

3. 建築構造物の設計と安全率

Design of building structures and their safety factor

キーワード：水平震度，応答倍率，荷重のばらつき

Key words : horizontal seismic coefficient, amplification ratio, variability of actions

高橋 徹 Toru TAKAHASHI / 千葉大学 Chiba University

3.1 はじめに

本稿をお引き受けする際に、若干とまどったのは、私的には現在の建築物の設計、特に耐震設計においては陽な意味での安全率という概念はほとんど無くなっているのではないかと考えていたことだった。だとすれば、何について議論をすれば読者の期待に応えられるのだろうか、ということ考えた末に、本稿では建築物の構造設計において安全率という概念がどのように取り扱われてきたのかをまず歴史的に概観し、現在の状況について簡単に解説することにした。肩すかしにあった読者諸兄には悪しからずご了承いただきたい。本編に入る前に、建築物の構造設計で考慮している荷重の概要を図示すると図3.1のようになる。建築構造物はこれらの荷重・外力に対して安全であるように設計される必要がある。

3.2 許容応力度設計と材料安全率

日本で建築物の構造設計が行われるようになったのは江戸時代の鎖国が解けてレンガ造の建築物が建てられるようになってからである。当然のことながら規定類は整備されておらず、シカゴ市条例やベルリン市条例などの諸外国の規定が参考とされた。そこで用いられている設計法は許容応力度法であり、材料強度として鋼材強度とコンクリート強度が規定され、材料強度を許容応力度で除した材料安全率としては3程度が採用されていた。他方、建築物の構造設計においては入力となる荷重が非常にばらつくので、設計荷重というものが規定される。したがって、安全率というのはこの設計荷重に対する構造物の破壊までの安全の余裕度、ということになる(図3.2参照)。ところが、初期の構造設計においてはこの設計荷重をどのように規定するかについても模索段階だったので、諸外国の規定値がそのまま用いられることが多かった。わが国独自の規定が定められるには明治10年に開学する工部大学校の卒業生が活躍するのを待たなければならなかった。(なお、正確には明治4年に工部省工学寮が、明治6年には同寮に大学が設置され、1期生は明治6年に入学している¹⁾)

ところで、わが国最初の構造規定である市街地建築物

法施行規則において当初規定されていた荷重は自重と積載荷重のみであった。上述の諸外国における条例や事前の学会による下案などには存在したにもかかわらず、法令となる段階で削られたのは、荷重の性質が良くわからなかったからであろうといわれている。地震荷重については諸外国の規定にも存在せず、佐野利器による家屋耐震構造論は1915年に発表されているが、施行規則に取り入れられたのは関東大震災の被害を受けて改正された1924年のことである。

3.3 水平震度の導入と構造安全率

関東大震災ではレンガ造のみならず最新の鉄筋コンクリート造の建物も軒並み被害をこうむったことを受け、市街地建築物法にも耐震規定が取り入れられた。東京の下町では水平震度0.3程度の地動が起ころうと考えられ、そのようなごくまれに起きる外力に対しては安全率を設ける必要がないという判断の下、水平震度0.1に対して許容応力度設計を行うことが規定された。これには、水平震度1/15ではほぼ無被害だった、内藤多仲設計の日本興業銀行本店の存在も大きかったと言われている。当

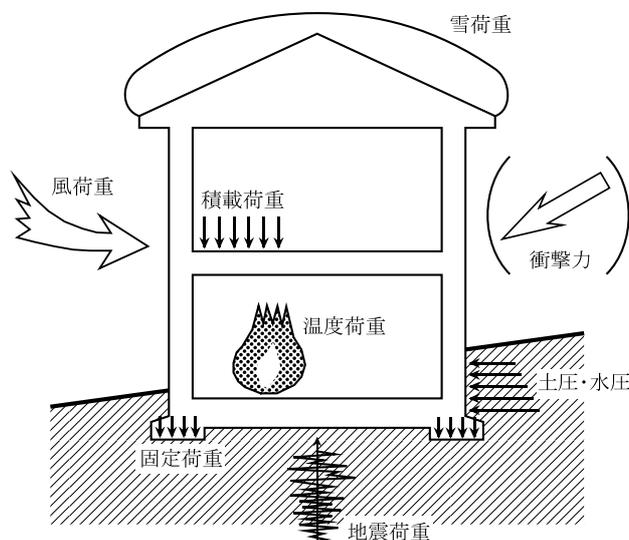


図3.1 建築物を取り巻く荷重・外力

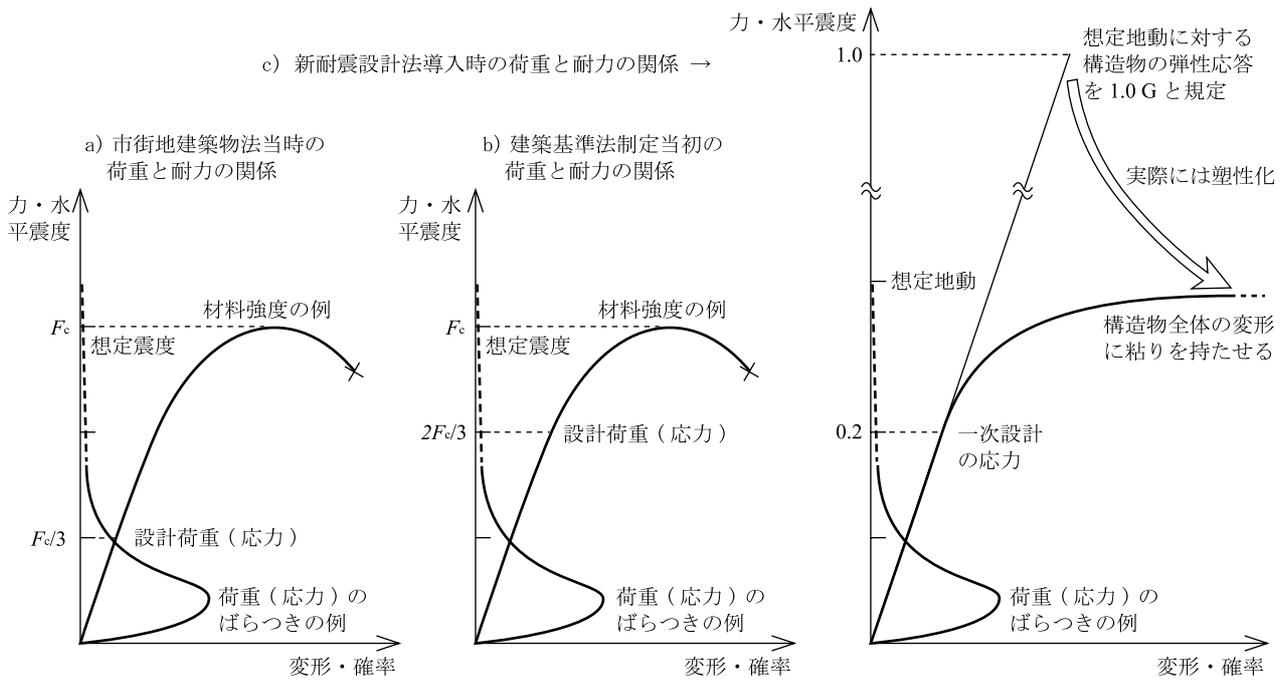


図3.2 地震力と許容応力度・建築構造物の耐力の関係 (鉄筋コンクリート構造物のイメージ)

時は建物の応答という概念がなく、剛体に作用する水平外力のイメージで設計されていたと思われる。結局、東雪荷重京下町における地震外力に対する安全率は1.0ということになる。ただし、構造物全体で考えれば、どこか1箇所が降伏したからといって全体が崩壊するわけではないので、その意味での安全率は存在した。しかしながら、当時はそのような塑性状態まで考慮する技術が存在せず、ましてや想定した外力を超える地震力がどの程度の頻度で襲来するのかなんかがい知ることではできなかった (図3.2a) 参照)。

3.4 臨時戦時規格

水平震度導入からあまり時を置かないうちに、日本は中国と、次いで欧米列強と戦争に突入し、20年もたたない1943年に市街地建築物法は停止され、臨時戦時規格が導入された。物資を節約するために許容応力度を従来の2倍まで引き上げ、それに応じて地震力を下町で0.2、山の手で0.15と定めた。山の手では実質的に地震力を低減したことになる。積載荷重の値は引き上げられなかったため、常時の荷重に対しては安全率が小さくなったことになる。

3.5 日本建築規格3001と建築基準法

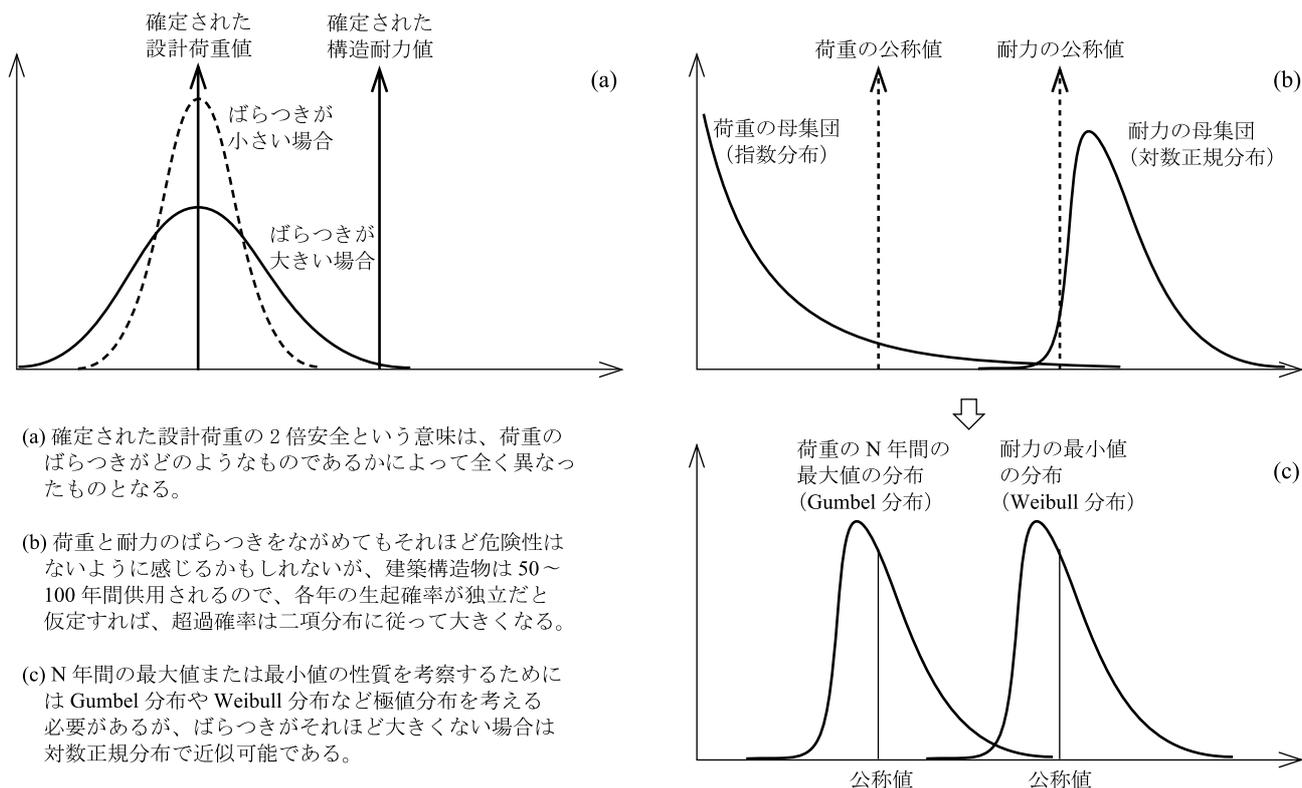
戦後、市街地建築物法は停止したままだったので、1948年に日本建築学会により日本建築規格3001という構造規定が定められた。ここで初めて長期と短期という2本立ての許容応力度が提案される。これは常時の荷重に対してはより大きな安全率を確保する一方で、非常時の荷重に対してはよりぎりぎりの応力度まで材料強度を見込もうとする考え方であった。したがって、正確には荷重の長期載荷・短期載荷とは関係ない。これに伴って、

鉄骨の短期許容応力度は降伏応力度と同じレベルまで高く設定された。ここに到って (鉄骨造については) 材料安全率も1.0になったことになる。

1950年に制定された建築基準法では、基本的にこの考え方が継承された。すなわち、コンクリート強度に関しては長期で3、短期で1.5、鋼材強度に関しては長期で1.5、短期で1.0 (ただしこれらは破断強度ではなく降伏強度に対するもの) という材料安全率が設定された。市街地建築物法と比較してコンクリートに対する短期の許容応力度は2倍 (安全率は半分) に設定されたので、対応する水平震度は2倍に設定された。これが、今日に到るまで許容応力度設計 (許容応力度等計算による耐震設計の1次レベル) に用いられている (図3.2b) 参照)。

3.6 地震・応答の研究と新耐震

ところが、当初下町での関東大地震レベル (水平震度0.3の地動) を想定していたはずの水平震度0.2は、その後の研究で、建物の応答というものがどういうものが明らかになるにつれて、一般の建築物に対しては震度4の上限から震度5弱にしか相当しないことが明らかになってきた。どういうことかということ、弾性応答によって地動が建築物の応力になる時に加速度が2.5倍~3倍に増幅されることがわかってきたのである。そうなること、関東大地震クラスの地動0.3Gを受けると、弾性応答だとすると水平震度にして0.7~0.9程度の応力が発生することになる。さらには、地震動の観測結果などから、下町での地動0.3Gというのはやや小さく、明らかにそれ以上の入力想定されるという認識が専門家の間で広まるにつれて、水平震度0.3の先は我関せずでは設計クライテリアとして不十分で、弾性応答で水平震度1.0程度



- (a) 確定された設計荷重の2倍安全という意味は、荷重のばらつきがどのようなものであるかによって全く異なったものとなる。
- (b) 荷重と耐力のばらつきをながめてもそれほど危険性はないように感じるかもしれないが、建築構造物は50～100年間供用されるので、各年の生起確率が独立だと仮定すれば、超過確率は二項分布に従って大きくなる。
- (c) N年間の最大値または最小値の性質を考察するためにはGumbel分布やWeibull分布など極値分布を考える必要があるが、ばらつきがそれほど大きくない場合は対数正規分布で近似可能である。

図3.3 荷重と耐力のばらつきと設計値

になるような入力（地動で0.4G程度）に対する応答を、塑性領域まで考慮して設計することの重要性が法律に盛り込まれることになった。これが1981年の建築基準法施行令の大改正（新耐震法）である。この時点で初めて、建築物が存在する期間内に発生するか否かがわからないようなごくまれに発生する地震動に対しては建築物の塑性化を許し、中にいる人の命だけは守る、という設計クライテリアが導入された（図3.2c）参照）。

市街地建築物法に水平震度法が導入された当初には材料安全率3.0を見込んで弾性設計していたのに対し、新耐震設計法では最初から塑性化することを前提に設計しているところが特徴的であり、安全率という概念がないと述べたのはこのことを指している。

3.7 限界状態設計法

ここまで述べてきた地動や材料強度・構造物の応答にはばらつきの概念は含まれていなかった。実際には材料強度にもばらつきが存在するし、応答は構造物の減衰をどの程度見込むかによって大きく異なる結果をもたらす。さらに、地動もどのような揺れになるのか起こってみなければわからない。都合よく0.3Gまたは0.4Gの揺れが起きるほうがまれであろう。となれば、建築基準法を守っていれば100%安全性が確保されると考えるのは幻想に過ぎず（そもそも、建築基準法で規定しているのは公共の福祉を確保するための最低水準である）、建築物が破壊する可能性もあるのだ、ということを冷静に心得ておく必要がある。技術者が対応可能なのはその確率をどの

程度に抑えるか、という命題であり、その確率をどの程度に設定すべきか、という問題については、正直なところ、日本建築学会でも意見が統一されているわけではない。参考資料としては近年の建築雑誌²⁾や、荷重運営委員会・最低基準のあり方に関するWG報告書³⁾などが挙げられるであろう。

荷重も耐力もばらついているときにその破壊確率をどのように考えればよいのかについては信頼性工学の分野で研究されており、その概略を記すだけでも本稿に許された紙幅を超過するのは明白ではあるが、誤解を恐れずにごく大雑把にまとめれば、何らかの手法によって構造物の望ましい破壊確率を設定することができれば、荷重と耐力それぞれのばらつきを考慮して、設計点を設定することは可能である。ここで規定される設計点は上述のような材料レベルで規定することも可能ではあるが通常は構造物の崩壊モードを考慮してシステムとしての破壊確率を考えるのが普通である。建築物の場合、一般のビル物では不静定次数が高いので地震動に対するロバスト性（構造安定性）は高いと言える。

3.8 建築基準法と建築関係者の現状

性能規定型設計を標榜した1998年の建築基準法改正は、外圧によるところが大きかったにせよ、構造設計者に上述のようなばらつきを考慮した設計法への道を開くことになるのではないかと期待された。ところが、内閣法制局などとの調整過程を経て2000年に施行された同施行令では、「限界耐力計算」という似たような響きの計算過

程が導入されたが、荷重に関してはある程度の地域性やばらつきが考慮されたものの、耐力のばらつきについては考慮されなかった。諸外国においてはLRFD（荷重耐力係数設計法）や部分係数設計法に代表される限界状態設計法が広く用いられるようになってきている中で残念なことである。

そんな中で、2005年11月には姉齒元一級建築士による構造計算書偽装事件が明るみに出て、社会的な問題となった。前述のように建築基準法は最低基準であるのに、それに対する安全率を0.5以下にまで下げるという前代未聞の事件であったが、それに引き続いて類似の事件が何件か発覚し、建築基準法や建築士法の大改正につながっていることは周知のとおりである。

ここで、彼が節約しようとした建設コストがどの程度のものであったのか、神田ら⁴⁾による興味深い試算があるので紹介しておく（図3.4）。この試算によれば、構造種別によらず、耐力を半分にすることによって節約できる建設コストはわずか5%ほどであり、逆に言えば、耐力を2倍にしてもそれによって上昇する初期建設コストは10%程度である。たった5%を節約しようとしたがために、何人もの人々の人生設計を狂わせることになってしまったとは何とも痛ましい。もしもこのような関係が広く一般に知られていれば、このような事件は起きなかったのではないかと悔やまれる。

神田らの研究には話の続きがあり、もしも構造耐力が高ければ地震などの外乱で損傷を受ける確率は低くなる。初期建設コストの勾配が比較的なだらかなので、建物の存在期間中での総費用は現行設計水準付近ではほぼフラットになってしまう（図3.5）。長期的視点を持つことが出来れば、Pareto最適解として何処を指向すべきかは、賢明な読者には自明であろう。

3.9 まとめ

市街地建築物法に水平震度の概念が導入されて以降の耐震規定における安全率の概念とその周辺について概観し、今日の建築物の構造設計における問題点を指摘した。

実際の構造設計はもっと詳細で多岐にわたるので、例えば設計コンクリート強度と実際に打設されるコンクリート強度の違い、型枠寸法の誤差、鉄筋の位置や鉄筋の定着長さの誤差、各種設計式で見込んである安全の余裕度、設計で見込んでいない雑壁の剛性や耐力、そして何よりも、設計者が各自の判断で見込む安全の余裕度により、部分部分ごとに少しずつ安全側に評価されることが多く、設計で見込んである地震動を上回る地震動が襲ったとしても多くの建築構造物が健全な状態を保っていることは最近の兵庫県南部地震、新潟県中越地震などの被害地震の被災例をみれば明らかである。

大局的にみれば、設計の中で見込んである種々の安全率によって建築構造物の安全性が確保されている状態、ということができようが、実際の建築構造物がどの程度の安全余裕度をもっているのか、実はまだ良くわかって

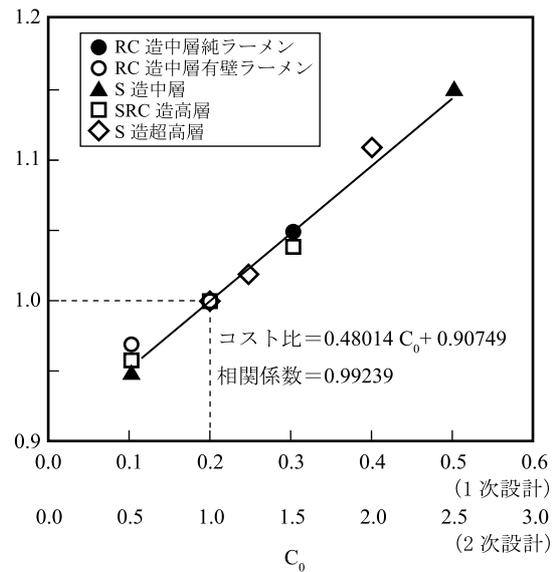


図3.4 標準せん断力係数 C_0 と建設費の関係⁴⁾

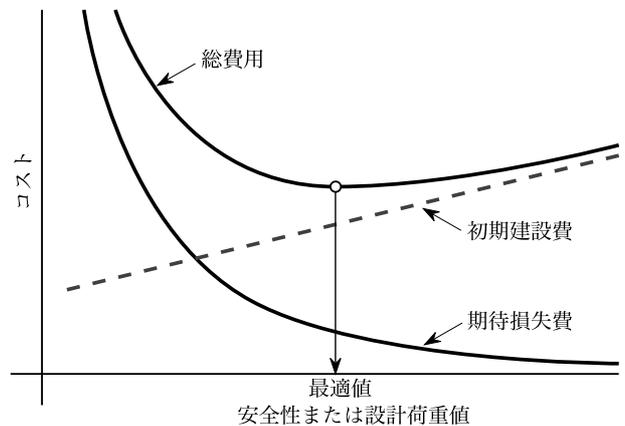


図3.5 初期建設費と期待損失・総費用の関係³⁾

いない状態とも言える。

もし、全ての部分的な安全率の意味づけが明確になり、建築基準法などで規定されたとしても、全ての建築物の耐力が最低値に集まってしまえば望ましい状態とは言えない。自然外力のばらつきを制御することは所詮不可能なので、施主や利用者の意見を取り入れながら設計者が適切な安全の余裕度を見込むこと、しかもそれは確率的にしか論じることのできない安全性なのだと理解することしか道はないのではないかと考えている。

参考文献

- 1) 大橋雄二：日本建築構造基準変遷史，日本建築センター，1993。
- 2) 日本建築学会：特集「建築基準法。最低基準の意味」建築雑誌Vol.119, No.1526, 2004.12。
- 3) 日本建築学会・構造委員会・荷重運営委員会：最低基準に関するWG報告書，<http://news-sv.aij.or.jp/kouzou/s10/WG01/>
- 4) 神田 順，浅野美次，石井 修，鈴木哲夫，橋元正美：地震荷重を変動させた時の各種建物の建設費について，日本建築学会大会学術講演梗概集，B-1，15-16，1994。

(原稿受付2007年9月26日，原稿受理2007年11月9日)