

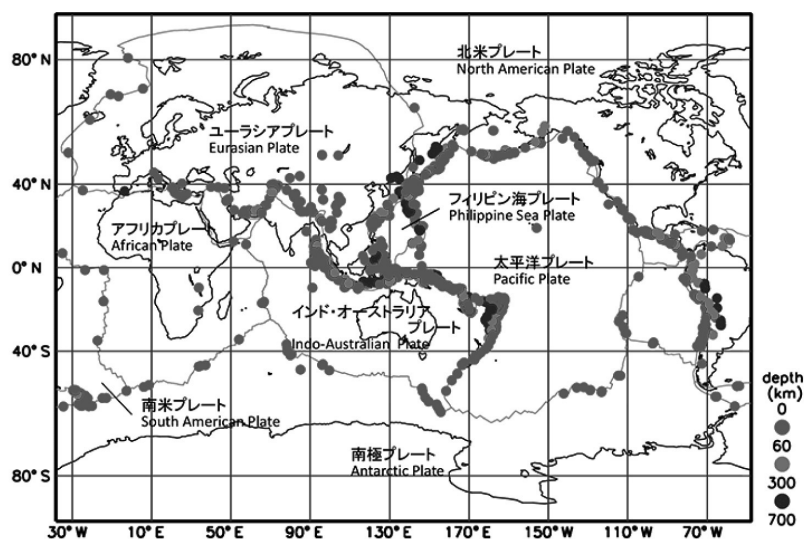
地震に負けない安全・安心な建物に向けて

生活環境デザイン学科 清水 秀丸

1. 自然災害多発地域である日本

日本は自然災害の多発する地域であり、今年（2016年）の地震災害だけに注目しても平成28年（2016年）熊本地震（最大地震Mj 7.3 最大震度7）、2016年10月21日鳥取県中部の地震（最大地震Mj 6.6 最大震度6弱）が発生している。熊本の地震では、震災関連死も含め110名の人命が失われた。世界的に見ても我が国は地震の多発地域であり、USGS（アメリカ地質調査所）が観測した世界中で発生する地震のうち、年間平均発生数の約1割は日本及びその周辺で起きていることが気象庁の震源データより分かっている。2011年東北地方太平洋沖地震、平成28年（2016年）熊本地震の活発な余震活動もあり、この割合は年間平均発生数を大きく上回る状態となっている。日本列島で地震が多い原因は、国土が地球のプレート境界に位置しているためであり、図1に示す世界のマグニチュード6以上の震源分布¹⁾がプレート境界上で発生していることから、日本で生活することは規模を問わず地震を経験すると断言される。

一方、私たち生活科学部が教育・研究対象としている「衣食住」は、どれも生活する上で欠かすことが出来ず、特に生活の基盤を構築する住宅は価格、規模の観点からも大きい。しかしながら、住宅を賃貸・購入する際にその耐震性に関する評価はそれほど大きくない。私たちが安全・安心に生活を営むためにも、住宅の耐震性能に関する基礎知識を得ることは有用である。本報告では、建築のうち特に木造住宅に関する耐震性能について述べる。



(注) 2006年～2015年
出典：アメリカ地質調査所の震源データを基に気象庁作成

図1 世界のマグニチュード6以上の震源分布とプレート境界¹⁾

2. 耐震基準の変遷

2. 1 耐震設計の夜明け

我が国の耐震設計とは、数多くの被災経験の上に構築された経験工学を出発とした。地震に関する最古の文献記録は、416年（允恭5年）に遠飛鳥宮付近（大和）で日本書紀に「地震」とのみ記載されている²⁾。その後も、数多くの被害地震が発生し、その度に多くの建物倒壊・人命の損失を繰り返してきた。明治以前の国内における建築物とは、ほぼすべて木造建築であり、文献³⁾によると奈良時代以前の建物は太い柱で地震に抵抗し、鎌倉時代頃からは重源が大陸から導入して東大寺再建（1190年）にも用いた貫構法で地震に抵抗していた。貫構法とは、図2のように縦材の柱を貫く横穴をあけて横材（貫）を貫通させる構法であり、木材の持つ大きな特徴である高い圧縮・めり込み強度を活用した耐震手法として、大径木材資源が不足し始めた鎌倉時代以降に採用された構法である。時代が下がるにつれ、更に大径材が枯渇して柱が徐々に細くなり、明治以降昭和まで地震や風などによる外乱（横方向からの力）に対する建物の抵抗力が小さくなってしまった。

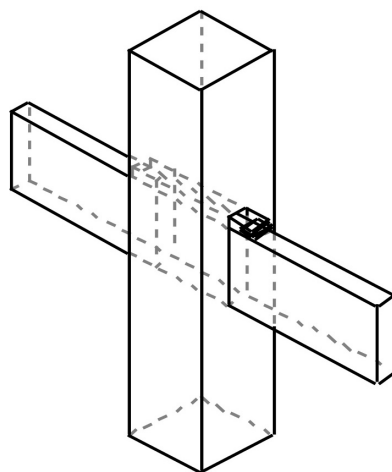


図2 貫構法の概要

耐震に関する研究は明治初期の所謂、お雇い外国人によって始まった。日本の地震学および地震工学の基礎を築いたのは、英国人のジョン・ミルンであり、彼は1876年（明治9年）に工部省工学寮（後の工部大学校、東京大学工学部）へ地質学・鉱山学の教鞭をとるために来日した。後に彼は地震学に興味をもち、1880年（明治13年）に発生した横浜地震（最大地震 M_j 5.5~6.0 最大震度4）を経験したことから同年、世界で初めて地震学を専門とする地震学会を設立した。その後、1891年（明治24年）に濃尾地震が発生し、岐阜県・愛知県を中心とした地域で甚大な被害が発生した。この地震では、木造建物だけでなく建築分野における文明開化の象徴であったレンガ建物に大きな被害が見られたことが大きな特徴である。レンガ建物とは、地震の少ないヨーロッパ地域で発達した建築構法であり、横方向からの力である地震に対する抵抗力は小さい。本地震の経験から翌年、震災予防調査会が設立され、我が国の耐震研究である耐震工学が始まった。ちなみに、世界初の地震に関する科学的アプローチは、1775年に発生したリスボン地震（最大地震 M_w 8.5~9.0）の経験からと言われている。

2. 2 耐震基準の誕生

耐震工学および地震学の次なる発展は、1923年（大正12年）に発生した1923年関東地震（最大地震 M_j 8.0 前後 最大震度6）による苦い経験からであった。関東地震による関東大震災の前、1920年（大正9年）に市街地建築物法が施行されたが、この法律では耐震

工学に関する記述が少なく、主に自重や積載荷重など鉛直方向の力のみを考慮したもので、耐震計算の規定はない。関東地震において多くの建物が倒壊し、特に濃尾地震と同様にレンガ建物で壊滅的な被害を受けたため、日本におけるレンガ建物の新築は、急速にその姿を消すこととなった。

多くの死者を出した関東地震を経て、1924年（大正13年）に市街地建築物法施行規則が改正され、初めて震度という概念と耐震基準が導入された。当時の耐震基準は「水平震度0.1以上」というものであり、水平震度0.1とは、簡単に言えば建物の重量の0.1倍の荷重が横方向から静的に加えられることを意味する。この状態において、建物は弾性挙動であることを義務化した許容応力度計算による設計が当時の耐震基準であった。

一方、木造建物の耐震設計に着目すると、ジョン・ミルンと同じく工部大学校に赴任した英国人のジョサイヤ・コンドル（造家学）らによって提唱された西洋建築的な考え方である「三角形不変の原理」として、図3に示すような筋かいを入れることで耐震性能を向上させることが提案されている。明治以前の木造建物とは、鉛直・水平方向にのみ柱や梁を入れる構法が主流であり、斜め材である筋かいを積極的に用いていなかった。これは、四角形の軸組では地震によって平行四辺形に変形してしまうため、変形しない三角形の軸組とするべきであるという、建物の粘り強さよりも硬さに着目した考えであった。当時の耐震工学では、この考え方が構造を問わず一般的であり、建物の耐震設計の主流であった。

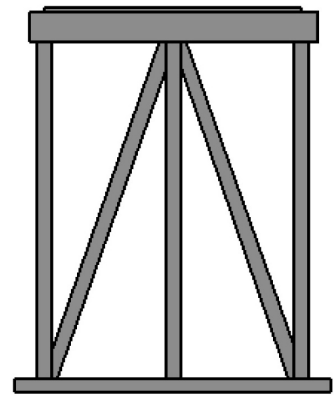


図3 筋かいの一例

2. 3 耐震基準の発展

1950年に市街地建築物法が廃止され、新たに建築基準法が制定された。同時に建築基準法施行令も制定され、耐震基準に関しては、荷重を短期と長期のそれぞれで検討すること、短期荷重における水平震度を0.2以上とすることが大きな変更点であった。これは、1948年福井地震（最大地震 Mj 7.1 最大震度6 後に新設された震度7に変更）が発生し、福井市を中心とする地域で甚大は被害が生じたことを受けた変更である。短期荷重とは、主に建物横方向からの力（地震・風など）、長期荷重とは主に鉛直方向からの力（自重・積載荷重）であり、水平震度は横方向からの静的な力という考え方に変化は無かった。

その後も建築基準法施行令は被害地震の度に改正を繰り返し、耐震基準を強化することとなる。1968年十勝沖地震（最大地震 Mj 7.9 最大震度5）、1978年伊豆大島近海地震（最大地震 Mj 7.0 最大震度5）、1978年宮城県沖地震（最大地震 Mj 7.4 最大震度6弱）の被害地震より、1981年に建築基準法施行令が改正され所謂、新耐震が誕生した（改正以前の耐震基準は所謂、旧耐震）。この改正では、これまで静的な力としていた短期荷重を動的な力である外乱とすること、外乱に対する耐震設計を弾性設計と塑性設計の2段階とす

ることが大きな変更である。外乱とは、地震などの短期荷重を振動する動的なものと捉え、建物の固有周期、建設地の地盤種別によって変化させるなど、より建物の実情に近づけたものである。耐震設計を2段階としたことは、これまで主に建物の硬さに着目していた設計（弾性設計である一次設計）と、新たに設定した建物の粘り強さに着目した設計（塑性設計である二次設計）である。一次設計とは、建築物がその存在期間中に数度遭遇することを考慮すべき稀に発生する地震動（震度5強程度）に対してほとんど損傷が生ずるおそれのないこと、二次設計とは建築物がその存在期間中に1度は遭遇することを考慮すべき極めて稀に発生する地震動（震度6強～7に達する程度）に対して倒壊・崩壊するおそれのないことを確認するものである。

そして、1995年兵庫県南部地震（最大地震 Mj 7.2 最大震度7）が発生し、神戸市を中心に甚大な被害（阪神淡路大震災）が発生した。この地震による被災調査による研究成果と、電子計算機の進歩に伴い、2000年に建築基準法施行令が改正され、おおよそ現在の耐震基準に至った。2000年の改正では、これまでの決められた仕様（寸法、形状など）を満足すれば構造性能を満たすと判定する規定（仕様規定）に加え新たに、要求される構造性能を満足すると判定される規定（性能規定）でも良いとする概念が追加された。

木造建物の耐震では、第3章で詳しく述べる壁量計算と称される仕様規定が1950年に制定された建築基準法施行令第46条第4項によって述べられ、地震・風などの短期荷重に対しては、建物を持つ壁の種類と量によって抵抗するとした。また、接合部が地震時に外れないことの確認と、地震に抵抗する壁が建物平面上でのバランスの確認が2000年の建築基準法施行令の改正で追加されることとなった。

3. 1 木造住宅の耐震性能とは

木造建物の耐震性能を確認する主要な方法は、建築基準法施行令第46条第4項で述べられている仕様規定を満足するとした所謂、壁量計算が主である。壁量計算とは、簡単に述べると耐震設計する建物の屋根の重さの種類と階数によって必要とされる耐力壁の量（必要壁量）を決定し、建物に存在する耐力壁の量（存在壁量）がそれより多いことを確認するものである。つまり、耐力壁の量（長さ）の大小によって耐震性能を判断するという考え方であり、地震や風などの短期荷重（横方向からの力）には主に耐力壁で抵抗することを意味する。この考えは、コンクリート構造などでも取り入れられている一般的なものであり、必要壁量は地震および風による検討を行うが、ここでは地震による検討を主に述べる。建築基準法第六条第4項で述べられている壁量計算によって構造安全性を確認する木造建物の条件を表1に示す。表より、一般的な2階建て木造住宅であれば、ほぼすべての建物が壁量計算によって構造安全性を確認することが理解出来よう。3階建て木造住宅などは、壁量計算以外にも、許容応力度計算などを行う必要がある。

$$(\text{地震および風より決定される}) \text{ 必要壁量 (cm) } \leq \text{ 存在壁量 (cm) }$$

表 1 壁量計算による構造安全性確認の条件（表に示す、すべてを満たすこと）

条件	<ul style="list-style-type: none"> ・ 階数が 2 階建て以下 ・ 延床面積 500 m²以下 ・ 最高軒高 9m 以下 ・ 最高高さ 13m 以下
----	--

3. 2 必要壁量

地震によって建物に被害を加える力とは、建物へ入力される地震の加速度に建物重量を乗じることで表現させる。つまり、同じ地震力（加速度）であれば、建物重量が重いほど建物に被害を加える力も大きくなることを意味しており、この原則に基づき必要壁量は定められた。この計算では、簡便化を図るために建物種別の判定を屋根と壁の種類のみとし、建物の階数によって図 4 のように定められている。図より、建物階数が多くなるほど、重たい建物ほど必要壁量が多くなることが容易に理解できる。図に示す必要壁量の単位は（cm/m²）であり、この数値に各階の床面積を乗じることで必要壁量を求める。この数値は、1950 年の建築基準法施行令の制定時に定めた値から 1959 年、1981 年の 2 回変更され数値が増加しており、図に示す現行の値となった。

つまり、木造住宅に限らず建築物の耐震性能を高める簡単な方法の一つは、建物の軽量化であり、軽量化として最も一般的な方法は屋根材を瓦以外とすること、瓦の下に葺き土が使われている場合の撤去が挙げられる。

必要壁量（cm）＝ 各階床面積（m²）× 地震力に対する床面積当たりの必要壁量（cm/m²）

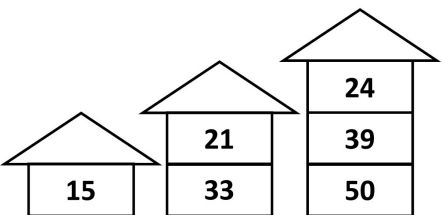
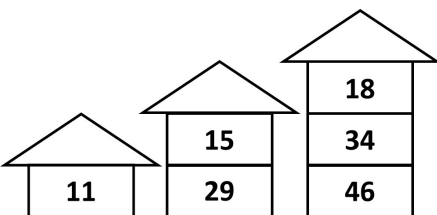
土蔵造の建築物その他これに類する 壁の重量が特に大きい建築物、 屋根に重たい材料をふいたもの	左に掲げる建築物以外の建築物で 屋根を金属板、石板、木板その他 これらに類する軽い材料でふいたもの
	

図 4 地震力に対する床面積当たりの必要壁量（cm/m²）

3. 3 存在壁量

前節でも述べたように、建築物の耐震性能は耐力壁の量（長さ）の大小によって判断する。耐力壁とは、表 2 にその一部を示す軸組の種類（全面壁もしくは筋かい等）を指す。表に示す倍率は「壁倍率」と呼ばれるもので、1m の耐力壁が負担できる地震力 200kg

(1.96kN) を基準値である 1.0 とし、通常は 0.5 ～ 5.0 まで 0.5 毎に定められている。

壁倍率は、耐力壁の種類や壁長さによって異なる地震力の負担性能を無次元化した便利な数値であり、耐力壁の持つ壁倍率に耐力壁長さを乗じることで、存在壁量を求める。この数値は、必要壁量と同時に変更され、当初は耐力壁の硬さに着目していたが徐々に粘り強さも考慮されるようになり、現行の値となった。存在壁量は、各階・各方向で検討し、すべての検討で必要壁量より多いことを確認する。

$$\text{存在壁量 (cm)} = \text{各階各方向における} \Sigma (\text{壁倍率} \times \text{壁長 (m)})$$

表 2 壁倍率

	軸組の種類	倍率
(一)	土塗壁又は木ずりその他これに類するものを柱及び間柱の片面に打ち付けた壁を設けた軸組	0.5
(二)	木ずりその他これに類するものを柱及び間柱の両面に打ち付けた壁を設けた軸組	1.0
	厚さ一・五センチメートル以上で幅九センチメートル以上の木材又は径九ミリメートル以上の鉄筋の筋かいを入れた軸組	
(三)	厚さ三センチメートル以上で幅九センチメートル以上の木材の筋かいを入れた軸組	1.5
(四)	厚さ四・五センチメートル以上で幅九センチメートル以上の木材の筋かいを入れた軸組	2.0
(五)	九センチメートル角以上の木材の筋かいを入れた軸組	3.0
(六)	(二) から (四) までに掲げる筋かいをたすき掛けに入れた軸組	(二) から (四) までのそれぞれの数値の二倍
(七)	(五) に掲げる筋かいをたすき掛けに入れた軸組	5.0
(八)	その他 (一) から (七) までに掲げる軸組と同等以上の耐力を有するものとして国土交通大臣が定めた構造方法を用いるもの又は国土交通大臣の認定を受けたもの	0.5 から 5 までの範囲内において国土交通大臣が定める数値
(九)	(一) 又は (二) に掲げる壁と (二) から (六) までに掲げる筋かいとを併用した軸組	(一) 又は (二) のそれぞれの数値と (二) から (六) までのそれぞれの数値との和

3. 4 その他の検定

以上で述べた壁量計算によって木造建物の耐震性能を確認する以外にも、以下に述べる2つの事項を確認する必要がある。これは、地震時において耐力壁が適切に耐震性能を発揮することを確認するものであり所謂、N 値計算、四分割法と呼ばれるもので、2000 年の建築基準法施行令の改正に併せた告示で示された。この2事項の確認によって、耐力壁を耐震設計の基本であるせん断変形挙動へと誘導し、壁量計算による地震への抵抗をより確実なものとする。

・ N 値計算

建築における耐震設計の基本として、耐力壁を構成する枠（土台・梁と柱）の接合部が先行破壊することを防ぐことが求められる。この耐力壁が、壁倍率などの耐震性能を十分に発揮することを担保することを確認する方法がN 値計算であり、平成12年建設省告示第1460号⁵⁾に示された木造の継手及び仕口の引張力を確かめる方法である。壁倍率の高い耐力壁ほど、接合部に生じる引張力は大きくなるため、接合部の構造的な安全性の確認が重要となる。

ここでは具体的な計算方法は割愛するが、計算によって求められた引張力に応じた接合金物を用いることで接合部の先行破壊を防ぎ、地震時において建物が想定通りのせん断変形とすることを担保するものである。

・ 四分割法

耐震設計におけるもう一つの基本が、建物に配置されたすべての耐力壁が等しくせん断変形して抵抗することが求められる。建物に配置された耐力壁が平面的に均等でない場合、建物の挙動はせん断変形ではなく、ねじれる回転挙動が卓越する。回転挙動では、同じ壁倍率を持つ耐力壁の場合、回転中心から平面距離が近い耐力壁はあまり抵抗せず、距離が遠い耐力壁が大きく抵抗する。このように、回転挙動とは、回転中心から距離が重要な要素となることが明白であり、それを利用したものが四分割法であり、平成12年建設省告示第1352号⁶⁾に示された木造建築物の軸組の配置の基準を定める件である。

こちらも具体的な計算方法は割愛するが、建物の外周部に配置した耐力壁の平面的なバランスを重点的に確認することで捩れ挙動を防ぎ、地震時において建物が想定通りのせん断変形とすることを担保するものである。

4. まとめ

世界的に見ても自然災害多発地域である我が国の現状と、木造建物を中心とする耐震工学に関する歴史、木造住宅の耐震性能設計の概要を述べた。生活科学において住宅とは安全・安心な空間を得るためのシェルターであり、科学的に安全であるという判断の基に安心が付随する。我が家が安全であることを、自ら調査し理解することでより良い安心できる生活を営むことができる。

平成28年熊本地震では、建築基準法の耐震基準を満足していたにも関わらず、倒壊した木造建物が7棟であったことが報告された⁴⁾。建築基準法とは、第1条に「この法律は、

建築物の敷地、構造、設備及び用途に関する最低の基準を定めて」と書かれているように、必要最低限度を定めたものである。今回のような、想定を超える地震が発生した場合を考え、最後に、寺田寅彦氏の有名な言葉と言われている「天災は忘れた頃にやってくる」を記し、災害が発生する前の事前学習・防災準備に努めたい。

参考文献

- 1) 内閣府：防災に関してとった措置の概況 平成 28 年度の防災に関する計画（平成 28 年防災白書）、pp. 附-1、2016 年
- 2) 宇佐美龍夫：新編日本被害地震総覧 [増補改訂版]、東京大学出版会、pp.31、1999 年 4 月
- 3) 内田祥哉：日本の伝統建築の構法 柔軟性と寿命、市ヶ谷出版社、pp.130-134、2009 年 12 月
- 4) 五十田博：木造住宅の被害とその分析、日本地震工学会誌第 29 号、pp.10-13、2016 年 10 月
- 5) 建設省住宅局建築指導課監修：改正建築基準法（二年目施行）の解説で提案された平 12 建告第 1460 号第二号のただし書きから接合金物を求める方法
- 6) 平成 12 年建設省告示第 1352 号：木造建築物の軸組の配置の基準を定める件