

単層ラチスドームの静的および動的応答における弾塑性挙動の比較考察

COMPARISON STUDY OF ELASTO PRASTIC BEHAVIOR ON STATIC AND DYNAMIC RESPONSES FOR SINGLE LAYER LATTICED DOME

建築構造学分野 松井知也

Structural engineering Tomoya MATSUI

本研究では、単層ラチスドームを対象に、静的鉛直荷重を受ける場合と地震波を入力した場合を比較し、二つの関係を明らかにする。その際、構造物に蓄えられる歪エネルギー速度換算値及び、エネルギースペクトルと速度応答スペクトルの差に注目し、時刻歴応答解析を必要としない終局地震動レベル推定法の提案を試みる。

In this paper, as for Single Layer Latticed Dome, the relation between static load carrying capacities under vertical load and ultimate seismic resistance capacities are investigated numerically. We focus on the equivalent velocity of strain energy of structures and the difference Energy spectrum and Velocity response spectrum. In additional we reveal the relation between the max input acceleration and the max response equivalent velocity of strain energy. Finally, the estimation method without time history analysis is suggested.

1. 序

我が国は世界でも有数の地震国であり、地震災害時には、一時避難場所や災害対策拠点として大空間の確保が必要となる。したがって、空間構造物の耐震性能を十分に確保・把握することが建築計画および防災計画において非常に重要となる。

地震時の構造物の応答評価には、エネルギーの釣合いに基づいた手法が提案されてきた。早くは、Housnerが提案した Limit Design が挙げられる¹⁾。その後、秋山によってエネルギーの釣り合いに基づいてラーメン構造の耐震性能評価式が提案されている²⁾。また、多田らは高層建物上に設置された二層立体ラチス平板を対象として、静的弾塑性挙動より定まる内部吸収エネルギーを定義し、その最大値が動的崩壊の尺度となりうることを示している³⁾。

本研究は、単層ラチスドームを対象に、静的鉛直および水平荷重を受ける場合と地震波を入力した場合を比較し、終局耐震性能と静的耐荷性能との関係を明らかにし、時刻歴応答解析を必要としない、速度応答スペクトルを用いた簡便な終局地震動レベル推定法を導くことを目的とする。

2. 数値解析モデル

本研究で取り扱う解析モデルを Fig.1 に示す。単層ラチスドームは短期許容応力度設計し、部材断面を統一した部材半開角 $\varphi = 2^\circ \ 3^\circ \ 4^\circ$ の3種類を扱う。また、接合部の強度と剛性は十分にあるものとし、部材間の接合はすべて剛接合とする。また、構造物の重量は、静的安全率 $\nu=2,3,4$ となるように固定荷重を設定し、節点集中型として扱う。

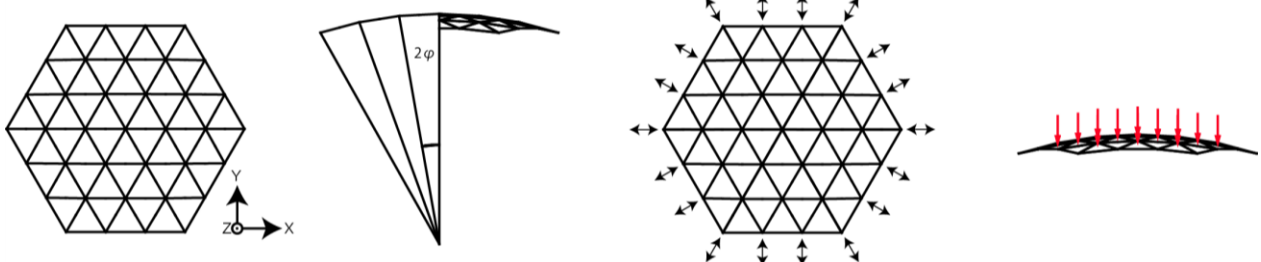


Fig.1 数値解析モデル

3. 静的弾塑性解析

本解析モデルを対象に、塑性ヒンジ法による幾何学的非線形弾塑性解析を行い、静的耐荷性能を把握する。ここでは、Fig.1 に示したように鉛直下向きの等分布荷重を用いて Push-Over 解析を行う。

静的解析において、Eqn.(2)のようなエネルギーの釣合いが成り立つ。

$$E^e - E^G = E^F \quad (2)$$

ここで、 E^e は歪エネルギー、 E^G は自重と鉛直方向変位によってなされるポテンシャルエネルギー、 E^F は外力によって入力されるエネルギーである。また、歪エネルギー E^e は、弾性歪エネルギー W_e と塑性変形による消費エネルギー W_p の和($W_e + W_p$)とする。各モデルの質量の影響をなくすために各種エネルギーを Eqn.(3)により等価速度に換算する。

$$V^E = \sqrt{2E^e/M}, V^G = \sqrt{2E^G/M}, V^F = \sqrt{2E^F/M} \quad (3)$$

M はモデル総質量であり、 V^E 、 V^F 、 V^G をそれぞれ歪エネルギー、静的吸収エネルギー、ポテンシャルエネルギーと呼ぶ。弾性限界耐力時、限界耐力時の時の歪エネルギー速度換算値をそれぞれ ${}_sV_{LE}^E$ および ${}_sV_{GY}^E$ と呼ぶ。ここで、限界耐力とは荷重変形関係より得られた耐荷力であり、塑性変形性能倍率 α を用いて Fig.3 のように定義される。

数値解析で得られた荷重変形関係($\nu=2$)及び各種エネルギーと変位の関係を Fig.2 に示す。Fig.1 に示した中央部節点のZ方向変位である。したがって、構造物に入力されるエネルギーは荷重分布には関係なく、降伏過程や変形モードによって決まるということが確認された。各限界状態時における歪エネルギー速度換算値および ${}_sW_p/({}_sW_e+{}_sW_p)$ を Table 1 にまとめる。

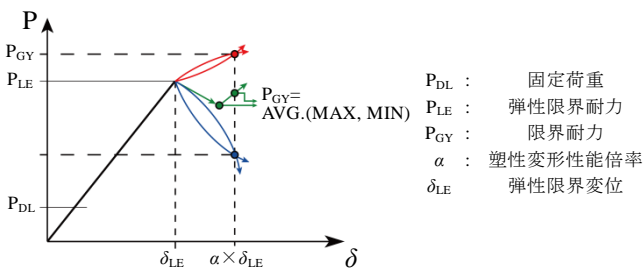


Fig.2 限界耐力の定義

Table 1 静的弾塑性解析結果

Model	${}_sV_{LE}^E$ (cm/sec)	${}_sV_{GY}^E$	${}_sW_p/({}_sW_e+{}_sW_p)$	
			$\alpha=3.0$	$\alpha=6.0$
2° (2)	82	194	0.63	0.79
2° (3)	98	231	0.63	0.79
2° (4)	116	273	0.63	0.79
3° (2)	75	177	0.69	0.86
3° (3)	92	217	0.69	0.86
3° (4)	106	249	0.69	0.86
4° (2)	70	115	0.72	0.95
4° (3)	88	141	0.72	0.95
4° (4)	97	163	0.72	0.95

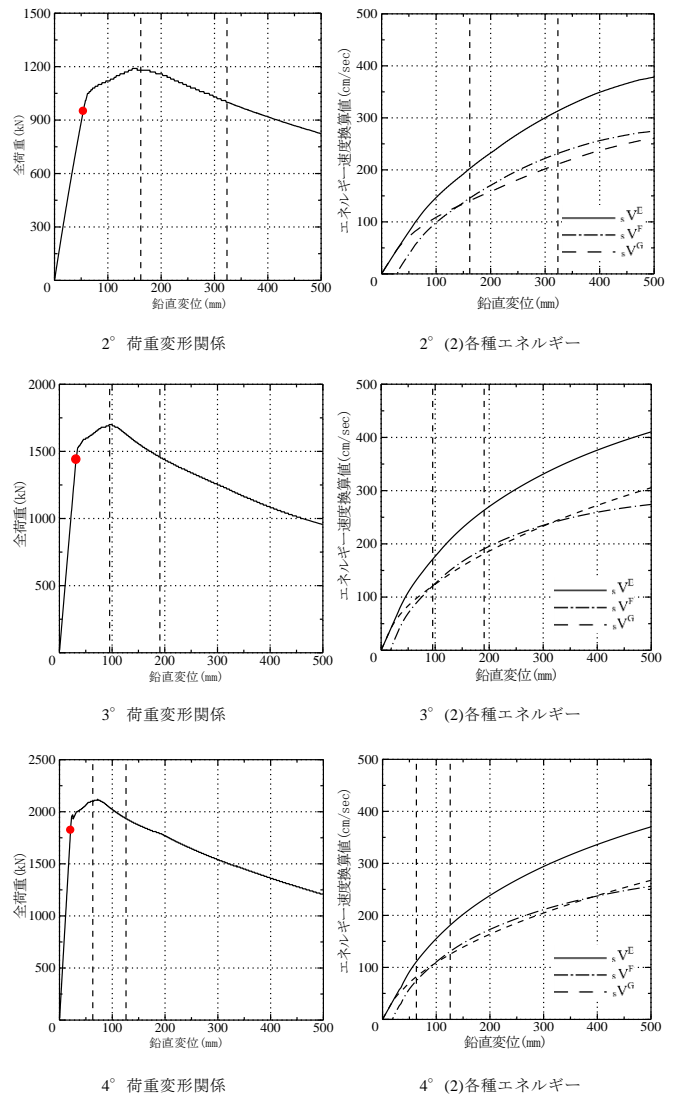


Fig.3 荷重変形関係及び各種エネルギー

4. 固有振動性状

本解析モデルの固有振動性状を把握するため、非減衰振動解析を行い、有効質量分布および固有周期を算出する。3° の解析結果及びモード形状の Z 方向並びに X 方向の上位 3 位をそれぞれ Table 2, Fig.4 に示す。モード形状はモードベクトルを 150 倍にして表している。Z 方向の卓越するモードの順位は部材半開角による影響は見られなかった。また、全てのモデルで、X、Z 方向ともに、上位 3 位までの累積有効質量比は 90% 以上である。

Table 2 固有周期と有効質量比

モード次数	固有周期(sec)			有効質量比(%)	
	静的安全率 ν			X 方向	Z 方向
	2	3	4		
1	0.235	0.192	0.166		78.46 1
6	0.191	0.155	0.135		19.26 2
15	0.134	0.109	0.094		1.78 3
20	0.057	0.047	0.040	26.45 2	
21	0.057	0.047	0.040	64.64 1	
28	0.024	0.019	0.017	4.80 3	

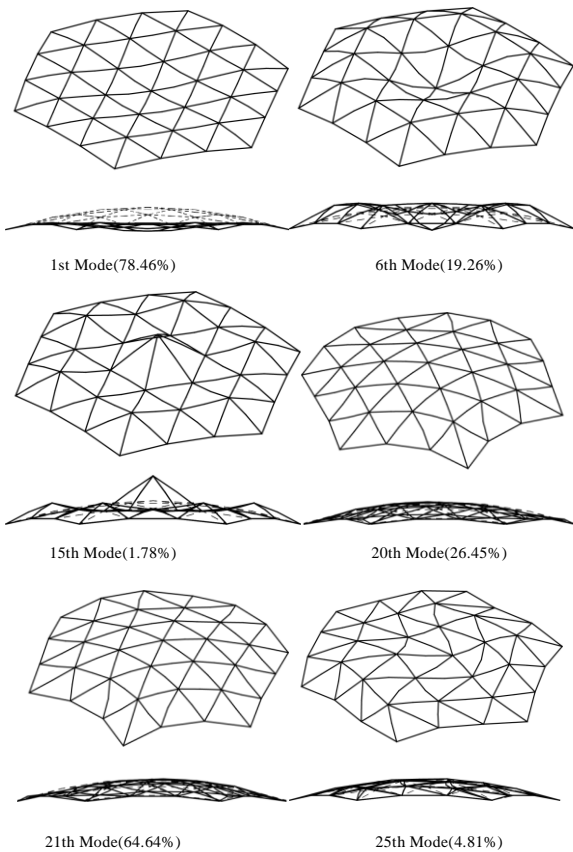


Fig.4 モード形状

5. 時刻歴応答解析

上下地震動に対する応答性状を把握するため、幾何学的非線形性を考慮した弾塑性時刻歴応答解析を行った。使用する地震波は、人工地震波である日本建築センター模擬地震波 BCJ-L2 及び、観測地震波である EL_CENTRO, HACHINOHE, TAFT とする。入力する地震波には BCJ-L2 は 0 秒から 30 秒までの 30 秒間の加速度波形データ EL_CENTRO, HACHINOHE, TAFT ではそれぞれ 0 秒から 15 秒, 10 秒から 20 秒, 0 秒から 15 秒を用いる。まず、地震波の最大入力加速度を 10gal に設定し、時刻歴応答解析を行う。次に、地震波の最大入力加速度を漸増させながら時刻歴応答解析を繰り返し、最初に部材の一部に塑性ヒンジが形成される際の最大入力加速度を初期降伏加速度 A_{LE} とする。さらに最大入力加速度を漸増させながら時刻歴応答解析を繰り返し、静的解析時に定めた限界変形と最も近い変形を生じた時の加速度を限界耐力加速度 A_{GY} 、変形が急激に進行し鉛直 500mm を超えた時の加速度を動的崩壊加速度 A_f とする。

解析により得られた最大入力加速度と最大応答変位の関係を Fig.5 に示す。各限界状態における最大入力加速度と最大応答歪エネルギー速度換算値を Table 3 に示す。初期降伏加速度入力時の最大応答歪エネルギー V_{LE}^E と静的解析での弾性限界時の歪エネルギー sV_{LE}^E の比率 V_{LE}^E / sV_{LE}^E は、Z 方向では平均 1.01、標準

偏差 0.17 となり、弾性範囲内ではほぼ同じ挙動をしていると言える。

Table 3 時刻歴応答解析結果(BCJ-L2)

Model	A_{LE}	V_{LE}^E	A_{GY} V_{GY}^E		A_{GY} V_{GY}^E		A_f	V_f^E
			$\alpha=3.0$		$\alpha=6.0$			
2° (2)	320	96.4	900	359	1500	640	1600	728
2° (3)	960	126.1	2500	745	3200	1288	3500	1399
2° (4)	1300	153.8	2700	820	4200	1547	7000	2789
3° (2)	320	73.2	640	178	1000	394	1300	706
3° (3)	600	93.5	1400	327	2400	837	2700	1106
3° (4)	1080	102.8	2200	280	3200	905	4100	1508
4° (2)	400	65.3	640	112	1000	286	1300	686
4° (3)	1000	94.9	1600	196	2200	604	2600	974
4° (4)	1460	91.3	2800	338	4000	917	4400	1396

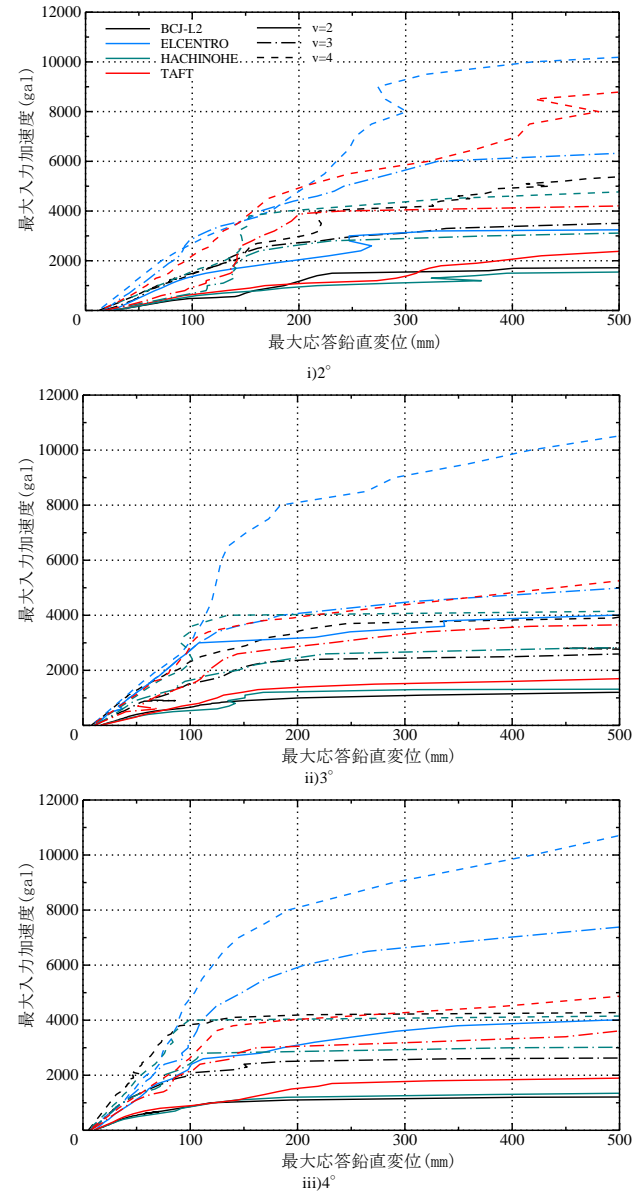


Fig.5 時刻歴応答解析結果

弾性限界時と限界耐力時の歪エネルギー速度換算値の比率の関係を Fig.6 に示す。ここで、横軸は静的解析結果 sV_{GY}^E / sV_{LE}^E 、縦軸は動的解析結果 V_{GY}^E / V_{LE}^E である。同図によると、静的解析よりも動的解析の方が大きくなっているケースが見られる。これは、圧縮降伏部材の繰り返しの塑性曲げ変形による消費エネルギーのためであると考えられる。

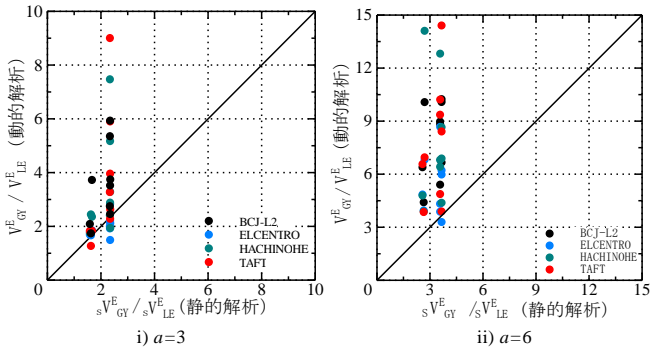


Fig.6 静的解析と動的解析の比較

6. 終局地震動レベルの推定

6.1 初期降伏加速度の推定

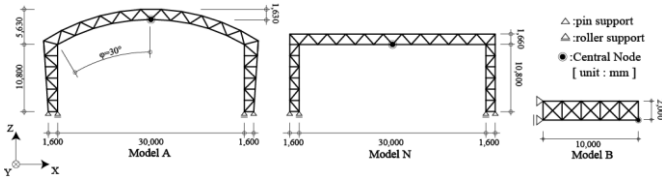


Fig.7 平面ラチス構造

本章では取り扱うモデル数を増やし, Fig.7 に示す平面ラチス構造⁴⁾も一部取り扱う.

ここでは, 速度応答スペクトルを用いて初期降伏加速度を推定する Eqn.(4).

$$A_{LE}^* = A_0 \times [{}_s V_{LE}^E / S_V(T_i)] \quad (4)$$

ここで, A_{LE}^* は初期降伏加速度推定値, A_0 は入力地震波の基準最大入力加速度, ${}_s V_{LE}^E$ は静的解析によって得られた弾性限界時の歪エネルギー, $S_V(T_i)$ は構造物固有周期に対応した入力地震波(基準最大入力加速度)の速度応答スペクトルの値である. 平均が 1.26 標準偏差が 0.30 とある程度の精度が確認できる.

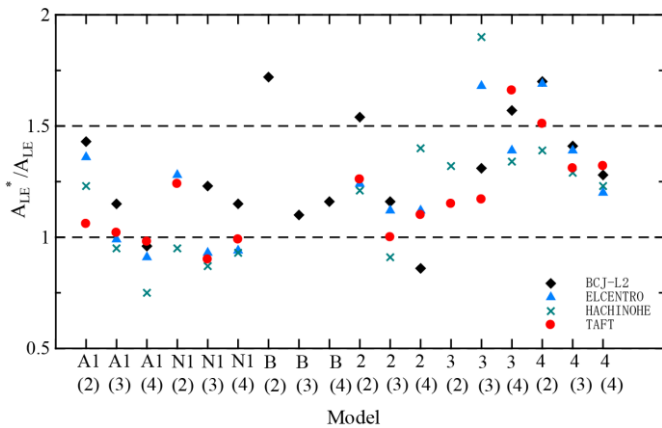


Fig.8 初期降伏加速度の推定精度

6.2 限界耐力加速度の推定_(1)

ここでは, 初期降伏加速度推定値 A_{LE}^* , ${}_s V_{GY}^E / V_{LE}^E$ を用いた外挿法による限界耐力加速度の推定法を示し, Eqn.(5)による推定結果を Fig.8 に示す. 推定値と解析により得られた限界耐力加速度の比率 A_{GY}^* / A_{GY} は $a=3$ については精度よくなく, 推定値の 2 割程度の最大入力加速度で限界変形に到達している場合もある. また,

$a=6$ については, 推定値の 3 倍以上の耐震性能を持つモデルもあれば, 1 割程度の耐震性能しか持たないモデルもあった.

$$A_{GY}^* = A_{LE}^* \times ({}_s V_{GY}^E / V_{LE}^E) \quad (5)$$

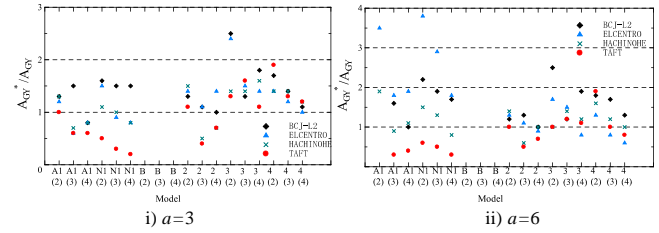


Fig.9 限界耐力加速度の推定精度_(1)

6.3 限界耐力加速度の推定_(2)

次に推定精度向上のために, i) 最大入力加速度 A_{max} と最大応答歪エネルギー速度換算値 V_{max} の関係の非線形性, ii) 歪エネルギーの静的解析と動的解析の差と静的耐荷性能を関連づけることを試みる.

最大入力加速度 A_{max} と最大応答歪エネルギー速度換算値 V_{max} の関係は Fig.10 i) に示した一例のように弾性限界点を境に, 増加勾配が下がっている. 本研究では, 時刻歴応答解析で得られた結果から, Fig.8 ii) のようにバイリニアにモデル化する. 弾性範囲内の解析結果のみをサンプルに最小 2 乗法による直線近似をし, その勾配(k_e)を求める. その次に, 部材降伏を起こした解析結果のみをサンプルにし, 同様に直線近似を行いその勾配(k_p)を求める. この 2 つの勾配の比率 $q = k_p / k_e$ を構造物の終局地震動レベル低減係数 q と定義する.

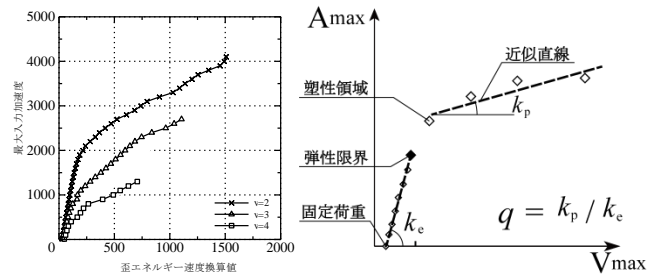


Fig.10 A_{max} と V_{max} の関係

この勾配の変化は歪エネルギーに占めるポテンシャルエネルギーの割合の増大によるものであると考えられる. そこで, 静的解析により得られた静的吸収エネルギーと変位の関係についても同様に近似直線の勾配を弾性範囲と塑性領域で求め, 勾配の比率 a_2/a_1 を静的

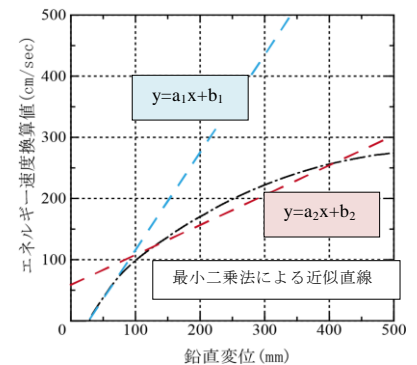


Fig.11 静的エネルギー低減係数

エネルギー低減係数 j と定義する(Fig.11). Fig.12 に終局地震動レベル q と静的エネルギー低減係数 j の関係を示す. 地震波ごとの結果を Table 4 にまとめる. 図中に示したように, 二つの低減係数 q と j の間には相関関係があると考えられ, モデルごとに分布が集中しており, なおかつ地震波ごとの変動がある.

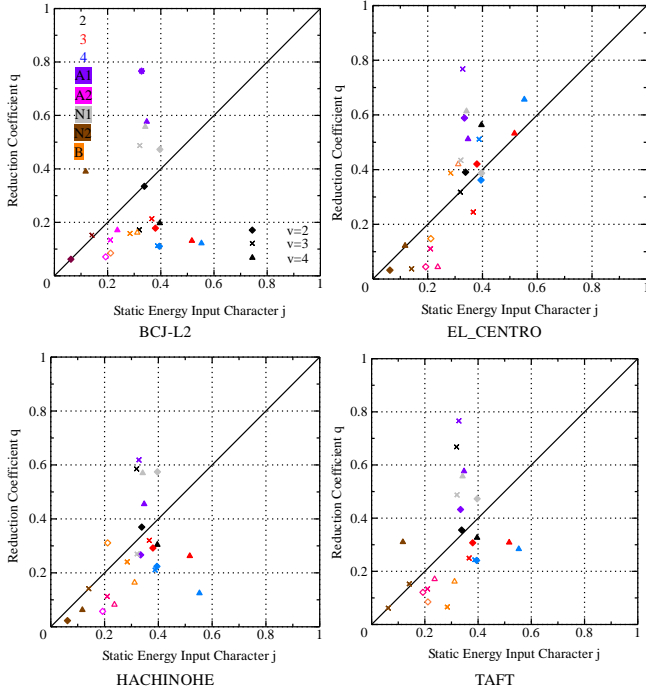


Fig.12 j と q の関係

Table 4 終局地震動レベル低減係数と静的エネルギー低減係数

Model(v)	静的エネルギー低減係数 j	終局地震動レベル低減係数 q					平均値	標準偏差
		BCJ-L2	EL_CENTRO	HACHINOHE	TAFT			
A1(2)	0.33	0.49	0.59	0.27	0.43	0.44	0.12	
A1(3)	0.33	0.33	0.77	0.62	0.77	0.62	0.18	
A1(4)	0.35	0.38	0.51	0.46	0.58	0.48	0.07	
A2(2)	0.19	0.36	0.04	0.06	0.12	0.15	0.13	
A2(3)	0.21	0.02	0.11	0.11	0.13	0.10	0.04	
A2(4)	0.24	0.08	0.04	0.08	0.17	0.10	0.05	
N1(2)	0.40	0.57	0.42	0.57	0.47	0.51	0.06	
N1(3)	0.32	0.30	0.43	0.27	0.49	0.37	0.09	
N1(4)	0.34	0.27	0.61	0.57	0.56	0.50	0.14	
N2(2)	0.06	0.01	0.03	0.02	0.06	0.03	0.02	
N2(3)	0.14	0.00	0.04	0.14	0.15	0.08	0.06	
N2(4)	0.12	0.17	0.12	0.06	0.31	0.17	0.09	
B(2)	0.21	0.34	0.15	0.31	0.08	0.22	0.11	
B(3)	0.28	0.11	0.39	0.24	0.07	0.20	0.13	
B(4)	0.31	0.16	0.42	0.16	0.16	0.23	0.11	
2 ^o (2)	0.34	0.33	0.39	0.37	0.36	0.36	0.02	
2 ^o (3)	0.32	0.17	0.32	0.59	0.67	0.44	0.20	
2 ^o (4)	0.40	0.20	0.56	0.30	0.33	0.35	0.13	
3 ^o (2)	0.38	0.18	0.42	0.29	0.31	0.30	0.08	
3 ^o (3)	0.37	0.21	0.24	0.32	0.25	0.26	0.04	
3 ^o (4)	0.52	0.13	0.53	0.26	0.31	0.31	0.15	
4 ^o (2)	0.39	0.11	0.36	0.22	0.24	0.23	0.09	
4 ^o (3)	0.39	0.11	0.51	0.21	0.24	0.27	0.15	
4 ^o (4)	0.55	0.12	0.66	0.12	0.28	0.30	0.22	

Fig.13 よりポテンシャルエネルギーと歪エネルギーの関係性を静的解析と動的解析と比較したものである. ここで地震波ごとによって歪エネルギーに差が生じており, 静解析より歪エネルギーが大きくなる傾向がある. 前者は構造物に入力される総エネルギーの差, 後者は先ほど述べた塑性曲げ変形による消費エネルギーによる差であると考えられる.

まず, 構造物に入力される総エネルギーの量に注目する. 地震動と構造物の応答を結びつける指標として, 速度応答スペクトル(S_v)とエネルギースペクトル(E_v)がある. エネルギースペクトルとは, 「地震動による構

造物への総エネルギー入力を速度換算したもの」である. 地震終了時に地震力がなくなった仕事速度換算値がその固有周期におけるエネルギースペクトル(E_v)となる. 波型解析によって得られた結果を Fig.14 示す. エネルギースペクトル, 速度応答スペクトルを求めるにあたって減衰定数は 10%としている.

この二つのスペクトルの差が最大応答時以外の時に入力されるエネルギーと疑似的に考えることができる. これらのスペクトルの関係によると, 相関があると考えられることができる.

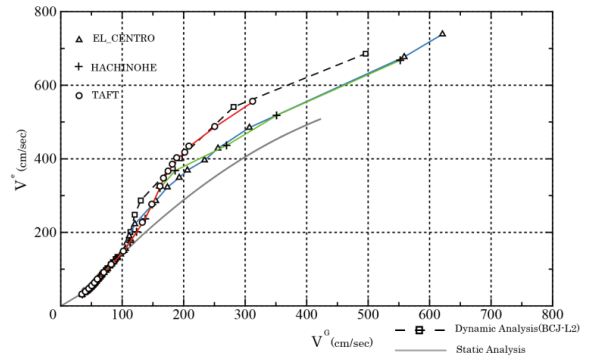


Fig.13 動的解析と静的解析のポテンシャルエネルギーと歪エネルギーの関係

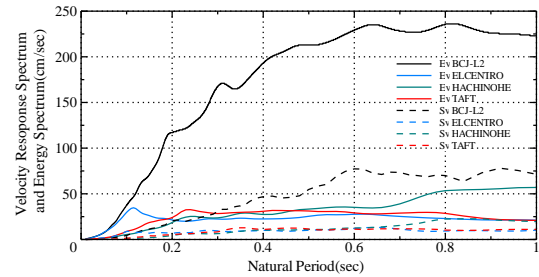


Fig.14 エネルギースペクトル(h=0.10)

速度応答スペクトル(S_v)とエネルギースペクトル(E_v)の比率と二つの低減係数 q と j の比率の関係を Fig.15, 16 に示す. 速度応答スペクトルとエネルギースペクトルの値は Z 方向で卓越する 1 次モードの固有周期の値を使っている.

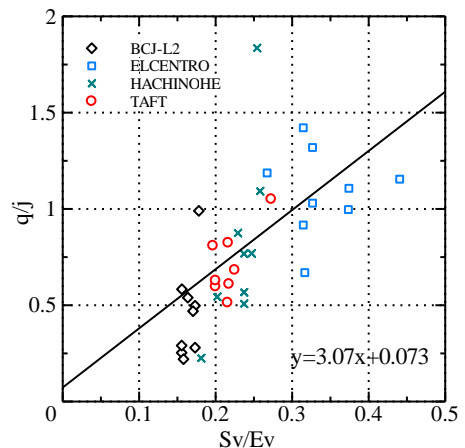


Fig.15 二つの低減係数とスペクトルの関係

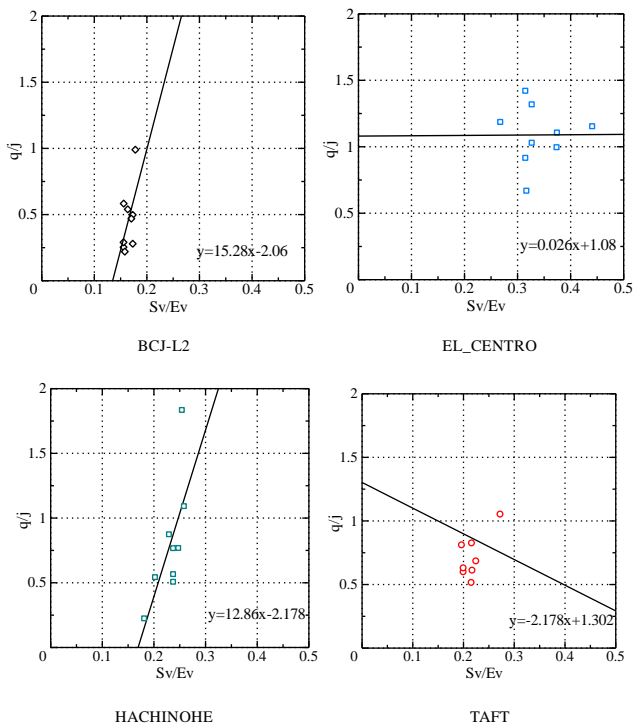


Fig.16 二つの低減係数とスペクトルの関係

Fig.15 を用いて終局地震動レベル低減係数を推定を行う。

本節で述べた限界耐力加速度推定法_(2)により単層ラチスドームのモデルのみ推定を行った。

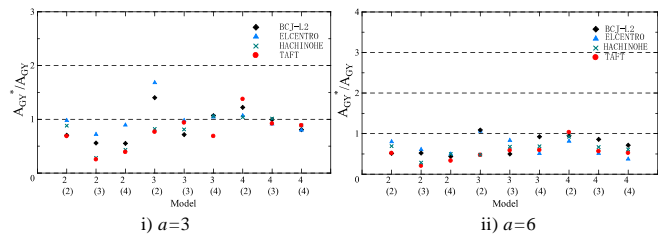


Fig.17 限界耐力加速度の推定精度_(2)

Fig.17 と Fig.9 を比較し推定の精度が向上され、地震波ごとのばらつきも少なくなったことが確認された。

7. 結論

本研究で得られた主な結論を以下にまとめる。

- 1) エネルギー入力勾配における弾性範囲と塑性領域の関係は、静的解析からエネルギースペクトルを考慮すれば動的解析を推定できる。
- 2) 速度応答スペクトル $S_V(T)$ とエネルギースペクトル $E_V(T)$ の比率を考慮することで、動的解析時の V_{GY}^E/V_{LE}^E の推定精度を向上させることができる。
- 3) その結果、静的弾塑性解析・固有値解析・入力地震波の速度応答スペクトル・エネルギースペクトルによる終局地震動レベルの推定法を提案し、そのフローチャートを Fig.18 に示す。
- 4) 本研究では、単層ラチスドームのみ場合の限界耐力加速度推定法_(2)の検討を行ったが、平面ラチス構造や立体構造物を対象とした場合の検討が必要である。

- 5) 本研究では、速度応答スペクトルとエネルギースペクトルの値はZ方向で卓越する1次モードの固有周期の値のみで検討しているため、複数のモードで検討する必要がある。
- 6) 複数の方向や X 方向から地震動が入力される場合や他の立体構造物を対象とした場合の動的挙動や静的耐荷性能との関係を明らかにする必要がある。

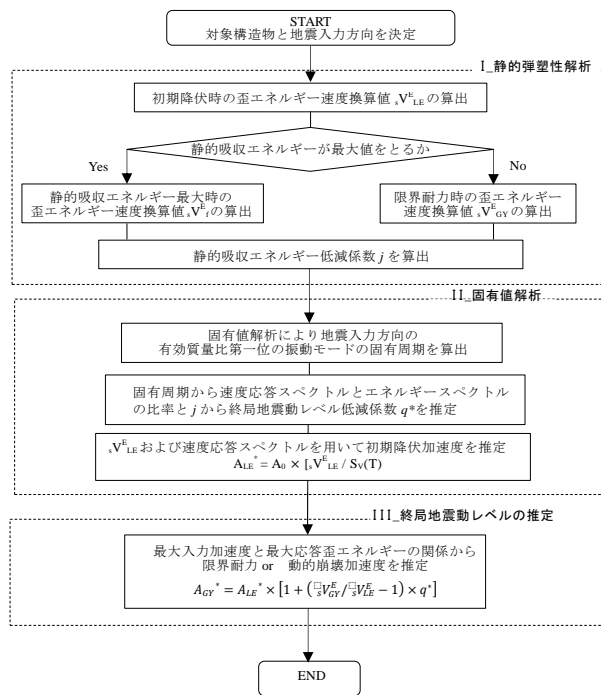


Fig.18 終局地震動レベル推定フローチャート

謝辞

数値解析プログラム(SPACE ver.3.75)では村田賢博士(名城大学)の多大なご支援を頂きました。ここに、謝意を示します。

[参考文献]

- 1) George W. Housner, Limit Design of Structures to Resist Earthquakes, Proceedings of the World Conference on Earthquake Engineering, Berkley, California, pp.5-1-5-13, 1956.
- 2) 秋山宏:「建築物の耐震極限設計」, 1987.
- 3) 多田元英, 米山隆也: 建築物の屋上に設置された2層立体トラスの鉛直地震応答性状, 日本建築学会構造系論文集 第452号 pp.77-86, 1993.10.
- 4) 徳田研多, 谷口与史也: 平面ラチス構造物の入力エネルギーと入力加速度に関する研究講演梗概集 2014(構造 I), 857-858, 2014-09-12

討議

討議[谷口 徹郎]

時刻歴応答解析から静的解析を評価するのか、最終的に静的解析を評価すればよいのか。

回答

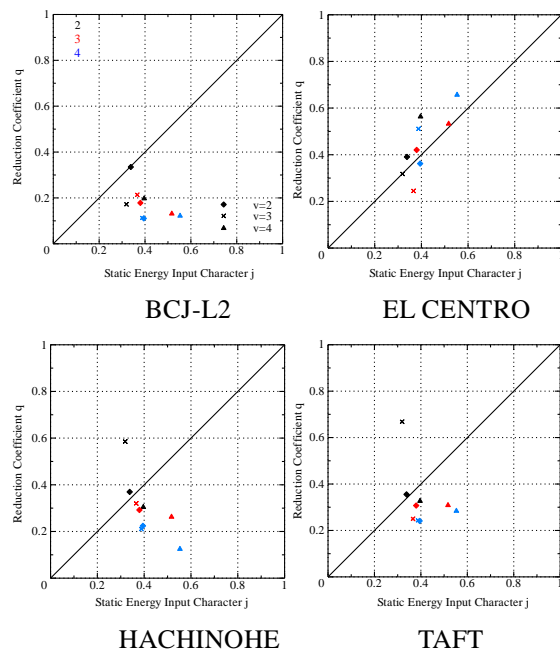
本研究では静的解析から動的解析を推定、評価を目的として行っています。動的解析での塑性域の挙動を静的解析による評価をするので、最終的には静解析で評価します。

討議[谷口 与史也]

終局地震動レベル低減係数と静的吸収エネルギー低減係数の関連について。

回答

終局地震動レベル低減係数は、動的解析による弾性域と塑性域の挙動を関連付ける指標であり、静的吸収エネルギー低減係数は、静的解析による弾性域と塑性域の挙動を関連付ける指標であります。この二つの相関性があります。



上図によって単層ラチスドームは地震波ごとによって分布が変わることが確認でき、仮説として「エネルギー入力の差が影響している」と考えています。

討議[鬼頭 宏明]

時刻歴応答解析の入力方向および、TAFTなどの最大加速度はどのように設定しているか。

回答

入力方向はすべてZ方向のみで解析しています。最大入力加速度を漸増させながら解析をしています。

討議[吉中 進]

上昇量はダンパーによって小さくすることができるのではないか。

回答

動解析と静解析の差の最大の原因は繰り返しの塑性曲げによる履歴消費エネルギーと考えられるため、有効な手段であると思います。

討議[山田 卓]

単層ラチスドームを選んだ理由は。

回答

本研究は空間構造の終局耐震性能と静的耐荷性能との関係を明らかにするための一部であり、更なるケーススタディが必要であります。本研究で得られた結果はエネルギースペクトルを考慮することで終局地震動レベル低減係数を推定できることです。