

7. 性能照査型耐震設計法のまとめと今後の課題

7.1 モデルコード作成に向けて

本報告では性能照査型耐震設計法の望まれる姿について論じてきたが、モデルコードとして具体化するためにはさらに検討すべき課題が多く残されている。例えば、重要度を設定することの必要性は誰しも認めるところであるが、方法論は具体的にはなっていない。地震時に想定される限界状態とその評価法は、終局限界に対してはかなり明らかになりつつあり、地震後の使用性を左右する損傷限界に対しての考え方は示したが、具体的にはまだ不明確な点が多い。さらに、信頼性設計法を取り入れるためには統計データが十分でないという問題もあり、安全性のレベルをどこに置くかという本質的な問題についてもまだ議論が必要である。

そこで、図 2.3.1 のフローチャートに沿って本報告の内容をまとめ、現在考えられる性能照査型耐震設計法の全体像を概略示すことにする。

7.2 要求性能の設定

7.2.1 地震動および重要度の設定

(1) 設計地震動の設定

設計地震動は土木学会第一次および第二次提言でも示されたように、また道路橋示方書・耐震設計編などでも取り入れられているように、レベル1およびレベル2の2段階を想定する。レベル1, 2地震動の現在の設定は、

レベル2地震動：兵庫県南部地震のレベル(タイプII)および関東大地震のレベル(タイプI)

(当該地点の最大級の地震動)

レベル1地震動：現行の震度法レベルの地震動

(耐震安全性の最低水準)

レベル2地震動の定義は耐用期間内に発生する確率は低いが非常に強い地震動とされている。当該地点に影響を及ぼす活断層から想定される最大級の地震動とすれば定義はさらに明確である。しかし、よく再現期間が1000~2000年と言われるように発生確率を同定することはほとんど正確にはできない。ただし、信頼性設計理論を取り入れていく方向としては、何らかの発生確率の設定が望まれる。一方、レベル1地震動の定義は耐用期間中に1~2回は発生する確率のある地震動とされている。しかし、実際に震度法レベルの地震動がそのような確率を有するかは明確でなく、過去の経験の蓄積により設定されたものと考えた方が意味は明快である。ただし、レベル2地震動と同様に信頼性設計理論の立場から発生確率を明確にすることが望まれる。

(2) 重要度の設定と情報公開

安全性向上には経済的な制約があることは事実であり、できるだけ多くの住民の要望に応えるためには構造計画において重要度を設定する必要がある。現在は「重要」と「その他」などのように2種類の設定が多いが、限られた財源で出来

るだけ多くの社会資本整備を進めるためにも「普通」、「重要」、「最重要」の3種類とする。

重要度は被災時の社会・経済的影響や復旧の難易度を考慮して決定される。その方法は、現在は有効性が十分に実証されていないが、第3章で示したリスクアナリシスや費用便益解析の結果を参考に取り入れる方向で検討を進めていくことが望ましい。

リスクはゼロにすることも限りなくゼロに近づけることも現実的には不可能であり、ある程度のリスクは受け入れざるを得ない。この安全性のレベルについて合意を得るためには信頼性理論に基づいた資料の情報公開が必要である。しかし、現状では設計者さえ構造物がどのくらいの安全性レベルを持っているのか明確にわからないのが実態であるから、性能照査型設計基準において安全性レベルを明確にしていくことが必要である。

7.2.2 限界状態の設定

(1) 想定すべき限界状態

耐震設計において構造物に要求される基本的な性能として構造安全性と地震後の使用性の2つを考える。構造安全性は構造物の崩壊を防止するために必要となる性能で、間接的には人命に対する安全確保を目的としている。地震後の使用性は地震後における救援・復旧のために機能を保持するためと構造物自身が早期復旧できるための2つから要求される性能である。

2つの要求に対して構造物に想定すべき限界状態は次のようになる。構造安全性に対しては、構造物が崩壊点に至らないことを照査するから終局限界状態が想定される。地震後の使用性に対しては、崩壊点の手前で使用性を確保するように損傷を制御するから損傷限界状態が想定される。

(2) 評価性能および照査指標の選定

上記の限界状態を照査する方法は、現在の照査技術によりある程度限定されたものになる。そこで、基本性能に対して評価すべき工学的（力学的）性能を評価性能とし、これを具体的に表す量を照査指標として体系的に整理しておくことと照査事項の峻別ができ照査内容が明確になる。

例えば、鋼製橋脚に対する性能評価体系は表 2.3.5 に示されており、構造安全性に対する評価性能は変形性能あるいは保有耐力、および低サイクル疲労である。この内、変形性能と保有耐力はどちらも局部座屈を主因とする不安定破壊モード（屈服も含む）を想定した評価性能であるから、いずれかを選んで照査すればよい。ただし、今後の方向としては静的/動的解析のいずれにおいても同じ評価軸となる変形性能の方が望ましい。低サイクル疲労は別の破壊モードに対する評価性能であるから、当然のことながら変形性能照査に代えて省略できない。

7.2.3 要求耐震性能の設定

(1) 要求耐震性能マトリックス

設計基準において要求耐震性能の設定方法は、①最低水準の耐震性能のみを規

定し、それを上回る性能はその都度決定する、②メニューとしていくつかの耐震性能を設定する、などが考えられる。ここでは構造物の重要度を3種類に区分したことから、構造物の重要度に応じた要求耐震性能をメニューとして例示しておくのが分かり易いと考え後者の設定方法とした。このメニューは要求耐震性能マトリックスとして図 2.3.2 のように表される。構造物の耐震性能レベルは前項で述べたように、構造安全性に関して安全か破壊かの2区分、地震後の使用性に関して表 2.3.2 の定義によって無損傷～崩壊までの5区分に予め分類されており、レベル2地震動時に要求される耐震性能は重要度に応じてメニューとして用意されている。この要求耐震性能は単独の構造物のみならず、システムに対しても照査されるのが望ましい。

(2)安全性レベル

前項でも述べたように、現在の設計基準で設計された構造物がどの程度の破壊確率（あるいは非破壊確率）を有しているのかほとんど分からないのが現状である。したがって、性能照査型設計基準においてはどのレベルの目標安全性水準を求めているのかを陽に示すことが望ましい。

目標安全性水準の設定方法の例は 6.2.2 で述べたが、現行基準で確保されている安全性水準を妥当なものとしてコードキャリブレーションに根拠を求める方法が最も現実的であろう。キャリブレーションを行うためには安全性水準を表す尺度が必要になるが、一般的には信頼性指標 β が使われている。

建築物の例であるが、新構造総プロ報告書 [建築研究所, 1997] では地震動を確率変数として扱い、現行基準で設計された建築物の信頼性指標を評価した例を示している。終局限界に対して $\beta=2$ 程度の値を得ているが、報告書でも述べられているように、この結果は入力地震動とその確率モデル、対象建築物の特性、さらには地震時応答の解析手法にも依存している。しかし、基準で目標信頼性指標を提示するためには上記のような検討作業が必要であり、地震以外の荷重に対する評価も含めて広範囲に検討しておく必要がある。

最終的に現行基準の平均的な安全性水準を表す β が求められ新基準に採用されたとしても、これだけでは性能照査型設計法が機能しない。そこで、新形式の構造に対して設計者自らが耐荷力評価を行い、 β に基づいて安全係数を定めるためのガイドラインを示しておかなくてはならない。あるいは、従来の構造であっても精度の高い統計データが収集されれば有利な設計ができるようにしておくことが望ましい。

7.3 性能の算定

7.3.1 解析および実験方法の選定

性能照査型耐震設計では、従来よりも詳細で精緻な、しかも多くの技術者にとって不慣れな非線形域での静的・動的解析が必要とされる。したがって、性能設計を十分機能させるためには耐震設計に用いられる解析手法ならびに解析ソフトの整備、精度検証用のベンチマークの作成等が必須である。

この点から第3, 5分科会報告書[土木学会・JSSC, 2000]では, 耐震設計で用いられる解析法を解析の種類(静的, 静的繰り返し, 動的), 幾何学的非線形性, および材料的非線形性に応じて11種類に分類して示し, 通常的设计段階で用いられる解析法の範囲を明確にしている. その中から設計対象に適切な解析法を選定すればよい.

性能評価式や解析法がない新材料・新構造の開発の場合, 性能は実験的に算定する必要がある. 性能評価のための実験は研究者が行ってきた作業であり, これを実施するためには入念な実験計画が必要である. 例えば, 破壊挙動に影響を与えるパラメータの想定と関連する特性値の計測, 荷重載荷プログラム, 不確定性をカバーするための供試体の数, などを事前に定めておかななくてはならない. 第3, 5分科会報告書[土木学会・JSSC, 2000]では, 耐震性能評価のための標準的実験手法をガイドラインとして示してある.

7.3.2 解析および実験結果の信頼性

解析プログラムについては精度が検証されたものを使うことが必要である. 第3, 5分科会報告書[土木学会・JSSC, 2000]では耐震解析用プログラムに対してベンチマーク問題が示されているので, 新たに開発されたプログラムはその結果を用いて検証すればよい. ただし, 非線形動的解析については明確なベンチマークを示すには至っておらず, 今後の課題になっている.

次に, 後述する部分安全係数法で使用する抵抗の特性値を実験結果から評価する方法について述べる. 方法はISO2394の付録D[ISO2394, 1998]でも述べられており, この内, 統計的推定による方法を例として示す.

抵抗値が正規分布に従い標準偏差 σ が既知の場合, 超過確率95%となる抵抗の下界値は次式で推定される.

$$R_{k,est} = m_R - k_s \cdot \sigma \quad (7.3.1)$$

ここに, $R_{k,est}$: 超過確率95%となる抵抗の下界推定値, m_R : サンプルの平均値, σ : 抵抗の標準偏差(既知), k_s : サンプルサイズに応じた係数であり, この係数の求め方を少し詳しく述べておく[市川, 1988]. 正規分布の場合, 超過確率95%となる時 $k=1.64$ であるが, 抵抗の平均値 μ が未知であるため式(7.3.1)の推定値はばらつきを持つ. したがって, 式(7.3.1)の推定値が $\mu - k \cdot \sigma$ を越える危険率を γ (信頼水準 $1-\gamma$) となるように k_s を定める必要がある. すなわち,

$$P_r[m_R - k_s \cdot \sigma > \mu - k \cdot \sigma] = \gamma \quad (7.3.2)$$

とすればよい. 式を変形して,

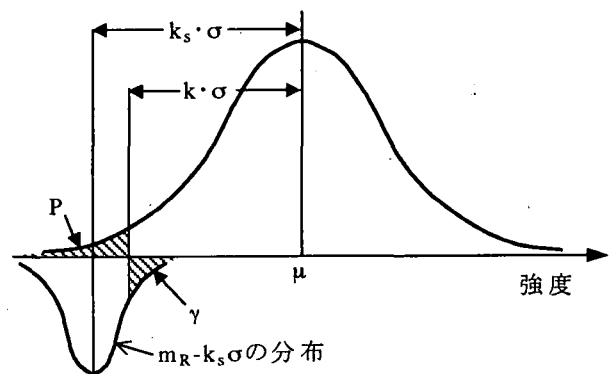


図 7.3.1 抵抗の超過確率95%推定値の分布

$$P_r \left[\frac{m_R - \mu}{\sigma/\sqrt{n}} > \sqrt{n}(k_s - k) \right] = \gamma \quad (7.3.3)$$

となる。上式の $(m_R - \mu)/(\sigma/\sqrt{n})$ は標準正規分布 $N(0,1)$ に従うから、 k_s は次式で求められる。

$$\begin{aligned} \sqrt{n}(k_s - k) &= \Phi^{-1}(1-\gamma) \\ \therefore k_s &= k + \frac{\Phi^{-1}(1-\gamma)}{\sqrt{n}} \end{aligned} \quad (7.3.4)$$

抵抗の平均値、標準偏差とも未知の場合、超過確率 95% となる抵抗の下界値はサンプルの平均値 m_R 、サンプルの標準偏差 s_R を用いて次式で推定する。

$$R_{k,est} = m_R - k_s \cdot s_R \quad (7.3.5)$$

ただし、サンプルの標準偏差は不偏推定量であり次式で計算する。

$$s_R = \sqrt{\frac{\sum (x_i - m_R)^2}{n-1}} \quad (7.3.6)$$

標準偏差が既知の場合と同様に次式を満たすように k_s を定める。

$$P_r [m_R - k_s \cdot s_R > \mu - k \cdot \sigma] = \gamma \quad (7.3.7)$$

上式を変形して、

$$P_r \left[\frac{\frac{m_R - \mu}{\sigma/\sqrt{n}} + \sqrt{n} \cdot k}{\sqrt{\frac{(n-1)s_R^2/\sigma^2}{n-1}}} > \sqrt{n} \cdot k_s \right] = \gamma \quad (7.3.8)$$

となる。この式の中の $(m_R - \mu)/(\sigma/\sqrt{n})$ は標準正規分布 $N(0,1)$ に従い、 $(n-1)s_R^2/\sigma^2$ は自由度 $n-1$ の χ^2 分布に従う。このとき式(7.3.8)の不等式の左辺は自由度 $n-1$ 、非心度 $\sqrt{n} \cdot k$ の非心 t 分布 [日本数学会, 1985] に従う。非心 t 分布の上側確率 γ に対するパーセント点を $t_\gamma'(n-1, \sqrt{n} \cdot k)$ と表すと、 k_s は次式で求められる。

$$k_s = \frac{t_\gamma'(n-1, \sqrt{n} \cdot k)}{\sqrt{n}} \quad (7.3.9)$$

例えば、信頼度が 75% 以上の水準 ($\gamma = 25\%$) で超過確率 95% となる抵抗の下界値を推定するための係数 k_s は下表のようになる [ISO2394, 1998]。

表 7.3.1 式(7.3.5)に用いる k_s 値

確率 P	サンプル数 n								
	3	4	6	8	10	20	30	100	∞
0.05	3.15	2.68	2.34	2.19	2.10	1.93	1.87	1.76	1.64

この例のように、部材の強度および安全係数を設計者自らが定めることができるような道を開いておくことは技術開発の意欲を高める。したがって、性能照査型設計法においては非常に重要なことと思われる。

7.4 性能照査法

7.4.1 照査フォーマット

現在，最も適用される可能性が高い信頼性設計法はレベル I の部分安全係数法である．そのフォーマットは式 (6.1.20) で示した次の式である．

$$\gamma_i \frac{\gamma_a \cdot S(\gamma_f \cdot F_k)}{R(f_k/\gamma_m)/\gamma_b} \leq 1 \quad (7.4.1)$$

ここに， R ：抵抗関数， S ：荷重効果関数， f_k ：材料強度の特性値， F_k ：荷重の特性値， γ_m ：材料係数， γ_f ：荷重係数， γ_b ：部材係数， γ_a ：構造解析係数， γ_i ：構造物係数（全体係数）である．この式は確率論に基づいた材料強度あるいは荷重の特性値とその他の様々な不確定要因を考慮するための部分安全係数によって構成される．各部分安全係数の意味は 6.1 で述べた通りであるが，特性値を平均値とするか，超過あるいは非超過確率が十分小さくなる点の値とするかで材料係数 γ_m および荷重係数 γ_f が考慮する不確定要因の範囲は異なってくる．超過あるいは非超過確率が十分小さくなる点のフラクタイル値とすれば材料強度あるいは荷重のばらつきに影響は含まず，材料・荷重の変動が限界状態に及ぼす影響度によって決まるものとなる．例えば，終局限界と使用限界で違った係数を与えることになる．鉄道構造物設計標準（耐震設計）[鉄道総合技術研究所，1999] では， $F_d = \gamma_f \cdot F_k$ を荷重の設計用値， $f_d = f_k / \gamma_m$ を材料強度の設計用値として次の照査式を与えている．

$$\gamma_i \frac{\gamma_a \cdot S(F_d)}{R(f_d)/\gamma_b} \leq 1 \quad (7.4.2)$$

信頼性設計法としての意義が薄くなるが，統計データが揃い確率論的決定が可能になるまでの暫定値として F_d を基準で定めた地震動， f_d を材料強度の公称値（規格値）とすればよいと思われる．

具体的に鋼製橋脚に対する構造安全性照査式の一例を表 2.3.5 に基づいて示すと，

$$\gamma_i \frac{\gamma_a \cdot \delta_{\max}}{\delta_u/\gamma_b} \leq 1 \quad (7.4.3)$$

ここに， $\delta_{\max} = \delta(F_d, f_d)$ ：非線形動的解析などで求められる橋脚の最大応答変位（非線形のため地震動だけでなく，材料強度にも依存する）， $\delta_u = \delta(f_d)$ ：Pushover 解析などで求められる橋脚の終局変位である．

7.4.2 部分安全係数の設定

部分安全係数の定め方として 6.2.3 で示した方法は目標信頼性指標 β_T をもとに，①それぞれの基本変数の限界状態に対する感度係数から定める方法，②適用範囲を網羅するように設計された構造物の信頼性指標が目標値に最も近くなるように部分安全係数の組合せをキャリブレーションする方法であった．どちらの方法も目標信頼性指標 β_T と基本変数の統計量が必要になる．

照査式として式 (7.4.3) を使うとすれば，定めるべき部分安全係数は部材係数 γ_b ，

構造解析係数 γ_a ，構造物係数 γ_i の3つである。まず， γ_i は構造物の主に重要度によって決定される係数であるが，選択された重要度に応じて抵抗の限界値を変化させるとすれば，暫定的に $\gamma_i = 1.0$ としてもよいと考えられる。この場合の γ_i の意味としては同じ重要度の構造物であっても地震時の期待損失にはばらつきが生じるため，これを調整するための係数になるかもしれない。ただし，経済的な計算のみで安全性を調整することには常々批判のあるところなので [長，1995]，十分な検討が必要である。重要度以外の要因としては，ヒューマンエラーのように確率的に決めにくい要因をこの係数で考慮することも考えられる。次に， γ_a は構造解析の精度によって与えられる係数であるが，精度は主に解析理論によるもので統計量として扱うことは困難である。したがって恣意的に決定し，暫定的に $\gamma_a = 1.0$ としてもよいと考えられる。将来的には性能照査型設計法の趣旨を活かし精度が高い方法に対してインセンティブを与えるために， γ_a を差別することを検討すべきであろう。最後に残された係数は γ_b の1つだけであるが，暫定的には現行基準の安全率と同じ値とすることができる。鉄道構造物設計標準（耐震設計）では，鋼部材に対して $\gamma_b = 1.15$ としている。

このように部分安全係数をすべて決めてしまうと，性能照査型設計法として一つの意味が失われてしまう。つまり，要求性能を満足すれば，どのような材料，構造形態，ディテール，工法を採用しても自由であるとして技術開発を促進させるような働きが失われるだろう。そこで，性能照査型設計法として実質的なメリットを活かすために γ_b を統計量によって変化させることが考えられる。抵抗 R に関する統計量は模型実験やシミュレーション解析によって比較的収集しやすいので，先に述べた感度係数による方法を適用して定めてもよいと思われる。

条件を単純化して $\gamma_i = \gamma_a = 1.0$ および抵抗 R のみが確率変数であるとする感度係数は必要なくなり， γ_b は次式から定めることができる。

$$\gamma_b = \frac{1}{1 - \beta_T \cdot V_R} \quad (7.4.4)$$

ここに， V_R は抵抗 R の変動係数で R の特性値は平均値とする。 R の特性値が5%フラクタイル値ならば次式となる。

$$\gamma_b = \frac{1 - 1.64V_R}{1 - \beta_T \cdot V_R} \quad (7.4.5)$$

最後に目安として式(7.4.4)の計算例を示してみる。性能照査型設計基準においてレベル2地震動に対する目標安全性指標が $\beta_T = 2$ と与えられているとする。そこで，設計者は抵抗 R の変動係数を既存の統計量，模型実験，数値解析などによって求め，式(7.4.4)に代入すれば γ_b を定めることができるが，仮に変動係数 $V_R = 0.1$ とすると次の部材係数 γ_b が得られる。

$$\gamma_b = \frac{1}{1 - 2 \times 0.1} = 1.25 \quad (7.4.6)$$

当然のことであるが，この値は抵抗の算定結果や算定式に依存するもので，異なる抵抗を使用する場合には γ_b の値は違ってくる。

逆に現行基準の安全係数から β_T を逆算してみる。鉄道構造物設計標準の

$\gamma_b = 1.15$ [鉄道総合技術研究所, 1999] と仮の変動係数 $V_R = 0.1$ を代入してみると、式(7.4.7)の値になる。ただし、鉄道構造物設計標準では変動係数を明らかにしているわけではなく一例を示したに過ぎない。

$$\beta_T = \frac{1}{V_R} \left(1 - \frac{1}{\gamma_b} \right) = \frac{1}{0.1} \times \left(1 - \frac{1}{1.15} \right) = 1.3 \quad (7.4.8)$$

β_T を定めるための最も現実的な方法は現行基準のキャリブレーションであるが、広範囲な計算と検討が必要である。

7.5 今後の課題

この章の初めでも述べたが、理想的な性能照査型耐震設計基準を具体化するためには解決しなければならない課題は山積している。これらの課題を列挙すると以下のような項目が挙げられよう。

想定地震動の設定

- レベル2地震動を当該地点の最大級地震動と定義して、その発生確率の定量化。
- レベル1地震動の大きさと発生確率の定義を、無損傷設計を要求する点から明確にすること。

重要度の設定

- 合理的で有効な重要度決定手法の開発（リスクアナリシスなどの適用性）。
- 重要度決定に関連して安全性水準の明確化とこれらの情報公開および社会的合意の醸成。

限界状態の設定

- 地震中の使用性について、限界状態を明確にすること。
- 地震後の使用性について、要求性能と設計クライテリアの関係をさらに精緻化すること。
- システムの限界状態を明確にするため、被災シナリオをさらに精緻化すること。
- システムの限界状態を予測する精度を向上するために、システムを構成するすべての構造あるいは部材（橋脚に比べて研究が進んでいない支承、落橋防止装置、伸縮装置など）の地震時挙動を明らかにすること。

要求性能の設定

- 安全性水準の設定方法の具体化とその検討作業。
- システムに対する要求から個々の構造物あるいは部材に対する要求を求める方法。
- システムに対する要求から決まる個々の構造物あるいは部材に対する要求の最適化、あるいはシステムパフォーマンスの評価指標を設定すること。

性能の算定

- 設計用解析ツールの整備と精度検証用のベンチマーク（詳細な課題は第3, 5分科会報告書 [土木学会・JSSC, 2000] を参照）。
- 性能検証用の高度な解析手法の整備あるいは開発。
- 標準実験手法および実験結果を整理するためのガイドライン作成。
- 第三者による評価・認定機関のあるべき姿。

性能照査

- 安全性を確保するための条件を明示し，基準作成者と設計者の役割分担を明確にすること．つまり，目標信頼性指標，部分安全係数の設定条件を統一し，明示するための方法論の検討．さらに，照査と認定の方法論相違の明確化．
- 部分安全係数法においては，各部分安全係数がカバーする不確定性の範囲を明確にすること．
- 構造解析係数 γ_a ，構造物係数 γ_i を定める方法．
- 材料係数 γ_m ，荷重係数 γ_f ，部材係数 γ_b を設定するための方法とそのガイドライン作成．
- 基本変数の統計量の収集や荷重指針の制定．

参考文献

- [長，1995] 長尚：基礎知識としての構造信頼性設計，山海堂，1995.4.
- [市川，1988] 市川昌弘：構造信頼性工学－強度設計と寿命予測のための信頼性手法－，海文堂，1988.11.
- [ISO2394，1998] ISO/TC98/SC2:ISO2394 General Principles on Reliability for Structures, 1998.6.
- [建築研究所，1997] 建設省建築研究所，(財)日本建築センター，(財)国土開発技術センター：建設省総合技術開発プロジェクト「新建築構造体系の開発」平成8年度報告書，1997.4.
- [土木学会・JSSC,2000] 土木学会鋼構造委員会・日本鋼構造協会次世代土木鋼構造特別委員会：鋼構造物の耐震解析用ベンチマークと耐震設計法の高度化，2000
- [鉄道総合技術研究所，1999] 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説（耐震設計），丸善，1999.10.
- [日本数学会,1985] 日本数学会編：岩波数学事典－第3版，岩波書店，1985.