

平成22年6月2日現在

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2007～2009

課題番号：19360247

研究課題名（和文） エネルギー吸収機構を用いた空間構造の包括的防災技術の確立

研究課題名（英文） Establishment of Comprehensive Disaster Prevention Technology using Energy Absorbing Devices for Spatial Structures

研究代表者

小河 利行（OGAWA TOSHIYUKI）

東京工業大学・大学院理工学研究科・教授

研究者番号：20126270

研究成果の概要（和文）：

本研究は、大地震及び強風時にも避難施設として使用可能な空間構造物の実現を目標として行われた。大地震時の構造物の挙動に関しては、数値解析及び振動台実験を行い、構造部材等の損傷メカニズムを明らかにするとともに、エネルギー吸収機構を用いた場合の設計法及び応答評価手法の提案を行った。強風時における挙動に関しては、流体解析及び風洞実験を行い、粘性抵抗を利用したエネルギー吸収機構による応答制御効果について分析した。さらに、最適化問題により強風中において変形が最小となる屋根面形状の提案も行った。

研究成果の概要（英文）：

This study was performed with the aim of realizing the spatial structures those are practicable as evacuation facilities in the case of large earthquake or typhoon. The numerical analyses and the shaking table tests were carried out for the behavior of structures at the large earthquake, and the damage mechanism of structural members etc. was clarified. In addition, the design method and the response evaluation method were proposed when the energy absorption device were utilized. As regards the behavior of structures at the strong wind, the fluid analyses and the wind tunnel tests were carried out. The response control effects by the energy absorption devices using the viscous resistance were examined from the analysis and experimental results. Additionally, the roof shape with minimum deformation in the strong wind was proposed by the optimization problem.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	3,000,000	900,000	3,900,000
2008年度	2,600,000	780,000	3,380,000
2009年度	2,000,000	600,000	2,600,000
年度			
年度			
総計	7,600,000	2,280,000	9,880,000

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：ラチスシェル，エネルギー吸収機構，大地震時応答，強風時応答，応答評価手法

1. 研究開始当初の背景

我が国を取り巻く自然災害条件は年々厳しさを増している。地震に関しては新潟中越地震に続き東海、中部、関東を震源とする大規模地震の発生が高い確率で予測され、長周期成分の影響など新たな構造物への影響が指摘されている。台風の規模も毎年拡大する傾向にあり、今までの想定を超えた強風が構造物に加わる可能性が高まっている。これらによる被害には構造物に生じる被害だけではなく、天井材、仕上げ材などの損傷も含まれる。例えば、2004年の新潟中越地震、2005年の宮城県沖地震では構造部の被害以外にも天井、照明などの大規模な崩落が生じ、災害時の避難施設として機能しなかった学校体育館・公共ホールが数多く見られた。また、2005年には台風に伴う膜構造屋根の被害や屋根仕上げの被害が相次ぎ、やはり避難施設としての機能を維持できない空間構造が多く見られた。これらの構造物は損傷により、災害時の人的被害およびライフラインへの甚大な影響が予測されるにも関わらず、形状が特殊であるために普遍的な外乱に対する応答性状の把握および損傷制御に有効な構法開発が遅れている。

また、2次部材の被害は空間構造物の振動応答と密接に関連しているため、両者を統合的に扱いながらその特性を把握し、対策を講じることが必須である。現在、学校体育館、公共ホールについては耐震補強などの対策が積極的に実行されつつあるが、強度的な補強は屋根各部の加速度応答を増幅させる危険性もあり、2次部材の被害を拡大させる恐れも指摘されている。これを防ぐためには、エネルギー吸収型の機構を駆使し、屋根構造地震の振動応答自身を低減させることが必要となる。

これらに関係する研究について以下のような現状である。まず、構造物に働く地震、強風の外乱レベルはわが国特有のものであり、海外で相応する研究は殆ど行われていない。特に、空間構造物では地震荷重がクリティカルになる場合と風荷重がクリティカルになる場合が交錯しているにも関わらず、研究者が耐震分野と耐風分野に分かれているため、わが国でも総合的評価があまり行われていないのが現状である。一方、エネルギー吸収機構を用いた振動制御手法は近年ビル構造物を主体に研究開発および実用化が進んでいるものの、空間構造物に関しては、その応答性状自体が整理されていないこともあって未だ一般化していない。さらに、強風に対する応答制御手法については研究が緒に

ついておらず、被害低減のために早急な対策が求められている。また、被害の多発している空間構造の2次部材については、その設計外力に関する研究がまだ殆ど行われていない状態である。

2. 研究の目的

本研究の目的は、災害時に避難施設となる体育館・公共ホールなどの空間構造物を対象とし、大地震および強風時における構造部材および2次部材の損傷メカニズムを明らかにし、大地震及び強風時にも避難施設として使用可能な空間構造物の実現することである。

具体的な目的を以下に示す。

大地震時の空間構造物の挙動に関しては、数値解析及び振動台実験を行い、その結果を分析することで、エネルギー吸収機構の有無が地震応答性状および損傷メカニズムに与える影響について明らかにする。さらにエネルギー吸収機構を用いた場合の設計法および応答評価手法の研究・開発を行い、実際の構造物に適用できる段階まで到達することを目標とする。

強風時の空間構造物の挙動に関しては、流体解析、流体解析及び風洞実験を行い、粘性抵抗を利用したエネルギー吸収機構による応答制御効果について分析する。さらに、流体問題に対して最適化手法の適用し、応答変位や応答軸力を最小化することで、応答制御手法の一つとして扱い、強風中における最適な屋根面形状の創生を試みる。

また、空間構造に付随する天井材、屋根材、膜材などの2次部材に対する設計用の外力を提案し、災害時の被害を最小限に留めるためのエンジニアリングを行う基盤を整える。

3. 研究の方法

本研究では、以下に示す方法に従い遂行し、目的を達成を目指す。

(1) 検討対象とする空間構造物の抽出・設定
災害時の避難所・防災拠点となる空間構造物のうち、大地震時、強風時に損傷が予想されるものの抽出を行う。また基本的な振動特性についても検証する。

(2) エネルギー吸収機構を用いた構法の設定
抽出・設定した空間構造物の大地震時の挙動を解析的に検証する。ここでは、使用頻度の高い形状に関する応答性状を分析し、簡便な応答評価手法の確立を目指す。具体的には下部構造物による増幅効果、構造物の崩壊パターンについての分析を行う。続いて、制振

部材を適用することによる損傷制御，応答制御設計の可能性を検討する。さらに，応答低減効果および簡便な応答低減効果の評価手法に関する検討・提案も行う。

(3) 振動台実験による地震応答制御効果の検証

上記において検討した支持構造付き空間構造物の架構模型を製作し，振動台実験による動的特性の把握を行う。架構模型は屋根構造のむくり及び支持構造剛性を変化させ，これらが応答性状に与える影響を検証する。続いて，支持構造にエネルギー吸収機構を設けた架構モデルを製作し，これらの機構が応答性状に与える影響を検証する。エネルギー吸収機構としては粘弾性系のダンパーを採用する。屋根各部で測定された加速度応答及び変位応答は，屋根架構に設置される天井・照明等の設計に用いるための基礎データとしても用いる。

(4) 数値解析及び風洞実験による強風時の応答制御効果の検証

ここでは，数値解析および風洞実験によって強風中における動的応答を分析し，粘性抵抗を利用したエネルギー吸収機構による応答制御効果を確認する。

数値解析には三次元流体解析を使用する。対象とする空間構造の強風中における応答制御効果を検討するとともに，流体問題に可変複合手法を適用した最適化問題として扱い，応答制御の一つとして応答変位最小化，応答軸力最小化等を目的関数に設定した場合の屋根面形状の形態創生も行う。

風洞実験では，強風中における応答を再現するため，剛モデルのみでなく，大きな変形を再現することの可能な模型を製作し，その製作方法を提案する。実験模型における応答制御機構のモデル化は，相似則により減衰定数等を算定し材料を選定することにより解決する。この風洞実験により実現象における応答制御効果を確認する。

(5) 2次部材の安全性確保のための評価手法の提案

以上の数値解析および構造実験より得られた知見を基に，2次部材の安全性を確保するための指標を提案する。地動→屋根応答→2次部材応答の評価手法を確立することにより，実際の設計において2次部材までの安全性の検定を行うことが可能となる。これにより，大地震時，強風時にも，構造体だけでなく2次部材も健全に保つことができ，避難拠点として機能する空間構造を実現することが可能となる。

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) 数値解析による大地震時の応答性状および応答低減機構の効果検証

ここでは，様々な形状の空間構造物を対象として地震時の応答性状の分析，応答低減機構による応答の低減効果について分析した上で，応答評価手法の提案を行った。

対象とした空間構造物の例を図1に示す。いずれの構造物も体育館規模であり，災害時に避難所として使用される可能性の高い建築物である。

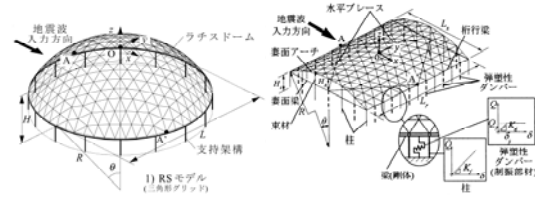


図1 対象とした空間構造物

応答性状の分析結果の一例を示す。図2に下部構造上部に免震支承を挿入した場合の応答加速度の低減効果を示す。方向によらず，応答が低減していることがわかる。ここには示していないが，図1右に示す構造物においても，下部構造に弾塑性ダンパーを付加することで鉛直・水平方向ともに応答の低減を図ることができた。

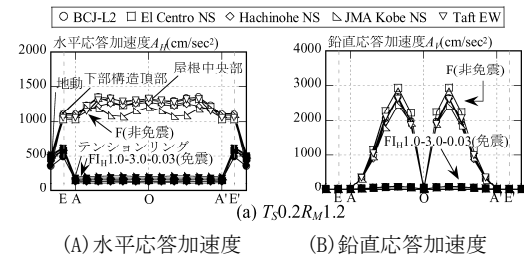


図2 免震支承挿入による応答加速度の低減効果

応答制御機構を付加した場合の応答評価手法は，現在までに提案してきた弾性応答に等価線形化法を適用すること，または免震層における等価固有周期を考慮することで提案を行った。提案の詳細については発表論文に譲るが，図3に示すように提案した応答評価手法により，良好な精度で評価可能であることを確認した。

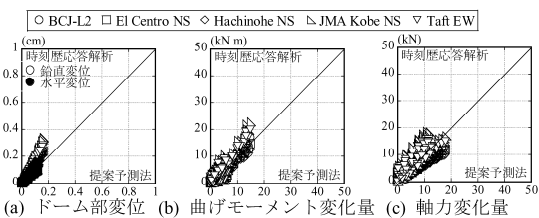


図3 応答低減機構した場合の応答評価手法の精度

(2) 振動台実験による大地震時の応答性状および応答低減機構の効果の検証

ここでは、スケール縮小モデルを対象として振動台実験を行い、空間構造物の地震時の実挙動の把握を行った。

対象とした試験体を写真1に示す。対象とした構造形式は、体育館等に多く使用されている形式である屋根型円筒ラチスシェルとした。

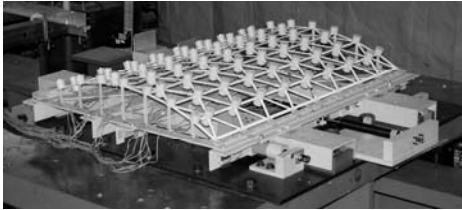


写真1 実験モデル（屋根型円筒ラチスシェル）

ここでは、弾性範囲内の応答の分析に加え、制振機構として粘性ダンパーを下部構造に付加した場合の応答低減効果について分析した。図4にダンパーの有無による応答加速度の比較を示す。鉛直・水平方向ともに加速度応答を、ダンパーを付加することで約半分に低減することができた。この性状は下部構造と屋根構造の振動性状（固有周期）に依存しないことを確認している。

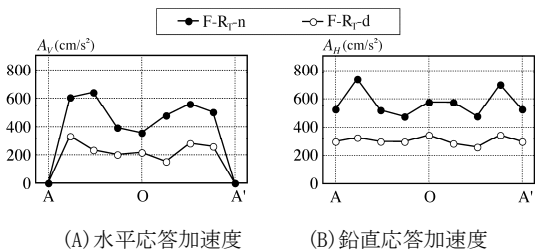


図4 ダンパー付加による最大応答加速度分布比較

次に、ダンパーによる加速度応答低減率を付加減衰に対応する応答スペクトル値を使用して予測する手法を提案し、その精度の検証を行った。図5に実験値と予測値の比較を示す。一部の地震波においてややばらつきが見られるものの、加速度応答低減率を予測できていることがわかる。

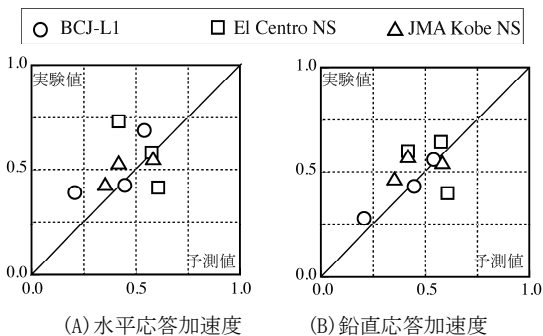


図5 ダンパー付加による加速度応答低減率予測

(3) 流体解析および風洞実験による強風時の応答性状および応答低減機構の効果

ここでは、強風中の空間構造物の応答に対する粘性抵抗を利用したエネルギー吸収機構による応答制御効果について分析した。また、最適化問題により強風中において変形が最小となる屋根面形状の提案も行った。

風洞実験では、写真2に示すHP型の空間構造物を対象とした。

風洞実験結果より、応答の共振成分に対するエネルギー吸収機構の付加減衰の効果が大きいことが明らかとなった。また、風洞実験結果は、付加質量を考慮したモード重ね合わせによる時刻歴応答解析によって再現可能であった。

次に、応答制御手法の一つとして流体解析

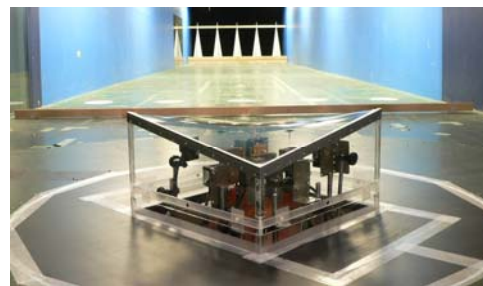


写真2 風洞実験モデル（HP型シェル）

により円筒屋根面の形状最適化を試みた。ここでは、計算時間の短縮のために、一般に多大な計算時間を要する流体解析の高速化を行った。高速化に際し、マルチグリッド法を適用した。また、最適化における目的関数のモデル化には応答曲面モデルを用いる。以上の手法により、最大応答変位を最小化する形状最適化を行った結果を図6に示す。形状最適化の結果、変動風圧係数のピーク値が小さくなっている。

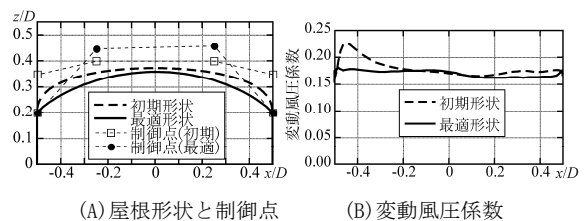


図6 強風中の円筒屋根面の形状最適化結果

(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、エネルギー吸収機構を付加することによる大地震時および強風時における空間構造物の応答低減効果の一端が明らかとなった。また、現在まで簡便に評価することが難しかったエネルギー吸収機構を付加した場合の応答評価手法が提案された。この応答評価手法は、構造部材以外の2次部材の設計の際にも使用することができる。なお、今後の課題として、本研究の

範囲で実現できなかった2次部材の設計のための明確な外力の提案, パッシブなエネルギー吸収機構のみでなく, アクティブな制振技術を利用した応答制御が挙げられる。

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 19 件)

- ① T.Kumagai, T.Takeuchi, I.Suzuki and T.Ogawa, Dynamic Responses of Cylindrical Lattice Shell Roofs under Horizontal Earthquake Motions with Arbitrary Direction by Shaking Table Tests, Proceedings of IASS 2009, pp.1-11 (CD-ROM) p.130 (Ext.Abst.), 2009, 査読有
- ② T.Takeuchi, T.Ogawa and T.Kumagai, State-of-Arts View on Response Control Technologies on Metal Space Structures, Proceedings of IASS 2009, pp.1-12 (CD-ROM) p.104 (Ext.Abst.), 2009, 査読有
- ③ 竹内 徹, 高松謙伍, 熊谷知彦, 小河利行, 免震支承が挿入された支持架構付き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, Vol.74, No.641, pp.1259-1266, 2009, 査読有
- ④ 竹内 徹, 松井良太, 西本晃治, 高橋聡史, 大山翔也, 拘束材端部回転剛性を考慮した座屈拘束ブレースの有効座屈長, 日本建築学会構造系論文集, Vol.74, No.639, pp.925-934, 2009, 査読有
- ⑤ 熊谷知彦, 竹内 徹, 牛渡ふみ, 瀬田絃子, 小河利行, 固有周期及び質量の異なる下部構造に支持されたアーチ構造物の地震応答実験, 日本建築学会構造系論文集, Vol.74, No.637, pp.503-510, 2009, 査読有
- ⑥ 山下拓三, 熊谷知彦, 小河利行, 宮村倫司, 大崎純, マルチグリッド法と可変複合モデルを用いた強風を受けるシェル構造物の屋根形状最適化, 日本建築学会構造系論文集, Vol.74, No.636, pp.297-304, 2009, 査読有
- ⑦ 熊谷知彦, 竹内 徹, 鈴木 泉, 小河利行, 任意方向地震動を受ける屋根型円筒ラチスシェルの振動実験, 日本建築学会構造系論文集, Vol.73, No.633, pp.1985-1992, 2008, 査読有
- ⑧ T.Takeuchi, T.Kumagai, S.Okayama and T.Ogawa, Seismic Response Evaluation of High-rise Lattice Domes with Substructures Using Amplification Factors, Proceedings of IASS 2008, pp.269-270(Ext.Abst.), 2008, 査読有
- ⑨ T.Kumagai, T.Takeuchi and T.Ogawa, Effects of Natural Period and Mass of Substructures on Seismic Responses of Arch Structures Subjected to Horizontal Motions, Proceedings of IASS 2008, pp.153-154(Ext.Abst.), 2008, 査読有

- ⑩ 竹内 徹, 熊谷知彦, 岡山俊介, 小河利行, ライズの高い支持架構付きラチスドームの地震応答解析, 日本建築学会構造系論文集, Vol.73, No.629, pp.1119-1126, 2008, 査読有
- ⑪ T.Takeuchi, T.Kumagai, H.Shirabe and T.Ogawa, Seismic Response Evaluation of Lattice Roofs Supported by Multistory Substructures, Proceedings of IASS 2007, pp.1-9(CD-ROM) pp.337-338(Ext.Abst.), 2007, 査読有
- ⑫ T.Kumagai, T.Ogawa, T.Takeuchi and E.Sato, A Prediction Method of Dynamic Collapse Behavior of Single-layer Latticed Domes Subjected to Horizontal Earthquake Motions, Proceedings of IASS 2007, pp.1-9(CD-ROM) pp.215-216(Ext.Abst.), 2007, 査読有
- ⑬ T.Takeuchi, T.Ogawa, T.Kumagai, Seismic Response Evaluation of Lattice Shell Roofs using Amplification Factors, Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures, Vol.48, No. 3, pp.197-210, 2007, 査読有
- ⑭ 竹内 徹, 熊谷知彦, 調 浩朗, 小河利行, 多層架構で支持されたラチスシェル構造の地震応答評価, 日本建築学会構造系論文集, 619号, pp.97-104, 2007, 査読有

[学会発表] (計 26 件)

- ① T.Kumagai, T.Takeuchi, F.Ushiwata and T.Ogawa, 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
- ② T.Takeuchi, K.Takamatsu, T.Kumagai, and T.Ogawa, Response Control of Lattice Dome Roofs Using Seismic Isolation, Joint Conference 7CUEE & 5ICEE, 2010年3月5日, 東京工業大学
- ③ 大林 優, 高松謙伍, 竹内 徹, 熊谷知彦, 小河利行, 応答増幅率を用いた支持架構付き免震ドームの地震応答評価 その1 粘性ダンパー及び弾塑性ダンパーが地震応答に与える影響, 日本建築学会大会学術講演会, 2009年8月27日, 東北学院大学
- ④ 瀬田絃子, 牛渡ふみ, 熊谷知彦, 竹内 徹, 小河利行, 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, 日本建築学会大会学術講演会, 2009年8月27日, 東北学院大学
- ⑤ 桑原諒子, 熊谷知彦, 竹内 徹, 小河利行, 屋根型円筒ラチスシェルの地震応答性状に及ぼす下部構造質量および屋根固有周期の影響, 日本建築学会大会学術講演会, 2009年8月27日, 東北学院大学
- ⑥ T.Kumagai, T.Takeuchi, I.Suzuki and T.Ogawa,

Shaking Table Tests of Cylindrical Lattice Shell Roofs Subjected to Horizontal Earthquake Motions with Arbitrary Direction, The 9th Asian Pacific Conference on Shell and Spatial Structures, 2009年5月28日, 名古屋国際会議場

⑦ T.Takeuchi, T.Kumagai, S.Okayama and T.Ogawa, Seismic Response Evaluation of Low-to-High Rise Lattice Domes, The 9th Asian Pacific Conference on Shell and Spatial Structures, 2009年5月28日, 名古屋国際会議場

⑧ T.Kumagai, T.Takeuchi and T.Ogawa, Vibration Tests of Arch Structures Supported by Substructures with Various Natural Periods and Mass Subjected to Horizontal Earthquake Motions, Sixth International Conference on Urban Earthquake Engineering, 2009年3月4日, 丸の内ビルディング

⑨ T.Takeuchi, T.Ogawa and T.Kumagai, Seismic Response Evaluation of Lattice Roofs with Substructures, Sixth International Conference on Urban Earthquake Engineering, 2009年3月4日, 丸の内ビルディング

⑩ 黒川雄太, 小河利行, 中山昌尚, 佐々木康人, 増田圭司, 熊谷知彦, 真木英二郎, HP型サスペンション膜屋根に作用する風圧力の性状と屋根面の風応答 その1 実験概要および屋根面に作用する風圧力の性状, 日本建築学会大会学術講演会, 2008年9月19日, 広島大学

⑪ 牛渡ふみ, 鈴木 泉, 熊谷知彦, 竹内 徹, 小河利行, 任意方向地震動を受ける屋根型円筒ラチスシェルの振動実験 その1 実験概要, 自由振動特性及び地震応答性状, 日本建築学会大会学術講演会, 2008年9月19日, 広島大学

⑫ 堤 友紀, 竹内 徹, 熊谷知彦, 小河利行, 弾塑性制振架構で支持された屋根型円筒ラチスシェルの地震応答評価, 日本建築学会大会学術講演会, 2008年9月19日, 広島大学

⑬ 瀬田紘子, 竹内 徹, 熊谷知彦, 小河利行, 牛渡ふみ, 下部構造との固有周期比及び質量比を変化させたアーチ構造物の地震応答実験, 日本建築学会大会学術講演会, 2008年9月19日, 広島大学

⑭ 高山秀俊, 小河利行, 竹内 徹, 熊谷知彦, 屋根部材の塑性化を考慮した二層ラチスドームの応答加速度評価, 日本建築学会大会学術講演会, 2008年9月19日, 広島大学

⑮ 高松謙伍, 竹内 徹, 熊谷知彦, 岡山俊介, 小河利行, ライズの高い支持架構付ラチスドームの地震応答評価 その1 応答増幅率及び応答加速度分布の評価, 日本建築学会大会学術講演会, 2008年9月19日, 広島大学

⑯ 佐藤英佑, 熊谷知彦, 小河利行, 竹内 徹, 水平地震動を受ける単層ラチスドームの崩

壊挙動予測 その1 動的崩壊性状, 日本建築学会大会学術講演会, 2007年8月30日, 福岡大学

⑰ 仲谷美咲, 竹内 徹, 調 浩朗, 熊谷知彦, 小河利行, 多層架構で支持されたラチスシェルの構造の地震応答評価 その1 重量の大きい1層架構に支持された場合, 日本建築学会大会学術講演会, 2007年8月30日, 福岡大学

⑱ 鈴木 泉, 牛渡ふみ, 山下拓三, 熊谷知彦, 竹内 徹, 小河利行, アーチ構造物の地震応答に関する模型実験 その1 実験装置及びアーチ構造物の自由振動特性, 日本建築学会大会学術講演会, 2007年8月30日, 福岡大学

〔図書〕(計2件)

① 小河利行, 日本建築学会, シェル・空間構造の減衰と応答制御, 2008, pp.372-373

② 竹内 徹, 日本建築学会, シェル・空間構造の減衰と応答制御, 2008, pp.112-118, pp.144-154

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小河 利行 (OGAWA TOSHIYUKI)

東京工業大学・大学院理工学研究科・教授
研究者番号: 20126270

(2) 研究分担者

竹内 徹 (TAKEUCHI TORU)

東京工業大学・大学院理工学研究科・教授
研究者番号: 80361757

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

(3) 連携研究者

無し