 総 説

[木材学会誌 Vol. 60, No. 4, p. 195-205 (2014)]

木造住宅の性能指向型耐震設計に関する 研究と経験工学の安全性^{*1}

五十田博^{*2}

Research Review of Performance-Based Seismic Design and Real Performance Followed by Non-Engineered Design of Wood Houses^{*1}

Hiroshi ISODA^{*2}

This paper presents problems of current seismic structural design as followed by current building standard law and enforcement and research review for wood houses. Key issues of seismic design are to define earthquake intensity, seismic weight such as amount of dead load and measurement of live load, design values of shear walls, load-displacement relationship in story and so on. They are decided based on observation of damages during known severe earthquakes and were attempted to be expressed with the technology of performance-based seismic design. To ensure the true safety against extreme and unexpected earthquakes which are not inexperienced in modern engineered design, a total design concept is important and it is not known whether refinement of partial design rules and seismic value of shear wall is safe.

Keywords: wood house, seismic design, performance-based design, Empiricism, wall quantity design.

木造住宅の耐震設計法は経験工学として発達してきた。一方で、最近の構造設計の潮流は実際の入力に対して応力や変形を求める性能指向型である。経験工学を最新の性能指向型設計で説明を試みるものの、完全に説明がつくわけではない。一方で、経験工学のうち技術的に説明が容易な部分、例えば壁の評価や接合部の設計法など、は高度化され耐震設計法に取り入れられている。しかし、建物全体として安全を担保する方向かは不明なところもある。本総説では、性能指向型の耐震設計の研究の現状を概説するとともに、それを現在用いられている経験工学の諸数値と比較、検討し、現在の耐震設計で確保される木造住宅の地震時安全性について論じる。

1. はじめに

木造住宅の耐震性能に関する解説書はいくつかあり、代表的な書籍として、杉山¹⁾、坂本²⁾によるものがあげられる。教科書としては「木質構造」^{3, 4)}など、があり、学術団体からは、日本建築学会「木質構造の設計 学びやすい構造設計シリーズ」⁵⁾、日本木材学会「木造住宅の耐震」⁶⁾などで網羅的に耐震性能や設計法について解説がされている。また、日本木材学会の総説では、有馬による「木造住宅の

^{*1} Received November 14, 2013; accepted April 20, 2014.

^{*2} 京大大学生存圏研究所 Research Institute for Sustainable Humansphere Kyoto University, Uji 611-0011, Japan

Corresponding author: H. Isoda (hisoda@rishi.kyoto-u.ac.jp)

耐震」で整理⁷⁾がある。これら書籍、教科書、解説に共通する具体的な事項は、設計に必要な壁量、構造計画の必要性、劣化への配慮などに加え、建築基準法施行令の木造部分（以下、基準法と称する）やその関連告示についての制定時からの考え方や設計法の推移などである。以上の内容を精査すると、耐震性を向上させる技術や設計法などの定性的な考え方はすでに整理が進んで一定の成果を上げた、ように読める。例えば、前出の日本木材学会が1995年兵庫県南部地震後に取りまとめた報告書⁶⁾では、「耐震性への配慮がされた木造住宅が倒壊を免れ（後略）」と記述されている。同様の記述が日本建築学会や日本住宅・木材技術センターなどの調査報告書^{8, 9)}にもあり、ごく当たり前の表現であるが、当時の耐震設計により住宅の安全性が担保できることをうたっている。一方で1995年兵庫県南部地震の被害に対し1981年以前の木造建物の被害が大きいことに目を奪われ、いくばくか被害を受けた新築住宅に注目し、現行の設計法の精度を上げる、という域にまで達していないとの見方も可能である。さらに、2011年東北地方太平洋沖地震ではこれまで経験したことのないような継続時間の長い地震波が観測されており、継続時間の長い地震動や引き続き襲う余震への安全性の確保も必要な検討項目のひとつであるが、そこへの注目はさほどでもない。

本稿では、実際の外力に対して存在応力や変形を求め抵抗側の許容耐力や限界変形と直接比較する性能指向型設計法（以下、性能設計と称する）に関する研究の現状を、経験工学である現在の耐震設計で用いる諸数値と比較しつつ概説する。なお、現在の設計法であっても変形や応力などを求め許容値と比較しており性能設計されているという考え方もあるようだが、大地震動に関していえば、入力設計上の決めごとであり限界変形も同様に決めごとで実態を表現しておらず、本来の性能設計で用いる諸数値とは異なる。また、上記で述べた解説書等との違いを出すにあたり重きを置いたのは、外力との関係で耐震性を論じることと、できるだけ定量的に示すこと、である。対象は在来軸組構法による2階建てを主とする木造住宅である。2章と3章の前半は本内容の理解の助けとなるよう基本的な事項を整理した。以下文中、単位などは整理せず、原著のままとしている点に注意願いたい。

2. 性能設計で要求される諸数値

構造設計は、設計外力に対して建物の抵抗力が上回ることを確認する行為である。ここで1質点系に

作用する地震動を考えると、地震外力を瞬間的な加速度と考えた場合には式(1)で、地震外力を瞬間的なエネルギー投入と考えた場合、式(2)で表される。

$$ma < Q \quad (1)$$

$$1/2mv^2 < E \quad (2)$$

m : 建物の質量

a : 質点に作用する絶対加速度

Q : 建物の抵抗力

v : 質点に作用する絶対加速度

地震動の時々刻々の地震力と抵抗力との力のつり合いは振動方程式であり、式(3)となる。

$$ma(t) + cv(t) + Q(x) = -ma'(t) \quad (3)$$

m : 質量

$a(t)$: 質点に作用する相対加速度

$a'(t)$: 地動加速度

$v(t)$: 質点に作用する相対速度

c : 減衰定数

$Q(x)$: 変位 x における抵抗力

力、エネルギーいずれの場合も外力側は地震動の強さと質量を変数とする。抵抗力側は荷重や荷重変形関係で囲まれる面積である。つまり、層の荷重変形関係によって抵抗力と抵抗エネルギーが定義される。また、時刻歴応答解析などによって個別の地震動に対する応答変形を議論する場合、荷重変形関係に加えて繰り返し荷重に対するルール、履歴則が必要となる。整理すると、大地震時の性能設計で定量化すべき諸数値は主に、外力、質量、抵抗側の性能を示す壁や層の荷重変形である。

3. 地震外力について

建築基準法における地震力規定の変遷については大橋により詳細に整理¹⁰⁾がされているのでそちらをご覧くださいこととして、現在は1981年の基準、いわゆる新耐震設計法を用いている。水平力を建物重量、ここでは地震力算定用重量、の0.2倍と考え、その際に建物各部に生じる応力が許容応力度以内にあることを確認する規定と、同じく1.0倍の水平力に対して保有水平耐力と比較する2つの規定からなる。ここで1.0倍の水平力に対しては、部材の変形能力、つまり地震エネルギー吸収能力等に応じた低減係数によって外力を減じること、さらに、建物の周期と地盤の周期の組み合わせによって外力を減じること、ができる。2000年に定められた施行令（以下、令と称する）第82条の6、限界耐力計算もベースシアスペクトルと応答スペクトルの違いはあるものの、基本的に規定している外力の大きさは同じである。外力と状態の組み合わせは稀に発生する地震

動に対して損傷しない限界以内にあることと、極めて稀に発生する地震に対して各部に生じる応力が保有水平耐力を超えないこと、を確認することである¹¹⁾。

近年観測されている地震動の加速度応答スペクトルを Fig. 1 に示す。限界耐力計算の2種地盤に対するそれも合わせて示した。建築物の倒壊に対して大きな影響を及ぼす周期帯は1~2秒とされ¹²⁾、そのうち2階建ての木造住宅にあつては1.0~1.5秒の速度成分の影響を受けること¹³⁾が、境により明らかにされている。2011年東北地方太平洋沖地震の際に各地で観測された地震動に対する時刻歴応答解析¹⁴⁾

Fig. 1. Acceleration spectrum observed in recent earthquakes Kasumigaseki is of ground motion directly hitting Tokyo area.

の層の最大応答変形を縦軸にとり、横軸を速度応答スペクトルの1~1.5秒周期に対して描いたものが Fig. 2(a)である。Fig. 2(b)には横軸を最大加速度としたものを比較として示したが、速度応答スペクトルの平均値で最大応答変形を良好に表現できること、地動加速度は建物の最大応答変形とほぼ無関係であること、がわかる。Table 1 は Fig. 2 に示した地震動の平均速度を比較したものである。限界耐力計算で想定している地震動はこれまで観測されている極大地震動に比べて1/2程度 of 平均速度であり、地震動としてはかなり小さめである。言い換えれば、観測地震動が大きい割には建物の倒壊などの被害は少ない。このことは木造住宅に限った話ではなく他の構造でも同じである^{例えば15)}。この原因については後述する。

また、将来予想される地震動に対しては、地震調査研究推進本部のHP¹⁶⁾にて強震動の長期予測による揺れの強さや「震源断層を特定した地震の強振動評価のレシピ」による精度高い地震動の予測手法が示されている。このレシピやその研究の背景などにより、特定の地震動に対する地震動予測の精度が確

Table 1. Pseudo average velocity of period of 1-1.5 s.

BSL	JMA Kobe	JR Takatori	K-net Kurihara
167	215	316	120

BSL : Building standard law of 2nd rank soil condition
JMA Kobe 1995 Hyogo-ken Nanbu Earthquake
JR Takatori 1995 Hyogo-ken Nanbu Earthquake
K-net Kurihara 2011 Tohoku Taiheiyoku-oki Earthquake

Fig. 2. Relationship between maximum story drift and average velocity of 1-1.5 s or ground maximum acceleration.

(a) Velocity of 1-1.5 s (b) ground maximum acceleration.

認されているが、「地震動の計算に用いる地下構造や微視的震源パラメータの精度良い推定には限界があることから、評価結果である地震動の数値は誤差を含んでいる」ともされている。その誤差の程度は不明であり、今後も修正・改訂していくことがこれらの予測の前提である。

このような前提条件付であるが、将来予測される地震動の参考として首都直下地震¹⁷⁾に対する加速度応答スペクトルをFig. 2中に併記した。この地震動は建築基準法が定める地震動と比較的同じ程度であり、時刻歴応答解析を実施しても安全限界程度となっている¹⁷⁾。

4. 木造住宅の重量について

地震力に直接的に関係する建物の質量、ここでの重量は固定荷重と積載荷重、そして積雪荷重である。固定荷重は材料そのものの重量で、木造住宅の平米あたりの固定荷重、いわゆる均し荷重の計算事例が木造住宅の耐震診断と補強方法（以下、耐震診断と称する）¹⁸⁾に示されている。この試算の前提は令84条や荷重指針¹⁹⁾である。これらの設計上の重量と実際の建物重量との比較研究は数例例えば²⁰⁾にすぎないが、均し荷重は実測より6%程度小さめ、つまり危険側、令84条との比較では均し荷重が3.2%程度重め、つまり安全側であることが述べられている。詳細に計算をすれば安全側としてほぼ妥当な値が計算されるということである。

積載荷重の評価は、昭和初期から建築構造に関する法令等で集中を考慮した最大時の積載荷重に対する低減係数として規定がなされていた^{21, 22)}。石川・平田らの積載荷重の評価に関する研究²³⁻²⁶⁾によると、これらの規定値の設定根拠は外国法令の模倣に端を発し、その後、いくつかの提案式による検討を経て、複数の算出式による日本独自の論理的検証に基づき決定されたとされている。しかし、算定式に用いられる係数等の設定に関しては、根拠が不明なもの、経験に基づき提案されたもの、まったくの見込みによるものなど、既定の根拠としてあいまいな点を内包したまま現在の建築基準法・施行令等にまで適用されている経緯がある。住宅に対してデータがないとの認識のもと調査を実施したのも石川ら²⁷⁾であり、平米あたりの平均物品重量を約30 kgf/m²、特異な値を除いた最大物品重量は60~80 kgf/m²程度としている。最大値は現行の建築基準施行令600 N/m²とほぼ同じである。なお、同論文では平均人間重量が14.9 kg/m²、最大人数時の平均人間重量は47.3 kg/m²であることも明らかにしている。

積雪荷重については、現行の壁量計算では考慮されていない。これは学術的な観点というよりは、常に後追い、つまり被害を生じて改正に至るという経緯を繰り返してきた我が国の法令の不備のひとつである。1925年の建築基準法制定後に積雪時に発生した地震としては1961年長岡地震や2011年3月12日未明に発生した長野北部地震などが知られるが、長岡地震では、積雪の壁により1階は倒壊を免れ、2階が倒壊している住宅が多くみられている²⁸⁾。同論文において被災時の屋根雪が30 cm程度で、無積雪時との違いが致命的な要素と考えられるほどの量ではないが、非住家では70~80 cm程度の積雪により倒壊した例が2, 3あるとも述べられている。しかし、結局のところ基準法改正までには至っていない。なお、住宅の品質確保の促進等に関する法律（以下、品確法と称する）や耐震診断では積雪荷重を地震力算定用重量と考えて壁量を算出している。

ここでこれら重量物の地震時の挙動について考えると、固定荷重は建物に固定されており、一般の設計で考える床面の地震応答とほぼ同じ挙動を示す。積載荷重は建物に固定されていないものもあり、積載物に床面の加速度を乗じたせん断力が床面に対して作用しているかは不明である。岡崎らの振動台実験²⁹⁾によれば、ピアノといった重量物から生じる床面のせん断力は実重量の20%程度との報告があり、固定されていない引き出しなども実重量の半分ほどに低減される。積雪荷重も滑動する可能性があるが、千葉らは屋根仕上げと積雪の破壊、滑動の関係を振動台実験を通じて例示し³⁰⁾、時刻歴応答解析により積雪時の木造住宅の地震応答を求め、2階の地震応答が極端に小さくなることを明らかにしている³¹⁾。ただし、屋根雪の破壊、滑動の境界条件については定性的な結論は出さず、今後の課題としている。

なお、基準法、品確法および耐震診断において壁量計算の際に固定荷重を想定しているが、それらについては8.で述べる。

5. 層の荷重変形

5.1 耐力壁と非構造部材

耐震設計において層の性能評価は、壁の評価値の累加、壁量計算では壁倍率×壁長さの累加によりなされる。基準法では耐力壁のみで設計をするが、木造住宅は非構造部材の水平耐力への寄与が大きい。非構造部材が持つ荷重と変形の関係について注目し多くの実験を実施した先駆者は大橋³²⁾である。実建物では非構造部材として用いる仕上げ材料とその

壁長さによりその寄与の多寡は異なるが、最近の報告では、垂れ壁、腰壁により $1/120 \text{ rad}$ 時の耐力が 1.25 倍³³⁾ になるとの実験結果がある。これは2004年度版の耐震診断³⁴⁾ で、それらの効果を必要耐力の 25% としていたが、その値と同じである。また、建具や階段などについても実験結果例があり、建具は 1P で $1\sim 2 \text{ kN}$ 程度の耐力を有すること³⁵⁾、階段は種類にもよるが直線階段は最大 28.0 kN もの耐力を有するが $1/70 \text{ rad}$ で急激に耐力低下すること³⁶⁾、が明らかにされている。

木造住宅のようなせん断系の建物の層の荷重変形関係は、非構造部材もすべて含む壁の累加により求められる。綿引・町田らは単体壁の累加により求めた層の荷重変形関係と実大建物の静的・動の実験により得られたそれを比較している^{37, 38)}。その結果、 $1/60 \text{ rad}$ 程度の範囲では累加により層の荷重変形を追跡可能であるが、最大耐力に関しては累加が 20% ほど小さな値になることを明らかにしている。

5.2 倒壊限界

木造建築物は規模も小さく重量も軽いため、比較的容易に振動台実験が可能であり、これまで住宅ばかりでなく多くの建物に対して実験が実施されている³⁹⁾。本稿の内容と関連深い、設計値と木造住宅の応答変形を比較した研究として、坂本・大橋・橋本らによる一連の振動台実験があげられる。そのうち、品確法の耐震等級2を 1.25 で除したものの、耐震等級2、耐震等級3の建物に対し、1995年兵庫県南部地震の神戸海洋気象台で観測された地震動の3次元加振を実施した結果がその22⁴⁰⁾ に述べられている。最大応答層間変形と主な損傷状況を Table 2 に整理し示した。基準法の 1.5 倍以上の性能を持つ耐震等級3であっても変形が $1/27 \text{ rad}$ に達し、後述の壁倍率算定の限界変形である $1/15 \text{ rad}$ はクリアできたが、限界耐力計算で要求している $1/30 \text{ rad}$ は満足できていない。品確法の等級2は $1/12 \text{ rad}$ にまで変形が進んだ。耐震等級2の性能を 1.25 で除した住宅は、 $1/5 \text{ rad}$ まで変形が進み倒壊防止ワイヤーが効いて倒壊を免れた。つまり、この実験結果は、壁量計算の耐力壁のみで構成される建物では極大地震に対して倒壊の危険があることを示している。

なお、木造以外の構造でも地震動の割に被害が小さいと前述したが、それらは地盤と建物の動的相互作用効果による有効入力低減効果などに原因があるのではないかとされている¹⁵⁾。しかし、木造住宅のように軽い建物ではその効果が表れにくい。入江ら⁴¹⁾ は中地震に対する観測結果を示し、今後の観測が必要としながらも現段階ではその影響の小さいことを述べている。

それではどの程度まで変形が進むと木造住宅は倒壊にいたるのであろうか。設計上の安全限界は、倒壊限界よりかなり控えめな値であり、限界耐力計算では $1/30 \text{ rad}$ を原則とし、特別な調査研究によってそれ以上の変形とすることが可能としている。耐力壁の性能評価試験⁴²⁾ では変形を最大荷重の 80% の荷重に低下するまでか、変形角が $1/15 \text{ rad}$ まで、としていることから推定するに、 $1/15 \text{ rad}$ までを許容しているように読める。耐震診断でも $1/15 \text{ rad}$ まで許容しているように読める。なお、一般的な壁は $1/20 \text{ rad}$ 程度で最大荷重の 80% に達するものが多く、モデル化でもそのように定めている⁴³⁾。実際の倒壊限界を静的実験により明らかにした論文⁴⁴⁻⁴⁷⁾ では、倒壊限界は設計値や積載荷重の多寡により厳密には異なるが $1/3\sim 1/5 \text{ rad}$ 程度としており、前述の $1/15 \text{ rad}$ に対して $3\sim 5$ 倍程度の余裕がある。

5.3 繰り返し則

地震時挙動の追跡に関する研究は層の荷重変形関係の履歴則を決めることであり、これまでこの種の研究の目的は大きく2つに分けることができる。ひとつは五十田⁴⁸⁾ による、モデルの精度向上よりも、鉄筋コンクリート造や鉄骨造と同様に部材や接合部の設計資料に基づいて、地震時挙動の追跡ができる環境の構築を目的に、簡易なモデルを提案したものである。そこでは、バイリニア+スリップというなじみのあるモデルを並列させたモデルにより、多少の誤差はあるものの、最大荷重以前の最大変形を追跡可能であることや、壁倍率を指標としたパラメータの決定手法を示している。多少の誤差は、安全側というよりも正解値に対するものである。

もうひとつは精度よく壁実験の結果や振動台実験

Table 2. Maximum story drift during JMA Kobe in shaking table test.

Seismic Performance	Rank 1	Rank 2	Rank 3
Maximum story drift	$1/5 \text{ rad}$	$1/13 \text{ rad}$	$1/27 \text{ rad}$
Damage	Braking of column Buckling of bracing Flaking off of Plywood	Separation of sheathings Drawing of nails	Drawing of nails only in corner of windows

の結果を追跡できるように提案した復元力特性モデルである。坂本・大橋は当初バイリニア+スリップを用いていた⁴⁹⁾が、より精度を高めるため大橋が壁実験を模したモデルを提案した³²⁾。その後、佐藤らによって Bouc-Wen モデルを用いた関数モデル⁵⁰⁾や松永らによる拡張 NCL モデル⁵¹⁾の木造耐力壁への応用があり、様々な履歴を持つ繰り返し実験の結果と比較し、その精度を論じる研究がなされている。また、荒木らによって等変位での繰り返し載荷時の剛性劣化をループの繰り返し回数で考慮する手法⁵²⁾が提案された。海外では Stewart⁵³⁾や Folz⁵⁴⁾などの研究がその代表である。その後 Pang⁵⁵⁾によって、Folz の指数関数モデルを踏襲しつつ、繰り返し変形時に剛性劣化を考慮できるよう2つの骨格曲線を持つモデル (EPHM) が提案された。最近では EPHM モデルを軸組構法の耐力壁等で精度がよくなるような改良法が提案され、その精度が振動台実験の結果との比較で述べられている⁵⁶⁾。以上のモデルでは、初期から非線形を示す木造のモデルを精度よく追跡できるよう連続関数を用いて表し、さらに、ある特定の材料や接合条件を用いた試験体に対する実験結果を忠実に再現できるモデルとして提案されている。

6. 経験工学で実現される安全性

500 m² 以下の2階建ての木造住宅では建築確認申請上、耐震耐風計算は不要であり、壁量計算と関連告示によって計算を代替している。品確法も同じく壁量計算による方法があり、さらに耐震診断の一

般診断法や精密診断法 I も壁量計算と同様の方法をとっている。この壁量計算、つまり平米あたりの壁の必要量を示す壁率の考え方の始まりは福井地震の被害観察の結果⁵⁷⁾に基づくもので、その後の地震被害を受けて何度か見直しがされている。有馬は基準法の壁量計算を「すでに明らかのように壁量計算は外力と抵抗力から導かれた換算法としての設計法である。構造力学的な体系からの解析が困難を伴っていることから設計法として便宜上、実験結果を参照して定められたものである。したがって、実務に則するように導かれた壁量計算や壁耐力を基本とした設計法を構造力学体系から単純に批判することは基本的に筋違いである」と指摘⁷⁾する。とはいえ、立案当初より数値的な根拠も示されている。それらは、前出の日本木材学会の報告書⁶⁾、日本建築学会日本建築学会「建築耐震設計における保有耐力と変形性能」⁵⁸⁾、「木質構造基礎理論」⁵⁹⁾や「木質系耐力壁構造に関する Q&A」⁶⁰⁾などに詳しい。ここでは、重量と壁の評価、非構造部材の評価という観点から、さらに現段階でこの壁量で担保されている性能を品確法や耐震診断と比較しつつ整理し、説明を続ける。

Table 3 に重量と倍率の根拠^{18, 58-63)}を示した。壁量については歴史的な経緯も若干たどり示した。2000年の改正では非構造部材は設計上見込まないよう変更しているが、壁倍率1.0倍の耐力を130 kgf から200 kgf に変更したことで、ばらつき係数の考え方を変えた結果、重量は変更がなく、つまり壁量も変更なく、1981年基準を踏襲している。その結果としてこの改正により、余力として考えていた開口部

Table 3. Calculation basis of seismic design method of length of shear walls.

	Seismic Weight (kgf/m ²)	Evaluation of shear wall	Contribution of Non-structural element
BSL of 1959	Roof 90, 120 Story 80, 80	Shear strength at 1/60 rad Dimension 1.5×9 cm of bracing is value of 1.0	20%
BSL of 1981	Roof 108, 147 Story 170, 170	Minimum strength of load of 120 rad or 2/3 of Maximum strength and 3/4 as the safety variability. 130 kg/m is defined as 1.0	1/3
BSL of 2000	Roof 108, 147 Story 170, 170	Lower limit of Minimum strength of load of 120 rad or 2/3 of Maximum strength of 0.2 Pu/Ds or yield strength Py. 200 kg/m is defined as 1.0	No count
Performance evaluation	Roof 140, 196 Story 210, 260	In addition to the BSL of 2000, evaluation of non-structural elements in the BSL with evident strength	No count
Seismic Diagnosis	Roof 140, 200 Story 220, 260	0.2 Pu/Ds including non-structural elements in the BSL and openings	No count

*1) Order of seismic weight is light weight and heavyweight

*2) 1/120 rad in the BSL of 2000 is defined as no damage in structure

などに壁倍率も与えることが可能との解釈も可能である。また、2000年の壁の評価法の変更により筋かいなどでは施行令に示されている壁倍率が得られないことも指摘されている^{64, 65)}。

なお、Table 3 に示したとおり、現行の設計上利用している壁の評価はいわゆる4つの指標でなされ、この指標の足し算が成立するかについて疑問が投げかけられている⁶²⁾。五十田は時刻歴応答解析によって、安全限界が一般の壁よりも脆性的な場合には足し算が成り立たず危険側となること、延性のある壁の足し算は安全側に作用していること、を示した⁶⁶⁾。筋かいは壁実験などでは脆性的な挙動の示すとの結果もあるが、振動台実験の項でも示したように振動台実験ではその傾向が顕著ではないようである^{67, 68)}。その結果、一般な構造用合板や筋かいなどの壁を用いた住宅については単純累加であっても安全性の低下はないものと考えられる。

基準法の壁量に加え、品確法と耐震診断のそれをFig. 3 に整理して示した。総2階建てでみると基準法の壁量が極端に少ない。しかしそれぞれで耐力としてカウントできるものが異なるため、単純な比較ではその実態はみえてこない。そこで、これまでの研究に基づき、比較検討の一例を示してみたい。比較の手順、方法は以下の通りとした。

- ① 基準法は耐力壁のみをカウントしている。そこで、外壁などの非耐力壁と垂れ壁腰壁が1/3を負担しているとして1.33を乗じ、さらに累加則に対する効果20%を考慮する。
 - ② 品確法は準耐力壁が含まれるため、外壁などの寄与を腰壁垂れ壁を含んだとする効果25%のうちの10%と見做し、さらに累加則に対する効果20%を考慮する。
 - ③ 耐震診断は累加則に対する効果20%を考慮する。
- 以上により実現される壁量を再整理したものが

Fig. 3. Comparison of length of shear wall.

Table 4. Comparison of real value of length of shear wall.

	BSL		Performance evaluation		Seismic Diagnosis	
	1/2	2/2	1/2	2/2	1/2	2/2
Light weight	46.3 (0.25)	23.9 (0.26)	47.5 (0.26)	26.0 (0.28)	44.1 (0.24)	22.3 (0.24)
Heavy weigh	52.7 (0.22)	33.5 (0.25)	61.2 (0.26)	36.2 (0.27)	56.3 (0.24)	31.8 (0.24)

Corresponding value of base shear is shown in parentheses

Table 4 である。整理にあたっては総2階建てを比較の対象とした。

ここで、耐震診断の値が比較的正しい重量に対して $Co=0.2$ で設計していると考ええると、実現される建物は $0.2 \times 1.20 = 0.24$ である。壁量計算の重い屋根で10%程度危険側であるが、総じて同程度の性能を要求している。その値は短期許容応力度レベルの地震動に対して $Co=0.24$ であり、木造は余力があるといわれるが、その傾向はこの計算からはみられない。なお、耐震診断における軽い建物はスレート葺き屋根、ラスモルタル外壁、内壁石膏ボードを想定しており、重い建物は屋根を棧瓦葺、土塗り壁が器壁、内壁石膏ボードを想定している。軽い建物は外壁をモルタルとしており比較的余裕をみた設計であるが、重い建物はその考慮はない。地震動は2章で考察したとおり、現行基準に対して2倍程度が最大として作用する可能性がある。ということは、結局のところ必要安全限界に対して必要な耐力が不足しているということである。つまり、地震時に現行の設計で倒壊に至らないという説明は、設計時の限界変形を最大 $1/15$ rad 程度とみているが、実際には $1/5 \sim 1/3$ rad 程度まで倒壊に至らないことが大きな要因のひとつと考えられる。

7. 各部設計における経験工学と性能設計への展開の問題

設計時に耐力壁の累加を成立させるためには、接合部が先行破壊せず、水平構面が十分に剛であり、ねじれ挙動が無視できるほどでなければならない。接合部の設計については告示1540号で表から選ぶ方法と表によらず計算による方法が示されている¹¹⁾。ここで耐力壁の短期許容耐力や壁倍率の算定は、Table 3 に示した最小値に平均値の下限値になるようにばらつき係数と施工による低減係数が乗じられたものによってなされる。一方、接合部の短期許容耐力は、降伏荷重か最大荷重の $2/3$ の95%下限値を

用いる。告示1540号の表による方法は計算による方法を安全側に簡略化したものである。仮に計算法が建物内の耐力壁の引き抜き力を精算できると考えた場合、保有耐力接合が担保されるためには壁の耐力を平均値の下限值としている点と、接合部を単純に下限値としている点の差による。この差で保有耐力接合が担保されるかは、中尾らによって、壁の許容せん断耐力と最大耐力に対する比率と接合部の短期許容引き抜き断力と最大引き抜き耐力の比率を用いて考察がされている⁶⁹⁾。その結果は「短期基準せん断耐力と短期基準接合耐力とを用いて損傷制御のための検定を行い、接合部の先行破壊が生じないように設計をしても、耐力壁と接合金物の組み合わせによっては、必ずしも実際に耐力壁が接合部より先に破壊することは保証されない」である。また、表によらない計算による方法、いわゆるN値計算法の計算精度を論じた論文⁷⁰⁾でその計算精度を確認すると、2P耐力壁では危険側、そのほかは安全側が妥当な数値を与えており、前述の不備を部分的に補うと説明も可能である。表による方法は略算であり、安全側となる部分が増える。結局のところN値計算法は略算であり、略算であるがゆえに部分的にはあるが安全率もある。それにより保有耐力接合の確率が高くなっている。逆に、計算手法を高度化し、精緻に結果を求めるのであれば、接合部の側に安全率を乗じて耐力を下げて評価をする、といったことが必要になる。ここでは耐力壁についてのみ述べたが、耐力壁と併用される計算にカウントしない壁が多々ある。これらは文字通り計算にカウントできないほどの性能であるが、わずかなりにも耐力を有する。これについても設計法か、接合部の安全率によって見込む必要がある。

ついで、偏心率についてみると、告示1352号によれば、木造の偏心率計算は0.30でよいとしている。偏心率が0.30とよいという説明は壁の靱性が十分にあること⁷¹⁾であるが、もちろん非構造部材や床の剛床仮定などによっても偏心計算は影響する⁷²⁾。仮に靱性であれば、靱性のある壁を用いる必要があるし、非構造部材や床の仮定であるのであれば、開口部の耐力評価や床の評価などで、偏心率が0.30では不十分ということになりかねない。

以上のように設計に用いる要素の取捨選択と評価値、さらに設計法は密接に関連している。

8. ま と め

結果論としての安全性と経験工学から性能設計へ耐震設計は作用する地震外力と建物の抵抗力を比

較し、「外力<抵抗力」をもって安全を確認する作業である。性能設計では外力、存在応力、抵抗力、変形量などがそれぞれ明示されるが、壁量計算とその関係告示ではそれらは不明で本来的に経験工学である。

本稿で考察してきた住宅の主な設計法である壁量計算とその関連告示の内容を、実態と比較して、危険側の評価と安全側の評価にわけて示すと、

危険側：外力（地震動）、固定荷重、積雪荷重、

安全側：積載荷重（微妙だが）、安全限界（設計法としては「耐力の評価」と読み替えることもできる）

である。また、保有耐力接合や偏心計算が略算や緩和規定として存在するが、耐力壁の種類や接合部との組み合わせによっては不十分の接合や配置になる。以上が現状の設計法であり、控えめな外力と安全側の抵抗力、あいまいな設計法と評価法の微妙なバランスで、設計上要求している地震動よりも大きい1995年兵庫県南部地震に対して「結果オーライ」となった。

世界的な潮流として性能設計に向かって研究が進んでいる。

現状では入力（地震動）を確定して材料や設計の詳細のわかる試験体であれば応力や変形を求め、実験結果に整合させることができる。しかし、この研究成果を設計に活かすためには、地震工学との協働による地震動の精緻化と設計体系全体の整理、構築を待たねばならない。

文 献

- 1) 杉山英男：“地震と木造住宅”，丸善，東京，1996.
- 2) 坂本 功：“木造建築を見直す”，岩波新書，東京，2000.
- 3) 杉山英男，菊池重昭，野口弘行，鈴木秀三，神谷文夫，安村 基：“木質構造（第4版）”，共立出版，東京，2001.
- 4) 平井卓郎，小松幸平，宮澤健二：“木質構造（第3版）”，東洋出版，東京，2004.
- 5) 日本建築学会：“木質構造の設計 学びやすい構造設計シリーズ”，日本建築学会関東支部，東京，2008.
- 6) “木造住宅の耐震”，日本木材学会編，1996.
- 7) 有馬孝禮：木造住宅の耐震，木材学会誌 43(7)，525-531（1997）.
- 8) “兵庫県南部地震被害報告書”，日本建築学会，東京，1997.

- 9) “平成7年阪神・淡路大震災 木造住宅等震災調査報告書”, 日本住宅・木材技術センター, 東京, 1995.
- 10) 大橋雄二: “日本建築構造基準変遷史”, 日本建築センター, 東京, 1993.
- 11) 日本建築センター, 日本建築防災協会: “2007年度版 建築物の構造関係技術基準解説書”, 全国官報販売協同組合, 東京, 2007.
- 12) 境 有紀: 地震動の性質と建物被害の関係. 日本地震工学会誌 9, 12-19 (2009).
- 13) 境 有紀: 建物被害と対応した地震動の周期帯の再検討-2007年能登半島地震, 新潟県中越沖地震のデータを加えて. 日本建築学会構造系論文集 642, 1531-1536 (2009).
- 14) 五十田博: 地震の基礎知識. “特集東日本大震災-木材産業に何が起こったのか”, 木材工業 vol. 66, 482-457 (2011).
- 15) 壁谷澤寿海: 鉄筋コンクリート建物の地震被害と耐震性能の現状. “耐震の今-成熟から拡張へ”, 建築雑誌 Vol. 127, 16-17, 2012.
- 16) 地震調査研究推進本部: http://www.jishin.go.jp/main/chousa/09_yosokuchizu/g_furoku3.pdf. 2013年11月1日参照.
- 17) 首都直下地震による建物応答に関する研究会: 特別シンポジウム「地震学と耐震工学の橋渡し」資料, 東京, 2012.
- 18) “木造住宅の耐震診断と補強方法 (2012年度版)”, 日本建築防災協会, 東京, 2012.
- 19) “建築物荷重指針・同解説”, 日本建築学会, 東京, 133-162, 2004.
- 20) 清水秀丸, 森 拓郎, 村瀬伸吾, 立花和樹, 五十田博, 小松幸平, 吉川盛一, 福田康彦: 新築木造住宅の重量算定-実大試験体を用いた重量計測. 日本建築学会技術報告集 15(29), 115-120 (2009).
- 21) 竹山謙三郎: 床の積載荷重に就いて. 日本建築学会論文集 (37), 12-16 (1948).
- 22) 伊藤憲太郎: 積載荷重に就いて. 建築雑誌 51 (628) 858-863 (1937).
- 23) 石川孝重, 平田京子: 東京市建築条例妻木案が果たした役割-構造関連規定の成立過程に関する研究. 日本建築学会構造系論文報告集 No. 397, 32-41 (1989).
- 24) 石川孝重, 平田京子: 東京市建築条例学会案から市街地建築物法施行規則に至る立案過程とその特徴-構造関連規定の成立過程に関する研究. 日本建築学会構造系論文報告集 No. 406, 13-23 (1989).
- 25) 石川孝重, 平田京子: 市街地建築物法に至る規定の変遷とその根拠-積載荷重の評価に関する研究その1. 日本建築学会構造系論文報告集 No. 436, 43-51, (1992).
- 26) 平田京子, 石川孝重: 臨時日本標準規格以降の建築構造規定における変遷とその根拠-積載荷重の評価に関する研究その2. 日本建築学会構造系論文報告集 No. 443, 43-52 (1993).
- 27) 石川孝重, 田中美知: 住宅の積載荷重に関する研究その1: 100住戸に対する調査-掲載: 1987年, 日本建築学会大会学術講演梗概集 1987年度B分冊, 139-140 (1987).
- 28) 大沢 胖, 山本正勝: 昭和36年2月2日長岡地震の家屋被害について. 地震研究所彙報 No. 39, 549-559 (1961).
- 29) 岡崎友也, 五十田博, 小塚直人, 若島嘉朗: 家具類の地震時挙動と有効質量に関する実験. 日本建築学会構造系論文集 No. 646, 2199-2208 (2009).
- 30) 千葉隆弘, 苔米地司, 高橋 徹, 植松武是: 積雪期の地震に対する木造住宅の耐震性に関する研究-振動による屋根雪の動的挙動と構造体の応答特性との関係について. 日本建築学会構造系論文集 No. 635, 25-32 (2009).
- 31) 千葉隆弘, 苔米地司, 高橋 徹, 植松武是: 地震応答解析による屋根雪の動的挙動と木造住宅の地震応答との関係. 日本建築学会構造系論文集 No. 644, 1777-1784 (2009).
- 32) 大橋好光: 非耐力部分を考慮した在来木造住宅の耐震性に関する研究. 東京大学提出博士論文, 1985.
- 33) 田中裕樹, 大橋好光, 新居健二: 実大実験による木造軸組構法住宅の耐震性に関する研究その1-壁単体と実大建物の静加力実験. 日本建築学会学術講演梗概集 C-1 分冊, 235-236 (1998).
- 34) “2004年度版木造住宅の耐震診断と補強方法”, 日本建築防災協会, 東京, 2004.
- 35) 宮本慎宏, 高橋遥希, 森井雄史, 林 康裕: 木造軸組架構の耐震性能評価に関する実験的研究その3-非構造部材の影響. 日本建築学会大会学術講演梗概集 C-1 分冊, 529-530 (2009).
- 36) 森 拓郎, 清水秀丸, 羽田竜介, 西沼裕介, 南宗和, 五十田博, 小松幸平: 木造住宅における非構造部材が耐震性能に及ぼす影響その1-直線階段の静的加力試験による性能評価. 日本

- 建築学会大会学術講演梗概集 C-1 分冊, 443-444 (2010).
- 37) 綿引 誠, 町田健一, 中野一郎, 大橋好光, 坂本功: 木造軸組工法住宅における水平力負担率と復元力特性の加算則に関する研究. 日本建築学会構造系論文集 No. 601, 105-111 (2006).
- 38) 町田健一, 綿引 誠, 大橋好光: 木造軸組工法耐力壁の動的性状の加算則検証と地震応答解析. 日本建築学会構造系論文集, No. 605, 135-142 (2006).
- 39) “特集 振動台を用いた木質系構造物地震時挙動把握の研究動向”, 日本地震工学会誌 No. 2, 1-32 (2005).
- 40) 川上 修, 坂本 功, 大橋好光, 高橋 仁, 橋本敏男, 上山耕平: 実大木造住宅の振動台実験手法に関する研究その22-耐震等級1~3標準試験体の概要 C-1 分冊, 539-540 (2007).
- 41) 入江康隆, 野俣善則: 観測記録に基づく木造2階建て住宅とRC造5階建て建物の動的相互作用 木質構造物の地震入力に関する研究その1. 日本建築学会構造系論文集 No. 548, 27-34 (2001).
- 42) “木造軸組工法住宅の許容応力度設計 (2008年度版)”, 日本住宅・木材技術センター企画編集, 2008.
- 43) 五十田博, 河合直人: 木造軸組構法住宅に用いる壁の復元力特性モデル, -木造建物の地震時挙動に関する研究. 日本建築学会構造系論文集 No. 616, 157-163 (2007).
- 44) 宮澤健二, 大西健司, 津田千尋, 野中悠貴: 実在木造住宅の引き倒し実験その1~3. 日本建築学会大会学術梗概集, 73-78 (2004).
- 45) 宮澤健二, 津田千尋, 服部大介: 実在木造住宅の引き倒し実験その4~7. 日本建築学会大会学術梗概集, 27-34 (2005).
- 46) 吉岡圭介, 津田千尋, 秋山高規, 宮澤健二: 実在木造住宅の引き倒し実験その8. 日本建築学会大会学術梗概集, 467-468 (2007).
- 47) 長岡 修, 五十田博, 槌本敬大, 清水秀丸: 木造軸組構法住宅の倒壊限界変形に関する実験的研究. 日本建築学会構造系論文集 No. 680, 1561-1568 (2012).
- 48) 五十田博, 河合直人: 木造軸組構法住宅に用いる壁の復元力特性モデル-木造建物の地震時挙動に関する研究. 日本建築学会構造系論文集 No. 616, 157-163 (2007).
- 49) Sakamoto, I., Ohashi, Y., Shibata, M.: Theoretical analysis of seismic response of wooden dwellings in Japan, Proceedings of Pacific Timber Engineering Conference No. 506, 454-461 (1984).
- 50) 佐藤利昭, 井口道雄, 真崎雄一: 木造軸組構法住宅の地震時応答シミュレーション-履歴特性のモデル化と振動台実験による検証, 日本建築学会構造系論文集 No. 631, 1569-1576 (2008).
- 51) 松永裕樹, 宮津裕次, 曾田五月也: 木造軸組耐力壁/非耐力壁の汎用モデル化手法に関する研究. 日本建築学会構造系論文集 No. 639, 889-896 (2009).
- 52) 荒木 智, 井戸田秀樹, 原 恭平: 等変位繰返し載荷による耐力劣化を考慮した木造耐力壁の復元力モデルその1-面材耐力壁の等変位繰返し載荷実験. 日本建築学会東海支部研究報告書, 225-228 (2007).
- 53) Stewart, W. G.: The seismic design of plywood sheathed shear walls. Ph. D. Thesis, University of Canterbury, Christchurch, New Zealand, 1987.
- 54) Folz, B., Filiatrault, A.: A cyclic analysis of wood shear walls. *J. Struct. Eng. (American Society of Civil Engineers)* 127(4), 433-441 (2001).
- 55) Pang, W. C., Rosowsky, D. V., Pei, S., van de Lindt, J. W.: Evolutionary parameter hysteretic model for wood shear walls. *J. Struct. Eng.* 133(8), 1118-1129 (2007).
- 56) 五十田博: 大変形と繰返しによる劣化を考慮した木造壁の復元力特性モデルの精度検証-木造建物の地震時挙動に関する研究その3. 日本建築学会構造系論文集 No. 659, 113-120 (2011).
- 57) 久田俊彦: 福井地震に於ける木造住宅壁体効果. 北陸震災調査特別委員会, 昭和23年福井地震震害調査報告, 1951.
- 58) “建築耐震設計における保有耐力と変形性能”, 日本建築学会, 東京, 1990.
- 59) “木質構造基礎理論”, 日本建築学会, 東京, 2010.
- 60) “木質系耐力壁形式構造に関するQ&A”, 日本建築学会, 東京, 2011.
- 61) “木構造設計規準・同解説 (第1版)”, 日本建築学会, 東京, 1983.
- 62) “木質構造設計規準・同解説”, 日本建築学会,

- 東京, 2012.
- 63) 河合直人: 壁量と壁倍率, “特集木造住宅の構造設計【改正基準法と品確法】”, 建築技術編, 2000, pp. 111-123.
- 64) 鎌田輝男, 新谷 隆: ニツ割り筋かい入り木造軸組の耐力特性について, 日本建築学会大会学術梗概 C-1 分冊, 297-298 (2001).
- 65) 福森大造, 正野崎昭: 木造連続壁の耐力について, 日本建築学会大会学術梗概集 C-1 分冊, 181-182 (2006).
- 66) 五十田博, 中村晋也: 異なる復元力特性を持つ木造耐力壁構造の耐震性能評価, 日本建築学会構造系論文集 No. 627, 781-786 (2008).
- 67) 五十田博, 貴船達也, 峯村廣紀, 浅井福太郎, 萬歳直喜: ニツ割りと三ツ割り筋かいの耐震性能その1: 振動台実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集 C-1 分冊, 275-276 (2013).
- 68) 貴船達也, 五十田博: ニツ割りと三ツ割り筋かいの耐震性能その2-壁実験との比較による考察, 日本建築学会大会学術講演梗概集 C-1 分冊, 277-278 (2013).
- 69) 中尾方人, 村上雅英, 山口修由, 宮澤健二: 壁式木質構造における層の水平耐力と構造特性係数-剛性とポテンシャルエネルギーを用いた耐力要素の性能評価法, 日本建築学会構造系論文集 No. 624, 291-298 (2008).
- 70) 稲山正弘, 村上雅英: 柱頭柱脚接合部N値計算の係数Biに関する研究-梁の曲げ剛性と接合部剛性を考慮した柱頭柱脚引抜き算定式の提案とBiの解析的検討, 日本建築学会構造系論文集 No. 657, 2009-2017 (2010).
- 71) 河合直人: 6.2耐力壁の釣合の良い配置の確認方法, 偏心率が0.15を超える場合の地震応答, “改正建築基準法の構造関係規定の技術的背景”, 国土交通省建築研究所編, きょうせい, 東京, 2001.
- 72) 村上雅英: 壁配置と偏心, “特集木造住宅の構造設計【改正基準法と品確法】”, 建築技術編, 2000, pp. 133-139.