

1. 性能設計と道路橋示方書V耐震設計編の改訂動向

1-1 はじめに

構造物の設計基準における性能規定の概念に関しては、1963年にノルディック建築基準委員会（NBK）がノルディック諸国の建築基準の調和のための検討を開始したのに始まり、既に30年以上の年月を経ている。現在、国際化、グローバル化の進展の中で、国際的な設計基準体系の調和、次世代の合理的な設計基準体系の確立を目的として、これを実現する有力な体系として性能設計法が指向されている。

道路橋示方書においても、現在、①国際化（市場解放、海外との技術交流、ISO）への対応、②多様な構造・工法への対応、③維持管理、耐久性の重視、④コスト縮減等の成果の早期導入、を念頭に、平成12年度中の完成を目標に「性能照査型基準」への改訂に向けた検討が進められている。「性能照査型基準」としては、「構造物が有すべき性能（要求性能）及び設計された構造物が要求性能を満足することを確認するために照査する項目等を規定する基準」として位置付け、このため、荷重に対する構造物の応答値の算定方法や構造部材の仕様等については原則として設計者の自由とすることも想定されている。

以上のような背景のもとで、本章では、国際的に指向されている性能設計の基本理念と体系及び国内外の性能設計基準の動向に関して文献のレビューを行うとともに、道路橋示方書耐震設計編の改訂動向の概要について紹介するものである。

1-2 性能設計

1) 性能設計の意味と定義

最近、性能規定化が必要だ、性能設計の方が有効だ、あるいは、この基準は既に性能設計法が取り入れられている、等々について聞く。ところで、どのような設計法が性能設計法か、あるいは、どういう条件を満たせば性能設計法となるのかについては、それぞれ異なった捉え方をなされているのが現状と考えられる。

耐震設計でいえば、例えば、「兵庫県南部地震に対して、ある安全性を確保する」というような規定があれば、それで性能規定になるのか、それとも、「ある想定地震に対して、構造物の機能（例えば通行機能）を確保する」というように機能を規定するのが性能規定なのか、性能設計の定義に関する共通の認識が必ずしも明確ではないのが現状である。

構造設計そのものは、もともと、「要求された機能をもつ構造物をいかに実現するか」という行為であるため、本来「性能・機能を実現する観点」で「性能設計」ということができる。

それでは、一体どのような体系となれば、性能規定、性能設計法、性能照査型設計法となるのか。

岡村[1]は、性能照査型基準における耐震設計について以下のように書いている。

「設計者は、その創造的能力を用いて、安全で、美しく、機能的な構造物を設計する。

そして、設計された構造物の耐震性能が所要の耐震性能を満足しているかどうかを判定するのが耐震性能照査である。耐震設計基準には、設計で想定すべき地震動及びその地震動に対して構造物に要求する耐震性能を明示する必要がある。そしてその耐震性能を満足するかどうかの判定方法あるいは照査方法が基準もしくはマニュアルに規

定される。…中略…。著者の提案は、所要耐震性能及びその照査の方法を基準には極めて一般性のある方法で記述するにとどめ、具体的な照査方法はその時点における技術レベルに応じて、構造種別ごとのマニュアルに詳細に記載することである。」

さらに、岡村[1]は、性能照査型の示方書とマニュアルを作成するに際しては、①人間が意志決定すべき内容と、科学的に照査すべき内容とを明確に区別する、②現在の基準で考慮されている内容を包含する、③技術の発展を阻害せず、むしろその発展に寄与するものとする、点を前提におくことを提案している。

また、堺[2]は、性能照査型設計法に関して以下のように書いている。

「問題は、現行の設計法のいずれも性能規定と項目規定が渾然一体となっていること、したがって設計レベルが必ずしも合理的に整理されていないこと、及び詳細な規定が設計上の規定の制約になっている場合があることなどである。このような背景に基づいて性能照査型設計法を改めて新しい設計概念として位置付けるとすれば、この設計法が、われわれが現在保有している、あるいは今後の研究・開発により得られるであろう情報・技術を様々なレベルで体系的に整理する上で極めて都合のよい方法となりえるであろう。」

こうした提案等を整理すると、性能設計という従来にはない何か全く新しい設計規範のように聞こえるが、そうではなく、基本的には従来の設計法の延長線上で、従来陰に陽に構造物に要求してきた必要な性能とこれに対する照査項目や照査方法を明確に体系化して規定するということができる。さらに、ここで、重要なのは、必要な要求性能についても、要求性能を照査する手法に関しても、「合理性」を欠いたものであってはならない、あるいは「合理性」を追求したものでなければならないということができる。基準の中でも、規定として必要なものと不要なものを区別し、さらに、技術の進歩に伴い、改良されるものや設計方法など1つの方法に固定する必要のないものは規定からはずし、マニュアルや標準仕様などとして別に整理することが必要とされる。

なお、用語として、「性能規定」、「性能設計」、「性能評価」、「性能照査型基準」、「性能明示型基準」等があるが、一般に、「性能規定」とは、法令の技術基準のタイプや規制手段のことをいい、「性能設計」とは構造物の設計に当たって目標とする性能を明確化した上で、その設定した性能を達成するような設計方法のこととされている[3]。このため、「性能規定」とは、法令が「性能」を規定していることであり、一方、「性能設計」とは目標性能を明確化して性能が実現するような設計をする方法であり、法令の規定とは関係のないことに留意する必要がある。したがって、性能設計法を用いた（性能を明示し、これを評価する手法を示した）法令としての「仕様規定」というものもあり得ることになる。現在用いられている耐震設計法のほとんどは、厳密には、「性能規定」ではなく、「性能設計法を用いた規定」、あるいは、「性能明示型規定」ということができる。

2) 性能設計の利点メリット[3,4,5]

要求性能を規定する「性能規定」の反対の用語として、一般に「仕様規定」が用いられる。例えば、仕様規定は、「〇〇は、〇〇 cm 以上にしなければならない」というように、使用材料や形状、寸法等を具体的に規定してしまうものである。一方、性能規定は、〇〇 cm 以上にしなければならない目的を明確にし、それを規定するものである。本来、仕様規定

も何らかの目的を達成するために、その規定が存在するわけであり、コードの解説等にはどうしてそのような規定が必要か、その値が必要かに関する説明が必要とされる。しかしながら、多くの基準の中には、経験的に決められた規定なども多数存在し、その数値のみが一人歩きし、どうしてその規定が必要であったのかがわからなくなってしまうといった場合もあり得る。

仕様規定は、上記のように、使用材料や形状、寸法等を具体的に規定してしまうので、具体性があり、誰にも理解しやすく、設計に特別高い能力を必要とせず、また、基準に対する適合性の審査が容易であるといったメリットがある。一方、新しい材料や構造が出現した場合に対応しにくいいため、硬直的で、実現すべき目標性能が明確でなく、代替性に乏しく、技術の進歩の障害になる、国際的に異なる仕様が存在することにより国際間の互換性に乏しく国際的な非関税障壁になる、といったデメリットが指摘されている。

性能規定は、仕様規定とは逆に、設計の自由度が大きく柔軟性がある、実現すべき目標性能が明確である、技術の進歩に対応しやすい、基準の国際調和に資する、といったメリットがあるが、短所としては、審査、適合性の判断に高度の技術が必要となること、設計に高い能力が求められること、などが指摘されている。

3) 性能設計体系と従来の設計法との相違点

性能設計体系を示す際には、一般に図1.1に示すような階層化（ピラミッド化）された性能指向型基準体系で示されることが多い[6]。

「目的」では、コードの社会的目的、「機能的要求」では、目的を実現するための機能的要求、「要求水準」では、機能的要求を実現するための要求水準や検証方法の原則を規定する。ここまでを強制力のある基準とされる。具体的な個々の検証方法や検証を満足する具体的な「解」が適合みなし仕様であり、この部分は強制力を有する基準ではなく、技術の進歩に伴い、見直されたり増強されるべき仕様である。

従来用いられてきている基準等の多くは、性能規定、仕様規定が混在して規定されており、いずれか一方の規定とは一概に分類しにくいのが現状である。このため、性能規定化といっても従来の基準が抜本的に大きく変わるのではなく、要求される性能を明確にし、基準としてこうした階層が明確になるとともに、どこまでが強制力のある規定であるかが、性能規定化の重要なポイントと考えられる。

性能規定化が採用された場合に心配される点はいくつか指摘される。設計の自由度が大きくなり柔軟性が高まる反面として、設計の現場において、対応可能な技術者が足りない、評価方法が確立されていない、結果として設計者によって異なるものができ、所要の要求性能を満足できる構造物が造れない、といった点等である。しかしながら、これは、いずれも設計体系の整備で解決が可能であると考えられる。すなわち、図1.1でいえば、最下層の「検証方法」や要求を満たすと見なされる「適合みなし仕様」を充実させることによって、従来と同じ仕様設計も採用が可能になる。ただし、新しい技術など基準にその記述がなければ、従来はその採用が必ずしも容易ではなかったものが、「適合見なし仕様」に記述がなくても、上位に規定される要求性能を満足できるものであれば採用は可能になることになる。したがって、性能規定、仕様規定を階層化することにより、両者の長短所を補った設計体系を確立することを目指しているともいうことができると考えられる。

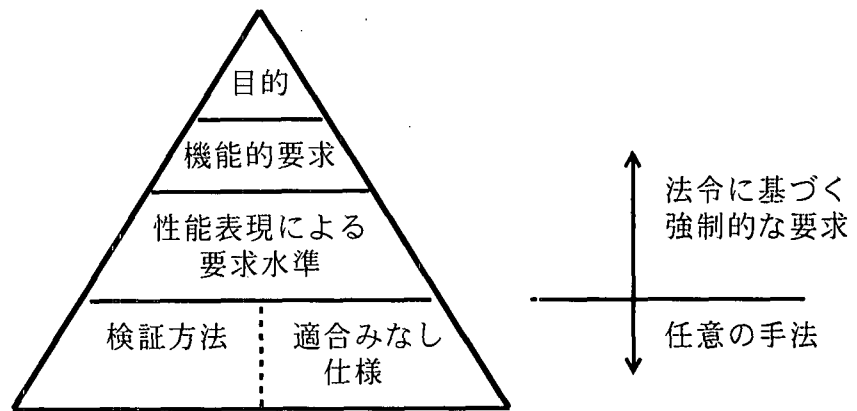


図1.1 性能指向技術基準の階層化モデル

4) 性能設計に関する海外の動向

(1) ISO における性能設計の位置付け [7]

我が国の技術標準を取り巻く国際的な状況としては、国際標準化機構（ISO）規格の制定がある。政府調達協定に関しては、GATT（関税と貿易に関する一般協定）東京ラウンド多角的貿易交渉において、1979年4月に物品を対象とする「政府調達に関する協定」として作成され、1981年1月に発効している。その後、物品からサービス分野までを対象とする改訂がなされ、1996年1月にWTO（世界貿易機関）協定に収録された新協定が発効した。

政府調達に関する協定第6条には、以下のように規定されており、土木に係わる広範囲の技術標準（土木学会等の土木関連の学協会が定めた技術標準を含む）に関しても、国際規格との整合とともに、性能に着目した技術仕様とすることが求められている。

第6条 1項

機関の定める技術仕様であって、品質、性能、安全、寸法等の調達される商品もしくはサービスの特性、記号、専門用語、包装、証票及びラベル又は生産工程及び生産方法について規定したもの並びに機関の定める適合性評価手続きに係わる要件は、国際貿易に対する不必要な傷害をもたらすことを目的として又はこれをもたらす効果を有するものとして、立案され、制定されまたは適用されてはならない。

第6条 2項

機関は、技術仕様については、適当な場合には、(a)デザイン又は記述的に示された特性よりも性能に着目して、また、(b)国際規格が存在するときは当該国際規格、国際規格が存在しないときは国内強制規格、認められた国内任意規格又は建築基準に基づいて定める。

(2) ノルディック諸国

性能規定に関する概念に関しては、1963年にノルディック建築基準委員会（NBK）がノルディック諸国の建築基準の調和のための検討を開始した[3,6]。その目的は、技術革

新と通商の広域化を促進し、産業を活性化することにあつた。1972年に、ノルディック諸国の建築市場の統合、すなわち、労働力の流動性の確保、建築システムや関連製品の通商の拡大などを図るための「アクションプログラム」として結実した。NBKは、その検討の中で、各国の既存の建築基準の内容を理解し、改訂するための共通の枠組みとして建築基準の内容を5つのレベルに分類するという表1.1に示す「NBK レベルシステム」を開発している。このNBK レベルシステムは、欧米の基準策定者に広く活用されている。当時、ノルディック諸国において必要に迫られたとはいえ、性能設計の基本的な理念となる概念が1960年代に初めて開発されたことは非常に先駆的と考える。

表1.1 NBK レベルシステム

レベル	定義
レベル1：Overall Goals	社会及びその構成員の観点から重要と考えられる建築物のあり方の全体的な記述
レベル2：Functional Areas	レベル1で規定された全体的な目標を特定の目的・意図を明確にするために、機能項目及び原則毎に分類したもの
レベル3：Operative Requirements	レベル2で規定された各々の機能項目毎の目的の実現のための要求
レベル4：Verification	要求の適合性の検証方法
レベル5：Example of Acceptable Solutions	要求に適合するとみなせる具体的技術的解(手法)

(3) EC 及び英国

1978年以降、国連ヨーロッパ経済委員会 ECE では、NBK レベルシステムを採用して、検討が行われた[3]。法規制はレベル1～3に、レベル4の検証方法とレベル5の適合すると見なせる具体的事例は強制力のある法規制外に置くべきとし、この方針にしたがってモデル建築コードが作成された。

英国では、かつては建築規則は詳細な仕様規定が多数定められていたが、1970年代後半には、そのような建築規則に対して、複雑すぎ、建築界の活力を抑制しているという批判があり、こうした点に対処するために、1984年に新しい建築法が制定された。ここでは、従来の詳細な仕様規定が廃止され、極めて簡潔な建築規則が定められた。従来からの仕様規定に相当するものは、強制力のない承認基準書として位置づけられている。

(4) ニュージーランド及びオーストラリア

ニュージーランドでは、かつては建築規制は、多数の法や規則、条例などから成り立っていたが、1986年から国の統一的な建築コードを開発すること、性能指向のものとするなどのもとに検討が行われた[3]。1990年に建築コード案(NZBC)がまとめられた。NZBCの構成は、NBK レベルシステムに類似したものであったが、表1.2及び図1.2に示すように5つのレベルで整理されている。現在では、NZBCの階層化が性能指向型の建築

基準の典型とされている。

オーストラリアにおいても全体的な行政改革、規制緩和の一環として、州毎にばらばらだった建築工事に関する技術的基準が全国統一の建築基準に書き換えられた[3]。性能型建築基準に関しても、目的、機能的要件、性能要求基準という明確な階層構造であるが、性能要求水準では、定量的なクライテリアを規定せず、適合みなし規定を強制的な位置づけをもつ建築基準の規定として盛り込んでいる。なお、これは定量的なクライテリアを与えないと法で義務づける基準が不明確になるとの判断による。

表1.2 NZBC レベルシステム

レベル	定義	強制力
レベル1	コードの社会的目的（目的規定）	強制力のあるもの （建築コードに含まれる）
レベル2	レベル1の目的を実現するための機能的要求	
レベル3	レベル2の機能的要求を実現するための建築物またはその構成要素についての要求性能及び適用可能な検証方法または保有すべき特性（いわゆる典型的な性能規定）	
レベル4	レベル3の要求への適合性の検証・予測方法	強制力のないもの （建築コードには含まれない）
レベル5	要求に適合するとみなせる具体的な解（みなし仕様）	

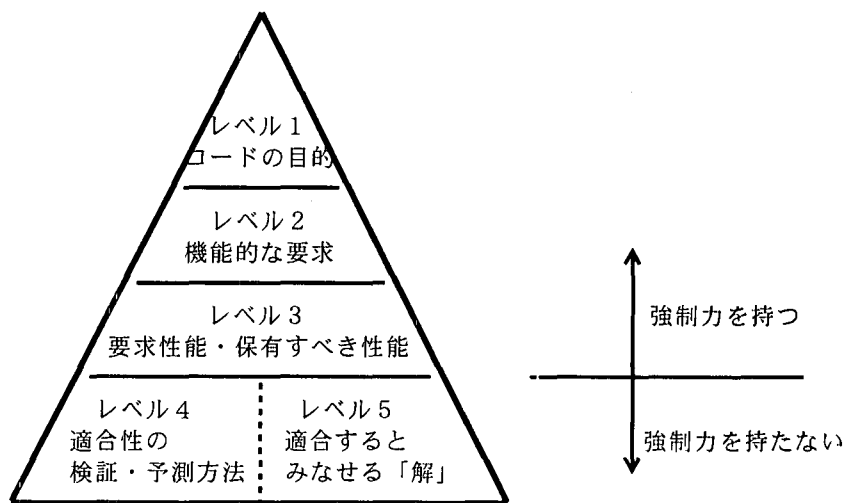


図1.2 NZBC レベルシステム

(5) 米国

米国は、各州あるいは自治体に独自の建築基準の策定・執行を認めており、それらの各主体が準拠するモデル・コードも複数存在する等、独特の地方重視型の建築規制体系を有している。現存する基準は、仕様規定も多く定められているが、現存する3つの主要なモデルコードを統一する動きや性能指向のコード作成の検討が進められつつある[3]。

なお、米国の西海岸を中心に、耐震コードに関しては、性能を基盤とする動きがあり、

カリフォルニア州構造技術者協会（SEAOC）による Vision2000 に示されたパフォーマンス・マトリックスが有名である[8]。ここで提案された地震外力に応じた性能目標は性能設計の典型として紹介される場合があるが、これは、耐震性能、すなわち、地震外力に対する建築物の挙動を明確にした耐震技術の枠組みを作ろうとするもので、必ずしも耐震コードを性能規定化するものとは異なるといわれている[3]。すなわち、目標とする耐震性能は明確にするが、コード自体としては仕様規定でもかまわないという考え方であり、「性能明示型規定、性能明示型設計法」ということができる。

5) 性能設計法に関する今後の課題点及び今後の研究方向

性能規定、性能設計法については、設計法そのものの整備にみならず、それを取り巻く社会環境も整備されて初めて有効に機能すると考えられる。ここで、性能指向化の課題点と今後の研究の方向について指摘されている点をいくつか整理する。

1) 性能的表現の難しさの克服[6]

具体的に「性能指向」基準を策定する段階において、構造安全その他の要求項目について、その目的や要求される内容を「機能」として表現することは比較的容易であるが、その要求される性能レベルを定量的に表現することが極めて難しい。通常、性能が〇〇以下という場合の「〇〇」の数値は、一定の工学的仮定（例えば、特定の評価式、試験法等の適用）のもとで、近似的に定義しうるものである場合が多い。一方、そのような特定の評価式などを基準の要求内容を規定するために使用すると、他の評価方法との互換性が保てなくなる（つまり、他の評価法で性能を測った材料等は、形式上、規定に適合するものではなく）という問題も生じ得る。しかしながら、定量的表現を避けると、「おそれが少ないこと」などといった抽象的な表現にならざるを得ず、法の要求に違反するものであるかどうかという法執行上の厳しい議論には耐え難い規範となってしまう。

このため、機能と性能と具体的な物理現象の関係の明確化、機能・性能の工学的評価法と判断基準の明確化、全ての性能を定量的に評価すること、定量的表現を追求することが必要とされる[9]。

2) 性能評価法：性能規定を満足しているかどうかを誰が何を根拠に判断するか

構造物に要求されるであろう性能の中では、現状の技術では必ずしも十分に明らかにされていないものもある。性能を規定してもその性能の検証方法がない場合や、また、明確に明示しにくい性能も存在する。こうした性能評価法に関する研究が必要とされる。例えば、以下の点が指摘されている[2,9]。

- ①構造物の挙動の時間軸による把握（性能の時間的変化の予測、劣化の予測、寿命予測）
- ②初期欠陥や荷重・環境作用が構造物の耐力や耐久性に及ぼす影響
- ③微気候を含む環境条件の評価

このため、性能の評価法・検証方法に関する研究を充実していく必要があると考える。性能規定では、求める性能が規定され、その性能を検証するための標準的な試験方法や解析方法が規定されたり、また、既にその性能があると認められる適合みなし仕様のようなものが規定されるか、または認定されるかである。特に新技術に対しても、今後、その性能を検証できるような標準的な試験方法・認証システムの開発などが重要になると考えら

れる。

3) 承認基準書や適合みなし仕様の充実

性能指向基準をベースとする設計法を円滑に活用するためには、基準により要求される性能を満足すると見なされる「解」の選択肢を十分に用意しておくことが必要とされる。標準的な検証方法や適合みなし仕様の充実であり、新しい技術であっても認証が増え、一般化されるものに関しては、速やかに承認基準書の中に取り込んでいくことができるシステムの構築が必要とされる。

また、性能のみを規定した場合、従来経験のない新技術などが採用されられ場合に、所要の性能が得られない場合も十部に想定される。こうした点に対処するためにも、設計施工品質の的確性の評価法や耐久性に関する手だてについても、基準の中で別途対応していく必要がある。さらに、契約問題なども関連するため、こうした点を含め、全体システムとして整備していくことが重要と考えられる。

4) 合理性を追求すべし

堺[2]によれば、

「科学技術の発達と政治・経済のグローバル化が著しい現代社会にあっては責任の所在があいまいで公平さと透明性を欠く社会システムはもはや機能し得ないことは明らかである。また、日本がこのような日本独特の価値基準に基づいて国際舞台で経済活動のみを行うことは許されない状況となっている。すなわち、国際社会の中で生きていくためには、多くの国が認める、あるいは認めざるを得ない共通のルールの下での「Performance」が求められる。」

と書いている。また、

「誰もが認めざるを得ない原則に基づく限り、摩擦は低く抑えることができる。」

執筆担当者としてもこうした意見に同意を感じずにはおれず、今後、国際化の中で、何事においても合理性を追求していくことが重要と考える。合理性を追求したものである限り、国際社会の中でも十分に通用できるものと信じる。

1-4 道路橋示方書耐震設計編の改訂動向

1) 道路橋における性能設計の指向

道路橋の技術基準である道路橋示方書については、現在、「性能照査型基準」への改訂に向けた検討が進められている。道路橋示方書の改訂では、以下の点に対処することが念頭に置かれている[4,5]。

(1) 国際化（市場解放、海外との技術交流、ISO）への対応

- ・我が国の競争力の向上を妨げず、むしろ促進すること
- ・規定の主旨、意義など基準の透明性を確保すること

(2) 多様な構造・工法への対応

- ・多様な技術の活用を可能とする契約方式（VE方式、総合評価方式、・・・）の利用
- ・将来、新たに提案される技術にも対応できる柔軟性、普遍性の高い基準であること

(3) 維持管理、耐久性の重視

- ・設計に際して橋梁の維持管理、耐久性への十分な配慮を促す基準であること

(4) コスト縮減等の成果の早期導入

- ・近年、実績と信頼を得た新技術・新工法を速やかに示方書に位置づけられること

上記の4点を実現する基準の在り方として、「性能照査型基準」を目標としている。したがって、性能規定が目的ではなく、上記4点の解決・実現を図る上で、「性能照査型基準」体系が有効となることからこれを目指すというものである。「性能設計」という言葉ばかりが先行して注目されがちであるが、これはあくまで手段であり、上記の課題の解決が重要目的であることに留意する必要がある。さらに、大半を占める中小規模の事業に対し、過度に高度な技術力を要求しないこと、設計、施工上の誤りが生じにくいこと等にも合わせて配慮することとしている。

なお、「性能照査型基準」は、以下のように定義している。

「構造物が有すべき性能（要求性能）及び設計された構造物が要求性能を満足することを確認するために照査する項目等を規定する基準」

このため、荷重に対する構造物の応答値の算定方法や構造部材の仕様等については原則として設計者の自由とすることを想定している。

道路橋示方書では、今後、段階を踏んで、図1.2に示すような改訂が予定されている。最終的には、国の責任で規定すべき事項を含む道路橋構造令等、要求を満たすことを検証する方法と満たされると見なされる仕様からなる標準技術仕様書等、さらに、設計に基本的な事項や技術情報からなる参考資料・便覧等から構成される。なお、標準技術仕様書に関しては、新技術等の開発やその検証に応じて、順次追加されていくことが想定されている。

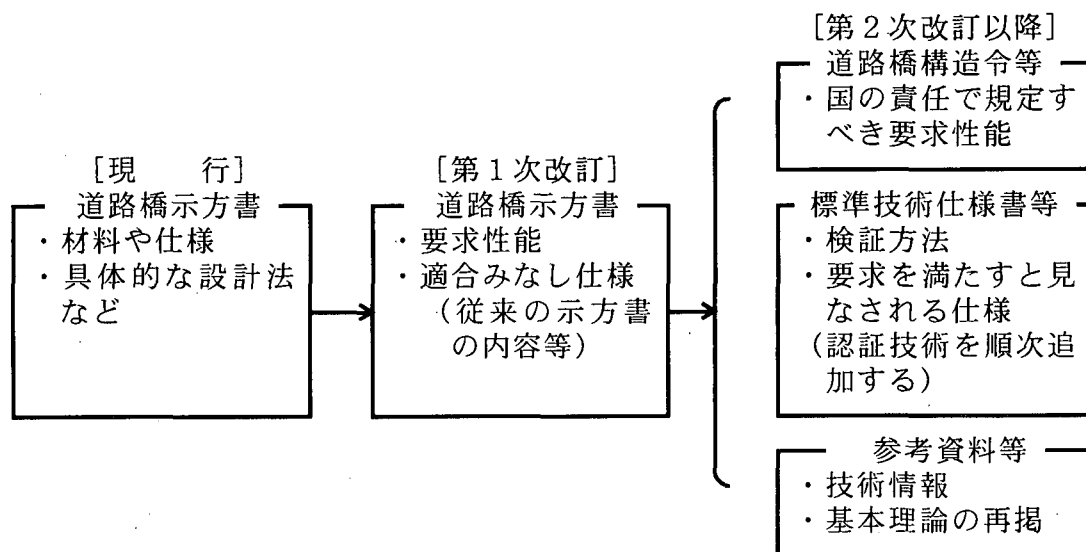


図1.2 道路橋示方書の改訂の方向

2) 道路橋に対する耐震要求性能の比較

現状の世界各国における道路橋に対する耐震性能の考え方を比較すると、表1.3に示す通りとなる。ここでは、道路橋示方書V耐震設計編[10]、欧州 Eurocode 8[11]、米国 ATC-32[12]、米国 AASHTO LRFD Bridge Design Specifications[14]、ニュージーランド New Zealand

TRANSIT Bridge Manual[15,16]の比較を行っている。道路橋のみならず他のコンクリート構造も対象としたものであるが、土木学会コンクリート標準示方書耐震設計編[17]についても示している。

設計地震動に関しては、基本的な考え方はいずれの国でも同様であり、比較的起こり得る中小地震と希に起こる大規模地震の両者に対して、それぞれの地震の規模に応じて必要な機能を確保したり、崩壊を防止するなどの限界状態が設定されている。ただし、具体的な設計照査においては、我が国のように2段階の地震の影響に対して性能を具体的に照査する場合と、大規模地震に対する照査のみを行う場合に分類される。

一方、こうした地震動及び重要度に応じた耐震性能についてもいずれの国においても供用性、安全性、復旧性といった要求性能に基づいて緊急輸送の確保などのサービスレベルと弾性範囲や崩壊しないなどの損傷レベルが設定されている。これも各国で表現は多少は異なるが、本質的な耐震要求性能に関してはほぼ同様の考え方と見ることができる。

3) 道路橋示方書耐震設計編の改訂動向

道路橋示方書の改訂に関しては、現在、日本道路協会に設置されている橋梁委員会において審議されているところである。ここでは、改訂検討されている概要に関して示したが、内容に関しては委員会の今後の議論に応じて変更されるものであることに留意いただきたい。

(1) 耐震設計編の改訂方針

今回の道路橋示方書の全体的な方針としては、上記1)に示したように「性能照査型基準」への移行を目的として、現行基準における要求性能を明示することが大きな柱となっている。

このような観点で現行の平成8年の耐震設計編を見てみると、地震時ならびに地震後において橋に求められる性能は既に明確に示されており、体系的には要求性能を明示した設計基準としての体裁を整えている。ただし、地震時保有水平耐力法による耐震設計を行うことにより、要求される性能がどのように照査されたことになっているのかが、設計者側に必ずしも十分に理解できないような点も指摘されている。また、要求性能を満足させるために、橋が地震時にどのように挙動し、また、地震後にどのような状態が確保できていればよいのかが重要となるが、鉄筋コンクリート橋脚についてはそのような限界状態が明示されているものの、他の構造部材については、限られた範囲でしか説明されておらず、要求性能に対して考慮している限界状態が必ずしも十分に明確にされていない箇所もある。このように、性能照査型基準としての体系を整えるためには、まだ、明確にすべき事項も多く残されているのが現状である。

このため、今回の耐震設計編の改訂では、平成8年の耐震設計編に規定された耐震設計で考慮する地震動と目標とする橋の耐震性能の考え方を基本として、橋の耐震性能の中に考慮されている様々な観点をより明確にするとともに、規定された要求性能を満足させるために橋全体系としてどのような限界状態を考慮すべきであるのか、また、このとき、各部材毎の限界状態としてどのような状態を考慮すべきであるのかをより明確に示すことに主眼を置いて作業が進められている。

表1.3 主要国の耐震設計基準で規定される設計地震動と構造物の耐震性能

各国の基準	設計地震動	耐震要求性能
日本 道路橋示方書 V耐震設計編	1) 橋の供用期間中に発生する確率が高い地震 2) 橋の供用期間中に発生する確率は低いが大きな強度をもつ地震動 ①タイプⅠの地震動（プレート境界型の大規模な地震） ②タイプⅡの地震動（兵庫県南部地震のような内陸直下型地震）	①健全性を損なわない（許容応力度以内：降伏状態を超えるような損傷を生じないこと） ②A種の橋：致命的な被害を防止する（落橋が生じ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こと） B種の橋：限定された損傷にとどめる（橋としての機能の回復をより速やかに行うためにさらに余裕をもった状態にあること、残留変位が許容以内にあること）
日本 土木学会コンクリート標準示方書耐震設計編	①構造物の耐用期間内に数回発生する大きさの地震動 ②構造物の耐用期間内に発生する確率が極めて小さい強い地震動	①耐震性能1：地震後にも機能は健全で、補修をしないで使用可能（鉄筋が降伏せず、コンクリートが圧縮破壊に対して余裕のある状態） ②耐震性能2：地震後に機能が短時間で回復でき、補強を必要としない（耐荷力が低下せず、残留変位が許容限度内） ③耐震性能3：地震によって構造物全体が崩壊しない（一般にせん断破壊に対する十分な安全性）
欧州 ユーロコード8	通常的重要度で、再現期間475年（数値は未確定）の地震動（供用期間50年～100年で、非超過確率が10%～19%相当）	①終局限界状態（非破壊要求） 地震後に適切な残存耐力を有し、緊急輸送路としての機能を確保するとともに、点検・補修が容易であること ②使用限界状態（損傷の最小化） 設計供用期間中に高い確率で起こり得る地震に対して、軽微な損傷で、交通機能を完全に確保するとともに、迅速な補修が可能であること
米国 ATC-32	①機能評価地震動 非超過確率60%の確率的地震動 ②安全評価地震動 確定的な最大地震動あるいは再現期間1000年～2000年の地震動	1) 重要な橋 ①機能評価地震動 サービスレベル：地震直後使用可 損傷レベル：最小損傷（弾性挙動） ②安全評価地震動 サービスレベル：地震直後使用可 損傷レベル：交通機能に影響を及ぼさずに修復可能 2) 通常の橋 ①機能評価地震動 サービスレベル：地震直後使用可 損傷レベル：交通機能に影響を及ぼさずに修復可能 ②安全評価地震動 サービスレベル：地震後数日で緊急輸送確保、数ヶ月で復旧 損傷レベル：崩壊防止、修復には通行止めが必要な損傷
米国 AASHTO	1) 中小地震 2) 大地震 ①重要度の特に高い橋：最大地震動 再現期間2500年 ②重要な橋：設計地震動 再現期間475年（供用期間50年で非超過確率10%）	①中小地震 橋の状態：弾性範囲 ②大地震 ・重要度の特に高い橋、重要な橋：地震直後に緊急輸送の確保 ・その他の橋：崩壊しない なお、損傷の発見・点検・補修が容易であること
ニュージーランド Bridge Manual NZS3101	設計再現期間地震動（再現期間450年）	①設計再現期間地震動 地震後に緊急車輛に対して使用可能であること、原型復旧が可能であること ②設計再現期間地震動よりも小さい地震動 軽微な損傷のみで、交通機能に影響を与えないこと ③設計再現期間地震動よりも大きい地震動 崩壊しない。応急復旧後に緊急車輛が通行可能で、復旧が可能であること（復旧では当初レベルよりも低い耐荷力でもよい）

さらに、性能照査型基準における性能照査法としての震度法や地震時保有水平耐力度、動的解析法等の位置付けを明確にするとともに、これらの手法に基づいて耐震設計を行うことにより、要求性能のどの部分を照査しているのかが設計者にわかりやすくなることを目的として改訂作業が進められている。

また、性能照査型の設計体系を構築して行く上では、その体系を図1.1に示したような階層化を図り、それぞれの位置付けの明確化を図ることが重要となるが、耐震設計編に関しては図1.3に示すような階層化が検討されている。

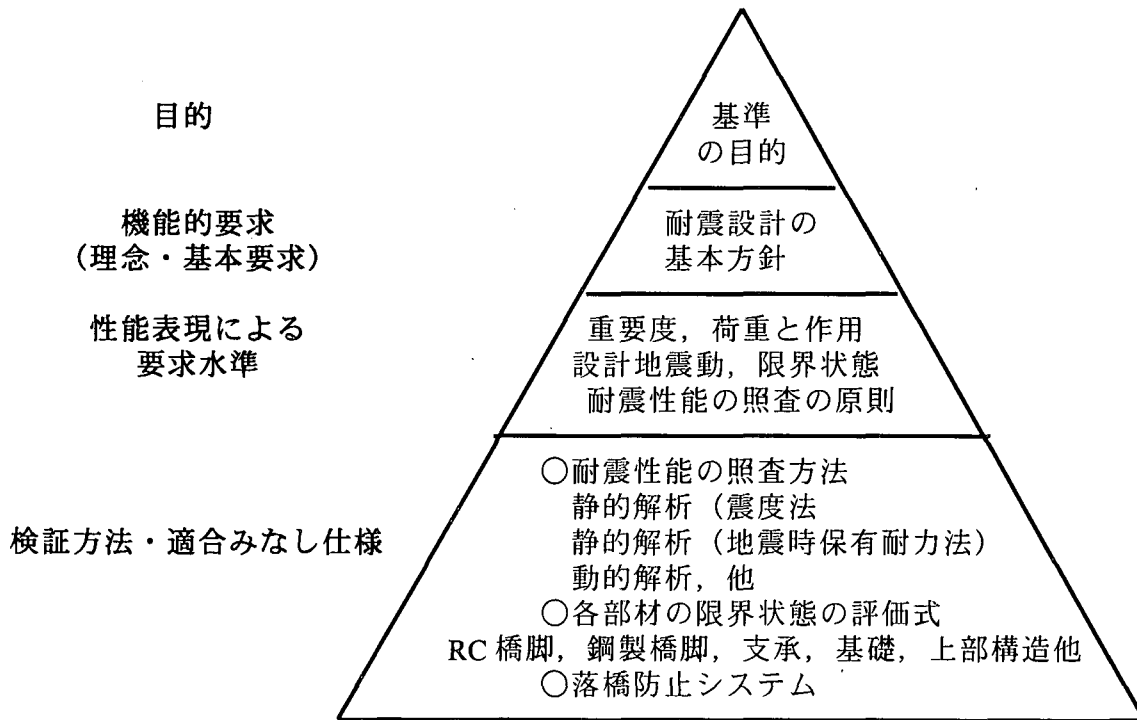


図1.3 耐震設計編の階層化モデルのイメージ

(2) 橋の耐震性能

表1.4は、検討されている耐震設計で考慮する地震動と目標とする橋の耐震性能を示したものである。これは、平成8年の耐震設計編で規定された橋の耐震性能と全く同一であるが、「健全性を損なわない」性能を「耐震性能1」、「橋としての機能の回復をより速やかに行うために限定された損傷に留める」性能を「耐震性能2」、また、「致命的な被害を防止する」性能を「耐震性能3」とそれぞれ定義している。

耐震性能に関しては、その観点として、改めて、耐震設計上の安全性、耐震設計上の供用性、耐震設計上の修復性の3つの観点で整理されている。ここで、耐震設計上の修復性に関しては、「短期的な修復」と「長期的な修復」の2つの観点があることも示している。表1.5は、それぞれの耐震性能に対して、安全性、供用性、修復性の観点から要求される性能を整理して示したものである。

すなわち、耐震性能1には、落橋に対する安全性の確保はもちろんのこと、地震直後においても地震前と同じ橋としての機能が確保でき、かつ地震直後に機能回復のための修復

が必要とならず、また、長期的に必要な修復もひびわれ補修程度の軽微な修復で対応できるようにすることが要求性能の観点として考慮されている。

耐震性能2には、落橋に対する安全性を確保するとともに、地震後において橋としての機能が速やかに回復でき、かつ地震直後に機能回復のために必要な修復が応急修復で対応でき、また、長期的に必要な修復もより容易に行うことができるようにすることを要求性能の観点として考慮されている。

また、耐震性能3には、供用性や修復性の観点からの耐震性能を考慮せず、落橋に対する安全性だけを確保することを要求性能の観点として考慮されている。

ただし、耐震性能の照査において、表1.5は基本的な耐震性能の観点の考え方を示したものであり、ここに示される全ての事項を照査する必要があるわけではなく、例えば、耐震性能1ならびに耐震性能2では、耐震設計上の供用性や修復性の観点から求められる耐震性能を満足すれば、落橋に対する安全性は明らかに確保できるため、一般に耐震設計上支配的な要求項目とはならないことに注意する必要がある。

表1.4 設計地震動と橋の要求性能

設計地震動		橋の重要度	
		A種の橋	B種の橋
レベル1地震動		健全性を損なわない（耐震性能1）	
レベル2 地震動	タイプⅠの地震動 （プレート境界型の大規模な地震）	致命的な被害を防止する （耐震性能3）	橋としての機能の回復をより速やかに行うために限定された損傷に留める （耐震性能2）
	タイプⅡの地震動 （兵庫県南部地震のような内陸直下型地震）		

表1.5 耐震性能の観点

橋の耐震性能	耐震性能の評価の観点			
	耐震設計上の 安全性	耐震設計上の 供用性	耐震設計上の修復性	
			短期的修復性	長期的修復性
健全性を損なわない（耐震性能1）	落橋に対する安全性を確保する	地震前と同じ橋としての機能を確保する	機能回復のための修復を必要としない	ひびわれ補修程度の軽微な修復でよい
橋としての機能の回復を速やかに行うために限定された損傷に留める（耐震性能2）	落橋に対する安全性を確保する	地震後橋としての機能を速やかに回復できる	機能回復のための修復が応急修復で対応できる	より容易に恒久復旧を行うことが可能である
致命的な被害を防止する（耐震性能3）	落橋に対する安全性を確保する	（機能回復は困難な場合もある）	（応急復旧だけでは機能回復が困難な場合もある）	（撤去・再構築となることも想定する）

(3)耐震性能のい照査において考慮すべき橋の限界状態

性能照査型基準では、表1.5に示される耐震性能を達成するために、地震時の橋の挙動をどのような状態までに抑える必要があるかを明確にすることが重要である。耐震性能1～3の照査において考慮されている橋の限界状態を整理すると表1.6の通りである。

平成8年の耐震設計編では、例えば、耐震性能1に対する照査で考慮している橋の限界状態は必ずしも明確に示されていないが、全ての部材において許容応力度以内に収めることを照査することから、「基本的に損傷が生じず、橋全体系として力学特性や振動特性が地震の影響によって変化しない状態」を考慮しているといえることができる。

また、耐震性能2に対しては、部材の塑性化を考慮するかしないかで限界状態が異なるが、塑性化を考慮した設計を行う場合には、「塑性化を考慮した部材には塑性変形が生じているが、その部材が保有する塑性変形性能に対してはまだ余裕があり、修復が困難な残留変形が生じない状態」、塑性化を考慮しない設計を行う場合には、「脆性的な破壊が生じない状態」を限界状態として考えられている。今回の改訂では、このように耐震性能を達成させるために考慮する橋の限界状態を明確にすることにより、性能照査型基準のフレームワークを構築していくことが検討されている。

なお、例えば、耐震性能2の照査において部材の塑性化を考慮した設計を行う場合には、塑性化させる部位として確実にエネルギー吸収を図ることができ、かつ修復を行うことが容易な部位を選定するとともに、地震時に確実にその部位のみが塑性化するようにしなければならないことも規定されることが検討されている。これは、キャパシティデザインの概念を耐震設計に導入していくことの重要性を考慮したものであり、橋全体系としてどの部位に塑性化を生じさせ、どのような挙動とするのが望ましいかを設計者が理解しながら橋の耐震設計を行うという基本的な考え方を耐震設計編の基本理念とするためである。

表1.6 橋の耐震性能と考慮する限界状態

橋の耐震性能	橋の限界状態	
健全性を損なわない(耐震性能1)	基本的に損傷が生じず、橋全体系としての力学特性や振動特性が地震に影響によって変化しない状態(一般に弾性範囲内)	
橋としての機能の回復を速やかに行うために限定された損傷に留める(耐震性能2)	塑性化を考慮した設計を行う場合	塑性化を考慮しない設計を行う場合
	塑性化を考慮した部材に生じている塑性変形が、その部材が保有する塑性変形性能に対してはまだ余裕があり、修復が困難な残留変形が生じない状態	橋に脆性的な破壊が生じない状態
致命的な被害を防止する(耐震性能3)	塑性化を考慮した設計を行う場合	塑性化を考慮しない設計を行う場合
	塑性化を考慮した部材に生じている塑性変形が、その部材が保有する塑性変形性能を越えない状態	橋に脆性的な破壊が生じない状態

1-5 おわりに

本章では、国際的に指向されている性能設計の基本理念と体系及び国内外の設計基準の動向に関して文献のレビューを行うとともに、道路橋示方書耐震設計編の改訂動向の概要について紹介した。

性能設計といった設計体系が根付き、優れた新技術開発がより容易に現場に適用でき、より良い橋梁構造物の実現が可能となることを期待するものである。

なお、本章1-4に示した道路橋示方書の改訂の動向の内容に関しては、現在、日本道路協会に設置されている橋梁委員会において現在審議されてる内容であり、内容に関しては委員会の今後の議論に応じて変更されるものであることに留意いただきたい。

【参考文献】

- 1) 岡村甫：性能照査型基準について－耐震設計－、コンクリート工学、Vol.35、No.11、1997年
- 2) 堺孝司：性能照査型設計法のゆくえ、橋梁と基礎、97-8、1997年
- 3) 建築基準法研究会：建築基準法大改正、日経B P社、1997年10月
- 4) 西川和廣：道路橋示方書の改訂－性能規定化への取り組み－、道路講習会、平成12年3月
- 5) 例えば、日経コンストラクション：性能規定で広がる技術者の裁量、5月28日号、1999年
- 6) 五條渉：性能指向の建築基準とその特性、建築研究所、1998年
- 7) 土木学会：I S O調査検討委員会報告書、1997年
- 8) SEAOC Vision 2000 Committee：Vision 2000, Performance Based Seismic Engineering of Buildings, 1995
- 9) 岡村甫：性能評価とシステムと効果、セメントコンクリート、No.630、1999年
- 10) (社)日本道路協会：道路橋示方書V耐震設計編、平成8年12月
- 11) CEN: European Committee for Standardization：Eurocode 8 - Design Provision for Earthquake Resistance of Structures - Part 2：Bridges, ENV 1998-2：1994
- 12) Applied Technology Council：ATC-32 Improved Seismic Design Criteria for California Bridges :Provisional Recommendations, 1996
- 13) CALTRANS：Bridge Design Specifications, 1993
- 14) AASHTO：LRFD Bridge Design Specifications, SI Unit Edition, 1994
- 15) New Zealand TRANSIT: Bridge Manual, 1995
- 16) Standard New Zealand: Concrete Structures Standard, Part 1:The Design of Concrete Structures, NZS3101:Part1, 1995, Part 2：Commentary on the Design of Concrete Structures, NZS3101：Part2, 1995
- 17) (社)土木学会：コンクリート標準示方書耐震設計編、平成8年
- 18) Edited by T. Tanabe：International Seminar on Comparative Performances of Seismic Design Codes for Concrete Structures, Tokyo Japan, April, 1999, Organized by the Concrete Committee of JSCE
- 19) 運上茂樹：道路橋鉄筋コンクリート橋脚の耐震性能と配筋構造、橋梁と基礎、Vol.33、No.8、1999年

(執筆者：運上 茂樹)