

持続的な社会における構造設計

名古屋大学 森 保 宏

1. はじめに

大量生産・大量消費に拠る地球温暖化，生態系やオゾン層の破壊，砂漠化といった 20 世紀の負の遺産を葬り去り，持続的な循環型・節約型社会を構築していくことは 21 世紀に生きる私たちの使命である。我が国における CO₂，産業廃棄物の最終処分量のそれぞれ約 1/3 を排出し，環境に多大な負荷を与えている建築関連分野も，これらを削減し，持続的な社会を築いていかなければならない。その一つの方策として，30～40 年と欧米諸国に比べ著しく短いわが国の建物の寿命を伸ばすことが考えられる。長寿命化によって，建設や廃棄に必要なエネルギーも削減することができ，また，これまでよりも高い構造性能が要求されるであろうから，災害時の被害の程度が小さくなり，倒壊等によって廃棄される建物の数も減り，被害総額も大きく減少するであろう。さらには，我が国の建設分野への新規投資額は対 GDP 比で見ると欧米の 2～3 倍の水準¹⁾と大きな負担になっており，所得に比べて生活の豊かさが感じられない原因の一つとなっているが，新規投資額を減らすことで，余裕のある豊かな生活が送れるようになるという副産物もありうる。

建物の寿命は，物的存在としての物理的・構造的に決定される場合の他，空間・機能や，デザイン，経済的収益などの建物の価値を維持したり，あるいは，新たな価値を与えるための費用と，その価値とのバランスで決定される。たとえば，土地の価値に見合うだけの収益性を持っておらず，価値を付加するのに多大な費用がかかってしまう場合には，建物は取り壊される運命にある。1960 年から 1970 年代にかけての高度成長期，1980 年代のバブル経済期と，人々は右肩上がり成長の妄想を抱き，戦後の復興期に建てられた質の悪い建物は，狭い，古くなった，使い勝手が悪い等の理由から，構造的寿命は尽きていないにも拘わらず，建て替えられてきた。しかし，建築学会の学会賞を受賞した「質の高い」とされる建物の寿命も同程度であり²⁾，単に，「戦後」の問題だけではないようである。長寿命化を実現するためには，まず，機能的，経済的寿命を伸ばすことが必要であり，建築家は陳腐化しない造形的・機能的（使い勝手）「価値」を与えるための計画的・材料的などの配慮をしなければならない。一方，この問題が解決されると，それまで，機能的・経済的寿命に隠れていた，構造的寿命の弱点が顕在化する可能性がある。ここでは，建物の長寿命化を実現するための様々な課題について，主に構造設計の視点から考える。

2. 長寿命化と構造設計

(1) 構造設計とは

構造設計の目的は，構造物の安全性・機能性を確保することである。構造物に加わる荷重・外力や材料強度などが確定的にわかっているならば，構造物の安全性・機能性は確実に確保することができる。しかしながら，「未来」は不確定であり，これから建てる建物が建っている間にどの程度大きな地震が起こるか，台風が来襲するかといったことは確実にわからない。考える最悪の状態を想定すると，幾重もの安全側の評価により，極めて高価な建物となる恐れがあるが，一方，安価な設計では，実現される機能や安全性に不安がある。資源，時間，能力は限られており，絶

対安全は不可能であり、構造設計とは、このような不確定性の下で、構造物に付与すべき性能水準を定める意思決定であるといえる。

長寿命化により、建物の供用期間が長くなると大きな地震や台風に遭遇する可能性は高くなるので、例えば、設計用荷重を割り増すなど、建物の性能水準を従来のもよりも高くする必要があると考えられる。長寿命化に対応した構造設計を考えるために、求められる構造物の性能水準について考察する。

(2) 構造物の性能水準の尺度

これまでは、特別な場合を除いて建築物の「最低限」の性能水準を要求する建築基準法を満足するように設計がなされており、性能水準についての明確な意識があったわけではない。「我が国で過去に起こった最大級の事象」(基準法には明示されていないが慣習的に理解されている)に対し部材応力が許容応力度設計を超えない(新耐震以降、地震に対しては、保有水平耐力の確認)よう設計することとなっているが、材料安全率や基準強度などは、経済性を考慮しながら、経験と工学的判断に基づいて定められており、(達成される性能水準は不明確である。ただし、阪神大震災まで社会的に大きな問題とはならず、暗黙のうちにある程度認められ、受け入れられた水準であった。もちろん、その背景には、建物の寿命が30年~40年程度と短いことも重要な要因としてあろう。

しかしながら、阪神大震災では、極めて多くの建築物が被害を受けた。その多くは、新耐震以前に設計された建物で、「既存不適格建築物」の問題が浮き彫りになったが、新耐震以降に設計された建物でも(当然ながら)、多くが被害を受け、財産としての価値の損失などが問題となった。「大地震では、人命を守ることを第一とし、構造物に大きな被害があっても良い」という建築技術者にとって常識である新耐震の理念は、一般市民には理解されていなかったのである。「最低限の水準」を守ることを課せられてはいたが、その上にランクはなく、また、水準を測る尺度がないため、「最低限」=「十分」と誤解されてしまったのであろう。長い間、我が国で大きな災害がなかったことや、大きな地震動を記録した釧路沖地震(1993)でも大きな被害が生じなかったこと、米国のノースリッジ地震(1994)の被害に対し、「日本では起こりえない被害である」といった構造技術者の談話も誤解を誘発した原因と考えられる。いずれにせよ、阪神大震災を契機に、「建築基準法は、最低限の水準を示すだけであり、その上の水準を確保するのは、建築主・使用者の自由であるが、その責任も問われる」という当然の考えが少しずつではあるが、広まってきている。このような背景から、建築主・使用者との合意の下で、目標とする性能水準を定めこれを満たすよう設計するという「性能設計」が提唱され、その実現のためには、性能水準の尺度が必要となる。

一方、「規制緩和」、「国際協調」、「自己責任」といった、当時の要請を反映して、1998年に建築基準法は50年ぶりの大改正を行い、必要な性能水準を満たしていれば手段は問わない「性能規定化」(あくまでも基準法の枠の中で、性能の最低水準を明確にし、これを満たすよう設計のことであり、「性能設計」とは異なるので要注意)された。構造設計についても限界耐力計算(2000)の導入により「性能規定化」されたことになっている。設計条件は、「建築物の存在期間中に1回以上遭遇する可能性の高い事象」に対し損傷しないこと、「極めて稀な事象」に対して倒壊、崩壊

しないこととなり、設計用荷重は、それぞれ「再現期間*1 数十年の事象（雪については再現期間 50 年）」、「再現期間数百年の事象（同 500 年）」とされ、「何年に 1 度の事象」に対する被害の状況といった、一般にとって一見わかり易い表現を性能水準の尺度としている。

性能水準のレベルに関しては、古くからある考え方として重要度係数がある。日本建築規格 3001（1947）では、「建物の重要度を考えて適当に荷重を割り増す」とされていたが、建築物の最低限の性能を要求する建築基準法以降は廃止されていた。2000 年に施行された「住宅の品質確保の促進等に関する法律」（品確法）における住宅性能表示制度で設定された、9 項目の性能表示基準のうち、「構造安全性」（構造躯体）の項目において、耐震・耐風・耐雪等級として復活した。しかしながら、最低水準の等級 1 は、基準法と同レベルとし、耐震等級 2、3 は、等級 1 のそれぞれ 1.25 倍、1.5 倍の地震に対して、耐風（耐雪）等級 2 は等級 1 の 1.2 倍の風（雪）に対して等級 1 と同様に設計することとなっており、数百年に 1 度と 1.2 倍や 1.5 倍の関係が不明確である。数百年に 1 度の事象の大きさを 1.2 倍や 1.5 倍した値が何年に 1 度に対応するかは、その事象の大きさのばらつきの程度（変動係数）に大きく依存し（図 1 参照）、また、そのばらつきは、事象や地域によって大きく異なるので、2 つの異なる地域で設計されたのと同じ耐震等級の建物が、同じ耐震性能水準であるとは限らないのである。

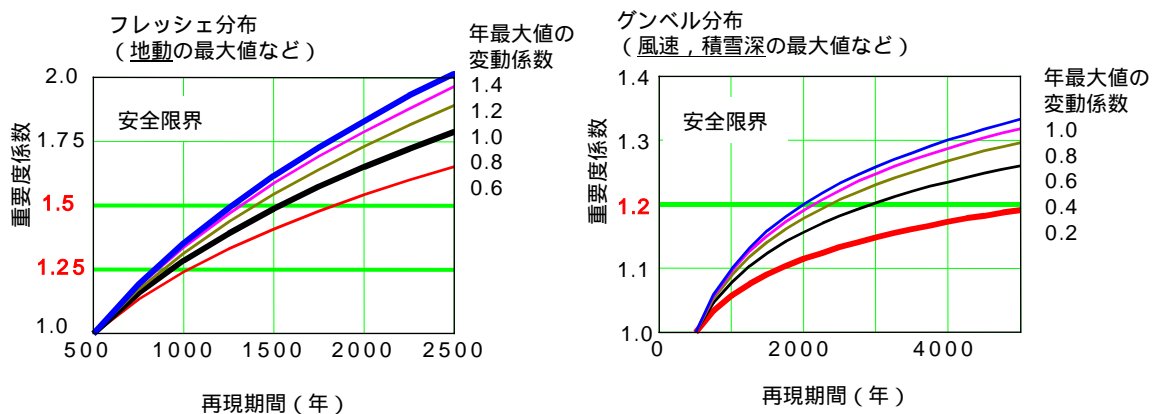
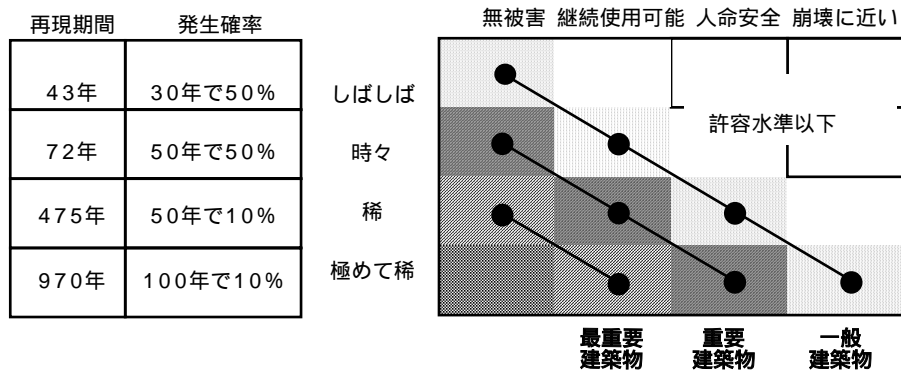


図 1：再現期間と重要度係数の関係

カリフォルニア構造技術者協会は、1994 年に VISON2000³⁾（図 2 参照）を提示しており、ここでは、地震の頻度を再現期間（または発生確率）によって「しばしば」、「時々」、「稀」、「極めて稀」の 4 つのランクに分け、また、被害の程度も「無被害」、「継続使用可能」、「人命安全」、「崩壊に近い」4 つのランクに分けて、その組合せ（耐震性能マトリクス）で建物の耐震性能水準を示そうというものである。地震動の大きさの不確かさを言葉とともに確率的に示すことで、わかり易く、かつ、定量的な表現となっている。しかし、構造設計においては、荷重のほかにも様々な不確実性が存在し、これらを考慮する必要がある。なお、発生頻度で荷重の大きさを表現する場合、「再現期間」と「発生確率」では、同じ現象でも印象（受け取り方）が異なるので、十分な注意が必要である。例えば、「500 年に 1 度」というと、聞き手は生きているうちには起こりそうもないと感じるかもしれないが、「50 年で 10%」というと、その可能性はもっと大きいと感じるであろう。

このように、建物の性能水準は、性能マトリクスのような、設計用荷重の発生確率と、被害の程度で表現するのが現在の流れであり、また、一見わかりやすいようにも思えるが、果たして、このままで、長寿命化に適切に対応することが可能であろうか。ここまで見てきたとおり、従来、構造設計では、建物の供用期間を明確に念頭においていたわけではなく、建築基準法においても「建築物の存在期間中」という、供用期間の概念についての記述はあるものの具体的な年数の記述はない²⁾。30年～40年という平均寿命を現行設計における設計用供用期間とみなせばよいのだろうか。設計供用期間を2倍にしたら、設計用荷重の再現期間も2倍にすればよいのだろうか。



いままでの構造設計の枠組みでは、なかなか答えられそうもない。

図2：耐震性能マトリクス

一方、荷重や耐力等における不確かさを確率・統計論的に取り扱い、建物がその供用期間中に安全を損なう確率を許容値以下におさえることにより建物の性能を確保しようとする考え方がある⁴⁾。例えば、建物の耐力を表す確率変数を R 、竣工後 j 年目の1年間における最大荷重効果を表す確率変数をそれぞれおよび S_j とし、耐力が供用期間中において変化しないものと仮定すると、供用期間 n 年の建物が好ましくない状態に陥る確率（限界状態超過確率） P_f は次式で評価される。

$$P_f = P[R < S_{\max}] \quad (1)$$

ここに、 $P[A]$ は事象 A の生起確率、 $S_{\max} = \max\{S_j\}$ は n 年間の最大荷重効果を表す確率変数である。実際の設計においては、目標を満足するように荷重や耐力に対する安全率を確率・統計論を適用して決定することとなる。このように P_f を性能水準の尺度とすることによって、耐力を割増しすることによる性能のレベルアップや、品質管理による耐力のばらつきの低減が P_f に反映され、投資額と投資効果の関係が明確になる（図3(a)参照）。また、現行の設計法では曖昧にされている供用期間に対しても、想定された供用期間に対応した S_{\max} の統計量を用いることにより、供用期間の異なる建物間の性能水準を比較することができる（図3(b)参照）。また、長寿命化のために新たに開発された材料についても、経験がなくともデータに基づいて「安全率」を定めることが可能となる。

(3) 耐久性設計

前記のとおり、建物を建てる際には、供用期間の概念がなく、一般的に「建てたら建てっぱなし」で、劣化や維持・管理に対する配慮がなされておらず、建物の価値も新築のときが最も高く、

その後は低下する一方である。それでも、建物の寿命が 30～40 年と短い場合には、大きな問題とはならなかったが、建物の長寿命化を実現するためには、供用開始直後の状態だけでなく、その後の建物のライフサイクルにおける建物およびこれをとりまく環境の「変化」や「劣化」への対策を講じておくことで、建物の価値を維持・向上させていくことが重要である。

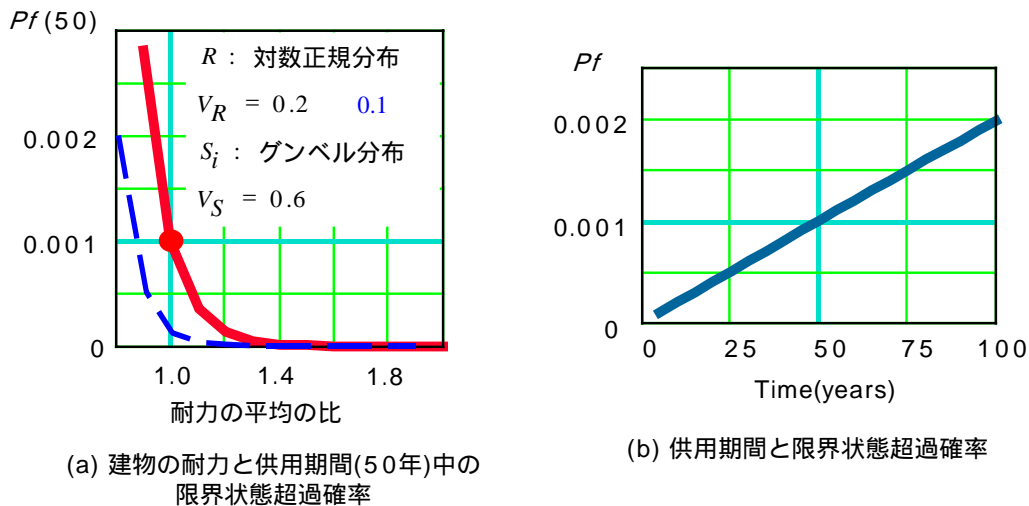


図 3：限界状態超過確率による性能評価

構造設計においても、建築物の耐力が供用期間中に劣化することは考慮されていない。しかし、実際には、構造物の耐力は、供用期間中に、例えばコンクリートの中酸化等によって引き起こされる鉄筋の腐蝕、アルカリ骨材反応、疲労などの経年劣化や、荷重効果による損傷により、構造設計の際に用いられた基準状態から低下する場合がある。このような場合には、建物の性能水準は、もはや、荷重の再現期間だけでは表すことができないが、限界状態超過確率をその尺度とした場合には、(1)式の代わりに(2)式で評価することができる。

$$Pf = P[R_0 \cdot g(1) < S_1 \quad R_0 \cdot g(2) < S_2 \quad \cdots \quad R_0 \cdot g(n) < S_n] \quad (2)$$

ここに、 $R(t)$ は時刻 t における耐力、 $g(t)$ は耐力の時間変化を表す関数、 R_0 は初期耐力である。(2)式の評価は、一般にかなり煩雑であるが、 $g(t)$ を確率的に等価な定数(劣化影響係数) g^* と置き換えれば⁵⁾、(1)式と同様の表現となる。

劣化する構造物の性能を維持するためには、適切な点検・補修・補強が必要となるが、低頻度ながら重整備を行うのか、あるいは日常的な保守で性能を確保するのか等、様々なオプションが存在する。点検・補修には費用がかかるので、補修をしなくても良いように初期耐力を予め割り増しておくとするオプションもありうる。いずれにせよ、性能維持の効果を一つの共通の尺度で測り、それらに伴う費用/環境負荷等を比較することにより、どのオプションを採用するか決定が可能となる。なお、このような耐力劣化や維持管理の効果の評価は、まだまだ研究段階ではあるが、一般に建物よりも寿命の長い土木構造物の分野では、実用に供されつつある。

構造設計の観点から、耐久性に関連した重要なもう一つの点として、建物用途に対するフレキシビリティが挙げられる。社会や地域の人口動態や産業構造等の変化によって、建物に求められ

る機能は変化し、建物を長寿命化させるためには、この変化に耐えられるようにしなければならない。そのためには、空間・機能的な自由度が重要である。構造的にこれを実現するための方法として、構造躯体と内部空間を構成する要素とを分離し、内部空間の機能が陳腐化した場合にその部分のみを更新するスケルトン・インフィルという考えも提案されているが、すべての構造物に適用することは非現実的であり、また、既存の建物には適用できない。最も大きな問題は、建物用途ごとに異なる設計用積載荷重であり、例えば、集合住宅を事務所に転用すると、設計用積載荷重が不足する。新築の場合には、用途変更を見越した積載荷重の設定する方法も考えられるが、当然ながら、費用の増加を伴うため、議論の余地はある。一方、既存の建物については、用途変更不可とするのではなく、設計用積載荷重が新たな建物用途に対して「不十分」であることを公開するとともに、積載荷重に制限を定めて変更を認める柔軟さが必要であろう。

(4) 目標性能水準

構造設計とは、不確定性の下で、構造物に付与すべき性能水準を定める意思決定であるといえると述べたが、その判断基準として、総期待費用（ライフサイクルコスト、LCC）最小化の原理が有名である。建物の初期性能を高くすると初期費用 (C_i) は高くなるが、限界状態超過確率 (P_f) が小さくなるので期待値としての損失額 ($C_F \times P_f$) が小さくなる。一方、初期性能を低くすると初期費用は安く済むが、限界状態超過確率が高くなり、結果として期待損失費用が高くなる。LCC 最小化の原理は、この初期費用と期待損失費用の和 (C_T) が最小となる点が、最適な性能水準であるとするものである（図 4 参照）。近年では、LCC に、点検・補修の費用や、限界状態超過による社会への波及費用などを加えることもあり、また、費用を最小化するというネガティブな観点でなく、建てられる建物からどれだけの効用（収益）が得られるかといった、総期待収益最大化といったポジティブな面を強調した考えもある。一方、環境問題に対応するために、費用だけでなく、CO₂ の排出量にも着目し、建物の建て替え時の廃棄に必要な CO₂ も含めた、総期待 CO₂（ライフサイクル CO₂、LCCO₂）も重要な判断基準となっている。その他、総期待エネルギー使用量、総期待最終廃棄物排出量なども考えられる。

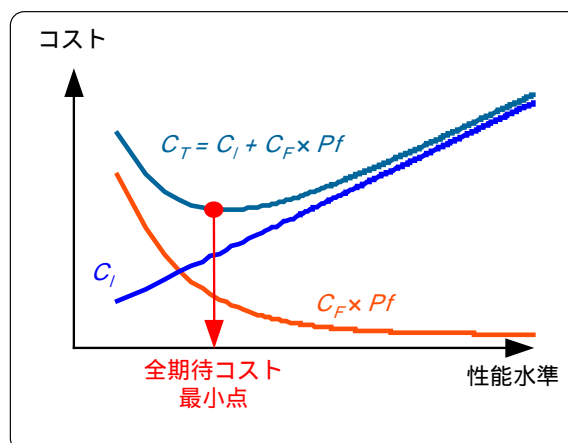


図 4：総期待費用最小化の原理の概念図

この 2 つの判断基準は一見良く似ているようではあるが、社会性という点で大きく異なってい

る。個人の財産としての建築の場合，総期待費用は，基本的に持ち主にとっての損得であり，個人的あるいは建物単体の観点からの判断基準であり，一方，後者は LCCO₂ や総エネルギーや廃棄物は，社会全体で積み上げられるものであり，社会的あるいは都市の観点からの判断基準であるといえよう。

(5) 情報公開

空間の自由度などの計画的な配慮や LCCO₂ 等の環境への配慮，また，構造的により高性能な建物などは，建築主がその恩恵を受ける可能性は小さく，建物単体の観点からはなかなかインセンティブが働かない。建物用途に対するフレキシビリティは，逆にいえば，多目的な建物となってしまう，結果として，変わり映えのしない平凡な建物となってしまう恐れもあり，建築家の興味も低いかもしれない。これを覆すためには，建物単体の観点からなされた意思決定の結果を公開し，使用者や社会にその妥当性を判断させる方法もあろう。近年，期限付き建築物の設計用荷重の低減についての議論が盛んであり，特に先が見えず，用途変更もしづらい郊外型の商業建築では，その要望が大きい。総期待費用最小化の観点からは，性能水準を一般の建物よりも低くしたほうが，望ましいかもしれない。しかし，LCCO₂ 等の観点からの検討も必要であり，少なくとも，構造性能の水準が一般の建物よりも低く設定されているということを使用者や社会に明示することが，建築の社会性を満たす上で必要であろう。そこで，性能水準を低く抑えることで，利用者が減るというデメリットを評価し，LCC に加えることで，また，異なった判断となるかもしれない。

阪神大震災以降いまだに問題となっている既存不適格建築物についても同様に情報公開を行うべきである。すべての建物を，新耐震の水準あるいはそれ以上に改修できれば良いのであるが，中には社会的・機能的寿命に近い建物もあり，そのまま使いつづけると判断した建物もあろう。また，経済的に新耐震の水準までは不可能であるが，部分的な耐震改修を行う場合もあろう。いずれにせよ，建物が保有している性能水準を公開することで，建築主だけではなく，社会の意思が反映されることができるようではなかろうか。

(6) アカウンタビリティ

使用者や社会が判断するためには，情報を理解しなければならない。建築技術者として，われわれは説明責任（アカウンタビリティ）を負っており，ここまで述べたことを，わかり易い言葉で伝えなければならず，そのための技術を身に付けることが，今後の一つの大きな課題である。

3. おわりに

私たちは建築に携わる者として，当然ながら建築主や使用者，社会に対して「良い建物を建てる」という責任を全うしなければならないが，建築主，使用者と徐々に距離が遠くなり，「社会」に至っては，かなり漠然とした存在となって，その要求も不明確となり，得てして近い存在の人々の要求が取り入れられてしまうことになる。その一つの結果が，不ぞろいの街並みであり，箱物の公共建築であると言っては言いすぎであろうか。しかし，持続的な社会における建築を考えたとき，次の世代の人々に対する責任をも果たす必要があり，年金制度，財政赤字，核廃棄物処理，道路公団など様々な問題を先送りしている現代社会にとって，これは極めて難しいことである。

少なくともわれわれは、まだこの世に存在しない彼らの生存権を脅かすことなく、また、莫大な負債を残さぬようにしなければならない。

参考文献

- 1) 日本建築学会：良好な社会ストック形成のために、我が国の建築分野での努力は如何にあるべきか、日本建築学会大会（東海）地球環境部門 PD 資料，2003.
- 2) 巽 和夫，柏原士郎，古阪秀三（編著）：進化する建築保全，LCC から FM まで，学芸出版社，2002，pp.230.
- 3) SEAOC, VISION 2000- Performance Based Seismic Engineering of Buildings, April, 1995.
- 4) 日本建築学会：建築物の限界状態設計法・同解説，2002.
- 5) 森 保宏，加藤隆広：劣化影響係数を用いた構造物の実用的な信頼性評価手法，構造物の安全性および信頼性，JCOSSAR `2003 論文集，Vol. 5，2003.11.

*1 再現期間とは、ある現象がある値を超過して、次に超過するまでの時間間隔の平均値のこと。正しくは、平均再現期間という。ある年に再現期間 p 年の値を超過する確率は $1/p$ ，また、 p が十分大きな値のとき p 年間に再現期間 p 年の値を少なくとも 1 回超過する確率は約 0.63 である。例えば、再現期間 50 年の事象がある年に起きる確率、および 50 年間に少なくとも 1 回起きる確率は、それぞれ $1/50$ ，0.63 である。

*2 我が国では、「住宅の品質確保促進に関する法律」における劣化対策等級において、法律としては初めて住宅の耐用年数（ここでは設計用供用期間に相当）が明記された。

劣化対策等級：構造躯体等に使用する材料の交換等大規模な改修工事を必要とする期間を伸長するための必要な対策の程度

等級 3：通常想定される自然条件および維持管理の条件の下で 3 世代（おおむね 75～90 年）まで、大規模な改修工事を必要とする期間を伸長するための必要な対策が講じられている。

等級 2：通常想定される自然条件および維持管理の条件の下で 2 世代（おおむね 50～60 年）まで、大規模な改修工事を必要とする期間を伸長するための必要な対策が講じられている。

等級 1：建築基準法に定める対策が講じられている。