

木造伝統構法で復元された白石城の常時微動測定 —地震による被災と補修を繰り返した建物の固有振動数の変化—

境 茂樹^{*1}・仲野健一^{*2}・中村一男^{*3}・加藤貴司^{*1}

2021年と2022年の福島県沖の地震で被災した白石城について、地震後と補修後に常時微動測定を行い、伝達関数に基づく固有振動数と層剛性の変化について過去の結果と比較して考察した。その結果、固有振動数は被災後に低下し、補修後に上昇することを繰り返していることが示された。また、建屋の層剛性は、福島県沖の地震後に層剛性30～60%まで低下したが、補修工事後に77～91%まで回復したと推定された。このように、常時微動測定による固有振動数と層剛性の変化から、地震および補修工事が建物の振動特性に与える影響を定量的に示した。

キーワード：木造伝統構法、木造天守、常時微動測定、伝達関数、固有振動数、層剛性

1. はじめに

筆者らは木造伝統構法で復元された白石城について、竣工後から地震で被災する度に常時微動測定を行い、その振動特性の変化を把握してきた^{1),2)}。木造伝統構法の建物は、木軸の仕口部や土壁の挙動が十分に解明されておらず、適切な振動解析モデルの設定による解析的評価が難しい。そのため、建物の振動特性の把握において、常時微動測定（あるいは人力加振試験）が行われることが多い^{3)～6)}。常時微動測定を継続的に実施し、経時的な振動特性を把握することは、資料の乏しい木造伝統建築物の設計やその維持補修計画において、重要な基礎資料になると考えられる。本論文は、2021年と2022年の福島県沖地震によって被災した白石城の災害復旧工事前後で実施した常時微動測定結果に基づき、固有振動数および層剛性の変化を過去の測定結果と比較して考察したものである。

2. 建物および災害復旧工事の概要

2.1 建物の概要

白石城は木造伝統構法で復元された建物で、1992年（平成4年）に建築基準法38条の大臣認定を取得し、1995年（平成7年）3月に竣工した。建物規模は、地上3階建て、軒高13.3m、最高高さ16.7m、建築面積287m²、延床面積414m²、基礎構造は格子梁で補強したべた基礎とし、石垣地業は玉石手積みである。写真-1に竣工時の外観を示す。

2.2 地震の概要

2011年東北地方太平洋沖地震以来、白石城に再び被



写真-1 竣工時の外観（1995年3月）

害をもたらした地震は、2021年2月13日の福島県沖の地震（マグニチュードM=7.3）と2022年3月16日の福島県沖の地震（M=7.4）である⁷⁾。どちらの地震も白石市では震度5強の揺れを観測した。また、これらの地震による住宅被害は宮城県・福島県を中心に、2021年2月の地震では、住家全壊69棟、住家半壊729棟、住家一部損壊19,758棟の被害が生じ、2022年3月の地震では住家全壊217棟、住家半壊4,556棟、住家一部損壊52,162棟の被害が生じている⁷⁾。

2.3 被災状況と災害復旧工事の概要

白石城の構造計画書⁸⁾によると、柱・梁による架構は接合部等の固定度が低いため、純ラーメン架構での水平力の負担は考慮せず、外壁を構成する柱と貫によるフレームおよび土壁が水平力を負担するものとして構造設計がなされている。実際、被災状況を見ると、外側と内側の漆喰壁に被害が見られ、柱や梁などには損傷は認められなかった。3階の開口部（火灯口）周囲の土壁のせ

*1 地盤・基礎研究部 *2 研究開発推進部 *3 建築技術部



写真-2 2022年福島県沖の地震直後の被災状況と災害復旧工事の補修状況

ん断ひび割れが顕著で、これは2011年東北地方太平洋沖地震の被害とも酷似している。被害例を写真-2(a), (b)に示す。

土壁の補修は、伝統構法に則した作業工程（荒壁補修→棕櫚縄（しゅろなわ）補強→荒壁補修→中塗り土補修→砂漆喰補修→本漆喰補修）で施工しているが、今後の地震被害を少しでも軽減し、漆喰壁のひび割れの発生を抑制するために、今回の補修工事では、①漆喰壁グラスファイバーネット伏せ込み、②内側漆喰壁チリ際目地押さえを新たに採用した。これらの工法は伝統的な土壁工法と異なるが、

白石城の文化的価値を損なわないものとして採用した。補修工事の施工状況の例を写真-2(c)～(f)に示す。

3. 常時微動測定

3.1 測定方法

常時微動測定は、災害復旧工事前の2022年3月24日と、災害復旧工事後の2022年10月12日に実施した。常時微動測定に影響する気象条件である平均風速は、工事前の測定中は約5～10m/s、工事後の測定中は1m/s

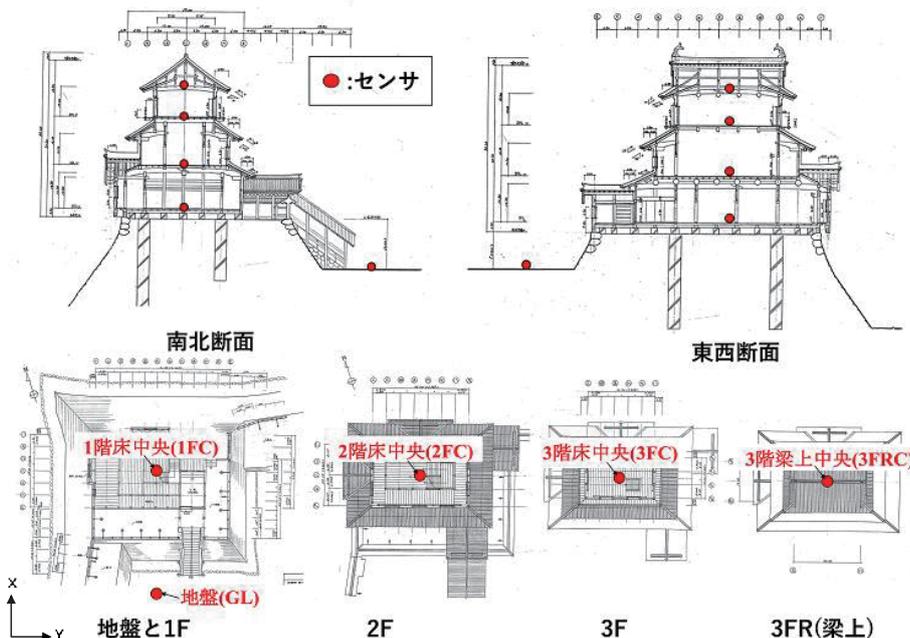


図-1 建物の断面図・平面図とセンサの配置（基本振動測定の場合）



(a) 3階小屋組み



(b) 1階床中央

写真-3 センサの設置状況

程度であり、工事前の測定データ処理においては風の影響を考慮した（詳細は次節に記載）。計測のセンサはJU410（白山工業製）を5台用い、加速度時刻歴波形を収録した。サンプリングは100Hzとし、測定レンジは±0.1G（アンプは100倍）、ローパスフィルタによるカットオフ周波数は40Hzとした。

計測は、同一ケースで20分間連続して測定した。センサ配置を図-1の建物の断面図・平面図上に示す。センサの設置状況を写真-3に示す。また、測定ケースは基本振動測定（並進振動）の他、ねじれやロッキング振動を計測するため合計4ケース実施したが、本論文では、基本振動測定の場合の結果を示す。

3.2 微動波形処理と伝達関数の算出方法

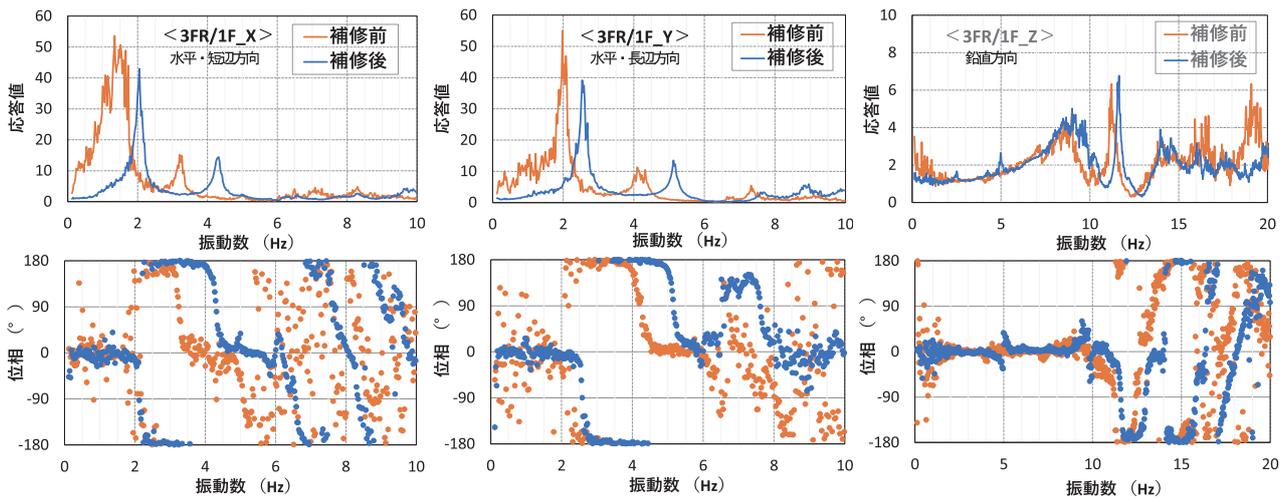
既報⁵⁾を参考に、各ケースで得られた20分間の加速度波形に対して、最小二乗法によるトレンド除去と6次のButterworthフィルタ（0.1-20Hz）を施した。その後1区

間につき4096点のデータを50%オーバーラップさせ、区間毎に波形を取り出す。次にFFTで各区間波形をフーリエスペクトルに変換して入出力のクロススペクトルと入力・出力のパワースペクトルを算出し、それぞれのアンサンブル平均の比をとることで伝達関数¹⁰⁾を求めた。式(1)で振幅 $H(f)$ を、式(2)で位相 $\theta_{io}(f)$ を得る。式中の G_{io} は入出力のクロススペクトル、 G_{ii} と G_{oo} は入力・出力のパワースペクトルである。また入力エネルギーによる基準化を行った¹⁰⁾。

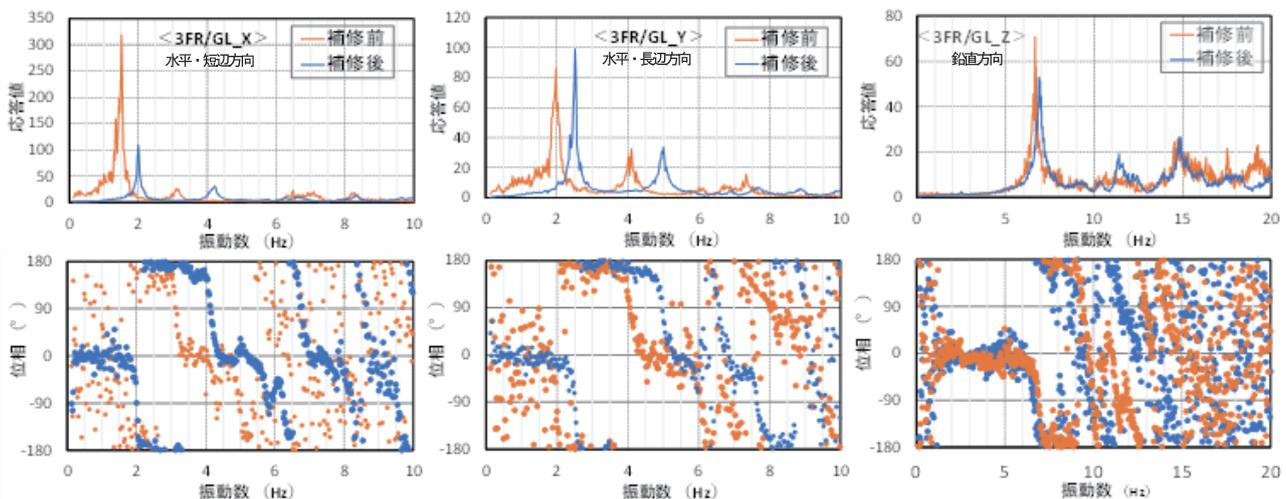
$$H(f) = \sqrt{G_{oo}(f)/G_{ii}(f)} \quad (1)$$

$$\theta_{io}(f) = \tan^{-1}(\text{Im}[G_{io}(f)]/\text{Re}[G_{io}(f)]) \quad (2)$$

なお、工事前の測定においては平均風速が5~10m/sであったことから、風の影響が懸念されたため¹¹⁾、出力（建物上部応答）波形の最大加速度PGAのRMS値に閾値（0.029cm/s²）を設けて、閾値を超えるデータ区間は風



(a) 1階に対する3階小屋組の伝達関数



(b) 地盤上 (GL) に対する3階小屋組の伝達関数

図-2 伝達関数（左：X方向，中：Y方向，右：Z方向）

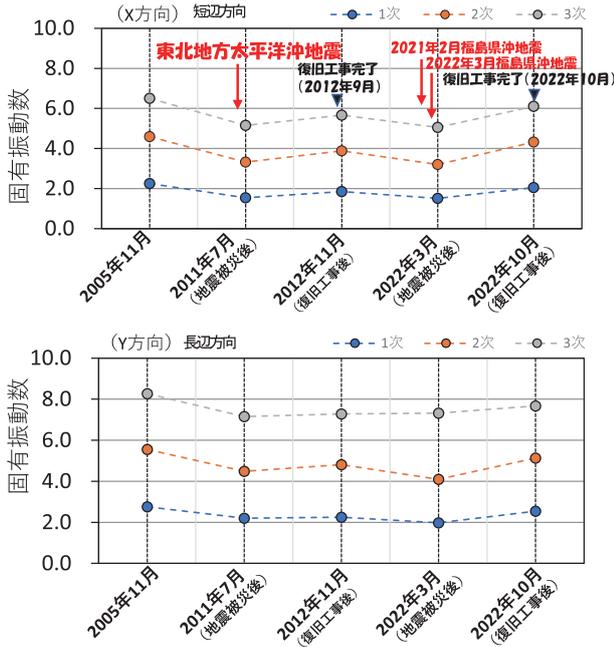


図-3 固有振動数の推移 (上: X方向, 下: Y方向)

の影響を受けていると仮定し、その区間を除去して伝達関数を算出した。工事後の測定はほとんど無風状況であったため、閾値を設けず伝達関数を算出した。

3.3 伝達関数の結果

測定データを用いて、災害復旧工事前後における3階小屋組の1階および地盤 (GL) に対する伝達関数 (振幅と位相) を図-2 (a), (b) にそれぞれ示す。X方向は短辺方向 (南北成分), Y方向は長辺方向 (東西成分), Z方向は鉛直方向を表す。その結果、いずれの伝達関数も災害復旧工事前に比べて工事後の1次, 2次のピーク振動数が高次側にシフトしている。Y方向は3次以降のピーク振動数も明瞭で高次側に移行している。

また、補修工事前の伝達関数には低振動数側で振幅に変動が見られるが、補修工事後の伝達関数の振幅は比較的安定している。地盤 (GL) に対する伝達関数は、1階に対する伝達関数と比較すると振幅レベルが大きく、ピーク振動数に大きな差は無いが、地盤-建物の相互作用の影響でやや低振動数側にピークが移行していると推察される。Z方向 (鉛直方向) については、補修工事前後の伝達関数のピーク振動数の変化の程度は水平方向に比べて小さい。

3.4 固有振動数の変化

図-3には、上記の水平方向の伝達関数 (3階小屋組/1階) より求めた建物の1次~3次の固有振動数の推移を示す。また、この図のX方向には測定時期と地震

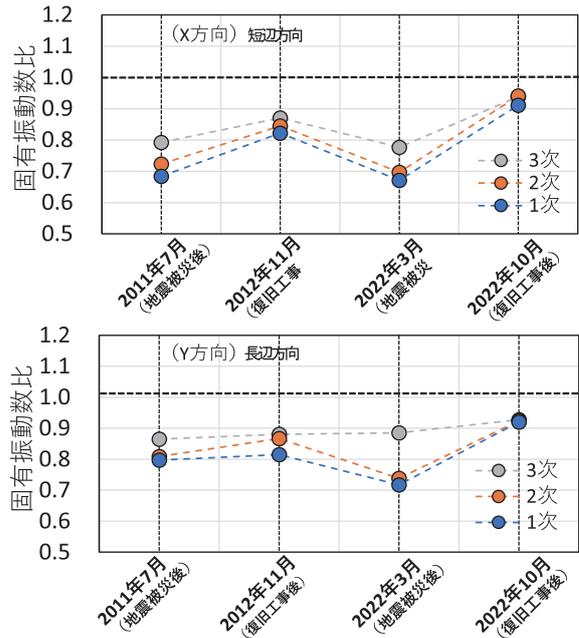


図-4 固有振動数比 (2005年を基準, 上:X方向, 下:Y方向)

発生、災害復旧工事の時期も合わせて示す。この結果から、被災する度に固有振動数が低下し、復旧工事後に固有振動数が上昇する傾向が認められた。この傾向は、Y方向も同様である。

この結果に基づき、竣工後の2005年11月の測定結果を基準 (1.0) として、固有振動数の変化 (固有振動数比) を表したものを図-4に示す。この図から、固有振動数は過去の地震で被災する度に低下し、復旧工事後にやや回復することを繰り返していることが分かる。また、2022年10月の復旧工事では、固有振動数は2005年の竣工後の測定結果に対して90%以上回復していることが確認された。

4. 層剛性の評価

既報²⁾を参考にして、常時微動測定の伝達関数の結果から層剛性を評価した。層剛性の算定は、建物をせん断型振動系とみなした非減衰自由振動を仮定し、建物各層の質量は設計図書⁸⁾に基づき表-1に示す値とし、1~3次モードの固有振動数とモードベクトルを1階床に対する各階の伝達関数から与えて求めた。

表-1 各層の質量

層	質量 [t]
3	58.6
2	90.8
1	168.6

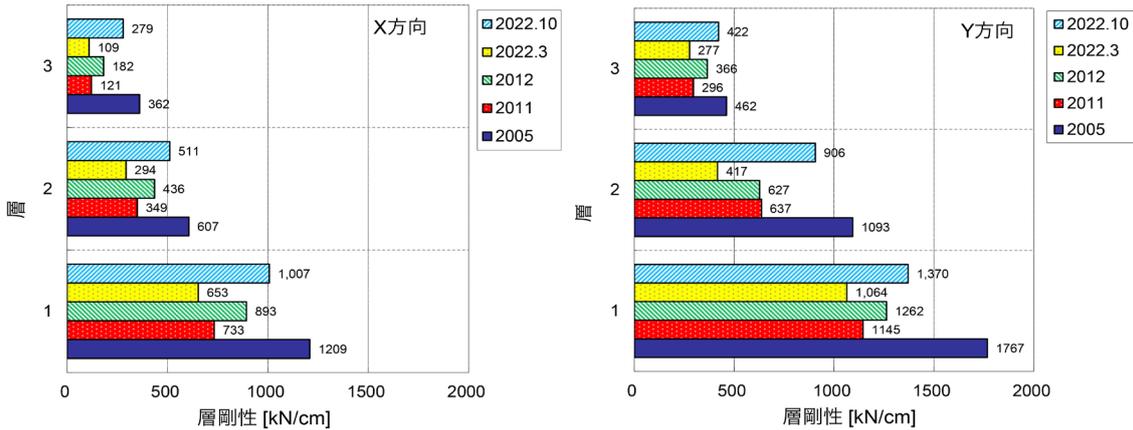


図-5 層剛性 (左: X方向, 右: Y方向)

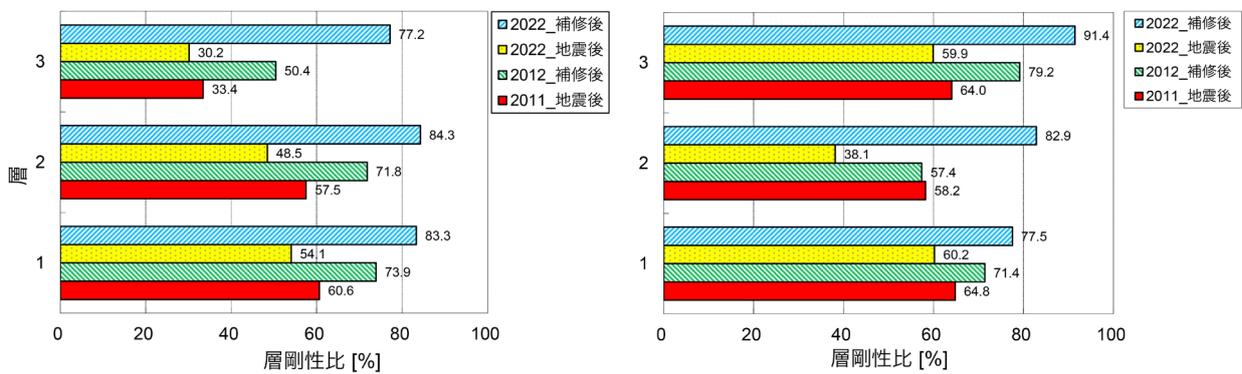


図-6 層剛性比 (2005年を基準, 左: X方向, 右: Y方向)

層剛性の算定結果を図-5に示す。また、竣工後(2005年)の結果に対する層剛性の比を図-6に示す。

図-5の結果から、各層の層剛性は2011年東北地方太平洋沖地震後、2021年と2022年の福島県沖の地震後に低下し、その災害復旧工事後に上昇することが示された。また、この図から2011年の地震後よりも2022年の地震後の層剛性の値が小さいことが確認された。

また、図-6に示す2005年に対する層剛性の比から、地震後に3層目のX方向(短辺方向)の層剛性の低下が著しく、この結果は被害状況とも対応している。また、2011年の地震で33~65%に低下した層剛性が、2012年の補修工事後には50~79%まで回復し、2021年および2022年の地震で30~60%まで低下した剛性が2022年の補修工事で77~91%まで回復した。現場写真や関係者へのヒアリングから、地震被害は2011年東北地方太平洋沖地震の方が、2021年と2022年の福島県沖の地震に比べて大きく、被害の状況と層剛性および層剛性比とは対応していない結果となっている。2022年の補修工事では、2.3節で述べたようにひび割れ抑制のグラスファイバーネット伏せ込みを施しているが、これが層剛性に大きく影響するとは考えにくく、2022年の補修工

事後の層剛性の回復の程度が大きい原因についてはよく分かっていない。今後、層剛性については、地震後や補修工事直後だけでなく、その経年変化についても分析していく必要があると考えられる。

5. まとめ

2021年と2022年の福島県沖の地震で被災した白石城について、地震後と災害復旧工事後に常時微動測定を行い、伝達関数を算出して固有振動数および層剛性の変化について過去の測定結果と比較して建物の振動特性を把握し、以下のことが示された。

- ・ 伝達関数から算定される固有振動数は、被災後に固有振動数が低下し、補修工事後に上昇することを繰り返していることが示された。
- ・ 竣工後の2005年の測定結果を基準として固有振動数比を求めたところ、一次の固有振動数比は2012年の補修工事後には82%まで回復し、2022年の補修工事後には91~92%まで回復することが示された。

- ・ 伝達関数の結果に基づき建屋の層剛性を評価した結果、2022年3月の地震後に層剛性は30～60%まで低下したが、補修工事後に77～91%まで回復したと推定される。

建物の層剛性の変化については、地震後、補修工事後のデータだけでなく、今後、経年変化を含めたデータを取得し分析していく必要があると考えられる。

謝辞

白石城の常時微動測定の実施については、白石市の関係者のご協力を得ました。また、災害復旧工事の現場所長はじめ工事関係者の協力を得ました。ここに、記して御礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 加藤貴司, 境茂樹, 田中靖彦: 伝統構法による大規模木造天守の常時微動測定 (その3) 東北地方太平洋沖地震後における振動特性の変化について, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造Ⅲ, pp. 421-422, 2012.
- 2) 加藤貴司, 境茂樹, 外館寛, 高橋豊: 伝統構法による大規模木造天守の常時微動測定 (その4) 東北地方太平洋沖地震で被災した白石城の災害復旧工事後の振動特性, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造Ⅲ, pp. 525-526, 2013.
- 3) 境茂樹, 山田憲明, 増田一眞, 加藤貴司, 外館寛: 伝統構法による大規模木造天守の常時微動測定 その1 測定の概要, 構造Ⅲ, pp. 447-448, 2006.
- 4) 加藤貴司, 山田憲明, 増田一眞, 境茂樹, 外館寛: 伝統構法による大規模木造天守の常時微動測定 その2 測定の結果, 構造Ⅲ, pp. 449-450, 2006.
- 5) 三室貴憲, 加藤貴司, 仲野健一, 三浦篤, 中村一男: 松江城における耐震補強工事前後の常時微動測定 その1: 部分移動測定の適用性確認と振動特性の把握, 構造Ⅲ, pp. 607-608, 2020.
- 6) 加藤貴司, 三室貴憲, 仲野健一, 三浦篤, 中村一男: 松江城における耐震補強工事前後の常時微動測定 その2: 振動特性に関する詳細検討, 構造Ⅲ, pp. 609-610, 2020.
- 7) 気象庁: 日本付近で発生した主な被害地震, <https://www.data.jma.go.jp/eqev/data/higai/higai1996-new.html> (2023年9月29日確認)
- 8) 宮城県白石市, (有) 建築文化研究所: 白石城三階櫓 構造計画書, 1992.
- 9) 日本建築学会: 建築物の減衰, 2000.
- 10) 理論地震動研究会: 地震動その合成と波形処理, 1994.
- 11) 石橋敏久, 内藤幸雄: 風外力の影響を受けた建物の常時微動による伝達関数の適用限界に関する検討, Vol. 507, pp. 87-94, 1998.

Microtremor measurements of a wooden castle restored by traditional construction - Changes in natural frequencies of buildings repeatedly earthquake damage and repair -

Shigeki SAKAI, Kenichi NAKANO, Kazuo NAKAMURA and Takashi KATO

Shiroishi Castle, which was restored using traditional wooden construction, was damaged in the 2011 Tohoku earthquake and again in the February 2021 and March 2022 earthquakes off Fukushima Prefecture. At Shiroishi Castle, constant microtremor measurements were carried out after construction was completed and before and after disaster restoration to understand the vibration characteristics of the building. In this paper, the results of the microtremor measurements before and after the disaster restoration in 2022 were compared with the results of past measurements, and the changes in natural frequencies and layer stiffness were analyzed.