

令和 6 年能登半島地震における文化財建造物の耐震対策に関する調査結果

1. 調査の目的

文化庁では、文化財建造物の耐震対策（耐震診断、耐震補強）について、平成 7 年の阪神・淡路大震災以降、文化財建造物等の耐震性能の向上に係る方策として「文化財建造物等の地震時における安全性の確保に関する指針」及び「重要文化財（建造物）耐震診断指針」並びに耐震予備診断・耐震基礎診断実施要項、手引を策定し、環境の変化を踏まえた改定を行いながら耐震診断及び耐震補強工事の実施を促してきた。

しかしながら、令和 6 年 1 月 1 日に発生した令和 6 年能登半島地震で、耐震補強済の文化財建造物が倒壊するなど多数の文化財建造物が被害を受けた。これを受け、被害状況の調査と原因の分析、耐震対策の方向性についての検証を行うため、専門家による文化財建造物の耐震対策の技術的事項に関する協力者会議を設置し、調査を実施した。

「文化財建造物の耐震対策の技術的事項に関する協力者会議」

（◎座長、○副座長、以下五十音順）

- ◎腰原 幹雄（東京大学生産技術研究所教授）
- 須田 達（金沢工業大学建築学部建築学科教授）
- 池本 敏和（金沢大学理工研究域地球社会基盤学系地震工学講座講師）
- 北 茂紀（株式会社北茂紀建築構造事務所代表取締役）
- 瀧野 敦夫（大阪工業大学建築学科准教授）
- 西川 英佑（関西大学環境都市工学部建築学科助教）

2. 調査の対象及び着眼点

（1）調査の対象

文化財建造物全体の地震被害を概観した上で、倒壊などの被害を生じた耐震補強済の文化財建造物を主な調査対象とし、比較として倒壊を免れた近傍の文化財建造物も対象とした。

- 重要文化財 旧角海家住宅主屋（倒壊・耐震補強済）
- 登録有形文化財 總持寺祖院（禅悦廊）（倒壊・耐震補強済）
- 同（禅悦廊以外）（傾斜、小被害・耐震補強済）
- 重要文化財 時国家住宅（傾斜・耐震補強済）
- 重要伝統的建造物群保存地区輪島市黒島の建造物

また、地震力についても各地で観測された地震波や、既往の調査、研究等から可能な範囲で分析を実施した。

（2）調査の着目点

- ・地震力の大きさ（観測波、地盤種別、加速度増幅率、地震地域係数）

- ・耐震補強設計（診断方法、診断時の建物モデル化、補強方法）
- ・現在の耐震設計方法で実施した場合どうか。

3. 調査結果

(1) 地震力の設定

a. 観測された地震波の特徴と各文化財建造物に生じた地震動の推定

今回の能登半島地震では、能登地方の広い範囲で震度 6 強以上の地震動が多数観測された。輪島、走出、穴水の観測点（JMA 輪島、JMA 走出、K-NET 穴水）で観測された地震波は、木造建築の固有周期に近い周期 0.5～3 秒くらいの成分が大きく、木造建築の被害を大きくした可能性がある。

このうち總持寺祖院や旧角海家住宅が所在する黒島地区に近い JMA 走出で観測された地震波の加速度応答は周期 0.5～3 秒くらいで、設計用地震動（地盤種別第 1～3 種、地震地域係数 $Z=1.0$ の場合）の加速度応答を大きく卓越していた。

微動測定や S 波速度の調査結果からは、總持寺祖院は場所により地盤が走出と同等かそれより軟弱である可能性があり、旧角海家住宅は走出よりはやや硬いが、黒島の北半の地区に近い軟弱地盤の可能性もある。よって、少なくとも總持寺祖院、旧角海家住宅に生じた地震動は、長周期が設計用地震動より卓越した地震動であった可能性がある。

なお、輪島市町野町の上時国家住宅、時国家住宅は、近傍に観測点がなく、正確な地震動は不明である。しかし耐震補強済の上時国家住宅納屋、時国家住宅（主屋）の被害状況を見る限り、想定以上であったとまでは判断できない。

b. 地盤種別、加速度増幅率

地震動の大きさは、地盤の硬軟の影響を強く受ける。耐震設計においては、地盤種別の設定とそれに伴う加速度増幅率 G_s の設定、地震地域係数 Z により反映され、建物の補強量に大きな差を生じる。加速度増幅率 G_s の設定は第 1 種～第 3 種の 3 種類の地盤種別から設定する略算法と、地盤調査等から加速度増幅率 G_s を計算して求める精算法がある。略算法で建物の固有周期が 0.64 秒以上の場合、第 1 種地盤では $G_s=1.35$ 、第 2 種地盤では $G_s=2.025$ で、1.5 倍の差が生じる。さらに地震地域係数 Z がこれに乗算され、 $Z=0.9$ の場合は 1.0 に比べ 1 割小さい値となる。

旧角海家住宅主屋の耐震補強設計は、杭基礎を支持地盤まで設置しており、第 1 種地盤とし略算法で加速度増幅率 $G_s=1.35$ 、地震地域係数 $Z=1.0$ に設定していた。しかし、黒島地区の被害状況を見ると、旧角海家住宅を含む北半の地区が大きな被害を受けており、南半の地区は北半の地区に比べ比較的被害は小さい傾向がある。北半の地区は比較的被害が大きく、倒壊した旧角海家住宅の地震動が周辺より小さかったとは考えにくい。

總持寺祖院禅悦廊では、加速度増幅率 G_s を精算法の考え方に準じて J-SHIS（防災

科学技術研究所・地震ハザードステーション)を参考に $G_s=1.5$ 、地震地域係数 $Z=0.9$ に設定していた。しかし、これも被害状況や地盤調査、門前町走出で観測された地震動などから設計想定以上であった可能性が高い。

c. 地震地域係数

地震地域係数 Z は、輪島市は $Z=0.9$ と設定されている。地震地域係数は、各地域における過去の地震記録に基づき、発生した地震の大きさや頻度等を踏まえて地域ごとに $0.7\sim 1.0$ の数値を定めたものである。しかし近年の地震では、熊本地震 (H28) や能登半島の地震 (H19, R4, R5, R6) など地震地域係数の低い地域でも大きな地震が度々発生している。国土交通省の検証^{注1}によると、地震地域係数を要因とする倒壊等の被害は確認されていないが、対策の方向性として、地震地域係数を用いた基準のあり方について検討を行う、としている。伝統的構法による木造建築の耐震設計マニュアル『伝統的構法のための木造耐震設計法』(2019年)でも、地震地域係数をそのまま用いることに慎重な姿勢を示している^{注2}。重要文化財建造物の耐震対策においては、適切な地震動、敷地地盤で想定される地震動を想定して診断を行うこととしている^{注3}。

以上より、旧角海家住宅、總持寺祖院禅悦廊に生じた地震力は、実際の地震が大きかったこと、また設計時の考え方による地盤種別、加速度増幅率、地震地域係数の設定により、実際の地震力が設計時に想定した地震力を上回っていた可能性が高い。

よって、地盤種別、加速度増幅率の考え方は、新たな知見により更新されており、地盤調査や最新の知見に基づいて適切に設定する必要がある。また、杭基礎の設置など鉛直支持の改良が必ずしも地震力の低減に影響するとは限らない点も注意が必要である。地震地域係数についても、 1.0 未満の地域でそれをそのまま適用するかは想定される地震動との比較により慎重に行う必要がある。

(留意すべき点)

○地盤種別、加速度増幅率は、地盤調査や最新の知見を参考に適切に設定する。

○鉛直支持の改良を行った場合でも地盤種別は適切に設定する。鉛直支持の改良は、必ずしも地震力の低減に影響しない。

○地震地域係数は、 1.0 未満を用いる時には想定される地震動と比較するなど慎重な検討が必要。

注1 「令和6年能登半島地震における建築物構造被害の原因分析を行う委員会中間とりまとめ(令和6年11月)」(国土交通省、令和6年11月1日)

注2 『伝統的構法のための木造耐震設計法』(伝統的工法木造建築物設計マニュアル編集委員会、平成31年)では、地震地域係数について「当該建築物の建設地に応じて数値を設定する」とし、解説で地震地域係数を 1 未満に設定する場合、各地域で予想される地震動を踏まえて慎重に設定すること、特に重要度の高い建築物の場合には地震地域係数を 1 未満に設定することなく、地震力を低減しないなどの配慮が必要である、としている。

注 3 「重要文化財（建造物）耐震診断指針」では入力地震動について、基礎診断では「建築基準法施行例に準じて、大地震動及び中地震動、その他必要に応じて適切な地震動を想定する」、専門診断では「敷地地盤で想定される地震動を想定する」としており、実際は当該建造物の所在する地盤、想定地震動、地震履歴、災害歴などを総合的に勘案して地震力を設定している。耐震対策において地震地域係数が 1.0 未満のところでは地震地域係数を適用するかは、その場所で想定される地震動の大きさと地域係数を勘案した設計用地震力を比較して余裕がある、包括可能な場合に適用可能とする運用をしている。

（2）複雑な形状の建物のモデル化

旧角海家住宅主屋は、二階建の主体部の北面東寄りに平屋建の北座敷、西寄りに平屋建の離れと突出部が取り付き、南面に外塀と一体化した南下屋が取り付く複雑な平面形状をしている。今回の地震では、二階建の主体部と離れ、南下屋が倒壊、北座敷は主体部からちぎれて倒壊を免れたが、大きく傾斜した。

補強設計では剛床仮定を前提とした 1 質点系でモデル化して検討していたが、実際には全体が一体化しておらず、地震応答解析でも二階建の主体部と平屋建の部分の地震時挙動が明らかに異なることわかった。また耐震要素である壁も北座敷や南下屋に集中しており、主体部や離れは壁が少なく、結果壁の少ない主体部や離れが倒壊に至ったと考えられる。

黒島地区の他の建造物においても、下屋の脱落、増築部の乖離など同様の破損の傾向が多数見られた。

複雑な形状で一体性に乏しい建造物においては、建物をゾーニングしバランス良く補強を配置するか、立体フレームによって詳細な検討をして挙動を把握し、適切な補強計画をとる、あるいは可能な場合は、水平構面の補強、接合部の一体化を行うのが望ましい。

（留意すべき点）

- 複雑な形状で一体性に乏しい建造物の診断では、ゾーニングによる検討、立体フレームによる詳細な検討を行う。
- 複雑な形状で一体性に乏しい建造物の補強設計では、補強をバランス良く分散配置を行うか、可能な場合は水平構面の補強、接合部の一体化を行う。

（3）補強材の選択、施工

調査した建造物の中には、補強壁と想定される所で、補強壁が薄いボード壁であったり、周囲のフレームへの止め付けの釘の本数が明らかに少なく、補強材として有効に機能していない例が散見された。また、剛性の高い耐震壁や鋼棒ブレースが地震に対して抵抗力を発揮したものの、突っ張って周囲の柱などを破壊した例が見られた。

總持寺祖院禅悦廊は、耐震要素がない梁間方向に仕口タイプ粘弾性ダンパーで補強

がなされていた。倒壊には至っていないものの大きく傾斜した禅悦廊以外の回廊では、ダンパー位置の柱に貫穴による断面欠損があり、その位置で柱が折れるなどの破壊性状がみられた。性能評価を受けている既成品の耐震補強材は、適用範囲と施工方法が明確になっている。地震時の挙動を予測して、定められた仕様の範囲を守りつつ適切に設計・施工を行う必要がある。

(留意すべき点)

- 適切な補強材を選択し、特性を正しく認識して適切に施工する。
- 既成品の補強材を用いる場合、仕様に定められた範囲で使用する。

(4) 柱の折損の可能性の検討

黒島地区やその他地域の文化財建造物においては、柱が小壁位置で折損しているものが多数見られた。倒壊した建造物で柱の折損が先行したかどうかは詳らかでない。柱の損傷状況については不明な点が多いが、能登アテ材が他の樹種と比べて脆い破壊性状を示しており、垂れ壁の下端部や差鴨居の取付部での柱の折損が生じやすい傾向にあると思われる。

柱の折損が生じると鉛直支持力を失い、倒壊する恐れが高い。柱が細い場合、小壁が土壁などで十分固まっている場合は、柱の折損可能性の有無を確認し、強度が不足する場合は柱の折損防止補強、代替鉛直支持部材の付加など、必要な補強を行う必要がある。

(留意すべき点)

- 柱の折損の有無を確認する。
- 柱の強度が不足する場合は柱の折損が起こらない所までの補強材の付加、柱の折損防止補強、代替鉛直支持部材の付加など必要な補強を行う。

(5) 設計の余裕度設定

旧角海家住宅は許容される変形角の設定を1/15以下に設定していた。代表点で1/15以下はかなり余裕のない設計となる事があり、今回のように設計想定以上の地震動が生じたり、不整形や偏心により局所の変形が進むことがあると倒壊に繋がる恐れがある。今回の地震が長周期部分で一般の設計用地震力より大きかったことも想定すると、適切な余裕を持たせた設計とするのが望ましい。どこまで変形を許容できるかという建物の構造特性、設計を代表点に集約させて行うか、立体フレームで検討するかなど設計の精度により許容される変形角は異なるが、許容される変形角の設定は代表点で1/20以下、もしくは倒壊限界を確認し、許容される変形をその2/3以下とするなどが考えられる。

(留意すべき点)

- 構造特性、診断の精度に応じて適切な余裕度を確認する。

(6) 構造劣化を反映した性能評価

黒島地区では、柱が小壁位置で折損しているものが多数見られ、それらの中には、平成19年(2007年)の地震でもすでに折損していた、あるいはその可能性がある柱が多数見られた。土蔵でも倒壊したものでは、足下の土台や柱の腐朽が進んでいたものもみられた。

『重要文化財(建造物)耐震診断指針』では、き損や劣化した部位については修理することを前提とし、建造物が本来の健全な状態であるものとして評価するとしている。しかし、地震で被害を受けたものを完全に修理しない場合や、柱の根継等修理を行った場合は、本来の健全な状態まで性能が回復しないこともある。また、一度変形した土壁は、初期変形時の剛性が低下するものであり、塗り直しなど完全な修理が出来ない場合はそれも考慮する必要がある。根継の修理で金輪継を用いた場合でも、元の健全な材料の2~3割程度の曲げ強度までしか回復しない。

よって、建物の健全性を適切に把握し、構造劣化の可能性、修理で性能を完全に回復させることができない場合はそれを反映した性能評価を行う必要がある。

(留意すべき点)

○修理を行えず構造劣化の可能性がある場合、または修理で性能を完全に回復させることができない場合は、構造劣化を反映した性能評価を行う。

4. 調査結果のまとめ

今回の能登半島地震で倒壊した耐震補強済の建造物、その他重要文化財や重伝健地区の建造物の被害状況を調査し、被害が生じた原因を分析した。

旧角海家住宅主屋、總持寺祖院禅悦廊が倒壊に至った主要な原因としては、地震力が設計想定より大きかった可能性が高い。要因は、地震波そのものが長周期で設計用地震動を上廻ったこともあるが、設計当時の考え方により設計想定地震力が地盤種別や加速度増幅率、地震地域係数の設定から実際よりやや低めに設定されていたことにあると考えられる。

文化財建造物の耐震対策に関する指針や、参考となる伝統木造建築に関する耐震マニュアル等は改訂を重ねており、現行の指針・マニュアルに則った形で当時設計された補強済みの文化財建造物で倒壊したものはなく、現行の文化庁の耐震に関する指針と関連する指針・マニュアルは有効と判断できる。

倒壊したものや大きな被害を受けた文化財建造物の分析から、複雑な形状の建物のモデル化、補強材の選択、施工、柱の折損の検討、設計の余裕度設定、構造劣化を反映した性能評価についても、倒壊に繋がる恐れのある項目として設計の中で十分留意すべき点として確認された。文化財建造物は建造物ごとに状況が異なるため、耐震対策の設計は、個々の状況を適切に把握し、個別に対応する必要があり、指針やマニュアルを

踏まえつつ、さらに文化財建造物の個々の状況に応じた適切な判断が必要である。

よって、これらの今回の調査結果を耐震対策の設計に携わる建築設計者・構造設計者等に有し、知識の更新を図るのが望ましい。

なお、今回の調査は既往の情報、現況の目視調査を元に行ったもので、対象とした建造物の調査はまだ充分ではなく、今後災害復旧事業の中で詳細な原因分析を継続する必要がある。

5. 今後の文化庁の取り組み

今回の知見を踏まえ、関係者に対して改めて耐震の必要性について周知するとともに、耐震対策の設計に直接携わる建築設計者・構造設計者等に対して、調査結果の共有と知識の更新を目的として講習会の実施を検討する。