

城郭を中心とした歴史的建造物の復元と それを支える技術

木造天守と石垣の復元・修復工事に携わって

外 館 寛

わが国の歴史的建造物において最もシンボリックなものとして城郭が挙げられる。現在、地方再生の役割も担い、全国に数多くの天守が復元されているが、伝統木造構法に基づき忠実に復元されたものは数少ない。また、城郭において石垣や土塁は天守と並びその景観を構成する重要な要素であり、歴史的・文化的な価値の高い土木構造物である。本報では、伝統木造構法による天守の復元と、日本古来の石積み技法による石垣の調査・修復に関して、それら伝統技術を解明し後世に継承していくために、さまざまな現代の技術やノウハウを活用した事例を紹介する。

キーワード：城郭，伝統構法，木造天守，木組み，石垣，修復技術

1. はじめに

現在、全国各地に城郭の天守や石垣が復元されているが、伝統的な技術の発掘や継承なくして、歴史的建造物の復元や修復は不可能である。それと同時に、伝統技術を駆使して木造天守や城郭石垣を復元する場合、現代の設計法に則した厳しい安全基準をクリアしなければならない。

本報では、筆者が携わった歴史的建造物の復元工事のうち、本格的な伝統木造構法で建築された大洲城と白石城の復元工事について紹介する。なお、大洲城の復元工事については既報¹⁾で完成に至るまでの地域住民の熱意と取り組み、工事内容の詳細について紹介しているので、ここでは工事に関連して開発・適用した現代技術を中心に紹介する。

また、わが国の城郭においては、石垣や土塁も天守とともにその景観を構成する重要な要素であり、歴史的・文化的な価値の高い土木構造物である。そこで、日本古来の石積み技法による石垣修復工事に欠かせない最新技術についても合わせて紹介するものとする。

2. 木造天守の復元と導入した現代技術

(1) 大洲城天守の復元

鎌倉末期の築城に始まる大洲城は、17世紀初頭に天守を戴く本格的な城郭としての姿を整えたといわれている。その天守が姿を消して百十余年、大洲市民の夢と情熱が実を結び、平成16年に往時の雄姿そのま

まに大洲城天守が甦った。写真—1に大洲城の全景を、写真—2に天守1階の内部の状況を示す。

本工事は本丸跡に4層4階の木造天守を築き、現存する重要文化財の台所櫓と高欄櫓を多聞櫓で結び、複連結式天守群として復元したものである。天守の最高高さは19.15mであり、戦後復元された木造天守とし



写真—1 大洲城の全景



写真—2 天守1階内部

ては国内一の高さを誇っている。この工事は、史料や古写真などの資料が豊富だったことに恵まれ、高い精度の復元工事であったことから、建築基準法3条の適用除外を受けることができた。

木造伝統建築の復元で最も重要な木組みでは、経験豊富な宮大工と地元大工が熟練した技術を展開し、伝統技術を継承、練磨する一方で、全天候型仮設屋根の構築、漆喰壁の保存、構造耐力の確認など、さまざまな分野で最新技術を導入した¹⁾。

(2) 白石城天守の復元と震災による復旧

白石城は、江戸時代に仙台藩で唯一天守を戴いた城であり、片倉小十郎（伊達政宗の忠臣）の居城として知られている。明治7年（1874年）に解体されてから120年近くを経た平成7年（1995年）に再びその姿を現した。元和1年（1615年）に発せられた一国一城令では、特別に破却を免れた。慶応4年（1868年）、戊辰戦争に際して、官軍に抗戦する目的で締結された三十一藩から成る奥羽越列藩同盟の調印もこの城で行われている。

本工事が実施された平成4年（1992年）においては、建築基準法により13mを超える本格的な木造建築は禁じられていたが、建築基準法の第38条の建設大臣特別認定（当時）により、16.7mの高さ（当時の木造で最高高さ）を実現することができた。

この工事においては、本丸内にあった三階櫓（天守）や大手一ノ御門、二ノ御門、土塀が復元された。本工事は、日本古来の木組み、8寸の厚さに19の工程を要する土壁塗り、そして、発掘されたものを忠実に再現した4万枚以上の瓦を使用する瓦葺など、伝統技術を総動員して進められた。また、土壁のせん断試験など、現代の技術を随所で活用し、木造による本格的な城郭の完全復元という日本初の試みを成功させた。

さらに、この白石城は、平成23年（2011年）3月11日に発生した東日本大震災およびその後の余震によって、壁の損傷や屋根瓦の落下などが生じ、大きな被害を受けた。被災後の調査では、被害は大規模かつ



写真一3 白石城の全景



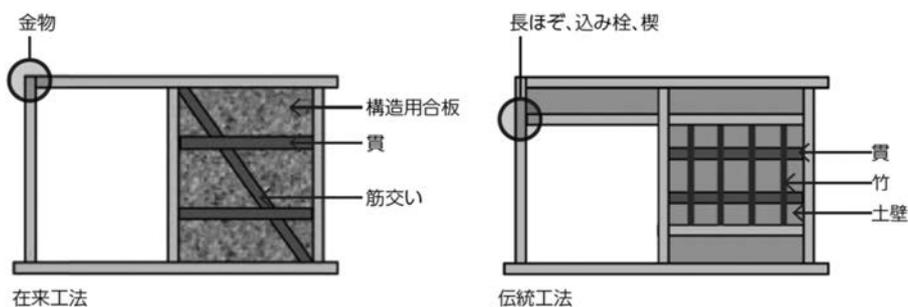
写真一4 3.11地震による被災状況

広範囲にわたり、石垣の崩落や木組みの損傷には至らなかったものの、地震発生時に大きな揺れが建物に作用したと考えられる痕跡と変形が確認された。写真一3に白石城の全景を、写真一4には東日本大震災による被災状況を示す。

(3) 復元工事に関わる技術事例

(a) 伝統木造構法の構造実験

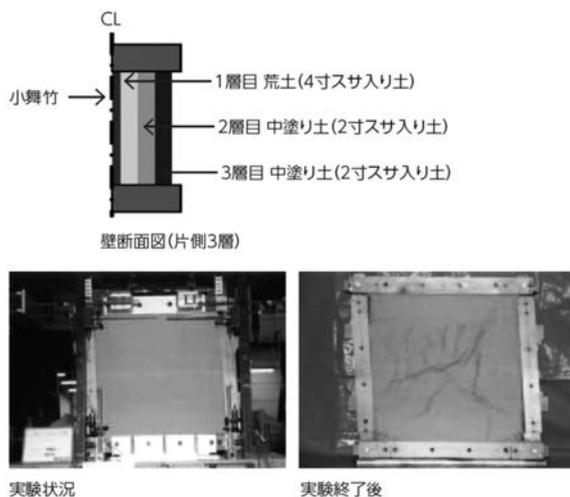
伝統木造構法とは、仕口部（柱と梁の接合部）に釘や金物などを使わない構造で、貫や梁は木材のめり込みを利用した一種のモーメント抵抗接合である。構造要素としては、貫、脚固め、差し鴨居や土壁などがある。しかし、これらの構造要素は構造性能が明確になっていない点が多く、構造設計を行う際、構造要素の強



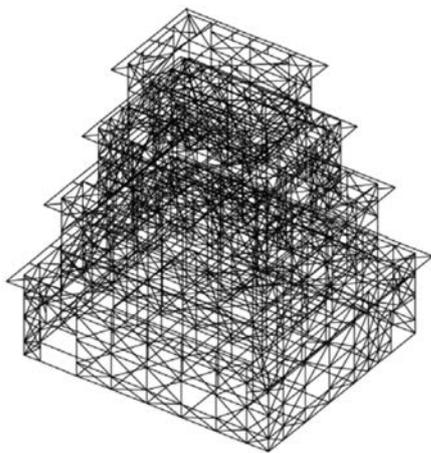
図一1 在来工法と伝統工法の構造要素の比較

度試験を実施しその構造性能の確認が必要である。図一1に在来工法と伝統工法の構造要素の比較を示す。

前述の白石城の復元では、(財)日本建築センターの構造評定を取得する際に、土壁が負担できるせん断力の評価が課題となった。そこで、実際の土壁を模擬した試験体を用いてせん断加力実験を実施し、土壁のせん断強度を定量的に評価し、土壁には $1.0 \times 10^{-3} \text{N/mm}^2$ 以上の終局せん断強度が期待できることを明らかにした^{2), 3)}。図一2に塗り土壁の断面図と構造実験の状況を示す。



図一2 塗り土壁の断面図と構造実験の状況



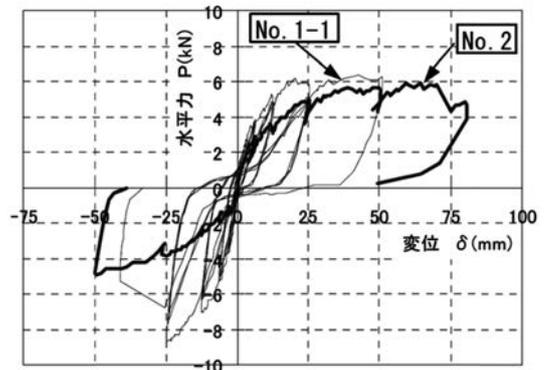
図一3 構造解析モデル

また、大洲城の復元工事において、設計では図一3に示す立体フレームモデルによる構造解析を実施⁴⁾しているが、その際、貫や繋ぎ梁による柱梁接合部の回転剛性の設定が課題となり、設定モデルの妥当性を検証するため、木造仕口部の強度変形状に注目した構造試験を実施した⁵⁾。図一4に試験体の部位と構造実験の状況を、図一5にはト型試験体の構造実験で得られた荷重—変形関係を示す。試験体の主な柱と梁の仕口は、「長ほぞ差し鼻栓打ち」と「込み栓打ち」の2種類で、柱と貫の仕口は通し貫とした。実際の構造体では、柱には地栓と木曾栓、土台は栗が使用されていたことから、試験体も同じ材料で作成した。試験の結果、構造設計で設定した回転剛性の評価方法は、ト型試験体および十字型試験体の実験結果と概ね良い対応を示すことが確認された⁵⁾。

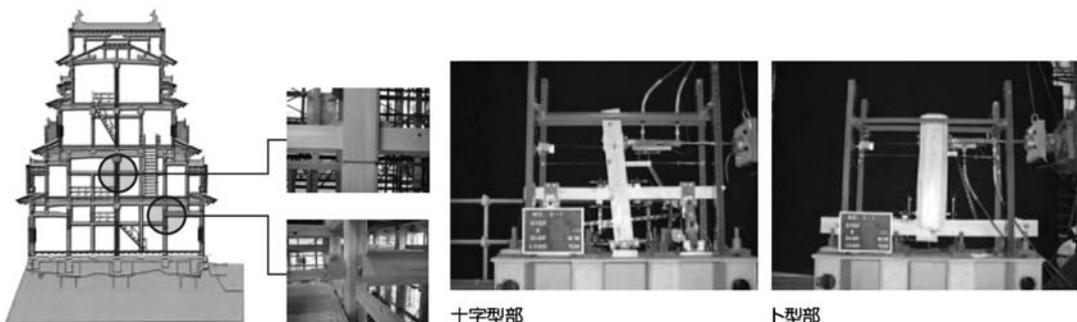
(b) 天守の振動測定

伝統木造構法は長い歴史による実績がある反面、鉄筋コンクリート造や鉄骨造などの近代構法に比べ、耐震工学的な性能の解明が置き去りにされてきた。地震の多いわが国では、伝統木造構法によって建てられた天守の振動特性を把握することは重要であると考え、上記の大洲城と白石城において振動測定（常時微動測定と人力加振実験）を実施した^{6), 7)}。

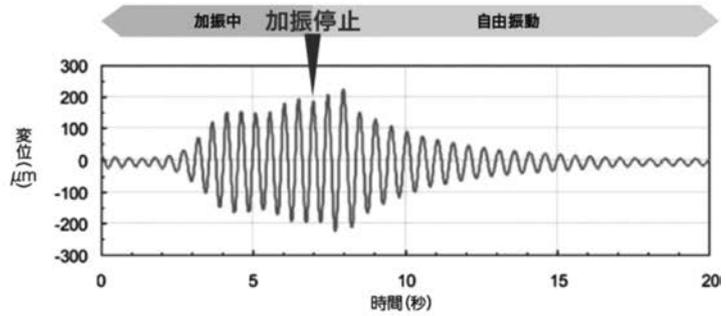
常時微動とは、地盤に常時生じている0.1マイクロン



図一5 荷重—変形関係（ト型試験体の例）
No.1-1：長ほぞ差し、込み栓打ちの試験体、
No.2：長ほぞ差し、込み栓なしの試験体の結果



図一4 試験体で取り出した部位と構造実験の状況



図一六 人力加振実験の様子と実験で得られた減衰振動波形

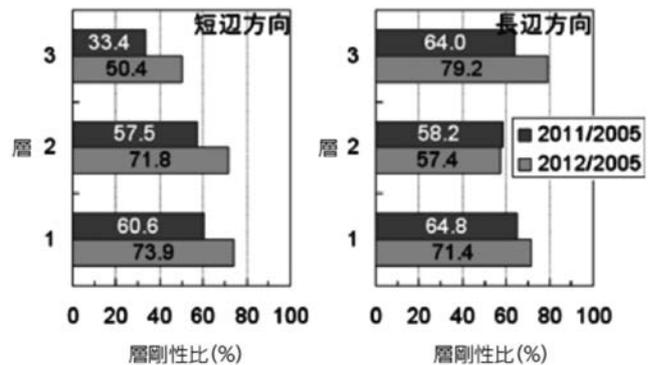
～数百マイクロン程度の微小な揺れであり、これによって励起される建物の微小な揺れを測定・分析することで、建物の固有振動数（建物の揺れやすい振動数）や振動モード（立体的、平面的な揺れ方）などの基本的な振動特性を把握することが可能となる。

図一六に大洲城において減衰性能を把握するためにに行った人力加振実験の様子を示す。建物が共振するタイミングに合わせて建物の揺れを増幅させ、加振停止後の振動（自由振動）を測定し、自由振動が小さくなる傾向から建物の減衰定数の値を把握した。人力加振実験の結果、木造天守の減衰定数は2～3%程度と推定された⁷⁾。

白石城は前述した通り東日本大震災で被災したため、震災前と震災後さらに補修後の常時微動を測定している^{8), 9)}。図一七には、震災前後の振動モードを比較した結果を示す。この図から、震災前には土壁の剛性が効いてロッキング（回転）の生じる振動モード形を示していたが、震災後はロッキングが減少し、せん断型の振動モード形となり、かつ3層部の変形が大きい傾向を示し、震災後の目視調査結果による被害程度とも対応することがわかった。これは、震災による土壁の被害により壁の剛性が低下し、木軸組のみのせん断剛性による、せん断型の挙動を示すように変化したためと考えられる。震災により壁の剛性は低下したが、地震時に土壁がエネルギーを吸収して損傷することで、木軸組の柱や梁への地震力の負担が軽減され、大きな損傷を免れたとも言うことができる。すなわ

ち、土壁が現代技術でいういわば制震要素的な働きをしたと考えられ、非常に興味深いデータが得られた。

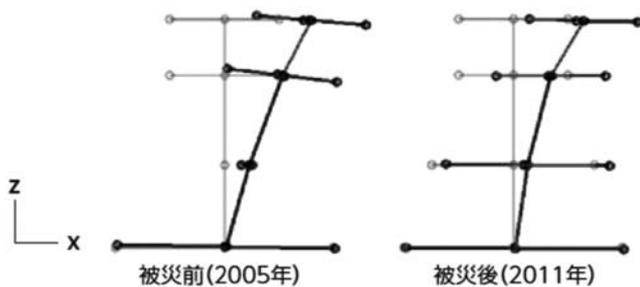
また、震災前、震災後、補修後の常時微動測定結果を利用して、天守の各層の剛性を評価し、震災前と比較して検討した⁹⁾。その結果を図一八に示す。この図から、震災後の剛性は、震災前に比べて被害程度の大きい短辺方向の3層部では33%程度まで低下し、その他の層では50～60%程度の低下であったものが、補修工事後には50～75%程度まで剛性が回復したことがわかる。しかし、天守の剛性は震災前の状態には完全に回復していないことから、塗り土壁の内外からの補修のみでは不十分であることがわかった。こうしたことから、目視できない土壁の内部の被害程度などを把握して、その内部まで補修できる補修材や補修方法の開発が今後期待されている。



図一八 震災後と補修後の層剛性比 (2005年比)

3. 石垣の調査・修復技術

天守等の木造構造物と並んで、その基礎をなす石垣もわが国の城郭の大きな特徴を示すものであるが、セメント等の接着剤を用いない「空積み^{からづ}」で構築される石垣の力学的な特徴や耐震性などは十分に研究されているとは言い難い。こうした背景において、以下では、石垣の内部構造を評価する調査技術と安定性評価のための解析技術について紹介を行うものとする。



図一七 白石城の振動モード形 (短辺方向1次モード)

(1) レーダーによる石垣調査技術

石垣の健全性評価において、その内部構造を調査することは非常に重要である。筆者らはレーダーによる石垣調査技術を開発し、実際の石垣調査に適用することでその有効性を確認してきた。この技術は、電磁波を石垣内部に送信し、その反射波を分析することで内部構造を把握する技術であり、貴重な文化財を傷つけないで調査できる非破壊調査法である。反射波の解析から、石材の控え（奥行き方向の長さ）や裏栗石の分布状況、空洞の有無やその範囲を推定することができ



レーダーアンテナ



調査状況

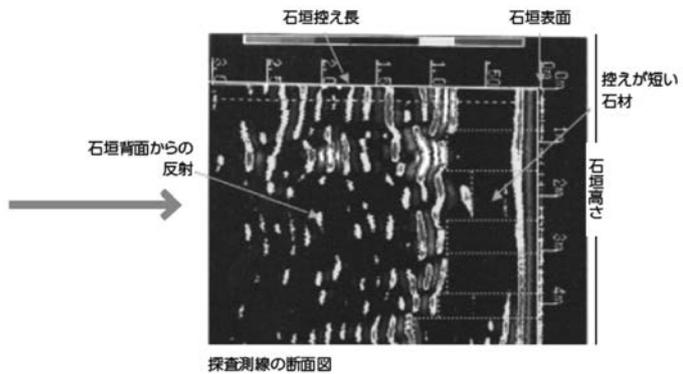
写真—5 レーダーによる石垣調査の状況

る。写真—5にレーダーによる石垣調査の状況を、また、図—9にはこの調査方法による石垣背面の断面構造の推定結果の事例を示した。この図から石材の控えや裏栗の状況などが確認できることがわかる¹⁰⁾。なお、本技術は石垣の安定性評価に関する調査のほか、補修計画の立案などに広く適用されている。

(2) 石垣の安定性解析

石垣の安定性を客観的に評価するためには、不連続体である個々の石材および裏栗石と地盤の相互作用を、適切にモデル化して解析する必要がある。ここでは、筆者らが関西大学と共同で開発した個別要素法による石垣の解析技術を紹介する。個別要素法は、連続体構造物の解析に用いられる有限要素法とは異なり、要素間の接触や分離、すべりなどを表現できる手法で、石垣のような不連続な構造物の解析に適している。図—10に個別要素法の概要を示す¹¹⁾。

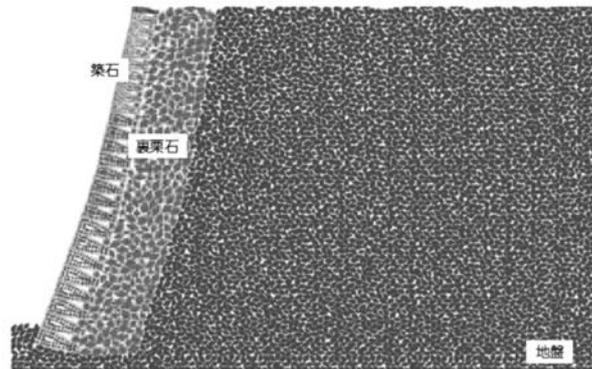
本技術により石垣の根石前面の補強効果を検討した事例を図—11に示す。実際の城郭石垣（高さ13m）を参考とした解析モデルについて、同じ地震動を入力して解析を行った結果、根石周辺に補強工である「砕工」を施し、同時に裏栗石層の整備と背面地盤の改良



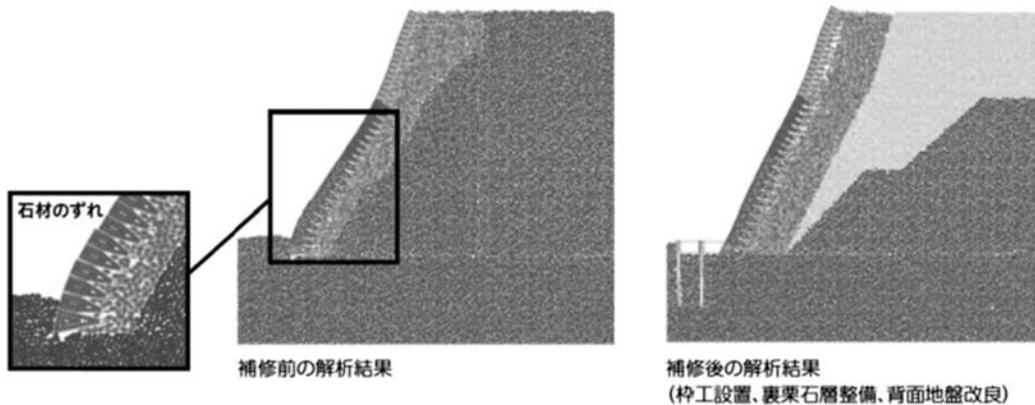
図—9 石垣背面の断面構造の推定結果



石垣モデル
築石、裏栗石、地盤からなる石垣を個別要素の集合体としてモデル化します。



図—10 個別要素法による石垣の安定性解析



図一 11 高石垣の安定性解析の実施例

を行った「補修後の石垣」では根石周辺の変位量が「補修前」より大きく低下しており、より高い耐震性能を有していることが示された。このような解析技術は、実験的に評価することが難しい石垣の耐震性の評価や補強工の効果を確認する上で有効な方法であると考えられる。

以上のように、最新の調査・解析技術を駆使することは、日本独特の伝統技術による石垣の維持・管理、保全を進める上で、その技術の伝承と同様に極めて重要である。

4. おわりに

伝統構法による歴史的建造物の復元・修復について木造天守と石垣を例に、現代技術との関わりについて紹介した。

歴史的建造物の復元においては伝統技術の伝承とその技術を受け継ぐ職人の育成が必要で、そのためには座学ではなく実際のものづくりが不可欠であり、今後、多くの職人がものづくりの現場に携われる機会が増えることを切望する。

また、伝統技術を継承していくためには、その技術のしくみや成性を解明・把握することが重要である。現代技術に基づく実験や試験、コンピュータを駆使した高度解析技術はその有効な手段である。伝統技術と現代技術のコラボレーションが今後さらに期待される。

数百年から千年を経て現代まで受け継がれ守られてきた歴史的建造物は、建設当時の人々の思いや技術だけでなく、さまざまな歴史の変遷の中で、各時代の人々の熱意とその時代の技術を駆使して守り抜いた歴史があり、平成の時代に生きる我々も、情熱を傾け技術を駆使して後世に継承していくことが必要である。「平成の復元・修復」の妥当性については、おそらく100年以上経過した後世の人々が評価してくれるはずであ

り、その評価に値するものを、我々は残していかなければならない。

JICMA

《参考文献》

- 1) 外館寛：大洲城天守復元工事に携わって、特集 歴史的遺産・建造物の修復、復元 建設の施工企画、pp.58-64、2008年5月
- 2) 伊藤倫顕、長稔、戸田哲雄、外館寛、増田一眞：塗り土壁のせん断耐力に関する実験的研究（その1）、日本建築学会大会学術講演梗概集、C-1、pp.31-32、1995.7
- 3) 長稔、伊藤倫顕、戸田哲雄、外館寛、増田一眞：塗り土壁のせん断耐力に関する実験的研究（その2）、日本建築学会大会学術講演梗概集、C-1、pp.33-34、1995.7
- 4) 山田憲明、外館寛、松浦恒久、増田一眞：伝統的木造による建物の設計および仕口部の構造性能（その1）、日本建築学会大会学術講演梗概集、C-1、pp.425-426、2005.7
- 5) 松浦恒久、外館寛、山田憲明、増田一眞：伝統的木造による建物の設計および仕口部の構造性能（その2）、日本建築学会大会学術講演梗概集、C-1、pp.427-428、2005.7
- 6) 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、日本建築学会大会講演梗概集、構造Ⅲ、pp.447-448、2006.
- 7) 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）測定の概要、日本建築学会大会講演梗概集、構造Ⅲ、pp.448-449、2006.
- 8) 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）2011年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、日本建築学会大会講演梗概集、構造Ⅲ、pp.421-422、2012.
- 9) 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、日本建築学会大会講演梗概集、構造Ⅲ、pp.525-526、2013.
- 10) 笠博義、平井光之、大沢克比古、莊林茂徳、小林力：城郭石垣の健全度診断への非破壊調査技術の適用性について—電磁波を利用した石垣控え長の測定—、第34回地盤工学研究発表会論文集、Vol.34、pp.371-382、1999.7
- 11) 野間康隆、西村毅、山本浩之、笠博義、西形達明、西田一彦：城郭石垣の補修効果に関する動的安定性の検討、第13回岩の力学国内シンポジウム&第6回ジョイントシンポジウム講演論文集、pp.277-282、2013.

【筆者紹介】

外館 寛（とだて ひろし）
安藤ハザマ
建築事業本部技術統括部 技術部
担当部長

