

1. 性能設計および限界状態設計による橋梁の耐震設計体系について

1.1 はじめに

近年、性能設計法や限界状態設計法が国際的に指向されている。性能設計法も限界状態設計法とともに 1960 年代に提案されてから既に 30 年以上の年月を経ており、特に限界状態設計法に関しては設計法の中心として位置付けられている。本章では、橋梁に対する次世代の合理的な耐震設計体系の確立に向けて、性能設計法や限界状態設計法に関する国内外の動向とともに、橋梁の耐震設計体系の構築に関する研究の現状、課題と今後の方向について整理を試みた。

ここでは、性能設計や限界状態設計に関して執筆担当者自身がよくわからない、わかっていないと感じた点を質問（Q）として挙げ、これに対する回答（A）を文献等を参考に作成する形で整理した。このため、用語の定義など非常に初歩的・基本的な部分も含めて整理したため、性能設計法や限界状態設計法にある程度精通されている方々にとっては既に常識と思われる点も多いと考えられるが、敢えて基礎に立ち戻って整理を試みた。

1.2 構造設計

Q 1 : 構造設計とは何か？

土木工学大系 15[1]によれば、設計という定義について、抽象的な表現から具体的な表現として以下のように示されている。

- 1) 利用し得る情報及び素材から、要求された機能を満足するような実現可能な実体を生み出す「情報の交換」
- 2) いくつかの良く認識された段階を包含する、意志決定の繰返し過程
- 3) 与えられた性能上の要求を満足させる構想の完全な総合
- 4) 付随する全てのリスクを評価した上で、多くの代替案よりの選択を行うこと
- 5) 思いついた「あるもの」に具体的な形を与え、その着想の正しさを確認すること
- 6) 種々の制約条件のもとで、特定の課題を最適に達成するように、要素・システムあるいはプロセスを案出すること
- 7) 要求された機能をもち、安全性と経済性が合理的に両立するような構造物をいかにして実現するかを指示する作業（土木学会：土木用語辞典）
- 8) ある製作、工事などにあたり、その目的に即して工費・敷地・材料及び構造上の諸点などの計画を立て、図面その他の方式で明示すること（広辞苑）
- 9) 構造物の用途・目的に対応して、構造の合理性・安全性・施工性・経済性がいかなる形で全うされるかを予見する操作活動

通常、「設計」というと、「設計計算」といった作業にとられる点が多からずあるが、もともと、設計そのものは、上記 7) の定義にあるように、「要求された機能をもつ構造物をいかに実現するか」という行為であり、まさに設計そのものは、性能・機能を実現するという観点で「性能設計」ということができる。問題は、どういう性能を設定し、その性能をどのように照査するかという点を構造物に応じて合理的に明示することである

と考えられる。これを明確化したのが、近年指向されている「性能設計、性能照査型設計法」であると考えられる。

【参考文献】

- 1) 伊藤 学、尾坂 芳夫：土木工学大系 15、設計論、彰国社 1980 年

Q 2：構造設計の目的は何か？

土木工学大系 15[1]によれば、構造設計の目的を以下のように定義している。

「構造設計の目的は、許容し得る危険確率（リスク）の範囲内で、建設中および供用中に予想されるすべての外的作用に対し、所要の安全性・耐久性および使用性を満足する構造物を経済的に作り出すことにある。」

ここで、「許容し得るリスクの範囲内で」と断らざるを得ないのは、構造設計においては避けられない種々の不確実さが存在するためであるとされている。したがって、構造設計の目的は、最も安全なものをつくるということではなく、例えば必要な安全性の確保といった制約条件の中で、経済性あるいは効用の最大化を図ることであるとされている。

また、岡村[2]によれば、構造物の設計について、

「構造物の設計においてまず第一に重要なことは、使用便益の高い構造物を経済的につくり、その使用目的が、耐用期間にわたって安全に達せられ、使用目的に適さなくなる確率を十分に小さくすることである。」

と記述している。こうした使用目的の機能を果たすために、荷重とその累積に対して安全な強度と耐久性をもつだけでなく、その耐用年限期間中に作用するあらゆる外力を支え、波浪、地震などの自然現象や風、雨などの気象条件に耐える必要があり、構造設計では、こうした条件を満足できることを決めることであるとしている。

【参考文献】

- 1) 伊藤 学、尾坂 芳夫：土木工学大系 15、設計論、彰国社 1980 年
- 2) 岡村 甫：コンクリート構造の限界状態設計法、コンクリートセミナー、共立出版株式会社、1978 年

Q 3：構造設計の流れはどのようになるか？ここで、設計基準の役割は何か？

土木工学大系 15[1]では、設計行為の流れを現実の作業過程の流れに照らして図1.1のようにまとめている。大きくは、種々の諸条件の中で目的を達成するために構造物の様式を決定する構造計画と、決定した構造形式が所要の安全性・耐久性・使用性を満足できるように構造解析を通じて形状寸法を決定する2段階に分けられる。設計計算は、外的作用としての「荷重条件」と、構造物の挙動を評価する「構造解析」、さらに、必要な性能を満足しているかを検証する「照査」から構成される。

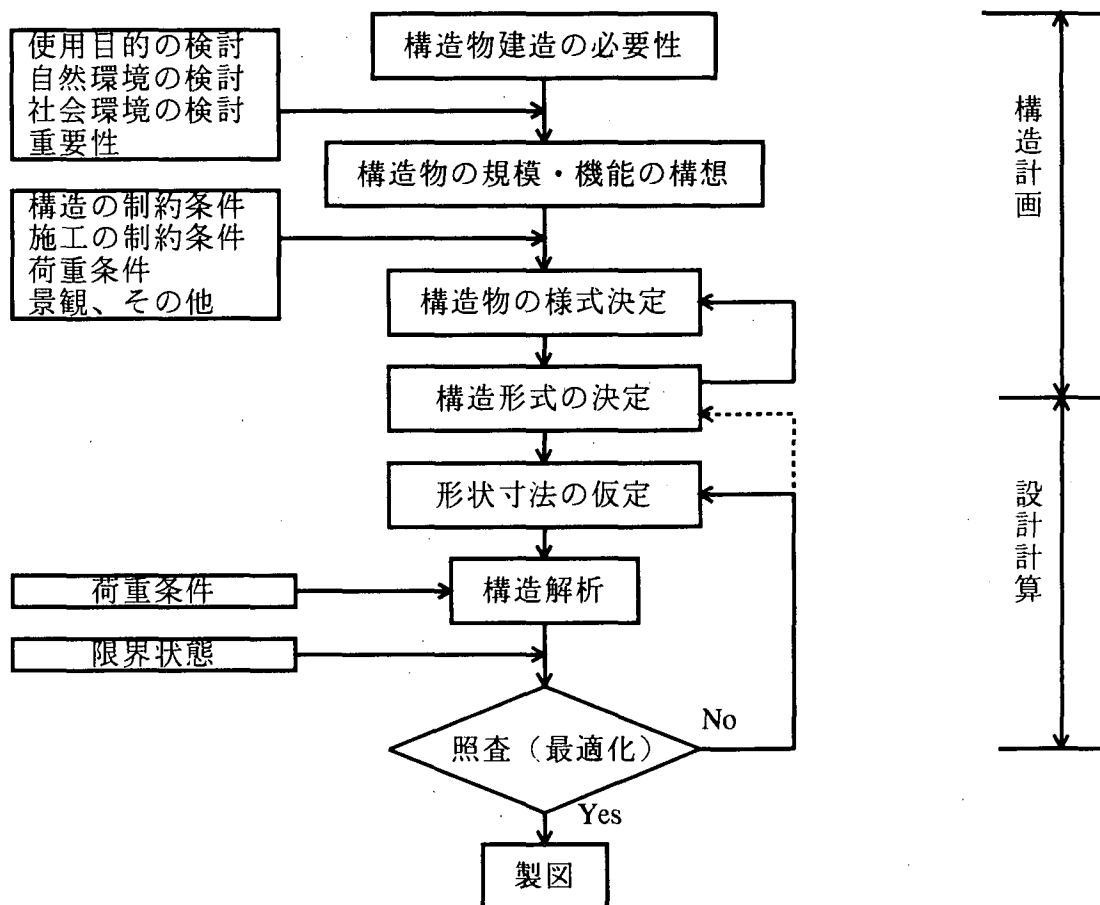


図1.1 構造設計のプロセス[1]

こうした構造設計のプロセスの中で、「設計基準」が果たすべき役割は何であろうか。共通した社会の中で、同じ目的を有する同種の構造物が設計者の裁量によって安全性・使用性等の水準に不均衡を生じるのを避ける必要がある。このため、このような構造物の設計に共通した基本事項、あるいは、構造物の目的を達成する上で必要最小限を規定する設計基準が必要とされる。設計基準では、通常、その役割から、適用範囲、構造物の機能の関連する規格等の基本条件、荷重、材料特性、限界状態、各種の許容値、構造細目といった事項から構成される。

こうした設計基準において、一般に留意すべき事項としては以下の点が指摘されている[1]。

- ①できるだけ単純明快で、誤用を招かないような構成、記述であること
- ②標準的な技術者を対象とすること
- ③設計者の創意工夫、技術的判断の余地を残し、将来の技術の発展を妨げないようなものであること
- ④新たな情報の組込み、技術の進歩への対応が可能なものであること

しかしながら、複雑化する構造物に対して安全性や使用性に対する不均衡を生じさせないようにし、また、主として上記の①と②に重点を置いた場合には、構造物の設計に必要な最小限の基本事項のみならず、結果として構造特性や設計法、構造細目の詳細に至るまでが基準化されることにより、上記の③と④に対する配慮が欠けがちになる等の問題も生じ

ている。必ずしも基準で規定する必要のない事項でも基準に記述があるために、それに従わざるを得なかったり、また、逆に基準に記述がないために新技術の採用が困難であったりする場合が存在する。また、その新技術が本当に所要の性能を満足しているかどうかを標準的に証明する手だてがないために判断ができず採用が困難となる場面なども考えられる。

こうした点を総合的に解決しようというのが、基準として性能のみを規定する「性能規定」の動きであると考えられる。

【参考文献】

1) 伊藤 学、尾坂 芳夫：土木工学大系15、設計論、彰国社 1980年

1.3 性能設計

Q1：性能設計とは何か？

性能設計とは何であろうか。最近、特に、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なのであろうか。どういう条件を満たせば性能設計法と呼んでいいのであろうか。

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。この辺に関する共通の認識が必ずしも明確ではないと感じられる。

上記 1.2 に示したように、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」という行為であり、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ことである。

それでは、一体どうなれば、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である[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。

【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BP社、1997年10月
- 4) 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

Q 2：性能設計のメリットは何か？

通常、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、「○○は、○○ 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り、一方、性能規定は、○○ 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ふ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。

【参考文献】

- 1) 建築基準法研究会：建築基準法大改正、日経BP社、1997年10月

Q 3：道路橋ではどうして性能設計が指向されているか？

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。

- 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。ただし、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。

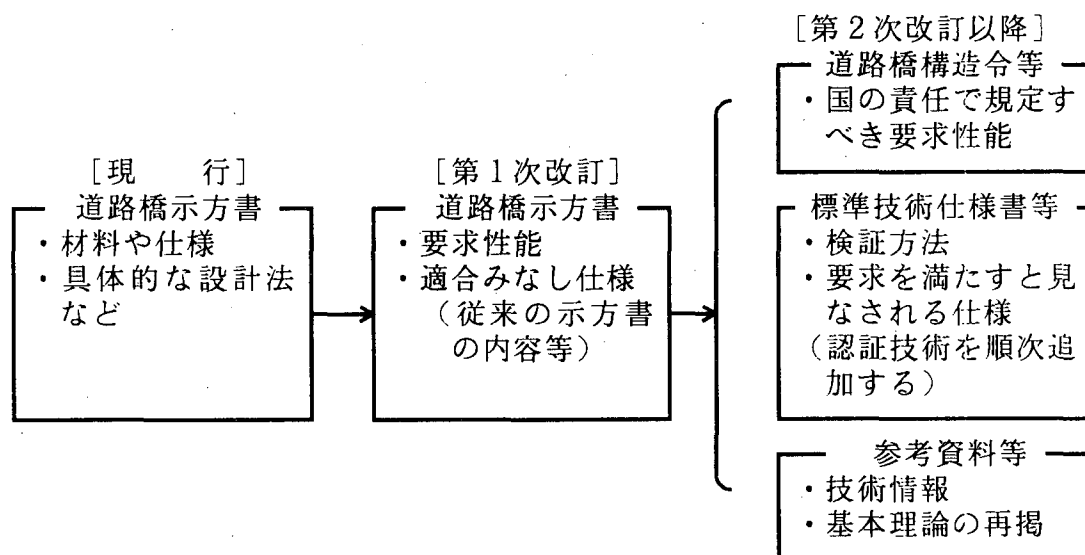


図1.2 道路橋示方書の改訂の方向

【参考文献】

- 1) 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

Q4：性能設計体系の全体の構成は？従来の設計法との大きな違いは何か？

性能規定化が採用された場合に心配される点がいくつか指摘される。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、所用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1.2**でいえば、「標準技術仕様書」に記述される検証方法や要求を満たすと見なされる仕様を充実することによって、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、標準技術仕様書に記述がなくても、上位の道路橋構造令等に規定される要求

性能を満足できるものであれば採用は可能になる。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いえることができる。

性能設計体系を示す際には、一般に図1.3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[1]。「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。

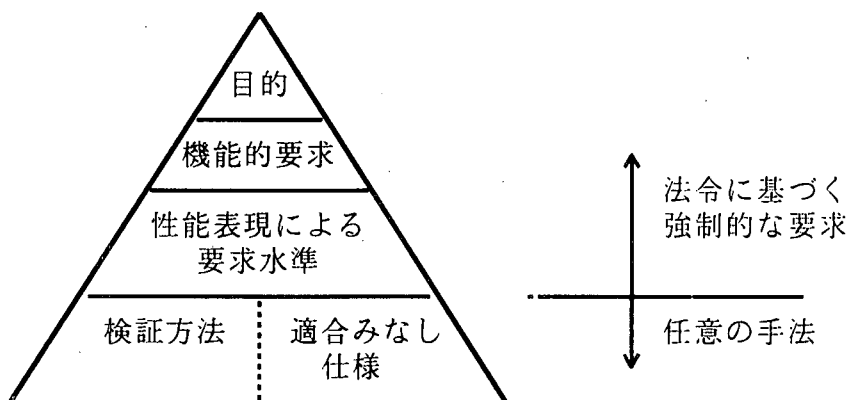


図1.2 性能指向技術基準の階層化モデル

【参考文献】

- 1) 五條 渉：性能指向の建築基準とその特性、建築研究所、1998年
- 2) 建築基準法研究会：建築基準法大改正、日経BP社、1997年10月

Q5：建築基準法の改訂の動向は？

我が国における性能設計については、建築基準法において先行して採用されている。1997年3月の建築審議会答申「二十一世紀を展望し、経済社会の変化に対応して新たな建築行政の在り方に関する答申」が出されており、これに基づいた形で建築基準法の改正が行われている。ここでは、建築基準法改正が必要とされる背景を次の3つに整理している[1]。

- 1) 経済社会の構造的変革と規制緩和の要請
- 2) 構造的変革に対応できる行政の在り方の見直しの要請
- 3) 震災を踏まえた新たな視点からの安全性確保の要請

海外の建築資材等の市場参入の急速な進展、建築物の意匠・構法や材料・設備等の選択の自由の拡大、競争等を通じた建築生産の高コスト構造の是正などの課題があり、こうした社会的環境の変化を背景にして、材料・構法等の選択の自由度の拡大、建築物の価値を決める本質的な要素である性能を重視した設計・生産や取引の拡大等を促すため、性能指向の考え方が強く進められることになった。

社会経済運営の新しいルールへの移行のためには、行政執行の仕組みも簡素で効率的な体制への改革が必要とされる。ここで、重要となるのが、市場重視、明確なルール、透明な手続き等と指摘されている。また、官民の役割分担が、これらのキーワードで見直される必要のあることが指摘されている。

法改正が急がれる直接の要因の1つになったものに、阪神・淡路大震災の経験があるとされている。この震災を通じて、監理、検査などといった建築物の法適合性や品質を確保する仕組みが、法制度上の建前はともかく、うまく機能していないケースもあることが明らかにされた。

同答申では、性能規定化の導入の必要性について、次のように記述されている。

「ライフスタイルやニーズが高度化・多様化するなかで、これに対応して多種・多様な材料、設備、工法等の開発・供給が可能となっている。また、経済活動の国際化の進展に伴い、海外の建築投資等の市場参入の動きが急速に高まっている。こうした状況の下で、建築物の意匠・工法や材料・設備等の選択の自由の拡大、高コスト構造の是正が強く求められているが、現行の建築基準は材料、工法、寸法等を具体的に規定する、いわゆる仕様規定が中心であるため、確保すべき性能水準が必ずしも明確ではなく、固定化した仕様が自由な選択を妨げるという問題を生んでいる。このため、建築物が満たすべき性能項目、性能水準を明確化することにより、技術革新の成果を積極的に採用した新技術や新材料の円滑な導入、海外の基準・規格との整合等を図ることが可能となる仕組みを建築行政の中で再構築することが求められている。」

「建築物単体の基準については、建築主や消費者が多様な選択を行うことができるよう建築設計の自由度を高め、新技術、新材料の開発や導入が円滑に行える新たな基準体系へと再構築すべきである。」

「原則として、建築物に要求される性能項目、性能水準及びその検証方法（計算方法、試験方法等）を規定する「性能規定」へと見直すべきである。」

以上のような背景のもと、建築基準法の改正が進められている。

【参考文献】

- 1) 建築審議会答申：二十一世紀を展望し、経済社会の変化に対応した新たな建築行政の在り方に関する答申、1997年
- 2) 建設省：公共工事の品質確保等のための行動指針、1998年
- 3) 建築基準法研究会：建築基準法大改正、日経BP社、1997年10月
- 4) 建築雑誌特集号－性能規定と構造設計－：建築雑誌、Vo.113、No.1418、1998年
- 5) 特集：仕様規定から性能規定へ、コンクリート工学、Vo.35、No.11、1997年

Q 6 : 建築基準法での耐震性能規定のイメージは？

建築基準法の改正に向けた建設省の総合技術開発プロジェクト「新構造体系の開発」では、人命の保護を目的とする「使用性」、財産の保全を目的とする「修復性」、機能及び居住性の確保を目的とする「安全性」の3つの基本構造性能を設定し、応答値（荷重・外力）が限界値を上回らないことを確認する性能評価法の原則が示されている[1,2]。

「安全性」を要求する目的は、建築物の内外の人命に直接及ぼす危険を回避すること（人命の保護）であり、評価の内容は、各評価対象について人命の保護が損なわれないように破壊等を適切に防止できているかどうかを評価することである。

「修復性」を要求する目的は、建築物が外部からの刺激によって受ける損傷に対する修復のしやすさを確保すること（財産の保全）であり、評価の内容は、各評価対象について財産の保全が損なわれないように劣化や損傷を修復のしやすさの観点（構造性能の回復性、修復工事の難易度、修復に関する経済的損失など）から設定した範囲内に適切に制御できているかどうかを評価することがその内容である。

「使用性」を要求する目的は、建築物の使いやすさ、住み易さを確保すること（機能及び居住性の確保）であり、評価の内容は、各評価対象について機能及び居住性の確保が損なわれないように機能障害や感覚障害を適切に排除できているかどうかを評価することである。

構造性能の水準は、安全性、修復性、使用性に関する尺度で示すものであり、それは、建築主の要求を満足する一方で、社会的な制約を考慮のうえ、文化的・経済的状況を踏まえて、建築主と設計者の合意のもとで設定する。建築基準法は、技術水準に応じて社会的な制約を反映し、必要に応じて構造性能の性能評価項目に対して最低水準を規定しており、個々の建築の構造性能の水準はそれを下回らないものでなければならないとされている。

性能規定型構造基準の基本的構成イメージが、**図1.3**のように示されている[2]。まず、構造安全性の原則が定められ、この原則に対する適合性の検証手順として、4つのルートに大別されている。

1つめの新たなルートは、現行の許容応力度計算と保有水平耐力の確認に代わる新たな検証手順であり、大地震動に対するものと、その他の荷重・外力に対するものである。このルートは、どのような設計法で設計された建築物であれ、設計された建築物が保有している構造性能を評価して検証するものである。

2つめの現行型ルートは、現行の構造計算を基本とした検証手順である。現行を基本とした構造規定（仕様規定）は、一種の適合みなし検証手順となる。

3つめのルートは、一定規模以下の小規模建築物を対象とした、現行を基本とした構造規定である。このルートは、構造計算を要しない仕様規定のみの適合みなし規定として位置付けられる。なお、各々の構造規定が要求している内容はできるだけ明確にし、性能規定化の方向に添うようにすることが望まれる。

4つめのルートは、その他の検証手順や適合みなし規定、民間が作成し認定された検証手順や適合みなし規定、超高層建築物のように特別の審査が必要な建築物を含むものであ

る。

地震に対する要求性能と検証手順に関しては、表1.1に示すような方法が検討されている。

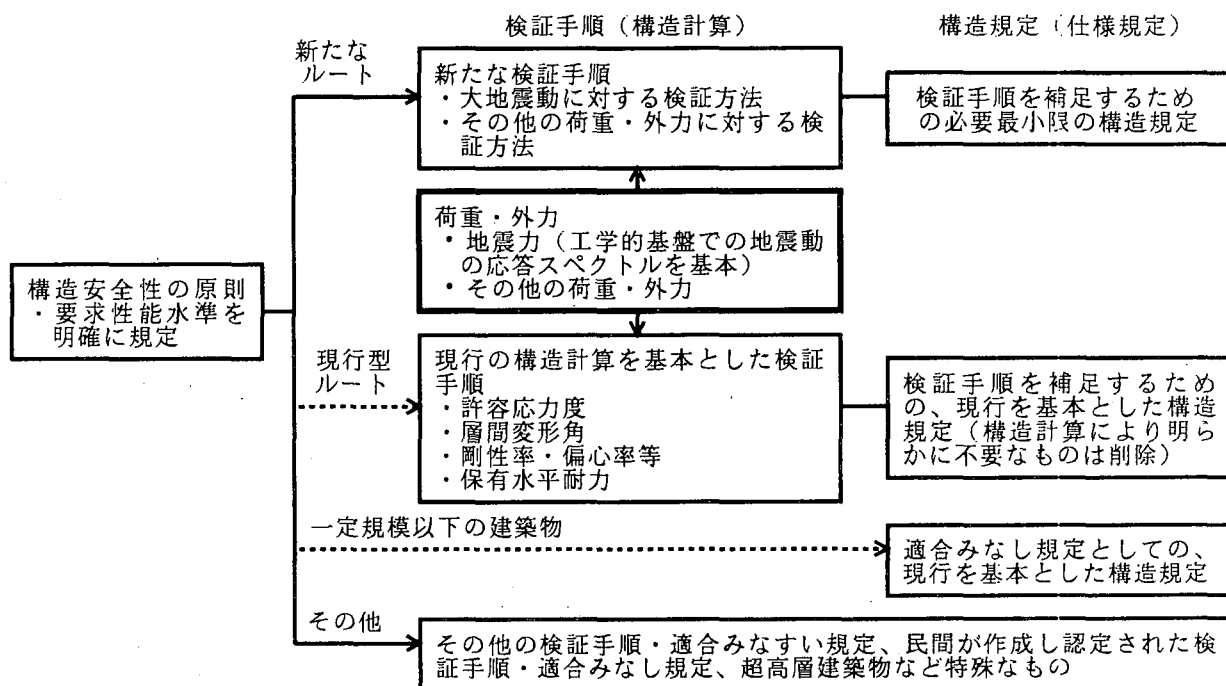


図1.3 性能規定型構造基準の基本的構成イメージ

表1.1 建築物の地震に対する要求性能と検証手順の代表例

要求性能	地震動レベル	応答値	限界値
(a)人命保護 (作用時に階の崩壊を生じない)	想定すべき最大級（過去の記録、地震地体構造、活断層等により設定）	地震によって生じる最大変形	限界変形（塑性域の繰返しの影響を考慮した限界値）
(b)損傷防止 (構造安全性の維持に支障のある損傷を生じない)	1度以上の遭遇を想定（再現期間概ね数10年～50年程度）	各部に生じる応力	限界応力（骨組全体が概ね弾性挙動を示す範囲）
(c)機能性の確保 (機能性を損なう変形などを生じない)	検証の対象外		

【参考文献】

- 1) 勅使河原 正臣、町田 重美：構造設計指針の概要－設計指針作成WG－、「プレストレストコンクリート、Vol.41、No.4、1999年
- 2) 緑川 光正、大川 出：建築基準法が変わる－建築基準法の性能規定化－、JSEEP NEWS, No.160、1998年

Q7：性能設計に関する海外の動向は？ ISO との関係はどのようになっているか？

- 1) ISOにおける性能設計の位置付け[1]

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[2,3]。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った。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1.2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。

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。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

表1.2 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）

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。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1.3及び図1.4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。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1.3 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）	

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

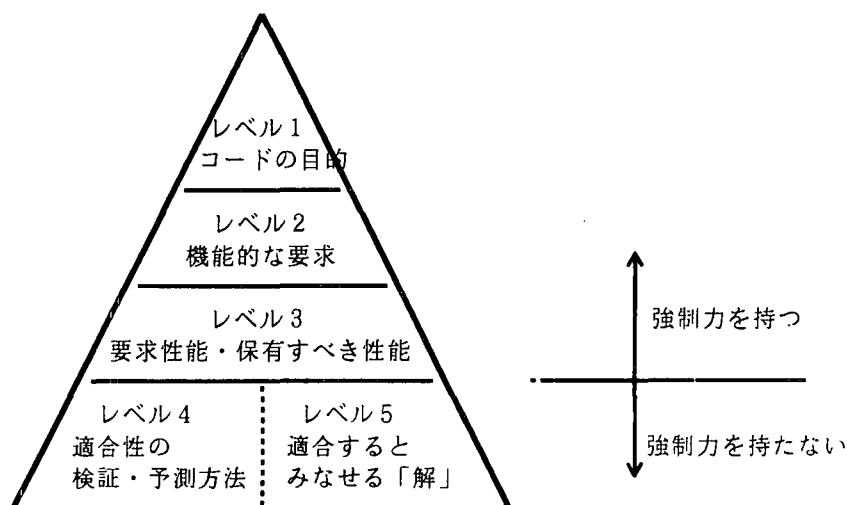


図1.4 NZBC レベルシステム

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。

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。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[2]。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。

【参考文献】

- 1) 土木学会：ISO調査検討委員会報告書、1997年
- 2) 建築基準法研究会：建築基準法大改正、日経BP社、1997年10月
- 3) 五條 渉：性能指向の建築基準とその特性、建築研究所、1998年
- 4) SEAOC Vision 2000 Committee：Vision 2000, Performance Based Seismic Engineering of Buildings, 1995

Q 8：道路橋に対する耐震要求性能の考え方、事例は？

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1.4に示す通りとなる。ここでは、道路橋示方書V耐震設計編[1]、欧州 Eurocode 8[2]、米国 ATC-32 [3]、米国 AASHTO LRFD Bridge Design Specifications[5]、ニュージーランド New Zealand TRANSIT Bridge Manual[6,7]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[8]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。

【参考文献】

- 1) (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
- 2) CEN: European Committee for Standardization : Eurocode 8 - Design Provision for Earthquake Resistance of Structures - Part 2 : Bridges, ENV 1998-2 : 1994
- 3) Applied Technology Council : ATC-32 Improved Seismic Design Criteria for California Bridges :Provisional Recommendations, 1996
- 4) CALTRANS : Bridge Design Specifications, 1993
- 5) AASHTO : LRFD Bridge Design Specifications, SI Unit Edition, 1994
- 6) New Zealand TRANSIT: Bridge Manual, 1995
- 7) Standard New Zealand: Concrete Structures Standard, Part 1:The Design of Concrete Structures, NZS3101:Part1, 1995, Part 2 : Commentasry on th Design of Concrete Structures, NZS3101 : Part2, 1995
- 8) (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
- 9) 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
- 10) 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

Q 9 : 性能設計法に関する今後の課題点、今後の研究の方向は？

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[1]

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

表1.4 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系が崩壊しない(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	通常の重要度で、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)

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[2]。

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 [2,3]。

- 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[3]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。

【参考文献】

- 1) 五條 渉：性能指向の建築基準とその特性、建築研究所
- 2) 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
- 3) 堺 孝司：性能照査型設計法のゆくえ、橋梁と基礎、97-8、1997年

1.4 限界状態設計法

Q1：構造設計法にはどのようなものがあるか？

構造設計法としては、現在大きく以下の3つの方法が実用されている。

- ①許容応力度設計法
- ②終局強度設計法
- ③限界状態設計法

それぞれの設計法の定義を振り返ると以下のとおりである[1]。

1) 許容応力度設計法

「許容応力度設計法」は、鉄筋コンクリート構造でいうと、鉄筋とコンクリートをともに弾性体と仮定し、コンクリートの引張応力を無視して計算した各材料に作用する応力度がそれぞれの許容応力度以下であることを確かめる方法である。安全性は、各材料の強度をそれぞれに対する安全係数で除して許容応力度とすることによって確保する方法である（安全係数は、鉄筋では約2、コンクリートでは約3が用いられている）。材料を弾性体として仮定していることから「弾性設計法」とも呼ばれる。

この設計法は我が国では道路橋を始め、設計法の中心として用いられているが、以下のような欠点から、現在では世界的には使用されなくなってきている。

- ①材料に作用する応力度が必ずしも断面力に比例しないので、この方法では破壊に対する安全度を一定に保つのに不便であること
- ②荷重に関する問題もすべて材料の許容応力度によって取り扱っているために荷重の性質の相違、例えば死荷重と活荷重における変動の相違を考慮しにくく、荷重の組み合わせ

わせの影響を合理的に取り扱いにくいこと

耐震設計の観点でいえば、弾性設計をしているため、構造物にどのように損傷が進展するかといった点を評価できないこと、また、実際の地震時にあたかも構造物が弾性挙動をするような固定観念を設計者に与えるような誤解を招くこと、などが挙げられる。

2) 終局強度設計法

許容応力度設計法の欠点を克服するために、現在多くの国で採用されているのが、「終局強度設計法」である。これは、材料の非線形の性質を考慮して求めた部材断面の耐力がその断面に作用する設計断面力以上であることを確かめる方法である。安全性は、従来の荷重 F_k に適当な大きさの荷重係数 γ_f を乗じて設計断面力 S_d を求めることによって確保する。この点から「荷重係数設計法」とも呼ばれる。この方法は、許容応力度設計よりも破壊に対する安全度の確保という観点では確実であり、また、荷重の特性も荷重係数 γ_f を適当に変えることによって設計に反映することも可能である。

しかし、この方法の欠点としては、以下の点が上げられている。

- ①材料に関わる安全性の問題もすべて荷重係数で取り扱うことになり、材料の特性を合理的に設計に反映することが困難である。これに対しては、断面の終局耐力 R_k に安全係数 ϕ を乗じた設計用終局耐力 R_d を設計断面力 S_d と比較することにし、安全係数 ϕ によって材料の特性を設計に反映させる方法がある。
- ②終局強度設計法は安全性の確保には便利な方法であるが、使用性の確保については別途検討が必要とされる。

道路橋示方書で規定される地震時保有水平耐力法は、この終局強度設計法の1種と考えることができる。

3) 限界状態設計法

終局強度設計法は安全性に重点を置き、必要に応じて使用性を検討する設計法であり、許容応力度設計法は使用性に重点を置き、必要であれば安全性を検討する設計法ともいうことができる。「限界状態設計法」は、これらを1つの設計体系で合理的にとりあげようというものである。この設計法は、1964年にヨーロッパ・コンクリート委員会によってはじめて提唱されたものである。限界状態設計法では、上記の安全性と使用性は、2種類の限界状態すなわち終局限界状態と使用限界状態とを検討することによって確保するというものである。

図1.5は、各設計法の安全性の検討方法を示したものである。限界状態設計法では、荷重に対するものと材料に対するものとの2種類の部分安全係数を用いることが特徴である。安全係数を2種類に分類することによって、鉄筋とコンクリートという異種材料特有の問題も、また活荷重と死荷重あるいは常時荷重と地震荷重のような異なった性質の荷重の問題も、それぞれ合理的に取り扱うことができる。

【参考文献】

- 1) 岡村 甫：コンクリート構造の限界状態設計法、コンクリートセミナー、共立出版株式会社、1978年

- 2) 長 尚：基礎知識としての構造信頼性設計、山海堂、1995 年
- 3) 土木学会：構造物のライフタイムリスクの評価、1988 年

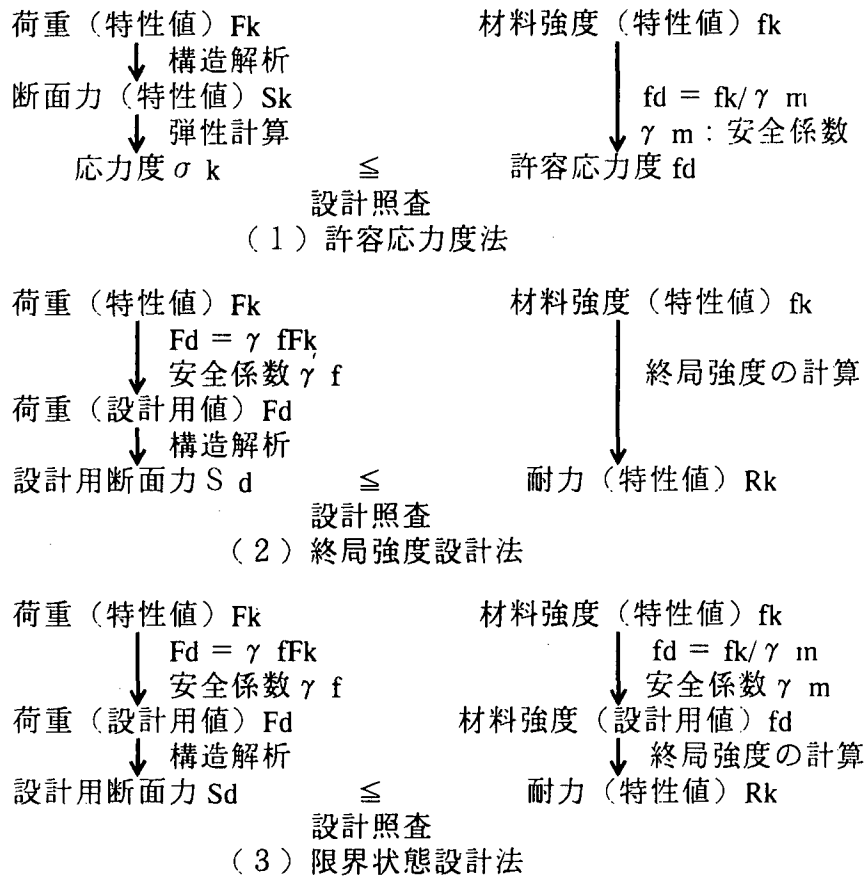


図1.5 各種設計法における安全性の検討方法

Q 2 : なぜ、限界状態設計法が必要か。

文献[1,2]によれば、設計における大前提が以下のように示されている。

「どんな「設計法」によるにしても構造物を設計する目的は「その構造物が果たさなければならない機能を全うさせること」である。ところが、構造物を設計するという行為は、はっきりしない要因、すなわち、不確定要因を抱えたままなされなければならないという現実がある。そこで、このような要因が不利に働いても、機能を全うしなくなるものがほとんど起きないように、通常の状態では機能に十分余裕があるように設計される。しかしながら、この余裕が多くとりすぎると不経済な設計をすることになる。つまり設計には、余裕を見込むということと経済性も配慮するという二律排反の要求のバランスを図らなければならないという難問が常につきまわっている。」

また、不確定要因としては、以下の点が示されている。

- ①作用荷重の不確定性
 - 1)変動性 (ばらつき)
 - 2)時代による変遷
- ②強度の不確定性

- 1)材料強度の変動性（ばらつき） 2)構造物内の強度の不明確
- ③製作・施工誤差
- ④算定・解析方法のもつ不確定性
 - 1)断面力の算定の不確実性 2)強度の算定の不確実性
- ⑤設計で考慮しなかった要因（応力集中、未知など）の存在
- ⑥人的過誤の存在

なぜ限界状態設計法が必要となったかは、上記Q1に示した「許容応力度設計法」、「終局強度設計法」は、主として構造物の全うすべき機能の最も大事なものであるとはいえ安全性のみが考慮され、設計内容が十分に整理されていない、また、不確定要因を確率統計理論などを基礎とした信頼性設計理論の助けを借りてもっと科学的に扱うべきである、という観点から、限界状態設計法が誕生したとされている。

文献[1]によれば、限界状態設計法についてさまざまな定義がなされているが、次のような定義が最も妥当であるとされている。

「まず構造物の施工および使用期間中に、この構造物が遂行すると予期されている機能を全うしなくなる状態（限界状態、すなわち設計において照査しなければならない状態）を明確に定義する。そしてその可能性が十分小さくなるように、できるだけ信頼性理論の助けをかりて構造物を設計する方法である」。

このように、限界状態設計法の特徴は、設計において照査しなければならない状態を明確に定義することと、信頼性設計理論の助けを借りて限界状態となる可能性を一定水準以下にすることの2点にある。前者の特徴は、まさにある性能を発揮できる限界状態に相当することから、まさに「性能設計法」と同等と考えることができる。

【参考文献】

- 1) 土木学会：構造物のライフタイムリスクの評価、1988年
- 2) 長 尚：基礎知識としての構造信頼性設計、山海堂、1995年

Q3：限界状態設計法と信頼性設計法との関係は？

限界状態設計法が理論の拠りどころとしているのが信頼性設計理論である。このため、限界状態設計法にとっては、信頼性設計理論はなくてはならないものと考えることができる。文献[1,2]によれば、信頼性設計とは、

「安全性・使用性・耐久性等の機能（性能）を支障なく遂行する度合（＝信頼性）が、ある合理的な水準以上に保てるように、確率統計理論をベースに設計を行うこと」とされている。

また、文献[3]によれば、

「構造物が耐用期間において、安全性に関する終局（強度）限界状態と機能性に関する使用限界状態の2つの限界状態を考えることにして、それらのいずれかに相当する複数個の危険状態、すなわち破壊モードを抽出し、不確定要因のもとで各破壊モードを確率的にどの程度の発生頻度におさめたらよいかに基づいた設計法」、いいかえると、

「構造物はいかに壊れるかに基づいた確率論的手法による設計法」と定義されている。

信頼性設計法のメリットとしては以下の点が挙げられている[3]。

- ①不確定要因を合理的に取り扱える。
- ②各破壊モードを破壊確率を用いて定量評価できる。すなわち、各破壊モードの安全性に対して相互に均衡のとれた設計が可能になる。
- ③破壊確率で規定して設計されるため、統一された安全性レベルを保証した設計が可能になる。例えば、盛土と橋梁の安全性レベルを同一の破壊確率という尺度で比較することができる。

また、限界状態設計法における信頼性設計理論の導入の程度により、3つの水準に分類されている。

1) 水準 - I

設計で用いる材料強度、及び荷重に確率論的に定義された特性値を用いるとともに、種々の不確定要因を部分安全係数を用いて考慮しようとするもので、「部分安全係数法」とも呼ばれる。ここに、材料強度及び荷重の特性値とは、これらのばらつきが各限界状態ごとに確率論的に同程度の影響を与えるように、それぞれの確率論的な水準を一定とした、材料強度値及び荷重値である。非超過確率（その値を下回る値となる確率）、もしくは超過確率（その値を上回る値となる確率）がある一定値となる水準の値を特性値という。

水準 - I では、信頼性理論は、特性値の部分にしか関与していない。しかしながら、統計的データの不足とか信頼性理論の発達の実状からは、当面この水準にとどまらざる得ない。

2) 水準 - II

水準 - II は、安全性・信頼性を評価する確率に変わる別な簡便な物差し、例えば、信頼性指標（破壊確率に変わる簡便な安全性を評価する物差し）を用いて設計しようとするものである。安全性指標 β は、破壊確率と密接な相関があり、安全性指標の最適な値を定めおき、その値になるように設計する方法である。安全性指標は、破壊モードに関する性能関数の平均値と標準偏差より得られる。この方法は、種々の確率変数の平均値と標準偏差がわかっているならば水準 - III よりも簡便に計算できるが、入力分布形状は考慮できないことになる。

3) 水準 - III

水準 - III は、全面的に信頼性理論を適用し、安全性・信頼性を評価する確率を直接用いて設計しようとするものである。したがって、入力される確率変数の統計的性質、言い換えると、平均値、標準偏差、分布形状までも既知である必要がある。一般に、性能関数と呼ばれる関数に、入力される確率変数の統計的性質を利用して、直接破壊確率 P_f を求め、期待費用最小関数等の評価関数を用いて最適設計を行う。

限界状態設計法では、一般にこの水準 - I の信頼性設計理論を用いた方法をいう。水準 - II、III の信頼性理論を用いて部分安全係数が合理的に正しく設定することができれば、水準 - I の設計法は有効ということができる。

【参考文献】

- 1) 土木学会：構造物のライフタイムリスクの評価、1988年
- 2) 長 尚：基礎知識としての構造信頼性設計、山海堂、1995年
- 3) 星谷 勝、石井 清：構造物の信頼性設計法、鹿島出版会、1986年
- 4) コンクリート構造系の安全性評価研究委員会報告書・論文集、日本コンクリート工学協会、1999年

Q 4：どのような限界状態を想定しているか？

文献[1,2]では、土木学会で検討された鋼構造と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が示されている。検討すべき限界状態としては、いくつか考えられるが、検討方法の相違に基づいて、終局限界状態、使用限界状態及び疲労限界状態に区分されている。終局限界状態は、最大耐荷能力に対する限界状態であり、表1.5に示すような例が挙げられている。使用限界状態は、通常の使用または耐久性に関連する限界状態であり、表1.6に示すような例が挙げられている。疲労限界状態は、繰返し荷重により疲労破壊を生じる状態である。

一方、耐震設計で想定される限界状態としては、表1.7に示すような限界状態が想定される。

表1.5 使用限界状態の例[1,2]

使用限界状態の例	内 容
変形の使用限界状態	変形が構造物の正常な使用状態に対して過大となる状態
変位の使用限界状態	安定、平衡を失うまでには至らないが、正常な状態で使用するには変位が過大となる状態
ひび割れの使用限界状態	ひび割れにより美観を害するか、耐久性または水密性や機密性を損ねるかする状態
損傷の使用限界状態	構造物に各種の原因による損傷が生じ、そのまま使用するのが不相当となる状態
振動の使用限界状態	振動が過大となり、正常な状態で使用できないか、不安の念を抱かせるかする状態
有害振動発生の使用限界状態	地盤等を通じて周辺構造物に有害振動を伝播し、不安感を抱かせる状態

表1.6 終局限界状態の例[1,2]

終局限界状態の分類	限界状態の例
断面破壊の終局限界状態	構造物または部材の断面が破壊を生じる状態
剛体安定の終局限界状態	構造物の全体または一部が、一つの剛体の構造物として転倒その他により安定を失う状態
変形の終局限界状態	塑性変形、クリープ、ひび割れ、不等沈下等の大変形によって構造物が必要な耐荷能力を失う状態
メカニズムの終局限界状態	不静定構造物がメカニズムへ移行する状態
変位の終局限界状態	構造物に生じる大変位によって構造物が必要な耐荷能力を失う状態

表1.7 耐震設計に係る限界状態の例

各種基準等	限界状態の定義の例
道路橋示方書 V耐震設計編	1) 使用限界状態(供用限界状態、降伏限界状態) 健全性を損なわない状態(降伏状態を越えるような損傷を生じない状態) 2) 終局限界状態 致命的な被害を防止できる状態(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前の状態) 3) 修復限界状態(復旧限界状態、早期復旧限界状態、機能回復限界状態、設計限界状態、損傷制御限界状態) 限定された損傷にとどめる状態(橋としての機能の回復をより速やかに行うために終局限界状態よりもさらに余裕をもった状態)
コンクリート耐震設計編(土木学会)	1) 耐震性能3 地震によって構造物全体系が崩壊しない(せん断破壊に対して十分な安全性を有する) 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(地震時にせん断破壊せず、各部材の塑性率が各部材のじん性を下回る)。安全係数は「終局限界状態」における値を使用する。 3) 耐震性能1 地震後にも機能は健全で、補強をしないで使用可能(鉄筋が降伏せずコンクリートの圧縮破壊に対して十分な安全性を有する)。安全係数は「使用限界状態」における値を使用する。
道路橋基礎構造設計法に関する調査速報(首都圏開発センター)	1) 限界状態Ⅰ 設計耐用期間に極めて稀に作用する荷重に対し構造物に壊滅的な損傷が生じない限界の状態 2) 限界状態Ⅱ 設計耐用期間に稀に作用する荷重に対し、構造物にほとんど損傷が生じない限界の状態 3) 限界状態Ⅲ 設計耐用期間に常にもしくはしばしば作用する荷重に対し、構造物の使用上有害な変状を生じず、所要の使用性および耐久性が確保される限界の状態
鉄道耐震設計標準(案)	1) 耐震性能Ⅰ 地震後にも機能は健全で、補修しないで使用可能であり、また地震時に列車の走行性を確保できる。 2) 耐震性能Ⅱ 適度な補修を必要とするが、地震後に機能が短時間で回復できる。 3) 耐震性能Ⅲ 地震によって構造物全体系が崩壊しない。
鉄筋コンクリート造建物の耐震設計指針(案)(建築学会)	1) 限界状態の分類 ①使用性-使用限界状態 ②復旧可能性-設計限界状態(あるいは損傷制御限界状態) ③安全性-終局限界状態(あるいは倒壊限界状態) 2) 使用限界状態 中小地震に対して、ほぼ無条件に継続使用可能とするために設定する応答の限界状態 3) 設計限界状態 大地震に対して、損傷を制御するために設定する応答の限界状態 4) 終局限界状態 極大の地震動やその他の不確定要因を考慮して人命に対する安全性を確保する限界状態

【参考文献】

- 1) 鋼・コンクリート共通構造設計基準小委員会：鋼構造と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、土木学会論文集、No.450/ I -20、1992年
- 2) 土木学会：コンクリート標準示方書、設計編
- 3) 土木学会：コンクリート標準示方書、耐震設計編、1996年
- 4) 日本道路協会：道路橋示方書V耐震設計編、1996年
- 5) 鉄道総合技術研究所：鉄道耐震設計標準(案)、1998年
- 4) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型耐震設計指針(案)、1997年

Q 5 : 部分安全係数法での設計式はどのようになるか？

文献[1,2]によれば、終局限界に対する検討のうち、断面破壊に対する安全性の検討は、**図1.6**に示すように行われる。すなわち、部材の終局限界に対する検討は、設計断面力 S_d の設計断面耐力 R_d に対する比に構造物係数 γ_i を乗じた値が、1.0 以下であることにより行われる。

非線形域の挙動を考慮した地震時の限界状態の設計照査では、断面耐力のみならず、変形や塑性率なども考慮した上での設計基本式となるが、これを記述してみると、**図1.7**のようになる。

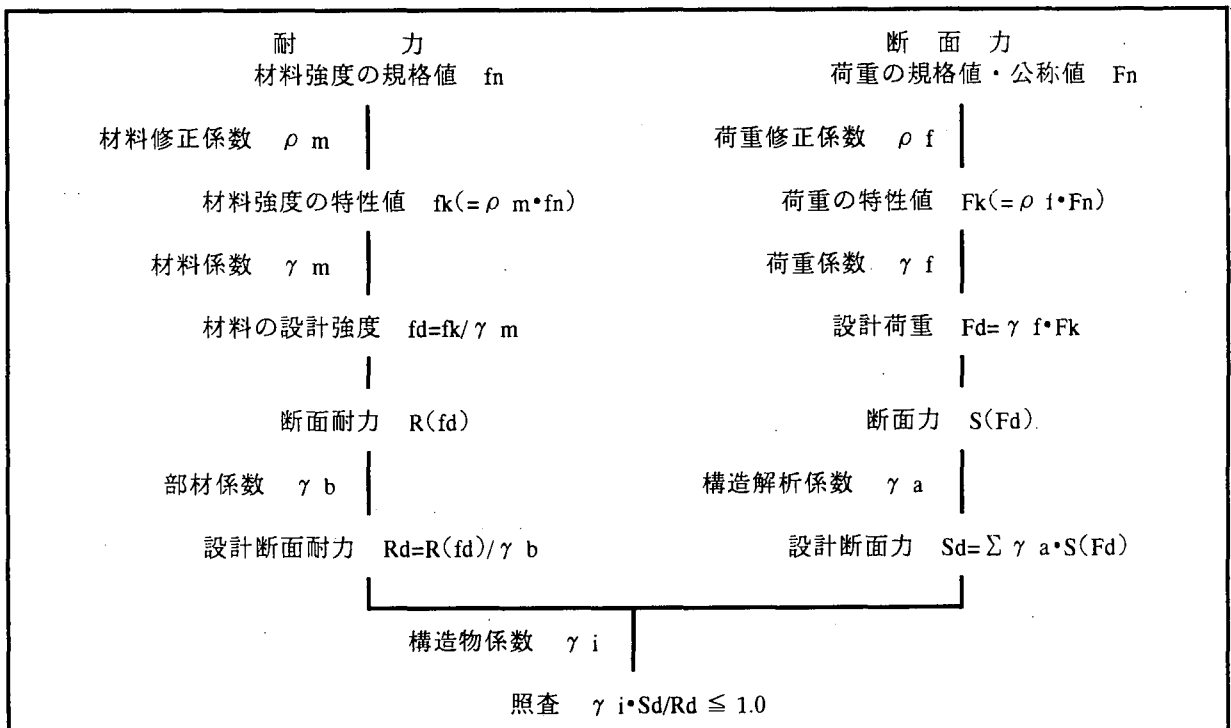


図1.6 断面破壊に対する安全性の検討[1,2]

【参考文献】

- 1) 鋼・コンクリート共通構造設計基準小委員会：鋼構造と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、土木学会論文集、No.450/I-20、1992年
- 2) 土木学会：コンクリート標準示方書、設計編

Q 6 : 限界状態設計法に関する今後の課題点、今後の研究の方向は？

信頼性設計理路値を取り入れた限界状態設計法においては、なんといっても、部分安全係数（荷重係数や抵抗係数）の設定について、必要なデータを収集するとともに、信頼性工学的な検討を行って合理的に設定する必要があると考えられる。信頼性設計導入において解決すべき課題としては、以下の点が挙げられる。

- ① 構造物の限界状態の明確化（限界状態の概念の明確化と定義）
- ② 材料抵抗力及び荷重の基準値の設定法（強度、荷重の確率変数の確率分布等の統計的性質の解明）
- ③ 構造解析技術の明確化（統計的信頼性の向上）
- ④ 破壊の定義、破壊規範の明確化
- ⑤ 許容破壊確率の合理的設定法

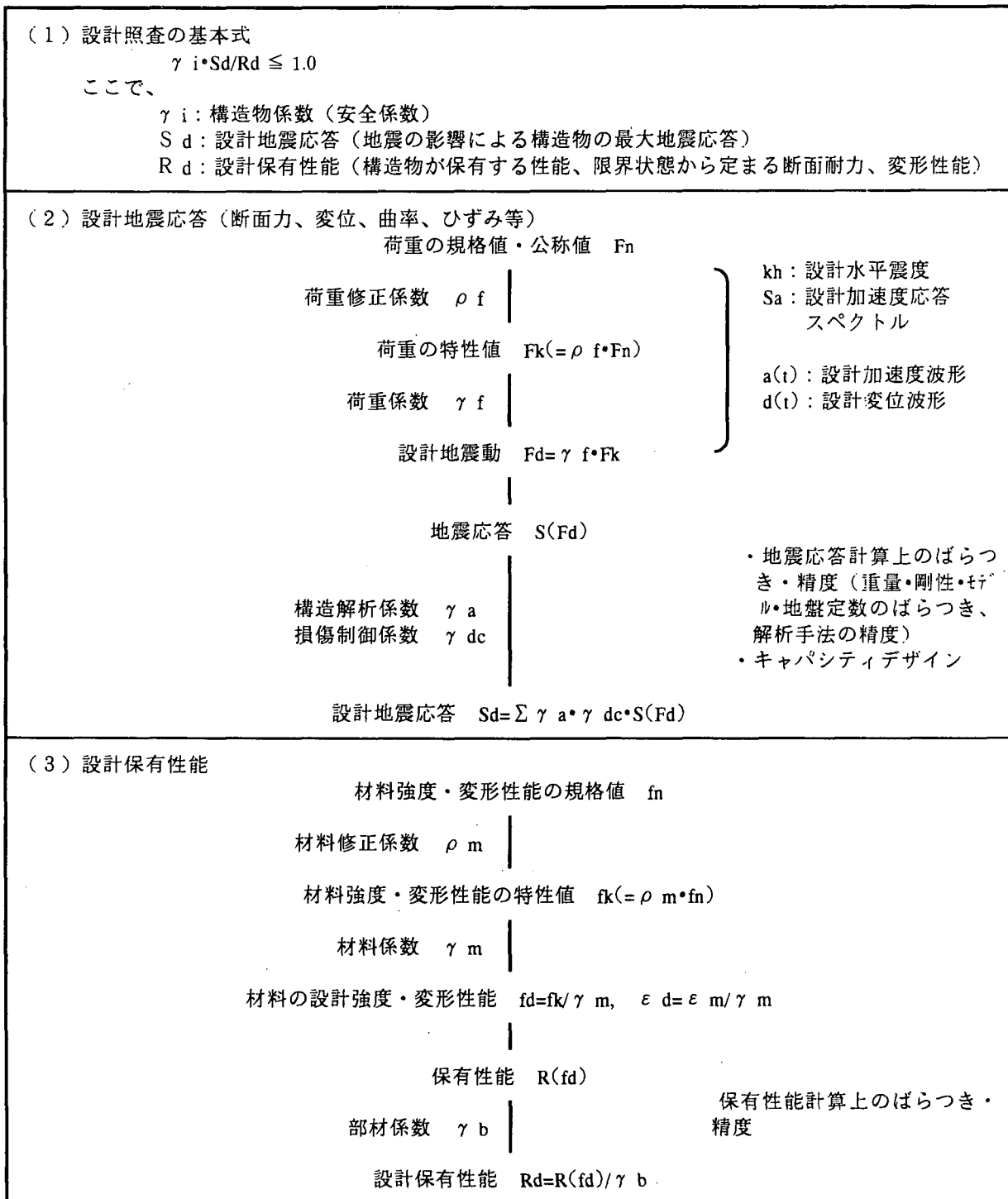


図1.7 耐震設計における限界状態の基本評価式

1.5 おわりに

性能設計や限界状態設計に関して執筆者自身がわくわからない、わかっていないと感じた点を質問（Q）として上げ、これに対する回答（A）を文献等を参考に作成する形で整理してみた。両設計法の基本的な事項のみに終始したが、性能設計法及び限界状態設計法について具体的にどうなればそういった設計法なのかという点について設計法の定義について再確認した。

基本に立ち返って見ると、性能設計法、限界状態設計法といってもその特徴やメリット、設計体系など奥が深く、また、今後さらに検討、研究を要する事項も残されている。今後、こうした設計法が根付き、より良い構造物を設計できるようになることが期待される。

（執筆者：運上 茂樹）