

令和 5 年 6 月 28 日現在

機関番号：82102

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K05056

研究課題名（和文）大空間建築物の地震後即時健全性診断のフィージビリティスタディ

研究課題名（英文）Feasibility Study on Estimation of Structural Damage due to Earthquakes for Large-Spanned Structures

研究代表者

藤原 淳 (Fujiwara, Jun)

国立研究開発法人防災科学技術研究所・地震減災実験研究部門・主幹研究員

研究者番号：80817049

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：模擬損傷を与えた縮小模型の振動台実験を通じて、構造物の振動数や振動形状（以下、振動特性）が模擬損傷によりどのように変化するかを検討した。実験の結果から、地震動の特性によらず安定して模擬損傷による振動特性の変化を検知可能であることを示した。模擬損傷を与える位置と、振動特性の変化のパターンに相関があることも明らかになっており、今後の地震損傷推定の実行可能性が示された。模擬損傷を与える実験や、地震損傷を意図した箇所に集中させる実験技術も開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

大空間建築物は自然災害時には避難所として利用される。地震後の構造安全性を客観的な観測データや評価手法等で判断できることは、利用可否判断にとって重要な情報の一つである。大空間建築物の振動は一般の建築構造と大きく異なるが、これを考慮した建築物の構造ヘルスマニタリング手法は、申請者の知る限り提案されていない。従って、大空間建築物の振動特性を把握するための基礎的な実験研究は独自のものであり、得られるデータは学術的に貴重なものである。開発した模擬損傷を試験体を与えた振動実験や、試験体の意図した箇所に地震損傷を生じさせる実験手法は、限られた試験体で数多くの実験を行うために、今後幅広く活用、展開可能である。

研究成果の概要（英文）：It has been studied through shake-table tests of small-scaled gymnasium model how earthquake damage can influence on dynamic behaviors of large-spanned structures. It has been shown from the test results that the dynamic characteristics, i.e. the eigen frequencies and mode shapes, can be stably measured regardless of the frequency characteristics of input ground motion, and the simulated earthquake damage correlates with the pattern of changes of dynamic characteristics caused by the damage. The research items for demonstrating the feasibility of earthquake damage detection for large-spanned structures have been well investigated. Experiments with simulated seismic damage and an experimental method for giving earthquake damage at intended locations have been also developed.

研究分野：建築構造

キーワード：大空間建築物 地震損傷推定 縮小模型実験 振動台実験 実験モード解析 模擬損傷

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

学校体育館等の、内部に広い無柱空間を有する建物(以下大空間建築物と呼ぶ)は、自然災害時の避難所としての機能を期待されている。本研究では、自然災害の中でも地震に着目する。大空間建築物は一般的には地震による被害が少ない建築構造ではあるが、構造躯体や天井等の非構造部材の地震被害事例も報告されており(図1,2)、避難所として利用するにあたってはその健全性を判断する必要がある。被災した大空間建築の利用可能可否の判断は、災害発生後速やかに行う必要があるため、専門家不在の状況で行われることが多い。従って、安全側の判断を下さざるを得ず、避難所として利用できない事例がみられる。

地震直後の応急危険度判定は建物外観の目視により行われる。しかし、外装材、仕上げ材内部の損傷・破断のように、構造的には重大な欠陥であるにもかかわらず、外観からの目視による発見が非常に困難なものもある。地震後には数多くの被災者がその中で生活するため、大空間建築物の応急危険度判定には一般の建築物に比べてより高い精度が求められる。計測などにより得られる客観的な数値、またはそれらから定量的に得られる指標に基づく大空間建築物の応急危険度判定手法を確立することができれば、機材とマニュアルを整備することにより専門家以外でも高精度の応急危険度判定を行うことができる。

建築構造の健全性判断は、構造ヘルスマニタリング等と呼ばれ(引用文献)、建物の各所に設置した加速度センサにより得られた波形を分析して、建物の剛性(硬さ)や固有振動数等の振動特性を同定する手法が数多く提案されている。これらの既提案手法の多くは、一般の住宅やビルを想定して構築されている(引用文献)。一方、大空間建築物の振動特性は一般的な建築物と大きく異なることが指摘されている(引用文献)。従って、既存の建築物の構造ヘルスマニタリング手法を大空間建築物に直接適用することは、困難である。また、実際に建設された大空間建築物の振動特性の計測結果は報告されているが(引用文献)、振動特性が損傷によってどのように変化するかを実験、実測した研究は申請者の知る限り報告されておらず、大空間建築物の振動特性(揺れ方や振動数)が損傷によってどのように変化するか、またそれをどのように検知し得るかは、明らかになっていない。



図1 屋根取り付け部の損傷

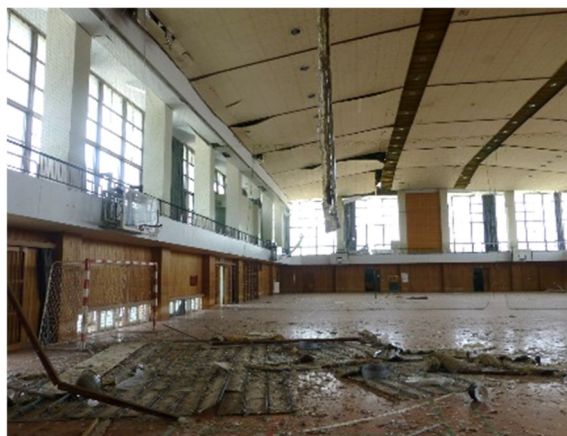


図2 天井被害

2. 研究の目的

本研究の最終的な目的は、地震直後の専門家不在の状況でも、大空間建築物を避難所として利用可能かどうかを工学的側面から判断するための手法を確立することである。その第一段階として、本申請課題では大空間建築物の振動特性同定、およびその結果を用いての損傷位置推定の実行可能性を明らかにすることを目的とする。

前述のように、大空間建築物の振動は一般の建築構造と大きく異なるが、これを考慮した建築物の構造ヘルスマニタリング手法は、申請者の知る限り提案されていない。従って、大空間建築物の振動特性を把握するための基礎的な実験研究は独自のものであり、得られるデータは学術的に貴重なものである。加えて、本研究で得られた実験結果・成果は、構造ヘルスマニタリングに留まらず、大空間建築物の耐震設計や耐震診断への活用も考えられ、幅広い分野への成果展開が期待される。

3. 研究の方法

本研究では、本震によって大空間建築物が既に被災した状況を想定し、余震に対する各所の振動計測結果から振動特性（揺れ方や振動特性）を同定し、被災前後の振動特性の変化から損傷を推定し得るかどうかを明らかにする。

その為に、図3に示す縮小鉄骨骨組の振動実験を行う。計測した各所の応答加速度波形から固有振動数や固有振動モード（揺れ方）を同定する。観測地震波を加振波に用いて、余震を想定してレベル調整するとともに、相似則を考慮して加速度軸および時間軸方向に、それぞれ拡大、縮小する。次に、健全な状態に加えて、模擬的な損傷を与えた状態でも同様に固有振動数や固有振動モードを同定する。模擬的な損傷は、壁面や屋根面の斜材の除去、または鉄骨継手のボルトを部分的に外すことで与える（図4）。そして、損傷による振動特性の変化から、損傷の有無や位置を検知可能かどうかを検討する。

対象とする縮小骨組は、2014年1、2月に防災科学技術研究所のE-ディフェンスで行われた実大体育館震動台実験の試験体の一部を切り出し、1/4に縮小したものである。元試験体は被害調査結果に基づいて設計されたものであり、対象として適切である。元の試験体と縮小骨組の振動特性が相似になるように、相似則を考慮して縮小骨組を設計する。これにより、縮小骨組の加振実験を通じて一般的な体育館の振動特性を調査可能である。

また、図4に示すように損傷を模擬的に与えて加振実験により試験体が損傷しないように実験を計画する。模擬損傷は、地震被害がみられる箇所や、载荷時に負荷の大きい箇所に設ける。これにより、試験体を損傷させることなく、地震被害に対応した様々な損傷パターンにおける振動計測を効率よく行うことができる。

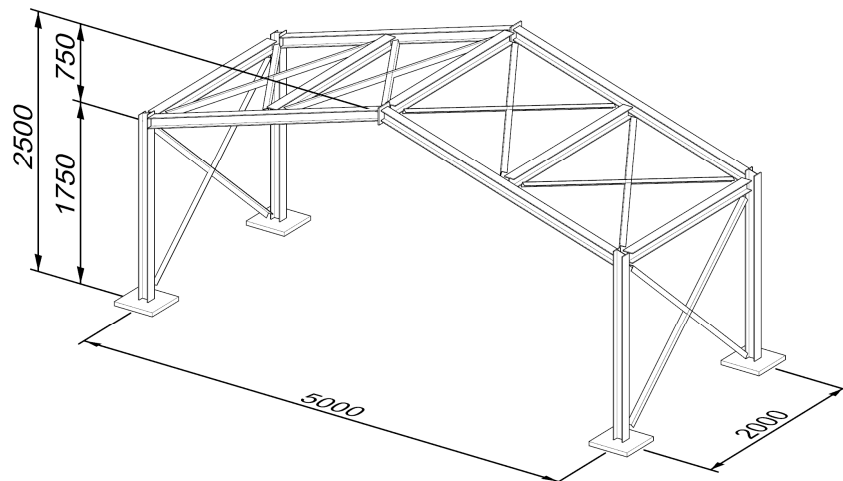


図3 縮小鉄骨試験体

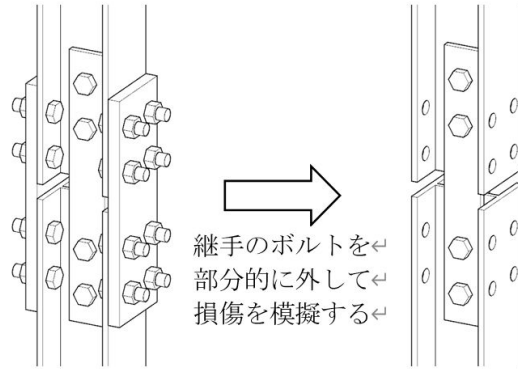


図4 模擬損傷

4. 研究成果

図3の試験体を対象とした振動台実験を行った。実験では、入力波形（ランダム波、EI Centro NS波、Hachinohe NS波）、入力地震動の大きさ（計測震度2, 3, 4）、および模擬損傷を与える箇所（無し、柱脚、柱梁接合部、屋根頂部、桁行構面ブレース、屋根ブレース）をパラメータとした。

図5~7に、EI Centro NS波（計測震度3）、Hachinohe NS波（計測震度3）、ランダム波の場合に、振動台上で計測した加速度を入力、屋根の頂部で計測した加速度を出力として求めた伝達関数をそれぞれプロットする。図5~7のグラフがピークとなるときの振動数が、試験体の固有振動数を示す。入力地震動によらず、安定して振動数が求められている。

図8~10に、柱脚、柱梁接合部、屋根頂部に模擬損傷を与えた試験体にEI Centro NS波（計測震度3）を入力した場合の伝達関数を、それぞれプロットする。柱梁接合部に模擬損傷を与えた場合は、梁間方向と上下方向の振動数が減少している。一方、柱梁接合部と屋根頂部に模擬損傷を与えた場合は、それぞれ梁間方向のみ、上下方向のみの振動数が減少している。

以上の結果から、模擬損傷を与えた場合の試験体の振動数と振動形状の変化には明確なパターンがみられる。このことから、地震によって大空間建築物に生じる加速度を計測、分析することによる、地震損傷推定の実行可能性が示された。なお、実験の詳細は、引用文献 1 に出版、公表されている。

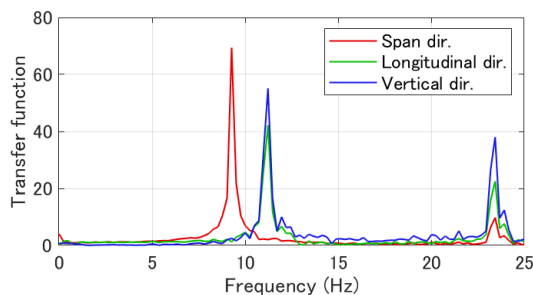


図5 伝達関数（模擬損傷：無し，EI Centro NS，計測震度3）

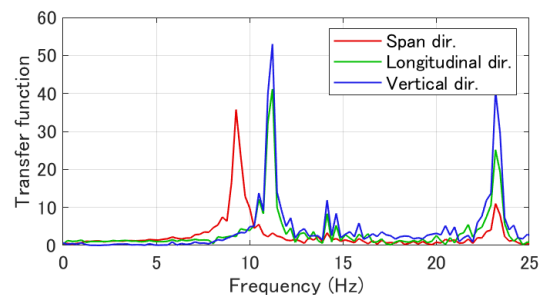


図6 伝達関数（模擬損傷：無し，Hachinohe NS，計測震度3）

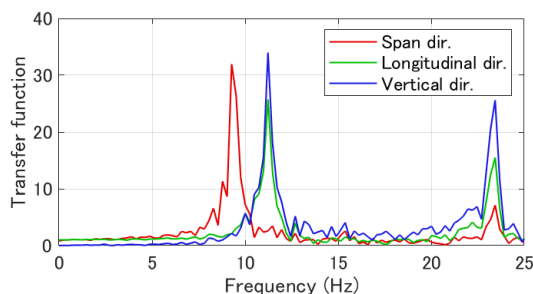


図7 伝達関数（模擬損傷：無し，ランダム波）

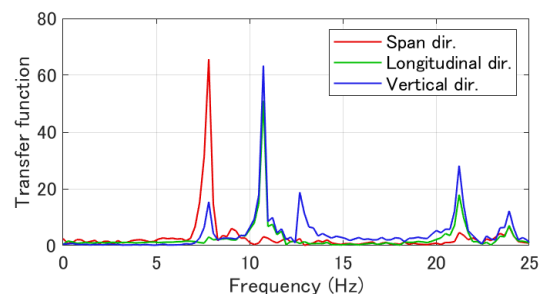


図8 伝達関数（模擬損傷：柱脚，EI Centro NS，計測震度3）

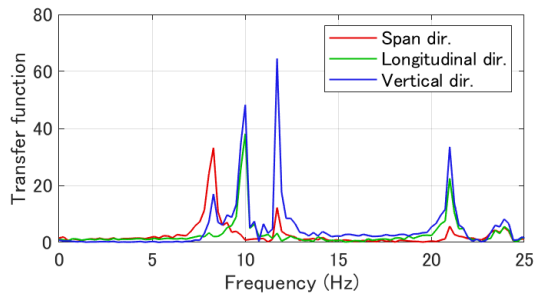


図9 伝達関数（模擬損傷：柱梁接合部，EI Centro NS，計測震度3）

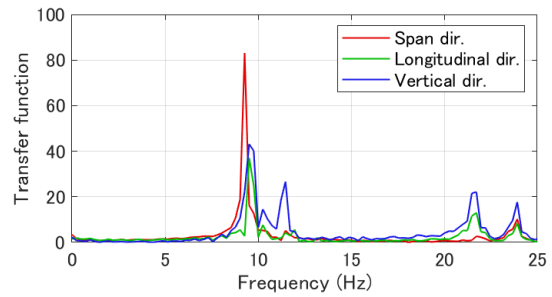


図10 伝達関数（模擬損傷：屋根頂部，EI Centro NS，計測震度3）

< 引用文献 >

- G. W. Housner, et al., Special issue, Structural control: past, present, and future, Journal of Engineering Mechanics, ASCE, Vol. 123, No. 9, pp.897-971, 1997.9
- 桐田 史生, 金澤 健司, 森清 宣貴, 北村 春幸, 建築物の地震損傷検知のための適応回帰型システム同定, 日本建築学会構造系論文集, 第619号, pp.65-72, 2007年9月
- 日本建築学会, ラチスシェル屋根構造設計指針, 2016年11月
- J.Y. Zhang and T. Aoki, Dynamic experiments on an HP shell roof, 12th Asian Pacific Conference on Shell & Spatial Structures, Penang, Malaysia, Oct., 2018.
- J. Fujiwara, A. Kishida, T. Aoki, R. Enokida and K. Kajiwara, Changes in the dynamic characteristics of a small-scale gymnasium model due to simulated earthquake damage, Journal of Disaster Research, Vol.16, No.7, pp.1074-1085, 2021

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Fujiwara Jun, Kishida Akiko, Aoki Takashi, Enokida Ryuta, Kajiwara Koichi	4. 巻 16
2. 論文標題 Changes in the Dynamic Characteristics of a Small-Scale Gymnasium Model Due to Simulated Earthquake Damage	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Disaster Research	6. 最初と最後の頁 1074 ~ 1085
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.20965/jdr.2021.p1074	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 藤原 淳, 梶原 浩一	4. 巻 67B
2. 論文標題 体育館縮小模型の打撃試験と模擬損傷による振動特性変化	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 構造工学論文集	6. 最初と最後の頁 243 ~ 250
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 藤原 淳, 梶原 浩一
2. 発表標題 空間構造への構造ヘルスマニタリング適用の試み
3. 学会等名 セミナー「シェル・空間構造の耐震設計における最近の発展」
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 J. Fujiwara, A. Kishida, T. Aoki, R. Enokida, K. Kajiwara
2. 発表標題 EXPERIMENTAL MODAL ANALYSIS USING SHAKE TABLE OF SMALL-SCALED GYMNASIUM WITH SIMULATED DAMAGES
3. 学会等名 17th World Conference on Earthquake Engineering (国際学会)
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

避難所建物の地震被害検知
<https://www.bosai.go.jp/info/event/2021/seika/kenkyudogaposter/pdf/pdf-002.pdf>

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------