

応答スペクトル法による中規模ラチスドームの地震応答評価

RESPONSE EVALUATION OF MEDIUM-SPAN LATTICE DOMES
WITH SUBSTRUCTURES USING RESPONSE SPECTRUM ANALYSIS

竹内 徹^{*1}, 小河利行^{*2}, 中川美香^{*3}, 熊谷知彦^{*4}
Toru TAKEUCHI, Toshiyuki OGAWA, Mika NAKAGAWA
and Tomohiko KUMAGAI

Seismic responses of lattice domes with substructures are known to be very complicate, because of the dome having large numbers of parallel vibration modes, and their amplitude changing drastically along the relationship between domes and substructures. Under limited condition, however, their response characteristics are considered to become relatively simple. In this paper, various shapes of domes are analyzed using response spectrum analyses with CQC method, which is less time-consuming than time-history analyses. The conditions for simplifying the principal modes are made clear through these studies, and their response characteristics are discussed.

Keywords : *Lattice Domes, Seismic Response Analysis, Response Spectrum Analysis, CQC Method*
 ラチスドーム, 地震応答解析, 応答スペクトル法, CQC法

1. 序

下部構造に支持されたドーム構造に水平地震動が働いた際の応答性状については、既に多くの研究がなされており、その性状が明らかにされつつある。ドーム構造は一般的に、非常に多くの振動モードが近接した固有周期において卓越するため、下部構造との関係によりその応答が大きく変化し、これを包括的に把握し表現することは容易ではない。この問題を解決するため、加藤、小西ら¹⁾²⁾³⁾は、ドーム部を複数の並列する振動系に置き換え、下部構造振動系と直列配置することで下部構造付ドームを簡易振動モデルに表現し、これを用いた応答評価法を提案している。また、下部構造が塑性化する場合、1次モード支配型的前提下、同モデルを1自由度系に縮約し、限界状態計算を行う方法についての提案を行っている。一方、山田⁴⁾は、下部構造付空間構造の応答を評価する前提として、下部構造と上部構造の質量比と剛性比または固有周期比が、上部応答に与える影響についての基礎的考察を行っている。これら既往の研究を通じて得られた知見として、以下が挙げられる。

- 1) 下部構造を含むドームの振動特性において、より少ない振動モードに有効質量が集中している場合には、応答性状を単純化でき、静的地震荷重へのモデル化が容易となる。
- 2) ドーム自身の固有周期帯に対し下部構造の固有周期が乖離している場合には、両者を合成した振動性状は比較的単純化されるが、下部構造の固有周期がドームの固有周期帯内に位置する場合に

は、その複合振動性状は非常に複雑となる。

- 3) 一般的傾向として、ドームを構成するラチス材の面外剛性が高いほど、卓越する主要なモード数は減少する。例として、単層ドームより複層ドームの方が、有効質量比の和が90%以上となるための振動モード数は少なくなる傾向がある。

以上の知見を総合すると、ある限られた条件下、即ち、一定以上の面外剛性を持つラチス材により構成され、下部構造との振動性状が一定条件を満足するドームでは、応答性状が比較的単純化され、静的地震荷重のモデル化が容易となる仮説が成り立つ。しかしながら、現在までの知見において、その範囲が明確になっているとは言い難い。加藤、小西らの提案する多質点並列モデルは、より多くの範囲をカバーすることが可能であるが、ドーム部の固有値解析を必要とするため、中小規模の建物に適用する設計法としてはやや煩雑となる。また、下部構造が塑性化した場合にはその等価剛性が低下するため、上部構造周期帯との分離が容易となり、応答性状が単純化できると推察されるが、その範囲は未だ明確になっていない。上記範囲を明らかにすることにより、応答性状が単純化できるドーム構造物の条件が明確化できることが期待できる。ライズを有するドームでは、水平入力に対する鉛直方向の励起も顕著であるため、上記条件内の応答を整理し、中規模ドーム設計用に一般化することは、空間構造の静的地震荷重の整理普及のために有意義であると考えられる。

そこで、本研究ではCQC法⁵⁾を利用して、ドームの面外剛性、及

^{*1} 東京工業大学理工学研究科建築学専攻 助教授・博士(工学)

^{*2} 東京工業大学理工学研究科建築学専攻 教授・工博

^{*3} (株)CRCソリューションズ 修士(工学)

(元 東京工業大学 大学院生)

^{*4} 東京工業大学理工学研究科建築学専攻 助手・博士(工学)

(元 東京工業大学 大学院生)

Assoc. Prof., Dept. of Arch. and Building Eng., Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.

Prof., Dept. of Arch. and Building Eng., Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng. CRC Solutions Corporation, M. Eng.

(Ex-Graduate Student, Tokyo Institute of Technology)

Research Assoc., Dept. of Arch. and Building Eng., Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.

(Ex-Graduate Student, Tokyo Institute of Technology)

び下部構造との特性を変化させた多くの下部構造付中規模ドーム構造についての応答評価を行い、その応答性状と卓越する振動モードとの関係を詳細に分析することによって、応答が単純化できるドームの条件を明らかにすることを目的とする。CQC法は、ドーム構造のような多振動モードが近接する構造物のランダム振動応答を、応答スペクトル法を用いて評価するうえで、SRSS法より精度が高く、また時刻歴応答解析より計算時間が短く、応答特性を分析し易い特徴がある。その精度についてはすでに前報⁶⁾⁷⁾で検討し、半開角 $20^{\circ}\sim 40^{\circ}$ の円形ドームにおいて、有効質量比90%までの振動モードを用いたCQC法による合成を行えば、幾何非線形性を考慮した時刻歴応答解析と同等の応答評価が可能であることを示した。本報では、その手法を利用し、同様のライズ/スパン比の範囲で下部構造の無いドームの面外剛性を変化させたモデルについて振動モードを分析し、卓越モードと面外剛性との関係を明らかにする。続いて、下部構造を付加し、その剛性を変化させたモデルについてパラメトリックに分析を行い、振動特性比と卓越モードとの関係を明らかにする。以上の結果を用い、卓越モードが限定される中規模ドームの応答特性を明らかにし、限定されたモードを使用した応答評価の精度について検証する。さらに、これを包絡する静的地震荷重の設定を試み、その精度を検証することにより、今後の設計法整備のためのデータを提供する。

2. 検討モデル

検討モデルは、図1及び表1に示すようなスパン $L=60\text{m}$ の中規模単層ラチスドームであり、半開角は $\theta=20^{\circ}, 30^{\circ}, 40^{\circ}$ の3種類とする。柱脚はピン支持とし、柱頭とテンションリング間はピン接合とする。表2に部材諸元を示す。以降、地震波入力方向に沿った節点A, O, A'を通る円弧を稜線と呼ぶ。ドームを構成する部材は全て円形鋼管とし、固定荷重のみを受ける時の部材応力が、ほぼ一樣になる様設計する。下部構造は、ベースシア係数 $C_0=0.3$ のせん

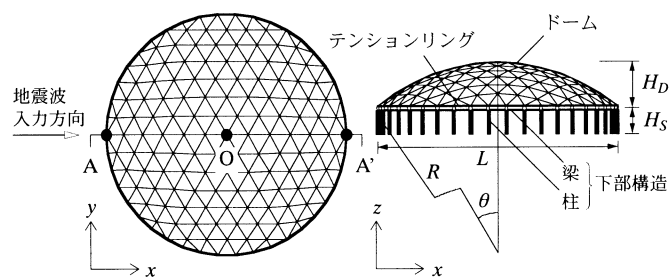


図1 解析モデル

表1 ドーム形状諸元

半開角 θ (deg.)	20.0	30.0	40.0
ドームのスパン L (cm)	6000		
ドームの曲率半径 R (cm)	8771	6000	4667
ドームのライズ H_D (cm)	529	804	1092
支持柱長さ H_S (cm)	600		
稜線部材長さ l (cm)	510	523	543

表2 部材諸元

	半開角 θ	ドーム (稜線)			テンション リング	柱
		20°	30°	40°		
部材細長比 λ	90.6~93.4	91.8~93.2	94.9~95.8	21.2	18.9	
外径 D (cm)		16.52		60.96	91.44	
厚さ t (cm)	0.60~1.10	0.40~0.65	0.35~0.50	1.27	1.60	
断面積 A (cm ²)	30.01~53.29	20.26~32.41	17.78~25.16	238	452	
断面二次モーメント I (cm ⁴)	952~1592	658~1020	581~808	106000	456000	
ヤング係数 E (kN/mm ²)	206					

断力、及びドーム部の固定荷重相当の軸力に対して弾性範囲とし、層間変形が $1/200$ 以下となる様設計する。固定荷重は、構造材重量、仕上げ材重量、吊り荷重等を考慮し、ドーム部 1.18kN/m^2 、下部構造 0.98kN/m^2 、及びテンションリングの自重とする。

図2に各モデルの卓越する固有モードを示す。有効質量比90%になるモード数及び卓越モードは、半開角により異なっており、規則性は見られない。

3. 応答スペクトル法の精度

幾何非線形性を考慮した時刻歴応答解析と応答スペクトル法を比較し、応答スペクトル法の精度を検討する。減衰はRayleigh型とし、減衰定数は1次、2次モードで2%を仮定する。応答スペクトル法では、モード間の相関を考慮するCQC法を用いる。CQC法による節点 i の最大応答値 $|x_i|$ は下式で表される。

$$|x_i| = \sqrt{\sum_{s=1}^N \sum_{r=1}^N (\beta_s S(T_s, h_s) u_{is}) (\rho_{sr} (\beta_r S(T_r, h_r) u_{ir}))} \quad (1)$$

ここで、 β_s は s 次の刺激係数、 T_s は s 次の固有周期、 h_s は s 次の減衰定数、 $S(T_s, h_s)$ は s 次の応答スペクトル、 u_{is} は節点 i の s 次の固有ベクトル、 ρ_{sr} は s 次と r 次との間のモード相関係数である。刺激係数 β 及び固有ベクトル u には、固定荷重下の軸力による幾何剛性を考慮した固有値解析により求めた値を用いる。また、モード相関係数 ρ は、地動の継続時間が各次固有周期に比べて充分長く、地動がホワイト・ノイズである場合の値であり、文献5, 8, 9で示された(2)~(4)式を用いる。

$$\text{相対変位: } \rho_{sr} = \frac{8\sqrt{h_s h_r} (h_s + \gamma h_r) \gamma^2}{(1 - \gamma^2)^2 + 4h_s h_r \gamma (1 + \gamma^2) + 4(h_s^2 + h_r^2) \gamma^2} \quad (2)$$

$$\text{相対速度: } \rho_{sr} = \frac{8\sqrt{h_s h_r} (h_r + \gamma h_s) \gamma^2}{(1 - \gamma^2)^2 + 4h_s h_r \gamma (1 + \gamma^2) + 4(h_s^2 + h_r^2) \gamma^2} \quad (3)$$

$$\text{絶対加速度: } \rho_{sr} = \frac{8\sqrt{h_s h_r} \{h_r + \gamma^3 h_s + 4\gamma h_s h_r (h_r + \gamma h_s)\} \sqrt{\gamma}}{\sqrt{(1 + 4h_s^2)(1 + 4h_r^2)} \{(1 - \gamma^2)^2 + 4h_s h_r \gamma (1 + \gamma^2) + 4(h_s^2 + h_r^2) \gamma^2\}} \quad (4)$$

ここで、 γ は s 次と r 次の固有円振動数比 ω_r/ω_s である。入力地震波は、人工地震波BCJ-L1, El Centro NS (1940), Taft EW (1952), Hachinohe NS (1968), Kobe JMA NS (1995)とし、最大速度を 25cm/s に基準化して用いる。

図3は、時刻歴応答解析結果と有効質量比90%でのCQC法による応答値を比較したものである。多様な地震波を通じ、加速度、変位、部材応力とも時刻歴応答解析結果とCQC法による応答値は良い対応

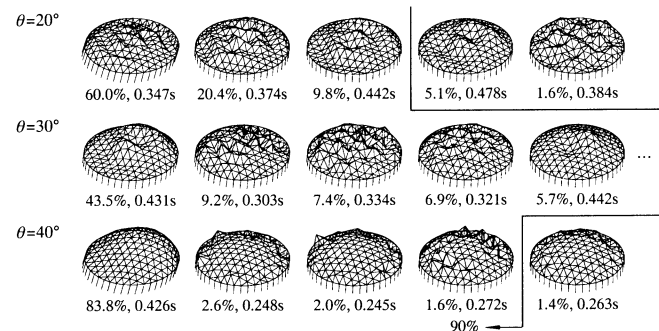


図2 卓越固有モード

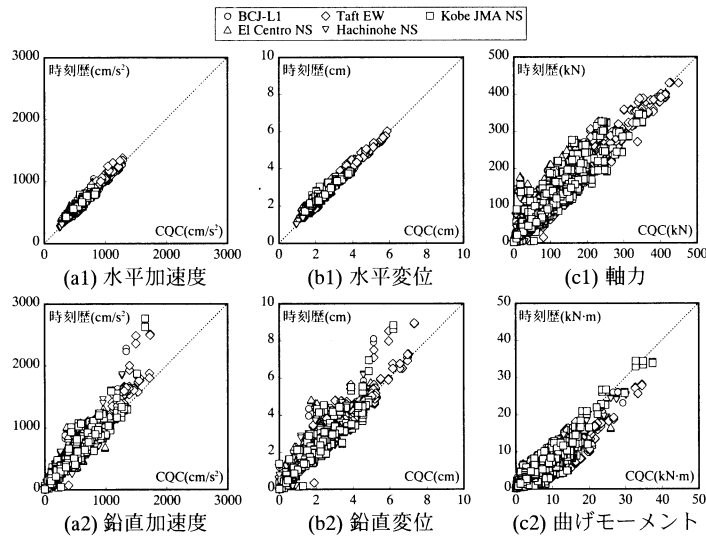


図3 CQC法の精度

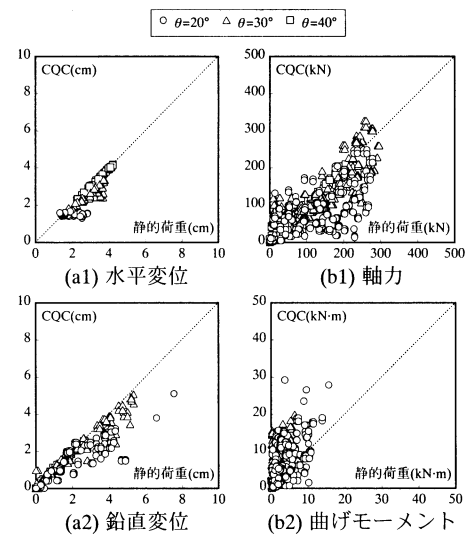


図4 最大応答加速度を静的荷重係数とした場合の精度 (BCJ-L1)

を示している。これより、ラチスドームにおいて、ここで扱う応答の範囲では、有効質量比90%でのCQC法は、幾何非線形性を考慮した時刻歴応答解析と同等の応答評価が可能であると考えられる。

静的地震荷重を設定する手法としては、最大応答加速度と質量の積を使用する方法が最も簡便であり、その精度を検証する。図4は、CQC法とCQC法による応答加速度と質量の積を静的地震荷重として載荷した場合の最大変位及び部材応力を比較したものである。変位はほぼ対応しているが、軸力と曲げモーメントは必ずしも良い対応を示していない。これは、全節点の加速度、変位もしくは各部材応力が、同時刻に最大とならないためである。これより、最大応答加速度を静的地震荷重係数として使用した場合、部材応力の評価には一定の誤差が伴うことがわかる。

4. デプス / スパン比と卓越モード

3章で示した検討モデルは、有効質量比90%に必要なモード数が半開角 $\theta=20^\circ, 30^\circ, 40^\circ$ の順に3, 10, 4モードとなっており、そのモード形状もモデルにより大きく異なるため、これらのモデルに対する静的地震荷重を一般化することは難しい。そこで、ドーム部材の曲げ剛性を大きくすることにより、ドームの面外剛性が卓越モードに与える影響を見る。これまでの検討モデルのドーム部のみをテンションリングでローラー支持としたモデルをR1、部材の曲げ剛性を10倍、100倍にしたものをそれぞれR10, R100とする。R10, R100

は表3に示すように、同断面積でデプス / スパン比が1/170, 1/50程度とした複層ラチスドームに相当する。

図5に、半開角 $\theta=30^\circ$ の屋根モデルについて、面外剛性を高くしていった場合の卓越する固有モードを示す。面外剛性が高くなるにつれ、有効質量比90%に必要なモード数は減少する。また、R1では面内変形モードが卓越しているが、面外剛性が高くなると面外変形モードが卓越してくる。図7に、半開角 $\theta=20^\circ, 40^\circ$ の場合の卓越モードの傾向を併せて示す。同図より、半開角に関わらず、面外剛性が高くなるにつれて、有効質量比90%に必要なモード数が4~8に減少することがわかる。この中には、図6に示すような逆対称1波(O1)、逆対称2波(O2)、逆対称2.5波(O2.5)、面内変形(I)モードの4モードが共通に見られ、半開角に関わらず、これらのモードで有効質量比80%以上を占めるようになる。以降、この4モードを主要4モードと呼ぶ。

以上より、今回の検討モデルでは、デプス / スパン比1/50程度になると、卓越するモードが主要4モードに限定され、応答性状が比

表3 デプス / スパン比 (d/L)

Model	$\theta=20^\circ$	$\theta=30^\circ$	$\theta=40^\circ$
R1	-	-	-
R10	1/172	1/169	1/168
R100	1/54	1/53	1/53

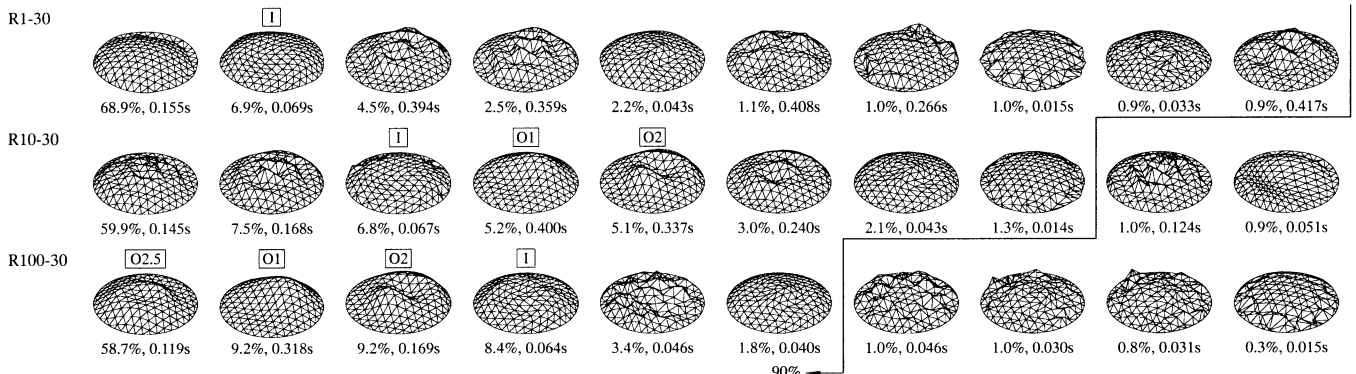
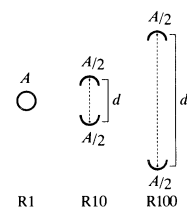


図5 ドームの面外剛性と卓越モード ($\theta=30^\circ$)

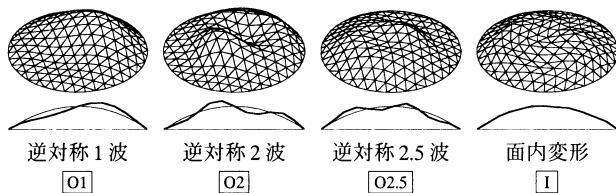


図6 主要4モード

較的単純化されると考えられる。

5. 下部構造の影響と応答評価

次に、ドームの卓越モードが限定される場合を想定して、ドームを面外剛性の高いR100相当に固定し、下部構造の水平剛性を変化させた時の応答性状について検討する。3章で利用したモデルと同じ下部構造を持つモデルをF1、柱、梁材の曲げ剛性を0.1倍、10倍、100倍にしたモデルをそれぞれF0.1、F10、F100とする。表4に、各モデルについて、ドーム部と下部構造の合計質量、及び下部構造の水平剛性を持つ1質点系モデルに置換した場合の等価固有周期 T_{eq} を示す。

図8に、半開角 $\theta=30^\circ$ のF0.1~F100の有効質量比90%に必要な固有モードを示す。ここでは、どのモデルもR100で抽出した逆対称1波、2波、2.5波、面外変形モードの主要4モードが主となっている。特にF0.1では、ドーム全体が水平方向に動くスウェイにドームの逆対称1波モードを組み合わせたモードのみが卓越する。半開角 $\theta=20^\circ$ 、 40° の場合も同様の傾向を示す。そこで、主要4モードのみを用いて、CQC法により応答評価することを考える。図9に、有効質量比90%の場合と主要4モードのみを用いた場合の応答加速度を示す。水平加速度、鉛直加速度ともよく一致しており、面外剛性の高いモデルでは、主要4モードを用いるCQC法でも、ドームの応答評価が充分可能であることがわかる。以後、CQC法は主要4モードを用いて行う。

次に、応答スペクトル法に用いる入力地震波のモデル化について検討する。文献10によるレベル1の水平動基準応答スペクトルに文献11による低減率 D_h を乗じたモデル化加速度応答スペクトルをBRI-L1とし、図10に示す。BRI-L1は下式で与えられる。

$$S_A(T) = \begin{cases} 200D_h & (0 < T < 0.04) \\ 200D_h(T/0.04)^{\log 3. \log 4.5} & (0.04 \leq T < 0.18) \\ 600D_h & (0.18 \leq T < \pi/6) \\ 100\pi D_h/T & (\pi/6 \leq T < 5) \\ 100\sqrt{5}\pi D_h/T^{3.2} & (5 \leq T < 10) \end{cases} \quad (5)$$

$$D_h = \sqrt{(1+97h_0)/(1+97h)} \approx 1.411 \quad (h_0=0.05, h=0.02) \quad (6)$$

ここで、 T は固有周期(s)、 D_h は低減率、 h は減衰定数である。同図中、 S_{Ag} は入力地震波の最大加速度、 S_{Ap} は加速度応答スペクトルの最大値である。BRI-L1を用いてCQC法により応答を計算した結果を図11に示す。同図は、F10-30の稜線上節点における応答加速度である。BRI-L1入力時の応答加速度は、他の地震波入力時の応答加速度を包絡している。これは他のモデルでも同様となっている。以上より、面外剛性の高いドームでは、主要4モード及びモデル化スペクトルを用いて、各モードの応答を求め、CQC法により合成すれば、応答加速度を予測することが可能である。

次に、この結果を用いて、主要4モードが、各モデルの最大応答性状にどのような影響を与えているかを図12に示す。各図中には、最

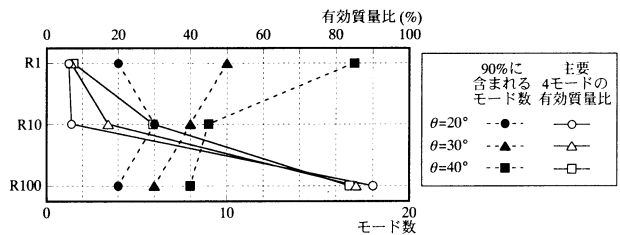


図7 卓越モードの縮約

表4 下部構造の等価固有周期 (T_{eq})

Model	$\theta=20^\circ$	$\theta=30^\circ$	$\theta=40^\circ$
F0.1	1.155 s	1.173 s	1.199 s
F1	0.350 s	0.355 s	0.362 s
F10	0.111 s	0.112 s	0.115 s
F100	0.035 s	0.036 s	0.036 s

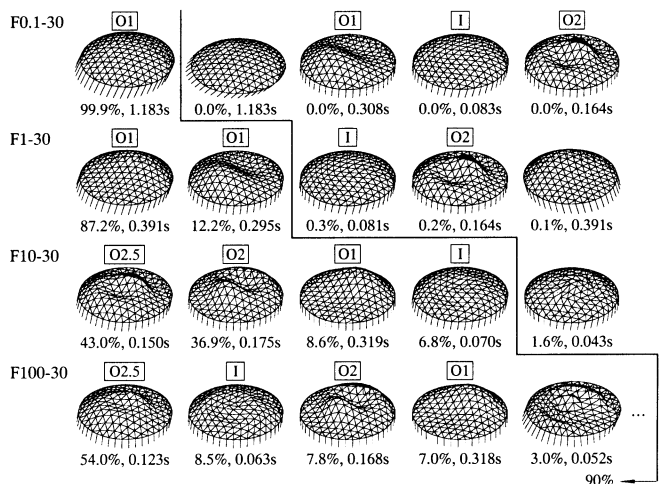
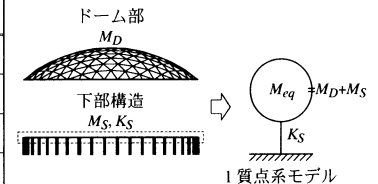


図8 下部構造の剛性と卓越モード ($\theta=30^\circ$)

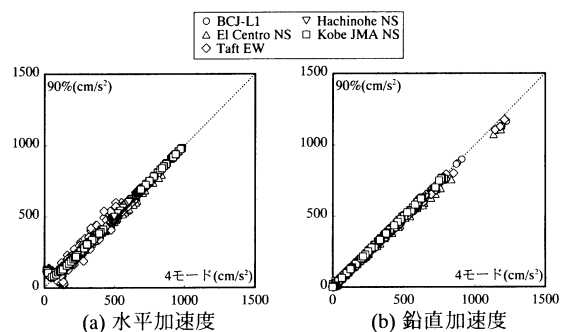


図9 90%と主要4モードの比較 ($\theta=30^\circ$)

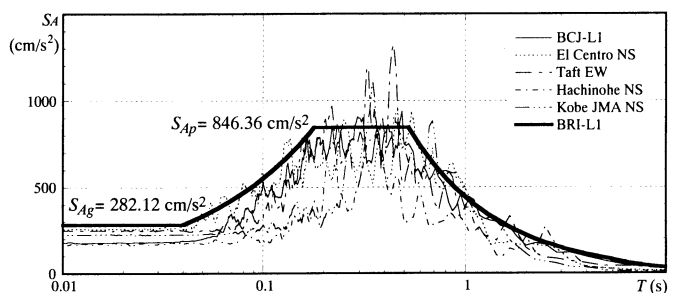


図10 モデル化加速度応答スペクトル ($h=0.02$)

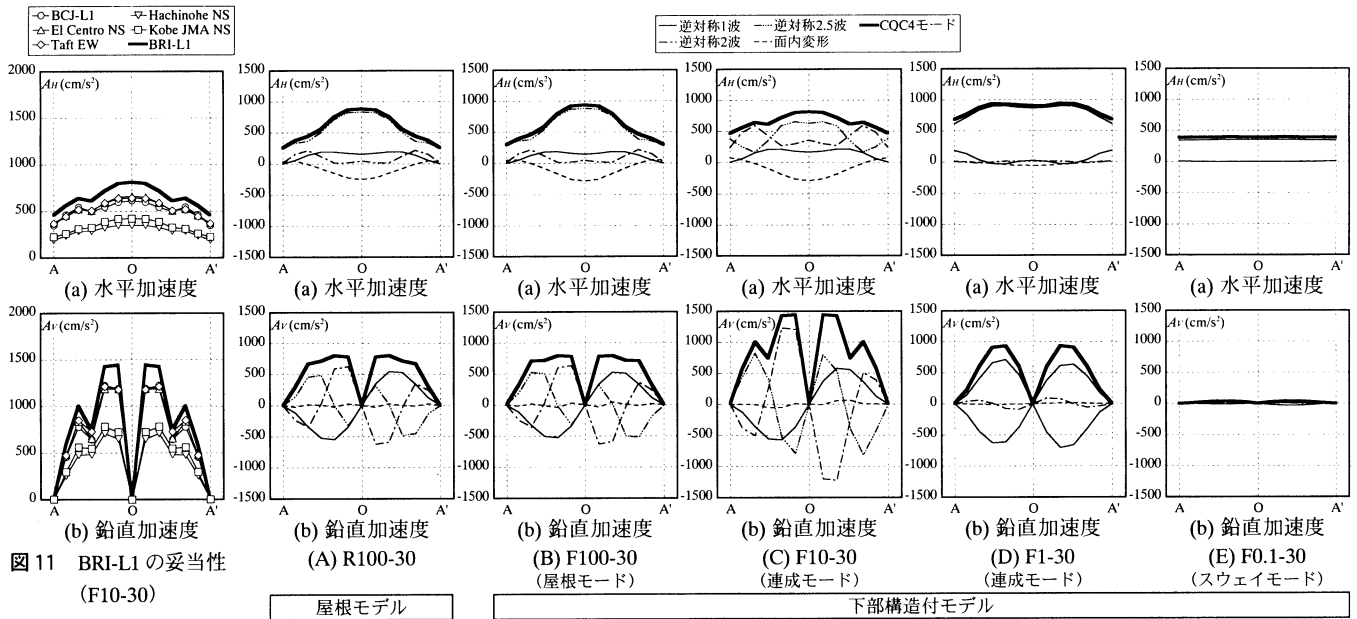


図 11 BRI-L1 の妥当性 (F10-30)

図 12 各モードの影響

大応答値を太実線で、主要 4 モードによる応答値を細線で表している。応答加速度の分布形状は、下部構造の剛性により異なり、F100 では屋根モデル R100 と同じ形状、F0.1 では下部構造による一様水平応答のみとなる。卓越するモードを見ると、水平加速度は、F100 では逆対称 2.5 波モード、F1 では逆対称 1 波モードでほぼ決まり、F10 では 4 モードが連成している。鉛直加速度は、F100、F10 では逆対称 3 モードの影響により決まり、F1 では逆対称 1 波モードのみとなっている。これらは半開角 $\theta=20^\circ$ 、 40° の場合も同様の傾向である。F10 の最大応答値で現れる、片側 2 つのピークを持つ加速度分布は、逆対称 2 波及び 2.5 波の合成により構成されていることがわかる。

次に、ドーム部と下部構造の関係を明確にするため、山田⁴⁾のスタディに今回のモデルを当てはめ、全体モデルを図 13 に示すような、ドーム部と下部構造の質量及び剛性からなる 2 質点系モデルに置き換える。 M_D 、 M_S はそれぞれドーム部、下部構造の質量であり、 K_D 、 K_S はドーム部、下部構造の剛性である。また、2 質点系モデルの 1 次、2 次固有周期を T_1 、 T_2 とすると、固有円振動数 ω_1 、 ω_2 は下式で表せる。

$$\left\{ \begin{array}{l} \omega_1 \\ \omega_2 \end{array} \right\} = \sqrt{\frac{R_M(1+R_T^2) \mp \sqrt{R_M^2(1+R_T^2)^2 - 4R_M^2R_T^2(1+R_M)}}{2R_M^2R_T^2(1+R_M)}} \omega_D \quad (7)$$

なお、質量比 $R_M=M_S/M_D$ 、周期比 $R_T=T_{eq}/T_D$ であり、 T_{eq} は 1 質点系モデルの等価固有周期、 T_D 、 ω_D は屋根のみのモデルの固有周期及び固有円振動数である。

図 14 に質量比 R_M 及び周期比 R_T を変化させた場合の ω_1/ω_2 分布を示す。本論文で検討しているモデルは、屋根のみを支持する下部構造を想定しているため、質量比 $R_M=0.2$ 程度と小さく、図 14 の範囲の中で、下部構造による上部の増幅効果が比較的小さい範囲に位置する。

図 15 に ω_1/ω_D と R_T の関係を示す。同図中に主要 4 モードをプロットしており、各モデルとも周期比 R_T の小さい方からドーム部の固有周期 T_D が、逆対称 1 波、2 波、2.5 波、面内変形モードの周期となっている。また、黒塗りのプロットは有効質量比が 1.0% 未満となるモードである。逆対称 1 波モードが $R_T<0.2$ 程度の範囲に

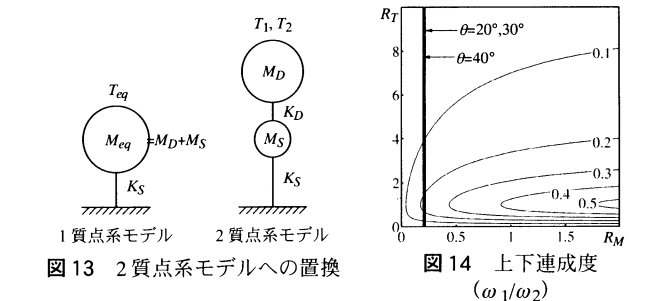


図 13 2 質点系モデルへの置換

図 14 上下連成度 (ω_1/ω_2)

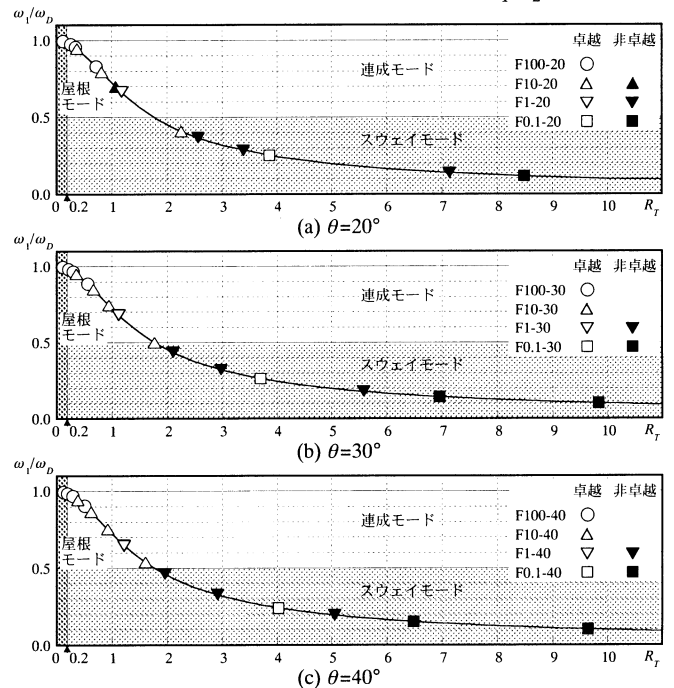


図 15 ω_1/ω_D - R_T 関係

あるモデルは、下部構造の剛性が充分高く、ドーム部の卓越モードは、屋根のみのモデルのモードとほぼ同じになる。また、 $\omega_1/\omega_D<0.5$ 程度の範囲では、下部構造の剛性が低く、ドーム部全体が水平移動するため、下部のスウェイとドーム部の逆対称 1 波モードを組み合わせ

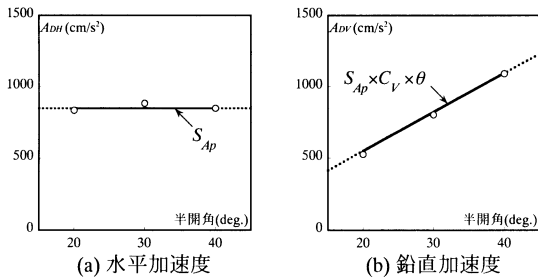


図 16 最大応答加速度 (R100)

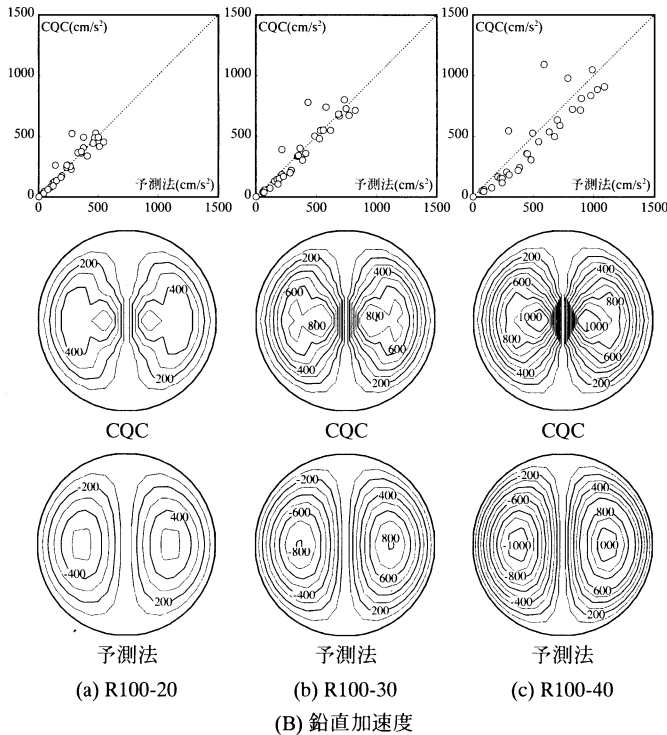
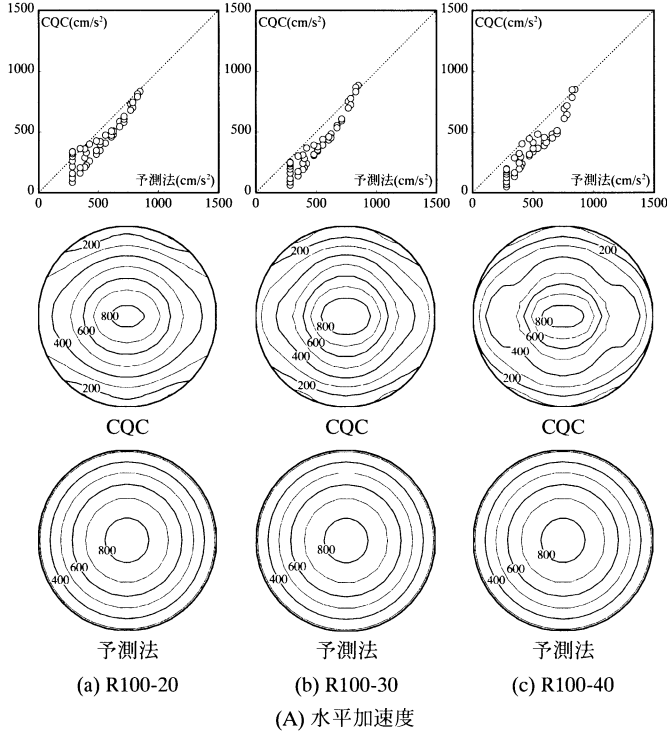


図 17 CQC 法による加速度分布と予測法による加速度分布の比較

わせたモードのみが卓越している。これらの中に位置する範囲は、下部構造とドームが連成し、ドーム部の応答が下部構造の影響で増幅する領域となっている。

6. 最大応答加速度の予測

以上より、ドーム部の面外剛性が高い場合には、主要な数モードとモデル化スペクトルを使用し、CQC 法等の応答スペクトル法を用いれば、分布形状を含めた応答加速度予測が可能であり、下部構造による影響もドーム部との質量比及び周期比の関係により分類できることがわかった。しかし、主要モードを求めるには、やはり固有値解析が必要であり、主要モードより合成された最大応答を、大まかであっても単純な関数で近似できると、設計上の有効範囲が広い。そこで、以降は得られた特性を利用し、静的地震荷重の設定方法について考える。

まず、下部構造の無い屋根モデルの最大応答加速度分布の近似関数を検討する。R100 における BRI-L1 入力時の水平及び鉛直加速度の最大値と半開角の関係は、図 16 に示すとおりである。水平加速度の最大値は、半開角に依らずほぼ一定であり、これは、加速度応答スペクトルの最大値 S_{Ap} (図 10) に対応している。また、鉛直加速度の最大値は、半開角が大きくなるにつれて増大し、ほぼ比例関係 $S_{Ap} \times C_v \times \theta$ となっている。ここで C_v は定数であり、本論文の検討モデルでは $C_v = 1.85$ となっている。また θ の単位は rad である。そこで、屋根モデルの最大応答加速度分布を文献 2 を参考に、以下

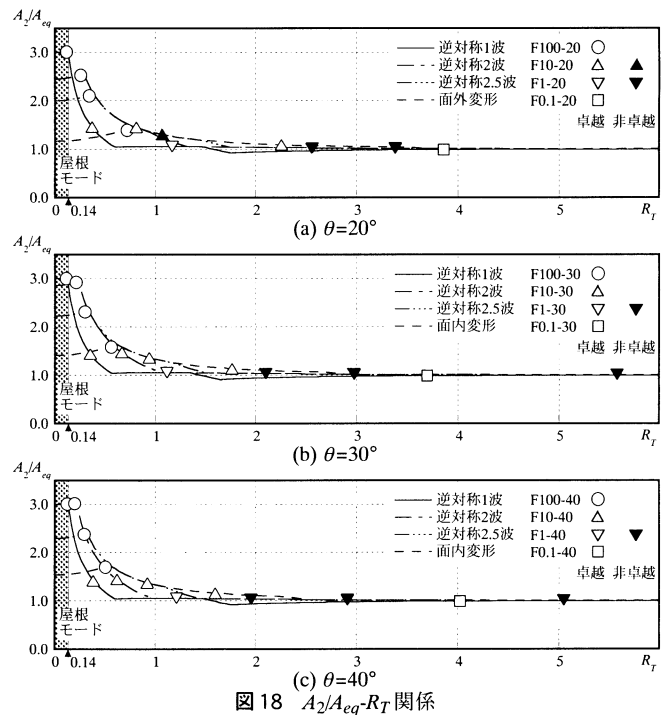


図 18 A_2/A_{eq} - R_T 関係

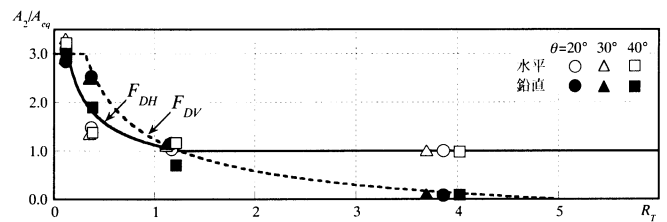


図 19 ドームの応答増幅率

のように設定する。

$$\text{水平: } A_{DH}(x, y) = S_{Ag} \left\{ 1 + \left(\frac{S_{Ap}}{S_{Ag}} - 1 \right) \cos \frac{\pi \sqrt{x^2 + y^2}}{L} \right\} \quad (8)$$

$$\text{鉛直: } A_{DV}(x, y) = S_{Ap} C_v \theta \frac{x}{\sqrt{x^2 + y^2}} \sin \frac{2\pi \sqrt{x^2 + y^2}}{L} \quad (9)$$

ここで、 S_{Ag} は入力加速度の最大値(図10)、 L はドームのスパンである。CQC法による応答加速度と、(8)、(9)式で表される応答加速度の比較及び分布図を図17に示す。複数モードの合成による応答を水平は対称、鉛直は逆対称波の関数で近似しているため、加速度が最大となる節点が多少異なっているが、CQC法による応答加速度と、(8)、(9)式による応答加速度は概ね良い対応を示している。

次に、下部構造付モデルの最大応答加速度分布について検討する。ドーム部と下部構造の連成振動による応答への影響は、周期比 R_T の関数として評価できる。そこで、4章で検討したBRI-L1入力時の2

質点系モデルの上層の応答増幅率 A_2/A_{eq} を図18に示す。ここで、 A_2 は2質点系モデルの上層の応答加速度、 A_{eq} は1質点系モデルの応答加速度である。同図中に主要4モードをプロットしており、各モデルとも周期比 R_T の小さい方からドーム部の固有周期 T_D が、逆対称1波、2波、2.5波、面内変形モードの周期となっている。また、黒塗りのプロットは有効質量比が1.0%未満となるモードである。全体の傾向は、モデル及びモードに依らず類似しており、逆対称1波モードが $R_T < 0.14$ 範囲にあるモデルの逆対称1波モードの応答増幅率は $A_2/A_{eq} = 3.0$ となっている。これは、屋根モデルの応答増幅率、即ち S_{Ap}/S_{Ag} に対応していると考えられる。また、周期比 $R_T > 1$ 程度の範囲では $A_2/A_{eq} = 1.0$ となり、上層の応答の増幅は見られない。

次に、全体モデルの応答増幅率を下式のように定義する。

$$\text{水平: } A_2/A_{eq} = A_{Hmax}/A_{eq} \quad (10) \quad \text{鉛直: } A_2/A_{eq} = A_{Vmax}/C_v \theta A_{eq} \quad (11)$$

ここで、 A_{Hmax} 、 A_{Vmax} はドーム部節点の水平及び鉛直応答加速度の

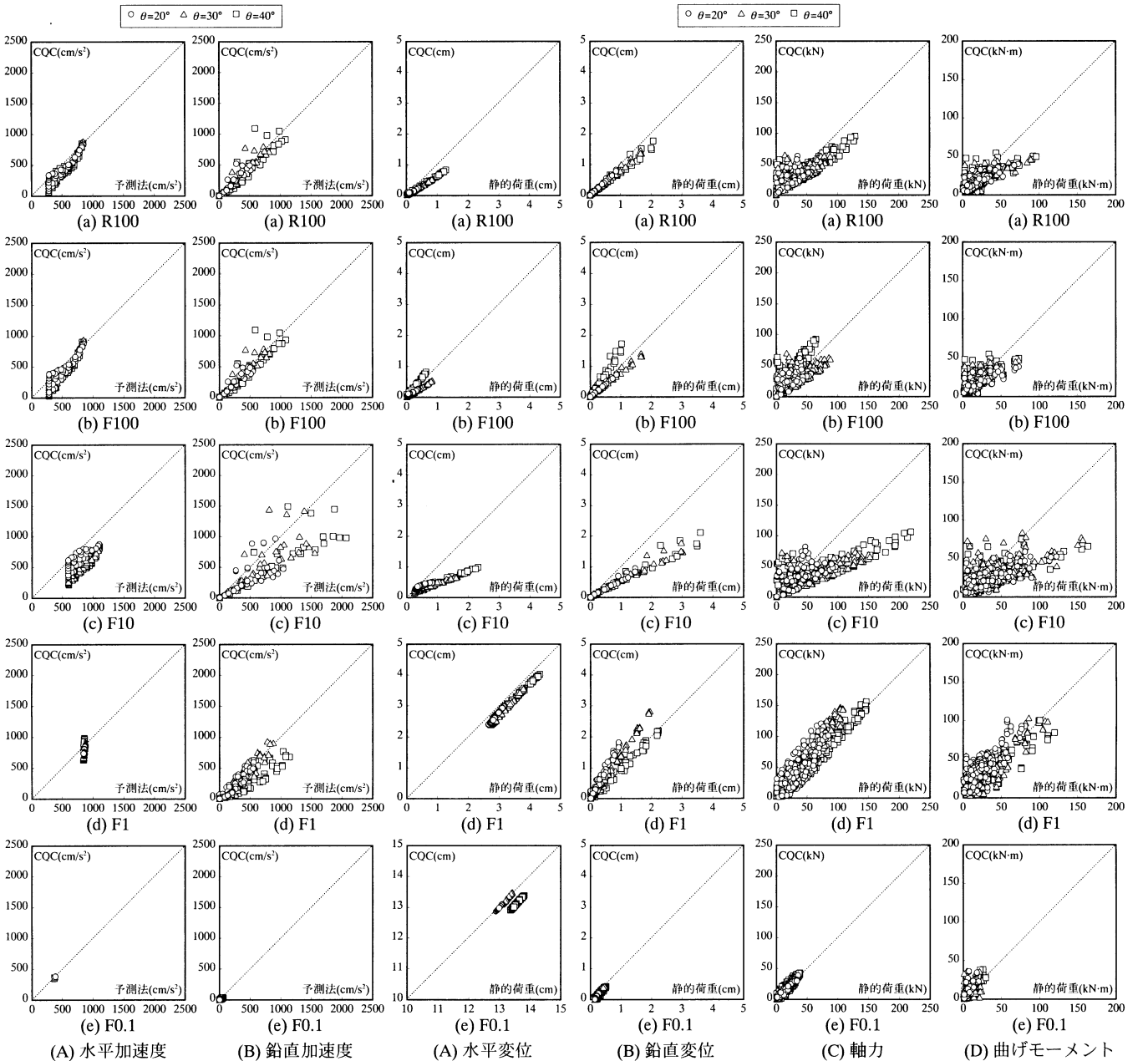


図20 予測法による加速度

図21 予測法による加速度を静的荷重とした場合の精度

最大値である。(10), (11)式より求めた下部構造付モデルのドーム部の応答増幅率を、逆対称1波モードの周期比 R_T に対してプロットしたものを図19に示す。全体モデルと2質点系モデルの応答増幅率は同様の傾向となっている。これらの応答増幅率を周期比 R_T の関数 F_{DH} , F_{DV} として表現すると、(8), (9)式より、ドーム部の最大応答加速度分布は、下式のように設定できる。

$$\text{水平: } A_H(x, y) = A_{eq} \left\{ 1 + (F_{DH} - 1) \cos \frac{\pi \sqrt{x^2 + y^2}}{L} \right\} \quad (12)$$

$$\text{鉛直: } A_V(x, y) = A_{eq} F_{DV} C_V \theta \frac{x}{\sqrt{x^2 + y^2}} \sin \frac{2\pi \sqrt{x^2 + y^2}}{L} \quad (13)$$

但し、ドーム部の応答増幅率は、図19より、

$$\text{水平: } F_{DH} = \begin{cases} 3 & (0 < R_T \leq 5/36) \\ \sqrt{5/4 R_T} & (5/36 < R_T \leq 5/4) \\ 1 & (5/4 < R_T) \end{cases} \quad (14)$$

$$\text{鉛直: } F_{DV} = \begin{cases} 3 & (0 < R_T \leq 5/16) \\ \sqrt{5/R_T} - 1 & (5/16 < R_T \leq 5) \\ 0 & (5 < R_T) \end{cases} \quad (15)$$

なお、 F_{DH} , F_{DV} は本来 R_T 及び R_M の関数であり、(14), (15)式は今回検討した $R_M=0.2$ に対応した関数であることに留意する必要がある。

以上より、今回対象としたデプス/スパン比1/50程度の中規模ラチスドームの地震応答加速度を、以下に示す過程で求めることが可能となる。

- 1) ドーム部と下部構造を一体とみなして等価固有周期 T_{eq} を計算し、応答加速度 A_{eq} を求める。
 - 2) ドーム部の逆対称1波モードの固有周期 T_D と等価固有周期 T_{eq} との周期比 R_T を求める。
 - 3) (14), (15)式により、ドーム部の応答増幅率 F_{DH} , F_{DV} を求める。
 - 4) (12), (13)式により、ドーム部の応答加速度 A_H , A_V を求める。
- 上記の過程において、ドーム部の逆対称1波モードの固有周期 T_D が未知となるが、これはデプス/スパン比と半開角 θ の関数になっていると考えられる。本論文では、デプス/スパン比1/50程度の検討モデルにおいて、半開角 θ による変動は±5%程度しかないので、3モデルの平均値 $T_D=0.305s$ で一定と仮定し評価することにする。以上の手続きにより求められた A_H 及び A_V とCQC法による最大応答加速度を比較したものを図20に示す。 F_{DH} 及び F_{DV} の関数設定条件より、F10の応答予測法による加速度が大きめになっているが、 A_H 及び A_V は概ね対応していると言える。

この応答予測法で求めた A_H 及び A_V と質量の積を静的地震荷重として載荷した場合の変位及び部材応力を図21に示す。加速度と同様、 F_{DH} , F_{DV} を大きめに設定しているF10では、変位及び部材応力はやや安全側に振れる。一方、図21(C)(D)では部材応力のばらつきが比較的大きいが、これは3章で検証した様に、最大加速度をそのまま地震荷重係数としたことによる誤差と考えられる。従って、部材設計においては、最大応力で照査した部材と断面の部材をある程度広い範囲で使用するなどの措置が必要となると思われる。

7. 結

下部構造に支持されたスパン60mの中規模ラチスドームの半開角、面外剛性及び下部構造の剛性を变化させたモデルについてパラメトリックスタディを行い、上記指標と卓越する振動モードとの関係を分析した結果、以下の点が明らかになった。

- 1) 下部構造の無い屋根のみの主要な振動モードは、面外剛性が高くなるにつれて限定され、デプス/スパン比が1/50程度では、半開角に関わらず、逆対称1波、2波、2.5波、面内変形の4モードで有効質量比80%以上を占める。
 - 2) 下部構造を有する上記条件下のドームの応答は、ドーム部と下部構造を一体と考えた等価1質点系固有周期とドーム自身の主要モード周期帯との関係により規定される。ドームの逆対称1波モード周期に対する等価1質点系周期の比が0.14以下では、下部構造の無い屋根のみの振動モードと同等となる。また、ドームの逆対称1波モードの固有円振動数に対する、ドームと下部構造からなる2質点系1次固有円振動数の比が約0.5以下では、ドーム全体が下部構造でスウェーする振動モードのみが支配的となる。
 - 3) 2)で示した両者の中間範囲では、ドームと下部構造が連成振動するが、下部構造とドームの主要4モードにより表現が可能である。具体的には、主要4モードにCQC法を適用して応答特性を表現できる。
 - 4) 屋根のみの主要モードによる応答加速度分布を包絡する近似関数を設定できれば、これにデプス/スパン比の影響、及びドーム部と下部構造の周期比による増幅率を加味した、応答加速度評価式が設定できるものと思われる。但し、これを静的地震荷重として部材設計を行う場合には、適切な措置が必要であると考えられる。
- なお、今回の検討は、限られた範囲のモデルに拠っているため、特に4)の応答加速度評価手法については、異なる規模、質量比のドームに適用した場合の精度についての検証を行う必要があると思われる。今後の課題としたい。

謝辞

本研究の一部は、平成15年度科学研究費補助金基盤研究(C)(2)(課題番号:14550560)によるものである。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 加藤史郎, 小西克尚, 中澤祥二, 向山洋一, 打越瑞昌: 下部構造に支持された空間構造の振動解析用質点簡易モデル, 構造工学論文集, Vol.48B, pp.37-47, 2002.3
- 2) 加藤史郎, 小西克尚: ラチスドームのPush-over analysisに基づく地震応答推定に関する一考察—1次モード支配型の空間構造に対する検討—, 日本建築学会構造系論文集, 第561号, pp.153-160, 2002.11
- 3) 小西克尚, 加藤史郎, 中澤祥二, 倉本洋: ラチスドームのPush-over analysisに基づく地震応答推定に関する一考察—2つのモードが支配的な空間構造物に対する検討—, 日本建築学会構造系論文集, 第569号, pp.89-96, 2003.7
- 4) 山田大彦: 空間構造の地震応答に及ぼす下部構造の影響に関する初步的考察, 第10回「シェル・空間構造」セミナー資料, 日本建築学会構造委員会 シェル・空間構造運営委員会, pp.65-77, 2001.11
- 5) E. L. Wilson, et al.: Short Communications A Replacement for the SRSS Method in Seismic Analysis, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol.9, pp.187-194, 1981
- 6) 小河利行, 中川美香, 熊谷知彦: 応答スペクトル解析を用いた単層ラチスドームの地震応答解析, 構造工学論文集, Vol.49B, pp.291-296, 2003.3
- 7) T. Ogawa, T. Takeuchi, M. Nakagawa, T. Kumagai: Seismic Response Analysis of Single Layer Lattice Domes with Substructure, IASS-APCS Int.Symposium Proceedings, pp.110-111, 2003.10
- 8) 渡辺基史, 滝澤春男: モード別単振子の時刻歴応答間に見られる相関度, 日本建築学会大会学術講演梗概集(東海), 構造I, pp.743-744, 1994.9
- 9) 大網浩一: CQC法におけるモード相関係数の簡便な近似式とその適用例, 日本建築学会構造系論文集, 第515号, pp.83-89, 1999.1
- 10) 建設省建築研究所: 建築研究資料 第83号 設計用入力地震動作成手法, 1994.11
- 11) 笠井和彦, 伊藤浩資, 渡辺厚: 等価線形化法による一質点弾塑性構造の最大応答予測, 日本建築学会構造系論文集, 第571号, pp.53-62, 2003.9

(2003年12月10日原稿受理, 2004年2月16日採用決定)