

8. 性能規範における重要度と裕度の扱い —土木施設の耐震規範を対象に—

On Treatment of Importance of the Structure and Safety Margins in Performance Based Criteria

○ 中村孝明（株式会社篠塚研究所）

Takaaki NAKAMURA, Shinozuka Research Institute, Shinjuku 6-26-4, Shinjuku-ku, Tokyo 160
e-mail: sri@po.iijnet.or.jp

For the use of the performance based design, it should be required to establish methods that deal with the importance of each performance level and corresponding to the safety margins. In the seismic design, the safety margins may be treated quantitatively by using failure probability, and the importance by using loss amount assigned for the failure of each performance level. In this paper, the applicability of the expected loss estimation for the above issues is discussed.

Key Words : Performance based design, Failure probability, Expected loss, Importance, Safety margins

1. はじめに

土木構造物の多くは公益を目的とした施設である。このため、社会的あるいは経済的な要求に基づいて造られる。高速道路や鉄道であれば、人や物を高速に輸送することが性能として要求され、また、電気ガス水道などの生産・供給施設には、人々への安定且つ継続的な供給が要求される。これら本来性能は、施設の目的や規模によって様々であり、また、経済状況や社会環境の変遷と共に変わることも忘れてはならない。そして、構造物には、供用期間中、この性能をまとうすることが、使命として課せられることになる。そのためには、地震等の外乱あるいは劣化に対し、十分な安全性を持つことが必要となり、その最低基準が設計指針や示方書によって定められている。一方、物性値や解析手法の精度、施工性の良否など、構造物の設計耐力と実際の耐力には差が生じることは避けられない。設計では、この差を見込んだ形で、安全余裕を持たせるよう規定している。しかし、裕度を含めたこれら基準は、工学的知見や事故・災害等の経験をふまえつつ、有識者の直感に基づき定められたもので、工学的判断以上の論拠を見出すことは難しい。

一方、性能規定型の設計いわゆる性能設計が、様々に取り上げられ、一部では次世代の設計規範として研究が進められている。性能規定型の耐震規範は、設計地震動に対し、段階的に設定された性能あるいは機能を維持できるよう規定するものである。一定の基準値を設ける点ではこれまでの設計法と変わらないものの、そこには、役割や機能など、施設の持つ性能が勘案され、より具体的な耐震性能が明示される。しかし、性能規範であっても、施設の重要度を取り入れる容易さはあるものの、重要度や安全余裕の扱いについて、明解な評価方法が示されているわけではなく、今後の課題として残されている。

本報では、性能照査型の耐震規範において、その動向を紹介しつつ、耐震性能を確率で照査する一案を示す。そして、確率や損失の期待値を使った重要度ならびに安全余裕の評価方法を示し、その可能性について論じる。

2. 性能規範の概要

2.1 耐震規範

性能規範では、構造物の被害を機能という視点から段階的に捉え、それぞれの段階において規範を設けるところが特徴である。そのため、施設の目的や機能を考慮しつつ、被害の程度を明確に定義することが第一に必要となる。以下、橋梁を例とした耐震規範について概説する。被害の定義としては、例えば、交通遮断を要しない程度の軽微な被害、落橋や下部構の倒壊など、大規模な補修や改築を必要とするような甚大な被害、などとなる。そして、設計地震動に対し、それぞれの被害の発生を抑止するよう規定することになる。具体的には、500年確率の地震動においては、一切被害を起こしてはならない。1000年確率の地震動に対しては、軽微な被害は許容するが、甚大な被害は起こしてはならない、となる。設計地震動は、確率的な表現ではなく、阪神大震災級の地震とか、L2地震など、より具体的な地震動に読み替えることも可能である。

一方、設計者においては、軽微あるいは甚大など、被害の状況を想像あるいは意識しつつ、構造形式や工法などの創意工夫をしなければならない。これは、壊れる状況を、考えらしなかったこれまでの設計思考と比べ、大きな改善点である。

2.2 重要度の扱い

本来性能は、施設の目的や規模によって様々である。これら性能の違いは、施設の重要性と同義に解釈できる。そして、

重要な施設はより堅牢に造ることが規定されなければならない。表-1に、平成8年に改訂された道路橋示方書¹⁾の耐震照査について、川島²⁾がまとめたものを示す。表では、設計地震動の大きさを発生確率の違いによって分け、さらに、プレート境界型の地震と内陸直下型の地震に分け、それぞれ照査するよう規定しているのが特徴である。また、橋の重要性に応じ、被害の許容限界を別途設けている。ちなみに、同示方書では、重要度をA種、B種と分け、塑性率の違いによって耐震性能の差異を設けている。しかし、重要性の定義は曖昧であり、重要度の違いを十分取り入れた耐震規範とは言い難い。一方、建築構造物を対象に、地震動と耐震性能を主要構造のグレードにおいてまとめたものを表-2³⁾に示す。これは、建築研究所・鋼材倶楽部が提案したもので、設計地震動を再現期間で定義し、グレードごとに耐震性能を明確に規定しているところが特徴である。グレードは、Aが高級、Bが推奨、Cが一般、Dが条件付きとなり、Cの一般が社会的な最低限の強度基準である。ここに、表-1、表-2共に、それぞれ文献²⁾³⁾からの抜粋であるが、一部修正したことを追記しておく。

高橋ら⁴⁾のアンケート調査によると、98%の専門家が重要度に応じ、安全性のレベルに差を持たせることに肯定的であると言っている。また、平成7年度土木学会全国大会研究討論会資料⁵⁾では、重要度の扱いについて、「ケースバイケースだが差を付けてもよい」、を含めると94%の技術者が賛成である、とのアンケート結果が示されている。これら調査結果や世の趨勢を踏まえると、重要度を勘案した設計規範は、そう遠くない将来、実現する可能性は高い。しかし、技術的な課題も然ることながら、解決しなければならない複雑な問題を抱えている。その一端を以下に示す。

重要度ランクが示されると、設計者は、当該施設がどの重要度ランクに類別されるかを判断しなければならない。その際、重要度の定義に従い、機械的に分別されよう規定すべきなのか、あるいは設計者の自己裁量の範囲にすべきなのか。これは、設計者の裁量と免責という表裏一体の問題、さらには設計の簡素化などとも関連し、重要な問題を呈している。佐藤ら⁶⁾は設計規準を提示する側と設計実務者の作業範囲の枠組みを明確化した、安全性確保の方法を提示している。そこでは、設計者に与えられる自由度をある程度制限しつつ、構造物の重要度の選択において自己裁量を与えていている。この種の問題の着地点を見出すには、一般的にも受け入れられるような基本理念を前提とし、合理性よりむしろ道徳性を重視した幅広い議論が必要となろう。

3. 確率を使った耐震規範

3.1 裕度の扱い

設計地震動等、予測される地震動には、不確定性を含むことは避けられない。また、設計パラメータと実際の物性値との差、解析手法の精度、施工性の良否など、構造物の耐力にもばらつきがある。このため、構造物には、このばらつきを含んだ形で安全余裕を与えなければならない。現況の設計指針等では、工学的判断に基づいた安全率を裕度として設けているが、その判断論拠は明確ではない。そこで、裕度の扱いがより明確化されるよう、信頼性理論で示される構造物の損傷確率の概念を取り入れる必要がある。図-1は、地震動の大きさによる条件付の損傷確率を与える Fragility Curve

表-1 耐震性能の目標²⁾

耐震設計で考慮する入力地震動	目標とする耐震機能	
	標準的な橋	特に重要な橋
橋の供用期間中に発生する確率が高い地震動		健全性を損なわない
橋の供用期間中に発生する確率は低いが大きな強度を持つ地震動	タイプI 地震動 (プレート境界型の大規模地震)	致命的な被害を防止する(落橋しないように、主要構造部材の水平耐力が低下し始める状態の手前にある状態)
	タイプII 地震動 (内陸直下型地震)	限定された損傷に止める(橋としての機能回復を左記より速やかに行うため、さらに余裕をもった状態)

表-2 主要構造に対する要求性能マトリクス³⁾

荷重レベル	L1	L2	L3	L4	
再現期間	20年	100年	500年	1000年	
50年間の超過確率	92%	39%	9.5%	4.9%	
主要構造のグレード	A	無被害	無被害	継続使用可	補修後使用可
	B	無被害	継続使用可	補修後使用可	非倒壊人命保護
	C	継続使用可	補修後使用可	非倒壊人命保護	
	D	補修後使用可	非倒壊人命保護		

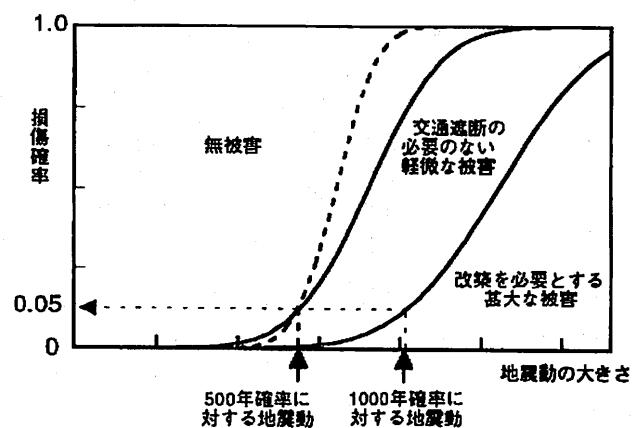


図-1 被害の程度による Fragility Curve

(以下F.C.と略記)と呼ばれる曲線の一例である。実線の一つは、交通遮断を要しない程度の軽微な被害が生ずる確率を評価するF.C.である。もう一つは、落橋や下部構の倒壊など、大規模な補修や改築を必要とするような甚大な被害の発生確率を評価する。損傷確率を使った規範は、図示のように、500年確率の地震動において、軽微な被害の発生確率は5%まで許容する、1000年確率の地震動に対しては、甚大な被害の発生確率を5%以内に抑える、などとなる。F.C.では、構造物の耐力は中央値(50%)で代表され、中央値からの隔

表-3 損傷確率による耐震規範

再現期間 重要度ランク	500年	1000年
A種	基大な被害の発生確率は5%まで許容する	
B種	軽微な被害の発生確率は5%まで許容する	基大な被害の発生確率は5%まで許容する
C種		軽微な被害の発生確率は5%まで許容する

たり（50%→5%）が裕度となる。換言すると、設計地震動に対し、95%の確率で安全を確保したことになる。これは、有識者も含め一般的にも分かりやすく、情報公開が叫ばれている昨今、有効な記述方法である。

一方、これら規定を満足するためには、耐力そのものを向上させることも一案だが、ばらつきを小さくすることも有効な手段となる。即ち、物性値や解析手法の精度、施工性の良否の検討などを構造物の耐震性の向上と同意に捉え、設計に反映させることができる。図-1の破線がそれに対応する。ばらつきを減らす工夫は、F.C. をより立たせることになり、結果として基準値である5%をクリアすることができる。これは、材料や工法あるいは解析手法など、より確実なものを選択する設計者の裁量が問われることになる。

新しい工法や材料の適用等、性能設計への移行は設計における自由度が増し、好ましい、との意見が多い。しかし、新工法や材料等は、経験不足という観点から、不確実性が大きいことを念頭に置かなければならぬ。このため、ばらつきを大きめにとることとなり、結果として設計耐力をより大きくとらなければ、基準をクリアしないことになる。安全余裕の本質的な議論は、ばらつきの程度をどこまで許容するかであり、その基本となるのが、実験やシミュレーションあるいは被害事例や経験などから評価されるばらつき情報である。新工法や材料の開発では、その耐震性や経済性も然ることながら、ばらつきの程度を量的に示すことも、重要な開発目標となる。

3.2 重要度と損失価値

施設の重要度を勘案した耐震規範を表-3に例示する。表では、重要度を3段階に分け、A種よりB種、B種よりC種がより重要な構造物になる。また、確率は一律である必要はなく、500年確率の地震動において、軽微な被害の発生確率は1%まで許容する、などと読み替えることもできる。即ち、重要度は、設計地震動、耐震性能、許容確率の合理的な組み合わせによって、示されることになる。澤田ら¹¹⁾は、重要度によって非超過確率を変化させることは合理的であり、ばらつきを考慮した設計の必要性を訴えている。

重要度の違いを勘案した規範の差異を評価するには、重要度を如何にして量的に示すかが必要となる。重要度は、被害を被った際の重大さであり、その損失価値を評価することで、量的な記述が可能となる。施設に何らかの被害が生じた場合の損失価値は、以下の4つに類別することができる。

- ・再調達価格
- ・機能低下に伴う損害
- ・波及被害に伴う損害

・人命

再調達価格は施設が被害を受けた場合の復旧費用に相当し、計画時に与えられた本来性能或いは施工法や構造形式によって異なる。更に環境や景観への配慮から付加的な価値を持たせる場合もある。いずれにせよ、被害の程度を明確に定義することで、再調達価格の評価は可能である。

機能低下に伴う損害は、対象施設が法人や個人のものであれば、営業損失や代替機能による付加費用等であり、公共施設或いはこれに準ずる施設では、社会的な経済損失として見る必要がある。機能低下による損失価値を評価する場合、第一にその施設の目的や性能を明確にすることが重要である。そして、施設が壊れた場合を想定し、復旧までに要する期間を推定する。これに機能低下による日単位あるいは月単位での損害額を乗じることで、損失金額として定量化ができる。ここで、日単位、月単位での損害額が期間により一様でないことに留意する必要がある。また、人や物の移動を目的とした施設では特に、機能を補完する代替機能を有する場合が多く、この場合の冗長性の問題についても十分検討を行うことが必要である。一方、地震のように同時且つ広域に発生する被害では、通常時の機能低下による損害だけでは納まらず、様々な影響を鳥瞰的に捉えることが重要である。

波及被害に伴う損害は、他の健全な施設への2次的な物的被害を意味する。評価においては、施設の倒壊あるいは基大な被害を被った場合に生ずる周辺への影響を物理的被害として想定することから始める。高架の道路や鉄道では、下部施設（道路や建築物）への影響や交通遮断、上水道では、水漏れによる浸水やこれによる交通遮断などが考えられる。出火爆発の可能性の高い施設では、周辺への延焼や爆風圧を考える必要がある。用水ダム等では、破壊による下流域への影響を見る必要がある。これらは、施設周辺の状況に左右されるもので、一般化は難しい。また、壊れ方や影響範囲、更には季節や時間など想定如何によつては、波及被害の様相も大きく変わってくる。精度や特定の値に固執するより、むしろ幅を持って評価する方が現実的であろう。また、住居地域か商業域か、あるいは工場地帯か、更に建物の密集度合い等により、波及被害のレベル分類を行い、損害を大雑把に見積もることもできよう。

人命は、施設が倒壊することによって生じる直接的なものと、機能低下や波及被害に伴う間接的な要因とに別けることができる。前者は人々の使用頻度、後者は周辺環境や当該施設の目的にそれぞれ関係する。人命は、貨幣価値換算が必ずしも容易ではなく、一元化は困難である。また、むりな定量化は社会的反感を招く恐れがあり好ましくない。しかし、人命の量的な差を損害の大小として認識することは、施設の重要性を見る上では不可避である。一方、機能低下に伴う損害は、人々の使用頻度に依存することは明らかで、人命の損失価値を暗に含めることも一案であろう。

一方、公益あるいはこれに準ずる施設では、重要度評価において、再調達価格を含めるべきか否か、議論の余地がある。ちなみに、アンケート調査⁵⁾によると、大半の回答者は、人命、社会的影響、周辺環境への影響を重要度の決定要因であると答えている。

3.3 損失期待値と重要度ランク

施設の脆弱性は、その施設の軽微あるいは甚大等被害の発生確率 P_f を評価することで量的な記述が可能となる。これに

その被害が生じた場合の損失価値 C_f を掛け合わせることで、損失の期待値（損失期待値 Expected Loss = $P_f \cdot C_f$ ）が求められる。これは、施設の重要度に脆弱性あるいは堅牢さを加味した合理的な指標である。例えば、図-1を参照しつつ、500年確率の地震動において、甚大な被害の発生確率が0.1%であったと仮定すると、同地震動における条件付の損失期待値は、次の様に計算される。

$$E_{500} = 0.049 \times C_a + 0.001 \times C_b$$

ここに、 C_a は軽微な被害による損失価値、 C_b は甚大な被害による同価値である。軽微な被害による損失価値は、その定義から再調達価格のみであり、甚大な被害による損失は、再調達価格に加え、機能低下に伴う損害、波及被害に伴う損害等から構成される。

一方、地震の発生頻度を勘案し、年間当たりの損失期待値を評価することもできる。その場合、地震ハザード曲線等から評価される地震動の年間当たりの発生確率を求め、これを乗することで、地震動の大きさを条件とした年間当たりの損失期待値が計算される。また、様々な大きさの地震動に対し損失期待値を求め、これに地震ハザード曲線を合積して得られる年間当たりのトータルの損失期待値も、有効な指標である。

現在、設計指針で規定されている構造物の脆弱性が一律であると仮定すると、損失期待値の違いは損失価値の差を持って現われることになる。損失期待値に対し、社会的な許容限界があるとすると、ある施設はこれを大きく上回り、またある施設下回り、一律とはならないことが容易に想像できる。これは施設の重要度を考慮していない設計基準の問題点を示唆している。大きく上回る施設については、 P_f を減らすこと、即ち、より堅牢に造ることが必要となり、重要度に応じた耐震規範の相対レベルが評価できる。しかし、あくまでも相対的な評価であって、基準点を見出すことはできない。基準点があるとすれば、それは社会的な合意に基づく許容限界であり、情報公開が呼ばれる時代ではあっても、この許容限界を社会に問い、合意を得ることは難しい。最終的には専門家の判断に委ねられことになろうが、損失期待値の適用によって、重要度ランク設定におけるモデルを示すことができ、重要度の本質的な議論を可能にすると共に、一般的な理解を得る上でも極めて効果的である。

4. まとめ

性能設計への移行と共に、安全余裕や重要度の扱いにおいて、より合理的でかつ明解な論拠が必要となろう。そこで、信頼性理論で示される構造物の損傷確率を取り入れた耐震規範を示すと共に、確率や損失期待値を使った安全余裕ならびに重要度の扱いについて、その可能性を論じた。

構造物の安全余裕は、設計耐力のばらつきをどこまで許容するかであり、確率による規範は、分かりやすく有効な記述

方法である。また、確率を使った耐震規範導入に伴い、設計実務者の意識や思考について、様々な変革が求められる。主なものとして、

- 1) 規範を満足するためには、耐力そのものを向上させることも一案だが、ばらつきを小さくすることも有効な手段となる。
- 2) 材料や工法あるいは解析手法など、より確実なものを選択する設計者の裁量が問われる。
- 3) 新工法や材料の開発では、その耐震性や経済性も然ることながら、ばらつきの程度を量的に示すこと、重要な開発目標となる。

一方、施設の重要度は、その施設が何らかの被害を被った際の重大さであり、損失価値を評価することで量的な記述が可能となる。そして、重要度ランクは、施設の堅牢さに損失価値を乗じた損失期待値の大小を比較することで、相対的な評価が可能となる。

安全余裕や重要度は、損傷確率や損失価値など、量的な指標をもってはじめて現実的な議論ができる。しかし、これら情報の整備、評価は様々な困難を伴う。特に確率情報は、統計的裏付けがあつてはじめて現実的な数値として認知されるため、統計情報を如何に収集するかが重要な課題となる。また、損失価値については、建設技術者の範疇を越えた、社会経済学の分野に関わってくるもので、様々な分野の専門家を巻き込んだ形で、広義の議論あるいは研究が必要となろう。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説、V 耐震設計編、1996, p. 224.
- 2) 川島一彦：土木構造物の耐震性と設計地盤力、強震動予測による地震災害の軽減をめざして、日本地震学会・強震動委員会、1997, pp. 81-84.
- 3) 建設省建築研究所・鋼材倶楽部：新設計体系研究会報告、1995, p.13 .
- 4) 高橋徹、横内隆典：階層分析法を用いた構造安全性に関する意識調査、日本建築学会学術講演梗概集、1994, pp.98-100.
- 5) 土木学会構造工学委員会建設事業における確率・統計的意志決定研究小委員会、平成7年度土木学会全国大会研究討論会資料：構造物の破壊時コストの明確化と設計問題における意志決定、1995.
- 6) 佐藤尚次・藤田宗久・白木渡・香月智・中村孝明：設計規準における安全性確保の考え方、構造工学論文集、Vol. 43A, 1997,
- 7) 澤田純男、香川敬生：強震動予測のばらつきと土木構造の耐震設計、日本地震学会・強震動委員会、1997, pp. 113-114.