

4.3 建物の耐震設計・評価への利用

建物・土木構造物等の耐震性能をどのようにとらえ、どのように表現し、どのように実現してゆくか、現在、建築界においても必ずしも共通の考え方が存在しない。ここでは、建築物の耐震性能に着目して、その捉え方、表現方法を示した後、確率論的地震動予測地図に限定して、その耐震設計・評価への利用について述べる。

4.3.1 建物の耐震性能の捉え方

「建物の耐震性能」という言葉は大変分かりにくく、曖昧な語句である。狭義には、構造物あるいは構造部材の保有するさまざまな耐震性を示していることが多いが、建物建設地点の地震環境を考慮に入れずに建物の耐震性能を論ずることは不十分である。すなわち、建物が建設される地域の地震動の起りやすさと建物の保有性能の両方を考慮に入れた上で、建物の耐震性能がはじめて議論できる。この当たり前のことが「建物の耐震性能」を議論する上での大前提である。本節では、建築物の耐震性能の基本的捉え方に焦点を当て、確率論的地震動予測地図の利用方法について以下に述べる。

建物の耐震設計をなぜ実施する必要があるかという極めて根源的な問いがある。この問いに対する回答としては、「将来の地震に対して安全な建物を構築するため」と考える人が多いであろう。もっと的確に答えるならば、「建物に要求される適切な耐震性能を付与するため」が挙げられる。建物に要求される性能を明確にした上で、それを実現する方策が耐震設計であるといえる。そうなれば、建物に要求される性能をどう捉え記述するかが重要な事項であり、耐震性能目標の記述と実現方法とも言い換えることができる。これは、想定する地震外力の大きさ（地震あるいは地震動の大きさ）と、その外力条件下でどのような設計を実施するかということと密接に関わる。

土木・建築の設計に関する原則¹⁾に従うと、建物に要求される耐震性能は以下の3つに分類される。

- ・ 安全性
- ・ 修復性
- ・ 使用性

安全性は人命保護のために要求される性能であり、建築分野では建物が倒壊しないこと、鉛直荷重が安定的に保持できることと同義とされる。修復性については、建物の損傷は許容するが修復が現実的に可能で継続使用できる範囲に収まる状態と記述される。修復性の背景には、1995年の阪神淡路大震災以降、建物が構造的にさほど被害を受けていなくても建物本来の機能が全く確保できなかった事例や、建物及び建物内に収用される財産の保全に関する要求が高まってきたことによる。使用性は、建物本来の機能が確保されている状態を表している。安全性については、建築構造体としての安定性の欠如という物理的状态と対応し他の性能に比べて工学的取り扱いが可能であり、欧米の限界状態設計法²⁾や

日本建築学会の限界状態設計指針³⁾においては、終局限界状態として取り扱われている。修復性や使用性については依然多様な捉え方が存在し、より物理状態と対応づけた限界状態の定義と明確化が今後必要となろう。

このように、建物の耐震性能に関して、建物の保有性能に加えて建物周辺の地震環境を同時に考える必要があること、性能と対応した建物の物理状態をできるだけ明確にする必要があること、の二点が性能に基づく耐震設計を考える上で最も重要な課題である。

4.3.2 耐震設計法における耐震性能確保の方法

いつ、どこで、どれくらいの大きさの地震が生じるかが事前に分かれば、どれほど耐震設計は楽であろう。しかしながら、こうしたことは極めて予測困難であり、確定的に取り扱うにはどうしても限界がある。これらの不確定性に対処する方法として、過去の地震データの分析や統計に頼らざるを得ないし、活断層などの新しい知見が得られればそれを活用することも必要である。確率論的地震動予測地図は、この要求に応えたものであり耐震設計・評価に有効に活用できる。

一方、建物の耐力についても良く分かっていない。兵庫県南部地震による建物被害が示しているように、同程度の地震力を受けたと思われる複数の建物においても、異なった被害状態を呈していることが報告されている。すなわち、建物の保有耐震性も不確定なものである。そうなれば、設計に際し、類似の既存建物の保有性能に関する統計データを用いてより実際的な不確定性の取り扱いが可能である。

以上のように、将来起きる地震により発生する応力や変形などは不確定な量であること、建物耐力もまた不確定な量であることから、前者を総称して荷重効果 S 、後者の建物耐力 R と表すと、図 4.3.1 のようなふたつの確率分布を描くことができる。荷重効果 S の確率分布は地震外力の分布を表しているから、確率論的地震動地図の情報から直接得ることができる⁴⁾。

設計の基本原則が謳われている IS02304⁵⁾によると、このふたつの確率分布を用いて、建物に作用する荷重効果が建物の保有耐力を越えたときに破壊（不具合）が生じるものとして、その破壊確率に基づいて建物の耐震性能の良否の判定を行う必要があることが指摘されている。この方法を確率に基づく構造設計法と呼び、破壊確率の大小により性能水準を決めるものである。この方法は、以前はリスク評価などによく用いられたものであるが、IS02394⁵⁾で提唱している限界状態設計法でも推奨されている設計の方法である。実設計で確率の計算をする煩雑さは残るものの、最も分かりやすい手法である。

そこで、このふたつの確率分布と、従来の耐震設計法で用いられてきた設計クライテリア（設計用地震荷重と設計用耐力）との関係を以下に考えてみる。

図 4.3.1 は、地震による建物の荷重効果を S とし、ある建物の性能に関する耐力（変形でも良い）を R とし、建物あるいは構造部材の耐震安全性を確保する方法を分類・図示したものである。図にはいろいろな表現の設計クライテリアが記述されており、それぞれ

用いる設計法あるいは考え方により異なった表現方法があることを示唆している。

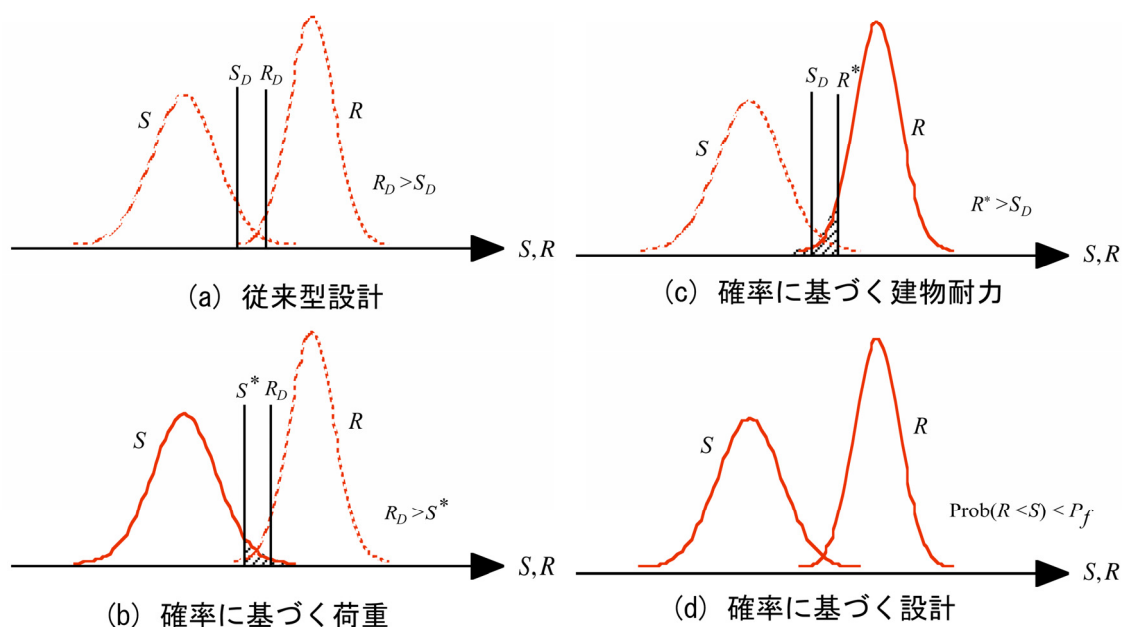


図 4.3.1 各種耐震設計法と設計クライテリアの設定⁴⁾

図中の(a)は、設計荷重 S_D と設計耐力 R_D を確定値として設計する従来型の方法であり、設計用地震荷重 S_D を経験的に定めた短期許容応力度設計法（現行一次設計）、終局強度設計法（現行二次設計）などはこの分類に入る。この設計法に用いる設計荷重 S_D や設計耐力 R_D は確率的なベースを持たないために、設計荷重や設計耐力の片方のみの議論に陥りやすい欠点がある。また、 S_D や R_D を統計的なデータに基づいて定めた方法に荷重・耐力係数設計法があり、建築学会の限界状態設計指針³⁾でも採用された方法であり、確率的な根拠付けに基づきつつも、設計法としての実用化に重点を置いた有効な方法である。

(b)は、建物の保有耐力については従来から用いてきた確定値を用い、地震荷重の確率分布を利用していくつかの設計用再現期間に対応した地震荷重の下で建物の耐震性能確保を行おうとするものである。再現期間を用いて地震荷重の大きさを記述するところが特徴的である。これは SEAOC の Vision2000⁶⁾で用いられた方法である。この方法では、建物耐力の不確実性が十分に反映できないところが弱点である。

(c)はあまり設計では用いられていないが、米国の原子力施設の安全性研究⁷⁾で以前用いられた手法である。建物の損傷度曲線あるいは脆弱性曲線から評価される高信頼度低損傷確率値(HCLPF 値: High-Confident and Low-Probability of Failure)から評価される建物耐力と別途定められた設計用地震荷重との大小関係を比較することにより建物の耐震性能を確保する考え方である。この場合、設計用地震荷重については統計的には定められていない。

図中の (d) は前述したように、二つの確率分布から荷重効果が耐力を上回る確率に基づいて構造物を設計する方法であり、「確率に基づく構造設計法」と呼ばれる。

こうした分類を行うことにより、理想的には確率論的地震動予測地図を直接用いられるという点、耐力側の不確実性も考慮できる点において、(d) の方法が実設計で用いられることが望ましいが、確率を直接用いる方法の煩雑さを軽減するための耐震性能確保の考え方には (a)～(c) のようないろいろな方法があることがわかる。次節では、これらの考え方と確率論的地震動予測地図との関わりについて述べる。

4.3.3 確率論的地震動予測地図の利用

(1) 耐震設計法への活用

図 4.3.1 に示した荷重効果 S の確率分布は建設地点に置ける地震動強さの確率分布に他ならない。確率論的地震動予測地図では、指定超過確率（例えば、今後 50 年間で〇%）の下での地震動の大きさが計測震度を用いて表現されている。これを設計に用いる場合には、前節で示したように、地震動強さの確率分布形の情報が必要となる。これには、複数の指定超過確率と地震動の大きさの対応関係から、地震動の確率分布を近似的に評価できる。米国では、極値 II 型分布を仮定してその分布形を定めるパラメータを求め、耐震性評価に有効に用いている事例もある⁷⁾。

一旦、確率論的地震動予測地図を用いて、建設地点に置ける地震動強さの確率分布が得られたなら、図 4.3.1 に示した、(d) 確率に基づく設計が可能である。ただし、地震動として評価対象期間を設定し、当該期間の最大値の確率分布を用いることになる。日本建築学会の限界状態設計指針³⁾では、終局限界状態に対して 50 年最大値分布を、使用限界状態に対しては年最大値分布を用いている。当然ながら建物の供用期間が長い場合には、その供用期間に応じた地震動最大値の分布を用いることが望ましい。

(b) の方法では、設計用地震動の大きさを再現期間と対応させて設定する方法である。「再現期間 Δ 年の地震動強さ」の評価には、地震動がある閾値を超過する事象の発生をベルヌーイ試行列と仮定する方法が一般的である。具体的には、今後 T 年間で確率 p_T となる地震動強さは、下式を用いて T 年間でならした平均再現期間 $(1/p_1)$ と関連させることができる⁸⁾。

$$p_1 = 1 - (1 - p_T)^{1/T} \quad (4.3.1)$$

ここに、 p_1 は 1 年当たりの超過事象の確率であり、上式を用いれば表 4.3.1 のような平均再現期間との対応関係が得られる。

表 4.3.1 平均再現期間と超過確率

推本の表現	平均年超過確率	平均再現期間
今後 50 年間で 39%	0.01	100 年
今後 50 年間で 10%	0.002	500 年
今後 50 年間で 5%	0.001	1000 年
今後 50 年間で 2%	0.0004	2500 年
今後 T 年間で p_T	$p_1 = 1 - (1 - p_T)^{1/T}$	$\frac{1}{p_1}$

日本建築学会の荷重指針⁹⁾においては、再現期間 100 年に対応する値を、図 4.3.2 に示すように「荷重の基本値」として定義し、時間変動する荷重（地震、風、雪）の大きさの目安を与えている。ただし、限界状態設計に用いる場合には、地震動強さのばらつきも含めた確率分布形の情報が必要であることは言うまでもない。

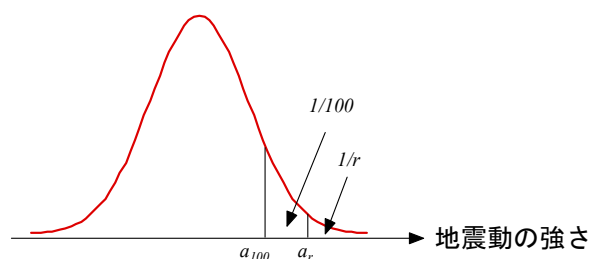


図 4.3.2 100 年再現期間に対する値

以下には、確率論的地震動予測地図の利用を考える上で、確率に基づく設計の具体事例をいくつか紹介する。

ISO の地震荷重規格¹⁰⁾

建築・土木構造物の地震荷重については、今年、国際標準化機構 (ISO) で一般構造物を対象にした地震荷重規格 (ISO3010) が改訂されたばかりであり地震荷重に関する世界共通の考え方が提示された。その骨子は、ISO2394 「構造物の信頼性に関する一般原則⁵⁾」の設計の基本に基づき、まず、1) ふたつの設計上重要となる終局、使用限界状態の定義を明確にしたこと、2) 夫々の限界状態に対して設計荷重の構成が示されていること、が特徴であろう。

本規格では、まず、耐震設計の基本的考え方が示されており、「耐震設計は、地震時における人身への危険防止、重要なサービスの維持、経済的な損失の最小化の目的で実施される」としている。そして、ふたつの限界状態に関しては、全ての地震から構造物を完全に守ることは経済的に不可能なために、起こるかも知れない大地震動に対しては構造物の

崩壊を防止し人命を守り〔終局限界状態〕、使用期間中に起こる中地震動に対しては構造物の被害を許容限界以内におさめる〔使用限界状態〕ことを目標にしている。この限界状態の考え方は、昨今の性能設計の根幹を成す重要な概念である。また、この規格の附則には、地震荷重の大きさを設定する考え方が示されており、確率・統計的な考え方がベースとなっている。表 4.3.2 及び 4.3.3 は、各々の限界状態に対して再現期間を定めて地震荷重の大きさを定めている。また、対象建物の重要度に応じて荷重係数を変化させている。

表 4.3.2 IS03010 における荷重係数と代表値の例¹⁰⁾

限界状態	重要度	荷重係数	地震動強さの代表値	再現期間
終局限界状態	高	1.5～2.0	0.4G	500 年
	中	1.0		
	低	0.4～0.8		
使用限界状態	高	1.5～3.0	0.08G	20 年
	中	1.0		
	低	0.4～0.8		

表 4.3.3 IS03010 における荷重係数と代表値の例¹⁰⁾

限界状態	重要度	荷重係数	地震動強さの代表値	再現期間
終局限界状態	高	3.0～4.0	0.2G	100 年
	中	2.0		
	低	0.8～1.6		
使用限界状態	高	0.6～1.2	0.2G	100 年
	中	0.4		
	低	0.16～0.32		

VISION2000⁶⁾

カリフォルニア構造技術者協会 (SEAOC: Structural Engineers Association of California) より「Vision 2000 - 性能に基づいた建築物の耐震工学⁶⁾」と題するレポートが発行され、性能明示型の新しい耐震設計体系の骨格と設計手法を提示している。これは、設計用地震荷重レベルをその地域の再現期間あるいは発生確率で複数定義し、それらの地震動レベルにおいて地震時の性能レベルを別途定めた性能マトリクスを目標に設計するものであり、それらの性能レベルは建物の被害状態と直接対応するようになっている。表 4.3.4 が Vision2000 で提案された耐震性能マトリクスである。この考え方は、米国統一耐震規定 IBC においても採用されている。

表 4.3.4 VISION2000 の耐震性能マトリクス⁶⁾

設計用地震動レベル		耐震性能レベル			
(再現期間)	超過確率	完全機能確保	機能確保	人命確保	崩壊寸前
しばしば (43年)	50% in 30yrs	●	×	×	×
時々 (72年)	50% in 50yrs	■	●	×	×
稀 (475年)	10% in 50yrs	★	■	●	×
非常に稀 (970年)	10% in 100yrs		★	■	●

日本建築学会の限界状態設計指針³⁾

日本建築学会では、建築物のより合理的な構造設計法確立を目指した活動を実施しており、その中で、建築物の限界状態設計指針³⁾が2003年に刊行された。これは建築物の構造形式〔鉄筋コンクリート造、鉄骨造、木造、など〕によらない統一的な共通の設計の枠組みを提供することを目的に、確率・統計的手法に基づいて目標安全水準を定めて設計荷重や設計耐力を決めてゆく合理的な方法である。ここでは、荷重・耐力係数設計法が採用され、荷重の発生頻度や荷重強さのばらつきを直接的に反映した設計式を用いている。

建築構造物に要求される条件として、安全性と使用性に関わるものがあるが、それらを設計で考慮する限界状態として定め、それらに対して、荷重・耐力係数を定めて、各部設計の荷重組合せ方法を示している。荷重係数は、荷重の種類や特性〔発生頻度は荷重作用時間〕に応じて荷重組合せ係数が定められる。なお、この設計式の一番の利点は、設計荷重や耐力が目標安全性水準と直接関連していることであり、現行設計法にはない重要な特徴である。

建築基準法における地震荷重の確率的評価¹¹⁾

1998年6月に建築基準法が大幅改定・公布され、2000年6月には基準法施行令が公布された。この改定の目的は、従来の仕様に基づく規定から性能に基づく規定への大幅改定であった。

要求耐震性能としては、最大級の地震に対して人命保護（各階の崩壊を生じさせない）、建物供用期間中に一度以上遭遇する地震に対しては、損傷防止（構造安全性の維持に支障のある損傷を生じさせない）となっており、前者に対しては、建物の変形量を評価するものとしており、等価線形化手法と応答スペクトル法を組み合わせた「限界耐力計算」と呼ばれる新たに開発された検証法を用いることが謳われている。残念ながら、地震荷重の大きさや表現については旧基準法のものと同様に基本的に変わっておらず、確率・統計的な考え方を盛り込むことが今後の大きな課題となろう。

この改定に先駆けて、建設省主導で総合技術開発プロジェクト「新建築構造体系の開発」が実施され、今後の建築設計において、建築物の安全水準をどう考え、どのように扱うべきかについて膨大な検討がなされた。図 4.3.3 は、全国 8 都市における旧建築基準法で定められる地震荷重を、建築学会の荷重指針の統計資料を用いて再現期間で表したもので、地域によって大きな差があることがわかる。同図より、建物の性能水準を全国で均一にするには、現行規準に用いられている地震地域係数 Z にもっと差をつける必要があることがわかる。これらは、確率論的地震動予測地図を用いて検討することができ、既往規準の不具合を確率的な視点から再評価することが可能である。

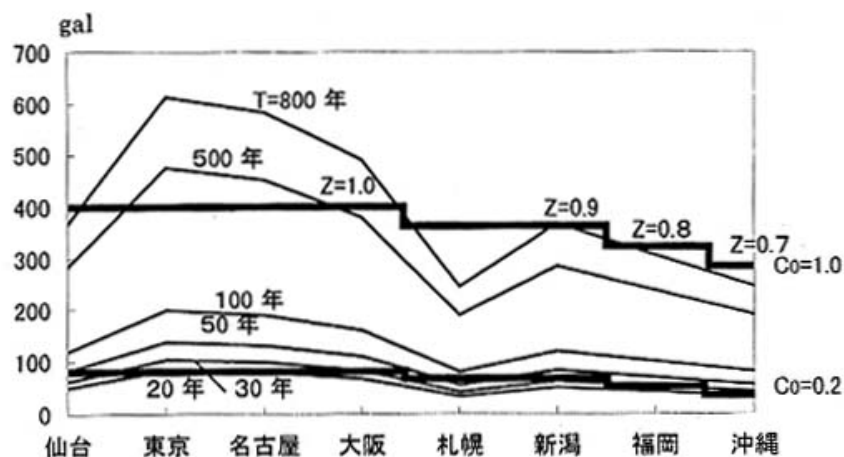


図 4.3.3 荷重指針⁹⁾のデータの基づく、全国各都市における地震荷重の再現期間
(Z :旧基準の地震地域係数)¹¹⁾

(2) 簡易建築物の耐震評価への活用

現在の確率論的地震動予測地図は地表面の計測震度に対して作成されている。これは国民が慣れ親しんでいる震度を用いることにより、国民の間で地震防災意識を喚起させる利点がある。地面の揺れを震度というわかりやすい表現を用いれば、個人住宅の耐震設計・診断に有効に活用できる。

個人住宅の耐震診断等においては、その評価は簡便な方が望ましい。そこで以下には、震度で表された確率論的地震動予測地図を用いて建物の簡易耐震診断が簡単にできる方法を紹介する。

個人住宅の耐震性能の内、建物の安全性を例にとって説明する。いま、建物が今後 50 年以内に地震により建物の安全性が損なわれ崩壊する確率 P_f は次式で評価することができる。

$$P_f = \sum_i \text{Prob}(I > i) \cdot \text{Prob}(R = i) \quad (4.3.2)$$

ここに、 $\text{Prob}(I > i)$ は今後 50 年間に建物建設地点の計測震度 I が i を超える確率、 $\text{Prob}(R = i)$

は対象建物の安全性を損なわせる地面の揺れが i となる確率であり、建物の強さを震度で表現したものである。計測震度 i に関する総和は、($i=3, 4, 5$ 弱, 5 強, 6 弱, 6 強, 7) とする。

確率論的地震動予測地図では対象地点において今後 50 年間に計測震度 I が i を超える確率 $\text{Prob}(I > i)$ が評価されており、計測震度に関するハザード曲線から容易に評価することができる。また、上式では対象建物の強さが地表面震度で表されている必要があるが、これは、建物の脆弱性曲線を計測震度で表したものに他ならず、既往の建物の脆弱性曲線に関する研究成果を活用することもできる。建物の耐震補強や新築建物の耐震設計においては、2003 年に施行された住宅の品確法や性能表示制度と関連づけられることが可能で、国民の住宅性能への関心度を高めることに役立つであろう。

4.3.4 確率論的地震動予測地図の利点

本節では、地図の耐震設計以外への利用を考える上で、確率論的地震動予測地図の特質を明確にし、今後のさらなる活用可能性への手がかりを示す。全国を概観した確率論的地震動予測地図の有用性は以下が挙げられる。

- (1) 全国の地震危険度の相対的評価が可能
- (2) 同一地域の建築物、土木構造物、他の施設の耐震設計、耐震性評価のための共通基盤となりうる
- (3) 他の自然災害（強風、雪、洪水、豪雨等）との危険度比較のための活用可能
- (4) 時間軸を取り込んだ評価となっていることから、将来の持続性に基づく設計、評価に活用可能

4.3.5 まとめ

本節では、建物の耐震設計への利用の視点から、耐震性能の捉え方、耐震設計の考え方、設計法への活用事例と今後の可能性について概説した。現在作成中の全国を概観した確率論的地震動予測地図は適用にあたって、建物の耐震設計においては工学的基盤における応答スペクトルなど、より詳細な情報の提示などが必要な場合もあるが、地図を活用する側が地図の利点を理解した上で、活用目的、対象範囲、評価の手間などを勘案して利用すれば、極めて合理的な意思決定ができる。確率論的地震動予測地図は今後の多様な展開可能性を秘めており、その有効性が今後幅広く認識されるはずである。

参考文献

- 1) 建設省、土木建築にかかる設計の基本、2000.12
- 2) CEN, EUROCODE-0 Basis of Design, 1999

- 3) 日本建築学会、建築物の限界状態設計指針、2003
- 4) 高田毅士、耐震性能の確率的表示と地震荷重、構造〔振動〕部門 PD 資料、1999.9
- 5) ISO2394, General Principles on Reliability for Structures, 1997
- 6) SEAOC, VISION 2000 – Performance Based Seismic Engineering of Buildings, April, 1995
- 7) R.C. Murray, et al., DOE Natural Phenomenal Hazards Design and Evaluation Criteria, Proc. of the 5th Symposium on Current Issues Related to Nuclear Power Plant Structures, Equipment and Piping, Orlando, Florida, 1994. 12
- 8) 高田毅士、新荷重指針・地震荷重の立場から、構造〔荷重〕部門 PD 資料、2004.8
- 9) 日本建築学会、建築物荷重指針・同解説、1993
- 10) ISO3010, Bases for design of structures – Seismic actions on structures, 2000
- 11) 建設省建築研究所、「新建築構造大系の開発」目標水準分科会報告書、建設省総合技術開発プロジェクト、平成 10 年 3 月