

平成 22年 3月 31日現在

研究種目：若手研究(B)  
 研究期間：2008～2009  
 課題番号：20760371  
 研究課題名(和文)  
 地震リスク解析に基づく長寿命型空間構造の機能維持性能評価手法の提案  
 研究課題名(英文) Proposal of the functional maintenance performance evaluation method  
 of the long-life spatial structure based on seismic risk analysis  
 研究代表者  
 中澤 祥二 (NAKAZAWA SHOJI)  
 豊橋技術科学大学・工学部・准教授  
 研究者番号：70314094

## 研究成果の概要(和文)：

本研究では、ダンパー等を有する空間構造の総合的な耐震性能を評価する方法として、地震リスク評価手法を導入し、地震ロス関数と地震ハザード曲線を組み合わせることにより、耐用年数の間に被る期待損失額や機能損失確率を定量的に評価する方法を提案した。本手法を用いるために必要となる、構造要素(主構造材や非構造材)の地震損傷度曲線、構造物全体の損傷を求めるためのイベントツリー、機能維持性能を分析するためのフォールトツリーなどの具体的な値を小中学校体育館、中規模ドームについて示し、本評価手法の有効性を数値解析より示した。

## 研究成果の概要(英文)：

The purpose of this study is to propose a procedure for evaluation of seismic risk considering the seismic resistance capacity of an example structure. In the present procedures, seismic risks are quantified as expected losses using an event tree of the seismic damages. On the other hand, a functional loss probability is adopted as an evaluation index to functional maintenance. From the results of numerical examples for spatial structures, the value outputted by the Seismic Risk Management procedure is proved useful for evaluation of the seismic resistance capacity and the effectiveness for retrofit decision making.

## 交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	2,100,000	630,000	2,730,000
2009年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,100,000	930,000	4,030,000

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，地震リスク解析，長寿命構造，機能維持性能，性能設計

## 1. 研究開始当初の背景

シェル・空間構造は小中学校の体育館などの公共施設や工場や電力施設の大型建屋、石油タンクなどの産業構造物へ適用されている。学校体育館などは地震後に避難施設として機能することや産業施設では地震後に生産ラインが機能することが望ましい。このような背景から、空間構造物の耐震補強の社会的要求が高まっている。申請者も制振・免震装置の積極的に導入することによる空間構造の耐震性能の向上や長寿命化、さらには環境負荷低減型空間構造物の設計法の提案を行っている。既往の研究では、主に主構造体（建物躯体）の耐震安全性に注目した耐震補強法の提案が中心である。一方、主構造が健全であっても非構造材の損傷（例えば、天井の照明器具や屋根仕上材の落下）によって避難施設として使用できない体育館や生産ラインのストップした工場の被害事例も多い。さらに、被災した工場が製品を供給できないためにサプライチェーンが失われ企業活動に甚大な損害をもたらした例も記憶に新しい。したがって、空間構造の耐震性能評価では、主構造と同様に非構造材の損傷や損失も考慮する必要がある。さらに、構造物自身の直接的な損失に加えて、機能損失に伴う経済的な損失（体育館では避難施設として機能しない場合の損失、工場では生産ラインの停止による損失、営業損失等）を考慮した耐震評価方法が強く望まれている。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、地域経済を支える工場や市民の安全を守る公共性の高い中小規模の矩形型空間構造物の応答性状や耐震性能の分析を行い、空間構造の地震時機能維持性能の分析手法および耐震補強法の性能評価手法を提案し、シェル空間構造物に対して適切な耐震補強法の普及を促すことを目的としている。

一般的な商業ビル等の重層構造物については、中央防災会議の企業評価・業務継続WG等で機能維持や企業継続性の評価方法が示されている。しかしながら、工場や体育館等の空間構造は応答性状が複雑であることや被害データの蓄積が十分でないために、空間構造の損傷評価に適用可能なイベントツリーや構成部材の地震損傷度曲線は

十分に整理されていづつとはいえない。

そこで、シェル・空間構造に適用可能な地震損傷度曲線の算定を試みるとともに、空間構造物の損傷や機能維持性能を分析するためのイベントツリーやフォールトツリーの提案を行う。

## 3. 研究の方法

本研究では、シェル・空間構造を対象とする。シェル・空間構造の形状、規模、目的は多様であり、各々の形状や規模に対して分析を行う必要がある。そこで、小中学校体育館や工場等に比較的多く利用される矩形形状の中小規模空間構造および下部構造に制振ブレースを有するスパン100m程度の中規模ドーム（長寿命型空間構造）を対象とする。この2つの構造物に対して、時刻歴弾塑性地震応答解析より地震時の動的挙動を分析し、本手法を用いるために必要となる、構造要素（主構造材や非構造材）の地震損傷度曲線、構造物全体の損傷を求めるためのイベントツリー、機能維持性能を分析するためのフォールトツリーなどの具体例を示す。

## 4. 研究成果

### (1)対象構造物の地震応答性状の分析

上記の対象構造物に対して、部材の降伏や座屈を考慮した時刻歴弾塑性地震応答解析を行い、入力地震動の大きさと最大応答値（主架構の最大層間変形角と累積塑性変形角、妻面、桁面および屋根面ブレースの最大変形と累積塑性変形角、非構造材の変形角、屋根面の最大加速度）の関係を示し、塑性化が発生する部材を検討した。

### (2)空間構造物の地震損傷度曲線の算定

応答解析の分析を踏まえて、構造物を構成する構成要素を分類し、その構造要素の損傷度を評価する応答量（損傷評価指標）を整理した。例えば、主架構の損傷評価指標は主架構の水平変形（最大層間変形角）、仕上材の損傷評価指標はせん断変形角が候補となることを示した。地震強度指標（例えば最大入力速度）と損傷評価指標の中央関係式とばらつきを評価し、構造信頼性の考え方にに基づき各構成要素の地震損傷度曲線の算定手法を提案するとともに、解析例を示した。

### (3) イベントツリーとフォールトツリーの構築

各々の構成要素が構造物全体の損傷に与える影響を分析し、構造物の損傷に関するイベントツリーの構築例を示した。各損傷モードの発生確率は構成要素の破壊確率から計算することができ、格損傷モードの損傷額は地震被害データを参照し決定する。

機能損失確率や復旧時間はフォールトツリーから算定する。地震後も避難施設や生産施設として機能することを目標とする。既往の地震被害例（屋根の吊物や仕上材の落下した場合、避難所として利用不可など）を参照し、各構成要素の損傷が機能維持に与える影響を分析し、フォールトツリーの具体例を示した。

### (4) 空間構造物の損傷や機能維持性能の分析方法の提案

イベントツリーに基づく地震ロス関数の算定法、フォールトツリーに基づく機能損失確率と復旧時間の算定法を示し、構造物自体の期待損失額と機能損失に伴う期待損失額の算定手法を示した。

提案した方法に基づき、鋼構造学校体育館（S1 タイプ）、下部第1層が鉄筋コンクリート構造の体育館（RS1b タイプ）および下部構造を有するドーム構造（長寿命型空間構造）に対して、制振ダンパーの導入が空間構造の地震リスクの低減や機能維持に対して有効かどうかを定量的に示した。本研究で提案した方法を用いることにより、複数の耐震補強案の相互比較を定量的に行うことや機能損失に伴う被害額を考慮した空間構造の被害額を算定することができることを示した。

### (5) グリッドシステムを用いた地震リスク解析法の提案

上記の地震リスク解析や弾塑性応答解析を効率的に行うために、並列グリッドシステムの構築を行い、並列計算を用いた地震解析システムの提案をおこなった。

## 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）

Eka Satria, Shiro Kato, Shoji Nakazawa, Daisuke Kakuda, Study on Dynamic Behavior of a New Type of Two-way Single Layer Lattice Dome with Nodal Eccentricity, Steel & Composite Structures, 査読有, Vol.8, No.6, 2008, 511-530

高橋邦広, 樋口直也, 中澤祥二, 吉野達矢, 加藤史郎: 下部 RC 構造に支持された骨組膜構造の応答性状に関する研究, 膜構造研究論文集 2008, 査読有, No.22, 2008, 33-38

中澤祥二, 加藤史郎, 大家貴徳: 弾塑性地震応答解析に基づく体育館の靱性指標評価の検討 桁面ブレースの検討, 構造工学論文集, 査読有, Vol.55B, 2009.3, pp.63-72

平野健太, 中澤祥二, 加藤史郎, 鋼構造体育館の地震リスク評価に関する基礎的研究, 構造工学論文集, 査読有, Vol.55B, 2009, 15-26

加藤史郎, 中澤祥二, 大家貴徳, 柏井恭平: 弾塑性地震応答解析に基づく体育館等のブレースの動的靱性指標の検討, 日本建築学会構造系論文集, 査読有, 第647号, 2010, pp.129-135

大家 貴徳, 中澤祥二, 柏井 恭平, 加藤 史郎: 弾塑性地震応答解析に基づく体育館の耐震性能評価 桁面ブレースの動的靱性指標と必要耐力に関する検討, 構造工学論文集, 査読有, Vol.56B, 2010, 掲載予定

加藤史郎, 樋口直也, エカサトリア, 中澤祥二: 2 曲面構成のブレース補剛直交格子ドームの弾塑性座屈耐力 新構造形式の単層格子ドームの可能性の検討, 構造工学論文集, 査読有, Vol.56B, 2010, 掲載予定

〔学会発表〕（計20件）

中澤祥二: 下部構造降伏型空間構造における応答制御, シンポジウム「シェル・空間構造の応答制御と減衰 最近の取り組みと将来」, 招待講演, 2009.12

Shiro KATO, Shoji NAKAZAWA, Seismic risk Analysis of large lattice dome supported by buckling restrained braces, The 6th International Conference on Computation of Shell & Spatial Structures, IASS-IACM 2008, 査読有, Cornell University, Ithaca, NY, USA, 2008, pp.98

Shiro Kato, Tetsuo Yamashita, Shoji Nakazawa, Takeru Konno: Buckling Strength Evaluation of Two-Way Single Layer Lattice Dome, IASS2008-Shell and Spatial Structures, 査読有, Acapulco, Mexico, 2008, 141-142 (on CD-ROM)

Shiro KATO, Shoji NAKAZAWA, A Trial for Seismic Fragility Evaluation of a Lattice Dome Supported by Buckling Restrained Braces, 6th International Conference on Urban Earthquake Engineering, Tokyo,

Japan, March 3-4, 2009, ( on CD-ROM )  
 Naoya HIGUCHI, Shiro KATO, Shoji NAKAZAWA : Evaluation of Buckling Strength of Orthotropic Single Layer Lattice Domes Based on Column Buckling Concept, Proceedings of APCS2009, 査読有, Nagoya, Japan, 2009, 52-53 ( on CD-ROM )  
Shoji NAKAZAWA, Shiro KATO : Study on Evaluation of Seismic Risk of Gymnasia Subjected to Longitudinal Earthquake Motions Based on Elasto-plastic Dynamic Response Analysis, Proceedings of APCS2009, 査読有, Nagoya, Japan, 2009, 69-70 ( on CD-ROM )  
 Eka SATRIA, Shiro KATO, Shoji NAKAZAWA, Yutaka NIHO : Form Finding of RC Shells Considering Multiple Design Loads, Proceedings of APCS2009, 査読有, Nagoya, Japan, 2009, ( on CD-ROM )  
 Shiro KATO, Takanori OYA, Shoji NAKAZAWA and Yun-Beom KIM, : Efficiency of a new steel hysteretic device for an intermediate seismic isolation system applied to reticular domes, Proceedings of IASS Symposium 2009, 査読有, Valencia, Spain, 2009, 312-322 ( on CD-ROM )  
Shoji NAKAZAWA, Shiro KATO and Ryoichi SHIBATA : Seismic Risk Evaluation of Spatial Structures by using Grid Computing System, Proceedings of IASS Symposium 2009, 査読有, Valencia, Spain, 2009, 366-377 ( on CD-ROM )  
Shoji Nakazawa, Shiro Kato : Seismic Risk Evaluation of School Gymnasia Based on Dynamic Nonlinear Response Analysis, Proceedings of 7th International Conference on Urban Earthquake Engineering and 5th International Conference on Earthquake Engineering, 査読有, Tokyo, Japan, 2010, PN.08-164 ( on CD-ROM )  
 中澤祥二, 加藤史郎, 柴田良一, 下部構造で支持された単層ラチスドームの地震リスクアナリシス, 日本建築学会大会梗概集, 2008, 891-892  
 平野健太, 加藤史郎, 中澤祥二, 地震リスク評価手法を用いた空間構造物の耐震性能評価 RS2a タイプの空間構造物への適用例, 日本建築学会大会梗概集, 2008, pp.871-872  
 森 伸也, 加藤史郎, 中澤祥二, 大家貴徳, 弾塑性地震応答解析に基づく体育館の靱性指標評価の検討 その 1: 桁面プレースの評価, 日本建築学会大会梗概集, 2008.9, pp.875-876  
 塚脇喜章, 加藤史郎, 中澤祥二, 今野 岳, 森 伸也, 大家貴徳, 弾塑性地震応答解析

に基づく体育館の靱性指標評価の検討  
 その 2: トラス梁で構成される張間方向の評価, 日本建築学会大会梗概集, 2008.9, pp.877-878  
 山口一彬, 加藤史郎, 中澤祥二, 東田豊彦, 姥聡美, 住宅の地震リスク評価に関する基礎的研究家財の被害を考慮したLCC 期待値の比較, 日本建築学会大会梗概集, 2008.9  
 長屋敦士, 柴田良一, 中澤祥二, 大家貴徳, 加藤 史郎 : 桁行き方向に地震動を受ける体育館のリスクアナリシス, その 1: 等価質点モデル, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2009.8, pp.745-746  
 中澤祥二, 加藤史郎, 大家貴徳 : 桁行き方向に地震動を受ける体育館のリスクアナリシス, その 2: 地震リスクと  $I_s$  値の関係, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2009.8, pp.747-748  
 塚脇喜章, 加藤史郎, 大家貴徳, 柏井恭平, 中澤祥二 : 弾塑性地震応答解析に基づく体育館の靱性指標評価の検討, その 1: 桁面プレースの評価, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2009.8, pp.749-750  
 塚脇喜章, 加藤史郎, 大家貴徳, 柏井恭平, 中澤祥二 : 弾塑性地震応答解析に基づく体育館の靱性指標評価の検討, その 2: トラス梁で構成される梁間方向の評価, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2009.8, pp.751-752  
 柳 昌吾, 大貝彰, 中澤祥二, 木下龍亮 : 建物倒壊・延焼・災害時行動困難性による地区レベルの期待損失額・死者数の推定 その 1, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2009.8, pp.351-352

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕  
 出願状況(計0件)  
 取得状況(計0件)

〔その他〕

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

中澤 祥二 (NAKAZAWA SHOJI)

豊橋技術科学大学・工学部・准教授

研究者番号: 70314094

### (2) 研究分担者

なし

### (3) 連携研究者

なし