

# 性能設計の動向

中央大学 理工学部 土木工学科 佐藤 尚次

## 1. はじめに

このシンポジウムの主目的は、鋼構造に関する「国際規格・国際標準に関する動向の調査・分析」である。そこに性能設計と題する一節を加えると、既に性能設計が世界の構造設計の主流となっているかのような、誤解を生むおそれがあると思われる。そこで、最初に次の点を明確にしておきたい。

- (1)現時点では、性能設計が世界の構造設計実務の主流となっているという実状にはない。また近い将来その方向に進む、明確な動きがあるという断定も出来ない。
- (2)ただし、ISOをはじめとする、いくつかの国際規格では、「構造物の性能」に関する基本に言及しており<sup>1)、2)</sup>、大きな枠組みとして意識しておく必要があるのはまちがいない。従来から「限界状態設計法への移行」の努力はわが国でもなされてきたわけであるが、「限界状態を明確に認識した設計」、「信頼性の考え方を取り入れた設計」は「性能を評価し、保証する設計」の実現のための最も有効な武器であり、あと少し考えの幅を広げれば、国際標準の大枠に対応していくことは決して困難ではないはずである。
- (3)国際化への対応は、日本以外の「先進国」で行われていることの「情報収集・分析」だけではないはずである。既にキャッチアップの時代ではない。「対抗する戦略の立案」、さらには「国際標準をリードしうる思想や技術の開発、提示」という立場で、積極的に動かねばならない。
- (4)わが国の性能設計への動きは、もともとは一種の外圧（建設資材の規制緩和についての日米交渉）によって発生したものである。しかし行政全般の流れが、大きく規制緩和に向かって現在の性能設計（というより、「構造設計基準ならびに評価認証体制の性能規定化」と表現すべきかも知れない）への動きは、ある程度国内的な社会状況の反映として、意識されるべきであろう。
- (5)だから、ここでは「国際標準としての性能設計」に集中するのではなく、むしろ「性能設計を意識して進められている国内中心の動き」を紹介し、それが長期的に「国際標準の大きな枠組みへの対応」にも「思想面・技術面におけるリード」にもつながり得るものだと、ご理解いただけることを期待して進めてみたい。

話がそれるかも知れないが、上記(4)で述べた行政各方面での「性能規定化」の急速な進展には、驚くべきものがある。建設関連では、河川法や海岸法が最近になって改正されている。今年の春、著者の勤務先で開催された、改正海岸法の趣旨説明会にたまたま臨席させていただいたことがあるが、旧海岸法(1956)では、国・都道府県による管理海岸線の領域とそうでないところを明確に線引きし、管理領域内については、専ら海岸保全を目的に「仕様規定」で管理してきたものが、新法では、従来の非保全区域の中にいわば中間領域である「一般公共海岸区域」を設け、管理を市町村レベルに委ね、保全のみならず環境・利用といった多様な目的に合致するよう、管理の自由度を認めた「性能規定」を導入している<sup>3)</sup>。関与・利用する立場の人間にとっての「性能」を明示していくことは、行政における説明責任原則からも必要なことであり、性能への要求水準を多様化し、その実現のための方策（構造設計もその一環ということになる）を自由化することは、規制緩和の一環という位置づけになる。半面、無制限の規制緩和が受け入れられるわけではなく、当然安全担保のための、何らかの評価・認証システムが必要になってくるはずである。この点については、杉本博之北海学園大学教授が強い関心を抱かれ、本年の土木学会全国大会でも話題提供されている<sup>4)</sup>。

このような、構造設計からはみ出した話題を、何故に出したかといえば、性能設計の論議を、一過性の流行として軽く受け止めていただきたくないからである。戦後の半世紀余、幾度か「体制見直し」の波が存在してきた。費用便益分析の専門家によれば、この手法のブームは過去2度ほどあり、今度が3度目のようである。筆者が関心をもっている、構造信頼性設計にも、やはり社会的な興味が向かう波があり、どうやら費用便益分析のブームと重なるものようである。しかし著者の見るところ、今回の波の大きさ（というより、わが国が直面している「慣行システムの硬直化」の深刻さ）は、かつてないものであって、小手先の対応に終始するならば、国際化対応ということのみならず、他分野の動きにも遅れをとることは避けがたい。金融ビッグバンも、農業基本法の改正も、すべて性能規定化志向である。座視するのは、必ずや後世に悔いを残すものとなる。ここには筆者自身の反省もあり、これは最後に重ねて述べたいと思う。

## 2. 性能設計に関係する外国の規準類

### 2.1 ISO 2394<sup>1)</sup>

鋼構造に関する ISO 規格は TC167 等で扱われ、またウイーン協定の関係で Eurocode(EC)3 との関連性にも注意が払われる必要がある。この点については、他の報告で触れられることになると思うので、深くは述べない。ここで説明させていただきたいのは、ISO/TC98（構造物の設計の基本）で扱われている、ISO2394「構造物の信頼性に関する一般原則」である。この原案作成グループは EC1（現在は EC0 と 1 に分離）とも重複が多く、鋼構造、コンクリート、地盤、耐震等の各分野を包括する、設計の基本となる考え方を与えている。

章ごとの目次を紹介すると、「1. 範囲」「2. 定義」「3. 記号」「4. 要求条件および概念」「5. 限界状態設計の原則」「6. 基本事項」「7. 解析モデル」「8. 確率に基づく設計の原則」「9. 部分係数による設計法」「10. 既存構造物の評価」となっており、さらに付属書 (Annex) として、「A. 品質管理と品質保証」「B. 永久作用、変動作用、偶発的作用の例」「C. 疲労のモデル」「D. 経験モデルに基づく方法」「E. 信頼性に基づく設計の原則」「F. 作用の組み合わせと作用値の評価」「G. 荷重組み合わせの例」「H. 定義の索引」がついている。

「第1章・範囲」の冒頭に、「信頼性は構造物の性能に関して考慮される」という内容の一文があり、また第5章が限界状態設計の原則となっていることから、一般的な枠組みとしての「性能設計」それを具体的に実現する手段、あるいは方法論としての限界状態設計法、という位置づけと理解されよう。設計基準の規制緩和手段としての性能設計を前面に出しているわけではないが、国標標準準対応と、性能設計の関係を考える上では、第一に注目されねばならない規定といえる。

内容的には、抽象的、一般的な原則論が多く、このまま日本語に訳して汎用的な設計の原則にしても通用しそうな部分が多い。しかしその半面、「基準期間、あるいは参照期間 (reference period) という概念が前面に出ている。設計供用期間という概念が出てくることもある」「作用（荷重という用語は例外的に用いられる）の種類を、時間変動性により、永続・変動・偶発に分類している」「要求条件に耐久性と維持管理が明確に示されている」「確率に基づく設計と、部分係数による設計が並べて章立てられており、これらに関連づけて理解しやすくなっている」など、わが国で現在用いられている設計基準とは、異なる概念構成も含まれている。さらに拘束力のない付属書の中とはいえ、付属書Eの中では、表 2.1.1 に示すような、目標信頼性指標の値も提示されている。ただし表中に示される値は信頼性指標  $\beta$  であり、 $\beta = 1.3$  が限界状態確率  $10^{-1}$ 、 $2.3$  が  $10^{-2}$ 、 $3.1$  が  $10^{-3}$ 、 $3.7$  が  $10^{-4}$ 、 $4.2$  が限界状態確率  $10^{-5}$ 、…に対応する。

このように、確率論や信頼性の考え方が多く取り入れられた「設計の基本」は、確かに既往の国内基準と整合性が高いとはいいいにくい。しかしもともと、欧州における戦後の限界状態設計法は、発展過程において、旧ソ連や東欧において盛んに研究されていた、確率論的設計法を取り込んでいたわけであり、わが国におけるキャッチアップの重点が、これまではそこに置かれていなかったともいえるのである。もともと、ISOの諸規定の底を流れる思想の中で、「不確実性のある量を、いかに科学的、合理的に扱うか」という点にはかなりの重きが置かれている。ISO9000s をみても、「記録をシステムティックに残す」という側面に注意が集まっているが、目的は品質管理であって、ばらつきへの対処が目的なのである。

表 2.1.1 ISO 2394 付属書に例示される目標信頼度レベル

安全性の相対コスト	破壊の頻度			
	小	時々	中	大
高	0	A 1.5	2.3	B 3.1
中	1.3	2.3	3.1	C 3.8
低	2.3	3.1	3.8	4.3

注) A：使用限界状態では、可逆的なものは $\beta = 0.0$ 、非可逆的なものは $\beta = 1.5$   
 B：疲労限界状態では、検査の可能性に応じて $\beta = 2.3 \sim 3.1$   
 C：終局限界状態では、安全性クラスに応じて $\beta = 3.1 / 3.8 / 4.3$

このISO 2394への対処を主たる目的として、昨年春より土木学会構造工学委員会の中に「構造設計国際標準研究小委員会（古田均委員長）」の活動がもたれており、今回の講演者とも重複が多い。来年半ばには、内容紹介にも重きを置いた、活動成果報告が行われる予定である。

## 2.2 Vision 2000<sup>5) 6)</sup>

性能設計の関連では、むしろ米国、カリフォルニア構造技術者協会(SEAOC)が1995年に発表した、「Vision 2000—性能評価に基づいた建築物の耐震設計」および、ここで提案されている性能マトリクスがよく知られている。シンポジウムの他の話題提供（山口氏等）と重複するかも知れないが、ISO2394と対比するためにも、簡単に紹介しておく。

この報告書では、設計地震の大きさを、その生起頻度と関連づけて、4つのレベルに分けている。すなわち再現期間43年（30年超過確率50%）；Frequent、72年（50年50%）；Occasional、475年；（50年10%）；Rare、970年（100年10%）；Very rare<ただし地震活動度の低い地域では2500年>である。これらと、地震を被ったときに構造物が示す性能の4つの段階：Fully Operational, Operational, Life Safe, Near Collapse)の組み合わせをマトリクスで表現し、構造物の重要度に応じて、望ましい組み合わせを示している。この例を表2.2.1に示してみることにしよう。

前出の表2.1.1では、性能の要素は「使用限界における可逆・不可逆性」ぐらゐの分類でしかなく、むしろ安全性の相対コスト（重要度に近い概念である）が軸に用いられている、という違いはあるものの、概念の組み立て方には共通したものが認められる。逆にいえば、だからこそISO2394は性能設計の指針である、といえるわけである。

表 2.2.1 Vision2000 の耐震性能マトリクスの例

	Fully Operational	Operational	Life Safe	Near Collapse
Frequent (43年)	C	D	D	D
Occasional(72年)	B	C	D	D
Rare (475年)	A	B	C	D
Very rare (970年)	—	A	B	C

表中、Aは最も重要な構造物（Safety critical objective）に要求する性能。  
 B、CはEssential/Hazardous Objective および Basic Objective で、この順に重要度が低く、DはUnacceptable Performance(for New Construction)とされる。

この性能マトリクスは、拘束力のある規定というよりは、むしろ設計技術者と発注者（建築物オーナー）が、それぞれイメージする耐震性能の間のギャップを埋める目的で示された、一種のガイドラインというべき性質のものである。基本となるデータや考え方の資料はすべて公開され、自由な批判のもとにおかれている。すなわち、性能設計とは「情報開示設計」でもある。ここに一つの特長がある。

ISO2394 と同じ ISO/TC98 の中には「地震作用」に関する国際標準 ISO3010 の作成グループもあり、幹事国は日本である。現在石山祐二北海道大学教授が convener となって、改定案の最終段階に入っている。伝統的に建築のグループが基準案の作成を手がけており、ごく最近まで土木の耐震関係者は大きな関心を払ってこなかった。昨年来、日本分科会メンバーに土木の人間が加わり、次々期の改定にはその意見が十分に反映できる見通しである。ここでは、ISO/TC98 の基本方針にのっとり、地震荷重（作用）を accidental ではなく、variable な action として、極力確率モデルで扱うような進め方をしている。最新案では、終局限界状態に対して再現期間 500 年、使用限界状態に対して 20 年の値をもちいるような考え方を示している（これとともに、いずれの限界状態に対しても再現期間 100 年値を特性値として与えて、荷重係数でそれぞれの限界状態に見合った修正を行うことも代案として提示）。これと比較した場合、Vision2000 の性能マトリクスは、限界状態の分類が細かく、また very rare な地震として 970 年ないし 2500 年の地震まで想定していることは、variable action の側面というよりは、accidental な一面として地震をとらえる、という部分が加味されているようにも思われる。ちなみにこの部分は、1994 年のノースリッジ地震以後に、一種のリスク管理策として追加されたという経緯がある

ちなみに Eurocodes の中にも、耐震設計について定めた EC8 が設置されている。しかしウイーン協定にもかかわらず、EC8 のメンバーは ISO3010 にほとんど注意を払っておらず、また Vision 2000 の 4 段階にも及ぶ性能の設定については、非現実的という批判の見解を抱いていることが、本城・松井らの聞き取り調査<sup>6)</sup>により明らかにされている。これも興味深いことであるが、EC の策定者が欧州の人間で、欧州に地震国が少ないことを考え合わせる必要もある。

### 3. 国内の諸活動

#### 3. 1 はじめに

紙幅の関係で、記述の範囲は限られたものとならざるを得ないことを、あらかじめお詫びさせていただく。例えば建築基準法の改定に伴う、建築界の動向も重要であるが、ここでは省略する。させていただく。また ISO/TC98 国内委員会も、前章の記述に留める。

土木における性能設計は、近年ライフサイクルコスト(LCC)問題への関心と結びつくことが多く、耐震設計のような、構造物のある「特別な」瞬間の性能だけを問題にするのではなく、供用期間全体での性能の、時間積分のようなものを、評価基準にしようという発想である。「長寿命化技術」「完成時検査技術」「寿命予測技術」「検査技術」「合理的補修計画立案」などを含む、性能設計の体系化のテーマに、科学技術庁の研究調整費候補となって、調査費がついた。このテーマで本年度の土木学会全国大会で研究討論会が行われた<sup>7)</sup>。筆者もフロアに参加したのであるが、「構造物の長寿命化」という技術者の戦略目標と、それを進める戦術論としての性能設計への関心がないまぜになったものを感じた。

#### 3. 2 建設省「土木建築に関する設計の基本」委員会

昨年秋より、建設省大臣官房主導で、標記の委員会（長瀧重義・岡田恒男共同委員長）が発足した。当初の主旨は、WTO/TBT 協定に基づく、建設関係の ISO ならびに EC 対応を支援し、国内審議団体相互の連携・土木建築の連携をはかること。この場で積極的に CEN などへのはたらきかけをはかるルートを探ることなどがあった。メンバーは土木・建築からそれぞれ鋼・コンクリート・地盤・耐震の学識経験者が選任されているが、実質的にはこの下部に土・建の 4 分野の学（）民）+官からなる幹事会があり、そこで審議を進めている。

当初は、ECO を「仮想敵国」として、それが受け入れ可能な「設計の基本」であるかの調査を行っていたのであるが、そもそも、土木建築が分化してしまい、共通の「傘」がないこと自体にわが国の特殊性があり、そこが弱点になる危険性も危惧された。そのため、「限界状態」「荷重の扱い」

「耐震の扱い」「部分安全係数法の受け入れ」などのテーマをしぼり、土木建築相互の立場を尊重しつつも、相違点を明確にし、さらにその相違点を整理するところから、構造物特性の違いや市場の違いを超えて、大きな「共通の原則」を見出す努力をしていくこととなったのである。

現段階では、「限界状態」の議論が一段落し、荷重の議論に移っている（これは次の3.3にも関連する）。限界状態の議論は、まずEC0やISO2394における「終局」と「使用」の2分類は適切か、同じ終局でも、性能の議論として見たときにはかなり異なるものが混在しているのではないかと、といったところから始まった。土木サイドは、前出の長寿命化・ライフサイクルマネジメントの含みもあって、耐久性・疲労といった時間依存の限界状態に、独立の地位を与える主張が強かったが、建築サイドは必ずしもそこまでの重視はせず、市場における一種のオプションでよいという意見もみられた。また、耐震の限界状態に関連して、「安定の喪失」や「人命への危険」といった構造物としての最終状態の限界と、いわゆる使用限界の間に、中間的な限界状態（あるいは性能）を設けた法がよい、という議論では、双方に一致性がみられたものの、その「中間状態」の捉え方は、土木サイドが被災構造物の早期復旧といった、公共性の機能維持に重きをおいたのに比べ、建築サイドでは、建築物の財産性の維持という点に目が向いた。こうした相違に対する整理は、難しくはあるが興味深く、機会をとらえてはご紹介したいと願っている。

### 3.3 構造工学委員会・構造設計国際標準研究小委員会（特に荷重関係）

この小委員会の活動については既に触れた。次年度以降、この趣旨をどのような形で継続していくかは未定であるが、鋼構造委員会との関連でいうと、「鋼構造物設計指針は、国際標準としての要求条件を満たしているか」ということを調査すること、とりわけISO2394に対応しているのかどうか、もし不足があるなら、どのような点を補強すればよいかを、明確にしていくことが重要であろう。この目的と、間接的にはあるが、関連するのが、現在この小委員会内のワーキンググループで進められている、「土木学会荷重指針」作成のための準備作業である。

建築の世界においては「建築基準法」に荷重も規定されている他、「建築学会荷重指針」も、1975年の第一版以来、継続的に改定努力が行われており、現在の1993年版は、一応建築学会としての統一見解に近い位置づけが与えられている。これをもとに「限界状態設計法指針」の作成も軌道に乗りつつあると聞く。これに対して土木の現状は、道路橋・鉄道橋・港湾構造物・発電電構造物・治山治水構造物等、管理主体ごと、構造物ごとの荷重規定であり、土木内部で統一されているとすら言いにくい。

荷重を「構造特性とは無関係な外的作用」と、割り切って捉えるならば、土木建築で共有できるデータ集のようなものが、あってもよいだろう。そこで、遅まきながら、土木学会でも白木渡香川大学教授を主査に、建築学会荷重指針と同等の位置づけが可能な、指針作成を目指した作業を進めている。そこでは建築学会同様、「再現期間100年、あるいは時間変動しないものなら非超過確率99%の荷重値」を基本値として横並び整理するとともに、その背景にあるデータも極力分布の当てはめなどを施して提示し、設計荷重として適切な再現期間（または非超過確率）のレベルに変換できる（所定の荷重係数を求められる）ような形を目指している。また、ISO2394を意識して、「永久荷重」「変動荷重」「偶発荷重」という章分けとし、それぞれの中に当てはめる形で、死荷重（自重）／水圧／土圧／間接作用（支点沈下）／活荷重（交通荷重）／地震荷重／風荷重／雪荷重／波浪荷重／間接作用（温度荷重）／環境作用（腐食）／爆発／火災／衝突（落石、土石流）／その他を挙げた。ただし、土木構造物は多様であり、支配的な荷重も、その効き方も、限界状態も様々で、この作業に続けて、設計計算で使えるモデルとしての「荷重」を提示するところで、新たな困難が生じてくると予測している。このあたりに土木と建築の相違も存在している。

## 4. むすび

戦後の、信頼性設計のブームと、費用便益分析のブームの時期の重なりについて、序論で触れた。結果として、品質管理技術など、日本の技術風土にマッチした応用分野は着実に根をおろしたものの、設計基準に関連した信頼性の方法論は、必ずしも技術者に幅広く受け入れられてきたとはいえない。

筆者は、15年ほど前の、「前回の」信頼性の波の高まりを経験している者である。当時も、信

頼性に基づく設計基準の形として、様々なものが議論された。レベルⅠないしレベルⅡといわれる、「設計基準策定者が、信頼性の考え方を取り入れて基準を作り、設計技術者は特に信頼性の知識を必要としない」行き方と、個別設計において厳密に破壊確率の計算を要求するレベルⅢの行き方があるという理解が一般的にされていたし、それは今日でも変わっていない。しかし当時から、「設計基準の中の自由度を増やしておいて、設計技術者にも信頼性の知識を要求し、『厳密な破壊確率計算』ではなく、1次近似2次モーメント法（FORM）等の簡便法によって個別設計の信頼性水準を確認していく」ような行き方もあるのではないかと考えていた。これはレベルⅡとⅢの中間的性質を有するもので、レベル2.5と勝手に呼んでいた。こうした行き方に近いものとして「メニュー方式」を提案したこともあるし、また規格値・特性値や安全係数をひとつに固定して与える基準を「閉じた設計」、そこに自由度を与える設計を「開かれた設計」という呼び方をしていた。今回の性能設計（あるいは設計基準の性能規定化）の議論は、いってみれば「開かれた設計」をどう運用するか、という話題である。筆者に限らず、信頼性に関心をもってきた技術者の方々には、懐かしい香りのする議論といえる。議論の行く末はまだ定かでないが、当時の「コストの合理化への関心」に代わって（加えてというべきかも知れない）「基準の国際化」「規制緩和・情報開示」という側面からも、世の中が動いていることには大いに興味をそそられる。

序論で触れた、筆者自身の反省についても少し述べておきたい。筆者は、道路橋示方書に代表される「鋼構造の許容応力度設計法」は、実質的内容の極めて多くの部分が「限界状態設計」としての性格を有していると理解している。この立場に拠って編纂された、第1版の「鋼構造物設計指針」の作成にも関与した。また鋼橋の設計のお手本として、道路橋示方書等には多くの先人の知恵が盛り込まれており、「それほどおかしなものにはなっていないはずがない」とも考えている。こうした成果を全否定する考えは毛頭ない。その意味で、現在道路橋示方書鋼橋編が目指す改定の方（本日本西川室長より話題提供の予定）は妥当な線を行くものと考ええる。

「全否定でなければ全肯定になる」というのは、論理的におかしいのだが、「それほどおしくない」ということが「それなら慌てて修正しなくてもいいではないか」となり、いつの間にか「修正の要なし」と形が変わって認識されてしまうのが、社会の多くの場における実状なのも事実である。これは「神話化」の過程なのだが、そこに対して十分なアピールが出来ず、結果的にISOやCENの取り組みなどを後追いする形になってしまったところに、反省すべき点がある。

「橋梁について成立つ議論が、構造物の安全性に関する汎用的な議論としてそのまま通用するか」、あるいは「『許容応力度による安全性照査』の前提として、断面あるいは部材単位での限界状態が照査条件になっている。これが、構造システムの挙動、あるいはその最適化といった側面の追求を不十分なものとし、設計上の弱点になっていないか」等、性能設計以前の、設計論として議論すべきであったと思う。この準備があったならば、今回の国際化対応や、性能設計化に限らず、阪神淡路大震災後の耐震規定の見直しなどにも、益していたように思われてならないのである。

## 参考文献

- 1) ISO: ISO2394 General Principles on Reliability for Structures(3<sup>rd</sup> Ed.) 1998.6.
- 2) 佐藤尚次（インタビュー）：技術基準の「性能設計化」によって設計者の差別化が始まる，日経コンストラクション，1999.3.12号.
- 3) 全国海岸協会：新しい海岸制度のスタート，パンフレット1999.
- 4) 杉本博之：性能規定と第三者検査について，平成11年度土木学会年次学術講演会概要集共通セッション pp.186-187，1999.
- 5) SEAOC: Vision 2000-Performance Based Seismic Engineering of Buildings, Vision2000 Committee final Report, 4Volumes Sacramento, CA, 1995.4.
- 6) 本城勇介：限界状態設計法による基礎構造物モデル設計コードの提案 —海外調査報告書—，平成10年度科学研究費補助金基礎研究(B)(1)，課題番号1055163，1999.3.
- 7) 土木学会コンクリート・鋼構造・構造工学委員会：安全性向上と長寿命化に向けた性能評価型の設計規準をめざして，平成11年度土木学会全国大会研究討論会資料，1999.9.