

設計地震動と限界状態の組合せの設定方法を 規定した新たな性能規定型設計法の提案

福井 次郎¹

¹ 正会員 サンコーコンサルタント株式会社 技術本部 (〒136-8522 東京都江東区亀戸 1-8-9)
E-mail: j.fukui@suncoh.co.jp

現在、土木構造物の耐震設計は構造物の重要度に応じ、予め設定された設計地震動と限界状態の組合せで照査を行っているが、組合せの設定根拠は明らかでない。本論文は、限界状態および性能の定義や両者の関係等について検討し、基本的な限界状態が使用限界状態、修復限界状態および終局限界状態であること、使用限界状態に対する照査は全ての構造物が必要であるが、他の限界状態に対する照査の要否は構造物の利用形態や設計方針等により異なることを明らかにした。また、設計地震動が限界状態に対して従属的に設定されることを明らかにし、定量的に評価される構造物の重要度に応じて費用便益分析およびリスクマネジメントの考え方に基づく具体的な設定方法を提案した。最後に、費用便益分析の困難さ等に関する実務上の課題とその対応を付記した。

Key Words: Performance based Design, Seismic Design, Seismic Load, Limit State, Importance of Structure, Cost-Benefit Analysis

1. はじめに

平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震(東日本大震災)で、東京電力の福島第一原子力発電所(以下、福島原発)が大津波によって全電力を喪失して制御不能となり、メルトダウンを引き起こした事故について、東京電力が「想定外」であったと説明、あるいは釈明したことが大きな社会的問題となり、「想定外」をどのように考え、どのように対処するのかなどについて、さまざまな意見が出されている。これらの意見の中で、「今後は想定外のことも想定すべきだ。」という意見が多く出されている。この意見は、一見もっともらしく聞こえる。しかし、その前に地震によって引き起こされる現象や被害の内容を合理的に想定する共通の手法を確立しないと、人によって想定内容が異なり、どこまでが想定内で、どこからが想定外なのかははっきりせず、想定外を想定することができない。また、想定の方やその根拠を明確にしないと、その想定が妥当かどうかを判断することができない。

福島原発の事故は複雑、大規模であったため、事故のどの局面、現象に着目するかによって「想定外」の具体的な内容は様々考えられるが、事故の直接の原因となった津波が防潮堤を越えて施設内に侵入した

現象を耐震設計の観点から見ると、次のように考えることができる。

津波の侵入による全電源喪失という重大事故を防止するためには、もっと波高の高い津波や発生頻度の低い巨大地震を想定すべきであった。逆に、今回の波高の津波に対して確保すべき性能としては、もっと軽度の損傷に対する性能を想定すべきであった。つまり、耐震設計の照査に用いる設計荷重(津波の波高)と性能(原発の損傷程度)の組合せが適切でなかったことが想定外であったといえる。

それでは、原子力発電所以外の一般的な構造物の耐震設計では設計荷重と性能の組合せはどのように設定されているのかといえば、両者の組合せは予め決められているが、その設定の根拠についての説明はない。設計荷重と性能の組合せの設定方法に着目した設計法としては、性能設計の一種である性能規定型設計法があり、その考えを示したものに性能マトリクスがある。しかし、性能マトリクスは設計荷重と性能の組合せの概念を示したものであり、具体的な設定方法は確立されていないのが現状である。

本論文は、構造物の限界状態と性能の関係や構造物の重要度の定量的評価を明確にした上で、費用便益分析およびリスクマネジメントの考え方に基づく設計地震動と限界状態の組合せの具体的な設定方法

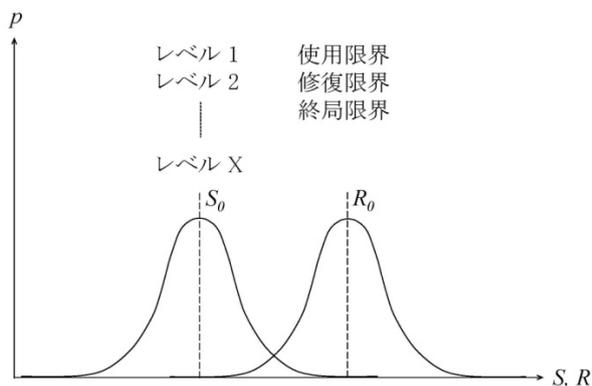


図-1 設計で考える荷重と抵抗の関係

Earthquake Design Level	Earthquake Performance Level			
	Fully Operational	Operational	Life Safe	Near Collapse
Frequent (43 years)	●	×	×	×
Occasional (72 years)	■	●	×	×
Rare (475 years)	▲	■	●	×
Very Rare (970 years)		▲	■	●

× : Unacceptable Performance (for New Construction)
 ● : Basic Objective
 ■ : Essential / Hazardous Objective
 ▲ : Safety Critical Objective

図-2 性能マトリクス (Performance Matrix)

を規定した新たな性能規定型設計法を提案するとともに、設計実務上の課題とその対応を提案するものである。

なお、設計地震動の評価は、確率論的地震ハザード評価とシナリオ型地震動評価の2つの方法があるが、本論文では確率論的地震ハザード評価に基づいて、検討を進める。

2. 設計地震動と限界状態の組合せの現状と課題

図-1は、設計法の教科書には必ずといっていいほど載っている設計で考える荷重 S と抵抗 R の関係を示したものである。この図は、荷重、抵抗にそれぞれ変動性があることを考慮し、抵抗の特性値(代表値) R_0 は、荷重の特性値(代表値) S_0 に対して所要の余裕度を持たせて設定する必要があることを意味している。現行の設計で用いられている許容応力度設計法や部分安全係数設計法、荷重抵抗係数設計法は、荷重と抵抗の変動性をどのように評価するかや、これ

らの変動性を照査フォーマットにおいてどのように表記するかに着目した設計体系である。しかし、図中に示すように、耐震設計では照査に用いる荷重および抵抗の特性値については、レベルの異なるものがあるが、これらの設計法では、それぞれの定義、レベルの数、各レベルの大きさや、どのレベルの荷重と抵抗を組合せて設計するののかについては考慮されていない。

荷重と抵抗のうち、抵抗の限界値である限界状態に着目した設計法に限界状態設計法があり、例えば、耐震設計ガイドライン(案)²⁾では、「構造物の限界状態を定義し、設計耐用期間中に作用する荷重などの外的作用に対して、構造物が所要の安全性を有して限界状態に至らないことを照査する設計法」と定義されている。また、包括設計コード³⁾および、性能設計における土木構造物に対する作用の指針⁴⁾(以下、作用指針)では、「照査すべき限界状態を明確にした設計法。照査フォーマットとして信頼性理論のレベルIにあたる部分安全係数設計法を採用することが殆どであるため、部分安全係数法が限界状態設計法と同義で使われることもある」と定義されている。このように、限界状態設計法では、限界状態の定義、設定には着目しているが、荷重については着目していない。また、どのレベルの荷重と限界状態を組合せて照査するかについても着目していない。

一方、「限界状態」とほぼ同義語として用いられている「性能」をベースとした「性能設計」には、様々な考え方や概念があるが、「性能規定」と「性能照査」の2つ⁵⁾、あるいはそれに「要求性能」を加えた3つ⁶⁾が基本的な概念と考えられる。その中で、「性能規定」は設計で照査する設計荷重と性能の組合せを規定することに着目した設計概念で、その考えを示したものに、SEAOCがVision2000⁷⁾で提案した性能マトリクス(Performance Matrix)がある(図-2参照)。

性能マトリクスが提案されたのは、ロマ・プリータ地震(1989)、ノースリッジ地震(1994)によって多くの建築物に被害が生じた際に、建築物の所有者が意図していた耐震性能と設計者が目指していた耐震性能が大きく異なり、両者間にコミュニケーションギャップがあったことが指摘され、構造物がどのような性能を満たすように設計しているのかを一般人にも理解できるよう明示、説明する必要があるとの要請が高まったためとされている⁸⁾。このことは、福島原発の事故で「想定外」が問題となっている状況と全く同じである。

性能マトリクスは、それぞれ4段階のレベルの設計地震動と性能の組合せをマトリクス表示したものであるが、全てのマス(組合せ)で照査するのではな

く、構造物の重要度に応じて●、■、▲印を付したマスで照査することを表している。このマトリクスは、設計地震動と性能の組合せの概念を示したものであり、そこから種々の内容が読み取れるが、その中で重要な点は、次の3点である。

- ①設計地震動のレベルが大きくなると、照査する性能のレベルも Fully Operational から Operational, Life Safe, Near Collapse へと損傷度が大きな性能になる。逆に、性能のレベルが大きくなると、その照査に用いる設計地震動のレベルが大きくなる。
- ②構造物の重要度が大きくなると、ある性能の照査に用いる設計地震動のレベルが大きくなる。逆に、ある設計地震動で照査する性能が損傷度の小さなレベルの性能になる。
- ③性能マトリクスは、構造物が絶対壊れない、あるいは絶対安全であることを想定しているのではない。

①、②については、一般常識といえるもので、性能マトリクスはこの定性的な概念を視覚的な図によって一般人にも理解できるようにしたものである。ここで、設計地震動と性能のレベルが4段階であることや、各レベルの設計地震動の再現期間や性能の名称等については、特に根拠があって設定したものではないと考えられる。例えば、設計地震動重と性能のレベルが3段階、Rareの設計地震動の再現期間が300年となっても、このマトリクスの内容を理解するのに支障はないであろう。SEAOが提案した性能マトリクスの設計地震動と性能のレベルが4段階であるのは、構造物の重要度を3種類に分け、照査するマスが重複しないようにマトリクスを作成しようとした結果、4×4のマトリクスになり、各設計荷重の再現期間の長さや性能の名称は便宜的に付けたのではないかと考えられる。

しかし、性能マトリクスの考え方を具体的な設計に導入するためには、マトリクスがなぜ4×4なのか、各レベルの設計地震動の再現期間や性能の大きさはどのように決定するのか、照査に用いる設計荷重と性能の組合せはどのように決定するのか等について、定量的、客観的な裏付け、説明が必要である。

一方、わが国においても、複数レベルの設計地震動、性能を用いた耐震設計法、いわゆる多段階設計が行われている。多段階設計が最初に提案されたのは、新耐震設計法(案)⁹⁾で、建築構造物の規定において「建築物の耐震安全性の目標を人命の安全、機能の保持、財産の保護(建築物を含む)に分け比較

的に頻度の多い中小地震に対して、人命の安全、機能の保持、財産の保護をはかり、きわめて稀に起こる大地震に対しては、人命の安全を重点に考える。」と2段階の設計地震動と性能のレベルが定められた。

土木構造物では、昭和55年版の道路橋示方書耐震設計編¹⁰⁾(以下、道示耐震編)において、震度法、修正震度法に加え、「コンクリート構造物は、鋼構造物に比べて一般に破壊はぜい性的に起こりやすいことから、鉄筋コンクリート橋脚または橋台が地震時においても[中略]適度のじん性(変形性能)を付与するように設計することが望ましい。」と規定され、2段階の設計地震動と性能のレベルが定められた。道示耐震編は、その後、被害をもたらしたいくつかの地震の教訓等も取り入れて何度か改訂が行われ、平成8年版¹¹⁾において2段階の設計地震動のレベルはそれぞれ、レベル1地震動、レベル2地震動と呼ばれるようになり、他の基準等においても同様の名称が用いられている。

2段階設計については他の関係機関でも各レベルの設計地震動の大きさや照査すべき性能等の検討が行われ、報告書や基準、提言等^{12)~15)}としてまとめられている。しかし、いずれも設計地震動のレベルは2段階という前提で検討が行われており、なぜ1段階や3段階以上でなく2段階なのかという基本的な事項に関する検討は行われていない。また、2段階の設計地震動の大きさは、例えば、作用指針では、「使用性照査用地震動は、設計供用期間内に発生する可能性が高い地震動」、「安全性照査用地震動は、当該地点で考えられる最大級の強さを持つ地震動」と定義されており、他の基準等でも表現方法に多少の差異はあるものの、ほぼ同じ内容の定義がなされている。これは、最初に提案された新耐震設計法(案)の定義をそのまま踏襲しているものであり、その設定の根拠や妥当性に関する検討、具体的な設計地震動の大きさの設定法に関する検討は行われていない。

性能については、新耐震設計法(案)や昭和55年版道示耐震編では2段階の性能が設定されていたが、平成8年版道示耐震編で耐震性能1~3、また、土木・建築にかかる設計の基本¹²⁾で安全性、使用性、修復性という3段階の性能が規定され、照査すべき性能のレベルが増加した。しかし、性能のレベルが2段階から3段階に増加した理由の説明はない。また、性能のレベル数が設計地震動のレベル数より1つ多くなったため、全てのレベルの性能を異なるレベルの設計地震動で照査することができなくなった。例えば、道示耐震編では橋の重要度に応じてA

種の橋とB種の橋に区分し、レベル1, 2地震動に対してA種の橋では耐震性能1, 3を、B種の橋では耐震性能1, 2を確保されていることを照査するように規定しているが、A種の橋の耐震性能2, B種の橋の耐震性能3に対する照査方法は規定されておらず、これらの性能がどの大きさの地震動に対して確保されるのか不明である。また、設計地震動のレベルと性能のレベルの組合せがどのような手順で設定されるのかが明確でない。

耐震設計に用いる設計地震動のレベルと性能のレベルの組合せは、両方の要因が互いに独立的に設定されるのではなく、まず、設計地震動か性能のうち、どちらかの要因を設定した後、重要度等に応じてもう一方の要因を設定する。具体的には、以下の2つの手順が考えられる。

- i) 設計に必要な設計地震動のレベル数および各レベルの大きさを地震の特性に基づいて設定する。次に、設定した各レベルの設計地震動に対する性能の組合せを、地震の特性に関する条件および構造物の重要度に応じて決定する。
- ii) 設計に必要な性能のレベル数および各レベルの大きさを構造物の特性に基づいて設定する。次に、設定した各レベルの性能に対する設計地震動の組合せを、構造物の特性に関する条件および構造物の重要度に応じて決定する。

また、後から設定する要因は、a) 最初に設定する要因とは関係なく独立していて、予めレベル数や各レベルの大きさを設定しておき、それらの中から最初に設定する要因との組合せを設定する方法と、b) 最初に設定する要因に従属していて、最初に設定する要因を設定した後に算出する方法が考えられる。a) は設計地震動のレベルと性能のレベルを個別に設定するため、両レベルの数が同じになるとは限らない。一方、b) は最初に設定した要因に対して他方が従属的に決定されるため、レベル数は同じである。

したがって、i), ii) と a), b) の組合せによって i-a), i-b), ii-a), ii-b) の4種類の設定方法が考えられる。

現行の設計基準類ではどの手順を採用しているかをみると、道示耐震編では「橋の耐震設計は、設計地震動のレベルと橋の重要度に応じて、必要とされる耐震性能を確保することを目的として行う。」と規定しており、前述のように設計地震動のレベル数と性能のレベル数が異なるので i-a) の手順である。土木構造物の耐震設計法に関する第3次提言¹³⁾ (以下、第3次提言) では「レベル1地震動に対して、基本的

にはいずれの新設構造物においても、「無被害レベル」の耐震性能を要請する.」, 「レベル2地震動に対する新設構造物の耐震性能は、その施設の重要度に応じて決定する.」と説明しており、設計地震動のレベル数と性能のレベル数が異なるので、道示と同じ i-a) である。また、土木構造物の耐震性能設計における新しいレベル1の考え方(案)¹⁵⁾も、レベル1地震動で照査すべき性能は何かという観点で検討を行っており、i) の手順である。

一方、新耐震設計法(案)では、具体的な説明はないが、前述の説明文からすると、上記の手順とは逆に、まず耐震安全性の目標を定め、それに応じた設計地震動を設定する手順となっており、ii) の手順である。また、道示耐震編も平成8年度版までは、重要度別補正係数を用いて設計地震動を補正する手法を用いており、ii) の手順である。土木・建築にかかる設計の基本では「耐震設計では、設定した耐震性能を明示し、それに対する地震動レベルを設定する.」と道示とは逆の設定手順を示しており、設計地震動のレベル数と性能のレベル数が異なるので、ii-a) の手順である。

さらに、耐震設計ガイドライン(案)では「構造物の耐震性能は、その施設の重要度及び想定する地震動レベル等を総合的に考慮して設定する.」という説明と「当該構造物に要求される性能の類別に応じた強さの設計入力地震動を設定する.」という説明があり、i) と ii) の手順が混在している。

このように、耐震設計に用いる設計地震動と性能の組合せの設定方法は基準によって異なり、どの手順が妥当かは明らかでない。

③については、SEAOCが提案する性能マトリクスでは、例えば通常の構造物では、再現期間が970年の地震に対して、Near Collapseの性能を確保することを規定している。このことは、荷重および抵抗の不確実性を考慮した安全率を無視して考えると、再現期間が970年を超える地震に対して、Near Collapseの性能を確保しない、すなわち構造物は壊れることを意味している。そして、荷重および抵抗の不確実性の推定精度や、設計計算精度が向上すればするほど、確実に壊れることを意味している。したがって、性能マトリクスは、構造物が絶対に壊れないことを想定しているのではなく、確率は小さいが必ず壊れることを想定しているといえる。問題は、その確率をどのように設定するかということである。

東日本大震災で「想定外」が問題となって多く出された意見に、前述の「今後は想定外のことも想定

すべきだ。」と並んで、「今後は、最大級の地震に対して安全性を確保すべきだ。」という意見がある。しかし、「最大級」は「最大」ではなく、これを越える大きさの地震が発生する可能性がある。そうすると、最大級地震に対して設計した構造物は壊れる可能性がある。このことを正しく周知し、理解させないと、最大級地震に対して設計した構造物は絶対に壊れないといった誤った安全神話が広まる可能性がある。また、設計は高い安全性を目指すのは当然であるが、安全性確保によって得られる便益と安全性確保に必要な費用とのバランスを考えて設計地震動と限界状態の組合せを設定する必要がある、やみくもに安全性だけを高くするのは、合理的ではない。

3. 性能と限界状態の定義および両者の関係

前章で述べた設計地震動と限界状態の組合せに関する課題を解決し、具体的な設定方法を提案するため、本論文では設計地震動や性能、限界状態の定義にまでさかのぼって検討を行うこととするが、その前に、ほぼ同義語として用いられている、と説明した「性能」と「限界状態」の定義および関係について明確にしておきたい。

代表的な設計基準類における性能と限界状態の定義およびそれぞれの内容、関係に関する説明文を以下に示す〔括弧内は、条文番号〕。

○耐震設計ガイドライン（案）²⁾

- ・耐震設計においては考慮する地震動と構造物の重要度に応じて必要とする耐震性能を定め、それを確保することを基本とする。〔1.6.1 (1)〕
- ・耐震性能は、構造物の応答値が要求される耐震性能に応じた限界状態を超えないことを照査するものとする。〔1.6.1 (5)〕

○包括設計コード（案）³⁾

- ・要求性能：構造物がその目的を達するために保有が必要な性能を一般的な言葉で表現したものである。〔1.2 (2)〕
- ・性能規定：性能照査を具体的に行えるように、要求性能を具体的に記述したものであり、構造物の限界状態、作用・環境の影響の程度および時間の組合せによって定義される。〔1.2 (2)〕
- ・限界状態：性能規定に対応して、構造物の意図した状態と意図からはずれた状態を区別する、ある状態〔1.2 (3)〕

○道示耐震編¹⁾

- ・耐震性能：地震の影響を受けた橋の性能〔1.2〕
- ・限界状態：耐震性能を満たし得る橋全体系及び各部材の限界の状態〔1.2〕
- ・橋の耐震設計は、設計地震動レベルと橋の重要度に応じて、必要とされる耐震性能を確保することを原則とする。〔2.1〕
- ・耐震設計の照査にあたっては、5.2 から 5.4 までに規定する橋の限界状態に基づき、各部材の限界状態を適切に設定しなければならない。〔5.1〕

○土木・建築にかかる設計の基本¹²⁾

- ・基本的要求性能：構造設計において、対象構造物が具備すべきものとして検証を実施する基本的な能力〔付属資料〕
- ・限界状態：構造物にとってその状態を超えると性能の要求を満足しない状態となる境界の状態〔付属資料〕
- ・設計においては、設計対象とする構造物の設計供用期間を定め、設定した期間において以下の(1)～(3)の基本的要求性能((1)安全性、(2)使用性、(3)修復性)を確保することを基本とする。〔1.2〕
- ・要求性能を満たすことの検証方法として信頼性設計の考え方を基礎とする。〔1.1〕
- ・検証の対象とする限界状態としては、終局限界状態、使用限界状態、および修復限界状態とする。〔2.1〕

以上のように、各基準類における性能、限界状態に関する定義、説明は抽象的で漠然としており、明確ではない。特に、両者の関係の説明は曖昧で、「耐震性能を確保することを設計の基本（原則）とする。」という説明と、「限界状態を超えないことを照査する。」という説明の関係が不明確である。

構造物は、例えば道路橋であれば、通行者が安全かつ快適に通行でき、所要の便益を得ることを目的に設計、建設するのであるから、地震によって構造物に損傷が生じた場合、修復不要でそのまま使用できる状態であるかどうか、あるいは、そのままでは使用できないが、修復することによって再利用できる状態であるかどうかは、耐震設計上考慮すべき状態であり、それぞれ使用性、修復性と定義される。

また、地震によって生じた損傷、特に破壊につながる致命的な損傷によって、構造物の利用者や第三者の生命、財産が損なわれる状態であるかどうか、考慮すべき状態であり、安全性と定義される。この

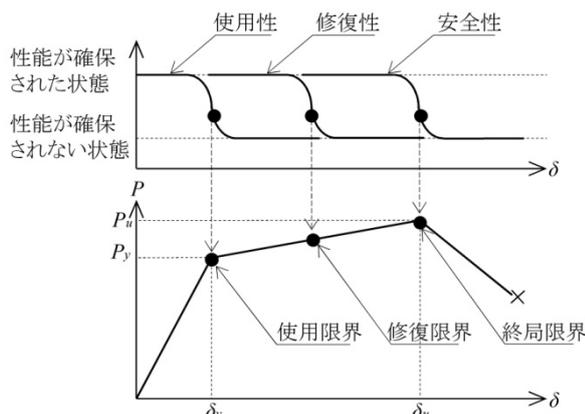


図-3 性能と限界状態の定義、関係

3つの状態、性能が耐震設計における基本的な性能で、地震動が作用した場合に、その地震動の大きさや再現期間に応じた性能を確保することが設計の基本となる。これら以外にも、地震後、救援活動に利用するために短期間で機能を回復できる性能や、疲労損傷に対する性能、環境作用の影響等に対する性能が各基準類で考えられているが、これらは上記の3つの性能の副次的な性能、あるいは特定の損傷要因に対する性能と位置づけられる。

上記の説明のように、性能は力や長さといった物理量ではなく、一般的な言葉で表現されるもので、「性能が確保された・されない」といった定性的な表現はできるが、定量的な表現、例えば、「性能が120%確保されている」とか、「性能が50%しか確保されていない」といった表現はできない。したがって、定量的な評価、照査を行うためには、別の指標、概念が必要である。

図-3の下の図は、構造物に作用する荷重 P と変形 δ の関係を表したものであり、構造物全体系に作用する荷重と変位の関係、部材断面に作用するモーメントと曲率の関係、あるいは微小要素の応力とひずみの関係などを想定している。十分な変形性能、じん性がある構造物、部材の荷重-変形曲線は、一般的にはこの図に示すように、荷重の増加に対し、初期状態では弾性(線形)挙動であったものが、降伏点を超えると変形の増加率が大きくなり、最大耐力に達した後、耐力が低下して破壊に至る。

図-3の上の図は、前述の性能が確保されている状態と確保されていない状態を下の図の変形の進行と連動して模式的に表したものであるが、図に示すように初期状態ではその性能が確保されている状態にあったものが、荷重、変形が増加していくと、その性能が確保されない状態に移行していく。それぞれの状態は変形量に対して、ある幅、範囲を有しており、

性能が確保されている状態から確保されない状態への移行は不連続ではなく、図に示すように連続的に移行すると考えられるが、工学的にはその限界点を決定することは可能であろう。この点が限界状態であり、「対象とする性能が確保されている状態から確保されない状態に移行する限界の状態」と定義でき、断面力や変位等の応答値を用いて定量的に決定することができる。一般には弾性限界、降伏強度が使用限界状態(使用性の限界状態)、最大強度が終局限界状態(安全性の限界状態)、その中間の状態のある点が修復限界状態(修復性の限界状態)として定義されている。ただし、実際の構造物では通常、ある断面が降伏しても使用性が直ちに確保できなくなることはない。また、地震後の救援活動、復旧活動等の使用、例えば、道路構造物では、通常の使用では許容できない路面の不陸や段差でも、多少走行速度を落とせば走行できる、あるいは、応急復旧によって必要最低限の速度で走行できる状態での使用も使用性の定義に含めた場合、さらに大きな損傷が生じた状態まで使用性が確保されていると評価できる。このように、限界状態の定量的な大きさの決定については、再検討の余地があると考えられる。

耐震設計では、構造物に地震動が作用した場合に、構造物が要求する性能を確保しているかどうかを照査する必要がある。しかし、地震動の大きさは後述するように再現期間に対して離散的あるいは段階的に増加するのではなく、連続的に増加し、どの大きさの地震動も発生する可能性がある。また、上記のように性能が確保されている状態、されていない状態は幅を持っている。したがって、本来は全ての大きさの地震動に対して性能が確保されている状態であるかどうかを照査する必要があるが、これを実行することは困難である。そこで、対象とする性能を確保すべき大きさの地震動の中で最大の地震動を設計地震動と定義し、設計地震動が作用した場合の構造物の応答が性能が確保されているクリティカルな状態である限界状態に達してないことを照査すれば、性能を確保すべき全ての大きさの地震動で性能が確保されていることが証明できる。また、設計地震動が作用した場合の応答値は、限界状態以下であればいくらかでも小さくてよいのではなく、必要最小限の余裕度を持って限界状態に近づくことによって経済的な設計を行うことができる。したがって、限界状態は設計地震動が作用した場合に、対象とする性能が確保されていることと、経済的な設計であることを照査するための指標と定義できる。

4. 照査が必要な限界状態の設定

前章において、耐震設計で考慮すべき限界状態として、使用限界状態、修復限界状態、終局限界状態があることを示したが、全ての構造物の設計で、全ての限界状態に対する照査が必要であるとは限らない。照査が必要な限界状態をどのような条件で設定するかを明確にする必要がある。

前述のように、構造物は所要の便益を得るために、継続的に使用できることを目的に設計、建設するのであるから、使用性が確保されている状態、すなわち使用限界状態を超えないことを照査することは全ての構造物の設計において必要である。

地震によって構造物に損傷が生じて使用限界状態を超え、そのままでは使用できなくなった場合、修復せずに廃棄、あるいは撤去して新しい構造物を新設するのであれば、修復限界状態に対する照査は不要である。例えば、ジェットエンジンのタービンブレードは定期的に点検し、亀裂や損傷が発見されれば、修復可能かどうかの判断をせずに新しい部品に交換する。また、エンジンの運用時間がある規定の時間に達すると亀裂や損傷の有無にかかわらず、新品に交換する。このような前提、方針で設計、運用する場合は、修復限界状態という概念、定義は必要ない。

しかし、土木構造物では、使用限界状態、すなわち降伏強度を少し超える程度の損傷であれば、適切な工法によって妥当な工期、工費で補修・補強（修復）することが可能であり、修復して再使用した方が経済的な場合が多い。このような場合は、使用限界状態を超えても廃棄せず、修復して使用し続ける方針で設計、運用した方が合理的である。しかし、損傷度がある限界を超えて大きくなると修復することが技術的、経済的に困難、あるいは不可能となる。したがって、使用限界状態を超えた構造物を修復して使用する方針で設計する場合、修復性が確保されている状態、すなわち修復限界状態以下であることを照査する必要がある。ただし、上記の「適切な工法によって妥当な工期、工費で」という条件が満足できない場合は、修復が可能であっても修復限界を設定できない場合がある。例えば、多くの家庭用電化製品はオートメーションで大量生産され低価格であるが、故障や破損が生じた場合、技術者が一品ずつ修理するため、修理費用が高額になり、修理するより新品に買い換えた方が経済的な場合がある。このような状況は、実質的には終局限界状態を超えたのと同じであり、技術的な修復限界状態は存在しても修復限界状態を設定できないことを意味している。

また、補強技術のレベルによって、修復限界状態の定量的な大きさが変わる可能性がある。例えば、道示耐震編では、RC橋脚柱の修復性に相当する耐震性能2に対して、耐力と残留変位による照査を規定している。このうち、残留変位に対する照査は、橋脚下端から上部構造の慣性力の作用位置までの高さの1/100、すなわち橋脚柱の回転角として1/100(rad)を許容値としている。この値は、兵庫県南部地震で回転角が1/60程度以上の被災が生じた橋脚柱を修復するのが困難であったという実績に基づいている。しかし、今後、もっと大きな回転角が生じていても修復できる新技術が開発され、一般的な工法として普及すれば、残留変位の許容値は変更される可能性がある。

修復限界状態を超え、修復による再利用が不可能となった構造物は、廃棄するか、撤去あるいは場所を変えて新しい構造物を新設することとなるが、その選択にあたって構造物の損傷度が破壊に近いかどうかは本来関係ない。場合によっては、中途半端に壊れているより、完全に壊れている方が撤去が容易という場合があるかもしれない。しかし、構造物が破壊することによって、構造物の利用者や第三者の生命、財産に損害を与える恐れがある場合（例えば橋梁の場合、上部構造の落下によって通行者の生命を損なうような場合）は、利用者や第三者の安全性が確保されている状態、すなわち終局限界状態を超えないことを照査する必要がある。逆に、人が容易に近づくことができない山間部の峡谷に架けられた水路橋などで、たとえ壊れたとしても第三者の安全性を損なう可能性がない構造物では、終局限界状態に対する照査は必ずしも必要ではないと考えることができる。なお、現行の設計基準では、安全性が確保できなくなるのは、構造物が破壊、すなわち終局限界状態を超えた場合を前提として、終局限界状態を安全性に対する限界状態としている。しかし、福島原発で、原子炉本体は完全な破壊状態に達してはいないが、放射性物質が漏出し、多大な被害が生じている状況や、最近、橋梁やトンネルにおいて、構造物全体系の損傷は致命的でなく終局限界状態には達していないが、非構造部材や付属物が破壊、落下し、利用者が被害を受ける事故が発生している状況をみると、終局限界状態以外の限界状態の設定、また、構造物全体ではなく部材単位の限界状態に対する照査が必要であると考えられる。この点については、今後の検討課題であろう。

なお、前述の説明で、修復限界状態を設定しない例を示したが、この場合、修復限界状態を設定しないからといって、それより損傷度が大きな終局限界

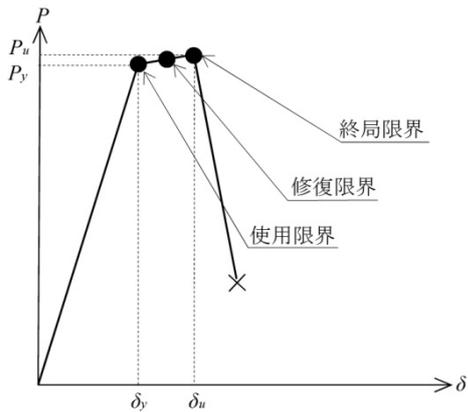


図-4 変形性能が小さい荷重と変形の関係

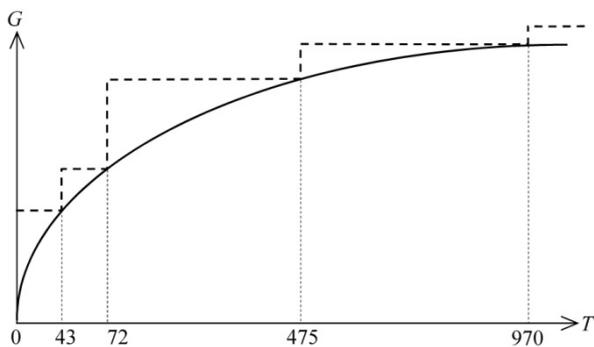


図-5 地震動と再現期間の関係

状態に対する照査が不要になるとは限らない。このような場合でも、修復できるかどうかとは関係なく、破壊によって構造物の利用者や第三者の生命、財産に損害を与える恐れがあるのであれば、終局限界状態以下であることを照査する必要がある。

このように、耐震設計では、使用限界状態に対する照査は全ての構造物の設計が必要であるが、修復限界状態および終局限界状態に対する照査の要否は、構造物の利用形態や設計方針等によって異なる。

この他、構造物の特性や使用する材料の特性によっても照査が必要な限界状態は変化する。3章では図-3に示すように十分な変形性能を有する構造物を前提に3つの限界状態を示したが、図-4に示すように、変形性能が小さく脆性的な荷重-変形関係の構造特性を有する構造物では、3つの限界状態がほぼ同時に発現するため、設計上は1つの性能、限界状態しか設定できない場合があると考えられる。

照査が必要な限界状態の設定でもう一つ重要なことは、上記の説明では、照査が必要な限界状態を設定する過程で、地震動の大きさや発生頻度等の特性を考慮していないことである。したがって、2章で

示した地震動レベルと性能レベルの組合せの設定手順のうち、i) の手順を選択することはできない。

5. 設計地震動の設定

図-5は、地震動の大きさ G と地震の再現期間 T との関係を模式的に示したものである。もし、破線のように、再現期間の増加に応じて、地震動の大きさが段階的に増加していくのであれば、SEAOCが提案したような4段階の設計地震動の設定は可能だろう。しかし、実際は実線のように、地震動の大きさは再現期間の増加に応じて連続的になだらかに増加していくであろう。このように連続的に変化する地震の発生特性から、離散的な大きさの設計地震動のレベルの数や、各レベルの地震動の大きさ、再現期間を主観、経験に基づいて設定することができたとしても、客観的、定量的に設定することはできない。

構造物の荷重-変位関係も図-3に示したように連続的に変化しているが、構造物を安全に使用するという目的に基づいて性能という概念を定義し、さらにその性能が確保されている状態から確保されない状態への限界点を限界状態と定義することにより、その大きさを離散的、定量的に設定することが可能となった。

設計地震動は単なる地震動ではなく、先頭に「設計」という名称がついているように、構造物を継続的に使用して便益を得るために設計することを前提に設定する地震動であり、3章で説明したように、対象とする性能を確保すべき最大の地震動と定義されるものである。したがって、設計地震動のレベル数および各レベルの大きさは、地震の特性だけではなく、構造物の性能や使用に関する条件、具体的には後述するように費用便益を考慮しなければ定量的に設定することができない。このことは、次のようにも考えることができる。

作用指針では、構造(解析・設計計算)モデル等に対する入力として用いられる作用、すなわちここでの設計地震動は、作用因子の値に基づき、構造物の用途、種類、構造特性を考え合わせて設定されると説明している。また、作用因子は構造物に影響を与える自然現象や人間活動から、代表的な物理量として選択され、かつ定量表現されたもので、その値は構造物の種類、構造特性などとは無関係に定義されるものと説明している。

地震は、いつどこで、どれ位の大きさの地震が発生するか、予測できないのであるから、作用因子としての地震動は特定の再現期間の地震動ではなく、

図-5で表されるすべての再現期間の地震動として定義できる。そこから、特定の再現期間の設計地震動である作用を定義するためには、構造物の用途、種類、構造特性に加え、費用便益を考え合わせて設定する必要があると説明できる。

このようなことから、設計地震動と限界状態の組合せは、2章で示したii-b)の手順、すなわち、限界状態(性能)を設定した後に従属的に設計地震動を設定する方法しか選択できない。

前章および本章の結果をまとめると、耐震設計における設計地震動と限界状態の組合せは、以下に示す手順で設定することが原則となる。

- ①設計対象とする構造物の構造特性や設計方針等に応じて使用限界状態、修復限界状態および終局限界状態の中から設計で照査が必要な限界状態を設定する。
- ②設定した限界状態に対して、構造物の性能や使用に関する条件および構造物の重要度を考慮して設計地震動を設定する。

6. 設計地震動と限界状態の組合せの設定

前章で、限界状態の照査に用いる設計地震動は構造物の性能や使用に関する条件を考慮しなければ設定できないと述べたが、具体的な考慮の方法については明らかでない。

第3次提言で述べられているように、設計地震動は、実際には構造物の所有者、建設責任者が自己の責任において任意に設定することができる。例えば、終局限界状態の照査に、SEAOCが提案する性能マトリクスのFrequentに相当する再現期間43年の地震動を用いたり、逆に、使用限界状態の照査にVery Rareに相当する再現期間970年の地震動を用いることは可能である。ただし、構造物の所有者、管理者はそれによって生ずる被害や無駄な支出に対して責任を取る必要がある。しかし、社会基盤である土木構造物は、その建設費を負担するのは国民で、使用することによって便益を得るのも、地震によって生じた損傷で被害を受けるのも国民である。したがって、土木構造物の管理者は構造物の構造特性や材料特性を最大限活用して高い安全性を確保するとともに最適な建設費用で最大の便益が得られるように設計する必要がある。しかし、建設費用や便益は設計地震動の再現期間によって変化する。このため、地震動の再現期間を変化させて費用便益分析を行い、最適な設計地震動と限界状態の組合せを設定

する必要がある。つまり、前述の性能に関する条件の具体的な考慮の方法は、費用便益分析による検討ということである。

第3次提言においても、「レベル2地震動に対する新設構造物の耐震性能は、損害回避便益と耐震化費用に基づく費用便益分析を基礎として決定すべきである。」と説明されている。ただし、費用便益分析の具体的な手法については説明されていない。

一般的な費用便益分析では、建設費用を増額し、構造物のサービス水準を向上させてその利用を促進し、増額した費用以上に便益の増加を図る方策を分析する場合もあると考えられるが、耐震設計の場合、費用を増額して耐震性能を向上させても、通常時のサービス水準が向上する訳ではない。耐震性能向上によって期待される効果は、地震発生時の損傷が減少することによる被害額の軽減である。そこで、ある再現期間の地震動に対して限界状態を超えないように設計した構造物の建設費用と、それ以上の大きさの地震動によって限界状態を超えて生じる被害額の和(総費用)が最小となる再現期間が存在するかを検討することとし、以下の条件と命題を考える。

条件：再現期間 T 年の設計地震動に対して限界状態を超えない設計供用期間 D 年の構造物を建設する。もし、供用期間中に再現期間 T 年を超える地震が発生して限界状態を超えた場合、修復または同じものを再建設する。
命題：初期建設費用 $C_{I,T}$ と被害額 C_R の和(総費用) C_0 を最小にする再現期間 T は何年か。

なお、ここでは荷重および抵抗の不確実性を考慮した安全率を無視し、再現期間 T 年を超える地震が発生した場合、直ちに限界状態を超えると仮定する。上記命題は、次式で表すことができる。

ここで、被害額 C_R は設計地震動以上の大きさの地震が発生した場合のみ生ずるので、リスクマネジメントの概念におけるリスクと同じ期待値として算出、評価する。

$$C_0 = C_{I,T} + N_{D,T} \cdot C_R \quad (1)$$

ここに、

C_0 : 総費用

$C_{I,T}$: 再現期間 T 年の設計地震動に対する初期建設費用

C_R : 被害額

$N_{D,T}$: 設計供用期間 D 年中に再現期間 T 年以上の地震が発生する回数の期待値

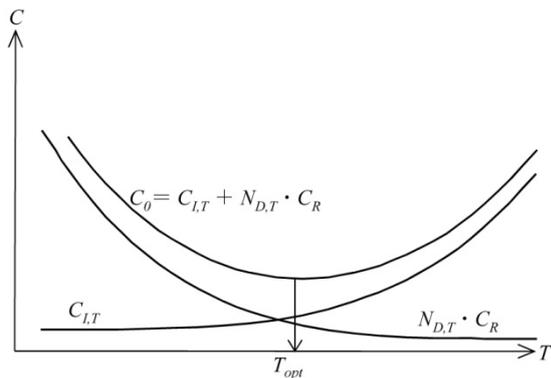


図-6 総費用と再現期間の関係

被害額 C_R は、修復または再建設費用、修復または再建設中に構造物を使用できないことによる便益の減少額および構造物の利用者や第三者の生命、財産の被害額（以下、利用者等の被害額）から構成され、検討の対象とする限界状態によって異なり、以下のようなようになる。

$$C_R = C_B \cdot T_1 + C_{R1,T} \quad : \text{使用限界状態}$$

$$C_R = C_B \cdot T_2 + C_{R2,T} \quad : \text{修復限界状態}$$

$$C_R = C_B \cdot T_2 + C_{R2,T} + C_{R3} \quad : \text{終局限界状態}$$

ここに、

C_B : 単位時間あたりの構造物の便益

$C_{R1,T}$: 修復費用

$C_{R2,T}$: 再建設費用（≡ 初期建設費用 $C_{I,T}$ 、撤去費用を含む）

C_{R3} : 利用者等の被害額

T_1 : 修復期間（使用に影響を与えない修復作業の期間を除く）

T_2 : 再建設期間（撤去期間を含む）

式（1）右辺第1項の初期建設費用 $C_{I,T}$ は、地震の再現期間 T が長くなると地震動が大きくなり、構造物の強度を大きくする必要があるため、 T に対して単調増加する。一方、式（1）右辺第2項に含まれる地震が発生する回数の期待値 $N_{D,T}$ は T に逆比例し単調減少、被害額 C_R に含まれる修復費用 $C_{R1,T}$ 、再建設費用 $C_{R2,T}$ は T に対して単調増加するが、 $N_{D,T}$ の方が変化率の大きいと考えられるので、第2項全体としては T に対して単調減少する。

図-6は総費用 C_0 の値を再現期間 T の関数として図示したものである。右上がりの曲線が $C_{I,T}$ 、右下がりの曲線が $N_{D,T} \cdot C_R$ 、放物線状の曲線が C_0 で、 C_0 が

最小となる再現期間 T_{opt} が存在する。この図は、再現期間が T_{opt} より長い設計地震動で設計すると被害額は小さいが、初期建設費用が高くなり、逆に再現期間が T_{opt} より短い設計地震動で設計すると初期建設費用は安い、被害額が大きくなることを表している。したがって、再現期間が T_{opt} の地震動を基に設計地震動を設定することが合理的であることが分かる。

上記と類似の検討は、土木構造物の耐震性能設計における新しいレベル1の考え方(案)や、阿部ら¹⁶⁾、坂井ら¹⁷⁾も行っており、図-6と同じような図が示されている。

なお、構造物の便益、利用者等の被害額算出は構造物を利用する人が受ける効果（直接効果）だけでは過小評価であり、広く社会一般が受ける波及効果（間接効果）の影響も考慮する必要があると考えられる。しかし、逆に波及効果の影響範囲を広げすぎると過大評価となるので、どの範囲まで考慮すべきかについて学識経験者等を含む中立・第三者的な機関で議論して共通的な算出方法を決定し、その結果を公表して社会的合意を得ることが必要だと考える。

7. 構造物の重要度の定量的評価

2章で述べたように、道示耐震編では道路種別及び橋の機能・構造に応じて、橋の重要度をA種の橋とB種の橋に区分しており、区分する場合には、1) 地域の防災計画上の位置づけ、2) 他の構造物や施設への影響度、3) 利用状況及び代替性の有無、4) 機能回復の難易、を考慮するのがよいと規定している。しかし、これらの要因を具体的にどのように考慮して区分するかの説明はない。他の設計基準類でも類似の要因を列挙し、これらを考慮して構造物の重要度を設定すると規定しているが、具体的な設定方法は明らかではない。

上記の1~4)の要因は、いずれも構造物の便益および利用者等の被害額と密接に関連しており、定量的に評価することが可能で、構造物の重要度が大きくなると、これらの要因の値も大きくなる。式（1）の被害額 C_R は、これらの要因の和で構成されており、 C_R も構造物の重要度が大きいほど大きくなる。そこで、 C_R の変化によって C_0 が最小となる再現期間 T_{opt} がどのように変化するかを検討する。

図-7は図-6と同じ、総費用 C_0 の値を再現期間 T の関数として図示したものである。 C_R を増加させると、 $N_{D,T} \cdot C_R$ を示す曲線が①から、②、③へと上

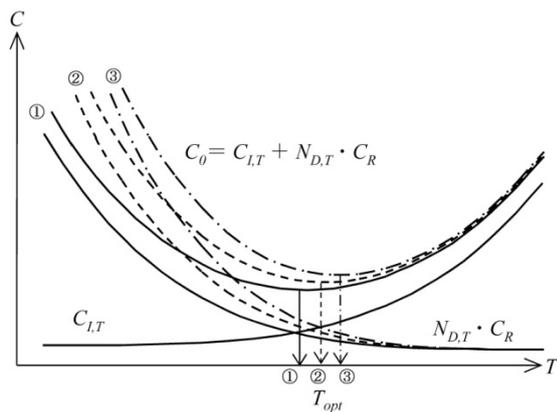


図-7 重要度による総費用と再現期間の関係の変化

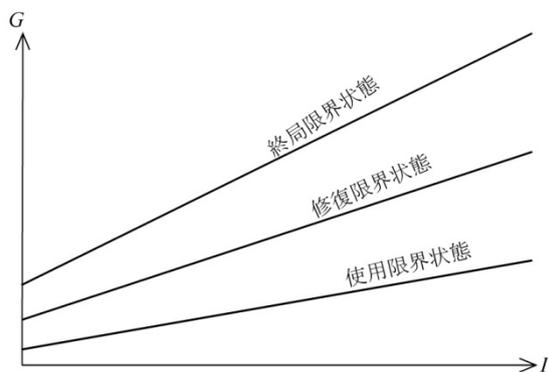


図-8 定量的な設計地震動と限界状態の関係

昇していき、 C_0 を示す放物線の最小となる T_{opt} が大きくなることから分かる。このように構造物の便益、利用者等の被害額から構造物の重要度を定量的に算出する共通的な手法を確立できれば、その大きさに応じた設計地震動の再現期間を設定することができる。この結果、図-8に示すように、限界状態をパラメータとして設計地震動の大きさ G を重要度 I の関数として表すことができる。図-2に示した性能マトリクスが設計地震動と性能（限界状態）の組合せの定性的な関係を示すのに対し、図-8は両者の定量的な関係を示すものといえる。

道路橋のA種、B種の重要度の区分は、図-8に示す設計地震動の大きさ G と重要度 I の関係から、後述のように類型化したものと考えられる。ただし、この区分は当然のことながら、道路橋を前提に類型化しているため、他の構造物に適用することはできない。しかし、前述のように、共通的な構造物の重要度の算出方法を確立することによって、構造物の種類とは関係なく重要度を評価することが可能となる。この結果、原子力発電所のように損傷の影響が

非常に広範囲、長期間に亘る重要度が極めて高い構造物は安全性に係わる設計地震動の再現期間が非常に長くなり、超巨大地震に対して設計する必要があることが分かる。

前章および本章の結果をまとめると、構造物の重要度を考慮した設計地震動と限界状態の組合せの具体的な設定方法は以下ようになる。

- ①設定した限界状態に対して、構造物の建設費、修復費、便益および利用者等の被害額を考慮した費用便益分析に基づいて設計地震動の再現期間を設定する。
- ②構造物の重要度は、構造物の便益および利用者等の被害額を基に定量的に評価することができ、上記の費用便益分析に反映される。

この結果、現在の耐震設計では使用限界状態の設計には構造物の重要度にかかわらずレベル1地震動という絶対的（固定的）な大きさの設計地震動を用いているが、本論文の提案では構造物の重要度に応じて設計地震動の大きさが異なり、絶対的な大きさの設計地震動としてのレベル1地震動という定義が成り立たなくなる。

土木構造物の耐震性能設計における新しいレベル1の考え方（案）でも、レベル1という名称が設計地震動の大きさによるものか、発生頻度か、それとも設計法によるものか、という問題について検討されている。本論文の結論から言えば、レベルという名称を使うとすれば、それは地震動に対してではなく限界状態であり、損傷度の小さい順に使用限界状態、修復限界状態、終局限界状態と並べたときに、それぞれをレベル1限界状態、レベル2限界状態、レベル3限界状態と定義するのが合理的で、レベル1地震動はレベル1限界状態の照査に用いる地震動で、その大きさは構造物の重要度に応じて異なる、と定義できるだろう。

なお、作用指針では、設計地震動は自然的要因をもとに定め、構造物の重要度は構造物の耐震性の設定に反映すべきと説明し、その根拠として、同一敷地内の構造物に入力される地震動が重要度によって異なるのが不合理と考えられるためだ、としている。しかし、3章で述べたように、性能が確保されている状態は幅があり、限界状態は性能が確保されているクリティカルな状態である。ある重要度の構造物に対する設計地震動が、異なる重要度の構造物に作用した場合、その重要度に応じた性能が確保される必要があるが、その性能のクリティカルな状態である限界状態である必要はない。

8. 設計実務上の課題およびその対応

前章までに説明した手順によって、設計地震動と限界状態の組合せを定量的に設定することが可能となった。ただし、各限界状態に対する設計地震動の最適な再現期間を決定するための費用便益分析は多大な時間と労力を必要とし、構造物を設計する度に実施することは現実的ではない。また、費用便益分析を実施しないと設計地震動の大きさを確定できないとなると、現在一般的に用いられている設計地震動の大きさに応じて構造物の大きな諸元をあらかじめ設定して設計計算に着手する手順を用いることが困難となり、実務的ではない。

このため、第3次提言で述べられているように構造種別や便益の規模、被害が生じた場合の影響範囲等を類型化し、また、構造物の重要度も同様に類型化し、各類型毎にモデルケースを設定して費用便益分析を行い、構造物の重要度別に標準的な設計地震動と限界状態の組合せを予め設定しておくことが実務的であると考えられる。

しかし、このような類型化をしたとしても、費用便益分析の作業はそれほど単純、簡単にはならず、依然として多大な時間と労力を必要とすると考えられる。さらに、それ以上に問題なのは、式(1)の計算に必要な各項の値を決定するための情報、データが十分な精度で得られていないことである。例えば、6章で構造物の便益、利用者等の被害額の算出には直接的な額だけでなく、間接的な額も考慮すべきと述べたが、それを将来の利用状況の変化も予測して算出することは非常に困難である。また、地震発生回数 $N_{D,T}$ を予測するためには、図-5に示した地震の再現期間と地震動の大きさの関係を精度よく推定する必要があるが、そのためのデータも十分収集されてはいない。

このため、性能照査型設計の運用で用いられる適合見なし仕様と同様、当面は過去の地震被害に基づく経験や工学的判断によって、上記の類型化した各グループ毎に、定性的な表現で設計地震動を設定するのが実務的と考えられる。

この結果、「供用期間中に数度」とか、「最大級の地震動」といった、現行の設計基準と大して変らない表現が用いられることもあると考えられる。しかし、第3次提言や、作用指針において述べられているように、意思決定過程の透明性を確保する観点から設計地震動の設定に用いたデータや評価手法、意思決定の根拠などを公表することが重要である。本論文で提案する設計地震動と限界状態の組合せの設

定の原則や根拠を明らかにした上で実務的な対応として上記の表現を用いるのと、何の根拠も示さずに上記の表現を用いるのでは、設定の内容の理解度が大きく異なるであろう。また、設計地震動設定の原則や根拠を明らかにすることによって、今後、設計地震動の推定精度を改善しようとする場合に、どのような情報、データを収集し、検討すればよいかが可能になる。

9. まとめ

耐震設計の品質を向上させるには、設計モデルおよび計算手法の高度化や地震動の推定精度の向上を図るだけでなく、設計地震動と限界状態の組合せを合理的に設定することが重要である。しかし、これまで両者の設定方法については十分検討されていなかった。両者の設定方法に着目した性能規定型設計法のひとつである SEAOC が提案した性能マトリクスは、両者の組合せを示したものであるが、その内容は概念的、定性的であり、具体的な設定方法は不明であった。本論文では、構造物の性能、限界状態や設計地震動の定義にまでさかのぼって検討を行い、費用便益分析およびリスクマネジメントの考え方に基づく設計地震動と限界状態の組合せの設定方法を規定した新たな性能規定型設計法を提案した。具体的な設定方法および設計実務上の対応は以下の通りである。

- ① 構造物を経済的、安全に使用するという目的に基づき、耐震設計における基本的な性能として、使用性、修復性および安全性の3つの性能が定義、設定できる。また、それぞれの性能が確保される状態から確保されない状態に移行する限界の状態として使用限界状態、修復限界状態および終局限界状態が定義でき、構造物の応答値を用いて定量的に決定できる。
- ② 上記の限界状態の中から、設計する構造物の構造特性や利用形態、設計方針等によって照査に用いる限界状態を設定する。
- ③ 設定した各限界状態に対して、構造物の構築費、修復費、便益および利用者等の被害額に基づき費用便益分析を実施し、設計地震動の再現期間を設定する。なお、構造物の重要度は、便益費、被害額を基に算出され、費用便益分析に反映される。
- ④ 構造物を設計する度に上記手順を実施することは現実的ではなく、費用便益分析するための情

報, データも十分整備されていないため, 構造物の種別, 便益の規模, 被害が生じた場合の影響範囲等を類型化し, 過去の地震被害等に基づく経験, 工学的判断によって定性的な表現で設計地震動を設定するのが実務的である.

- ⑤本論文で明らかとなった耐震設計における設計地震動と限界状態の組合せの設定の原則や根拠を公表することにより, 意思決定過程の透明性が確保されるだけでなく, 設計地震動の推定精度を改善する際の検討方針が明確になる.

本論文では, 費用便益分析に基づき, 設計地震動と限界状態の組合せの設定方法を提案したが, その中で被害額はリスクマネジメントの概念におけるリスク(期待値)として評価した. このため, 設計地震動の再現期間が長くなると, 被害額のリスク値は実際の被害額よりかなり小さくなる. しかし, もし設計地震動以上の地震が発生すると, 期待値ではない実際の被害額が顕在化し, 社会経済に甚大な影響と被害, いわゆるカタストロフィックリスクをもたらすこととなる. このような状況に陥ることを防ぐためには, 設計地震動の再現期間を長くするだけでは不十分であり, 新技術の開発や事後対策としてのクライスマネジメントの導入等, あらゆる対策を講ずる必要がある. ただし, 地震発生時にはそれらの対策が計画通り実施できるとは限らない. このことも想定した上で「想定外」を想定することが, 今後求められるであろう.

参考文献

- 1) 福井次郎: 限界状態設計法と性能設計法に基づく設計荷重の設定方法に関する一考察, 第14回性能に基づく橋梁等の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集, 土木学会, pp. 291-294, 2011. 7.
- 2) 土木学会: 耐震設計ガイドライン(案), 2001. 11.

- 3) 土木学会: 包括設計コード(案), 2003. 3.
- 4) 土木学会: 性能設計における土木構造物に対する作用の指針, 2008. 3.
- 5) 福井次郎: 道路橋基礎の性能設計, 基礎工, pp. 17-20, 2001. 8.
- 6) 亀田弘行他: 座談会・東日本大震災を受けて性能設計をどう考えるべきか, 土木学会誌, pp. 6-11, 2013. 3.
- 7) SEAOC: Vision 2000 - Performance based seismic engineering of buildings, Vision 2000 Committee, Final Report, 1995.
- 8) 本城勇介: 性能規定型設計・限界状態設計法の動向と杭基礎への適用, 基礎工, pp. 1-5, 2000. 12.
- 9) 建設省土木研究所: 総プロ「新耐震設計法の開発」研究報告・新耐震設計法(案), 土木研究所資料, 第1185号, 1977. 3.
- 10) 日本道路協会: 道路橋示方書 V耐震設計編, 1980. 5.
- 11) 日本道路協会: 道路橋示方書 V耐震設計編, 1996. 12.
- 12) 国土交通省: 土木・建築にかかる設計の基本, 2002. 10.
- 13) 土木学会: 土木構造物の耐震設計法に関する第3次提言と解説, 2000. 6.
- 14) 土木学会地震工学委員会レベル2地震動研究小委員会: レベル2地震動の明確化に向けて, 土木学会論文集, No. 675/I-55, pp. 15-25, 2001. 4.
- 15) 土木学会地震工学委員会耐震設計基準小委員会: 土木構造物の耐震性能設計における新しいレベル1の考え方(案), 2003. 11.
- 16) 阿部淳一, 杉本博之, 渡邊忠朋: 地震リスクを考慮した設計地震動強度算定に関する研究, 土木学会論文集 A, Vol. 63, No. 4, pp. 780-794, 2007. 12.
- 17) 坂井公俊, 室野剛隆, 佐藤勉, 澤田純男: トータルコストを照査指標とした土木構造物の合理的な耐震設計法の提案, 土木学会論文集 A1, Vol. 68, No. 2, pp. 248-264, 2012.

PROPOSAL OF A NEW PERFORMANCE BASED DESIGN METHOD CONSIDERING COMBINATION OF DESIGN SEISMIC LOADS AND LIMIT STATES

Jiro FUKUI

The current seismic design methods for infrastructures are based on the combinations of preconfigured design seismic loads and limit states considering the importance of structures; however, backgrounds of their combinations are not clear. In this paper, the author reviews the definitions of limit states, performance requirements and their relationship, and demonstrates the following points: (1) Fundamental limit states are serviceability limit states, reparability/ restorability limit states and ultimate limit states, (2) Verification on the serviceability limit states is indispensable whereas the necessity of verifications on the reparability/ restorability limit states and ultimate limit states depends on the intended purpose of structures and/ or design policy. Furthermore, the author points out that the design seismic loads depend on the limit states and proposes that their quantitative evaluation should be based on the cost-benefit analysis and risk management philosophy considering the quantitative value of the importance of the structure. Finally, the author, taking account of the difficulty of the cost-benefit analysis, adds practical manner of utilization on this matter.