

体育館を対象とした継続使用性の判断方法に関する検討

—振動特性とコンクリート基礎の損傷の関係—

白井 佑樹* 島崎 和司** 伊山 潤*** 涌井 将貴**** 荻本 孝久**

Study on the methods for determining the continuous usability of steel-framed gymnasiums

— Relationship between seismic vibration characteristics and damage to concrete foundations —

Yuki SHIRAI* Kazushi SHIMAZAKI** Jun IYAMA*** Masaki WAKUI**** Takehisa ENOMOTO**

1. 緒言

神奈川県横浜市内市立小学校等に設置された体育館の多くは、地震や台風等の災害時に避難所として機能する。地震時に避難所は、自宅が被災した住民にとっての避難中の生活空間となるだけでなく、地域の物資の拠点として、一時的なものでなく継続して機能することが求められる。そのため地震本震だけでなく、余震経験後も避難所として継続使用できるかどうかを被災区分判定に基づいて適切に判断することが重要となる。

通常は、災害後に一級建築士等の資格を有する専門家が現地へ赴き判断を行うため即時性はなく、余震経験後に再び専門家が判断することは現実的でない。また、本来物資の乏しい被災地に専門家が立入ることによる二次災害の危険性がある。さらに、熊本地震のように本震とされていた地震が前震であり、その後さらに大きな本震が発生する場合も考えられる。一方で、各自治体が所有する体育館の継続使用性を専門家ではない自治体職員が判断することができれば、即時性があり、繰返し余震にも対応することができる。

そこで本研究では、体育館をIoT化し常時監視することで専門家以外でも継続使用性を判断することができるシステムを開発することを目指す。IoT化することで、建物に立入ることによる二次災害発生を最小限に抑えることができる。常時監視する対象は、微動あるいは地震時の加速度とひずみ度の計測とする。一方、クライテリアとして被災区分判定に基づいた項目のうち、体育館の多くが鉄筋コンクリート基礎にアンカーボルトによって接続されていることに着目して、コンクリート基礎のひび割れ幅、およびアンカーボルトの損傷を対象とする。また本研究では、従来と比較して1/100～1/10程度の極めて低コストでの実測を目標としており、実用化に耐

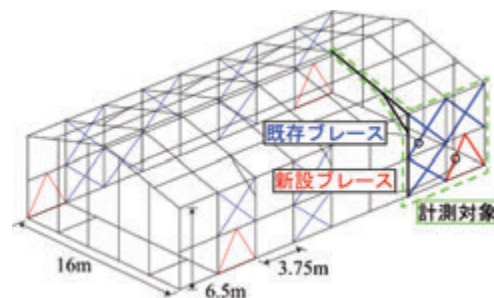


図1 計測対象建物の骨組全体概要

えうる計測装置、設置方法、実測から分析までの体系的なシステムが確立できれば、高い実用性が期待できる。

本研究でははじめに、神奈川県横浜市内市立小学校の鉄骨造体育館に、開発した低コストの加速度計測装置とひずみ計測装置を設置し、常時の監視を開始した。監視のためのネットワーク環境を整備し、オンラインで小学校の地盤加速度履歴、建物加速度履歴、そして建物主要部材の歪履歴を確認できるようになった。観測結果から、対象建物の基礎的な振動特性を把握する。

また、鉄骨造体育館を模擬した骨組み解析モデルを作成し、観測結果との比較検証を行った。解析モデルは設計図書等に基づき作成することで、設計で想定される振動特性や部材の応力状態を再現できると考える。ここでは地震時の固有振動数と鉛直ブレース軸力の観測結果と解析結果を比較することで、現状と設計での構造性能の違いについて検討する。

最後に、鉄骨造体育館基礎を模擬した構造実験を行った。観測対象とした体育館は、上部構造が鉄骨造、基礎構造が鉄筋コンクリート造で、H形鋼柱のフランジ内にアンカーボルトが設置された露出型柱脚であった。ここでは、静的載荷実験を行い、振動特性に重要な柱脚の回転剛性について検討する。

2. 鉄骨造体育館の観測概要

計測対象は神奈川県横浜市内の市立小学校体育館である。図1に

*助教 建築学科

Assist. Professor, Dept. of Architecture

**教授 建築学科

Professor, Dept. of Architecture

***准教授 東京大学 工学系研究科建築学専攻

Assoc. Professor, Dept. of Arch., GSE. The Univ. of Tokyo

****准教授 新潟工科大学 工学部工学科

Assoc. Professor, Faculty of Eng., Niigata Institute of Technology

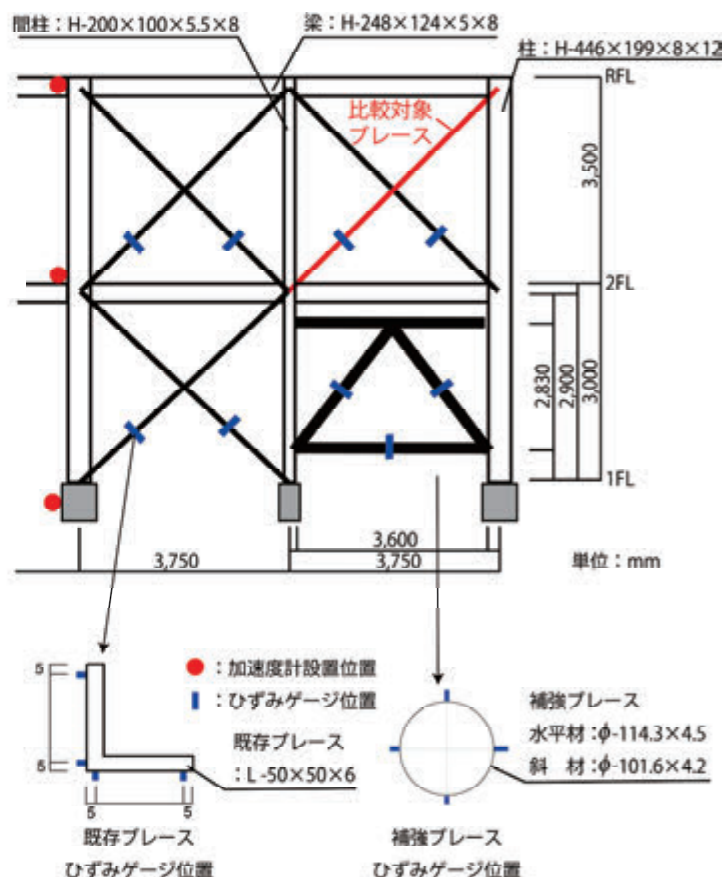
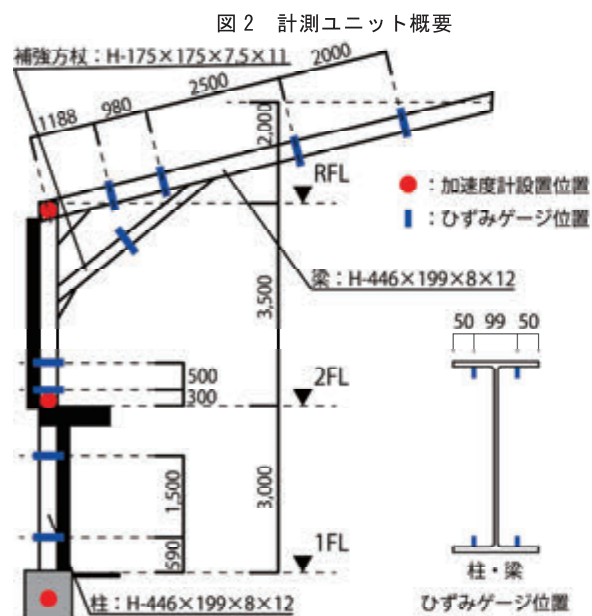


図3 計測位置

計測対象建物の骨組全体概要を示す。体育館は基礎が鉄筋コンクリート造、上部構造が鉄骨造であり、桁行方向はブレース構造、梁間方向は山形ラーメン構造である。1977年に竣工し、1996年頃の耐震補強工事によって、梁間方向の柱梁接合部への方杖、および桁行方向への補強ブレースとして円形鋼管 Φ -101.6 \times 4.2、 Φ -114.3 \times 4.5の増設が行われている。

計測システムの構成について、1つのセンサユニットは、1つのRaspberry Pi Zero WHとMEMS加速度センサ、あるいはひずみセンサが接続されている。計測データは、各センサユニットからWi-Fi経由でMQTTプロトコルを通じて、随時サーバーPCに送信される。各加速度センサユニットおよびひずみ計測ユニット間では厳密な時刻同期を取っていないが、NTPクライアントが作動し、秒単位以下の時刻同期は取られており、データはタイムスタンプとともにサーバーに送信される。

図2に加速度計測ユニットとひずみ計測ユニットを示す。加速度計測ユニットは、MEMS加速度センサADXL355を取り付けた基板をRaspberry Pi Zero WHにSPIにより接続している[1]。今回の計測では、データ取得の安定性と適切なサンプリング周波数の範囲から、サンプリング周波数を125Hz、計測レンジを $\pm 2.0G$ とした。

ひずみ計測ユニットはAD変換にはHX711を用いている[2]。HX711はホイートストンブリッジを用いた差分電位の計測を主目的としたマイクロチップである。極めて安価であるが、安定性や計測精度について適用性を検証する必要がある。図2(b)に示すように、今回の計測ユニットは、4つのHX711を1つのRaspberry Pi Zero WHに接続しているため、1つの計測ユニットで4点の計測が可能であ

る。サンプリング周波数はひずみ計測ユニットのクロック周波数によって決まっており、ユニットごとに若干の違いがあるが、87Hz程度のサンプリング周波数で安定して計測されている。

図3に梁間方向、桁行方向の計測位置を示す。梁間方向は柱頭2箇所、キャットウォーク位置に1箇所、柱脚基礎に1箇所の計4箇所に加速度計を1台ずつ設置し、柱4断面、梁4断面、方杖1断面の計9断面に半導体ひずみゲージ(共和電業製, KSNB-2-120-E4-11)を貼付した。ひずみゲージは、軸力および曲げモーメントが計測できるよう、各断面のH形鋼フランジの内側に計4枚ずつ貼付している。また桁行方向では鉛直ブレースを対象として、L-50 \times 50 \times 6の既存ブレース6断面、補強ブレース3断面の計9断面にひずみゲージを貼付した。なお、柱と間柱は桁行方向が弱軸となっている。また、補強ブレース、既存ブレースともに柱のフランジにピン接合されている。

以上より、加速度計測ユニット4台、ひずみ計測ユニット18台の計22台の計測ユニットによって計測を行った。計測は2020年11月下旬から開始している。

3. 鉄骨造体育館を模擬した骨組み解析と観測結果との比較

はじめに、解析概要について説明する。使用する解析ソフトは汎用立体フレームの弾塑性解析ソフトSNAPである[3]。設計図書及び実測により得られた数値を元に部材の寸法を決定し、モデル化を行った。SNAPによって作成したモデル及び計測対象は図1に示す骨組みである。モデル化に際し、非構造壁、体育館内部のステージなど解析結果に影響が少ないと想定されるものに関してはモデル化

を行っていない。柱脚は剛とし、基礎梁のモデル化も行っていない。なお屋根葺き材、キャットウォークはモデル化を行っていないが、それぞれ自重を屋根、2階の梁に固定荷重として加えている。また、補強ブレースである K 型ブレースは水平ブレースが負担する力が少ないと判断し、斜材のみをモデル化している。解析は弾性での固有値解析と地震時の応答解析である。

また屋根葺き材とキャットウォークの自重に関して SNAP のモデルの精度確認のため、一貫構造計算ソフト SS7 によるモデル化および常時荷重による軸力の解析を行った[4]。SNAP のモデルとの比較を行った結果、常時荷重の軸力は両者ほぼ同じ値を示していることを確認した。

以降は、2021 年 12 月 3 日午前 6 時ころ山梨県東部を震源とする M4.8、対象小学校所在地での震度 3 の地震を対象として検討する。

図 4 に観測例として、最大加速度を観測した任意の時刻範囲での加速度の時刻歴波形を示す。前述した通り、加速度記録には計測ユニットごとに時刻ずれがあるため、最大値を示す時刻が同一となるように修正している。1FL での最大加速度は 15gal、RFL での最大加速度は 26gal である。図 4 より加速度は、梁間方向について 1FL、2FL、RFL の順に大きく、2FL は RFL に近い。桁行方向について、RFL が突出しており、1FL、2FL はほぼ等しい。このことから、梁間方向では 1 層部分での変形が大きく、桁行方向では 2 層部分での変形が大きいことがわかる。

表 1 に加速度記録の伝達関数から求めた固有振動数と、解析での固有値解析結果を併せて示す。観測での伝達関数の固有振動数は、梁間方向 2FL で 4.8Hz 付近、桁行方向 RFL で 5.4Hz 付近、解析での固有振動数は、梁間方向 2FL で 3.8Hz、桁行方向 RFL で 4.9Hz であった。梁間方向はラーメン構造、桁行方向はブレース構造であるため、桁行方向の固有振動数が高いことが想定されるが、観測値と解析値とも桁行方向の固有振動数が高い結果となっている。観測値は解析値より高くなっており、梁間方向では体育館内ステージを構成する化粧板の水平力負担が想定より大きいことや、妻面壁内にブレースなどの耐震要素がある可能性などが考えられる。桁行方向では、キャットウォークの曲げ剛性を勘案できていないことが考えられる。鉛直ブレースについては後述する

図 5 に既存ブレースの軸力のフーリエスペクトルを、解析での地震時の応力解析の結果と併せて示す。解析では、地震時の建物基礎で観測された加速度記録を入力している。対象とした比較対象ブレースは、図 3 に示すように 2 層にあり、貼付した 4 枚の歪ゲージにヤング係数と断面積を乗ずることで軸力とした。なお、曲げ成分は小さかった。図 5 より、観測と解析ともに、固有振動数が 1.7Hz 付近と 5.4Hz 付近であり、表 1 に示す加速度桁行方向の固有振動数との対応が見られた。各周波数成分での軸力を比べると、1 桁程度観測値が小さい結果となり、ブレースが地震力を負担していないことを示唆する結果となっていた。これは、ブレースがボルト接合されているためズレが生じることが指摘されていることと対応する[5]。一方、前述の固有振動数では解析値が高いことと反する結果となっているので、解析モデルの高精度化等、引き続き検討していく。

4. 鉄骨造体育館柱脚を模擬した部材実験

図 6 に試験体を示す。試験体は、1000mm×800mm×500mm の基礎

部を模したスタブと H-200×450×14×9mm の H 形鋼柱から成る。スタブと柱の間には 200×450mm 厚さ 20mm のモルタルを敷設した。アンカーボルトは鋼種 SS400、軸径 Φ20 ねじ部 M20 で、その有効埋込み長さを 370mm とした。柱のベースプレート厚さは 15mm としたが、現行の告示ではアンカーボルト径の 1.3 倍以上 (26mm 以上) とされており、既存不適格となっている[6]。スタブは実在の基礎部よりも大きくコンクリート部での破壊が起こらないよう、2 重にせん断補強筋を設けた強剛なスタブとした。

表 1 固有振動数の比較

	梁間方向	桁行方向
観測値	4.8	5.4
解析値	3.8	4.9

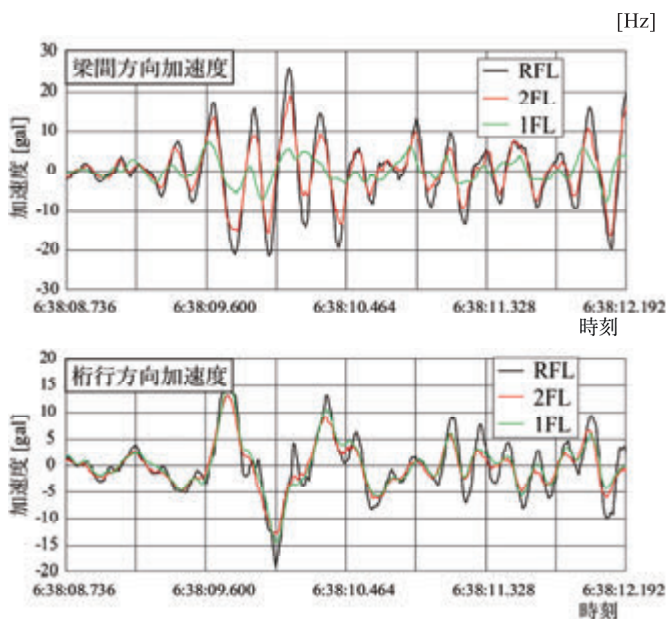


図 4 観測例 加速度の時刻歴

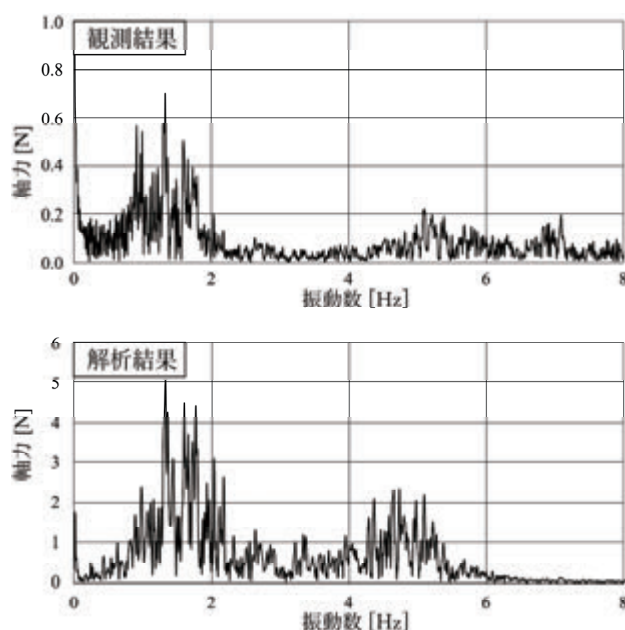


図 5 ブレース軸力のフーリエスペクトル 観測と解析の比較

