

輪島市黒島地区のワクノウチ建築物の耐震性能

A Study on Seismic Performance of Traditional Wooden Buildings in the Kuroshima Area of Wajima City

須田 達

Tatsuru Suda

金沢工業大学教授 建築学部建築学科 (〒921-0000 白山市八東穂3-1)

Professor, Department of Architecture, College of Architecture, Kanazawa Institute of Technology

A detailed structural investigation and seismic performance evaluation were conducted on traditional wooden houses in the Kuroshima area of Wajima City. The traditional wooden houses in this area, which was selected as an important preservation district of groups of historical buildings in 2009 were built with a characteristic plan and a unique structure called Waku-no-uchi. Seismic performance was evaluated based on the collapse of the whole building and the behavior of each structural part. Based on the results of the study, it was clarified that the column buckling and the column base sliding, therefore the risk of collapse of the Waku-no-uchi structure due to an earthquake was pointed out.

Keywords: Column buckling, Base sliding, Waku-no-uchi, Building weight

1. 目的

輪島市黒島地区は、能登半島の西岸北寄りに位置し、海岸段丘上に家屋が連なって集落を形成している。この地域は江戸後期から明治中期にかけて北前船の拠点となり、船主および船員の居住地として多くの木造建築物が建てられ発展した歴史を持ち、当時の地割りを良く残し、現在もワクノウチと呼ばれる特徴的な空間を有する伝統的な木造建築物によって街並みが形成されていることから、2009年に重要伝統的建造物群保存地区に選定された¹⁾。一方で2007年に能登半島地震によって被災した地域であり、倒壊は土蔵や納屋などで報告され、住居の被害はそれほど大きくないものの²⁾、調査棟数286棟のうち98棟で全壊・半壊、一部損壊を含めると地区内のほぼ全ての建物で被害は発生しており³⁾、景観に配慮されながら建築物の修理が進められている。しかしながら耐震対策についてはほとんど進められておらず、個々の建築物に相応しい耐震診断および耐震補強方法が求められている。そこで本研究は、輪島市黒島の伝統的建造物群保存地区における伝統木造建築物の耐震対策の促進を目的として、地区内の標準的な伝統木造建築物2棟を対象に構造詳細調査を実施して、建物全体および各部の耐震性能評価に基づいて大地震に対する倒壊危険性を明らかにする。

2. 対象建物

(1) 黒島地区における伝統木造建築物の平面的特徴

黒島地区の間取りは黒島型間取り¹⁾と呼ばれ、ザシキ、チャノマ、ナンド、カッテの4室とトオリニワで構成される間取りを基本に大きく5種類に分類されている。また各居室は横を段方向として表から奥へ1段、2段、3段と数え、縦を列方向としてトオリニワ側から1列、2列、3列と数える。

基本となる黒島I型は、ザシキ、チャノマ、ナンド、カッテを田の字に配置される。またこれに準じて、

田の字型を食い違っ構成される間取りや、中廊下で前後に分けた間取りなどもある。黒島I型をもとにして表側に2室を増やして2列3段とした間取りが黒島II型、奥に中庭を設けるためにザシキを田の字から張り出して5室をL字に配置する間取りが黒島III型である。つぎに黒島III型の奥に2室を増やして7室を配置した間取りが黒島IV型で、基本の居室に対して1段1列目にミセノマ、2段2列目にカンチョウバなどの居室が増える。最後に、IV型の裏側で部屋を張り出して中庭を囲んでコの字に配置する間取りが黒島V型である。黒島型間取りの分類と、それに対応する地区内の建物棟数を表1に示す。

表1 黒島型間取りと棟数

型	発展	構成	配置	棟数
I	I	基本室	田の字	8
	I'		食い違い田の字	2
	I''		中廊下田の字	2
II	Iから派生	基本室+表側2室	2列3段	6
III		基本室+1室	L字	1
IV	IIIから派生	III+裏側2室	L字	1
V	IVから派生	基本室+3室	コの字	10

(2) 対象建物の間取り

対象は黒島地区において建物の規模や間取りの特徴を捉えた標準的な建物とし、また耐震性能に大きく影響することから平屋建てと2階建てのMNT家とMSG家の2棟を選出した。外観を図1に示す。

対象建物の間取りは表1より、それぞれII型とV型に分類される。MNT家は平屋建てで、間取りは基本のチャノマ、ザシキ、カッテ、ナンドの4室に2室を加えた6室で、トオリニワに沿って2列3段に配置され、II型に分類される。チャノマは天井を貼らずに屋根までの吹き抜けとし比較的断面の大きい梁をけた行と張り間にそれぞれ架けている。またトオリニワの一部を改修して奥側を台所としている。MSG家は2階建てで、コの字型に居室を配置して中庭を有する間取りとし、V型に分類される。チャノマは梁を井の字に架けており、トオリニワを土間、改修は一部の居室と台所で行われている。構造は、いずれも屋根を瓦葺き、外壁を下見板張りとし、基礎は石場建てと外周に延べ石を敷いて土台を配置、柱梁の接合部はほぞ差しとした伝統構法である。また建物内観を図2、床下と接合部の状況を図3に示す。



(a) MNT家 (平屋)



(b) MSG家 (二階建て)

図1 対象建物の外観

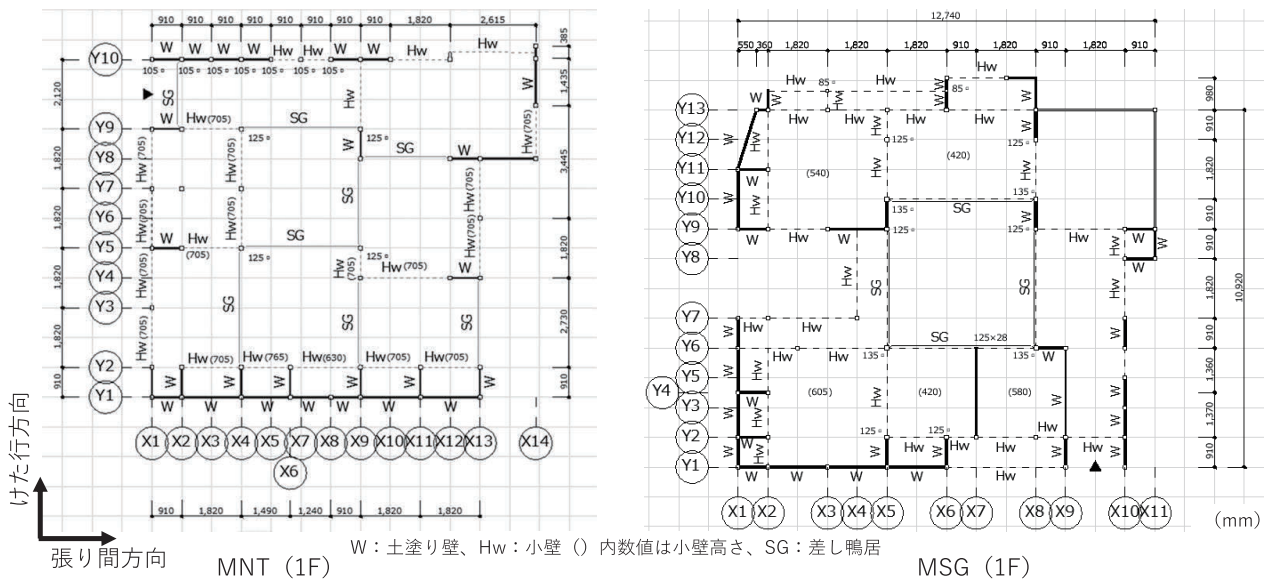


図5 調査建物の構造平面図

表2 各部寸法と床面積

mm	MNT	MSG	m ²	MNT	MSG
柱の断面寸法	85~135角	105~125角	階数 (階)	1	2
差し鴨居のせい	415~420	330~375	2階床面積	—	21.2
土壁の壁厚	65~70	65~70	1階床面積	108.4	130.8
1階床高さ	520	500	のべ床面積	108.4	152.0
1階階高 (居室)	2680	2890			
階高 (ワクノウチ)	5270	5520			

構造詳細調査では、あらかじめ設定した調査項目に従って平面プラン、立面プラン、構造部材の断面寸法、構造要素の仕様とその配置等を可能な限りを採寸して野帳に記録するとともに、各部をデジタルカメラで記録した。また床板の一部を剥がして床組みや基礎、地盤等の状態を目視で確認した。建設時期や改修歴については家主へ聞き取りを行った。図4に野帳の一部と図5に各調査建物1階の構造平面図を示し、表2に調査で得られた構造各部の寸法および床面積を示す。

(2) 復元力特性と建物重量

建物は、屋根を棧瓦葺、外壁を下見板張り、内壁を土塗り壁とし、軸組は柱断面をおおむね120 mm角とし、小屋梁は断面の大きなタイコ梁を使用しており、建物重量の算出は固定荷重および地震時検討用の積載荷重に当該構面の面積を乗じて算出し、固定荷重および積載荷重は建築基準法施行令84条、85条に基づきつつ、地域内建物の過去の改修記録⁴⁾も参考に材の大きさや構面の仕様に応じて設定した。1階床面積あたりの重量と合わせて建物重量の算出結果を表3に示し、屋根、壁、床の要素別に図6に示す。なお屋根には大屋根と下屋、壁には各階の壁、床には各階床と二階建てのMSG家には地震時検討用の積載荷重が含まれる。

各建物の重量はMNT家で396.4 kN、MSG家で446.9 kNとなり、1階床面積で除した値は、それぞれ3.66 kN/m²、3.42 kN/m²となり、既往研究において京町家が概ね3.0 kN/m²以下⁵⁾であることからすると、対象建物は比較的重いと言える。また要素別にみると壁が最も多く、建物全体に対して約半分を占めており、順に床、屋根となった。

構造要素は主に土塗り壁、土塗り小壁と柱ほぞ、中央のチャノマに差し鴨居、外壁の下見板である。土塗り壁および土塗り小壁は塗り厚を55-65 mm程度とし、仕上げは中塗りあるいは上塗りとしている。また一部に黒く、色漆喰のような仕上げもある。土壁の貫は、トオリニワや中央の居室の小壁においては踵しで貫を設けており、居室部においては確認出来ない。差し鴨居は梁せいを約400-500 mm程度とし、柱に小根ほ

ぞ鼻栓打ちとしている。柱のほぞは、差し鴨居や床下の足固めの接合部から判断すると長ほぞと思われるが、確認出来ていない。

表3 建物重量

kN、kN/m ²	MNT	MSG
屋根	168.4	76.7
2階壁(上半分)		52.3
2階壁(下半分)		34.7
下屋		59.1
2階床・地震時積載		30.2
1階壁(上半分)	96.9	103.8
1階壁(下半分)	94.0	49.3
1階床	37.0	40.7
合計	396.4	446.9
建物重量/1階床面積	3.66	3.42

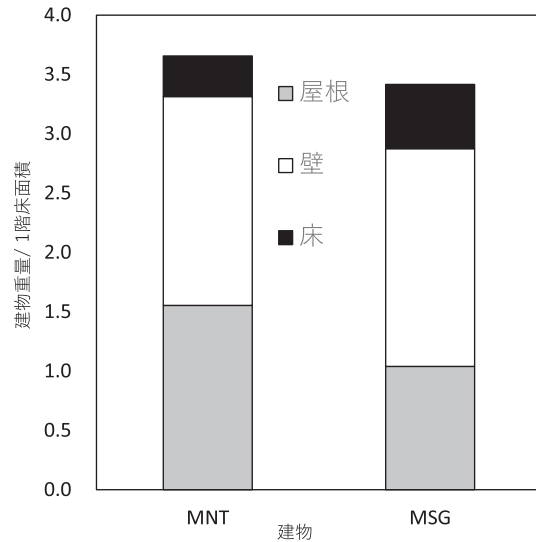


図6 1階床面積当たりの建物重量

建物の復元特性は設計資料⁹⁾に基づいて各構造要素の仕様に合わせて、各階、各方向ごとに算出した。ただし、柱ほぞについては、ほぞの長さ、ほぞ向きは現地調査で確認出来ておらず、復元力は全体的な軸組の状況から長ほぞと判断して算出し、柱総数の半分をけた行方向、もう半分を張り間方向に振り分けて加算した。また構造調査時に土壁のひび割れや軸組の腐朽、蟻害等による著しい損傷は確認されなかったため、劣化による低減は行っていない。各建物の復元力特性を図7にそれぞれ示す。また復元力を質点系重量で除してベースシア係数を算出し、一般的に木造の降伏点とされる変形角 1/120 rad 時と伝統木造建築物の倒壊の判定基準とされる 1/20 rad 時における構造要素の構成を図8に示す。復元力特性は各建物共に、概ね変形角 1/120 rad で降伏し、1/30 rad で最大となり、その後 1/10 rad まで緩やかに低下する。また1階の復元力において、MNT家はけた行方向よりも張り間方向が大きく、MSG家は建物方向によって違いはほとんどない。ベースシア係数は、MNT家において、けた行方向で 1/120 rad 時に 0.24、1/20 時に 0.37、張り間方向でそれぞれ 0.49、0.82、MSG家において同様にけた行方向 0.30、0.47、張り間方向 0.03、0.45 であった。各要素の構成としては、外壁を下見板とした土塗り壁が全体の約半分を占めている。軸組の割合は柱ほぞを長ほぞとして算定したことで比較的大きく、小壁と同程度であった。ただし変形が大きくなるに従って小壁の割合が大きくなっている。なお同図において、壁には土塗り壁と下見板壁、軸組には土塗り壁以外の貫、差し鴨居、柱ほぞを含む。

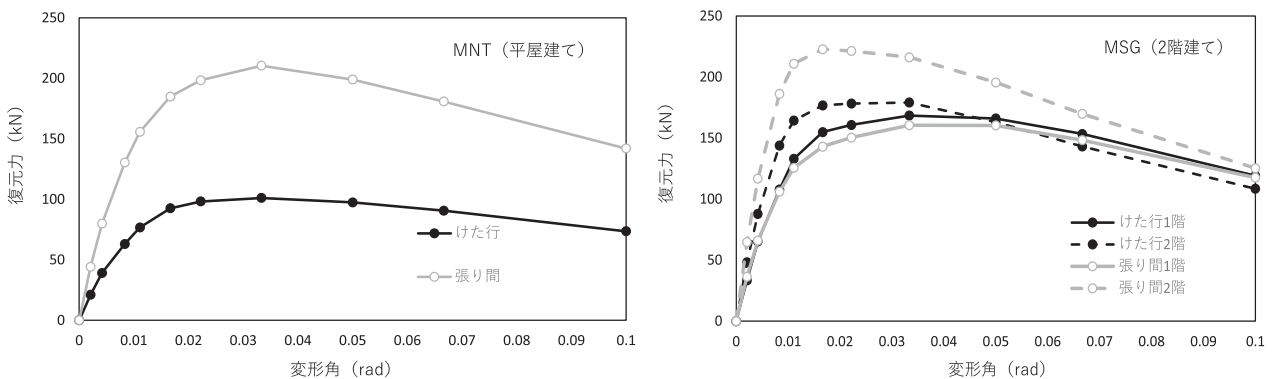


図7 対象建物の復元力特性

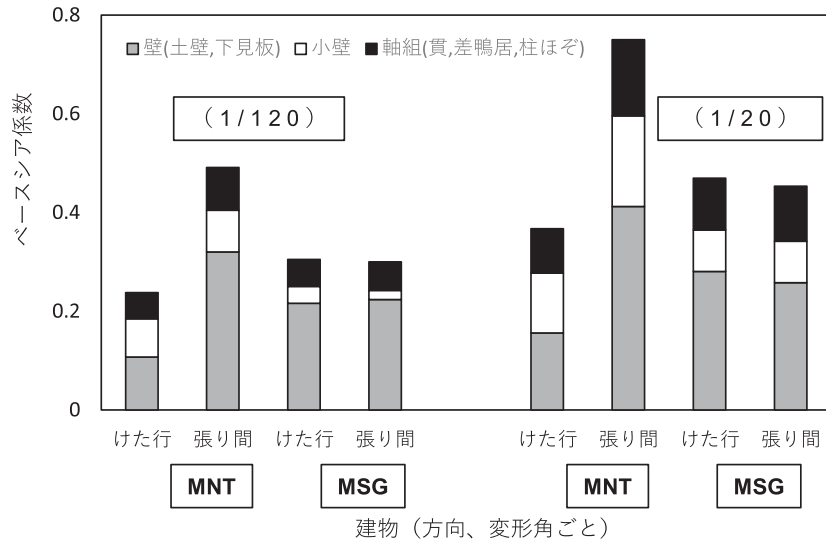


図8 特定変形角における復元力の構成

4. 耐震性能評価

(1) 限界耐力計算による最大応答変形角

各対象建物の耐震性能は限界耐力計算に基づく近似応答解析⁹⁾を行って、検証用地震力に対する各階の応答変形角を算出した。なお柱脚部は移動しないものとして計算し、柱脚部の移動については後述する。計算結果の一例を図9に示し、算出された応答変形角を表4に示す。

各対象建物の近似応答解析の結果より、MNT家の最大応答変形角は、まれ地震においてけた行方向で1/194 rad、張り間方向で1/382 rad、極まれ地震においてけた行方向で1/25 rad、張り間方向で1/60 rad、同様にMSG家では、それぞれ1/244 rad、1/258 rad、1/39 rad、1/52 radとなった。伝統木造建築物の限界変形角として一般的に用いられる損傷限界変形角1/120 radおよび安全限界変形角1/20 radをそれぞれ下回っており、地震に対して建物全体的な損傷あるいは倒壊の危険性は低いといえる。

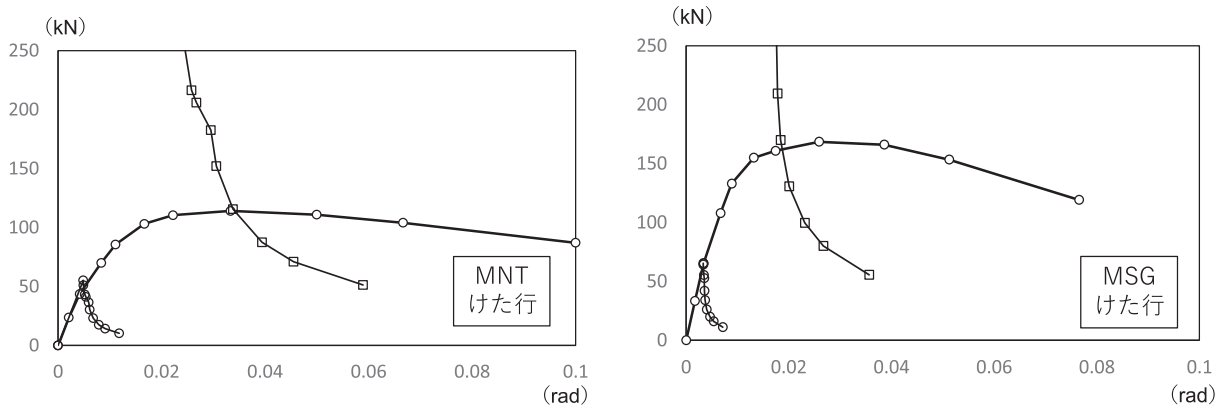


図9 近似応答計算の結果一例

表4 最大応答変形角

rad		まれ地震		極まれ地震	
		けた行	張り間	けた行	張り間
MNT	1層	1/194	1/382	1/25	1/60
MSG	2層	1/866	1/258	1/433	1/52
	1層	1/244	1/308	1/39	1/62

(2) 平屋建て建物の柱脚部の滑り

MNT家は上部構造に十分な耐力を有し、基礎を石場建てであることから、地震時に柱脚部の滑り移動が懸念される。柱脚部の滑り移動は、柱脚部に作用するせん断力が摩擦抵抗を超えると生じるため、柱脚と礎石の摩擦係数を0.36とし、表3に示す建物重量を乗じて柱脚部の摩擦力 (F_0) を求めて、1層のせん断力と1階床レベルの質量に生じる慣性力から求められる柱脚部に生じるせん断力 (Q_0) とを比較して滑りの有無を判定し、すべり量 (x_s) は図10の概念に基づいて式 (1) から推定した⁶⁾。表5に示す滑り判定の結果より、けた行方向、張り間方向ともに滑る可能性があり、推定した結果は耐力の高い張り間方向の方が大きく、それぞれ9.6 cm、15.3 cmであった。滑りに対する対策として、柱脚部を基礎に固定して滑らなくする場合と、滑りを生じた際の安全を整備・確保する場合とで分けられる。安全の整備・確保には、隣棟間隔は建物の変形も合わせて考慮すると50 cm以上必要と言える。また床下の束や大引き等が倒れたり、ずり落ちたりしないように接合部を確認することや、幅20 cm程度の基礎石の整備、不要な材の撤去などが必要といえる。

$$x_s = k_t x_t / k_s \quad (1)$$

ここに、 k_t : 応答時における全体系の等価剛性、 k_s : 滑りを含む全体系の等価剛性

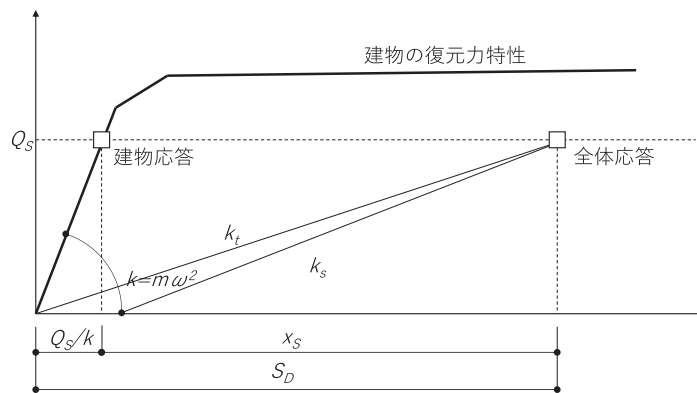


図10 滑りの判定と滑り量の概念図

表5 柱脚部の滑り判定と滑り量

	F_0 (kN)	Q_0 (kN)	x_s (cm)
けた行	142.7	176.4	9.6
張り間		271.8	15.3

(3) ワクノウチにおける柱の折損

黒島地区の伝統木造建築物はザシキをワクノウチ構造としており、MSG家のザシキも小屋組まで吹き抜けており、軸組は通し柱と比較的大きな断面の梁を井桁に組んでいる。その通し柱には、大きな小壁やせいの高い差し鴨居が取り付けられているため、応力集中あるいは各階の変形差による折損などが懸念される。

まずMSG家は表4に示すように、けた行方向において各階の変形に大きな差があり、各階の変形差によって通し柱に曲げ変形が生じて折損する場合がある。各階の変形差によって生じる柱の変形と曲げモーメントの関係を式 (2) とし、許容曲げ応力度を用いて式 (3) より折損を判定した。

$$M_C = 3EI(R_1 - R_2)/H \quad (2)$$

$$\Delta R \leq 2\alpha H F_b / 3DE \quad (3)$$

ここに、 M_C : 柱の曲げモーメント、 H : 柱の高さ、 R_i : 各階の応答変形角、 ΔR : 各階の変形差、 E : ヤング係数
 I : 断面二次モーメント、 α : 柱の断面欠損による低減率、 D : 柱の断面寸法

次に、小壁や差し鴨居によって生じるせん断力によって通し柱に曲げモーメントが生じて折損する場合は

ある。小壁と差し鴨居のせん断力から柱に生じる曲げモーメント (M_c) と材の基準強度 (F_b) から求まる許容曲げモーメント (M_u) をそれぞれ式 (4)、(5) から求め、比較することで折損を判定した⁶⁾。なお基準強度は令89条に示される無等級材のすぎとした。結果を表6に示す。なお、小壁や差し鴨居は両側の柱によって構成され、せん断力は二本の柱で負担する。しかし地震時に軸組が変形すると、一方の柱で小壁の乖離や差し鴨居の抜け出しを生じることがあり、その場合、一本の柱でせん断力を負担すると考え、それぞれについて検討を行っており、表中の有効柱とはせん断力を負担する柱の本数を示す。

$$M_c = Q_c h_0 \quad (4)$$

$$M_u = n \alpha D^3 F_b / 6 \quad (5)$$

ここに、 Q_c :柱のせん断力、 h_0 :柱長さから小壁、差し鴨居高さを引いた値、 M_u :柱の許容曲げモーメント、 n :せん断力を負担する柱の本数

表6 差し鴨居等による柱の折損判定の結果

kN・m	M_c	有効柱	M_u	判定
まれ地震時	7.37	1	4.98	NG
		2	9.97	OK
極まれ地震時	17.11	1	4.98	NG
		2	9.97	NG

これら柱折損の検討より、まず各層の変形差によって柱の曲げ許容力度を超える事は無い結果であった。次に差し鴨居等によって生じる曲げモーメントによる折損については、大地震時には有効柱を二本としても許容曲げモーメントを大きく超える結果となり、折損する可能性は高いと言える。

5. まとめ

輪島市黒島伝統的建造物群保存地区におけるワクノウチ建築物を対象に構造詳細調査を実施して耐震性能を評価した。標準的な間取りを持つ平屋建てと二階建て建物をそれぞれ選出し、構造詳細調査に基づいて構造特性を整理した。耐震性能評価では、建物の耐力が高いことで建物全体的な倒壊ではなく、平屋建て建物の柱脚部のすべりや、ワクノウチにおける柱の折損による倒壊危険性を示した。

謝辞：調査において地域住民との調整を輪島市教育委員会および株式会社東洋設計に、また実施およびその後のデータ分析を金沢工業大学学部4年生の黒古真矢君（現・大日本土木）、中島紗巴羅君（現・清水建設）、横川奨君（現・三谷産業）に協力いただきました。

参考文献

- 1) 能登・黒島の町並み—輪島市黒島地区伝統的建造物群保存策調査報告書一、輪島市教育委員会、2008年12月
- 2) 2007年能登半島地震災害調査報告 2007年新潟県中越沖地震災害調査報告、日本建築学会、2010年3月
- 3) 輪島市黒島地区伝統的建造物群保存地区防災計画報告書、輪島市教育委員会、2021年3月
- 4) 石川県指定有形文化財 角海家住宅及び土蔵 修理工事報告書、石川県輪島市、2012.3
- 5) 京町家の構造調査に基づく構造特性の評価、須田達、鈴木祥之、奥田辰雄、小笠原昌敏、地域安全学会論文集 No.7、pp.15-21、2005年11月
- 6) 伝統的構法のための木造耐震設計法 石場建てを含む木造建築物の耐震設計・耐震補強マニュアル、伝統的構法木造建築物設計マニュアル編集委員会、学芸出版社、2019.6