

支持架構付きラチスドームにおける地震応答評価手法の適用範囲

APPLICABILITY OF RESPONSE EVALUATION METHOD FOR LATTICE DOMES WITH SUBSTRUCTURES

竹内 徹*¹, 小河利行*², 熊谷知彦*³, 中間明子*⁴, 佐藤英佑*⁵

Toru TAKEUCHI, Toshiyuki OGAWA, Tomohiko KUMAGAI, Akiko NAKAMA and Eisuke SATO

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. The authors have proposed simple response evaluation method for medium span domes with substructures having relatively high out-of-plane stiffness. In this paper, proposed evaluation method is applied to more detailed models, less out-of-plane domes, and domes with various spans, respectively, and their validity and accuracy are analyzed and 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

一般的にドーム構造は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複雑に変化し、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、中澤、小西ら^{1)~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の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次モードおよび2次モード支配型に分類しながら、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、筆者ら⁴⁾⁵⁾は下部構造で支持されたスパン60mのドームについて、面外剛性がある程度以上確保されればドーム部の卓越モードにおけるドーム部分の変形形状が数種類に限定されることを前提に、下部支持構造との剛性比および質量比の関数であらわされる増幅率を用いてドーム各部の応答加速度をある程度の精度で簡便に予測できる手法を示した。ドーム屋根を一旦同一層とみなしてその水平応答加速度を評価し、そこからドーム各部の応答を算出する方法は、現状行われている多層骨組の設計法とも整合するため、同手法の適用範囲を明らかにした上でこれを利用すれば、ドーム屋根構造の構造設計上有用となるものと思われる。

具体的な課題としては、既報において良好な応答予測精度が確認された面外剛性の高いドームの解析モデルはダブルレイヤードーム

を想定しているもののシングルレイヤードームの構成部材の断面2次モーメントを増加させることにより構成されており、実際のダブルレイヤードームに適用した場合の精度を確認しておく必要がある。また、提案された応答予測法が検討された約1/50のデプス/スパン比からどの程度薄いドームまで精度を確保できるか、あるいはスパンや固有周期の異なるドームにおいて同様に応答予測が可能かどうか等その適用範囲について明らかにする必要がある。

そこで、本研究では既報告⁵⁾で提案した応答予測法を、モデルや面外剛性、規模の異なる支持架構つきラチスドームに適用し、その有効性と精度を確認することにより適用範囲を明らかにすることを目的とする。具体的には、まず前報で検討した60mスパンドームについて詳細なダブルレイヤーモデルを作成し、固有値解析および時刻歴応答解析を行い、その動的特性を等価単層モデルと比較するとともに応答予測法の精度を分析する。続いて、ドームの面外剛性を低下させていき、増大する卓越振動モード数が応答予測法の精度に与える影響とその限界適用範囲を検討する。また、適用範囲外のドームについては、それを補正する手法について考える。最後に、モデルの構成等はずえにスパンを30m~240mの範囲で変化させ、それぞれ設計されたドームの動的特性を分析するとともに応答予測法の精度について検討する。この過程の中で、前報で設定したドーム部の増幅係数に関するライズ/スパン比の影響係数について

*1 東京工業大学大学院理工学研究科建築学専攻 助教授・博士(工学)

*2 東京工業大学大学院理工学研究科建築学専攻 教授・工博

*3 東京工業大学大学院理工学研究科建築学専攻 助手・博士(工学)

*4 株式会社バンダイネットワークス 修士(工学)
(元 東京工業大学 大学院生)

*5 東京工業大学大学院理工学研究科建築学専攻 修士課程

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.
Assist. Prof., Dept. of Arch. and Building Eng., Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.
BANDAI NETWORKS CO., LTD., M. Eng.

(EX-Graduate Student, Tokyo Institute of Technology)

Graduate Student, Dept. of Arch. and Building Eng., Tokyo Institute of Technology

そのメカニズムを分析するとともに、より精度の高い予測式の可能性を検討する。

2. 詳細モデルによる応答予測法の検証

検討対象の基本となるモデルは、既報^{4)~6)}と同じく、図1(a)、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とし、半開角は $\theta=20^\circ, 30^\circ, 40^\circ$ の3種類とする。AOA'を結ぶ線を稜線と呼ぶ。本研究における検討モデルのモデル部材には鋼管部材を用いる。柱脚はピン支持とし、柱頭と梁は剛接合、下部構造梁上部とテンションリング間はピン接合とする。下部剛性倍率は、ベースシア係数 $C_0=0.3$ に対し弾性設計した支持構造を基準とし、その剛性を変化させた比率を示す。モデル名は、F(半開角)-(ドーム部面外剛性倍率)-(下部剛性倍率)で分類しており、各半開角のモデルを前述の条件で設計し、それぞれ、F20-1-1, F30-1-1, F40-1-1とする。下部構造を有するこれらのモデルの総称をFモデルとする。

既報⁵⁾で応答予測法を算出するにあたって使用したのは、基本モデルのドーム部面外剛性倍率を100倍にしたデプス/スパン比 $d/L=$ 約1/50を想定した仮想二層ドームである。本モデルは卓越モードが前報で示された主要4モード(O1:逆対称1波, O2:逆対称2波, O2.5:逆対称2.5波, I:面内変形)に限定され、弾性域での簡易応答予測法の精度が確認されたモデルである。各半開角によるデプス/スパン比を表2に示す。

本章では上記F θ -100-1のモデルに相当する二層ドームの詳細なモデルを作成し、上記予測法、および応答加速度を静的地震荷重係数とする場合の精度を検証する。

二層モデル(以降、Dモデルとする)は、Fモデルにおけるドーム

面を中立面とし、デプスは半開角 30° で面外剛性倍率100倍のデプス/スパン比を満たす $d=113(\text{cm})$ とする。下弦材のテンションリングと下部構造梁上部はピン接合、柱脚はピン支持とする。固定荷重は基本モデルと等しく、また鉄骨重量以外は全て上弦材節点にかかるものとする。図1(b)に二層ドームの解析モデル、表1にFモデル、Dモデルの形状諸元を示す。柱の高さは、Dモデル、Fモデル共に600cmとする。Dモデルの部材をFモデルと同等の曲げ剛性、伸び剛性となるように以下の手順で設計する。Dモデルを設定するにあたり、現実的な複層トラスとして、まず想定モデル(D'モデル)を設定する。D'モデルは図2(a)に示すようなモデルとする。D'モデルの弦材の断面積 A_f' を、Fモデルの部材断面積 A_0 に対し、 $A_f'=A_0/2$ とする。また、標準的なプロポーションより、斜材、束材の断面積 A_w', A_n' は $A_w'=A_n'=A_f'/5$ とおく。複層トラスの曲げ剛性 K_{eq}' 、伸び剛性 D_{eq}' は文献⁷⁾より下式で評価できる。

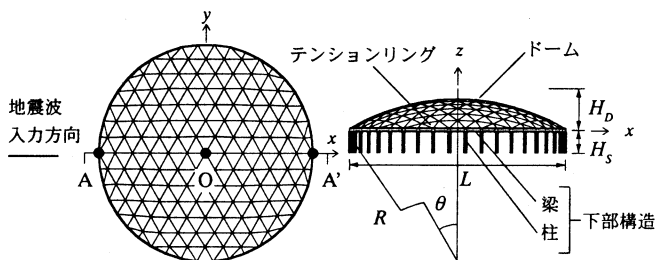
$$K_{eq}' = \frac{d^2}{2} EA_f' \quad (1)$$

$$D_{eq}' = 2EA_f' + \frac{\cos^3 \varphi'}{1 + \frac{A_w'}{A_n'} \sin^3 \varphi' - \frac{A_w'}{6A_f'} \cos^3 \varphi'} EA_w' \quad (2)$$

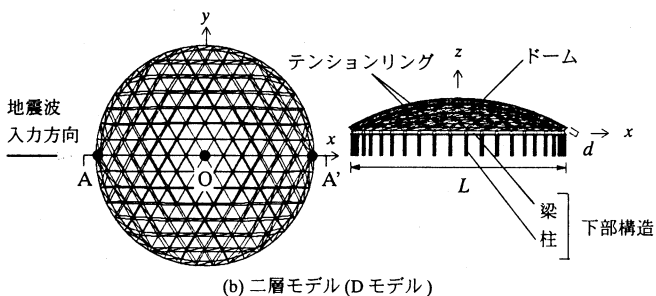
ここで、 d はトラスのデプス、 A_f', A_w', A_n' は弦材、斜材、束材の断面積、 φ' は弦材と斜材のなす角である。

式(1)よりD'モデルの曲げ剛性 K_{eq}' はFモデルの曲げ剛性と同等となる。また、式(2)よりD'モデルの伸び剛性 D_{eq}' はFモデルの伸び剛性の約1.1倍となる。

次に、解析上の節点数の制限より、D'モデルを図2(b)に示すよ



(a) 単層モデル (Fモデル)



(b) 二層モデル (Dモデル)

図1 解析モデル

表1 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	6000	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	600	600
稜線部材長さ l (cm)	510	523	543
デプス d (cm)	113	113	113

表2 デプス/スパン比

モデル	d/L
F20-100-1	1/54
F30-100-1	1/53
F40-100-1	1/53

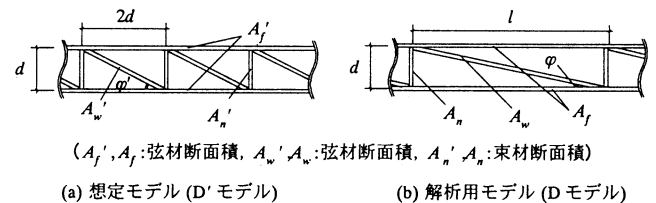


図2 モデル詳細図-解析モデル(D30-100-1)

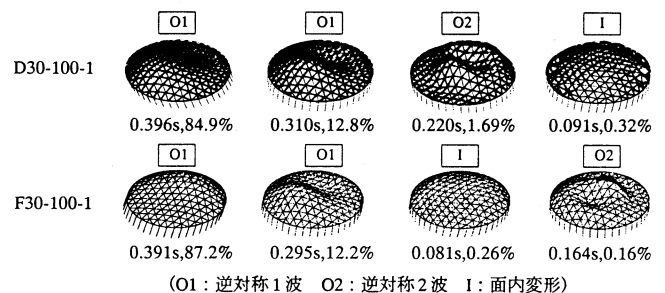


図3 有効質量比分布および固有モード($\theta=30^\circ$)

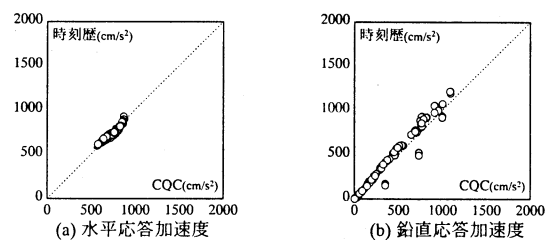


図4 主要4モード、 $\eta=2\%$ を用いたCQC法の精度(BCJ-L1, D30-100-1)

うな解析用のDモデルに変換する。 $A_f=A_f'$, $A_w=A_n=2A_f/3$ とくと、式(1)よりDモデルの曲げ剛性 K_{eq} はD'モデルの曲げ剛性と等価、式(2)よりDモデルの伸び剛性 D_{eq} はD'モデルの伸び剛性の約1.2倍となる。以上より設計したDモデルを用いて解析を行う。換言すると、ドーム部面外剛性を100倍にしたFモデルは、以下の特性を持つ2層モデルをモデル化したものと見ることができる。

1) 仮想のデプスと同じデプスを有し、デプスの2倍のユニット長を持ち、弦材の断面積はFモデルの半分で、ウェブ材の断面積は弦材の1/5程度の2層モデルと同等である。

2) トラスの伸び剛性、曲げ剛性はほぼ正確にモデル化できているが、せん断変形は単材では評価しておらず、対応していない。

図3にD30-100-1とF30-100-1の卓越固有モードを示す。D30-100-1, F30-100-1共に主要4モードが卓越しており、各主要モードの固有周期はほぼ同じ周期である。D30-100-1の方がやや固有周期が長いのは、二層としたことによるせん断変形や荷重のためであると考えられる。この傾向は半開角によらず見られる。

CQC法^{8)~10)}を用いた二層モデルの場合の応答スペクトル解析の精度を検討する。入力地震波には、人工地震波のBCJ-L1波を $V_{max}=25(\text{cm/s})$ に規準化して用いる。図4にCQC法と、時刻歴応答解析による結果の対応を示す。両者は良い対応を示していることから、主要4モードを用い、減衰定数 $\eta=2\%$ で一定とした場合のCQC

法による結果を応答予測法の精度確認に用いることとする。

3. 応答予測法による応答加速度的精度

以下の式(3)(4)で表される応答予測式⁵⁾を用いて、最大応答加速度を求める。

$$\text{水平: } A_{Hr}(x, y) = A_{eq} \left\{ 1 + (F_{DH} - 1) \cos \frac{\pi \sqrt{x^2 + y^2}}{L} \right\} \quad (3)$$

$$\text{鉛直: } A_{Vr}(x, y) = A_{eq} F_{DV} C_V \theta \frac{x}{\sqrt{x^2 + y^2}} \sin \frac{2\pi \sqrt{x^2 + y^2}}{L} \quad (4)$$

A_{eq} は架構を1質点系とみなした時の応答加速度であり、ドームを剛体とした時の固有周期 T_{eq} と加速度応答スペクトルBRI-L1¹¹⁾¹²⁾を用いて求める。また、 $C_V=1.85$, θ は半開角(rad)である。 F_{DH} , F_{DV} は下部構造に対するドーム部の応答増幅率であり、式(5)(6)で表される。

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

$$\text{鉛直: } F_{DV} = \begin{cases} 3 & (0 < R_T \leq 5/16) \\ \sqrt{5/R_T} - 1 & (5/16 < R_T \leq 5) \\ 0 & (5 < R_T) \end{cases} \quad (6)$$

R_T は等価1質点系における等価固有周期に対するドーム部の逆対称1波モードの固有周期比で、 $R_T=T_{eq}/T_D$ の関係として与えられる。ここで、 T_D はドーム部の逆対称1波モードの固有周期で、 $T_D=0.305(\text{s})$ である。

図5にD30-100-1の上弦材節点、下弦材節点における応答予測法、時刻歴応答解析、CQC法による応答加速度的精度を示す。また、図6にD30-100-1およびF30-100-1に予測最大応答加速度を静的地震荷重係数とした場合の精度をCQC法による応答変位、軸力変化量、曲げモーメント変化量との比較により示す。D30-100-1はF30-100-1に比べて、ややばらつきが見られるものの、概ね同等の精度を得ている。

次に、部材応力レベルでの、単層モデルと二層モデルの対応を調べる。

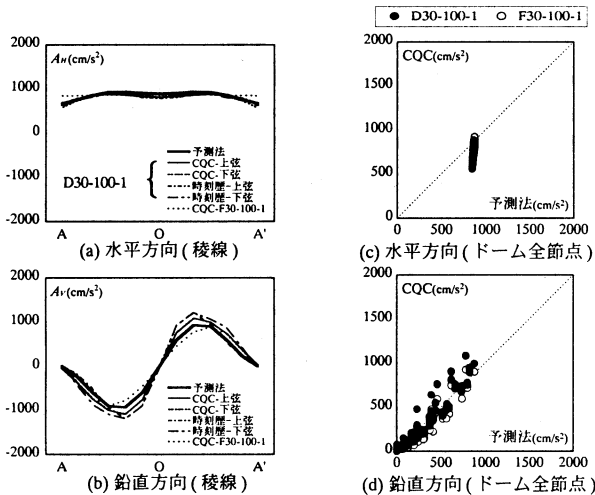


図5 最大応答加速度比較(D30-100-1, F30-100-1)

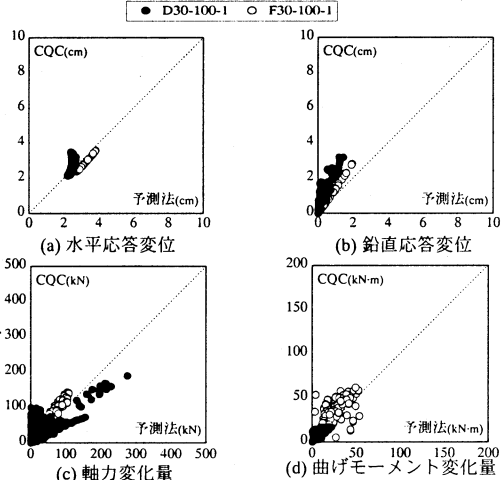
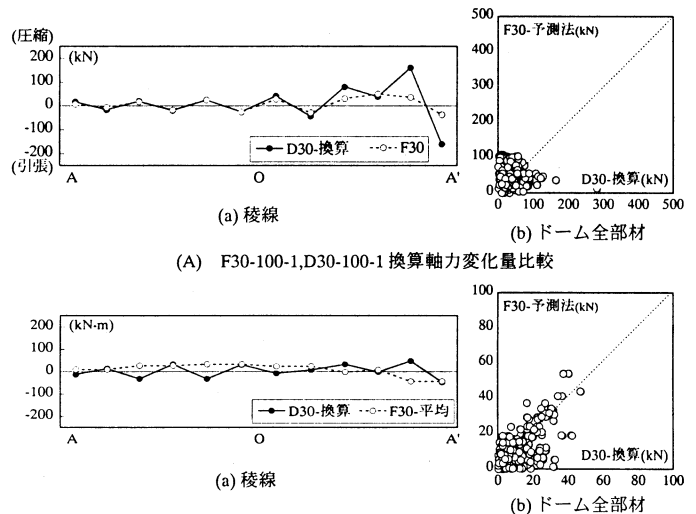


図6 最大応答加速度を静的地震荷重係数とした精度(D30-100-1, F30-100-1)



(A) F30-100-1, D30-100-1 換算軸力変化量比較

(B) F30-100-1, D30-100-1 換算曲げモーメント変化量比較

図7 D30-100-1, F30-100-1 部材応力変化量比較

D30-100-1の軸力変化量をFモデルの軸力、曲げモーメント変化量 N' 、 M' に換算し、F30-100-1の軸力、曲げモーメントと比較する。換算には以下の式(7)(8)を用いる。

$$\text{軸力} \quad N' = N_1 + N_2 + N_3 \cos \varphi \quad (7)$$

$$\text{曲げモーメント} \quad M' = (N_1 - N_2) d \quad (8)$$

N_1 、 N_2 、 N_3 はそれぞれDモデルの上弦材、下弦材、斜材の軸力変化量であり、 φ はDモデルの斜材と弦材のなす角である。

換算した部材応力とF30-100-1の静的地震荷重を載荷した時の部材応力の比較結果を図7に示す。各図(a)は稜線上の部材を抽出し、横軸に部材の中央のx座標をとって軸力および曲げモーメントをプロットしたものである。稜線上の部材においては正負の違いが幾つかの部材で見られるが概ね対応している。しかし、各図(b)においてドーム全体の部材で評価すると、良い対応は見られない。これらは、両モデル間の部材応力分担差に起因するものである。

以上より、応答予測法による最大応答加速度およびそれより算出した静的地震荷重は、二層モデルに対しても適用が可能であり、CQC法、時刻歴応答解析結果とも概ね良い対応を示すことが言えた。しかし、部材応力ではモデル化の違いにより二層モデルと等価単層モデル間に誤差が存在するため、予測法荷重を用いて解析を行う際のモデルにはより詳細な解析モデルを使用することが望ましいと言える。

4. デプスの薄いドームにおける応答予測法の適用範囲

次に、デプスの薄いドームの適用範囲を調べる。検討モデルは半開角 $\theta = 30^\circ$ とし、ドーム部の面外剛性は、基本となる単層ドームである1倍、およびデプス/スパン比 d/L が1/170を想定した10倍のものを使用する。更にそれぞれ下部構造剛性を基本モデルに対し1倍、10倍、100倍にした計6体について検討を行う。表3にモデル分類表を示す。また、下部構造を持たないドーム部分のみのモデルを屋根モデル(以降Rモデルとする)とし、R30-(ドーム部面外剛性倍率)で分類する。

図8にF30-1-10、F30-10-10の卓越固有モードを示す。面外剛性倍率が1倍のモデルについては100倍のモデルと比べると、有効質量比和が90%以上になるために必要なモード数が多く、主要4モードの有効質量比は小さい。また、面外剛性倍率が10倍のモデルについても同様である。

下部剛性が1倍および100倍のモデルにおいても同様に、ドーム部面外剛性が100倍のものに比べて、有効質量比和が90%以上になるために必要なモードの数は多く、逆対称モードが卓越しているモデルも少ない。

図9にF30-1-10、F30-10-10において、採用モードが主要4モードの場合と有効質量比和90%以上となるモードの場合のCQC法の比較を示す。有効質量比和90%以上となるモードを用いた場合のCQC法の精度については文献(4)(5)により全モードを用いた場合と同等の結果となることが示されているが、面外剛性倍率が小さくなると、主要4モードでの有効質量比和が低下するため、主要4モードのみを用いたCQC法の精度は低下している。従って、面外剛性100倍のモデルと異なり、1倍、10倍のモデルにおいては、主要4モードのみを用いるCQC法ではなく、有効質量比和90%以上となるモー

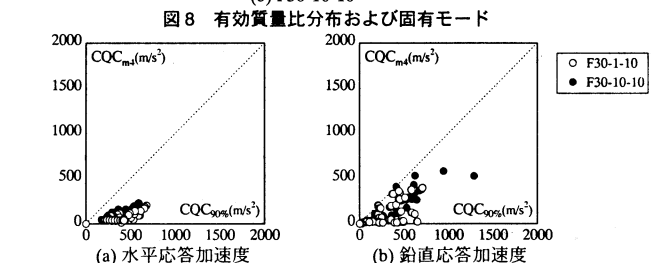
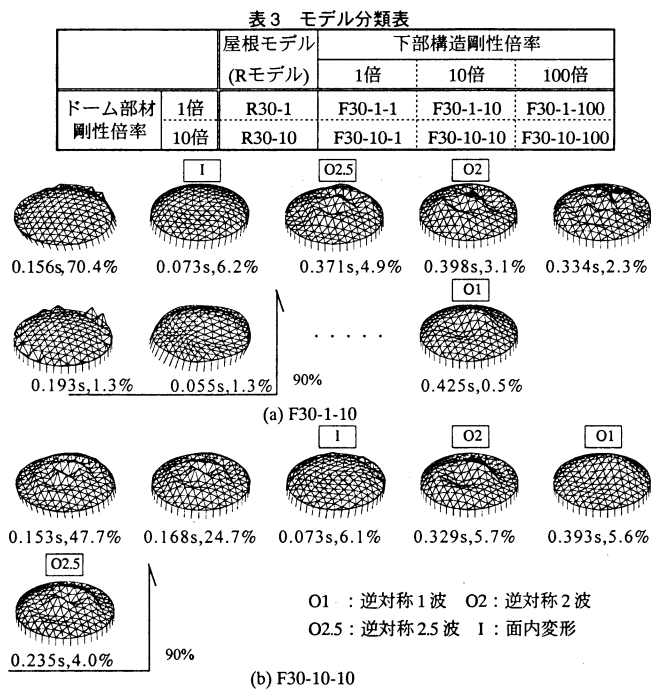


図9 採用モードの違いによるCQC法の精度(F30-1-10, F30-10-10)

表4 周期比

			T_{eq} (s)	T_D (s)	$R_T = T_{eq} / T_D$	A_{eq} (cm/s ²)
F30	$I_D = 1$	$I_s = 1$	0.355	0.441	0.805	846.4
		$I_s = 10$	0.112	0.441	0.255	599.6
		$I_s = 100$	0.036	0.441	0.081	282.1
	$I_D = 10$	$I_s = 1$	0.355	0.400	0.887	846.4
		$I_s = 10$	0.112	0.400	0.281	599.6
		$I_s = 100$	0.036	0.400	0.089	282.1
	$I_D = 100$	$I_s = 1$	0.355	0.305	1.163	846.4
		$I_s = 10$	0.112	0.305	0.368	599.6
		$I_s = 100$	0.036	0.305	0.117	282.1

I_D : ドーム部面外剛性倍率

I_s : 下部剛性倍率

R_T : 周期比

T_D : ドーム部の逆対称1波モードの固有周期

T_{eq} : 1質点系モデルの等価固有周期

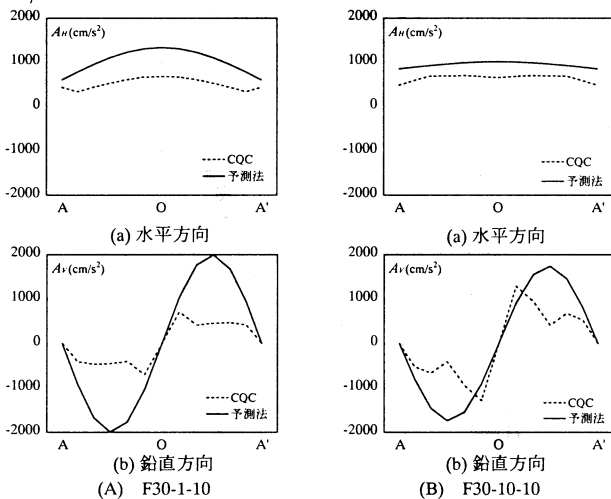


図10 応答予測法の精度(応答加速度、稜線)

ドを用いた結果を使用する。

続いて、面外剛性1倍、10倍のモデルにおける応答予測法より算出した最大応答加速度の精度を検証する。

表4に各モデルの周期比を示す。 I_D はドーム部面外剛性倍率、 I_S は下部構造剛性倍率である。図10にF30-1-10、F30-10-10の稜線上節点における予測応答加速度の精度を示す。ドームの剛性に関わらず、水平、鉛直応答加速度共に、大ききから分布形状まで大きく誤差が生じている。

図11に各モデルにおいてドーム部全節点の予測応答加速度および、それを静的地震荷重係数とした場合の精度を示す。最大水平応答加速度は、予測法による加速度でやや大きい、概ね良い対応が見られる。一方、鉛直応答加速度や変位、部材応力では、下部剛性倍率

が1倍のモデルは曲げモーメント変化量以外は全体的に対応していると言えるが、10倍、100倍のモデルでは精度は悪化する。特に、下部剛性倍率の10倍のモデルにおいてその差はかなり大きい。これより、応答予測法の適用範囲は既報で設定したデプス/スパン比1/50以上に限られると言える。但し、これより薄いドームにおいても予測法は概ね安全側の値を示している。

次に、誤差の目立った下部剛性倍率が10、100倍のモデルに関して応答予測法の補正を試みる。応答予測法はドーム部が逆対称に変形することを前提としているが、有効質量比が卓越するモードの固有ベクトルより、実際はドーム部の逆対称モードが殆ど励起されていない点が誤差の主因と推察できる。下部構造剛性1倍のモデルで静的地震荷重載荷結果が良い精度を示したのは、下部構造を付加し

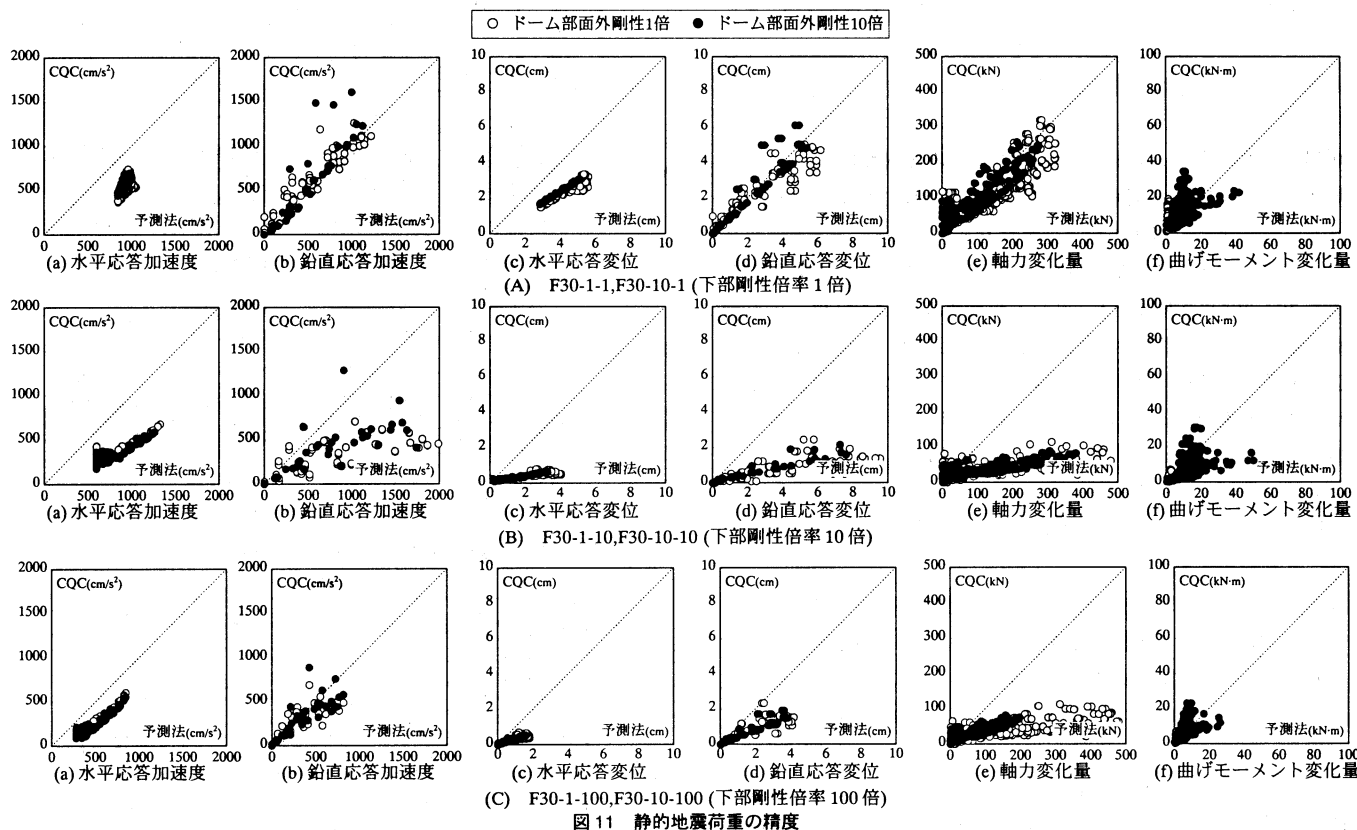
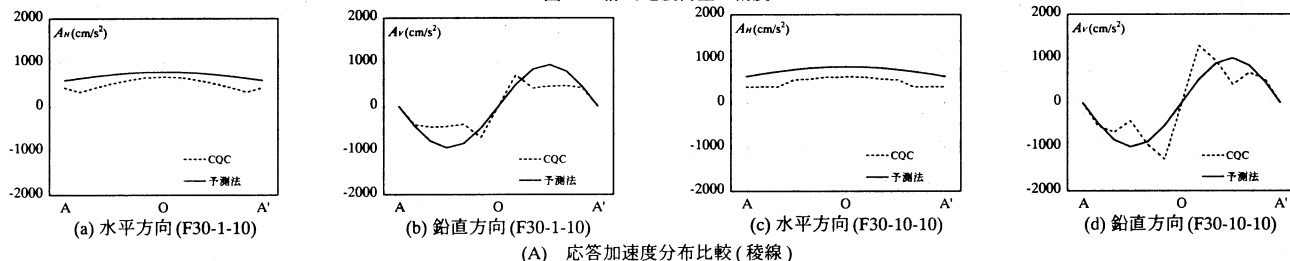
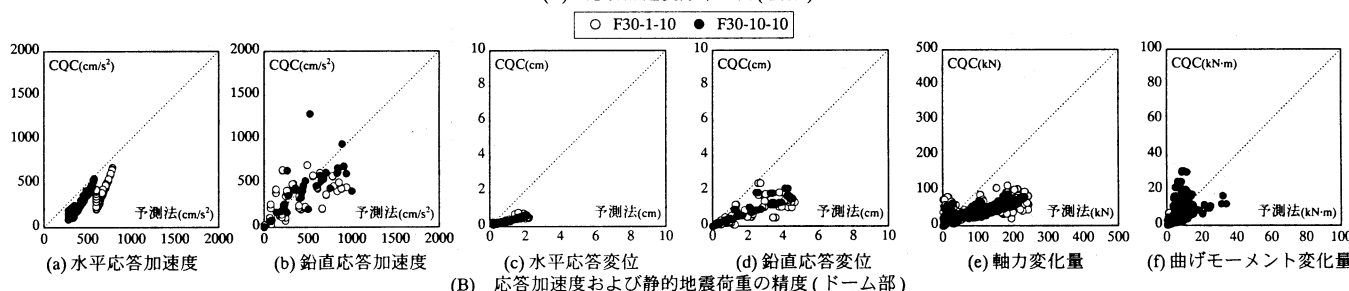


図11 静的地震荷重の精度



(A) 応答加速度分布比較(稜線)



(B) 応答加速度および静的地震荷重の精度(ドーム部)

図12 卓越モードを基準に補正した応答予測法の精度(F30-1-10,F30-10-10)

たことで偶然に逆対称モードが励起されているためである。

そこで、逆対称モードが卓越しない下部剛性倍率が10倍、100倍のモデルについて、予測法を使用する際には、 R_T の計算に使用する T_D に逆対称1波モードの固有周期ではなく、Fモデルで最も有効質量比が卓越するモードと同形状となるRモデルの固有周期に置き換えて最大応答加速度の算出を行う。図12にF30-1-10、F30-10-10における補正した予測法による最大応答加速度と、それを用いた静的地震荷重の精度を示す。図12(A)の稜線上の応答加速度分布比較より分かるように、予測法の加速度分布関数はsin関数で表現しているため、分布形状は異なるものの、全体的な大きさは以前より良い対応を示している。また、ドーム部全節点についての比較でも改善の傾向が見られる。これより、Fモデルにおける有効質量比最大のモード形状に着目し、そのRモデルにおける固有周期を T_D として用いた予測法を用いることができればより薄いドームにおいても提案予測法は有効となることが分かる。

5. 規模の異なるドームにおける応答予測法の適用範囲

最後に面外剛性が100倍のモデルに関し、規模の異なるドームにおける応答予測法の検証を行う。検討モデルは図1に示すFモデルとし、スパンを30、60、120、240mと変化させる。ドームの半開角は20°、30°、40°の3種類とし、ドームの面外剛性は100倍、下部剛性倍率は1倍のものを用いる。なお、本研究においては規模の変化による応答予測法の検証を行うため、分割パターン数および分割形状はすべての規模のドームに関して同様のものを用いる。検討モデルの形状諸元は表5に示す通りである。部材設計に関しては、表6に示す固定荷重を用い、スパンを60mのモデルの場合と同様の設計手法を用いて設計を行う。以降においてモデル名は半開角とスパンにより分類する。

図13にR120-L30およびF120-L30の卓越固有モードのモード形状を示す。屋根モデル、下部構造付きモデルともに既報⁵⁾と同様に主要4モードの有効質量比は大きくなっている。これらの傾向は半開角、スパンによらず、すべての検討モデルに関して同様の傾向が見られる。

表7に各モデルの屋根を固定し、一質点系とした場合の等価固有周期 T_{eq} 、屋根モデルでの固有周期 T_D 、周期比 R_T 、 T_{eq} におけるBRI-L1の加速度応答スペクトルの値を示し、図14に本検討においてCQC法における入力地震波であるBRI-L1¹¹⁾¹²⁾の加速度スペクトルおよび半開角30deg.のモデルにおける固有周期を示す。スパンが大きくなると等価固有周期は長くなる傾向があり、スパン30、60、120mのモデルの等価固有周期はBRI-L1の加速度スペクトルにおいて加速度一定領域にあり、スパン240mのモデルの等価固有周期は加速度一定領域から外れている。

図15にCQC法による稜線上節点の最大応答加速度分布を示す。なお、本検討においても、CQC法に採用するモードは、有効質量比和90%以上とすると、採用モード数が1つになるモデルが発生するため、有効質量比和が90%以上かつ主要4モードを含むように設定し、解析を行う⁴⁾。これらを比較すると、水平方向、鉛直方向共に稜線上の応答加速度分布はモデルによらずほぼ同様の性状を示している。ここでスパンF30-L240の応答加速度の値が他のモデルにくらべて小さくなっているのはF30-L240の等価固有周期に対

表5 形状諸元

モデル	スパン L (cm)	半開角 θ (deg.)	曲率半径 R (cm)	ライズ H_R (cm)	支持柱高さ H_S (cm)
F20-L30	3000	20	4386	265	300
F30-L30		30	3000	402	
F40-L30		40	2334	546	
F20-L60	6000	20	8771	529	600
F30-L60		30	6000	804	
F40-L60		40	4667	1092	
F20-L120	12000	20	17542	1078	1200
F30-L120		30	12000	1608	
F40-L120		40	9334	2184	
F30-L240	24000	30	24000	3215	2400

表6 固定荷重

スパン L (m)	固定荷重 (kN/m ²)	
	ドーム	下部構造
30	0.93	0.78
60	1.18	0.98
120	1.67	1.37
240	2.65	2.21

モデル名
F30-L120
— スパン(m)
— ドーム半開角(deg.)
R:屋根のみモデル
F:下部構造付モデル
ドーム部面外剛性100倍
下部剛性1倍

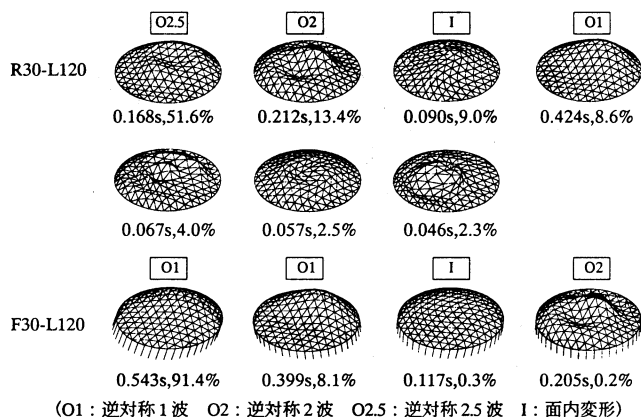


図13 有効質量比分布および固有モード(R30-L120, F30-L120)

表7 周期比

	T_{eq} (s)	T_D (s)	R_T	A_{eq} (cm/s ²)
F20-L30	0.224	0.208	1.08	846.4
F30-L30	0.232	0.208	1.12	846.4
F40-L30	0.228	0.208	1.10	846.4
F20-L60	0.350	0.305	1.15	846.4
F30-L60	0.355	0.305	1.16	846.4
F40-L60	0.362	0.305	1.19	846.4
F20-L120	0.493	0.423	1.17	846.4
F30-L120	0.500	0.423	1.18	846.4
F40-L120	0.510	0.423	1.21	846.4
F30-L240	0.786	0.588	1.34	564.0

T_{eq} : 1質点系モデルの等価固有周期

T_D : ドーム部の逆対称1波モードの固有周期

R_T : 周期比 ($R_T = T_{eq}/T_D$)

A_{eq} : T_{eq} におけるBRI-L1の加速度スペクトルの値

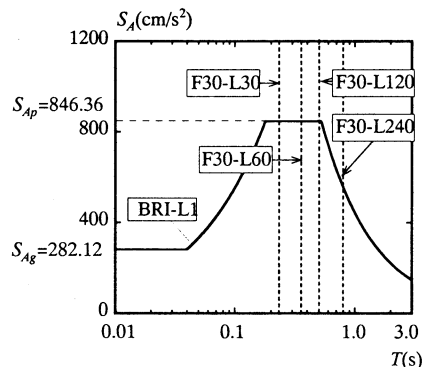


図14 BRI-L1の加速度応答スペクトル

するBRI-L1の応答スペクトルの値が小さいためであると考えられる。

以上より、ドームの面外剛性倍率および下部剛性倍率の等しいドームは、スパンによらずほぼ同様の自由振動特性および地震応答性状を示すことがわかる。ただし、地震応答性状に関して、最大応答加速度の値は卓越モードの固有周期により影響を受ける。

図16にドーム上の全節点における予測応答加速度の精度を、CQC法による応答加速度との比較により示す。これらを比較すると、全てのモデルに対して水平方向、鉛直方向共に予測法は概ね良い対応を示しているが、いくつかのモデルの鉛直方向の応答加速度に対して精度が低下していることが分かる。

そこで精度にばらつきのある鉛直方向の応答予測式について原因の分析を行う。まず図17にスパン30mのモデルにおけるCQC法、予測法による応答加速度の最大値を示す。これらを比較すると、水平方向に関しては、CQC法および予測法による最大加速度がほぼ一致しているが、鉛直方向に関してはCQC法による最大応答加速

度が、予測法において前提としている半開角による比例関係を示さず、フラットとなる傾向を示している。この傾向は他のスパンのモデルでも同様の傾向を示す。これは、屋根モデルより導いた半開角(すなわちライズ)と鉛直加速度応答増幅率 F_{DV} との関係が、下部構造付きの場合には変化していることを示唆している。そこで、文献13)と同様に、図18に示すような簡易アーチモデルを用いて応答増幅率と下部剛性倍率との関係の検討を試みる。簡易アーチモデルは、各節点で曲げ回転バネを有し、軸変形は生じない(軸剛性 ∞)ものとする。水平入力に対する振動モードを図18のような逆対称1波の曲げ変形モードに限定すると、固有ベクトル u は次式で表される。

$$u^T = [\delta_{1x}, \delta_{1y}, \delta_{2x}, \delta_{2y}, \delta_{3x}, \delta_{3y}]$$

$$= u \left[\sin \frac{3}{4}\theta, -\cos \frac{3}{4}\theta, 2\sin \frac{\theta}{4}, 0, \sin \frac{3}{4}\theta, \cos \frac{3}{4}\theta \right] \quad (9)$$

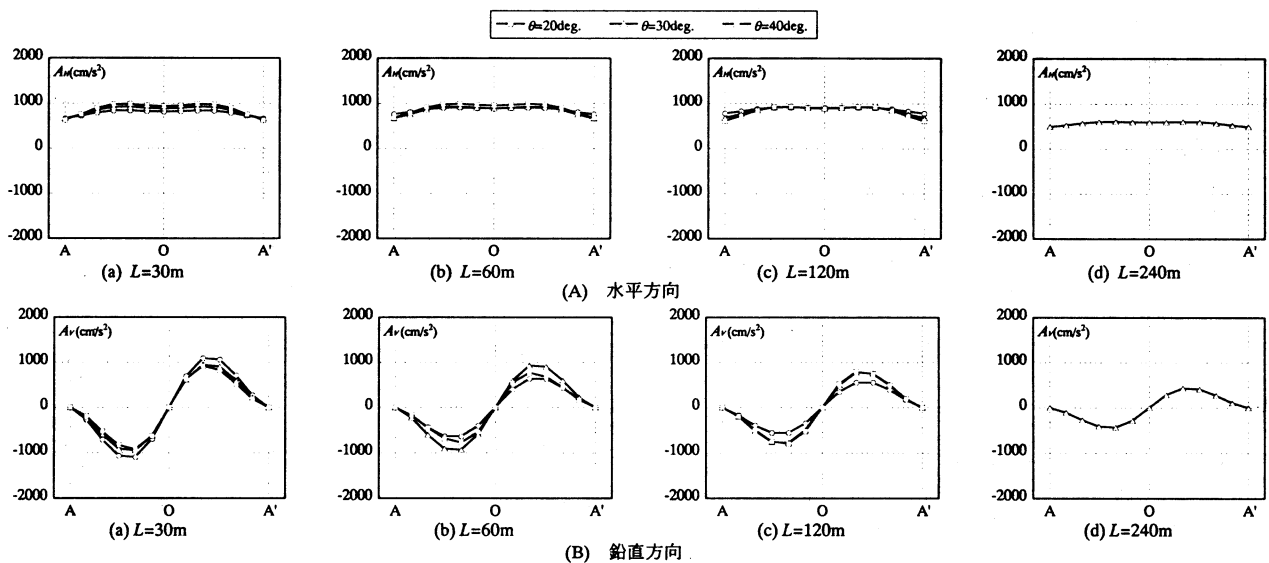


図15 応答加速度分布(続線)

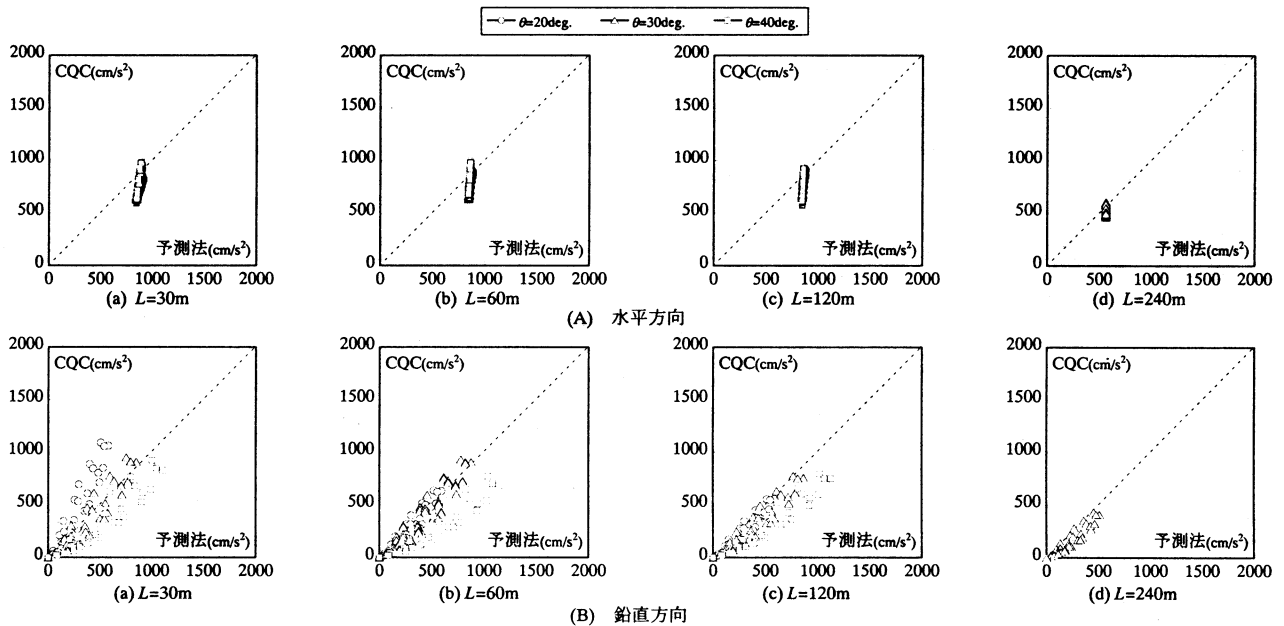


図16 応答予測法の精度

ただし、 $u=2R\alpha \sin(\theta/4)$ である。これより、水平入力に対する曲げ変形モードの有効質量 M_{R1} が得られる。全有効質量 M_R から M_{R1} を除いた有効質量 M_{R2} の応答は、軸変形(地動)モードにより与えられると考える。ここで、文献14)を参考に、アーチ各節点の応答加速度 a_R を、曲げ変形モードの応答と軸変形(地動)モードの応答をSRSSで合成することにより、次式で評価する。

$$a_R = [a_{1x}, a_{1y}, a_{2x}, a_{2y}, a_{3x}, a_{3y}]^T$$

$$= \sqrt{(S_{Ap}\beta_{R1}u)^2 + \left(S_{Ag}I_x \cdot \frac{M_{R2}}{M_R}\right)^2} \quad (10)$$

ただし、 β_{R1} は曲げ変形モードの刺激係数、 I_x は水平成分のみ1で他は0となるベクトルである。なお、式(10)の第1項は、曲げ変形モードの固有周期が図14の S_{Ap} の加速度一定領域に位置していることを前提とする。

次に、下部構造付きモデルを図18に示すような1質点系モデル、2質点系モデルに置き換える。図中の K_R は $K_R=M_{Req}(2\pi/T_R)^2$ とする。支持架構上部を地表に置き換え、式(10)の S_{Ap} を2質点系モデル上層の応答加速度 A_R 、 S_{Ag} を1質点系モデルの応答加速度 A_{eq} とし、これを A_{eq} で除すことにより応答増幅率が得られる。

$$\frac{a_R}{A_{eq}} = \sqrt{\left(\frac{A_R}{A_{eq}}\beta_{R1}u\right)^2 + \left(I_x \cdot \frac{M_{R2}}{M_R}\right)^2} \quad (11)$$

図19に、スパン60mのモデルに対して、式(11)によって算出された簡易モデルでの応答増幅率、予測法における応答増幅率および前報⁵⁾での解析結果を示す。なお、鉛直方向の応答増幅率に関しては、 $C_V \cdot \theta$ で除したものと除していないものの2つを示す。文献13)では、この簡易アーチモデルによる増幅率は、アーチモデルの応答を精度よく再現しており、円筒シェルやドームに関しては、高次モードの影響により、より R_T の小さい領域で増幅率が増加することが示されている。ここで鉛直応答増幅率において $C_V \cdot \theta$ で除した図19(B-1)および除していない図19(B-2)を見ると、 R_T の小さい領域では、半開角に比例関係で増幅していた F_{DV} の差が $R_T=1$ 付近では、殆ど無くなっていることが分かる。これは $R_T=1$ 付近の範囲で

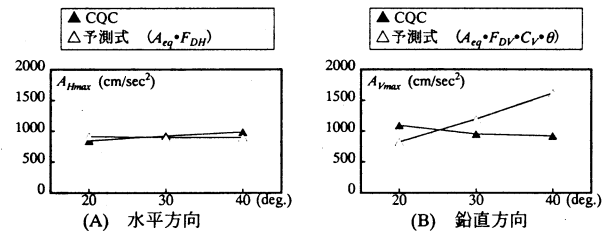


図17 予測法とCQC法による最大応答加速度(L=30m)

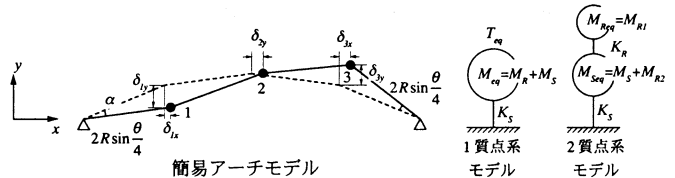


図18 簡易モデル

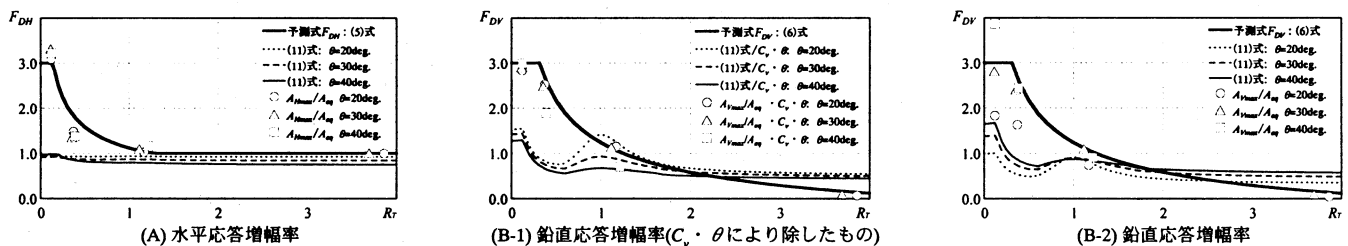


図19 下部構造付きモデルの応答増幅率(L=60m)

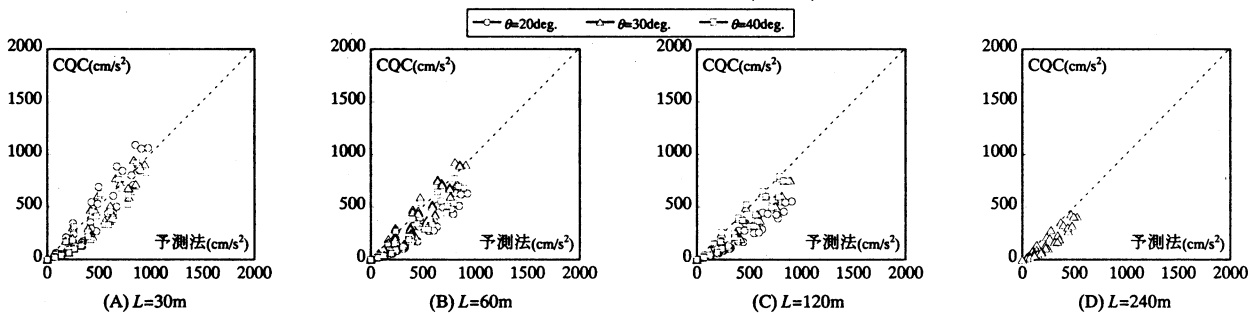


図20 応答予測法の精度(補正後)

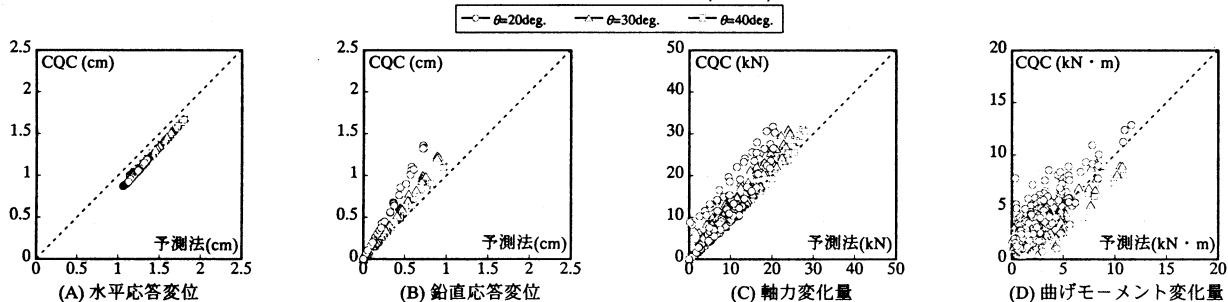


図21 最大応答加速度を静的地震荷重係数とした場合の精度(L=30m)

は、ドーム部の下部構造の共振により増幅率が決定されており、この場合には半開角による最大鉛直応答の差は小さくなることを示している。すなわち、 F_{DV} に対する半開角 θ の影響は単純な比例関係 $C_V \cdot \theta$ ではなく、 R_T および θ の関数 $C_V(R_T, \theta)$ の形になっていると考えられる。今回検討したドームは概ね R_T が1付近に分布していることから、この $C_V(R_T, \theta)$ の変化の影響を強く受けたものと考えられる。図20に $C_V(R_T \approx 1, \theta) = 1.0$ (一定)としての補正を行った予測法の精度を示す。これらを図16と比較すると、すべてのモデルで精度が向上していることが分かる。さらに、予測法により得られる応答加速度を静的地震荷重係数として与えた場合の精度を図21に示す。これらは概ね良い対応を示している。ここではスパン30mのモデルの結果のみを示しているが、他のスパンのモデルでも同等の精度を示している。

以上より、既往の予測式はスパンが変化した場合においても適用可能であることが示された。しかしながら F_{DV} に対する半開角 θ の影響は R_T により変化し、特に $R_T=1$ 付近では大きな影響が生じるため、これらを捕捉する $C_V(R_T, \theta)$ 関数の設定が今後の課題となる。

6. 結

本検討では、下部構造に支持されたスパン60mの中規模ラチスドームを対象とし、前報⁵⁾で提案された、応答増幅率を用いた応答予測法を、詳細な二層モデルと等価な単層モデルに適用し比較することで検証を行い、更にデプスの薄いドームに予測法を使用して応答予測法の適用可能な限界を調べ、最後にスパンを30m～240mの範囲で変化させ、予測法の適用範囲の検証を行った。その結果、以下の点が明らかになった。

- 1) 本検討で使用した面外剛性を100倍にした単層モデルは、詳細な二層モデルと同等の自由振動特性を示す。ただし、同じ固有モードでもせん断変形や質量分布の差により、二層モデルの方が単層モデルより固有周期が2%程度長くなる傾向が見られた。
- 2) 二層モデルにおいても応答予測法で算出した最大応答加速度とCQC法の結果は概ね良い対応を示す。ただし、両モデル間の局部的な部材応力間の相互性の精度は必ずしも良くないため、提案予測法による静的地震荷重を適用する場合、部材設計にはより詳細なモデルを使用することが望ましい。
- 3) ドーム部面外剛性倍率を小さくして単層モデルのデプスを薄くしていくと、逆対称モード以外のモードが卓越するようになることから、応答予測法はCQC法結果より大きな値を示し、非常に安全側の値を示す。一方、デプスの薄いモデルにおいて、応答予測

法で用いる T_D を逆対称1波モードの固有周期ではなく、単層モデルで最も卓越するモードに等しい屋根モデルでの固有周期に置き換えて補正すると、応答予測法の精度は向上する。

- 4) ドームの面外剛性が大きく、規模が異なるモデルに対しては、ドームのスパンによらず中規模のモデルの場合と同様の自由振動特性および地震応答性状を示し、既往の予測式を適用させることが可能である。ただし、周期比が1付近では共振の影響により、鉛直応答加速度に関する予測式の精度が若干低下する。これは、 $C_V \cdot \theta$ が R_T の関数になっている事に起因し、適切な補正を行うことにより予測式の精度は向上する。

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物に対する検討, 日本建築学会構造系論文集, 第561号, pp.153-160, 2002.11
- 3) 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-2つのモードが支配型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) 小河利行, 中川美香, 熊谷知彦: 応答スペクトル解析法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
- 5) 竹内 徹, 小河利行, 中川美香, 熊谷知彦: 応答スペクトル法による中規模単層ラチスドームの地震応答評価, 日本建築学会構造系論文集, 第579号, pp.71-78, 2004.5
- 6) 竹内 徹, 小河利行, 中間明子, 熊谷知彦: 弾塑性架構で支持されたラチスドームの地震応答評価, 日本建築学会構造系論文集, 第596号, pp.49-56, 2005.10
- 7) 坂 壽二: 二層立体トラス平板の耐力の連続体解析に関する研究, 大阪市立大学博士論文, 1988.12
- 8) 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
- 9) 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1, pp.743-744, 1994.9
- 10) 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
- 11) 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
- 12) 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
- 13) 竹内 徹, 小河利行, 山形智香, 熊谷知彦: 支持架構付き屋根型円筒ラチスシェルの地震応答評価, 日本建築学会構造系論文集, 第596号, pp.57-64, 2005.10
- 14) A.K.Gupta: Response Spectrum Method, CRC Press, 1992