

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 5 月 11 日現在

機関番号：12608

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2009～2011

課題番号：21760427

研究課題名（和文）耐震性の向上を目指した空間構造物の崩壊挙動予測および
応答低減手法の提案研究課題名（英文）Proposals for Prediction of Collapse Behavior and Response Reduction
Method of Spatial Structure which aim at Improvement of Seismic Performance

研究代表者

熊谷 知彦（KUMAGAI TOMOHIKO）

東京工業大学・大学院理工学研究科・助教

研究者番号：70376945

研究成果の概要（和文）：本研究は、地震または台風などの災害時に避難場所、防災拠点となるべき建築物である空間構造物の地震時における損傷、崩壊挙動の解明、予測手法の提案および応答制御法の提案を目的としている。まず、体育館等に使用されることの多い円筒ラチスシェルを対象とした振動台実験により動的崩壊挙動を分析した。次に、構造物が崩壊に至らないようにするためにエネルギー吸収機構による応答制御を試みた。最後に地震動を多方向から受ける場合の応答性状について振動台実験および数値解析によって分析した。

研究成果の概要（英文）：The purposes of this study are to investigate the dynamic collapse behavior subjected to earthquake motion and to propose the prediction method of collapse behavior and the response reduction method of spatial structure. First, the dynamic collapse behavior of cylindrical lattice shell roofs which are often used for the roof of gymnasiums is examined by shaking table tests. Next, the control of seismic responses by energy absorption device is attempted so that the structures do not collapsed. Lastly, the response behavior subjected to horizontal bi-directional earthquake motions are investigated by carrying out the shaking table tests and numerical analyses.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2010年度	700,000	210,000	910,000
2011年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	2,700,000	810,000	3,510,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：建築学，建築構造・材料

キーワード：空間構造物，動的崩壊挙動，応答低減手法，動的応答解析，振動台実験，レベル2地震動，1周期コサイン波，加速度応答倍率

1. 研究開始当初の背景

近年、イベントスペースやスポーツ施設として空間構造物が数多く建設されている。このことは同時に、地震または台風等による災

害時の避難場所、防災拠点の増加とも一致する。しかし、近年多発している大地震（1995年の阪神淡路大震災、2004年の新潟中越地震、2008年岩手・宮城内陸地震等）の際に

は、地震によって、防災拠点となるべき空間構造物においても屋根構造部材および下部構造部材の破断、座屈、天井材落下等の多くの被害が発生し、その耐震性の確保は重要な課題のひとつとなっている。しかしながら、地震時の損傷、崩壊挙動については解明されたとは言えない状況であり、さらに現行の設計規準では、ビルなどの重層構造物を対象とした水平荷重のみが規定されており、空間構造物特有の鉛直方向の振動を考慮した設計用地震荷重は規定されておらず、耐震設計手法は無いというのが現状である。

2. 研究の目的

研究の目的は、公共性が高く、地震または台風などの災害時に避難場所、防災拠点となるべき建築物である空間構造物の地震時における損傷、崩壊挙動の解明、予測手法の提案および応答制御法の提案である。具体的には、以下に示す項目に従い研究を遂行し、目的の達成を目指す。

(1) 現在まで行ってきた研究を更に発展させ、振動台実験によって空間構造物の崩壊実挙動を分析し、提案してきた崩壊挙動予測手法の妥当性の検証を行う。

(2) 崩壊に至らないようにするために、エネルギー吸収機構を付加することによって応答低減を試みる。

(3) 多方向から地震動を受ける場合の応答性状についても数値解析のみならず、振動実験によっても分析を行う。

3. 研究の方法

本研究は、以下に示す具体的方法に従って遂行され、目的の達成を目指す。

(1) 振動実験による空間構造物の崩壊実挙動の分析

体育館等の屋根に多く使用されている屋根型円筒ラチスシェルを対象として、レベル2を上回る地震動入力を受けた場合の崩壊実挙動について分析を行う。また、基本的な崩壊性状を分析するため、入力波として1周期コサイン波も用いる。実験結果より、応答加速度、崩壊に要する入力エネルギー等に着目した分析を行う。

(2) 数値解析によるエネルギー吸収機構を用いた空間構造物の応答低減効果

空間構造物が崩壊に至らないようにする手法として、エネルギー吸収機構による応答制御を試みる。エネルギー吸収機構には、パッシブ型の Tuned Mass Damper (TMD)を採用する。対象構造物は、基本的な空間構造物であるアーチ構造物とする。分析は非線形時刻歴応答解析プログラムを用いた数値解析結

果により行い、その応答低減効果に対するTMDの配置位置やパラメータ設定の影響も検討する。

(3) 振動台実験によるエネルギー吸収機構を用いた空間構造物の応答低減効果および応答低減手法の提案

実挙動におけるエネルギー吸収機構による応答低減効果について、レベル2地震入力に対する弾塑性範囲での振動台実験を行うことにより分析する。エネルギー吸収機構としては、粘性ダンパーを用いる。応答低減効果の評価としては、等価線形化手法を用いる。

(4) 多方向から地震動を受ける空間構造物の応答性状

上記では単一方向からのみの入力に対する地震時崩壊性状、応答性状について分析している。ここでは、多方向から地震動を受ける場合の応答性状について振動台実験および数値解析によって分析する。最終的に、多方向入力に対応した応答加速度評価手法を提案する。

4. 研究成果

本研究により、以下のような研究成果が得られた。

(1) 振動実験による空間構造物の崩壊実挙動の分析

屋根型円筒ラチスシェルを対象とした振動実験により、崩壊実挙動について分析を行った。

円筒ラチスシェルの実験モデルを写真1に示す。屋根構造は、アーチ方向スパン60cm、桁行方向スパン80cm、半開角30deg.である。

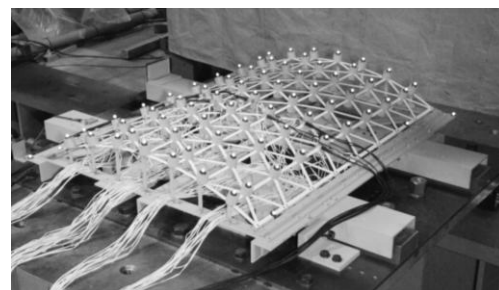


写真1 実験モデル（屋根型円筒ラチスシェル）

試験体は薄板を部材幅 $b=9\text{mm}$ の網目状に切り抜いた後、曲げ加工を施すことにより円筒状に成形して製作した。実験は屋根構造のみを対象とした。入力波は周期特性の明確な1周期コサイン波、観測地震波 JMA Kobe NS(1995) および El Centro NS(1940) である。载荷方法は、入力加速度の最大値を徐々に増加させ、繰り返し载荷する漸増载荷と、漸増载荷での最大加速度を有する入力波を一度载荷する単一载荷とした。屋根面の応答は加速度計、非接触画像処理変位計、ひずみゲージにより

計測した。

ここでは、円筒ラチスシェルの動的崩壊挙動を最大入力加速度と応答倍率の関係から分析した。その結果を図1に示す。1周期コサイン波入力における鉛直応答加速度倍率は、初期降伏を発生する入力加速度 A_y 付近までは増加するが、それ以上では減少する。また、水平方向では、鉛直方向に比べ変動は小さいが、徐々に減少し、その後は概ね一定となる傾向が見られる。一方、地震波入力では、地震波により異なるが、 A_y 以上の入力加速度に対しては、鉛直応答は減少し、水平応答では一定となる。なお、最大加速度入力時の漸増載荷と単一載荷を比較すると、応答変位と同様に応答の方向によらず概ね等しい値となる。また、ここには示していないが、崩壊に要する入力エネルギーについては、入力加速度が増加しても頭打ちとなることがわかった。

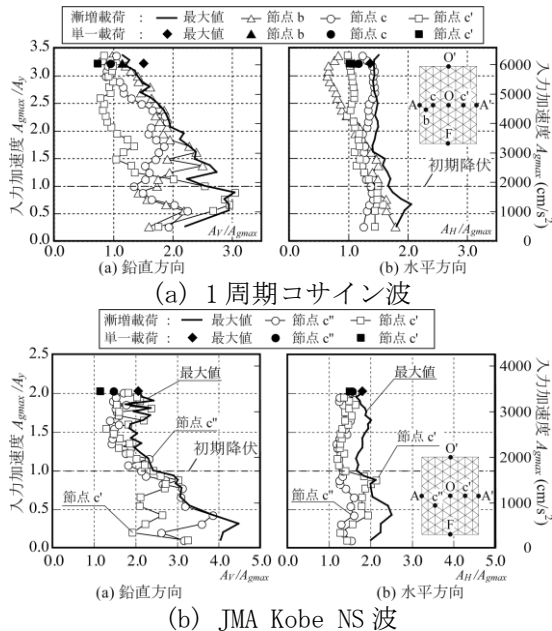


図1 入力加速度と最大応答加速度倍率の関係

(2) エネルギー吸収機構を用いた空間構造物の応答低減効果

次に、空間構造物が崩壊に至らないようにする手法として、エネルギー吸収機構による応答制御を試みた。ここでは、エネルギー吸収機構として、パッシブ型の Tuned Mass Damper (TMD) および粘性ダンパーを採用した。対象とした構造形式は、基本的な空間構造物であるアーチ構造物および(1)でも対象とした屋根型円筒ラチスシェルとした。

① TMD による応答低減効果の検討 (数値解析)

図2に示すアーチ構造物を対象として、TMDによる応答低減を試みた。アーチ構造物のスパンは40mであり、ライズスパン比は1/10とした。TMDは、変位への寄与の大きい1次モードに同調するように設計し、その設置数

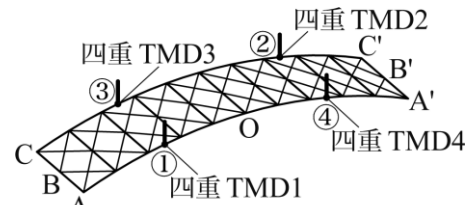


図2 解析モデル (アーチ構造物)

を1台、2台、4台の3種類とした。TMDの総質量は、アーチ質量の3%とした。設置位置は、1次モードの振動の腹とした。TMDの設計には定点理論または極値のばらつきおよび極大値を最小化する最適条件式を用いた。数値解析には幾何学的非線形性を考慮した時刻歴応答解析プログラムを用いた。

TMDによる応答低減効果の一例として地震波入力時における最大応答分布を図3に示す。どのTMDにおいても、TMDを設置することにより応答は低減している。また、①点に付加質量のみを与えた場合も応答は低減しているが、TMDを設置した場合と比較すると効果は小さい。他のTMDと比較すると、二重TMDにおける応答が大きくなっているものの、単一、二重、四重TMDには大きな差は見られない。このことより、全節点の応答をほぼ均等に低減でき、TMD1台当たりの質量が単一TMDの1/4であり設置点の負担質量の分散が可能な四重TMDがより実際的な設置方法であると言える。

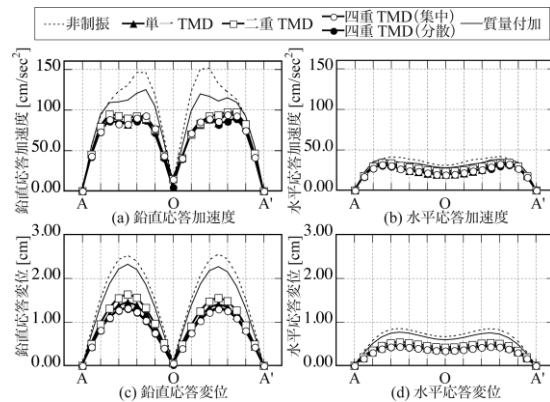


図3 最大応答絶対値分布 (BCJ-L1 入力)

② 粘性ダンパーによる応答低減効果および応答低減手法の提案 (振動台実験)

(1)で対象とした屋根型円筒ラチスシェルを対象として実挙動におけるエネルギー吸収機構による応答低減効果について検討した。ここでは、写真2に示すように(1)のラチスシェル屋根に下部構造を付加し、そこに粘性ダンパーを設置した。ダンパーとしては、付加減衰が20%程度になる粘性係数を有するダンパーを選定した。入力波はレベル2の観測地震波4波、人工地震波1波の計5波を用いた。応答の計測は(1)と同様である。

まず、粘性ダンパーを付加することによる地震応答の低減効果について検討した。シェ

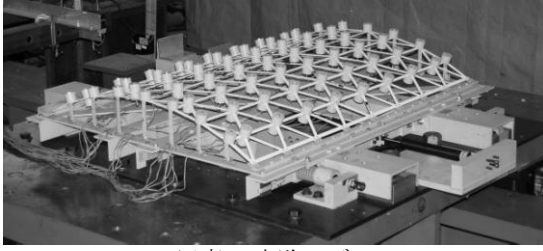


写真2 実験モデル

(ダンパーを付加した屋根型円筒ラチスシェル)

ルの妻面方向中央線上の最大応答加速度分布を示す。モデル名の-n はダンパー無しを、-d はダンパー有りを表す。また、 R_T の後ろの数字は下部構造と屋根構造の固有周期比に関する係数である。ダンパーを付加することで、鉛直方向、水平方向の応答共に、固有周期比 R_T に関わらず、ダンパーのないモデルに比べて応答加速度は約半分に低減されている。F- R_T -n モデルの鉛直応答加速度では R_T に関わらず頂点0に対して二山型の分布になっている。一方、F- R_T -d モデルの鉛直応答加速度では、 $R_T = 1, 1.2$ ではF- R_T -n モデル同様の二山型の分布であるが、励起されるモードが異なるため $R_T = 0.8$ では円弧頂点0で最大となっている。

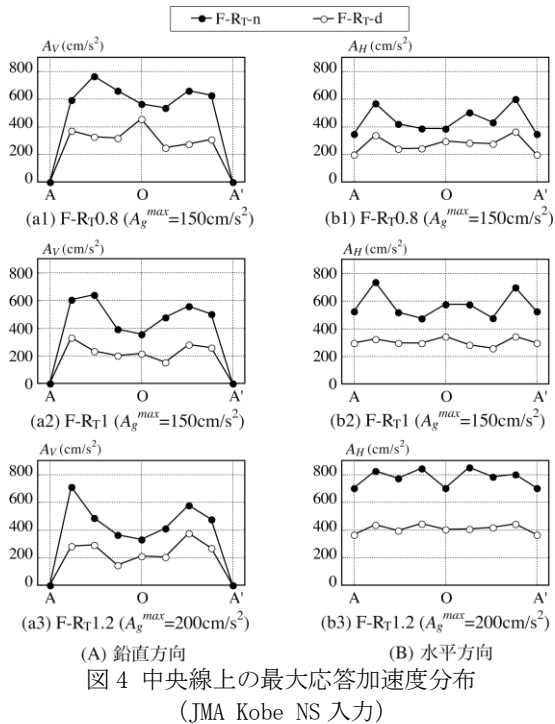


図4 中央線上の最大応答加速度分布 (JMA Kobe NS入力)

また、既往の研究で提案されている応答増幅率の評価式との対応について検討した。その結果、水平応答ではダンパーの減衰を考慮することで評価式と良い対応を示し、鉛直応答では、付加減衰の考慮の仕方を変更することで安全側に評価できることがわかった。

(3) 多方向から地震動を受ける空間構造物の応答性状

上記までは、単一方向からのみの入力に対する地震時崩壊性状、応答性状について分析した。ここでは、多方向から地震動を受ける場合の応答性状について振動台実験および数値解析によって分析した。

対象とする空間構造物は、写真3に示す単層ラチスドームである。スパンは160cm、半

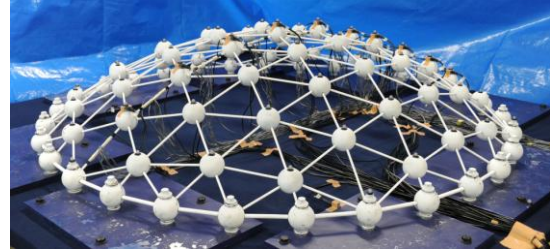


写真3 実験モデル (単層ラチスドーム)

開角は40°である。試験体はボールジョイントを用いた機構とし、ノードにφ63.5mmの鋼球を、部材にφ6.0mmの亚克力丸棒を用い、エポキシ樹脂系接着剤でそれらを接着し、製作した。境界条件は、球面座金を用いてピン支持とする。実験は屋根構造のみを対象とし、入力波により下部構造の応答を考慮した。入力方向は水平2方向とする。地震波はNS, EW間の位相差を変化させ、EWの時間軸を $-T_R/4 \sim +T_R/4$ (T_R はドームの固有周期) を進める。入力波は、正弦波および観測地震波JMA Kobe (1995) とした。屋根面の応答は3軸加速度計、非接触画像処理変位計、ひずみゲージにより計測した。

図5に R_T 1モデルにおける位相差 T_p が異なる場合の最大鉛直加速度応答倍率分布を示す。図中右上には各 T_p における入力加速度の軌跡を併せて示す。入力加速度の軌跡が円に近い $T_p = +T_R/8$ では、直線に近い $T_p = -T_R/8$ に比較し、多くの領域で大きな応答を生じる。このように、 T_p によって分布および最大応答を生じる節点は変化する。

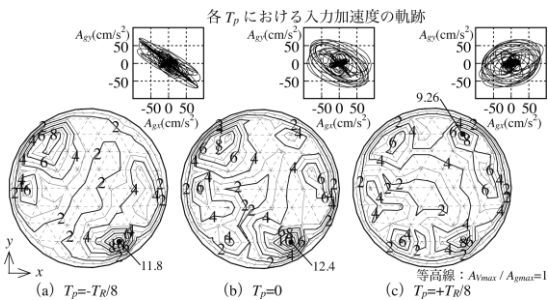


図5 T_p による最大鉛直加速度応答倍率分布の変化 (JMA Kobe)

また、固有モードを用いることによって多方向入力時の最大応答加速度を生じる瞬間の分布の評価を試みた。その結果、図6に示すように地震波の入力方向間の位相差を考

慮することで、下部構造と屋根構造が共振する R_7 モデルでは精度良く評価が可能であるが、複数のモードが励起される R_7 .2 モデルでは実験値が算定値より大きく評価された。

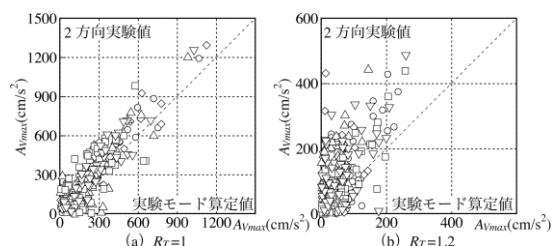


図6 固有モードより求めた2方向入力に対する応答加速度と2方向入力時の応答加速度の比較 (JMA Kobe)

(4) 成果によるインパクト、今後の課題

以上の研究成果により、現在まで数値解析でしか行われてこなかった実挙動における地震時崩壊性状が明らかにされた。この成果により、現在までの知見との実挙動との対応が明らかとなった。また、崩壊に至らないようにするための手法として、エネルギー吸収機構による応答低減効果についても、数値解析および振動台実験結果から明らかとなり、その有用性が示された。最後に、多方向地震動入力に対する応答性状についても分析し、その応答評価手法を提案するに至った。これらの研究成果が、空間構造物の振動特性を考慮した設計手法の確立の一助となり、今後の空間構造物の設計の自由度が広がることが期待され、更には大地震時においても防災拠点として健全に使用することのできる空間構造物の実現が可能となると考えられる。なお、より効果の大きい応答低減手法の提案および多方向入力時の弾塑性応答性状の解明は、次年度以降の課題とする。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計9件)

- ① 三松あずさ, 熊谷知彦, 小河利行, 富本淳, 複数のTMDを用いたアーチ構造物の振動制御, 構造工学論文集, 査読有り, Vol. 58B, 2012, pp. 489-495
- ② T. Kumagai, T. Takeuchi, T. Ogawa, Effect of Yielding of Roof Members on Seismic Responses of Lattice Dome, Proceedings of IABSE-IASS 2011, 査読有り, 2011, pp. 1-7 (CD-ROM)
- ③ T. Kumagai, F. Ushiwata, T. Takeuchi, T. Ogawa, Vibration Tests on Seismic Response Reduction of Cylindrical Lattice Shell Roof by Viscous Damper Added to Substructures, Proceedings

of IASS 2010, 査読有り, 2010, pp. 1-11 (CD-ROM)

- ④ T. Kumagai, T. Takeuchi, I. Suzuki, T. Ogawa, Dynamic Responses of Cylindrical Lattice Shell Roofs under Horizontal Earthquake Motions with Arbitrary Direction by Shaking Table Tests, Proceedings of IASS 2009, 査読有り, 2009, pp. 1-11 (CD-ROM), p. 130

〔学会発表〕(計18件)

- ① T. Kumagai, Dynamic Responses of Arch Structures with Plural TMDs, Joint Conference 9CUEE & 4ACEE, 2012年3月7日, 東京工業大学
- ② 三松あずさ, 複数のTMDを用いたアーチ構造物の振動制御, 2011年度日本建築学会大会(関東), 2011年8月23日, 早稲田大学
- ③ 熊谷知彦, 屋根架構の塑性化がラチスドームの地震応答に与える影響, 2010年度日本建築学会大会(北陸), 2010年9月9日, 富山大学
- ④ 小澤拓典, 漸増する水平振動を受ける屋根型円筒ラチスシェルの弾塑性応答実験 その1 実験概要、自由振動特性および1周期コサイン波を受ける場合の弾塑性応答性状, 2010年度日本建築学会大会(北陸), 2010年9月9日, 富山大学
- ⑤ 桑原諒子, 漸増する水平振動を受ける屋根型円筒ラチスシェルの弾塑性応答実験 その2 弾塑性地震応答性状, 2010年度日本建築学会大会(北陸), 2010年9月9日, 富山大学
- ⑥ T. Kumagai, Shaking Table Tests of Cylindrical Lattice Shell Roofs Supported by Substructure with Viscous Damper Subjected to Horizontal Earthquake Motions, Joint Conference 7CUEE & 5ICEE, 2010年3月5日, 東京工業大学
- ⑦ 瀬田紘子, 制振機構を有する屋根型円筒ラチスシェルの地震応答実験 その1 実験概要、自由振動特性および地震応答性状, 2009年度日本建築学会大会(東北), 2009年8月27日, 東北学院大学
- ⑧ 牛渡ふみ, 制振機構を有する屋根型円筒ラチスシェルの地震応答実験 その2 制振機構による地震応答の低減効果, 2009年度日本建築学会大会(東北), 2009年8月27日, 東北学院大学

6. 研究組織

(1) 研究代表者

熊谷 知彦 (KUMAGAI TOMOHIKO)

東京工業大学・大学院理工学研究科・助教

研究者番号: 70376945

(2)研究分担者
無し

(3)連携研究者
無し