この4モデルについて、重ね合わせの方法を各方向最大応答の絶対値和としたときの表を表4に示す。これによってX、Y方向に対して安全側に設計することができるが、Z方向に対しては已然危険側となっており、計算精度も著しく落ちる。

| | X | | | Y | | | Z | | |
|------|----------|----------|--------|----------|----------|--------|----------|----------|--------|
| | 時刻歴 | CQC(300) | | 時刻歴 | CQC(300) | | 時刻歴 | CQC(300) | |
| FP | 1.04E+00 | 1.06E+00 | 101.9% | 1.02E+00 | 1.06E+00 | 103.8% | 6.17E+00 | 6.25E+00 | 101.4% |
| CL30 | 3.33E-01 | 3.81E-01 | 114.3% | 2.39E-01 | 2.64E-01 | 110.5% | 1.23E+00 | 1.26E+00 | 102.7% |
| CL45 | 4.05E-01 | 4.16E-01 | 102.6% | 2.01E-01 | 1.80E-01 | 89.5% | 7.76E-01 | 7.95E-01 | 102.4% |
| CL60 | 4.58E-01 | 4.78E-01 | 104.4% | 1.58E-01 | 1.58E-01 | 100.1% | 5.59E-01 | 6.10E-01 | 109.0% |
| DM | 2.69E-01 | 3.19E-01 | 118.6% | 2.57E-01 | 3.02E-01 | 117.4% | 6.84E-01 | 7.63E-01 | 111.6% |
| TS | 3.90E-01 | 3.75E-01 | 96.3% | 2.50E-01 | 2.60E-01 | 104.1% | 1.05E+00 | 1.11E+00 | 105.8% |

(a) 周辺ピン支持

| | X | | | Y | | | Z | | |
|------|----------|----------|--------|----------|----------|--------|----------|----------|--------|
| | 時刻歴 | CQC(300) | | 時刻歴 | CQC(300) | | 時刻歴 | CQC(300) | |
| FP | 1.38E+00 | 1.39E+00 | 100.4% | 1.25E+00 | 1.34E+00 | 107.5% | 9.11E+00 | 9.10E+00 | 99.9% |
| CL30 | 3.02E+00 | 3.52E+00 | 116.6% | 1.16E+00 | 1.30E+00 | 111.2% | 6.54E+00 | 6.83E+00 | 104.4% |
| CL45 | 4.05E+00 | 4.03E+00 | 99.4% | 1.20E+00 | 1.17E+00 | 98.0% | 5.47E+00 | 5.46E+00 | 99.8% |
| CL60 | 3.64E+00 | 3.80E+00 | 104.4% | 8.36E-01 | 9.47E-01 | 113.2% | 3.38E+00 | 3.48E+00 | 102.9% |
| DM | 2.02E+00 | 2.20E+00 | 108.9% | 2.05E+00 | 1.93E+00 | 94.0% | 3.03E+00 | 3.02E+00 | 99.6% |
| TS | 2.56E+00 | 2.98E+00 | 116.3% | 1.46E+00 | 1.57E+00 | 107.5% | 5.75E+00 | 5.74E+00 | 99.8% |

(b) 周辺ローラー支持

表3 時刻歴地震応答解析とCQCで300モード抽出したときの最大変位の比較(単位:cm)

| | X | | | Y | | | Z | | |
|------|----------|----------|--------|----------|----------|----------|----------|----------|--------|
| | 時刻歴 | CQC(300) | 時刻歴 | CQC(300) | 時刻歴 | CQC(300) | 時刻歴 | CQC(300) | |
| CL45 | 4.05E-01 | 4.36E-01 | 107.7% | 2.01E-01 | 2.08E-01 | 103.6% | 7.76E-01 | 8.71E-01 | 112.3% |
| TS | 3.90E-01 | 4.16E-01 | 106.7% | 2.50E-01 | 2.97E-01 | 118.8% | 1.05E+00 | 1.21E+00 | 116.0% |

(a) 周辺ピン支持

| | X | | | Y | | | Z | | |
|------|----------|----------|--------|----------|----------|----------|----------|----------|-------|
| | 時刻歴 | CQC(300) | 時刻歴 | CQC(300) | 時刻歴 | CQC(300) | 時刻歴 | CQC(300) | |
| FP | 1.38E+00 | 1.55E+00 | 112.0% | 1.25E+00 | 1.49E+00 | 119.7% | 9.11E+00 | 9.10E+00 | 99.9% |
| CL45 | 4.05E+00 | 4.40E+00 | 108.7% | 1.20E+00 | 1.33E+00 | 111.2% | 5.47E+00 | 5.46E+00 | 99.8% |
| DM | 2.02E+00 | 2.47E+00 | 121.8% | 2.05E+00 | 2.15E+00 | 104.8% | 3.03E+00 | 3.02E+00 | 99.8% |
| TS | 2.56E+00 | 3.30E+00 | 128.8% | 1.46E+00 | 1.74E+00 | 119.0% | 5.75E+00 | 5.74E+00 | 99.8% |

(b) 周辺ローラー支持

表4 重ね合わせの方法を各方向最大応答の絶対値和としたときの最大変位の比較 (単位: cm)

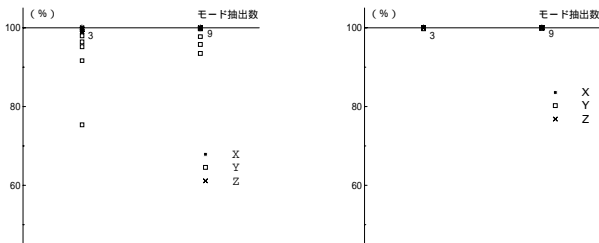
| モード番号 | 固有周期(s) | 等価質量比 | | | 順位 |
|---------|---------|--------|--------|--------|----|
| | | X | Y | Z | |
| 1 | 0.24260 | 0.00% | 0.00% | 66.74% | 1 |
| 2 | 0.11554 | 0.24% | 6.33% | 0.00% | 20 |
| 3 | 0.11554 | 6.33% | 0.24% | 0.00% | 5 |
| 4 | 0.08238 | 0.00% | 0.00% | 0.00% | |
| 5 | 0.05869 | 0.00% | 0.00% | 0.00% | |
| 6 | 0.05831 | 0.00% | 0.00% | 16.79% | 2 |
| 7 | 0.05297 | 33.12% | 3.03% | 0.00% | 2 |
| 8 | 0.05297 | 3.03% | 33.12% | 0.00% | 3 |
| 9 | 0.05193 | 34.14% | 3.31% | 0.00% | 1 |
| 10 | 0.05193 | 3.31% | 34.14% | 0.00% | 8 |
| 14 | 0.03652 | 6.67% | 0.06% | 0.00% | 4 |
| 15 | 0.03652 | 0.06% | 6.67% | 0.00% | 4 |
| 34 | 0.02494 | 0.00% | 0.00% | 5.30% | 3 |
| 64 | 0.01812 | 0.00% | 0.00% | 2.33% | 4 |
| 255 | 0.01060 | 0.00% | 0.00% | 1.67% | 5 |
| 等価質量比合計 | | 99.32% | 99.32% | 99.00% | |

(a) 周辺ピン支持

(b) 周辺ローラー支持

表5 等価質量表 (SSFP)

図4にモード抽出数を3つ、9つにしたときの300個抽出したときに対する比を示す。ピン支持のときは9つ、ローラー支持では3つでよい精度を示している。



(a) 周辺ピン支持

(b) 周辺ローラー支持

図4 抽出数を変化させたときの精度

4.2 「SD」型モデルに関する結果

等価質量比に関しては、周辺ピン支持のとき、等価質量比の順位で1位から3位までのモードがSDFPでは20次以内、SDCL30、SDCL45、SDCL60は40次以内、SDDMは50次以内、SDTSは55次以内となり、形状によって性質が異なっている。周辺ローラー支持のときは、SDCL30とSDCL60を除いては、等価質量比の順位で1位から3位までのモードが60次以内におさまっていることから、全体的に低次のモードで特に卓越している。また、両支持条件において等価質量比の合計は全てのものにおいて95パーセントを超えていることから、形状がもつ卓越する振動モードの殆どが300次のなかに含まれていると言える。

表6に時刻歴応答解析とCQCで300モード抽出した

ときの結果の比較を示す。周辺ピン支持のとき、SDDMを除いては、各方向とも上下10%誤差以内の範囲におさまっているため、数値計算上は良い近似を示しているといえる。一方、SDCL30、SDCL45、SDCL60、SDTSに時刻歴に対する比が100パーセントを下回っているものがある。この4モデルについて、重ね合わせの方法を各方向最大応答の絶対値和としたときの表を表7に示す。これによってすべての方向に対して安全側に設計することができるが、計算精度が著しく落ちる。

周辺ローラー支持のとき、各モデルともいずれかの方向に対しては、時刻歴応答解析の結果と比べ10パーセント以上割高な結果が出ている。一方、時刻歴に対する最大変位の比はすべてのモデル、すべての方向について100パーセントを超えている。

| | X | | Y | | Z | |
|------|----------|----------|--------|----------|----------|----------|
| | 時刻歴 | CQC(300) | 時刻歴 | CQC(300) | 時刻歴 | CQC(300) |
| FP | 1.17E+00 | 1.22E+00 | 103.9% | 1.17E+00 | 1.22E+00 | 104.2% |
| CL30 | 3.88E-01 | 3.74E-01 | 96.4% | 3.27E-01 | 3.21E-01 | 98.2% |
| CL45 | 3.71E-01 | 3.57E-01 | 96.2% | 2.38E-01 | 2.55E-01 | 107.1% |
| CL60 | 4.22E-01 | 4.27E-01 | 101.3% | 2.14E-01 | 2.07E-01 | 96.8% |
| DM | 2.56E-01 | 2.82E-01 | 110.0% | 2.23E-01 | 2.59E-01 | 115.7% |
| TS | 3.33E-01 | 3.23E-01 | 96.9% | 2.50E-01 | 2.66E-01 | 106.4% |

(a) 周辺ピン支持

| | X | | Y | | Z | |
|------|----------|----------|--------|----------|----------|----------|
| | 時刻歴 | CQC(300) | 時刻歴 | CQC(300) | 時刻歴 | CQC(300) |
| FP | 9.42E-01 | 1.09E+00 | 115.9% | 9.53E-01 | 1.07E+00 | 112.4% |
| CL30 | 9.58E-01 | 9.96E-01 | 103.9% | 5.62E-01 | 6.36E-01 | 113.2% |
| CL45 | 1.07E+00 | 1.17E+00 | 109.3% | 5.44E-01 | 6.14E-01 | 112.9% |
| CL60 | 1.02E+00 | 1.25E+00 | 122.9% | 5.03E-01 | 5.40E-01 | 107.5% |
| DM | 3.39E-01 | 4.15E-01 | 122.3% | 3.00E-01 | 3.86E-01 | 128.8% |
| TS | 6.08E-01 | 7.14E-01 | 117.5% | 3.89E-01 | 3.92E-01 | 100.6% |

(b) 周辺ローラー支持

表6 時刻歴応答解析とCQCで300モード抽出したときの最大変位の比較 (単位: cm)

| | X | | Y | | Z | |
|------|----------|----------|--------|----------|----------|----------|
| | 時刻歴 | CQC(300) | 時刻歴 | CQC(300) | 時刻歴 | CQC(300) |
| CL30 | 3.88E-01 | 4.20E-01 | 108.3% | 3.27E-01 | 3.51E-01 | 107.3% |
| CL45 | 3.71E-01 | 3.83E-01 | 103.2% | 2.38E-01 | 2.85E-01 | 119.5% |
| CL60 | 4.22E-01 | 4.59E-01 | 108.7% | 2.14E-01 | 2.37E-01 | 110.5% |
| TS | 3.33E-01 | 3.58E-01 | 107.5% | 2.50E-01 | 3.05E-01 | 122.1% |

表7 重ね合わせの方法を各方向最大応答の絶対値和としたときの最大変位の比較 (単位: cm)

| モード番号 | 固有周期(s) | 等価質量比 | | | 順位 |
|---------|---------|--------|--------|--------|----|
| | | X | Y | Z | |
| 1 | 0.24848 | 0.00% | 0.00% | 66.23% | 1 |
| 2 | 0.11789 | 2.78% | 1.64% | 0.00% | 6 |
| 3 | 0.11789 | 1.64% | 2.78% | 0.00% | 9 |
| 4 | 0.07471 | 0.00% | 0.00% | 0.00% | |
| 5 | 0.06808 | 0.00% | 0.00% | 0.00% | |
| 6 | 0.06337 | 0.00% | 0.00% | 15.03% | 2 |
| 7 | 0.05476 | 0.29% | 3.25% | 0.00% | 1 |
| 8 | 0.05476 | 3.25% | 0.29% | 0.00% | 11 |
| 9 | 0.05179 | 0.30% | 3.50% | 0.00% | 2 |
| 10 | 0.05179 | 3.50% | 0.30% | 0.00% | 2 |
| 12 | 0.04125 | 5.55% | 0.08% | 0.00% | 3 |
| 13 | 0.04125 | 0.08% | 5.55% | 0.00% | 3 |
| 19 | 0.03271 | 0.00% | 0.00% | 3.95% | 3 |
| 26 | 0.02939 | 3.95% | 3.90% | 0.00% | 4 |
| 27 | 0.02939 | 3.90% | 3.95% | 0.00% | 5 |
| 63 | 0.02107 | 0.00% | 0.00% | 2.06% | 5 |
| 87 | 0.01868 | 0.00% | 0.00% | 2.26% | 4 |
| 等価質量比合計 | | 96.98% | 96.98% | 99.09% | |

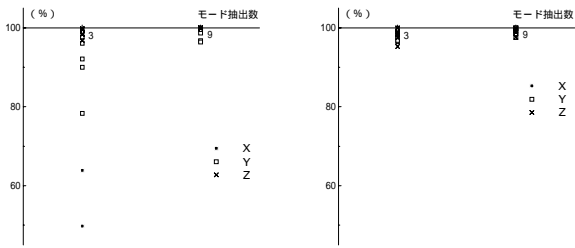
(a) 周辺ピン支持

(b) 周辺ローラー支持

表8 等価質量表 (SDFP)

| モード番号 | 固有周期(s) | 等価質量比 | | | 順位 |
|---------|---------|--------|--------|--------|----|
| | | X | Y | Z | |
| 1 | 0.26470 | 0.00% | 0.00% | 65.29% | 1 |
| 2 | 0.12733 | 0.01% | 0.02% | 0.00% | |
| 3 | 0.12733 | 0.02% | 0.01% | 0.00% | |
| 4 | 0.07884 | 65.32% | 0.75% | 0.00% | 1 |
| 5 | 0.07884 | 0.75% | 65.32% | 0.00% | 8 |
| 6 | 0.07591 | 0.00% | 0.00% | 0.00% | |
| 7 | 0.06935 | 0.00% | 0.00% | 0.00% | |
| 8 | 0.06921 | 0.00% | 0.00% | 16.39% | 2 |
| 9 | 0.06559 | 0.00% | 0.00% | 0.00% | |
| 10 | 0.05492 | 0.00% | 0.00% | 0.00% | |
| 27 | 0.03251 | 0.00% | 0.00% | 5.11% | 3 |
| 34 | 0.02822 | 4.91% | 1.65% | 0.00% | 2 |
| 35 | 0.02822 | 1.65% | 4.91% | 0.00% | 4 |
| 37 | 0.02731 | 0.41% | 2.93% | 0.00% | 11 |
| 38 | 0.02731 | 2.93% | 0.41% | 0.00% | 3 |
| 61 | 0.02230 | 0.00% | 0.00% | 2.74% | 4 |
| 101 | 0.01888 | 0.00% | 0.00% | 1.98% | 5 |
| 127 | 0.01673 | 1.47% | 0.04% | 0.00% | 5 |
| 128 | 0.01673 | 0.04% | 1.47% | 0.00% | 17 |
| 等価質量比合計 | | 99.12% | 99.12% | 98.91% | |

図5にモード抽出数を3つ、9つにしたときの300個抽出したときに対する比を示す。ピン支持のときは9つ、ローラー支持では3つでよい精度を示している。



(a) 周辺ピン支持 (b) 周辺ローラー支持
図5 抽出数を変化させたときの精度

4.3 「DS」型モデルに関する結果

等価質量比に関しては、周辺ピン支持のとき、等価質量比の順位で1位から3位までのモードがDSFPでは20次以内、DSCL30、DSCL45、DSDM、DSTSは30次以内におさまっているがDSCL60は30次以内に固まってはいるものの、38次と73次にも卓越するものがあり、形状によって性質が異なっている。周辺ローラー支持のときは、すべてのモデルにおいて等価質量比の順位で1位から3位までのモードが1次から10次の間、30次代といった具合にある程度の範囲をもちながら広く分散している。また、両支持条件において等価質量比の合計は全てのものにおいて95パーセントを超えていることから、形状がもつ卓越する振動モードの殆どが300次のなかに含まれていると言える。

表9に時刻歴応答解析とCQCで300モード抽出したときの結果の比較を示す。周辺ピン支持のとき、DSFP、DSCL30、DSTSは、各方向とも上下10%誤差以内の範囲におさまっているため、数値計算上は良い近似を示しているといえる。一方、時刻歴に対するCQC法での応答値の割合は100パーセントを下回らなかった。

周辺ローラー支持のとき、DSFP、DSCL45、DSCL60、DSTSは、各方向とも上下10%以内の範囲におさまっているため、数値計算上は良い近似を示しているといえる。一方、DSFPに時刻歴に対する比が100パーセントを下回っているものがある。このモデルについて、重ね合わせの方法を各方向最大応答の絶対値和としたときの表を表10に示す。これによってすべての方向に対して安全側に設計することができ、計算精度もよい結果が得られた。

| | X | | | Y | | | Z | | |
|------|----------|----------|--------|----------|----------|--------|----------|----------|--------|
| | 時刻歴 | CQC(300) | | 時刻歴 | CQC(300) | | 時刻歴 | CQC(300) | |
| FP | 1.33E+00 | 1.42E+00 | 106.4% | 1.35E+00 | 1.45E+00 | 107.5% | 7.56E+00 | 7.77E+00 | 102.8% |
| CL30 | 8.54E-01 | 9.00E-01 | 105.3% | 9.51E-01 | 1.01E+00 | 105.8% | 4.78E+00 | 4.98E+00 | 104.0% |
| CL45 | 4.65E-01 | 4.94E-01 | 106.2% | 4.40E-01 | 4.88E-01 | 111.0% | 1.97E+00 | 2.18E+00 | 110.4% |
| CL60 | 4.09E-01 | 4.67E-01 | 114.4% | 2.98E-01 | 3.12E-01 | 104.7% | 1.21E+00 | 1.27E+00 | 105.2% |
| DM | 2.38E-01 | 2.74E-01 | 115.0% | 2.79E-01 | 3.16E-01 | 113.1% | 1.35E+00 | 1.57E+00 | 115.9% |
| TS | 6.34E-01 | 6.88E-01 | 108.5% | 7.78E-01 | 8.32E-01 | 106.9% | 3.50E+00 | 3.71E+00 | 106.1% |

(a) 周辺ピン支持

| | X | | | Y | | | Z | | |
|------|----------|----------|--------|----------|----------|--------|----------|----------|--------|
| | 時刻歴 | CQC(300) | | 時刻歴 | CQC(300) | | 時刻歴 | CQC(300) | |
| FP | 1.31E+00 | 1.29E+00 | 99.1% | 1.20E+00 | 1.25E+00 | 104.6% | 7.56E+00 | 7.64E+00 | 101.0% |
| CL30 | 2.32E+00 | 2.57E+00 | 111.0% | 9.23E-01 | 1.03E+00 | 111.7% | 6.75E+00 | 7.42E+00 | 109.9% |
| CL45 | 2.53E+00 | 2.67E+00 | 105.3% | 9.27E-01 | 1.01E+00 | 108.4% | 5.86E+00 | 5.99E+00 | 102.3% |
| CL60 | 2.37E+00 | 2.53E+00 | 106.6% | 7.97E-01 | 8.65E-01 | 108.5% | 4.19E+00 | 4.39E+00 | 104.7% |
| DM | 7.58E-01 | 8.77E-01 | 115.6% | 7.10E-01 | 8.40E-01 | 118.4% | 2.42E+00 | 2.69E+00 | 111.2% |
| TS | 1.86E+00 | 2.00E+00 | 107.5% | 1.29E+00 | 1.35E+00 | 104.6% | 6.07E+00 | 6.18E+00 | 101.9% |

(b) 周辺ローラー支持

表9 時刻歴応答解析とCQCで300モード抽出したときの最大変位の比較(単位: cm)

| | X | | | Y | | | Z | | |
|----|----------|----------|--------|----------|----------|--------|----------|----------|--------|
| | 時刻歴 | CQC(300) | | 時刻歴 | CQC(300) | | 時刻歴 | CQC(300) | |
| FP | 1.31E+00 | 1.37E+00 | 105.3% | 1.20E+00 | 1.32E+00 | 110.2% | 7.56E+00 | 7.64E+00 | 101.0% |

表10 重ね合わせの方法を各方向最大応答の絶対値和としたときの最大変位の比較(単位: cm)

| モード番号 | 固有周期(s) | 等価質量比 | | | 順位 |
|---------|---------|--------|--------|--------|----|
| | | X | Y | Z | |
| 1 | 0.25781 | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 1 |
| 2 | 0.12410 | 0.48% | 4.08% | 0.00% | 5 |
| 3 | 0.12409 | 4.06% | 0.48% | 0.00% | 5 |
| 4 | 0.07877 | 0.00% | 0.00% | 0.00% | |
| 5 | 0.07196 | 0.00% | 0.00% | 0.00% | |
| 6 | 0.06696 | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 2 |
| 7 | 0.05779 | 0.26% | 1.27% | 0.00% | 9 |
| 8 | 0.05779 | 1.27% | 0.26% | 0.00% | 9 |
| 9 | 0.05477 | 2.76% | 1.49% | 0.00% | 2 |
| 10 | 0.05477 | 1.49% | 2.76% | 0.00% | 2 |
| 12 | 0.04364 | 0.39% | 0.15% | 0.00% | 3 |
| 13 | 0.04364 | 0.15% | 0.39% | 0.00% | 3 |
| 19 | 0.03460 | 0.00% | 0.00% | 0.00% | |
| 26 | 0.03108 | 7.81% | 0.05% | 0.00% | 4 |
| 27 | 0.03108 | 0.05% | 7.81% | 0.00% | 4 |
| 63 | 0.02229 | 0.00% | 0.00% | 2.11% | 5 |
| 87 | 0.01976 | 0.00% | 0.00% | 2.19% | 4 |
| 等価質量比合計 | | 97.17% | 97.16% | 99.28% | |

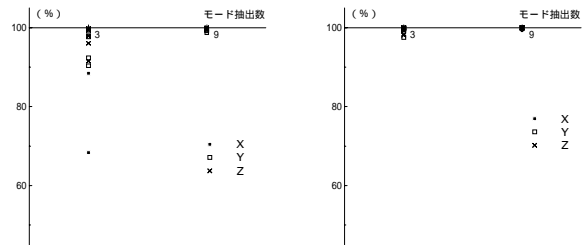
| モード番号 | 固有周期(s) | 等価質量比 | | | 順位 |
|---------|---------|--------|--------|--------|----|
| | | X | Y | Z | |
| 1 | 0.27630 | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 1 |
| 2 | 0.13432 | 0.02% | 0.01% | 0.00% | 18 |
| 3 | 0.13432 | 0.01% | 0.02% | 0.00% | 18 |
| 4 | 0.08338 | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 1 |
| 5 | 0.08338 | 1.80% | 0.00% | 0.00% | 4 |
| 6 | 0.08006 | 0.00% | 0.00% | 0.00% | |
| 7 | 0.07338 | 0.00% | 0.00% | 0.00% | |
| 8 | 0.07319 | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 2 |
| 9 | 0.06986 | 0.00% | 0.00% | 0.00% | |
| 10 | 0.05802 | 0.00% | 0.00% | 0.00% | |
| 27 | 0.03438 | 0.00% | 0.00% | 0.11% | 3 |
| 34 | 0.02955 | 0.00% | 0.99% | 0.00% | 2 |
| 35 | 0.02955 | 0.99% | 0.00% | 0.00% | 2 |
| 37 | 0.02890 | 0.34% | 0.34% | 0.00% | 3 |
| 38 | 0.02859 | 0.34% | 0.34% | 0.00% | 3 |
| 60 | 0.02359 | 0.00% | 0.00% | 2.75% | 4 |
| 101 | 0.01998 | 0.00% | 0.00% | 1.98% | 5 |
| 127 | 0.01768 | 1.54% | 0.00% | 0.00% | 5 |
| 128 | 0.01768 | 0.00% | 1.54% | 0.00% | 5 |
| 等価質量比合計 | | 99.31% | 99.31% | 99.11% | |

(a) 周辺ピン支持

(b) 周辺ローラー支持

表11 等価質量表(DSFP)

図6にモード抽出数を3つ、9つにしたときの300個抽出したときに対する比を示す。ピン支持のときは9つ、ローラー支持では3つでよい精度を示している。



(a) 周辺ピン支持

(b) 周辺ローラー支持

図6 抽出数を変化させたときの精度

5. まとめ

これまでの結果をまとめると、以下の結論を得た。

- ・形状による比較としては、FP、TSが全体的に良い精度を示しており、DMは全ての網目、境界条件について精度が悪かった。
- ・モード抽出数は、最低でも9つ抽出すればよい精度が得られることがわかった。また境界部の拘束効果が小さければ、さらに少ない抽出数でもよい精度が得られることがわかった。

参考文献

1) E.L. Wilson, A. Der kiureghian, E. P. Bayo, 1981, 「A replacement for the SRSS method in seismic Analysis」, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol.9, pp.187-194