床と雑壁を考慮した軸組木造住宅の保有水平耐力と壁量の関係

RELATION BETWEEN THE WALL-LENGTH RATIO OF JAPANESE WOODEN HOUSES AND
THE ULTIMATE HORIZONTAL RESISTANT FORCE CONSIDERING THE STIFFNESS
OF BOTH FLOOR AND NON-STRUCTURAL WALLS

山田 耕 司*

Koji YAMADA

In this paper, the relation between the wall-length ratio of Japanese wooden houses and the ultimate horizontal resistant force considering the stiffness of both floor and non-structural walls is discussed. The analytical model has the restoring force characteristic composed of the floor, bracing bearing walls and non-structural plaster board walls. The results may be summarized as follows: The wall-length ratio considering both structural walls and non-structural walls is nearly equal to the wall-length ratio considering only structural walls. The lower limit of the ultimate horizontal resistant force is estimated using the wall-length ratio considering only structural walls.

Keywords: Japanese wooden house, Non-structural wall, Ultimate horizontal resistant force,
Flexible horizontal diaphragm, Wall-length ratio
軸組木造住宅, 雑壁, 保有水平耐力, 柔床, 壁量

1. 序

2階建軸組木造住宅の耐震安全性は、一般には建築基準法施行令第46条により規定される。この条文中には、建物に必要とされる耐震要素を壁量で換算し、耐震要素を釣り合いよく配置するよう義務づけている。また、木造住宅の耐震診断法などでは、偏心率による壁配置バランスの評価¹⁾、柱直下率や外周部・隅角部への壁配置の割合による評価²⁾が取り入れられ、耐震要素の配置バランスを評価している。一方、軸組木造住宅は、不整形な平面・立面形状の建物が多く、RC造や鉄骨造と違い剛接合・剛床を作成し難いことも知られている。そのため、平成12年度には建設省告示に耐力壁のバランスを検討する項目が取り入れられた。軸組木造住宅の保有水平耐力や床剛性に関する近年の報告として、柴田らが18棟の戸建て住宅の資料を基に木造住宅の保有水平耐力と必要保有水平耐力について論じている³⁾。また、村上らは水平構面の剛性を考慮した設計法を提案し、ねじれ応答に対する変位の補正方法を提起している⁴⁾。

前報⁵⁾では、耐力壁線に注目し、床剛性を仮定した上で既存建物の保有水平耐力を算定し、床剛性の保有水平耐力への寄与を検討した。また、保有水平耐力と耐力壁線毎の壁量満足度の最小値、建物1階全体での壁量満足度とを比較した。その結果、床剛性の変更による保有水平耐力増分の平均は、耐力壁の最大変形角を1/120radまで変形を許した場合で

10~20%、1/30radまで変形を許した場合で6~10%程度期待できること、耐力壁の最大変形角を1/30radまで変形を許した場合には、1/120rad時の耐力係数から計算できる1/30rad時の耐力係数より床剛性の大きさに拠らず平均で20%大きいこと等が判明した。また、既報⁵⁾では、雑壁量をパラメータとした地震応答解析を行い、軸組住宅では、雑壁量を考慮して解析すべきことを示した。

そこで本報では、加振直交方向壁の耐震性能を無視し、床構面と加力方向の雑壁の剛性・耐力を考慮した保有水平耐力を既存軸組木造住宅の平面図を利用して計算し、保有水平耐力、耐力壁量、雑壁量の関係を検討し、壁量による保有水平耐力の下限の推定法を考察する。

2. 各種仮定・使用する既存建物の壁量

2.1 建物モデルの仮定

建物モデルは図1のように耐力壁もしくは雑壁の存在する通り芯を壁線と設定し、壁線毎の水平力抵抗要素を耐力壁および雑壁の壁長と各々の耐力特性を乗じて得られるせん断バネの和とし、床の荷重伝達特性も床の加力方向長さや壁線間距離に応じたせん断バネと仮定した。なお、加力直交方向の壁の剛性は無視し、重量のみ算定する。耐力壁量は設計図書に示されている耐力壁種類に応じた壁倍率と耐力壁長さを乗じて計算した。なお、今回用いた資料の耐力壁は、筋交い耐力壁のみで

* 豊田工業高等専門学校建築学科 助教授・博士(工学)

Assoc. Prof., Dept. of Architecture, Toyota National College of Technology,
Dr. Eng.

あった。雑壁量は無開口壁のみを算定対象とし、垂壁、腰壁は雑壁量に算入しない。また、雑壁は大壁形式、外周壁においては片面貼り、内壁においては両面貼りと仮定した。

建物重量は、保有水平耐力および最大塑性率を計算する場合は表1に示す値とする。一方、建築基準法施行令での床面積当たりの重量は表2に示される値である。施行令に基づいた建物総重量は表1より算定した建物総重量に対して平均93%、標準偏差4%であったので、表1の仮定はほぼ妥当と考えられる。

2.2 壁および床の骨格曲線と復元力特性

図2に壁1m当たりの骨格曲線を示す。この内、3つ割筋違い耐力壁（図中、3つ割耐力壁）・2つ割筋違い耐力壁（図中、2つ割耐力壁）・石膏ボード耐力壁は文献7)に示されるデータに基づく。図中の石膏ボード雑壁（以下、雑壁と略す）は1820mm×910mm×12mmの石膏ボードを使用し、@300mmで下地（柱のみ）にビスで固定されているものとする。著者の知る限り、雑壁の骨格曲線の資料は見あたらなかったため、文献8)に沿った方法により計算した雑壁と石膏ボード耐力壁の終局耐力の比(0.26)を石膏ボード耐力壁の骨格曲線に乗じて雑壁の骨格曲線を作成した^{注1)}。

本報では、耐力壁として2つ割筋違い耐力壁を用いるが、図2中の2つ割筋違い耐力壁の骨格曲線は、3つ割筋違い耐力壁の骨格曲線より初期剛性が劣っているので、3つ割筋違い耐力壁の骨格曲線を4/3倍（壁倍率の比2.0/1.5）したものを使用する（壁倍率は2.0とする）。

図1 壁線に基づくモデル化

表1 建物質量の仮定

項目	質量	備考
重い屋根	90 kgf/m ²	施行令を参考（軒の深さは0.75mとする）
軽い屋根	60 kgf/m ²	施行令を参考（軒の深さは0.75mとする）
外壁	190 kgf/m	サイディング+軸組+ボード内壁
内壁	95 kgf/m	ボード内壁+軸組+ボード内壁 （雑壁長は壁実長の2倍になる）
床	50 kgf/m ²	施行令を参考
積載物	60 kgf/m ²	施行令を参考

外壁・内壁は壁1mあたりの重量、その他は床面積1m²あたりの重量

表2 床質量・壁量の設定

		2階建て	
		1階部	2階部
床重量		170kgf/m ²	150kgf/m ²
壁量	重い屋根	0.33 m/m ²	0.21 m/m ²
	軽い屋根	0.29 m/m ²	0.15 m/m ²

床の骨格曲線は、文献9)を参考に図4に示すようなせん断変形角1/200 rad時を第一折点、変形角1/100 rad時を第二折点とした tri-linear 型を3種類の特性を設定した。床の骨格曲線は、前報では線形で耐力壁線間距離に反比例する剛性・耐力と仮定したが、本報では加力方向の壁線間の床長さに比例、壁線間距離に反比例する剛性・耐力を仮定した。

2.3 保有水平耐力の計算法

床剛性が低く偏心のある建物の床構面水平変位は、図5に示すように、剛体変位、剛体回転、床構面のせん断変形の和で表される。しかし、本報で扱っている床構面は剛性が低くせん断変形が生じやすい。また、直交壁による変位抑制は剛体回転にのみ有効である。既報¹⁾では壁線間距離が3640mmで本報と同じ床の種類の場合においては直交壁の水平変位抑制効果が小さいことを示した。従って本報では、建物の剛体回転を無視し、算出する保有水平耐力では図1のように壁線毎の壁の水平耐力と床のせん断変形抵抗のみを考慮する。

地震荷重は各壁線が負担する範囲の建物重量に対して、Ai分布で加わるよう設定した。ここで、各壁線が負担する範囲は各壁線間の2等分点

図2 耐力壁長さ1m当たりの骨格曲線（文献8）等

図3 耐力壁長さ1m当たりの骨格曲線（計算時）

図4 床加力方向長さ1m当たりの骨格曲線

を境界として設定する。保有水平耐力は荷重増分法で計算し、各階でいずれかの壁線の変形角が $1/120\text{rad}$ に達した時を Level 1、 $1/30\text{ rad}$ に達した時を Level 2 とし、その時のベースシア係数を以後本報では“保有水平耐力”と称する。

2. 4 充足率の定義

建物内に存在する水平抵抗部材量の自重に対する比率を表す値として以下の充足率を定義する。

$$\text{耐力壁充足率} = \text{耐力壁量} / \text{所用有効壁長} \quad (1)$$

$$\text{雑壁込充足率} = \text{雑壁込壁量} / (\text{所用有効壁長} \times 1.5) \quad (2)$$

ここで、耐力壁量は“耐力壁長×壁倍率”、雑壁込壁量は“耐力壁長×壁倍率+雑壁長×0.5”で計算する。所用有効壁長は文献1)に基づき、表3により算出した。

2. 5 使用する既存建物の耐力壁充足率

本報で使用した建物の延床面積、耐力壁充足率の分布を図6に示す。本建物群は既報¹⁾で用いた2階建て在来軸組構法木造住宅の内の278棟で、平均延床面積は、 144.9 m^2 である。なお当該建物の床の種類は不明である。本報では建物の梁間・桁行を考慮せずに各方向とも計算時のサンプルとする。従って、計算のサンプル数は556となる。1階耐力壁充足率の平均は1.42で、2階耐力壁充足率の平均1.81である。

なお、本報で使用した建物データの中には、2つ割筋違い以外に一部3つ割筋違耐力壁が含まれているが、耐力壁量が同量になるように2つ割筋違いに換算した。

3. 結果

3. 1 保有水平耐力の分布

図7にLevel 1時保有水平耐力とLevel 2時保有水平耐力の関係、直線近似式、近似式からの標準偏差(σ)を示す。図より全体的に1階の保

図5 床構面水平変位の分解模式図

表3 所用有効壁長(m)

	1階	2階
軽い屋根	$0.11 A_1 + 0.18 A_2$	$0.15 A_2$
重い屋根	$0.15 A_1 + 0.18 A_2$	$0.21 A_2$

A_1, A_2 : それぞれ1階, 2階の床面積(m^2)

a) 延床面積の分布

b) 耐力壁充足率の分布

図6 使用した建物の特性

有水平耐力より2階の保有水平耐力の方が保有水平耐力の分布する範囲が大きいことが分かる。また、床の種類・階に関わらず、Level 2時保有水平耐力はLevel 1時の1.5倍程度になっており、前報⁵⁾と同様の傾向が得られている。これは、図3で仮定した耐力壁および雑壁の耐力がLevel 1時の変形角に対しLevel 2時では約1.5倍になっているためと考えられる。また、Level 1時保有水平耐力に対してLevel 2時保有水平耐力が線形関係とならないのは、壁の耐力特性の影響のみでなく、壁線間の荷重伝達特性が床の荷重-変形特性も影響するためと考えられる。近似直線に対する標準偏差は、床剛性・耐力が大きいほど小さくなること、2階の標準偏差より1階の標準偏差の方が小さいことが分かる。従って、保有水平耐力は、Level 1時からLevel 2時を適切に予測可能と考えられる。

図8, 9に床の種類の変更による保有水平耐力の変化、および、その平均(μ)、標準偏差(σ)を示す。図より、Level 1およびLevel 2時のどちらの場合でも、保有水平耐力は床の剛性・耐力が増大するほど、保有水平耐力増分の平均(μ)が大きくなる。しかし、増分の標準偏差(σ)も増大するので、床を剛性・耐力の大きい床に変更しただけで確実に保有水平耐力が増大するわけではない。このことは既報⁵⁾と同じ結果である。

3. 2 雑壁込充足率と耐力壁充足率の関係

図10に雑壁込充足率と耐力壁充足率の関係、直線近似式、近似式からの標準偏差(σ)、相関係数(R)を示す。本報での結果のみから判断すれば、雑壁込充足率と耐力壁充足率の相関は高く、耐力壁量を用いて雑壁込充足率を推察可能である。ただし、標準偏差は1階で0.1、2階で0.2あり、推定時には安全側を見るよう注意する必要がある。なお、雑壁込充足率と耐力壁充足率の差は、1階で平均0.005標準偏差0.122、2階で平均0.108標準偏差0.248であり、近似的に雑壁込充足率=耐力壁充足率と考えることができる。

図7 Level 1時保有水平耐力とLevel 2時保有水平耐力

3. 3 充足率と保有水平耐力の関係

図11, 12に雑壁込充足率と保有水平耐力の関係、図13, 14に耐力壁充足率と保有水平耐力の関係を示す。また、図中に直線近似式、近似式からの標準偏差(σ)、相関係数(R)を示す。

全体的な傾向として、Level 1時保有水平耐力の方がLevel 2時保有水平耐力より充足率と相関が高く、床の剛性・耐力が大きいほど保有水平耐力と充足率の相関が高い。これは、加力レベルが低い、もしくは、床の荷重伝達能力が高い場合には、建物全体の水平耐力が有効に働くためと考えられる。また、1階における保有水平耐力と充足率の相関の方が、2階における保有水平耐力と充足率の相関より高い。

充足率の種類による保有水平耐力の推定を考えた場合、雑壁込充足率の方が耐力壁充足率より相関が高い傾向がある。これは、雑壁込充足率では、雑壁の壁量が算入されているためと考えられる。また、充足率と保有水平耐力の線形近似式は、雑壁込充足率による近似式の方が近似曲線の勾配が大きく、より良い保有水平耐力の推定ができています。しかし、

図8 雑壁込保有水平耐力の床の変更による増分(Level 1)

図9 保有水平耐力の床の変更による増分(Level 2)

図10 耐力壁充足率と雑壁込充足率の関係

1階のLevel 2時保有水平耐力は床の種類・充足率の種類に依らず、ほとんどの場合で充足率の0.2~0.4倍の間にある。また、2階のLevel 2時保有水平耐力も先の範囲以上の保有水平耐力であり、充足率の算定法の違いによる保有水平耐力分布の違いは少ない。従って充足率のみから保有水平耐力を推測する場合には、耐力壁量のみを算定すれば効率が良い。

図11 雑壁込充足率と保有水平耐力の関係 (Level 1)

図12 雑壁込充足率と保有水平耐力の関係 (Level 2)

3. 4 保有水平耐力の下限の推定

2階建て軸組木造建物では2階の層間変形に比べ1階の層間変形の方が大きくなる傾向があるので、本報では、1階のLevel 2時保有水平耐力の下限式を検討する。床の種類は安全側を取り、“4隅火打ち”とする。図15に雑壁込充足率の場合、図16に耐力壁充足率の場合の直線近似式（切片が0の場合と0でない場合）とその近似式から1.65σ減じた下限推定式（近似式からの誤差が正規分布で分布するとした場合

の90%信頼率の下限）を示す。図より、ほとんどの計算結果が保有水平耐力0.35以上であること、切片を0としない下限推定式がより良い推定式となっていることが分かる。以上の結果より、充足率から保有水平耐力の下限を推測する次式が得られる。

$$\text{保有水平耐力の下限} = 0.18 \times \text{雑壁込充足率} + 0.04 \quad (3)$$

$$\text{保有水平耐力の下限} = 0.11 \times \text{耐力壁充足率} + 0.16 \quad (4)$$

4. 結語

本報では、床構面と雑壁の剛性・耐力を仮定した上で、既存軸組木造建物の保有水平耐力解析を行い、保有水平耐力への床種類の影響を考察した。その結果、本報では耐力壁、雑壁、床を簡単な骨格曲線で仮定するなどの問題はあるが、以下の知見が得られた。

- ・層間変形角1/30rad時の保有水平耐力は層間変形角1/120rad時の保有水平耐力の1.5倍程度ある。これは耐力壁および雑壁の層間変形角1/30rad時の耐力が1/120rad時耐力の1.5倍と仮定したためである。
- ・床種が“4隅火打ち”時の保有水平耐力に対する他の床種時の保有水平耐力の増分を検討した結果、床の剛性・耐力が大きいほど保有水平耐力の増分の平均が大きいことが判明した。しかし、その分布を見ると増分がほとんどない場合もあり、床耐力の増加が保有水平耐力の増加に直結する保証はない。これは前報¹⁾と同じ結果である。
- ・耐力壁の壁量から計算した充足率は雑壁まで考慮した充足率にほぼ等しい。
- ・雑壁まで考慮した充足率を用いれば、耐力壁のみから計算した充足率より、保有水平耐力をより良く表記できるが、その向上はわずかである。
- ・耐力壁量から保有水平耐力の下限を推定する式を提案した。

図13 耐力壁充足率と保有水平耐力の関係 (Level 1)

図14 耐力壁充足率と保有水平耐力の関係 (Level 2)

図15 Level 2時保有水平耐力の推定直線 (雑壁込充足率)

図16 Level 2時保有水平耐力の推定直線 (耐力壁充足率)

参考文献

- 建設省住宅局：木造住宅の耐震精密診断と補強方法, 1985
- 財団法人石川県建築住宅総合センター：木造住宅の耐震診断・改修指針とその解説（石川県内の伝統構法による在来木造住宅を中心に）, 1997
- 武田 寛, 柴田 拓二：木造住宅の保有耐力と壁量に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集（近畿）, C-1, pp.207-208, 1996
- 村上雅英, 稲山正弘：偏心を有する柔床壁式構造物の靱性設計法, 日本建築学会構造系論文集, No.530, pp.93-96, 2000
- 山田耕司：床剛性と耐力壁線を考慮した在来軸組木造構法住宅の耐震性能評価に関する研究, 日本建築学会構造系論文集 第525号, pp.79-84, 1999
- 山田耕司：軸組木造住宅における雑壁量と固有周期・最大塑性率の関係, 日本建築学会東海支部研究報告集, 第38号, pp.265-268, 2000
- 日本建築学会：建築耐震設計における保有耐力と変形性能 1981, p.41, 1981
- 村上雅英, 稲山正弘：任意の釘配列で打たれた面材壁の弾塑性挙動の予測式, 日本建築学会構造系論文集, No.519, pp.87-93, 1999
- 飯塚五郎蔵：木構造における水平構面のせん断耐力, 日本建築学会大会学術講演梗概集, C, pp.1997-1998, 1980
- 山田耕司：木造建物の地震時最大塑性率への床構法の影響（1層1スパン建物の場合）, 日本建築学会大会学術講演梗概集（東北）, C-1, pp.197-198, 2000
- 山田耕司：愛知県内の在来軸組木造住宅の壁量に関する調査研究, 構造工学論文集 Vol.46.B, pp.181-188, 2000

注

注1) 石膏ボード雑壁の終局耐力の算定

石膏ボード雑壁および耐力壁の終局耐力を以下の仮定に基づき文献8)に沿った方法で算定した。石膏ボード雑壁は1820mm×910mm×12mmの石膏ボードが@300mmで付図1のように下地（柱のみ）にビスで固定されているものとし、石膏ボード耐力壁は2730mm×910mm×12mmの石膏ボードが@150mmで柱のみにビスで固定されているものと仮定した。石膏ボードのビス接合一面せん断の骨格曲線を付図2とした場合、付図3のように耐力壁の終局耐力が608kgf、雑壁の終局耐力が162kgf計算される。なお、柱の曲げ変形は考慮していない。本文図2中の石膏ボード耐力壁の最大耐力が600kgf程度であるので、本仮定は適切と判断し、本文中の石膏ボード雑壁の骨格曲線を石膏ボード耐力壁の162/608=0.26倍とした。

付図1 想定モデル

付図2 石膏ボードのビス接合一面せん断骨格曲線

付図3 石膏ボード耐力壁および雑壁の復元力特性計算値

注2) 計算に用いた建物の法定耐力壁量の決定要因

今回計算に用いた建物の法定耐力壁量は、223棟が1,2階とも地震力で決定し、274棟が1,2階とも風圧力で決定している。また、43棟が1階のみ地震力で決定し、16棟が2階のみ地震力で決定している。付図4に各々の場合における耐力壁充足率の分布を示す。

a) 1,2階とも地震力で決定する場合 b) 1,2階とも風圧力で決定する場合

c) その他の場合

付図4 耐力壁充足率の分布

注3) 上下階の耐力壁がずれている場合の床剛性による保有水平耐力の増幅効果について

上下階の耐力壁がずれている場合の壁配置例として付図5及び付図6を示す。付図5ではEW方向耐力壁による偏心率0.40, NS方向耐力壁による偏心率0.26, 直下率（＝直下に1階耐力壁の存在する2階耐力壁実長／全2階耐力壁実長）はEW方向壁で0.00, NS方向壁で0.67である。付図6ではEW方向耐力壁による偏心率0.13, NS方向耐力壁による偏心率0.37, 壁直下率はEW方向壁で0.40, NS方向壁で0.00である。図中のf1, f3は各々“四隅火打”と“火打＋合板”の場合のLevel 2時保有水平耐力を決定する最大変位壁線である。本報の解析法による両建物の保有水平耐力を付表1, 2に示す。図より床の種類の変更による保有水平耐力決定最大変位壁線はあまり変化しないことが分かる。また、付図5の建物のEW方向保有水平耐力が床の種類を“四隅火打”から“火打＋合板”に変更したことより倍増していることが数字上目立つが、図9より妥当な増加であることが分かる。

また、Level 2時保有水平耐力とLevel 1時保有水平耐力の比は、付図5の偏心率の大きいEW方向で“四隅火打”の場合で1.39倍、“火打＋合板”の場合で1.79倍となっており、床構面強度の増加による保有水平耐力の比の増加が読みとれる。一方、偏心率の小さいNS方向では“四隅火打”の場合で1.62倍、“火打＋合板”の場合で1.58倍となりあまり変わらない。しかし、付図6の偏心率の大きいNS方向で“四隅火打”の場合で1.68倍、“火打＋合板”の場合で1.74倍、偏心率の小さいEW方向で“四隅火打”の場合で1.64倍、“火打＋合板”の場合で1.80倍であり、床構面強度の増加による保有水平耐力の比の増減は明確でない。従って、床構面強度の増加によるLevel 2時保有水平耐力とLevel 1時保有水平耐力の比率の増減傾向は現状では特定できない。

注4) 直交壁を考慮した3次元解析結果と本報の解析法による結果の比較

付図5および付図6の壁配置を持つ建物に対し、直交壁を考慮した3次元解析結果と本報解析結果を比較する。3次元解析では、直交壁の耐力を考慮するほか、

床で伝達するせん断力は図4の骨格曲線を用い、保有水平耐力を2.3節の定義で計算している。付図5, 6中の3Df1, 3Df3は各々“四隅火打”と“火打+合板”の場合の直交壁を考慮した3次元解析によるLevel 2時保有水平耐力決定時最大変位壁線である。図より保有水平耐力決定時最大変位壁線は、直交壁を考慮した解析と本報の解析法では大きく変わらないことが分かる。保有水平耐力を付表1, 2に示す。表より、付図5の建物で床が“四隅火打”の場合、偏心率の大きい方向(EW方向)加力時には直交壁を考慮した解析と本報の解析法では値が大きく違うが、偏心率が小さい方向(NS方向)加力時には大きくは違わない。一方、付図6の建物では偏心率の大きい方向(NS方向)に加力した場合も、偏心率が小さい方向(EW方向)に加力した場合も本報の解析法による保有水平耐力と直交壁を考慮した解析による保有水平耐力では大きくは違わない。ただし、どちらの建物の場合でも本報の解析法による計算結果の方が小さく、本報の解析法が安全側の結果を算出することが分かる。

付図5 対象建物の壁配置(図中の番号は壁倍率を表す)

付図6 対象建物の壁配置(図中の番号は壁倍率を表す)

付表2 付図6の建物の保有水平耐力

		本報の解析法		直交壁を考慮した解析	
		Level 1	Level 2	Level 1	Level 2
E W 方向	“四隅火打”	0.28	0.46	0.38	0.62
	“火打+合板”	0.35	0.63	0.39	0.65
N S 方向	“四隅火打”	0.22	0.37	0.27	0.43
	“火打+合板”	0.27	0.47	0.28	0.47

付表1 付図5の建物の保有水平耐力

		本報の解析法		直交壁を考慮した解析	
		Level 1	Level 2	Level 1	Level 2
E W 方向	“四隅火打”	0.18	0.25	0.24	0.50
	“火打+合板”	0.28	0.50	0.32	0.59
N S 方向	“四隅火打”	0.34	0.55	0.40	0.67
	“火打+合板”	0.36	0.57	0.42	0.62

(2000年5月10日原稿受理, 2001年4月20日採用決定)