偏平ドーム状空間骨組構造物の動的崩壊挙動と 吸収エネルギーに関する考察

ON THE RELATION BETWEEN ABSORBED ENERGY AND DYNAMIC COLLAPSE OF A SINGLE-LAYER SHALLOW LATTICED DOME

喬 鋒*, 萩原伸幸**, 松井徹哉***

Feng QIAO, Nobuyuki HAGIWARA and Tetsuya MATSUI

The collapse characteristics of a single-layer shallow latticed dome under vertical dynamic excitation is investigated from the point of view of the absorbed energy. Both static and dynamic analyses are performed taking into account the geometrical and material nonlinearities. By comparing the collapse characteristics under the dynamic excitation and the static distributed loads which are proportional to vibration modes, it is shown that the absorbed energies at the collapse state under both static and dynamic excitations are limited, and that the maximum absorbed energies are different with different vibration modes. This latter is a particular characteristic for the latticed dome which is distinguished from that for the plate-type space frame.

Keywords : single-layer latticed dome, vibration mode, earthquake response, dynamic collapse, absorbed energy, mode extraction

単層ラチスドーム, 振動モード, 地震応答, 動的崩壊, 吸収エネルギー, モード抽出

1. 序

空間構造物の動的挙動や耐震性能に関する研究が近年盛んに行われるようになってきており^{1)~9)}, その応答性状が明らかにされつつある。特に, 空間構造物の場合は, 構造の形態や形式が多様であることに加えて, 固有振動数が接近して存在すること, 低次振動モードが必ずしも大きな刺激関数を与えるとは限らないこと, 上下振動の影響が相対的に重要になることなど, 特有の振動性状を示すことから, 地震力を層せん断力に置換する通常の建築構造骨組用耐震設計法を単純に適用することには困難があると考えられる。現状では, 線形振動解析や, 何らかの工学的判断に基づいて静的置換された地震荷重を用いて耐震設計が行われることが多く, 大空間構造に対する合理的な静的地震荷重の算定手法は未だ確立されていない。

空間構造物の耐震設計に用いる静的地震荷重分布は, その崩壊形状や弾塑性振動性状などを把握した上で, 検討される必要があると考えられる。空間構造物を対象とした動的な弾塑性崩壊性状に関しては, 加藤ら⁸⁾が崩壊加速度に注目し, 単層ラチスドームの耐震性を固定荷重に対する安全率との関係に基づいて整理しているほか, 多田ら⁹⁾が複層平

板立体トラスの崩壊時の吸収エネルギーに着目して, 動的崩壊挙動との関連について分析を行っている。多田らは, 固定荷重によるポテンシャルエネルギー以外に構造物が吸収しうるエネルギーを吸収エネルギーと定義し, これを動的崩壊の判定指標として用いることを提案している。さらに, 平板トラスの場合は, 静的漸増載荷時の最大吸収エネルギーが荷重分布形に鈍感であり, 動的崩壊時のその下限値を与えるとの結論を得て, 合理的な設計用地震荷重分布を設定する上で貴重な示唆を与えている。しかし, 平板立体トラスと違って, ドーム状の構造物の場合は励起される振動モードにより構造物の崩壊性状が異なり, 崩壊時の最大吸収エネルギーの値も異なってくると考えられる。さらに, 構造物が動的な外乱を受け塑性化すれば, 固有振動数や振動モードに変化が生じ, 初期の状態からは予期できないメカニズムによって崩壊に至ることも考えられる。よって, 平板立体トラスを対象として分析された知見が直接ドーム状の構造物にも適用できるか否かについて検討する必要があると考えられる。

このような観点から, 本論文では, 偏平ドーム状空間骨組構造物の力学特性を有する簡単な解析モデルに限定し, その動的崩壊挙動と吸収エ

* 名古屋大学大学院工学研究科建築学専攻
大学院生・修士(工学)

** 大同工業大学建設工学科 講師・博士(工学)

*** 名古屋大学大学院工学研究科建築学専攻 教授・工博

Graduate Student, Dept. of Architecture, Nagoya Univ., M. Eng.

Assist. Prof., Dept. of Construction Eng., Daido Inst. of Technology, Dr. Eng.
Prof., Dept. of Architecture, Nagoya Univ., Dr. Eng.

エネルギーとの関連について考察する。特に励起される振動モードが構造物の崩壊性状と吸収エネルギーに及ぼす影響に着目し、静的荷重分布との関連性について分析することにより、平板立体トラスを対象として得られた知見が偏平ドームに対しても適用できるか否かを検討することを目的とする。

2. 解析モデルと解析方法

2.1. 解析モデル

解析モデルとして、図1に示すような偏平ラチスドームを採用する。このモデルは偏平ドーム状空間骨組構造物の力学特性を有するモデルとしてしばしば採用されるピン接合ドーム¹⁰⁾の接合条件と部材断面に一部修正を加えたものである。ドームはすべて同一断面の鋼管部材($\phi 165.2 \times 5$)で構成されるものとする。節点における部材の接合を剛接合とし、境界条件は周辺ピン支持とする。固定荷重として図1に示すように各節点に $P = 5tf$ の集中荷重を与え、動的解析モデルとして各節点に固定荷重相当の集中質量を配している。簡単のため、減衰定数は0とする。

図-1: 解析モデル

図-2: 部材モデル

部材モデルは、図2に示すように、部材端および中央に配置された3つの弾塑性性体梁要素とそれらを繋ぐ2つの弾性性体梁要素により構成される¹¹⁾。要素座標系として、材軸方向に x 、断面の主軸方向に y 、 z ととり、 x 、 y 、 z 方向の変位成分をそれぞれ u_x 、 u_y 、 u_z とする。さらに、梁の断面において、材軸位置を原点とする極座標 (r, θ) を定義する。幾何学的非線形性を考慮するため、要素内の軸方向歪 ε およびねじり歪 γ を次式で表す。

$$\varepsilon = \frac{du_x}{dx} - \frac{du_y^2}{dx^2} r \sin \theta - \frac{du_z^2}{dx^2} r \cos \theta + \frac{1}{2} \left(\frac{du_y}{dx} \right)^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{du_z}{dx} \right)^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{du_x}{dx} - \frac{du_y^2}{dx^2} r \sin \theta - \frac{du_z^2}{dx^2} r \cos \theta \right)^2 \quad (1)$$

$$\gamma = r \frac{d\phi}{dx}$$

梁要素の変位関数として、軸方向変位 u_x に関して一次、回転変位 ϕ に関して一次、たわみ方向変位 u_y 、 u_z に関して三次の多項式を採用する。数値積分には、弾性要素については軸方向5点、周方向8点の Gauss 求積分を使用し、弾塑性要素については軸方向は弾性要素と同様

で、周方向においては、断面を均等に8分割したセグメントを用いて算定する。応力-歪関係には完全弾塑性型（初期剛性 $2100t/cm^2$ 、降伏応力度 $2.4t/cm^2$ ）を用いる。

2.2. 時刻歴応答解析

時刻歴応答解析には、材料および幾何学的非線形性を考慮するために Newmark β 法 ($\beta=1/4$) の増分変位表現による定式化を用いる¹¹⁾。各増分ステップの残差荷重については、その増分区間内で Newton-Raphson 法により0に収斂させる。固定荷重が初期剛性に及ぼす影響を考慮するために、まず固定荷重に対する静的解析を行ない、この状態に対して動的荷重を作用させ、応答解析を開始する。

2.3. 吸収エネルギーの定式化

構造物における系のポテンシャルエネルギーは、系の内部にある運動エネルギー (E^I)、減衰による散逸エネルギー (E^D)、構造物の内部エネルギー (E^e) と動的外乱あるいは静的外乱によって入力されるエネルギー (E^F)、固定荷重によるポテンシャルエネルギー (E^G) に分類できる。ここで、 $E^e - E^G$ は固定荷重によるポテンシャルエネルギー以外に構造物が吸収するエネルギーを表し、多田ら⁹⁾はこれを吸収エネルギーと定義している。本研究では、静的解析および時刻歴応答解析により得られたデータからその構造物の吸収エネルギーを算定する。

静的漸増荷重時および動的外乱時における骨組構造物の釣合式は、減衰がない時、式(2)、(3)で表される。

$$M_{ij} g_j - Q_i + F_i = 0 \quad (2)$$

$$M_{ij} (\ddot{x}_j + \ddot{y}_j) + Q_i = M_{ij} g_j \quad (3)$$

ここに、 M_{ij} : 質量マトリクス、 g_j : 重力加速度ベクトル、 $\ddot{x}_j$: 質点の相対加速度ベクトル、 $\ddot{y}_j$: 入力加速度ベクトル、 Q_i : 復元力ベクトル、 F_i : 固定荷重を除いた荷重ベクトルである。式(2)、(3)の両辺に変位 $dx_i = \dot{x}_i dt$ を掛け積分し整理すると、式(4)、(5)を得る。

$$\int_0^d Q_i dx_i - \int_0^d M_{ij} g_j dx_i = \int_0^d F_i dx_i \quad (4)$$

$$\int_0^t Q_i \dot{x}_i dt - \int_0^t M_{ij} g_j \dot{x}_i dt = - \int_0^t M_{ij} \ddot{y}_j \dot{x}_i dt - \int_0^t M_{ij} \ddot{x}_j \dot{x}_i dt \quad (5)$$

式(4)、(5)は静的漸増荷重時および動的外乱時のエネルギーの釣合を与える。両式の左辺は、構造物の内部エネルギー E^e から固定荷重のポテンシャル E^G を差し引いたものとその時刻歴過程を表しており、多田ら⁹⁾により提案された吸収エネルギーに一致する。本論においては、静的解析については式(4)右辺で、動的解析については式(5)右辺でラチスドームの吸収エネルギーを算定している。

2.4. モード抽出

本研究では、滝澤¹²⁾によって提案された手法により、時刻歴応答解析によって得られた変位応答データからその構造物の振動モードを算定する。これによって塑性化に伴う構造物の動的特性と変形状の変化

が詳細に把握される。これはあるベクトル時系列 $\{f(t)\}$ に対して

$$\{f(t)\} \simeq \{X\}\xi(t) \quad (6)$$

となるようなモード形 $\{X\} = \{u_x, u_y, u_z\}^T$ を見出すために、次式

$$E = \int_{t_0}^{t_1} [\{f(t)\} - \{X\}\xi(t)]^T [A] [\{f(t)\} - \{X\}\xi(t)] dt \quad (7)$$

を最小化にするものである。ここに、 $[A]$ は重みを与える正値対称行列であり、本解析においては質量マトリクスを用いている。

3. 解析例

本稿で扱うようなライズが低いドームに対しては水平動より上下動の影響が大きいと考え、上下方向の入力に対する崩壊性状に限りて検討する。ここでは軸対称上下振動のみを扱うものとし、対称性を考慮して図1の斜線部に示される1/6の領域について解析を行う。ただし、水平あるいは上下地震動によって大規模ドームの一部が面外方向に振動し局部崩壊するような場合には、ここでの検討で得られた知見が適用できると考えられる。

3.1. 自由振動解析

まず、固定荷重の影響を考慮した自由振動解析を行い、ドームの振動特性を把握した。なお、この解析に限り、ドーム全体を解析領域とした。表1はドームの1次～7次の固有円振動数と質量マトリクスに關しての正規化されたモードに対する刺激係数を示し、図3は上下(Z)方向刺激係数の大きい2モードのモード形を示している。以後、固有3次モードを上下1次モード、固有7次モードを上下2次モードと呼ぶことにする。固有振動モードは図3に示したように、上下1次モードは中央節点のみが大きく揺れ、上下2次モードは周辺節点が大きく振幅を持つモードとなっている。1次モードと2次モードを比べると、2次モードの方が刺激係数が大きくて、励起されやすいと考えられる。

表1: 固有円振動数および刺激係数

次数	固有円振動数 rad/sec	刺激係数		
		X	Y	Z
1次	23.13	0.000	-0.382	0.000
2次	23.13	-0.382	0.000	0.000
3次	23.29	0.000	0.000	0.426
4次	23.38	0.000	0.000	0.000
5次	23.41	0.000	0.000	0.000
6次	23.41	0.000	0.000	0.000
7次	29.13	0.000	0.000	-1.837

図3: 固有モード

3.2. 静的解析

3.2.1 等分布荷重による解析

図4は等分布鉛直荷重に対する静的解析によるドームの荷重一変位曲線を示している。横軸は各節点の鉛直変位で、縦軸 λ は固定

荷重に対する分布荷重の倍率である。図4に示したように、本モデルは座屈後急激な耐力低下を起こすことが特徴として挙げられる。図5に式(4)に基づいて求めた吸収エネルギーを示す。横軸は頂点の鉛直変位である。吸収エネルギーは変位の増加とともに上昇し、最大値に至った後、変形の進行に伴い減少する。図5中の最大値 ($E_{\max}=0.502\text{tf}\cdot\text{m}$) が静的荷重時に自重によるポテンシャルエネルギー以外にドームが吸収し得る最大エネルギーとなる。

図4: 荷重変位曲線 (等分布荷重)

図5: 静的吸収エネルギー

図6、図7は等分布荷重時の変形状を示している。図6に示したように、周辺節点と支持点を繋ぐ部材に最初塑性化が発生し、それらの部材の塑性化の進展に伴いドーム全体の変形が進み、図7に示すように周辺節点が落ち込む上下2次モードに類似の変形状態で崩壊に至っている。

図6: 塑性化発生時の変形状

図7: 崩壊時の変形状

3.2.2 モード比例型分布荷重による解析

本節では、上下自由振動モードに比例して荷重分布を設定し、等分布荷重時と最大吸収エネルギーを比較する。ここで、モードに比例する荷重ベクトル $\{F_i\}$ はモードベクトル $\{u_i\}$ に比例し、かつ全荷重 $\sum\{F_i\}$ が全固定荷重 $\sum\{P_i\}$ を一致するように算定される。図8はこのようにして算定された上下1次モードおよび2次モードに比例する荷重分布を表している。

図8: モード比例型分布荷重

図9、10にモード比例型分布荷重による解析結果を示す。ここでは、自重レベルまで等分布荷重を載荷した後、各モードに比例する分布荷重を与え、等分布荷重の場合と同様に構造物の吸収エネルギーを計算している。等分布荷重の場合と同じように、吸収エネルギーが変位の増加とともに上昇し、最大レベルを越えると変形の進行に伴い減少する。

荷重変位曲線

吸収エネルギー

塑性化発生時の変形性状

崩壊時の変形性状

図-9: 上下1次モード比例型分布荷重に対する応答

荷重変位曲線

吸収エネルギー

塑性化発生時の変形性状

崩壊時の変形性状

図-10: 上下2次モード比例型分布荷重に対する応答

上下1次モード比例型荷重分布の場合、吸収エネルギーの最大値が等分布荷重の場合の52.4%($E_{\max}=0.263\text{tf}\cdot\text{m}$)で構造物が崩壊した。上下2次モード比例型荷重分布の場合は等分布荷重の場合より少々高い値($E_{\max}=0.516\text{tf}\cdot\text{m}$)で崩壊した。崩壊時の変形性状を比較すると、上下1次モード比例型荷重の場合は中央節点と周辺節点を繋ぐ部材に最初塑性化が発生し、それらの部材の塑性化に伴い周辺節点付近に塑性ヒンジを生じ崩壊に至るのに対し、上下2次モード比例型荷重の場合は等分布荷重と類似な崩壊性状を示している。従って、ドーム状構造物の場合は、平板立体トラスとは異なり、崩壊時の変形性状によって吸収エネルギーの値が異なってくることが分かる。

3.3. 動的解析

本節では、ラチスドームの動的解析を行い、動的崩壊時の吸収エネルギーと静的崩壊時の吸収エネルギーを比較する。(ここでいう動的崩壊は変位がある限界点を越える発散する現象であり、厳密には動的不安定と呼ぶべきものである。) 入力外乱として正弦波、バンドリミテッドホワイトノイズおよび実地震波を与えた場合について考察する。それぞれの入力加速度波形とフーリエスペクトルを図11に示す。なお、正弦波については円振動数を20~32rad/sの範囲で変化させ、最大加速度aが0.2G、0.4G、1Gになるように正規化して用いた。バンドリミテッドホワイトノイズの場合は、バンド領域が0~25rad/s(上下1次固有振

動数付近) および20~35rad/s(上下1次および2次固有振動数が含まれる領域)の2種類を設定し、最大加速度aが0.2G、0.4G、1Gになるように正規化して用いた。実地震波については、1995年兵庫県南部地震の神戸海洋気象台における記録波の上下成分を採用し、最大加速度aが0.1G、0.2Gおよび実最大加速度になるように正規化して用いた。

正弦波入力時刻歴波形

時刻歴波形

フーリエスペクトル

$\omega=0\sim 25\text{rad/s}$

$\omega=20\sim 35\text{rad/s}$

バンドリミテッドホワイトノイズの入力波

時刻歴 フーリエスペクトル

実地震波入力波形 (Kobe UD)

図-11: 入力加速度波形

3.3.1 正弦波による解析

図12、図15に上下1次および2次固有振動数に近い振動数の正弦波による変位応答を示し、図13、図16にそれぞれの時刻歴吸収エネルギーを示す。図に示したように、 $\omega=21\text{rad/s}$ の正弦波加振では低レベル入力($a=0.2\text{G}$ 、 0.4G)に対して部材の塑性化が生じず、高レベル入力($a=1.0\text{G}$)に対して振幅が増大し一気に崩壊まで至っている。崩壊時の吸収エネルギー($E_{\max}=0.998\text{tf}\cdot\text{m}$)が静的解析によって得られた吸収エネルギーの最大値($E_{\max}=0.263\text{tf}\cdot\text{m}$)に比べてかなり大きいことが分かる。 $\omega=28\text{rad/s}$ の正弦波加振では低レベル入力に対しても部材の塑性化が生じ、 $a=1.0\text{G}$ の時崩壊を生じている。吸収エネルギーの時刻歴を見ると、各入力レベルに対して、塑性化の発生時の値がほぼ同じであり、崩壊時の吸収エネルギー($E_{\max}=0.529\text{tf}\cdot\text{m}$)が静的解析の場合($E_{\max}=0.516\text{tf}\cdot\text{m}$)に近い結果となっている。

$\omega=21\text{rad/s}$ と $\omega=28\text{rad/s}$ の2種類の正弦波加振($a=1\text{G}$)による時刻歴変位応答波形の全継続時間を2秒間隔に分け、各区間の応答について振動モードの抽出を行った結果が図14、図17に示されている。抽出1次モードについては、 $\omega=21\text{rad/s}$ の正弦波加振の場合、最初弾性

図- 12: 時刻歴変位応答 (正弦波 $\omega=21\text{rad/s}$)

図- 15: 時刻歴変位応答 (正弦波 $\omega=28\text{rad/s}$)

図- 13: 時刻歴動的吸収エネルギー (正弦波 $\omega=21\text{rad/s}$)

図- 16: 時刻歴動的吸収エネルギー (正弦波 $\omega=28\text{rad/s}$)

図- 14: 振動モードの推移 (正弦波 $\omega=21\text{rad/s}$)

図- 17: 振動モードの推移 (正弦波 $\omega=28\text{rad/s}$)

1次モード成分が現れ(0~2s), 振動が大きくなると共に部材の塑性化により徐々に弾性2次モード成分が含まれるようになり(2~4s), さらに塑性化の進展と共に弾性2次モードが支配的になり(4~6s), 崩壊に至っている。ちなみに, 弾性1次モードと2次モードの寄与率は2~4sで1:0.6, 4~6sで1:2.9である。 $\omega=28\text{rad/s}$ の正弦波加振の場合は, 各時間区間において弾性1次モードと2次モードの寄与率は1:3前後であり, 振動モードの変化は現れない。一方, 抽出2次モードについては, いずれの時間帯においても弾性2次モードに類似した変形になっている。

以上の結果より, 振動モード形状が大きく変化せず崩壊に至る場合は, 塑性化の進展により振動モードが変化して崩壊に至る場合より吸収エネルギーが低く崩壊しやすいことが分かる。さらに, そのモード形状が静的な変形形状に類似する場合は, 動的吸収エネルギーは静的吸収エネルギーに近い値になり, 静的解析により動的崩壊を推定することが可能であると考えられる。

図18は, 正弦波の振動数に対する動的吸収エネルギーの関係を示したものである。図中の四角形の黒点が崩壊した場合を示している。振動数の領域は図に示すように大きく3区域に分けられる。第1は振動モードが変化する区域, 第2は振動モードが変化しない区域, 第3は自由振動モードが卓越する振動数域から外れ, 崩壊が生じなかった区域である。第1領域では, ラチスドームのように非線形性が強い構造物においては, 振幅の増大によりモードが変化し, 吸収エネルギーもそれに伴って増大すると考えられる。第2領域では, 振動モードは変化せず, 上下2次モードに類似した変形になっており, 崩壊時の動的吸収エネルギーは上下2次モード比例型荷重による静的吸収エネルギーに近い値になっている。

図-18: 正弦波による吸収エネルギー

図-19: 共振曲線 (中央節点)

比較のため, 定常振動解析に基づいて描かれた共振曲線¹¹⁾を図19に示す。図中の縦軸はライズ h で無次元化された中央節点の変位を, 横

軸は加振振動数 p と弾性1次固有振動数 ω の比を示している。図に示したように, 本解析モデルにおいては, 振動数領域が性質の異なる2つの共振領域すなわち固有振動数の低次側と高次側に分けられる。低次側を励起する振動数の正弦波を入力する場合は, 図中矢印1の経路により安定領域を越え変形が進み崩壊に至るが, 安定領域を越えるために多くのエネルギーを吸収すると考えられる。それに対して, 高次側に近い振動数の正弦波を入力すると, 図中矢印3の経路により共振領域の範囲内で変形が進み崩壊に至るため, 低次側と比べて崩壊時の吸収エネルギーが小さくなると推察される。さらに高振動数の場合は, 図中矢印4に示したように共振曲線と外れるため, 崩壊に至るにはかなり大きな入力加速度が必要となる。これらの傾向は図18に示す3つの領域と対応していることが分かる。

3.3.2 ホワイトノイズおよび実地震動による解析

図20, 21はバンドリミテッドホワイトノイズによる解析結果の一部を示している。 $\omega=0\sim 25\text{rad/s}$ のホワイトノイズ加振の場合は最大入力加速度が1.0Gになると崩壊し, この時の動的吸収エネルギーの最大値は0.469tf·mである。 $\omega=20\sim 35\text{rad/s}$ のホワイトノイズ加振の場合は最大入力加速度が0.2Gでも崩壊し, この時の動的吸収エネルギーの最大値は0.42tf·mである。振動モードについては, いずれも上下2次モードが支配的であり, 塑性化によるモードの変化は見られない。図22は実地震波(神戸海洋気象台記録波)による動的挙動を示している。ホワイトノイズの場合と同じように, 上下2次モードが支配的であり, 塑

時刻歴変位応答

動的吸収エネルギー

8~16(s)

動的モード性状

図-20: ホワイトノイズによる動的挙動 ($\omega=0\sim 25\text{rad/s}$, $a=1.0\text{G}$)

図- 21: ホワイトノイズによる動的挙動 ($\omega=25\text{--}35\text{rad/s}$, $a=0.2G$)

性化によるモードの変化は生じていない。この時の動的吸収エネルギーの最大値は $0.403\text{tf}\cdot\text{m}$ である。なお、El-Centro 1940 地震波による解析も行ったが、その地震波の卓越振動数域は今回の解析モデルの卓越振動数域を外れ、図 18 の第 3 域に入ったため、最大入力加速度 $3G$ でドームが崩壊し、その時の吸収エネルギーは $0.59\text{tf}\cdot\text{m}$ であった。

ホワイトノイズや実地震動の場合は、入力波形に多数の周波数成分が含まれるため、構造物の最も振動しやすい上下 2 次モード（刺激係数が大きいモード）が励起され、図 19 の矢印 2 の経路で高次側共振曲線の背骨曲線に沿いながら変形が進み、最も崩壊しやすいパターンで崩壊したと考えられる。そのため崩壊時の動的吸収エネルギーは上下 2 次モード比例型荷重による静的吸収エネルギーを下回る結果となったと推察される。

4. 結び

偏平ドーム状空間骨組構造物の力学特性を有する解析モデルについて、幾何学的非線形性及び材料的非線形性を考慮した静的および動的時刻歴応答解析を行い、構造物の弾塑性崩壊挙動について考察した。特に吸収エネルギーの観点から、構造物の崩壊性状の変形性状への依存性について分析し、ドーム状構造物と平板立体トラスの相違を明らかにした。ただし、ここでの検討は一つの特異な形状のドームに関するものであり、一般的な結論を得るには、今後形状や荷重条件、境界条件などが異なるドームについて多面的な検討が必要である。

本研究で得られた主な知見を以下に要約する。

図- 22: 実地震動による動的挙動 (Kobe UD)

1. ドーム状構造物の場合、平板立体トラスのように等分布荷重とモード比例型分布荷重による崩壊時の静的吸収エネルギーが必ずしも一致せず、崩壊時の変形性状により異なる。
2. 構造物の動的吸収エネルギーは、励起される振動モードにより異なる。崩壊時の吸収エネルギーは入力加速度の最大値のみならず、入力波形の周期特性とも関連がある。
3. 構造物の静的崩壊時および動的崩壊時の吸収エネルギーはともに有限値であり、変形性状が類似する場合は両者の吸収エネルギーの最大値は近い値となる。すなわち、振動モードが変化せず、静的な変形性状に類似の振動モードが励起される場合は、動的吸収エネルギーは静的吸収エネルギーに近い値になり、塑性化の進展により振動モードが変化すると、静的吸収エネルギーと大きく異なる。
4. 実地震波やホワイトノイズ波の場合は、構造物の最も振動しやすいモードが励起される。崩壊時の動的吸収エネルギーはモード比例型荷重による静的吸収エネルギーを下回っており、平板立体トラスのように静的吸収エネルギーが必ずしも動的吸収エネルギーの下限値を与えるとは限らない。

以上のように、ドーム状構造物の場合、崩壊時の動的吸収エネルギーが励起される振動モードによって異なり、モード比例型荷重による静的吸収エネルギーが必ずしもその下限値を与えるとは限らず、平板立体トラスに対して多田ら⁹⁾が得た結論はドーム状構造物には直接適用できないことが明らかとなった。今後、合理的な設計用地震荷重分布を

設定するためには、構造物の崩壊時の変形性状を把握することが重要であり、塑性化によるモード形の推移や非線形共振曲線との関連を分析する必要があると考える。

参考文献

- 1) 日本建築学会：シェル・単層ラチス構造の振動解析 一地震、風応答と動的安定一、丸善、1993
- 2) 国枝治郎：上下地震動を受ける球形ドームの応答解析、京都防災研究所年報、第 26 号、B-1, pp.1-11, 1983
- 3) 加藤史郎、石川浩一郎、横尾義貫：大スパントラス構造物の耐震性に関する研究、上下地震動を受ける平行弦トラスばりの耐震性について、日本建築学会構造系論文報告集、第 360 号、pp. 64-74, 1986
- 4) 加藤史郎、石川浩一郎、横尾義貫：上下地震動を受けるトラス平板の耐震性について、直交交差型トラス平板についての検討、日本建築学会構造系論文報告集、第 370 号、pp. 60-67, 1986
- 5) 和田章、向秀元：一方向大スパン複層円筒トラス構造物の地震応答解析、日本建築学会構造系論文報告集、第 413 号、pp. 87-95, 1990
- 6) 石川浩一郎、加藤史郎：上下地震動を受ける二層立体ラチスドームの耐震性に関する研究、日本建築学会構造系論文報告集、第 447 号、pp. 79-88, 1993
- 7) 加藤史郎、向山洋一、植木隆司：高ライズドームの地震応答性状、日本建築学会構造系論文報告集、第 442 号、pp. 101-109, 1992
- 8) 加藤史郎、庄村昌明、向山洋一：水平と鉛直地震動を受ける大スパン単層ラチスドームの応答性状と崩壊加速度に関する研究、日本建築学会構造系論文報告集、第 477 号、pp. 87-96, 1995
- 9) 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、日本建築学会構造系論文報告集、第 452 号、pp. 77-86, 1993
- 10) Hangai, Y. and Kawamata, S.: Perturbation Method in the Analysis of Geometrically Nonlinear and Stability Problems, *Advancement in Computational Mechanics in Structural Mechanics and Design*, pp.473-489, UAH press, 1972.
- 11) 萩原伸幸：材料および幾何学的非線形性を伴う構造物の定常解と動的非線形挙動に関する研究、名古屋大学学位論文、1998
- 12) 滝沢春男：梁崩壊型靱性架構の動的機構形成における定モード成分の抽出、構造工学論文集、Vol.36B, pp. 245-258, 1990

(1999年7月9日原稿受理、1999年12月20日採用決定)