

年間
特集

土木構造物のための耐震設計法： 阪神淡路大震災前後

盛川 仁*

Basic concepts of earthquake-resistant design for civil engineering structures — before and after 1995 Kobe earthquake

Hitoshi MORIKAWA *

Abstract

1995 Hyogo-ken Nanbu (Kobe) earthquake has brought a drastic paradigm shift for the concepts of earthquake-resistant design in the civil engineering field. Especially, the procedure to determine earthquake ground motions for design has been completely changed after the earthquake. Two important concepts were introduced: one is performance based design and the other is two different levels of earthquake ground motions, that is, level-1 and -2.

Before the Kobe earthquake, nobody cared earthquake ground motions to be used in his design, because the design code provided definitely the earthquake ground motion. After the earthquake, however, engineers should determine most appropriate earthquake ground motions by themselves in the considerable earthquake ground motions. This means that the engineers are required deep understanding about various circumstances relating to earthquakes. The point is that design code should be constraint of the structural performance and not a manual book to design a structure.

キーワード：土木構造物，耐震設計，設計用入力地震動，レベル2地震動，震度法

Key words：civil engineering structure, earthquake-resistant design, earthquake ground motion for structural design, level-2 earthquake ground motion, static lateral force method

* 東京工業大学大学院 総合理工学研究科
Department of Built Environment, Tokyo Institute of Technology

1. はじめに

本稿では、阪神淡路大震災によって土木構造物の耐震設計の枠組みや考え方がどのように変わったのか、という点について約85年の耐震設計の歴史を振り返りながら述べようとするものである。

土木構造物に限らず、一般に耐震設計を行うにあたっては大きく分けて次の3つのステップについて検討する必要がある。すなわち、

- (1) 対象構造物に作用する地震動の設定、
- (2) 地震動による対象構造物の応答の算出、
- (3) 得られた応答に基づき対象構造物が所要の性能を有しているかの評価、

の3段階である。

これら3つのステップのなかで阪神淡路大震災によって特に大きな変化を余儀なくされたのは1つめの地震動の設定であった。3つめのステップにおいても、「所要の性能」とは何か、という根元的な部分での考え方に大きな変化があった。それに対して、2つめのステップは阪神淡路大震災による影響が比較的小さかったと考えられる。

構造物の地震応答の算出にあたっては、静的応答を用いた簡易的な計算法が伝統的に用いられてきたが、計算機能力の急速な向上に伴って動的解析に対する敷居が低くなったために、阪神淡路大震災以前より、静的解析から動的解析へと重心が移りつつあった。歴史に「もしも」が無意味であることは十分に承知しているが、もしも阪神淡路大震災がなかったとしても、この流れが進行したであろうことは想像に難くない。もちろん、阪神淡路大震災によって設計用入力地震動が波形で与えられることになったために、この方向性を決定づけるとともに、その変化を加速させたことは間違いない。

土木構造物には様々な構造様式の構造物が存在し、しかもそれらに様々な材料が用いられるため、我々は多種多様な構造物を対象としなくてはならない。構造物の地震応答計算においては、構造様式や材料特性に応じて適切であると考えられる手法を選択する必要があるため、それぞれ構造物の数だけ異なる計算手法が存在するということになる。本稿においてそれらを網羅的に述べること

はあまりにも詳細に過ぎるだけでなく、そもそも不可能である。

このように、地震応答の算出法については歴史の中で必然的に変化の方向がある程度決められていて、かつ、構造物個別の問題となりがちである。地震応答の解析手法には約85年の耐震設計の歴史の中で様々な工夫が積み重ねられながらその時代の社会的要請に応じてきたという点で、非常に興味深いものがある。しかし、こと、阪神淡路大震災という節目においては他の耐震設計上の要素と比較して大きな変化があったわけではない。以上のような理由により、本稿では2つめのステップである地震応答の算出法については言及せず、阪神淡路大震災前後の1つめと3つめのステップに焦点を絞って述べたい。なお、多様な構造ごとに細かく規定されている個別の事例や地震応答解析の手法については、参考文献(たとえば、時松ほか¹⁾、土木学会地震工学委員会耐震基準小委員会²⁾など)を参照されたい。

2. 道路橋のための耐震設計規定の変遷

道路橋設計示方書に見られる耐震設計規定の変遷は、土木構造物の耐震設計の歴史と言っても過言ではあるまい。種々の土木構造物の耐震設計法に対して、いろいろな意味で影響を与えてきたからである。阪神淡路大震災によって設計体系がどのように変わったかを述べる前に、道路橋のための設計用入力地震動がどのように変遷してきたかを振り返ることで耐震設計の歴史を概観したい。

昭和15年に³⁾

地震ノ水平加速度ハ重力ニ因ル加速度
ノ20%、鉛直加速度ハ重力ニ因ル加速
度ノ10%ヲ標準トスヘシ

と規定されて以来、昭和47年に道路橋耐震設計指針⁴⁾が出るまでは、耐震設計と言えば、戦前戦後を通じて水平震度0.2、鉛直震度0.1を標準値として震度法にて設計する、という実にシンプルなものであった。なお震度法とは、構造物の重量に水平震度(または鉛直震度)を乗じた力を水平(または鉛直)に静的に作用させ、その応答値が所定の値より小さくなるように設計するという設計

手法である。

耐震設計をすべし、という規定そのものは、大正15年の「道路構造に関する細則案」にまで遡るが、昭和15年の示方書案解説³⁾に述べられている通り、「旧細則案（筆者注：大正15年の「道路構造に関する細則案」のこと）に於ては地震荷重は、橋梁の所在地方に於ける最強地震力に依り、橋梁の各部に最大応力を生ずるものを用ふべしと規定せられ、条文のままにては如何なる方法にて計算すべきか全然不明で」あった。なんらかの具体的な数字を示したという点で、昭和15年の示方書案は非常に便利であったものと想像される。しかし、その数字の根拠についてははっきりしない。また、「但し架橋地点ノ状況ヲ考慮シテ之ヲ増減スルコトヲ得」という条文が含まれることからわかるとおり、設計者が自ら設計レベルを設定することを期待するような記述となっていた。

もちろん、この条文は、設計用入力地震動を決定することを設計体系の中に組み入れようとする阪神淡路大震災以降の新しい考え方と志を同じくするものではないであろう。むしろ、どのように数字を決めたら良いのかわからないので適当に設計者自身で考えてくれ、という気持が多分にこめられているように感じられる。実際、昭和15年版のみならずいずれの版においても、新しく導入された概念については、「設計者自身で考えてくれ」と書かれている部分が多く見られる。しかし、多くの場合、その次の改訂で具体的な数字が与えられ、「設計者が考える」部分がマニュアル化されていく。このような観点からは、道路橋の耐震設計のための設計用入力地震動の歴史とは、マニュアル化の歴史であった、と言えるかもしれない。

大正15年に具体的な指針を示すことなく始まった道路橋のための耐震設計指針は、昭和31年の鋼道路橋設計示方書⁵⁾以降、8～10年ごとに改訂される。そして、半世紀以上にわたって、毎回のよう新しい概念を導入して続く版で当該部分のマニュアル化を果たすというパターンを繰り返してきた。言い換えれば、チャレンジと普遍化の繰り返しとその積み重ねであった。そのため、チャレンジする部分については「設計者自身で考えてく

れ」という意味のおおらかな記述が形を変えながらも生きながらえることができたのであろう。

ところが、平成2年の道路橋示方書⁶⁾の改訂において、ついに「設計者自身で考えてくれ」という記述はほぼ一掃される。この時点で、設計用入力地震動が目指してきたマニュアル化は、その是非は兎も角として、あるひとつの頂点に達したと見ることができる。そして、その5年後、不幸にも阪神淡路大震災を経験し、新しい設計体系への移行を余儀なくされるのである。

平成14年の改訂⁷⁾で、「条件が整えば設計者自身で考えよ」という従来とは全く異なるスタンスで、設計者が自ら設計用入力地震動を設定することを求める規定が導入され、設計用入力地震動の設定に設計者が積極的に関わるべきことが明文化される。これは従来の徹底したマニュアル化とは異なる新しい方向性を示しており、阪神淡路大震災から7年を経て、新しい設計体系の変化への息吹きを予感させるものとなった。

以下、耐震設計の考え方が確立していく昭和47年以降の設計用入力地震動の変遷を順を追って述べる。

図1に昭和15年から平成14年までの設計用入力地震動を示す。ただし、平成14年の道路橋示方書⁷⁾では設計用入力地震動は加速度応答スペクトルで規定されるようになったため、図中の線は照査用水平震度である。図中の設計水平震度はいずれも、東京（大きな地震がしばしば発生している地域、または地域区分A）の堅くもなく軟弱でもな

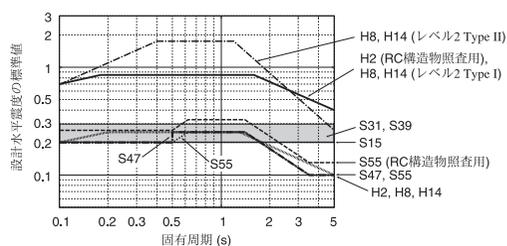


図1 設計用入力地震動の変遷（水平震度，東京，II種地盤相当，重要な橋梁の場合）。図中のS15などは設計規準の刊行年（S：昭和，H：平成），S31の水平震度は範囲指定であるため網掛け領域で表示。

い地盤（2種地盤，またはⅡ種地盤）に重要な橋梁（1級，またはB種）を設計する場合に使われるものである。

昭和47年，はじめて耐震設計指針という形で道路橋の耐震設計法が独立する⁴⁾。このとき，橋の重要度や地盤条件，河角マップ⁸⁾に基づく地域別の地震危険度の影響が統一的に取り入れられると共に，構造物の応答の周波数特性を考慮した修正震度法が一部導入された。そして，驚くべきことに，修正震度法による設計のために規定された設計水平震度の形状は，現在まで綿綿と使われ続ける。もちろん，示方書の改訂のたびに少しずつその形状は変化していくのであるが，大きくは変わっていないことが，図1からも理解される。設計水平震度の形状がどのような経緯で決定されたか，についての説明は昭和47年の耐震設計指針⁴⁾の記述には見つからないが，どういうわけか，その後，改訂を重ねるに従って，設計水平震度の形状の妥当性の根拠や物理的イメージが次々に追加されていく。

昭和55年の改訂⁹⁾で，修正震度法の適用範囲が拡大し，設計水平震度の形状が微修正される。それとともに，設計水平震度の決定にあたっては，強震記録から得られた平均の応答加速度スペクトル，および「観測と実験上の事実，さらには経験的事実を勘案したうえで」決定された旨の記述が追加される。また，鉄筋コンクリート（RC）橋脚と橋台について地震時変形性能を照査するための水平震度が，設計水平震度の1.3倍以上，として新たに規定された。もちろん，レベル2地震動という術語こそ用いられていないが，現在で言うところの2段階設計法を連想させる設計スタイルが登場する。ただし，何をどのように照査したいのか，という性能規定があまりはつきりしていないなど，今日的な意味での2段階設計法と同一視するにはまだまだ不十分な点も多い。

さらに，安全性の照査のための手法として動的解析が新たに紹介されている。時刻歴応答解析に用いる地震動入力については，「将来生じることが予想される地震の規模，位置などを想定し，こうした情報をもとに架橋地点の地震動を推定しよう

とする方法」に言及しているものの，「研究途上の課題が多く，今すぐ動的解析に取り入れることは実際的ではない」としてそれ以上の具体的記述はない。このような理想的な方法が当時実現可能であったかどうかを別にすると，現在に通ずる先進的な考え方が示されていたのである。

10年後の平成2年の改訂⁶⁾では修正震度法へ移行し，それとともに，設計水平震度が微修正される。動的解析による安全性の照査のための入力地震動が設計水平震度をもとに応答スペクトルとして規定される。また，RC橋脚の安全性の照査法が地震時水平耐力法となり，照査用の水平震度が新たに規定される。解説には照査用の水平震度は大正12年の関東地震級のものを想定することにしたと記述されている。関東地震による地盤の加速度が0.3~0.4Gであったため，橋の応答はその2~3倍であろう，ということで橋の応答をおおむね1Gとした，ということのようである。図1からもわかるとおり，実際のところは，その形状は設計用水平震度をほとんどそのままかさ上げしただけのように見える。

平成8年には阪神淡路大震災による大きな被害をふまえて通常の改訂までの間隔を大幅に短縮して改訂が行われる¹⁰⁾。このとき，レベル1およびレベル2地震動相当の設計用入力地震動が陽な形で定義される。レベル1地震動には従来の設計水平震度が，レベル2地震動には地震時保有水平耐力法で用いられていた照査用設計水平震度がタイプI地震動（プレート境界型の大規模な地震による地震動）として引き継がれた。新たに，兵庫県南部地震の際の加速度応答スペクトルを包絡するような形状の水平震度がレベル2地震動相当のタイプⅡ地震動（兵庫県南部地震のような内陸直下型地震による地震動）として導入された。また，目標耐震性能と設計用入力地震動や構造物ごとにどのような耐震計算法を選択すべきか，が示された。

平成14年の改訂では⁷⁾，性能規定型の設計体系に移行し，橋の耐震性能，設計入力地震動の設定方法，耐震性能の照査法の基本的項目が整理された。レベル1地震動，レベル2地震動という術語が正式に採用されると共に，建設地点に特有の地

震に関する情報を考慮した設計用入力地震動の設定が可能となった。また、設計用入力地震動が応答スペクトルで規定されることとなり、従来からの設計水平震度は照査用として用いられることとなった。

設計用スペクトルの形状については平成8年改訂時¹⁰⁾のものがそのまま踏襲されている。レベル2地震動のタイプI地震動（プレート境界型の大規模地震による地震動）について、「394成分の強震記録の加速度応答スペクトルの統計解析結果をもとに定めた」という解説が追加されている。

以上のように、設計用入力地震動の変遷をたどってくると、平成8年に導入されたレベル2地震動のタイプII地震動以外は、昭和47年の改訂で修正震度法とともに導入された設計水平震度の形状が大きな影響を与えていることに気づく。このことは、道路橋の設計用入力地震動が、いかに、過去の連続性を重視してきたか、を示すものととらえることができよう。

大正15年に規定された「地震荷重は、橋梁の所在地方に於ける最強地震力に依るべし、というおよそ抽象的な条文は、その背景を差し置いて文言としてだけ見るならば、まさしく今日のレベル2地震動の定義に相通ずるものである。75年あまりを経て再び「ふりだし」に戻ったかのような錯覚を覚えるかもしれない。しかし、本項において見てきたように、75年間の自然科学の発展と試行錯誤の積み重ねは、我々の立ち位置が大正15年当時とは全く異なり、ようやくこのような規定を現実のものとして実現可能な技術レベルに達した、と見るべきであろう。

3. 阪神淡路大震災前後の土木構造物の耐震設計法

既に述べた通り、土木構造物には、橋梁、ダム、トンネルや埋設管などの地中構造物、擁壁、基礎、盛土などの土構造物といった様々な構造様式が存在し、また、コンクリートや鋼だけでなく土などの様々な材料が用いられ、実に、多種多様である。そのため、構造物の設計のための技術標準はこれらの構造種別、材料種別ごとにそれぞれ

独自に整備され発展してきた。耐震設計のための入力地震動の設定方法についても、その有り様は同じでそれぞれが対象とする構造物にあわせた考え方が採用されてきており、特定の対象構造物にとって合理的かつ合目的な体系が形作られている。しかし、そのために、異なる構造物のための耐震設計規準どうしの関係性が希薄で、同じ「地震」という現象を扱っているにもかかわらず、構造物が違えば「地震」としての物理的イメージが全く整合しない、ということでもあった。

たとえ、設計手法が多様であったとしても、設計時に考慮すべき入力地震動をどのように決定するか、ということについては、対象とする構造物によらずある程度共通した考え方のもとに設計方法が体系づけられていることが望ましいことは言うまでもないであろう。

1989年のロマプリエタ地震の際のI-880号線高架橋の倒壊やベイブリッジの落橋、1994年のノースリッジ地震の際の高速道路橋の倒壊は耐震工学の先進国であるはずの米国でさえも地震による大きな被害を免れない、ということのみせつける出来事であった。しかし、このとき、日本ではこの重大性を認識しつつも、一方で、文字通り対岸の火事という受取り方をしていて、これらの米国における大被害を機に日本の土木構造物の耐震設計規準を見直そう、という大きな動きにはつながらなかった。むしろ、日本の設計規準は米国のそれとは異なるので大丈夫という論調が強かった、と個人的には感じている。

ところが、ノースリッジ地震のちょうど1年後の1995年1月17日に発生した阪神淡路大震災によって高速道路橋の崩壊など多くの土木構造物が未曾有の大被害を受けたのである。この状況下で土木学会は地震後、比較的早い時期（1995年5月）に新しい耐震設計のための指針となるべき「提言」を行っている¹¹⁾。提言は、地震直後の1995年の第一次提言から、その後議論を十分に深めたうえで出された2000年6月の第三次提言まで断続的に出されている（以下、これらをまとめて「提言」と呼ぶ¹¹⁻¹³⁾。

「提言」では、レベル1とレベル2の2段階の地震動を考慮する「2段階設計法」と、各設計レベ

ルに応じた「性能規定型設計」を行うことをその骨子とし、それ以前の設計体系である許容応力度設計法に基づく体系からの大きな方針転換を求める内容となっている。橋梁などの一部構造物については、「提言」に見られる考え方は既に取り入れられていたが、地中構造物等を含む、すべての土木構造物を対象とした、と云う点で「提言」は大きなインパクトを持つものであった。

また、物理現象としての地震の共通のイメージを設計段階から持つことを要求し、これまでのあいまいな「地震荷重」のかわりに、構造種別や構造材料の違いによらず、物理現象としての地震とそれによる作用がイメージできる設計体系が必要であると訴えている。

阪神淡路大震災以降、十余年にわたる様々な議論を経て、レベル2地震動についてはそのイメージがおおよそ確定したという段階に達しているものの、レベル1地震動についてはまだ十分な検討が行われているとは言えないのが現状である。しかし、土木構造物のための設計用入力地震動を考える際に「提言」の果たした役割は大きかったと言えよう。

「提言」における設計用入力地震動の設定方法に関する議論の進展と平行して、国際規格（ISO）の耐震設計法の制定において、土木学会を中心として日本は積極的な貢献をおこなってきた。これまで橋梁などの一部の地上構造物（たとえば、ISO 3010¹⁴⁾）や港湾構造物¹⁵⁾を別にすると土木構造物を陽な形で対象とした耐震設計のための国際規格は制定されておらず、日本からの提案でそのためのワーキンググループが組織され、ISO/TC98/SC3/WG10として活動が行われた。「提言」における議論や種々の地震工学的知見を最大限に取り込むことで、設計技術者および、設計規準策定者のための基本的指針として、2005年11月にISO 23469「構造物の設計の基本—地盤基礎構造物の設計に用いる地震作用」がまとめられた^{16,17)}。

ISO 23469¹⁶⁾の内容は非常に多岐にわたるが、適用範囲として本文中に明記されているように非常に一般化された内容となっている。設計用入力地震動の考え方の部分だけを見れば、地盤基礎構

造物に限らず、あらゆる構造物に対して通用するような書き方がなされている。これは、構造様式や種別ごとではなく、設計用入力地震動については、共通の考え方のもとで取り扱われるべきである、という哲学を基本としているために、当然の帰結であり、かつ、日本の設計体系の新しい方向性と整合するものである。

1996年以降、数年にわたって道路橋示方書、鉄道構造物等設計標準等の主な設計規準が次々に改訂され、2段階設計法と性能規定型設計法に対応した。また、2001年11月に土木学会地震工学委員会がまとめた「土木構造物の耐震設計ガイドライン²⁾」には、各種構造物のレベル2地震動に対する設計法が詳細に述べられている。これらの設計法は、いずれも、その基本として土木学会の「提言」に沿う形で体系化されている。特に、これらの新しい耐震規準の多くは主として土木学会の第二次提言を参照するような形をとっている。

阪神淡路大震災から約15年を経て、これらの耐震規準の一部は新たな改訂の時期を迎えている。今後は、レベル2地震動の取り扱いが第三次提言に沿うように改められるとともに、レベル1地震動の考え方にも新しい考え方が取り込まれるものと予想される。特に、2007年改訂の港湾施設の耐震規準¹⁸⁾や2009年改訂の水道施設の耐震規準¹⁹⁾ではこの15年間の成果を取り入れた大幅な改訂が行われており、これまでの議論が少しずつ実務的なレベルに反映されつつあることを示している。

かつて、構造物の設計技術者の中には、入力地震動さえ決まれば、いかようにでも設計をしてみせる、と豪語する専門家が存在したという。ことの真偽のほどは兎も角として、このことは、設計技術者が入力地震動の設定には関与しない、というだけでなく、土木構造物の耐震性に何らかの問題が生じたとしてもそれは入力の設定に問題があるものとする、ということを暗に仄めかしたものと言える。これまでの設計体系では地震の物理的イメージが希薄であるかわりに、設計のプロセスは単純であった。示方書や規準に書かれておりにコツコツと数字を積み重ねていくことで耐震化が実現する、と信じられてきたのである。こ

のような仕組みは、確かに便利であったし、特別の事情がなければうまく機能していた。

しかし我々は、阪神淡路大震災での手痛い経験を通して、このような（ほとんど）一律の地震外力を想定した体系のもとで耐震設計を行うことでは地震に対する安全性を十分に確保し得ない、ということ学んだのである。被害を受けた構造物は、地盤の条件が特に悪かったり、あるいは、震源にとても近いといった、一律の外力を想定する設計体系の枠組みから大きくはみ出した地震動を受けたために被害を受けたのである。このことは、これからの耐震設計においては、対象構造物を取りまく地震に関する環境、すなわち、震源断層や地盤条件等を考慮した設計用入力地震動を用いて設計を行わなくてはならない、と云うことを意味している。

このような立場を全面的に取り入れてドラステックな改訂を最初に行ったのが「港湾の施設の技術上の基準」¹⁸⁾であった。特にレベル2地震動については第三次提言における定義と整合するよう配慮されている。さらに、要求性能、性能規定など遵守すべき事項が省令、告示およびその解説として明示される一方で、具体的な手法の選択は設計者の責任ある判断に委ねられるようになった、という点で従来の設計規準から大きく踏み出した意欲的な内容となっている。

このように、阪神淡路大震災以降、2段階設計法と性能規定型設計法が取り入れられて、設計体系そのものが新しい方向へ大きく舵が切られただけでなく、入力地震動を決定するというプロセスそのものが設計体系の中に組み込まれなくてはならない、という必然性が生じたことを正しく理解しておくことが重要である。すなわち、1.で述べた耐震設計における3つのステップのうち、最初と最後のステップで大きな方向転換があった、ということである。

かつて行われていたような、一律の地震外力のもとで設計を行うという、便利ではあるが、前近代的な設計法へはもはや後戻りできない。これまでのように設計用入力地震動は他人まかせ、ということでは設計そのものが成り立たないのであ

る。くどいようであるが、設計技術者は、対象とする構造物の構造様式や材料特性だけでなく、その重要度等にまで目を配ったうえで、地震の物理に基づく設計用入力地震動を責任を持って決定することが強く求められている、ということ強調しておきたい。

4. 土木学会「提言」における設計用入力地震動の基本的な考え方

4.1 「提言」の概要

阪神淡路大震災によって土木構造物が非常に深刻な被害を受けたことを契機として、設計用入力地震動について、少なくとも大きな枠組みとしての共通の考え方を持つ努力が行われるようになった。これには、阪神淡路大震災後に土木学会から発表された「土木構造物の耐震規準等に関する提言」(1995年5月)¹¹⁾、および「同、第二次提言」(1996年1月)¹²⁾が大きな役割を果たしている。

これらの提言の骨子は、

- ・土木構造物の耐震性能の照査では、レベル1とレベル2地震動という2種類の地震動を適用し、
 - ・土木構造物の保有すべき耐震性能と耐震設計法は、設計対象構造物の重要度を評価し、適用すべき手法を選択しなくてはならない、
- という点にある。すなわち、第一次、第二次提言におけるもっとも重要な点は、土木構造物の耐震設計にあたっては、異なるレベルの2種類の地震動を考慮する「2段階設計法」と、それぞれの設計レベルに応じた「性能規定型設計法」を導入するということであった。これらはそれぞれ、1.で述べた耐震設計における3つのステップのうち、最初と最後のステップに対応すると考えてよいであろう。

ここで、レベル1地震動とは、構造物の使用期間中に1~2回発生すると考えられる強さの地震動であり、レベル2地震動とは陸地近傍で発生する大規模なプレート境界地震や内陸の直下の地震による地震動も対象とした、非常に大きな震動を伴うが発生確率が極めて低い地震動とされている。また、設計にあたっては、構造物の重要度を

考慮したうえで保有すべき耐震性を評価しなければならぬことになっており、重要度を規定する要因として人命・生存に与える影響、避難・救援活動や二次災害防止活動に与える影響、地域の生活機能と経済活動、都市機能の早期復旧に与える影響等が挙げられている。

第一次提言のすぐあとの1995年7月に全面改訂された国の防災基本計画²⁰⁾においても、その第2編第1章第1節「地震に強い国づくり、まちづくり」の冒頭部分に、「構造物・施設等の耐震性の確保についての基本的な考え方」として、レベル1とレベル2にほぼ対応する2種類の地震動に対して耐震設計をすべき、と記述された。2段階設計法の考え方は、耐震設計に対する国の基本方針として位置づけられたのである。

このうち、第一次、第二次提言を実務に反映させるべく、記述内容を具体化するための努力が行われ、2000年6月に「第三次提言」が公開された¹³⁾。この中で、レベル2地震動は「構造物の耐震設計に用いる入力地震動で、現在から将来にわたって当該地点で考えられる最大級の強さを持つ地震動」と再定義された。第一次、第二次提言では、レベル2地震動は「極めて稀であるが非常に強い地震動」という発生確率を念頭においた定義となっていた。しかし、海溝部で発生する大規模なプレート境界地震と内陸の活断層で発生する地震はいずれも大きな地震動強度を示すと云う点では共通であるものの、その再現期間が大きく異なるため、第三次提言では発生確率に関する記述を廃し、レベル2地震動の尺度として地震動強度のみが採用されることとなった。

一方、レベル2地震動の位置づけが明快になるにつれて、レベル1地震動の定義の曖昧さが問題になりつつある。この問題に対する一つの提案として、2003年11月に土木学会地震工学委員会からレベル1地震動相当の地震動に対するイメージが提示され、今後の耐震設計における入力地震動の設定に対する新しい考え方の方向性が示された²¹⁾。これは、コストの概念を耐震設計の枠組みのなかに採り入れることで耐震設計の最適化を行おうとする新しい考え方を含むもので、今後のより深い

議論が望まれるところである。

4.2 レベル2地震動

設計体系における地震ハザードのモデルの一つとしてのレベル2地震動は、従来型の耐震構造物だけでなく、制振構造物や免震構造物などに対する様々な設計体系の根拠となる設計入力地震動である。これは自然からの外力として、構造種別や重要度によらず、できる限り共通の物理的条件のもとで取り扱われるべきものである。第二次提言は、そのハザードとしての地震動を応答スペクトルまたは時刻歴波形で表そう、と主張するものであった。

第三次提言では、この考え方をさらに推し進めて、レベル2地震動について、基本的な考え方や評価方法が平易な解説とともに具体的に記述されている。

既に述べた通り、第三次提言において、レベル2地震動とは「構造物の耐震設計に用いる入力地震動で、現在から将来にわたって当該地点で考えられる最大級の強さを持つ地震動」である。これを評価するにあたっては、主として以下のような考え方に基づくよう定められた。

- ・震源断層を想定して評価する（震源依存）。
- ・強震動予測手法によって対象地点を特定して評価する（地点依存）。
- ・震源断層が特定されない場合でも、マグニチュード6.5程度の直下地震が起こる可能性に配慮するものとし、これによる地震動をレベル2地震動の下限とする。
- ・確定論的地震動評価法を基本とするが、地震の発生確率にも配慮する。
- ・レベル2地震動で対象とする地震は単一の地震に限る必要はなく、また、同一地点にあっても対象とする構造物の動的特性に応じて対象とする地震が異なる場合もあり得る。

すなわち、レベル2地震動は、対象となる地震を選定したうえで、そのような地震が発生した場合の地震動として設定することを原則としている。従って、対象地点と構造物、震源断層の3者を特定して、はじめてレベル2地震動が決められるの

である。

また、レベル2地震動を規定する場所(基準面)として、工学的基盤面の露頭している解放面または当該対象地点の地表面を基準として設定することを原則としている。地表面を基準面とする場合には、工学的基盤面より浅い表層地盤による非線形増幅特性を考慮できる手法で評価することを求めている。

これまでの地震による地表地震断層の出現や被害との関係を考慮したうえでマグニチュード6.5程度の地震は地表に痕跡がなくとも発生する可能性があり、レベル2地震動を設定する際には、これを考慮するよう求められた。これは、第二次までの提言では陽に述べられていなかったが、たとえ震源断層が特定されないような場所で設計を行う場合であっても、マグニチュード6.5程度の直下の地震がレベル2地震動の下限値を与えることとなる。

「提言」では、地震の発生確率を考慮する場合を確率論的地震動評価と呼んでおり、地震の発生確率を考慮しない場合は確定論的であるとして区別している。しかし、確定論的地震動評価を行う場合であっても、対象地震の断層面の位置、地震の規模、想定する断層の破壊過程や地震動の評価方法等には種々の不確実性が含まれており、これらの不確実性の存在を認識しておくことが重要である点についてもあわせて指摘されている。

また、現時点では、過去の地震データが得られている期間の短さ、活断層データの精度などを考慮すると、地震のような低頻度の現象を確率論的に取り扱って地震危険度レベルを議論することはオーダーの評価が精一杯であり、定量的にそれ以上の細かい議論を行うことは困難である。従って確率論的地震動評価によって得られる地震危険度レベルとレベル2地震動とを定量的に関係づけて定義することは難しく、地震の発生確率については基本的には考慮しないこととされた。ただし、地震によるリスクを定量化することは、共通の意思決定規範として、今後、ますます重要となることが予想される。そのためにも、レベル2地震動が当該地点の地震危険度レベルとどういう関係に

あるのか、ということを確認していくことは今後の重要な課題である。

4.3 レベル1地震動

第一次、第二次提言では、レベル2地震動との対比として、レベル1地震動は構造物の供用期間中に1~2度発生する確率をもつ地震動強さを表現するとともに、これを弾性設計法と組み合わせる用いるものとして、その設定に関しては従来(1995年以前)の耐震設計において使用されてきた地震荷重や設計法の体系とノウハウを尊重するのが適当である、とされている。

しかし、第三次提言では、レベル1地震動では、厳密に言えば、従来の地震荷重は地震の発生確率を根拠に設定されたわけではなく、主として1891年濃尾地震以降における地震被害の教訓を活かすため直観的あるいは試行錯誤的に定められてきた側面が強い。

とその定義の曖昧さを明確に指摘したうえで、「レベル2地震動と対比する形で簡明に定義することには相当無理がある」ため、レベル1地震動についての深い議論は行われていない。

「土木構造物の耐震設計ガイドライン²⁾においても、「レベル1地震動は、当面従来の各種土木構造物の耐震設計規準で設定されていた地震動を踏襲する」ものとしている。「レベル1地震動はその設定因子としてレベル2地震動のように自然的要因のみで設定するのではない」という新しい考え方の方向性を示しながらも、それが「具備すべき設定因子の考え方や具体的方法を明確化するための研究を行うことが急務である」と述べるにとどまっている。

つまるところ、土木学会の「提言」によって、兵庫県南部地震以前に行われていた許容応力度設計法における設計スペクトルが、使用性を照査することを目的としたレベル1地震動として取り扱われることになったが、そもそも、レベル1地震動が本当に使用性の照査を目的とした地震動であったのか、ということについては不明な点が多い、ということなのである。

この点について、土木学会地震工学委員会からレベル1地震動に関する新たな考え方が提示されており、それについて以下に紹介する²¹⁾。

レベル2地震動による設計を行うと、ほとんどの場合、構造物の断面はレベル2地震動で決まってしまう。これは、レベル2地震動による設計が終局限界状態を照査するものである以上、ごく自然な成り行きと言える。しかし、だからといって、レベル1地震動はもはや不要である、という意見は土木技術者の間からはあまり聞かれない。レベル2地震動によって構造物の系全体が崩壊しないように設計されていたとしても、レベル1地震動によって弾性限界を規定することで中小地震による被害をコントロールする必要がある、と多くの技術者が考えているのであろう。

ところで、性能規定型設計法においては、各種の限界状態を適切に規定することが重要となる。ISO 2394²²⁾では2つの限界状態、すなわち、終局限界状態及び使用限界状態を規定しており、国土交通省²³⁾はそれらに加えて、修復限界状態を規定したうえで設計対象構造物の目的等に応じて限界状態を選択するものとする、としている。上の議論でふれた「弾性限界」はこれらの限界状態とはやや位置づけが異なり、物理的に地震応答が弾性範囲内であるかどうか、という意味での限界を述べている。国土交通省が例示している限界状態のイメージ²³⁾に、弾性限界を筆者が加筆したものを図2に示しておく。弾性限界と使用限界の位置関係は構造物の使用目的や使用限界の設定方法など

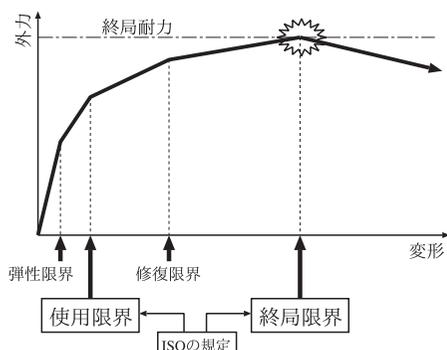


図2 限界状態のイメージ (文献²³⁾に加筆)

によっていかようにでも変化し得るものであり、この図はあくまでも概念的に一例を示したに過ぎないことには注意が必要である。なお、これらの限界状態については5.でも改めて議論する。

レベル1地震動に話を戻す。レベル1地震動は、過去の教訓を活かすことを拠所として決められている、という経緯からもわかる通り、中小地震による被害の制約条件として本当に機能しているかどうかは不明である。たとえレベル1地震動によって弾性限界を考慮した設計を行ったとしても、「供用期間中に1～2回発生する」地震によって構造物の応答が弾性限界を超える確率はゼロではあり得ない。もちろん、このような弾性限界を超える地震の場合でも、その地震動の大きさはレベル2地震動に比して十分に小さい地震動であるはずで、系が崩壊をするということはない。

しかし、もしも構造物の応答が弾性限界を超えた場合には、構造物はなんらかの被害を受け、その被害から復旧するための修理や構造物が使えないことによる経済的損失等のコストを我々は負担しなくてはならなくなる。そして、残念なことに、それがどのような被害で、どれだけのコストを要するのか、について現状では誰も何も言えないのである。

つまり、重要なのは、無被害である確率ではなくて、どの程度の被害がどのような確率で発生し、それによってどれだけのコストを要するか、という期待損失を正しく評価することなのである。

よって、レベル1地震動を用いた設計において期待されるのは、中小地震によって時々受けるであろう被害の期待損失が過大にならないように構造物を設計することである、と言えよう。すなわち、レベル1地震動を単なる弾性限界の指標とするのではなく、地震時および地震後に構造物の機能が経済的に維持できるような地震動と定義することが可能である。これにより、レベル1地震動による設計は当該地点における地震活動度や地盤応答特性、初期建設コストに加えて地震被害復旧のためのコストや被害が社会に与えるインパクトを表す間接被害を考慮したうえで最も経済的な設

計を行うこと、と明確に定義されるのである。

レベル1地震動に対する考え方を上記のように明確化すると、その対比としてのレベル2地震動の意味付けも明快となる。レベル2地震動による設計では、安全性照査として重大な人的被害が発生しないこと、あるいは社会的に重要な悪影響を与えず緊急活動に必要な最小限の機能を確保する、などの経済性に関わらない性能だけを対象にすればよいこととなる。すなわち、レベル2地震動による設計で期待される性能が、経済的評価が困難な人的被害などにかかわる安全性のみに限られる、と云う点でレベル2地震動の役割が極めて明快となる。従って、極端な場合、構造物全体の崩壊が発生しても人的被害等を与えることがないのであれば、レベル1地震動によって経済性照査を行うだけで十分であり、レベル2地震動による安全性照査は必要ないのである。

なお、5.で述べるように、国際規格(ISO 23469)においても地震ハザード解析において、使用性照査と安全性照査のための地震動を評価することが規定されている。本項で述べた設計のための枠組みのもとでは、使用性および安全性の照査がそれぞれ、レベル1地震動、レベル2地震動による設計に対応するものと言え、国際規格への対応という観点からもわかりやすい枠組みとなり得る。

ただし、この新しい枠組みでは、レベル1地震動で断面設計を行い、レベル2地震動で安全性を照査するというこれまでの2段階設計法の枠組みとは大きく異なり、先にレベル2地震動で安全性を確保したうえで、レベル1地震動によって経済性を照査する、という手順となっていることには注意が必要である。

ここまで述べてきたレベル1およびレベル2地震動に対する考え方は、設計の枠組みの考え方の一例にすぎない。特に、レベル1地震動については、現時点では定義そのものに曖昧な点も多く、種々の解釈が提示される可能性がある。設計の枠組みを規定する、ということは一朝一夕に実現されるものではない。本項で述べたような新しい考え方が広く理解され、実務で利用されるようになるまでには、より深い議論が必要である。

本稿執筆時点で最新の耐震規定である「水道施設耐震工法指針・解説(2009年版)」¹⁹⁾では総論においてレベル1地震動の考え方として経済的指標を取り入れることが明記された。このように、新しい考え方が実務レベルへ着実に広がっていることも事実である。今後、レベル1地震動についてどのような提案がなされるにしても、基本となる思想が明確、かつ、国際規格との整合性も高いものであることが求められることは間違いのないであろう。

5. ISO 23469における地震動の考え方

構造物の設計に関する国際規格としては、信頼性設計の考え方に関する一般原則をまとめたISO 2394²²⁾、および、構造物の設計の基本として、建築構造物を中心とした地上構造物への地震作用についてまとめたISO 3010¹⁴⁾がこれまで制定されていた。また、既存構造物の性能評価についてのISO 13822²⁴⁾や、港湾構造物に対する国際ガイドライン¹⁵⁾も既に公けにされていた。しかし、地盤基礎構造物(geotechnical works)のような土木構造物についての国際規格は長らく存在しなかった。地盤基礎構造物にも対応可能である、というような形でISO 3010の改訂が検討されたこともあったようであるが、地上構造物とまったく同じプロセスで地盤基礎構造物の設計を取り扱うことは難しい、との判断のもとで、2002年から日本提案によりISO/TC98/SC3/WG10(地盤基礎構造物の地震作用)が活動を始め、土木学会からの全面的な支援のもとで日本のコンビナーが精力的に国内外の調整を行った。その結果、約3年の歳月をかけて、2005年11月にISO 23469「構造物の設計の基本—地盤基礎構造物の設計に用いる地震作用(Bases for design of structures—Seismic actions for designing geotechnical works)」として国際規格にまとめられた¹⁶⁾。

ISO 23469は、「経験豊かな」設計技術者および規準策定関係者が地盤基礎構造物の設計に用いる地震作用を定める際に遵守すべき指針の体系を示したもので、いわば、codes for code writersとして書かれたものである。以下では、ISO 23469に

見られる設計用入力地震動の考え方について簡単に整理する。

まず、地盤基礎構造物の定義であるが、トンネルや埋設管等の地中構造物、基礎、岸壁や土留めなどの擁壁、杭支持の栈橋や突堤、アースダムや盛土などの土構造物、重力式ダム、廃棄物処理場などが含まれる、とされている。また、先行する国際規格である ISO 2394, ISO 3010, ISO 13822 を引用規格としており、これらの規格の内容と齟齬がないようにまとめられている。

規格の冒頭の「適用範囲 (Scope)」において述べられているように、ISO 23469 で示されている指針は非常に一般化された内容となっている。規格の中では、(当然のことながら) 明示的には述べられていないが、地盤基礎構造物に特有の事象を除けば、その内容はそのまま任意の構造物に対する設計用入力地震動を設定する際に考慮すべきこととして読み取ることが可能である。

耐震設計のための原則として、適切な性能目標を設定することが必要であるが、ISO 23469 では使用性と安全性という 2 つの性能目標を規定し、それぞれの性能目標に応じて地震作用が適切に規定されなければならない、としている。ここで、使用性とは、残留変形は許すがそれを許容値以下とし、かつ、構造物として継続使用可能で経済的に機能回復が可能であること、である。また、安全性とは人的被害と資産に対する被害を最小限にとどめ、崩壊してはならない、としている。このような考え方は、4. で述べたレベル 1 地震動およびレベル 2 地震動による設計の新しい枠組みとよく対応していることが理解されよう。

このように、ISO では安全性と使用性という非常に明確な性能目標を設定しているが、使用性については、構造物の目的等によって様々な「状態」が考えられる。不快でない、といった心理的要素も考慮した使用限界を考えるような場合には、物理的な限界状態である弾性限界と使用限界の関係は必ずしも図 2 のようになるとは限らないであろう。さらに、国土交通省が定義している修復限界²³⁾についても、ISO の使用限界の定義のもとでは、広い意味での使用限界に含まれることになる。

ISO の規定を正しく理解するためには、これらの限界状態 (性能目標) の位置づけや意味についての理解が不可欠であることを指摘しておく。

ISO 23469 における重要な考え方の一つは、地盤基礎構造物の地震作用を決定するにあたって、以下に示す 2 段階の手続きを示している点である。すなわち、

ステージ 1 当該地点に構造物が存在しない自由地盤における地震動を評価する。

ステージ 2 ステージ 1 で得られた結果をもとにして、当該地点に対象構造物を設置した状態で地盤と構造物の相互作用を考慮した地震作用を評価する。

地盤基礎構造物は地盤と何らかの形で接触をしており、それによって地震動が影響を受けることは免れない。このような動的相互作用は、構造物の設計にあたって無視することはできないため、これを 2 段階に分けて評価しようとするものである。構造物によって様々な解析法が存在し、また、簡易な手法から非常に詳細な方法まで解析法は多岐にわたるが、それらの手法についても ISO 23469 では類型化して詳しく解説されている。その詳細は本稿では省略するが、必要に応じて ISO 23469 を参照されたい。

地震ハザードをどのように決定するか、については、性能目標に応じて規定されている。使用性照査のための地震動は、確率論的解析によって評価されなくてはならないが、安全性照査のための地震動は確率論的解析か確定論的解析のいずれかをを用いることとされている。

ここで、確定論的解析では、マグニチュード、断層位置、断層規模、震源メカニズムなどの個々の地震シナリオ (想定地震) を選定した上で地震動を決定するものである。従って、地震の発生確率は考慮しないが、シナリオによる地震動評価に含まれる不確定性は考慮する。それに対して、地震の発生確率も含めて評価するものを確率論的解析と呼ぶ。

使用性照査においては、どのような地震によってどのような被害が発生するか、ということを評価して経済性をも考慮した設計を行うことが期待

される。そのため、地震作用が一つのシナリオに固定される確定論的解析を用いることは適切ではなく、地震の発生確率を考慮した確率論的解析を行う必要がある。

一方、活断層が当該地点の近傍に存在するような場合や、地震活動度が高くてどのようなシナリオの地震が発生するのか予想がつきやすい場合には、確定論的評価によって安全性を照査することが適当である。なぜなら、いつその地震が発生するかについて不明であっても、いつかは地震が発生し、しかるべき地震作用を構造物におよぼすことになる。従ってシナリオ地震に対応できる設計をしておかなければ、地震時に確実に崩壊してしまい、安全性を確保できないからである。もちろん、地震活動度が非常に低いような地域では、ほとんど起こる見込みのない地震に対する備えをすることになって極めて不経済となるであろうし、適切なシナリオ地震を設定することさえも難しいことが予想される。そのような場合には確率論的解析によって安全性を照査することが必要となろう。

以下、地震作用を決定するための種々の手法が詳細に述べられているが、この部分についても本稿では省略する。ISO 23469の本質的な考え方は、上に述べてきた通り、2段階の手順で地震作用を決定し、使用性と安全性という2つの性能目標に見合った地震作用を評価する、という点に集約されるのである。

6. おわりに

大正15(1926)年に最初の耐震設計の指針が示されてからほぼ70年めに経験した1995年阪神淡路大震災によって土木構造物は大きな被害を受けた。甚大な被害を前にしてどのように対処すればよいか、震災後のおよそ10年は多くの専門家が悩み、迷った時期であったと言えるのではないだろうか。1996年以降、数年の間にほとんど全ての土木構造物のための耐震設計規準は改訂されたが、その内容を見ると震災以前の設計規準とこれからの設計法との狭間での苦悩が行間から滲み出しているようなものも少なくなかった。

そのようななかで2003年の土木学会第三次提言、2005年のISO 23469によって耐震設計の枠組みの方向性がほぼ確定し、震災から10年を経てようやく迷いが吹っ切れたように感じられる。これらの文書により専門家の間でのコンセンサスが得られるようになるとともに、個別の構造物の具体的な耐震基準の作成が当面の課題として浮上することとなった。そして、ここ数年は、震災直後に改訂された規準が再改訂される時期に入ったこともあって、新しい耐震設計規準の枠組みに整合するような形で規準の大幅な改訂が行われている。

2007年の港湾施設の耐震基準の改訂はドラスティックで極めてインパクトの高いものであったが、2009年改訂の水道施設についても同様の方向性が打ち出されたことにより今後の耐震基準の方向性が具体的かつ明瞭に見えるようになってきたと考えられる。

これまで耐震設計規準に示されている式に何ら疑いを持つことなくただ単に数字を代入するだけで「設計」ができていたものが、設計とは設計技術者の裁量で行われるべきものである、という至極まっとうな方向へと方向転換をおこなったのがこの15年間の大きな変化である。つまり、設計規準は設計のための手続を記述するマニュアルではなく、設計された対象構造物が満たすべき性能を示すものに変ったのである。これこそが「規準」と呼ばれるものが本来具足すべき機能であろう。現場の設計技術者にも、技術とは「数字を代入すること」ではなく、「規準を満足するように責任を持って適切な手法を選択して設計できること」である、ということが少しずつ理解されはじめている。そのため、これまでほとんど注意を払われていなかった地震という現象について、技術者自らが積極的に勉強をはじめるといった新しい動きが出始めているとも聞く。このことは、本当の意味での本邦における技術の底上げとさらなる発展という観点からも望ましいものである。

このような大きなパラダイムシフトはおそらく阪神淡路大震災のような強力なインパクトなしには達成し得なかったであろう。我々は極めて大きな犠牲のもとでこれを実現したのである。そし

て、現時点では、その犠牲を無駄にしないもつとも適切な方向へ進んでいると信じている。

阪神淡路大震災から15年めにあたる2010年が、新しい耐震設計の枠組みを実務レベルに展開しはじめた記念すべき年として、遠い将来において高く評価されることを願って本稿を閉じたい。

謝 辞

本稿執筆の機会を与えていただいた本誌編集委員会に感謝する。また、本稿をまとめるにあたって、構造物の設計に関する多くの専門家から有益な助言をいただいた。特に、京都大学の澤田純男博士、東京工業大学の大町達夫博士には設計体系全般について、多くの情報を提供していただくとともに、示唆に富む有益な議論をしていただいた。あまりにも多くの感謝すべき人がいるためお名前を省略させていただくが、本稿はこれら多くの方々の暖かい協力なしにはなし得なかったものである。記して感謝の意を表する次第である。

参考文献

- 1) 時松孝次・大町達夫・盛川 仁・翠川三郎：地震・津波ハザードの評価，シリーズ都市地震工学2，山中浩明編，朝倉書店，pp.87-113，2010.
- 2) 土木学会地震工学委員会耐震基準小委員会：土木構造物耐震設計ガイドライン—耐震基準作成のための手引き—，土木学会，2001.
- 3) 日本道路技術協会：鋼道路橋設計示方書案解説，修教社書院，1940.
- 4) (社) 日本道路協会：道路橋耐震設計指針・同解説，丸善，1972.
- 5) (社) 日本道路協会：鋼道路橋設計示方書鋼道路橋製作示方書解説，(社) 日本道路協会，1956.
- 6) (社) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編，丸善，1990.
- 7) (社) 日本道路協会：道路橋示方書 (V 耐震設計編)・同解説，丸善，2002.
- 8) Kawasumi, H.: Measures of earthquake danger and expectancy of maximum intensity throughout Japan as inferred from the seismic activity in historical times, Bulletin of Earthquake Research Institute, Vol.21, pp.469-482, 1951.
- 9) (社) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編，丸善，1980.
- 10) (社) 日本道路協会：道路橋示方書 (V 耐震設計編)・同解説，丸善，1996.
- 11) 土木学会「耐震基準等基本問題検討会議」：土木構造物の耐震基準等に関する提言，土木学会，1995.
- 12) 土木学会「耐震基準等基本問題検討会議」：土木構造物の耐震基準等に関する「第二次提言」，土木学会，1996.
- 13) 土木構造物の耐震設計法に関する特別委員会：土木構造物の耐震基準等に関する「第三次提言」，土木学会，2000.
- 14) ISO 3010: Basis for design of structures—Seismic actions on structures, 2001.
- 15) International Navigation Association, “*Seismic Design Guidelines for Port Structures*,” A.A. Balke-ma, Tokyo, 2001.
- 16) ISO 23469: Bases for design of structures — Seismic actions for designing geotechnical works, 2005.
- 17) Iai, S.: International Standard (ISO) on seismic actions for designing geotechnical works – an overview, Proc. 11th International Conference on Soil Dynamics and Earthquake Engineering & 3rd International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, Vol.1, pp.302-309, 2004.
- 18) (社) 日本港湾協会 (国土交通省港湾局監修)：港湾の施設の技術上の基準・同解説，日本港湾協会，2007.
- 19) 日本水道協会：水道施設耐震工法指針・解説 (2009年版)，日本水道協会，2009.
- 20) 中央防災会議：防災基本計画，1995.
- 21) 土木学会地震工学委員会耐震基準小委員会：土木構造物の耐震設計における新しいレベル1の考え方，土木学会，2003.
- 22) ISO 2394: General principles on reliability for structures, 1998.
- 23) 国土交通省：土木・建築にかかる設計の基本，国土交通省，2002.
- 24) ISO 13822: Bases for design of structures – Assessment of existing structures, 2001.

(投稿受理：平成22年7月7日)