

平成 21 年 5 月 13 日現在

研究種目：若手研究 (B)

研究期間：2006～2008

課題番号：18760414

研究課題名 (和文) ラチスシェルの動的崩壊挙動予測手法の提案

研究課題名 (英文) Proposal for Prediction Method of Dynamic Collapse Behavior of Lattice Shells

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：

本研究は、災害時にも防災拠点として使用可能な空間構造物を具現化することを目標とした、ラチスシェルの動的崩壊性状の分析、崩壊挙動の評価手法に関する研究である。2006年度には、数値解析により動的崩壊挙動を分析した上で、静的座屈荷重に着目した崩壊加速度予測手法を提案した。また、簡易モデル置換によってひずみエネルギー推定方法を提案した。2007年度以降は、スケール縮小モデルを対象として、実挙動における崩壊挙動分析の前段として弾性範囲内の地震応答実験を行い、応答性状の分析を行った。

交付額

(金額単位：円)

|        | 直接経費      | 間接経費    | 合計        |
|--------|-----------|---------|-----------|
| 2006年度 | 800,000   | 0       | 800,000   |
| 2007年度 | 1,300,000 | 0       | 1,300,000 |
| 2008年度 | 400,000   | 120,000 | 520,000   |
| 年度     |           |         |           |
| 年度     |           |         |           |
| 総計     | 2,500,000 | 120,000 | 2,620,000 |

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，数値解析，振動台実験，地震応答性状，動的崩壊挙動，崩壊加速度，崩壊挙動予測手法，応答評価手法

## 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、地震による災害の一例となった1995年の阪神淡路大震災、2004年の新潟中越地震の際には、その防災拠点となるべき空間構造物でも屋根構造部材および下部構造部材の破断、座屈等の多くの被害が発生した。

このような現状において、現在までに空間構造物を対象として、静的荷重に対する座屈性状、地震動に対する応答性状などに関する様々な研究が行われてきた。その結果、静的な座屈性状に関しては、座屈荷重の推定法が提案されるに至っているが、動的崩壊性状を扱った研究は数少なく、その中でも動的崩壊挙動の予測手法に関しては皆無に等しい。また、振動台による地震崩壊実験を行った研究についても皆無である。このことを受け本研究では、災害時にも防災拠点として使用可能

な空間構造物を具現化することを目標として、空間構造物でも特に単層または複層の鉄骨造ラチスシェルを対象とし、架構形式による動的崩壊性状の違いを分析し、ラチスシェルを崩壊に至らしめる最大入力加速度である崩壊加速度の評価を行った上で、ラチスシェルの崩壊機構および崩壊加速度の簡便な評価手法を提案する。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、災害時に防災拠点となるべき空間構造物の動的崩壊の制御を目標とした、動的崩壊性状の分析、崩壊機構および崩壊加速度の評価手法の提案である。具体的には、以下に示す内容に従い研究を遂行し、崩壊挙動の予測手法を提案し、振動台実験による実挙動の分析を行う。

(1) 数値解析によって地震動を受けるラチスシェルの動的崩壊性状を分析する。その解析結果より地震入力に対する崩壊加速度を求め、さらに崩壊加速度を簡便に評価するための手法を提案する。また、地震崩壊時にラチスシェルに発生するひずみエネルギーの予測手法も提案し、崩壊時の挙動予測を試みる。

(2) 振動台実験によって、現在までほとんど行われて来なかったラチスシェルの実挙動における地震応答性状を分析する。対象とする構造物は、まず、基本的な空間構造物であるアーチ構造物とし、次にラチスシェルとする。ここでは、弾性時の応答性状から分析を始め、部材の塑性化を伴う入力に対する応答性状についても分析を試みる。

## 3. 研究の方法

本研究は、以下に示す具体的方法に従い遂行し、目的の達成を目指す。

本研究を通じ対象とする空間構造物は、ラチスシェルの代表的な架構形式である単層形式、複層形式のラチスシェルである。規模は、通常の体育館規模であり、約 60m のスパンを有するラチスシェルとする。

(1) 検討対象とするラチスシェルの設定

現在日本国内に存在するラチスシェルの現状調査を行い、防災拠点としての可能性を把握する。またそれらの構造についても整理し、研究対象とするラチスシェルの設定を行う。

(2) 周期特性の複雑な入力波形（地震波）を用いた場合の動的崩壊性状の分析

非線形時刻歴応答解析プログラムを使用した数値解析により、地震動に対する単層および複層ラチスシェルの動的崩壊性状を分析する。この解析結果より、崩壊性状の分析を行い、ラチスシェルを崩壊に至らしめる最大入力加速度の評価を行う。

(3) 動的崩壊挙動の予測手法の提案

地震動を受ける場合の動的崩壊挙動および動的崩壊加速度の予測手法を検討する。ここでは、静的荷重を用いて動的崩壊挙動を予測する手法の提案を行い、精度を確認する。

(4) スケール縮小モデルを対象とした振動台実験

提案した動的崩壊挙動の予測手法の妥当性を実現現象からも確認するために振動台実験を行う。実験モデルは、スケールを縮小したラチスシェルを用いる。ここでは、弾性応答から動的崩壊発生までを対象とし、数値解析および評価法との比較を行う。

## 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) 数値解析による動的崩壊性状の分析および動的崩壊挙動予測手法の提案

単層ラチスドームを対象として、数値解析により水平地震動を受ける場合の崩壊性状の分析および崩壊挙動予測手法の提案を行った。

解析モデルは、図 1 に示すスパン 60m の単層ラチスドームであり、ドーム半開角は 30, 40, 50(deg.) の 3 種類である。部材断面は許容応力度設計（短期）を行い、固定荷重を受ける時に安全率が 2.5 以上となるように決定している。解析方法は、材料学的非線形および幾何学的非線形を考慮した動的応答解析とする。

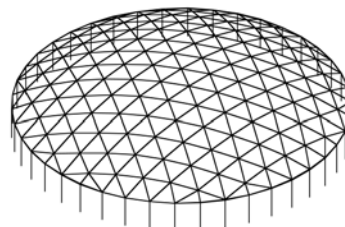


図 1 解析モデル（単層ラチスドーム）

応答性状分析の一例を以下に示す。図 2 は、各入力加速度での、鉛直、水平方向の全節点における最大応答加速度、最大応答節点における最大鉛直応答変位、ドーム屋根に発生するひずみエネルギー速度の最大値である。最大鉛直応答変位は、ライズ H により無次元化し

て示す。最大応答加速度では、鉛直、水平方向ともに、入力加速度の増加に伴いほぼ線形に増加し、原点を通る直線となっている。これは、各入力加速度に対する応答倍率がほぼ一定であることを意味する。最大鉛直応答変位は、初期降伏以降の入力加速度では非線形に増加し、崩壊加速度入力時に大きく増加する。最大ひずみエネルギー速度も最大鉛直応答変位と同様の性状を示す。また、最大ひずみエネルギー速度は、崩壊前加速度入力時には、地震波によらずほぼ一定の値（350cm/s前後）となっている。

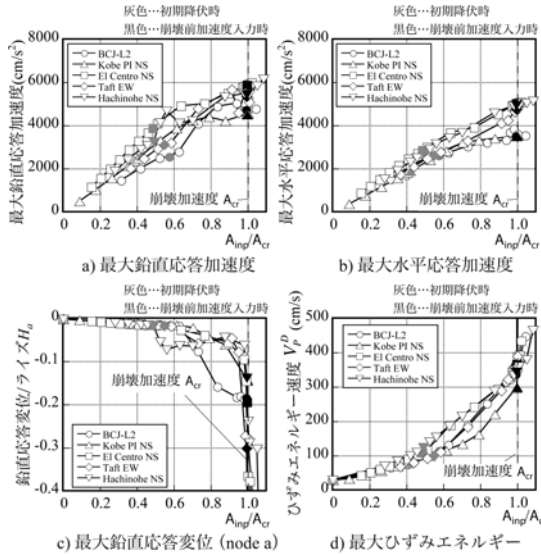


図2 入力加速度の違いによる応答値の変化

次に、崩壊加速度の評価手法および評価精度を示す。崩壊加速度  $A_{cr}$  は、静的座屈荷重を加速度に変換した静的座屈加速度を基準として入力地震波の応答倍率の増加に従い減少する、つまり反比例関係にあるとして評価する手法を提案した。その結果を図3に示す。その結果、崩壊加速度予測式と動的応答解析による崩壊加速度は、ドームの半開角や、入力地震波によらず、良い精度で対応し、安全側に評価可能であることがわかった。

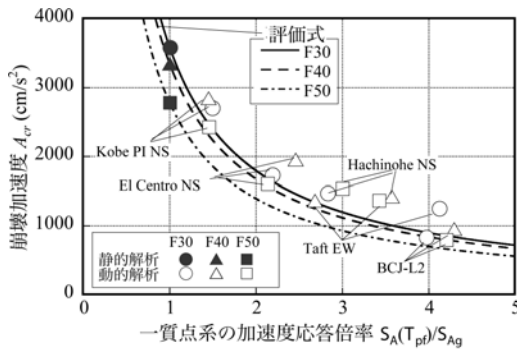


図3 加速度応答倍率を用いた崩壊加速度評価

(2) 振動台実験による地震応答性状の分析

次に、スケール縮小モデルを対象として、空間構造物の実挙動を把握することを目的とした振動台実験を行った。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。

① アーチ構造物の振動台実験

ここでは、アーチ構造物の地震時の実挙動について模型実験により把握する。

アーチ構造物の実験装置を写真1に示す。アーチ屋根部と下部構造の固有周期比  $R_T$  をパラメータとし、その比率を約0.5, 1, 2とする。また、下部構造重量についても屋根重量に対し11倍, 18倍と変化させた。アーチ屋根は0.7mm厚の冷延鋼板(SPCC)により製作した。屋根面の計測は、2軸加速度計(3台)とモーションキャプチャーにより行った。入力は、最大加速度を  $100\text{cm/s}^2$  に基準化した水平地震動である。ここでは、基本的な応答性状を把握するため、弾性応答を対象とした。

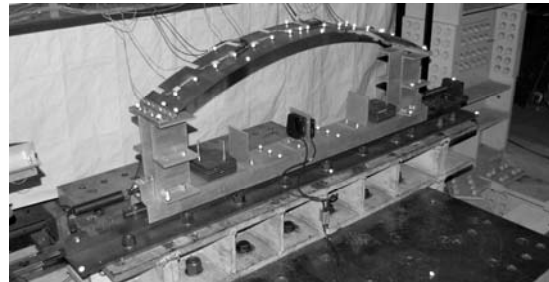


写真1 実験装置 (アーチ構造物)

振動台実験結果の一例として、最大応答増幅率分布を図4に示す。図には実験結果および3質点アーチモデルによる評価値を示す。水平応答増幅率は、固有周期比  $R_T=0.5, 2$  では、モデルによらず応答増幅率は1.0付近でなだらかに分布している。しかし、アーチ屋根の固有周期と等価1質点系モデルの固有周期がほぼ一致する  $R_T=1$  の場合には、分布形状に逆対称1波による影響が見られ、最大で1.5倍程度の増幅が見られる。また、鉛直方向の応答増幅率の分布は  $R_T=0.5, 1$  で逆対称1波の分布である。一方、  $R_T=2$  のモデルでは、下部構造の剛性が小さく免震状態となるため、分布形状に対する逆対称1波の傾向が小さい。

また、下部構造質量の違いに着目すると、下部構造質量の大きいモデルでは、  $R_T=1$  モデルの水平・鉛直応答共に重量の小さいモデルに比較して大きくなっている。これは、共振による応答の増幅に質量比が影響することを示している。

以上のような性状が、アーチ構造物の地震応答実験により得られた。

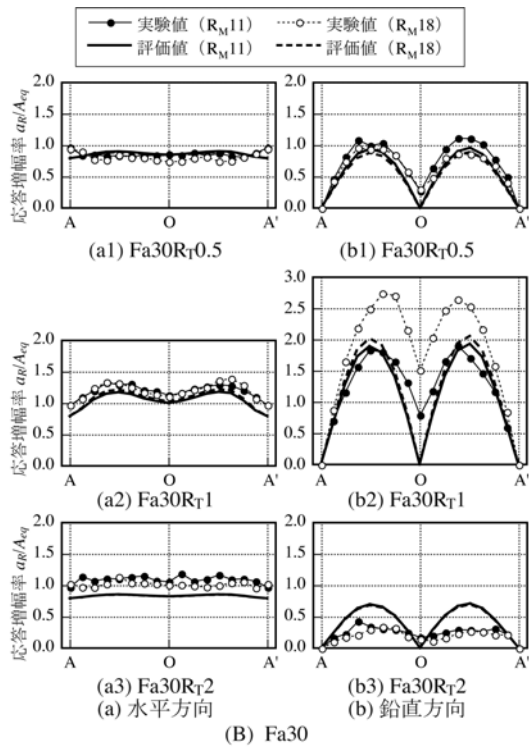


図4 アーチ屋根面の最大応答増幅率分布

② 屋根型円筒ラチスシエルの振動台実験

次に、ラチスシエルとして屋根型円筒ラチスシエルを対象として、地震時における実挙動の分析を行った。当初、部材が塑性化する領域における応答の分析を行う予定であったが、まず、弾性範囲内の応答を分析することとした。

円筒ラチスシエルの実験モデルを写真2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。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。

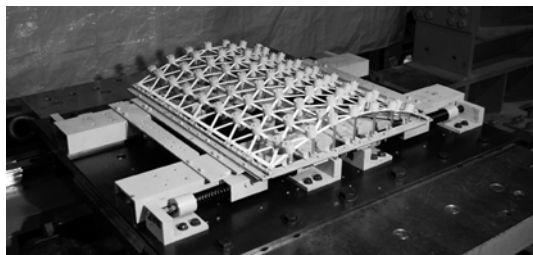


写真2 実験装置 (屋根型円筒ラチスシエル)

下部構造の剛性の調節は、下部構造と振動台の間に取り付けられた8本のバネにより行う。パラメータは、地震波の入力方向(0deg.(アーチ方向), 90deg.(桁行方向), 45deg.(斜め方向))およびシエル屋根と下部構造の固有周期比  $R_T$  (0.8,0.9,1.8) である。

屋根面の応答は、ひずみゲージ型加速度計、モーションキャプチャーにより計測する。入力地震波は、最大速度を  $15\text{cm/s}$ に水平方向

地震波である。

ここでは、円筒ラチスシエルの地震時挙動を、固有周期比および地震波入力方向による違いに着目して分析した。更に、応答評価の一つとして、斜め方向(45deg.方向)入力時の応答を0deg.および90deg.方向入力時の応答を合成することにより評価する手法を提案した。その結果を図5に示す。図より、水平応答加速度は概ね良い対応を示すことがわかる。また、鉛直応答加速度は、 $R_T=0.9$ のモデルでは稜線BO上において、O点の振動するモードの影響により相違が見られるが、他の節点においては合成による加速度と斜め方向(45deg.方向)入力時の実験値は良い対応を示している。以上より、入力角度0, 90deg.の応答の組み合わせにより、任意方向入力に対する応答は概ね評価可能と考えられる。

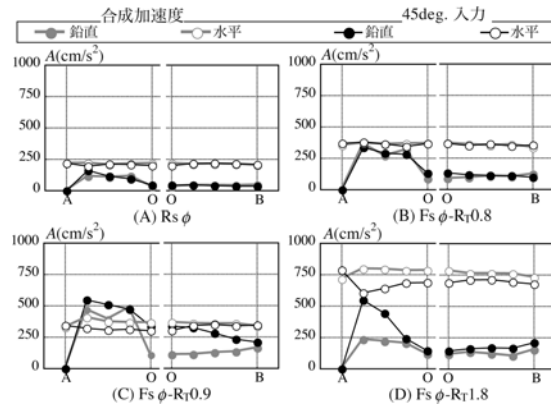


図5 0, 90deg. 入力の合成による加速度と45deg. 入力の応答加速度の比較

また、研究代表者らが既論文において提案した応答評価手法と実験結果との比較についても検討した。図6に実験値と評価法による応答加速度の比較を示す。実験では鉛直応答加速度が境界部から急激に増大する分布となるため、節点同士を比較した際に相違が生じるものの、全体の分布形状は概ね対応しており、応答加速度分布は再現できていることがわかる。一方、斜め方向入力(45deg.)の場合には、図4に示したように0deg.と90deg.方向入力時の応答を合成することで、他方向と同程度に評価可能であることがわかる。

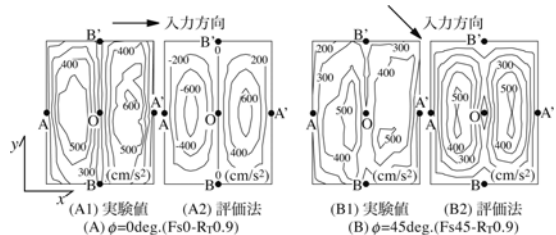


図6 実験による応答加速度と評価法による応答加速度の比較

(3) 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, 現在まで簡便に予測することが難しかった崩壊加速度の予測法が提案され, また, 実挙動における地震応答性状が明らかにされた。この成果により, 今後は動的崩壊までの余裕度を把握した上で設計ができるようになり, 空間構造物の設計の自由度を広げることが可能になった。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, 本研究の範囲で実現できなかった部材が塑性化を伴うような入力に対する実挙動の分析は, 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 11 件)

①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

②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

③ 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

④T.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

⑤熊谷知彦, 谷口与史也, 小河利行, 舟橋靖之, 網目形状および境界条件の異なる二層立体ラチスドームの弾塑性座屈性状および耐力評価, 構造工学論文集, Vol.54B, pp.337-344, 2008, 査読有

⑥T.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.215-216(Ext.Abst.), 2007, 査読有

⑦T.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

⑧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

⑨ T.Kumagai, Y.Taniguchi, T.Ogawa and M.Masuyama, Static and Dynamic Buckling Behavior of Double-layer Latticed Domes with Various Mesh Patterns, Proceedings of IASS/APCS 2006, pp.456-457(Ext.Abst.), 2006, 査読有

⑩S.Kato, T.Takeuchi, S.D.Xue, S.Nakazawa, I.Tatemichi, M.Fujimoto, F.Fan, T.Ogawa, C.Zhi-hua, T.Kumagai, State-of art Report on Seismic Response Estimation of Metal Spatial Structures under Earthquake Motions, Proceedings of IASS/APCS 2006, pp.382-383(Ext.Abst.), 2006, 査読有

⑪熊谷知彦, 谷口与史也, 小河利行, 増山真紀子, 網目形状の異なる二層立体ラチスドームの静的および動的弾塑性座屈性状, 日本建築学会構造系論文集, 610号, pp.107-114, 2006, 査読有

[学会発表] (計 13 件)

① 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

②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

③瀬田絃子, 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

④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

⑤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2 入力方向が応答性状に与える影響と応答評価, 日本建築学会大会学術講演会, 2008年9月19日, 広島大学

⑥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

⑦牛渡ふみ, 鈴木泉, 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2 アーチ構造物の地震応答性状, 日本建築学会大会学術講演会, 2007年8月30日, 福岡大学

⑧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

⑨熊谷知彦, 佐藤英佑, 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2 入力加速度の違いが動的応答に及ぼす影響および崩壊挙動予測, 日本建築学会大会学術講演会, 2007年8月30日, 福岡大学

⑩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

⑪鈴木泉, 竹内 徹, 小河利行, 熊谷知彦, 桁行方向に地震動を受ける支持架構付き屋根型円筒ラチスシェルの応答評価, 日本建築学会大会学術講演会, 2006年9月8日, 神奈川大学

⑫熊谷知彦, 谷口与史也, 小河利行, 増山真紀子, 網目形状の異なる二層立体ラチスドームの弾塑性座屈性状 その2 動的弾塑性座屈性状および耐力評価, 日本建築学会大会学術講演会, 2006年9月8日, 神奈川大学

⑬佐藤英佑, 熊谷知彦, 谷口与史也, 小河利行, 増山真紀子, 網目形状の異なる二層立体

ラチスドームの弾塑性座屈性状 その1 静的弾塑性座屈性状, 日本建築学会大会学術講演会, 2006年9月8日, 神奈川大学

## 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