

第1編 鋼構造物の性能照査型耐震設計法（第1分科会）

1. はじめに

最近、性能照査型設計が建築分野および土木分野で注目を集めている。建築分野では平成7～9年度にかけて、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」が実施され、性能照査型設計への基礎と課題がまとめられた。さらに平成10年には建築基準法の改正法が成立し、建築基準の性能規定化への手続きが始められた。土木分野においても将来の本格的な性能照査型設計法に向けて、道路橋示方書の改訂が作業中であり、第1段階の改訂版が平成12年度中には発行されることになっている。

性能照査型設計法が要望されるに至った背景としては、行政改革、規制緩和および市場開放などの要請が第一に挙げられるが、阪神大震災において得られた構造物の安全性・機能性に関する新しい教訓も大きな要因となっていると考えられる。そこで、耐震に関する性能照査型設計法を考えることは重要な課題であり、土木学会鋼構造委員会・鋼構造物の耐震検討小委員会（委員長：宇佐美勉）・第1分科会（主査：伊藤義人）では、性能照査型設計法に向けて耐震設計法を高度化するための課題について検討した。

本報告の構成は以下の通りである。第1章の序論に続いて、第2章では耐震設計で要求される性能を検討し、性能照査型耐震設計法の基本的枠組みと問題点についてまとめている。第3章では要求性能を定める上で問題となる地震動の想定と構造物の重要度について述べている。第4章では限界状態の定義を明確にし照査すべき事項を峻別するために、橋梁の破壊シナリオについて述べている。第5章では限界状態の内、阪神淡路大地震以降、特に重視されるようになった地震後の使用性について述べている。第6章では国際規格への対応として、限界状態設計法のフォーマットと安全係数設定の考え方について述べている。最後に、第7章では限界状態設計法に基づいた性能照査型耐震設計法のまとめと今後の課題について述べている。

2. 性能照査型耐震設計法の基本的枠組み

性能照査型耐震設計規準においては、設計地震動および構造物の重要度に応じて要求性能が示され、その性能を具体的に表す指標によって照査される。ここでは、新技術報告書、道路橋示方書、鉄道構造物等設計標準、およびコンクリート標準示方書、アメリカのCaltrans（カルフォルニア州交通局）における設計法の考え方を相互比較している。

これらの規準の相互比較を参考にして、要求耐震性能の設定は図1のようにマトリックスで表した。基本性能としては、構造安全性と地震後の使用性を考え、損傷度は5段階に区分している。マトリックスでは構造物の3種類の重要度（最重要、重要、普通）に応じて、3レベルの想定地震動に対し許容される損傷度を与えている。この要求性能の設定から始まり、性能の照査、結果の公開に至る性能照査

耐震性能 レベル		構造安全性				
		安全				破壊
		地震後の使用性				
地震動		無損傷	小損傷	中損傷	大損傷	崩壊
レベル1	タイプ I	○	△	□	□	□
	タイプ II	○	△	□	□	□
レベル2	タイプ I	○	△	□	□	□
	タイプ II	○	△	□	□	□

○—○ 最重要構造物 △—△ 重要構造物 □—□ 普通構造物

図1 要求耐震性能マトリックス

型耐震設計法の基本フローを図2に示す。ここで問題となることは次の2点で、これらを明確にしておかないと性能照査型設計法はなかなか普及しないと思われる。①設計時の性能照査をどのような形で行うか？②設計された構造物の性能の検証および認証は誰が、どこで、どのような形で行うか？①に関しては、応答値(S)の解析用ツールの整備、限界値(R)の求め方(実験または解析)の明確化および安全係数の求め方について検討する必要がある。②に関しては、照査と検証の方法論の相違、検証のための実験方法および解析法、第三者による評価・認証機関のあるべき姿などについて検討しなければならない。

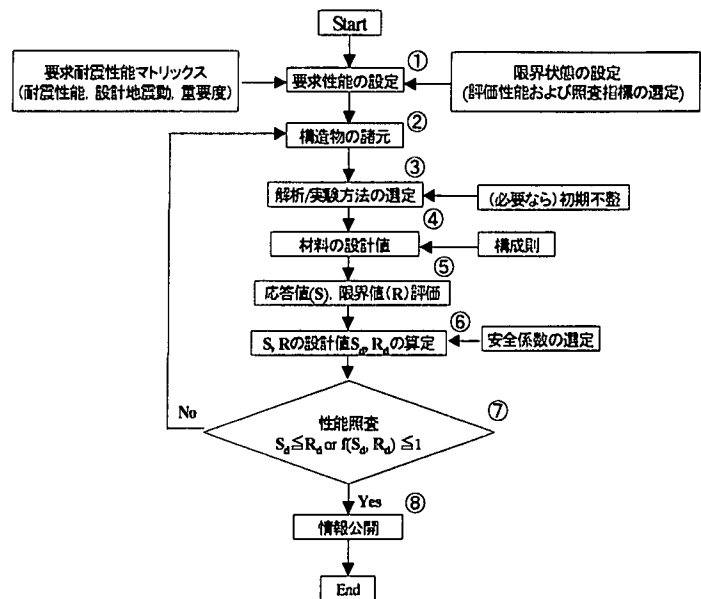


図2 性能照査型耐震設計法の基本フロー

3. 構造物の重要度と想定地震の考え方

前章で述べたように、構造物の重要度と想定地震は要求耐震性能を定める際に重要な要因となる。そこで、重要度と想定地震を設定するための考え方と問題点について述べている。

まず、想定地震動の基本的な考え方は、2章で相互比較した各種基準・指針のいずれにおいても供用(耐用)期間内に発生する確率の高い地震動(L1)と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(L2)という2つのレベルに分けることで一致している。しかし、現状では構造物の耐用期間および想定地震発生確率の定義については曖昧であり、信頼性理論に基づいた設計法が適用しづらい。現状では特にレベル2地震動に関する統計量が十分ではないため、地震発生確率を定められていないが、工学的判断を取り入れて戦略的に設定することが必要になる。

次に、構造物の重要度について考えている。社会資本を最も効率的に運用するためには重要度を考えて整備することが必要であり、重要度を表す指標としてコストを用いるのは自然な概念である。この分野の研究手法としてリスクアナリシスや費用便益手法がある。リスクは損失コストの期待値であり、リスクが大きい構造物ほど重要と考える。費用便益手法は事業の効率性を分析する手法で、一部の社会基盤整備に対して取り入れられ始めている。ただし、現在のところ地震のような災害損失を費用に含めることはないが、耐用期間中の災害損失リスクも含めるのが理想である。これらの手法には公平性の配慮など様々な問題があることも事実であり、すぐに取り入れるための国民的コンセンサスは得られていないが、全体のフレームワークを作り上げた上で議論や情報収集を重ね、改善を繰り返すのがよいと思われる。

4. 高架橋の地震時限界状態

性能照査型設計法では「性能」という本質的ではあるが、概念的なことが設計の基本とされるので、ややもすると曖昧になりやすいと思われる。したがって、性能に対して想定される限界状態を明確にし、照査すべき事項を峻別しておくことが重要である。そこで、4章では構造物の想定被害とそのシナリオから考慮すべき限界状態について考えている。ただし、構造物全般についてシナリオを想定することは容易でないため、橋梁に限定している。

まず、落橋または過度の変形により機能喪失が最終的な高架橋の破壊と考えた。そして過去の地震における損傷状況から、高架橋を構成する基礎、定着部、橋脚、支承、落橋防止装置、上部構造（桁）が損傷し破壊に至るシナリオを想定した。

耐震設計上、照査すべき限界状態は構造安全性に対する終局限界状態と地震後の使用性に対する損傷限界状態とした。想定シナリオにおいて限界状態に至る過程を詳しく検討するために、上に挙げた2つの限界状態の内容を以下のように分類した。

終局限界状態

部材強度限界状態……部材が降伏、座屈、破壊などで破壊する状態で、耐荷力を対象とする。

逐次崩壊限界状態……1つの構造物の中で複数の要素部材の破壊が逐次的に進行し、全体崩壊に至る状態。不静定構造物の冗長性を考慮する。

システム崩壊限界状態…システムを構成する複数の要素構造物が崩壊して、システム全体の崩壊に至る状態。システム全体としての冗長性を考慮する

損傷限界状態

機能保持限界状態……地震直後における使用性の程度に関する限界状態。

機能復旧限界状態……地震後の復旧のしやすさに関する限界状態。

これらの限界状態の分類に基づいて、高架橋の構成する構造物要素およびシステムの想定シナリオから考慮すべき限界状態について述べている。

5. 機能を重視した耐震設計法

阪神淡路大地震の教訓として構造物が破壊しないばかりでなく、本来の機能を保持することの重要性が認識された。そこで、4章では高架橋で想定される限界状態全般について考察したのに対し、5章では特に地震後の使用性に着目して要求耐震性能を考えている。

まず、高架橋システムの構成とそれらの機能的相関関係を調べ、高架橋が機能を維持するための条件を考察している。次に、機能的損傷に着目して従来の耐震設計基準、指針の考え方を比較し、機能重視の必要性について述べている。ここでは4章で示された限界状態の定義に従い、機能的損傷を地震後の使用性と復旧性に分けて考えることとしている。

機能的な損傷を設計で照査するためには、それを構造的な損傷と関連付けておく必要があると考えた。そこで、過去の地震における構造的被害と機能的損傷の関係を調べ、機能保持から見た望ましい損傷箇所、望ましくない損傷モードを考察した。

地震後の機能保持と復旧性に対して要求される耐震性能のグレードは4章で示されて

いる。ここでは、その耐震性能を実現するための設計クライテリア案を述べている。復旧性に関しては、耐震性能とクライテリアの関連において復旧工法と工期を想定している。

地震後の使用性を制御する耐震設計法の流れは、耐震要求性能マトリックス→損傷度→機能損傷設計クライテリアのようになる。また、地震後の使用性は複数部品の損傷、広範囲の被災などによっても違ってくるので、被災シナリオを想定する必要がある。

6. 耐震性能照査法

世界貿易機関 WTO の TBT 協定では、国内規格の基礎としていわゆる ISO 規格を採用することが義務づけている。したがって、設計規準策定に際しては ISO 規格との整合性を考慮する必要がある。構造物の設計に関しては ISO2394 の要求事項を踏まえなければならない。本章では ISO2394 の要求事項を考慮して鋼構造物の耐震設計における安全性照査方法の試案を提案すると共に、今後の課題、将来展望についても概説している。

まず、安全性照査式のフォーマットについて、我が国の「鋼構造物設計指針」、「鋼・コンクリート構造の限界状態設計法に関する共通の原則」と「ISO2394」の安全性照査式（部分安全係数法）のフォーマットを比較した。これらには本質的な違いはなく、対応させることは容易である。

次に ISO2394 に対応した安全性確保の問題について述べている。ISO2394 の要求事項の中で安全性確保のための重要点は、各限界状態の目標安全性水準を設定することと、確率論に基づき部分安全係数を設定することである。そこで目標安全性水準と部分安全係数の設定について述べている。ISO2394 の Annex E.4 には、目標安全性水準の設定方法として次の 3 種類の方法が紹介されている。①人命の安全性に対する要求値に基づいて設定する方法、②ライフタイムコストを最小化するように設定する方法、③現行設計規準へのキャリブレーションによって設定する方法、である。現実的には③の方法が使われることが多いが、目標安全性水準の算定根拠を明らかにしておくことが今後のために重要である。次に部分安全係数の設定については、ISO2394 に従い、基本変数の感度に応じて設定する方法、キャリブレーションによる方法を示している。いずれの方法も基本変数の統計量が必要であり、基本変数の確率分布、および統計量のデータベース、荷重指針の制定等が今後の課題である。

最後に安全照査方法の展望と課題について述べている。提案されている部分安全係数法では、安全性照査の精度を高めようとする、構造種別を細分化してそれぞれの構造種別毎に部分安全係数のメニューを準備する必要がある、かえって設計者が行う部分安全係数の設定作業は煩雑になると思われる。それならば、確率論に基づく方法（ β 法）で信頼性解析を設計者に任せた方が、精度がよく簡潔な設計基準になる。したがって、将来的には確率論に基づく方法（ β 法）に移行するのがよく、部分安全係数法はそのための過渡的な状況と考えるべきである。さらに、考えておかなければならない点は、設計規準（作成者）と設計者との役割分担である。つまり、目標安全性水準ならびに部分安全係数は前提条件に依存する値であるので、それらの条件を統一させるような機能が設計規準に必要であり、性能照査型設計だからといって全てが設計者の裁量に任されることにはならない。設計規準においては必ず安全性確保の方法を明確にし、統一しておくことが重要である。

7. 性能照査型耐震設計法のまとめと今後の課題

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いるが、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。そこで、図2で示した基本フローに従い、現在考えられる性能照査型耐震設計法の全体像を概略的に示し今後の課題について述べている。

現在、実現性が比較的高いと思われるレベルの性能照査型耐震設計法の内容としては以下のものを試案として想定している。

想定地震動：レベル1，2の2種類の地震動

重要度の設定：最重要，重要，普通の3区分

限界状態の想定：構造安全性に対して終局限界，地震後の使用性に対して損傷限界

照査指標の設定：各限界状態に対して，評価すべき性能とその照査指標を体系化

要求性能の設定：要求性能マトリックスにより表現

性能の算定：解析ツールの整備と精度検証用ベンチマーク，標準実験手法

性能照査：部分安全係数法 $\gamma_i \frac{\gamma_a \cdot S(F_d)}{R(f_d)/\gamma_b} \leq 1$

ここに，R：抵抗関数，S：荷重効果関数， f_d ：材料強度の設計用値， F_d ：荷重の設計用値， 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。

γ_b については設計者自身が実験等のデータによって決められるように，係数設定のためのガイドラインを示す。

情報公開：重要度と安全性水準を明確にし，これらのデータを公開する機能を持つ。

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みしていると思われるが，これらの課題の中で代表的なものを列挙すると以下のようになる。

- 1) 信頼性設計法を取り入れるために，地震動の発生確率の定量化。
- 2) 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など）。
- 3) 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。
- 4) 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。
- 5) 基準で定める安全性水準の設定方法の具体化とその検討作業。
- 6) 性能検証用の高度な解析手法の整備あるいは開発。
- 7) 第三者による評価・認証機関のあるべき姿を示すこと。
- 8) 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，目標信頼性指標と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，照査と認証の方法論の相違を明確にすること。
- 9) 設計者自らが実験や高度な解析の結果を用い，部分安全係数を設定するための方法とそのガイドラインを作成すること。
- 10) 基本変数の統計量の収集や荷重指針の制定。