

土木・建築における技術基準の動向と展望

建築研究部長 平野吉信
港湾研究部長 山本修司
評価研究官 西川和廣

土木・建築における技術基準の動向と展望

国土技術政策総合研究所 建築研究部長 平野 吉信
港湾研究部長 山本 修司
評価研究官 西川 和廣

- イントロダクション -

1. 土木・建築を取り巻く諸環境と技術基準

土木・建築における各種の技術基準、例えば各種土木施設の構造基準、設計・施工基準や公共建築物の建築基準、そして一般の建築物に適用される建築規制における建築基準等は、本来の施設・建築物の安全性や目的に応じた機能を確保するための役割に加え、いろいろな社会的役割を期待されるようになってきつつある。

- ① 施設・建築物が、安全性や各種機能等に関わるどの程度の性能を持っているのかについて、社会的に説明・表示し、信頼感を与える役割。すなわち適用される技術基準に施設・建築物の構造や施工条件等が適合することによって、一定のレベルの性能・品質が得られることが保証され、社会的な認知が得られる。
- ② 的確な安全性水準の設定や設計の自由度すなわち使用材料や構造方法等の選択の自由度を提供することにより、施設・建築物の生産性向上に貢献する役割。
- ③ 進展する技術革新の成果である新しい材料や構造方法あるいはIT等を活用して、これまでと異なった手法によって安全性等の水準を確保する技術等を活用できるようにする役割。
- ④ 建設資材の流通の国際化、建設関連専門業務やマネジメント手法等のボーダレス化等といった、技術のグローバル化に対応する役割。

これらの役割は、社会的説明責任の遂行、多様な技術的方法や材料を受け入れる設計の柔軟性・自由度の確保にも強く関係し、公共建設事業等におけるコスト構造改革といった今日的課題対応への貢献が大きく期待できる。また技術革新の受入れ等を通じて建設関連産業の活性化を促すとともに、これらの産業の国際的競争力を高め、建設市場のグローバル化の中で業務展開を活発化していくための基盤を提供することにもなる。

2. これからの技術基準における「性能指向」についての論点

2.1 なぜ「性能指向」か？

2.1.1 建設基準・設計法における「性能規定」と「仕様書規定」

- ① 「仕様書規定」が、建設物の形状、構造方法、使用材料等の「手段」を規定しているのに対し、「性能規定」は、そうした手段を投入した結果どのような要求が満たされるようにされるべきか…の「結果」を規定。

- ② 「結果」とは、建設物が外部等からの「作用」を受けたときの「挙動」（変形等）やさらにその結果としての「状態（の変化）」（崩壊、高い室温等）
- ③ 従って「性能規定」又は「性能指向」の建設基準・設計法とは、建設物（又はその部分）が、使用環境下（地震等の作用、経時的な劣化要因の作用、人的な作用等）でどのような挙動をするのかに着目し、建設物が使用目的に適するようにその挙動をコントロールするような基準・設計法。
- ④ 一般に、建設物の挙動又はその結果としての状態の変化が、その建設物の使用目的にもはや適合しなくなるとみる「限界状態」（例えば、崩壊、日常生活が送れない振動・室温・空気質、…）を設定し、建設物の使用期間中に想定される作用に対して、挙動又は状態がその限界状態を超えないことを確認することを要求。

2. 1. 2 性能指向基準・設計法の利点

性能指向基準・設計法が、建設物へはたらす作用とそれによる挙動または状態を捉え、その限界状態までのプロセスや限界状態に至る可能性をコントロールするものであることから、原理的には次のような利点が生じると考えられる；

- ① 構造物の崩壊等といった限界状態まで作用と挙動の相関を追いかけることが可能となることにより、設計者はもとより、所有者やユーザーも建設物の限界的な状態やその状態への至りやすさ（にくさ）を理解することが可能。目標や挙動のしくみ等が明確にされることにより、求められる性能に応じた品質管理や、より具体的な性能表示や性能保証の実施が実現。
- ② 安全率等経験に頼ってきた余裕度の設定を、より工学的な根拠や判断に基づいて合理的に設定することによって、コストの合理化を追求可能。
- ③ 建設物の使用材料や構造方法等の選択・設計に大きな自由度を確保することができる。これによって技術革新成果の応用、コスト合理化、産業の活性化、さらには国際的な資材・技術の流通の円滑化等に貢献が期待。

2. 2. 「性能指向」基準・設計法に関する諸問題

2. 2. 1 作用・挙動の不確定性

- ① 建設物又はその部分にはたらく作用（例えば地震動や構造物への入力）と、それによって生じる挙動（変形や崩壊機構の形成）とを如何にモデル化してみても、起りうるすべての事象を代表することは困難。地震動自体の性状や規模等やそれによる構造物への作用の仕方にも大きな不確定性要素。
- ② 一方建設物において地震動に応答して生じる変形等の挙動も、材料特性や部材特性のばらつき、そして挙動予測モデルの特性等により、不確定性・ばらつきが存在。
- ③ 性能指向の基準・設計法では、このような不確定性を有する作用と挙動の相関を如何に捉えるかが大きな問題。確率論・信頼性設計法の適用？工学的課題？

2. 2. 2 「性能規定」の普遍性？

- ① 性能指向基準の骨格となる「性能規定」には、作用と挙動との相関等に関する「予測法」、及びどれだけの挙動又はその結果としての状態を許容するかの「クライテリ

ア)とがなんらかのかたちで規定（性能評価法、性能検証法（照査法）等）

- ② 挙動予測や作用と挙動の相関モデルは、実用性・精度を求めるほど、万能ではなくなりがち。RC造・木造等構造方法との相性？予測法やモデル化の工学はたえず進歩。
- ③ そこで、挙動や状態の予測法等は技術基準で一義に規定する必要はなく、専門技術者の判断に任せれば良い…、そうでないと他の技術的可能性を否定してしまい、仕様書型規定と変わらなくなる…という議論も多い。

2. 2. 3 検証・照査結果の信頼性？

- ① 「性能指向」基準・設計法では、基準と設計との「照合」による検証・照査が可能な「仕様書型」基準・設計法と異なり、設計結果について、工学的に作用・挙動の相関予測等を行って、要求適合の検証・照査を行う必要。
- ② この場合、そうした検証・照査の実行にあたって、個々の設計担当者の能力や適性、倫理等、及び実行結果の信頼性等をどのように担保するのか…が問題。
- ③ 設計・検証担当者の資格認定の仕組み、直接の担当者以外の者が検証の結果をレビューし評価・証明する第三者認証システム等を導入する考え方がありうる。
- ④ 一般建築の場合には、建築基準法に基づく建築主事等による建築確認において、そのような機能を提供することが可能。公共事業にあっては設計や検証・照査が外注される場合、発注者側の責任者がその第三者認証の役割を果たす必要があるだろう。
- ⑤ 上述の「設計検証・照査」における挙動等予測手法の自由度を確保するニーズと、手法適用の結果の信頼性を確保するニーズの両立はなかなか困難。一般の設計・検証担当の技術者、その結果を第三者的にレビューする発注担当者や建築主事等が安定して実行できる技術的手法は、標準化され普及した手法に限られがち。
- ⑥ 現実的な対応として、標準化され普及した手法を「性能規定」のなかに「適合みなし検証法」として位置づけておき、特別の検証法を用いる場合には、より専門的な第三者評価機関が適用した挙動等予測法及び設計結果の工学的妥当性をレビューして評価・証明するような仕組みを設けることも有望。

3. 技術基準の国際的調和に関する動向と我が国の立場

3. 1 なぜ「国際的調和」か？

- ① 我が国の技術・産業の地盤沈下を避けるための重要な戦略・戦術として、国際的調和を位置づけ。国内市場にのみ依存から脱却し、国際的なマーケットでの競争力を確保するためには、国際的に通用する実務手法に習熟することが必要。この場合、我が国の技術的手法・慣行を積極的に対外的に提案し ISO 等での国際標準のイニシアティブもとっていく…という戦術・戦略を展開すべき？
- ② 技術や資材の生産・流通のグローバル化の進展に対応し、より安くより効果的な資材や技術を国際市場から調達できるよう、我が国の建設事業上、可能な限り広く技術的選択肢を集め、プロジェクトの効率の向上を図る必要に応える。もちろんこのためには国内技術基準の目的指向・性能指向化が前提となるが。

3. 2 建設関係の国際的調和の動向

3. 2. 1 資材関係の国際的調和

- ① 比較的先行しているものは、各国における製品規格、いわば製造者の立場から製品仕様の標準化をはかるという伝統的な取り組み。鉄鋼等生産・流通のボーダレス化が進む基礎的資材の領域でより取り組みが具体化。
- ② 製品規格の領域でも「性能指向化」が進展。WTO/TBT 協定等での「性能」重視が反映。ただし2つの方向性がある；
 - * 第1は対象製品についての要求性能レベルを検証法と共に規定。製造側が任意の製品の組成や使用素材等を選択し、製品設計の自由度を確保できる利点。
 - * 第2は対象製品タイプまたは特定の「部位」に使用する材料一般について、要求性能レベルではなく、「性能表示」のルール（評価法等）を標準化。製品ユーザーである建設物の設計者・生産者側の製品選択・設計の自由度を確保するためには合理的だが、製造の立場からは多品種少量生産の負担等の問題が発生。

3. 2. 2 建設物の基準・設計法に関する国際調和

- ① 従来この領域は、各国において各々の経験蓄積等をベースとして、法令として設計基準を規定したり国内規格である実務規準 Code of practice として確立してきたこともあり、国際標準化あまり進展していなかったが、近年の建設活動自体のボーダレス化を反映し、関連業務手法の国際的近似化が加速し、関心の対象に。
- ② 特に建設物の構造設計の分野では、信頼性設計法等の比較的新しい設計法に関し、その原理や原則的取扱い等に関する国際標準化が積極的に進展。その先行例の1つとしてEUのEUROCODEの進展への関心が高まっている。
- ③ 各国における経験の蓄積としての基準化が必ずしも進んでいなかった比較的新しい領域、例えば環境負荷低減やサステナビリティ等に関する設計手法に関しては、急速に国際的標準化が進み、国内の基準化・標準化に先行している傾向も見られる。

3. 3 わが国の立場と対応

- ① 我が国の建設産業においては、公共建設プロジェクトにおけるコスト構造改革等への対応の必要性が高まると同時に、地盤沈下への懸念への対応が重要課題となってきたことから、国際的な活動展開のための戦略づくりが必至。
- ② 国土交通省においても、平成10年前後から建設関係の国際標準化活動への関わりを強め、関連するISO/TC等の動向モニタリングを継続するとともに、土木・建築の関連学会等の協力も得て、構造設計分野の「土木・建築にかかる設計の基本」を策定。これは、信頼性設計法の考え方を基礎とし、今後の国際的な取り組みの円滑化・積極化に資するよう、国内の土木・建築の共通の原理的考え方の確立を図ったもの。
- ③ 本年10月「土木・建築分野における国際標準対応省内委員会（委員長：技監）」を発足。これにより、①土木・建築分野における国際標準の動向を的確に把握、②我が国の技術的蓄積の国際標準への反映、③国内基準類の国際標準への整合化若しくは国際標準の導入、などといった国際標準に対する全省横断的な取り組み体制を確立。

建築基準の性能規定化及び国際調和に関する動向

国土技術政策総合研究所 建築研究部長 平野 吉信

1. 建築基準における「性能指向」

1. 1 海外諸国等の動向

1. 1. 1 海外諸国の建築基準における「性能指向」の導入

建築基準における「性能指向」の概念導入の端緒は、1984年の英国（厳密に言えばイングランド及びウェールズ：E&W）建築法の制定とそれを受けた1985年建築規則の制定で切られた。この性能指向建築基準の原型は、次のような性格を持ったものであった；

- ① 建築規則において規定する法的な義務的要件を、達成すべき目的（例えば「火災時の人命安全」と、それに関係付けられた“内部火災の拡大を防止するため、内装は表面における火災の拡大に抵抗すること…”といったような定性的要求（「機能的要件」）のみに限定した。
- ② それまでの建築規則においては義務的要件として位置づけられていた構造や空間計画の条件、使用材料等の規定を法令規定からはずした。
- ③ その結果として、原則としてどのような構造・材料によるものでも「目的」と「機能的要件」を満足するものと規制当局が承認した場合には、建設が認められるものとした。

一方、それまで法令における義務的要件であった構造や空間計画の条件、使用材料等に関する技術的規定は、義務ではないが、それに適合すれば当然法令の要求条件を満足するとみなされる（deemed-to-satisfy）ものとして、別途政府が承認する「承認規準書（Approved Documents）」に収録され、なお一般に活用されることとなった。

この初代の「性能指向」建築基準では、「性能」そのものを工学的に扱う手法、すなわち計算、分析等によって建築物やその部分に働く作用やそれに伴う挙動を予測し、挙動又はその結果としての構造体や空間の状態が許容される範囲にあるかどうかを確認することを求める「性能（挙動）評価・検証法」は、直接は規定されていない。設計者は自らの判断で適用する挙動予測法や評価・検証法を選択することはできるが、それをういた建築設計が承認されるかどうかは、規制当局（一般に地方政府）の裁量にかかっている。この裁量の個別の発動は現実には難しく、木造建築等分野別の専門家団体等が取りまとめる設計指針や英国の国家規格BSの一環として策定される設計・施工実務規準（Code of Practice）のような“社会的に認められるようになった規準類”として整備されることによって、実務に応用されるようになっていく。

この英国の事例を先例として、特に英連邦系の諸国で、類似の「性能指向」概念の導入が進んだ。ただしそれぞれに先例を教訓としたいろいろな“改良”が導入されている。ニュージーランド（NZ）では1991年建築法・1992年建築規則により、またオーストラリア（豪）ではモデルコード機関ABCBによるビルディングコードオーストラリアBCAの1996年版で「性能指向」が導入された。この2つの例では、現段階で規定可能な定量的なパラメータを用いた「性能要求」までが、義務的規定とされている。カナダでは国家ビル

ディングコード NBC の改訂が「目的指向」のもとで進められており、コードの目的（例えば「安全」）から技術的要件の目的（例えば「安全な避難ルートを提供」）までをツリー状に整理（目的ツリー）し、それに対応する「機能的要件」までを収録した Division A を義務的規定とした。「性能要件」以下は“承認しうる解”のグループである Division B で扱われるようになっている。

これらの各国の建築基準は、数年間隔で見直しがなされており、より進化した性能指向の基準に向けての改良が続けられている。

1. 1. 2 「性能指向」の建築基準研究の国際的連携

上述のような建築基準における「性能指向」概念について、各国の経験を持ち寄り、問題点を共有して討論を行うことによって、次の世代の「性能指向」建築基準の構想や他の諸国にも「性能指向」概念を普及させること等を目的として、建築分野における各国の研究機関の国際的連携組織である CIB（国際建築研究・情報会議）においてタスクグループ（TG11：1993）が設置された。わが国も当初からグループメンバーに加わり、各国のシステムの相互比較、一般原理の抽出、諸問題の明確化等の活動を続けてきた。その活動は、後継の CIB/TG37 や、建築規制行政組織や建築モデルコード組織が結成した IRCC（国際建築規制担当機関連携委員会）に引き継がれ、現在に至っている。

1. 1. 3 「性能指向」の建築基準における諸問題

上述した「性能指向」建築基準に関する国際的連携の元での研究調査を通じ、実際に建築規制に「性能指向」建築基準を導入するうえでの多くの問題点が指摘されてきた。これらは「性能指向」建築基準のシステムをより本質に近づけていくため、工学的・社会的に解決を図っていかなければならない問題として、今後よりいっそう研究的取り組みが求められているものである。以下に概要を示す。

① どの部分までが義務的規定とされるべきか？

- * 一般に、性能指向の建築基準の構成は、図 - 1 のとおり、5 レベルのモデルで説明されることが多い。
- * E&W では、レベル 2 の「機能的要件」までを義務的要求とした。
- * 豪 BCA では、法令としてナショナルミニマムを示すために、少なくともレベル 3 の「(定量的) 性能要件」までを義務的要求とする必要があるとされた。
- * しかし、工学的にレベル 4 の「性能評価・検証法」とリンクさせないで、定量的な性能(挙動)クライテリアをレベル 3 で規定することは困難な場合が多く、結果的にレベル 4 までが、実質的に義務的規定として取り扱われざるを得ない。
- * 一方、レベル 4 を完全なる義務的規定と位置づけると、当該「性能評価・検証法」を適用することが工学的に適当ではない特殊な構造方法による建築物の場合、より対象建築物の挙動を精緻にモデル化する高度な性能

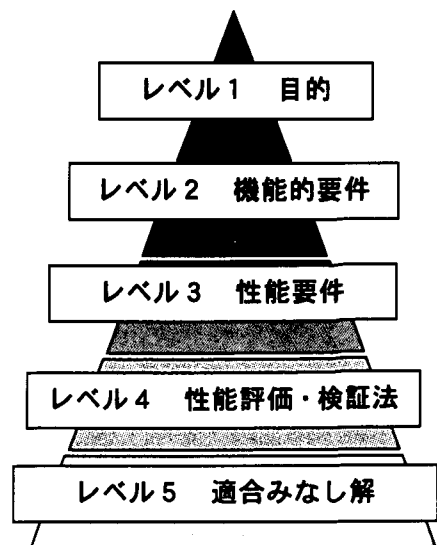


図 - 1 5 レベルモデル

評価を適用する場合等の対応が難しくなる。工学的手法の適用の自由度を損なうことにもなる。

② 作用・挙動の相関モデルの精度

- * 「(定量的)性能要件」と「性能評価・検証法」を規定する場合、その基盤となるべき作用・挙動の相関について、現実の事象をどれだけ忠実にモデル化して把握しうるかが常に大きな問題となる。
- * 第1の問題は、作用と挙動双方の不確定性をどのように扱うか…?という問題。確率論的な信頼性の問題として工学的手法化できる分野はまだ多くない。
- * 第2の問題は、モデルの汎用性の問題。できる限り計画された建築物の挙動等をトレースしうる精密なモデルであるほど、他の建築計画へも適用しうる汎用性は小さい。建築基準として基準化する「性能評価・検証法」としては一定程度のばらつきも念頭においたものとせざるを得ない。個々の建築計画から見ると、不必要な冗長性等を含む場合もあり。
- * 原理的には、少なくとも「性能評価・検証法」については、工学的な妥当性さえ確保されていれば、建築計画の特性等に応じ、“任意”の手法を手供することが許容されてよい。しかし現実的には、後述の検証法等の実行結果の信頼性の問題もあり、通常の建築許可・確認ルートで処理できる性能評価・検証法は、特定の標準的なものに限らざるを得ない。

③ 「性能評価・検証法」の実行結果に関する信頼性

- * 比較的高度な工学的解釈・判断等を必要とする「性能評価・検証法」の実行結果が十分な信頼性を持ちえるか…?が建築規制の有効性・信頼性を左右する。
- * 現実問題としては、そのような信頼性は、設計者又は検証担当者、建築規制の許可・確認側で審査に当たる担当者双方の、技術的適性・能力や倫理観等に依存する。
- * 一般には設計を担当する者の専門的職能・資格、例えばプロフェッショナルエンジニア、建築士等の制度による信頼性担保が期待される。より高度な特別な性能評価・検証法を適用する場合等にあっては、設計当事者の資格や適性のみでは十分に信頼性を確保しにくく、例えば専門評価機関による第三者審査やピアレビュー手法の適用等、特別の仕組みの導入が必要と考えられている。

④ 性能の経時的変化をどう扱うか?

- * 建築物を構成する部材や材料等の物性は、長期間の使用過程で受ける周辺環境からの作用や荷重作用の繰り返し等によって、次第に変化する。これに伴って、各部材やその集合体としての建築物が、安全等の目的を達成するために、作用に対して抵抗その他の挙動をする能力(すなわち「性能特性」)も変化する。
- * こうした特性の経時的変化を正確にモデル化・予測することは至難。建設前の設計段階で、こうした性能特性の耐久性や劣化の性向を建築物やその部分の性能評価・検証にどう組み込むか…?が各国共通の悩みの種となっている。
- * さらに、建築基準における性能の要求水準が、「設計・建設時」のみに適用されるものなのか、建築物の存続期間の全体にわたって求められる「継続的」要求なのか…?もなかなか明確化しにくい問題。前者の立場に立つと、建築基準は時間が経過した建築物の安全性等は担保できない…ということになるし、後者の立場では、大きな安全率を持って当初の設計をしておかないと、ある程度時間が経過して性能特

性の劣化が起きると、その建築物が法令基準に不適合又は違反したものとなってしまふ…という問題が生じる。

1. 2 わが国の建築基準と「性能指向」

1. 2. 1 建築基準法に基づく技術基準の改正

わが国の建築基準法では、ほとんどの建築物についての技術的「最低基準」を定め、それに適合するように設計や建設工事等をコントロールする仕組みを提供している。「最低基準」を示す技術基準は、建築基準法施行令（政令）や国土交通省告示等で具体化されており、それぞれの事項ごとに詳細な技術的規定が定められている。また、個々の建築物の建設計画・設計について建築主事等への申請を求め、この申請内容が技術的規定に適合していることを建築主事等が審査し確認するという「建築確認」制度が組み込まれている。

このような建築基準法の技術的規定について、各部の構造方法や寸法等、使用材料等を詳細に規定しており、技術革新等を反映した新たな構造方法や材料、工学の発達をベースとした性能評価法等を受け入れにくい…との指摘が大きくなってきたことから、1995年頃から技術基準の「性能指向」への改正を目指した検討が開始された。その結果は1998年制定・2000年施行の建築基準法改正に反映され、その新法に基づく技術的規定を定める施行令・告示の制定が漸次進められてきた。

1. 2. 2 改正された技術基準の構成と「性能指向」の問題に対する対応

現段階で整備された新しい技術的規定の体系は、構造安全、火災安全、健康等目的の項目別に若干の異なりがあるものの、一般的に言って前述の5レベルモデル等に照らしながら見ると、次のような構造を持っているといえる（図-2参照）。

- ① レベル1の「目的」は、法の目的として規定されている「国民の生命、健康及び財産の保護」そのもの。

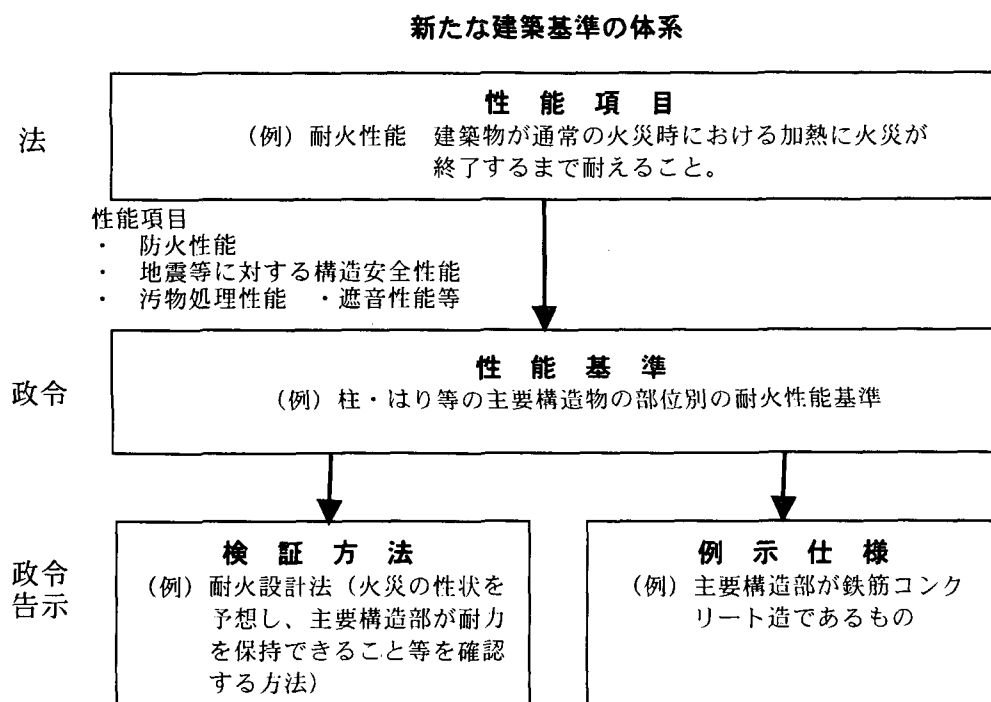


図 - 2 改正後の建築基準の体系

- ② レベル2の「機能的要件」は、防火性能、地震等に対する構造安全性能等の「性能項目」に対応し、これらは法で規定される。
- ③ レベル3の「性能要件」は、政令で規定される「性能基準」で、例えば柱・はり等の主要構造部の部位別の耐火性能基準等
- ④ レベル4の「性能評価・検証法」は、政令または告示で規定され、例えば、耐火設計法等
- ⑤ レベル5の「適合みなし解」には、政令または告示で規定される「例示仕様」が該当する。

1. 1. 3で述べた性能指向の建築基準における「問題点」に関しては、建築基準法の新しい技術規定では、以下のような対応をとっている；

- ① 工学的手法の適用の自由度を損なわないよう、政令や告示で規定する「検証方法」以外の「高度な検証方法」でも、その方法や適用が妥当であれば、これによって「性能基準」に対する適合性の検証を許容する。ただし、検証結果の信頼性等の問題にかんがみ、「高度な検証方法」による場合には、「指定性能評価機関」の評価を受けた上で「国土交通大臣の認定」を必要とすることとしている。より挙動等の予測の精度が高いと思われる「時刻歴応答解析」等の手法も、このルートで適用が可能となっている。
- ② 経時的な性能の変化等にどう対応？という問題に関し、現段階では定量的な判断基準を規定することが難しいこと等から、構造計算関係の規定において、構造性能に関係しそうな部材の耐久性等については一定の仕様に関する規定（「耐久性等関係規定」）を設定し、この仕様規定に適合させることによって劣化等への信頼性に対処している。

2. 建築基準に関わる国際的調和の動向

2. 1 EUにおける先進的とりくみ

2. 1. 1 共通の単一市場

欧州連合 EU は、1951年の欧州石炭鉄鋼共同体 ECSC にその起源を持ち、その後の欧州経済共同体 EEC (1957)、欧州共同体 EC (1967) といった発展過程を辿りながら、1993年に設立された国家間連合体である。その連合の基本理念は、共通の単一市場を構築することであり、それによってももの・サービスの域内自由移動さらには通貨統合等を実現し、市場規模の拡大・規模の経済の享受を図ることにある。この「もの・サービスの域内自由移動」を実現する手段の1つとして取り組まれたのが、「技術的障壁の除去」である。この技術的障壁として実際に共同体施策の対象となったのが、各国において製品やサービスの特性等に関する技術的要求を規定している技術法規や国内規格等である。従って共同体の施策は、この各国の技術法規や国内規格の「統一化」に向けられた。初期の方策は、共同体として共通の技術基準や規格を策定し、これらによって各国の技術法規や国内規格を置き換え統一を図る…というものであった。この施策は「オールドアプローチ」と呼ばれる。

2. 1. 2 ニューアプローチ

「オールドアプローチ」による技術基準・規格の域内統一は、各国の主権や地域における気候・風土の差異、保護水準の異なり等によって、きわめて実現困難な枠組みであることが認識され始め、1985年、それに代わる、より現実的な方策である「ニューアプローチ」が採択された。ニューアプローチは、次のような特徴を持っている；

- ① 製品等の特性について、各国が各国固有の法令で規制をおこなう権限は留保される。

- ② EU は、各国に強制力を持つ法規である「理事会指令」によって、対象とする製品が、ユーザーの安全・健康等の観点から最低限保有すべき…と考えられる特性「基本的要件 Essential Requirements」を定める一方、各国は、製品特性を規制する国内法令において、原則としてこの基本的要件以外の規制要件を設けないようにし、基本的要件適合製品については各国における市場流通を確保すべきことを義務付ける。
- ③ この基本的要件に対象製品が適合すると考えられる標準的な技術仕様を「欧州調和規格 European Harmonized Standards (hEN)」等として規定する。製品がこれに適合すれば“基本的要件に適合する”と自動的に“みなされる”こととし、当該製品の域内市場での自由流通が保証される。これらの欧州技術仕様に適合する製品には、いわゆる「CE マーキング」が表示されることになる。
- ④ 欧州調和規格等の策定は、EU の行政機関である欧州委員会からの委任 (Mandate) に基づいて、非行政機関である欧州標準化委員会 CEN 等に委ねられる。
- ⑤ 一方、製品の製造・供給者には、欧州調和規格等に適合しなくとも、直接基本的要件に適合することを証明すれば、域内市場に流通させる (つまり CE マーキングを表示すること) 選択肢が留保されている。

以上の施策により、規制に関する各国の固有の権限が確保されるとともに、欧州調和規格等によって当該製品の“実質的”な技術基準の「共通化」が図られる…という現実的な施策目的の達成が期待されることとなった。なおこの場合、各国の製品を規制する法規は、少なくとも基本的要件を満足する製品を受け入れない根拠となる規定は廃棄せざるを得なくなり、こちらも実質的な「近似化」が図られることとなる。

2. 1. 3 建設製品指令 CPD

(1) ニューアプローチと CPD

建築・土木建設に使用される建設資材も、域内各国間で輸出入されることが多いと考えられ、ニューアプローチ施策の対象とされた。適用された理事会指令は、1987 年の「建設製品指令 (Construction Products Directive. 以下 CPD) である。

CPD は、他のニューアプローチと比較して、以下のような際立った特徴を持っている。;

- ① 建設製品は、それ自身が直接建築・土木の建設物のユーザーの安全・健康等に影響を与えるわけでは必ずしもない。建設製品の特性は、それらが建設物に“組み込まれた状態”で建設物の特性に影響を及ぼすことによって“間接的”にユーザーに影響する。このことから CPD における基本的要件は、建設製品そのものではなく、建設物について規定される (図 - 3 参照)。
- ② 建設製品というカテゴリーに含まれる材料・資材は、建設物に“組み込まれた状態”で、その建設物が“基本的要件を満足するようになる”ような特性を持つことが要求される。それらの特性について欧州調和規格 hEN 等が策定されることになる。

ER1 : 物理的抵抗性及び安定性 (建設中及び使用中に作用する可能性のある荷重に対し、崩壊、重大な変形等を生じない)
ER2 : 火災時の安全性 (火災発生時に、一定時間以上の荷重支持能力の維持、建物内の火災の発生・拡散の抑制、隣等への火の拡大の抑制、避難手段の存在、消防隊の安全)
ER3 : 衛生、健康及び環境 (在館者及び近隣の衛生を脅かす毒性ガスの発生、危険物質等の滞留、湿気の滞留等を生じない)
ER4 : 日常安全性 (滑り、転落、衝突、火傷、感電、爆発による傷害等の発生リスクが過大とならない)
ER5 : 騒音に対する保護 (在館者等にとって、騒音が、健康を損ねず、睡眠、休息及び満足のいく環境で作業が d けいることを可能に示うレベル内に収まる)
ER6 : エネルギーの経済性及び保温 (建造物及び冷暖房空調設備の仕様に要するエネルギーが少ない)

図 - 3 CPD における基本的要件

- ③ 建設資材は技術革新が著しい分野でもあり、ある製品ジャンルについて欧州規格として標準化することが適切ではない場合や標準化が追いつかないようなものもあることが認識され、個々の製品企画について、個別の評価・認定を行って CE マーキングの表示を行う「欧州技術認定 European Technical Approvals : ETA」という仕組みが導入され、hEN と同様の効果を持つ技術仕様として位置づけられた。

(2) CPD における建築物の特性と建設製品の特性との相関

この「建築物の特性」と、それに組み込まれる「建設製品の特性」とを相関付けるという CPD の枠組みは、非常に複雑でわかりにくい。このことは建設分野で使用される材料・製品類の製品規格の策定が如何に難しい問題を抱えているか…を示すものでもあるが、建設製品にかかる hEN 等の策定委任にいたるまで、以下のようなしくみが導入されなければなかった。

- ① 同じ製品であっても、建設物に組み込まれて使用される部位や使用目的によって求められる特性が異なる。すなわち建設製品についての hEN 等は、その製品の「意図される用途 Intended Use」に対応して定められる必要がある。
- ② 使用する材料・製品の特性を、建設物全体が「基本的要件」に適合するための特性すなわち性能特性にどのように反映するか…、あるいはどのように相関付けるか…は、構造安全、火災安全等のための設計法（あるいは性能評価・検証法）如何によっていろいろな選択がありうる。すなわち、hEN 等で規定すべき建設製品の特性は、建設物の設計法・性能評価法において、当該製品にどのような役割を与えているか…、どのような特性を全体の性能評価に用いるパラメータとして規定しているか…等によって変わってしまう。

こうした問題に対処するため、CPD では建設物に適用される「基本的要件」と「組み込まれる建設製品の特性」との関係付けを明らかにする目的の「解釈文書 Interpretative Documents」を欧州委員会が制定することを規定した。これは実質的には、各基本的要件に対応する設計法／性能評価・検証法の“標準”を規定することに他ならない。これらの設計法や性能評価・検証法は、各国毎に技術的慣行として標準化されていたり、技術的法規で規定されていたものであり、その実質的な“統一化”には当然ながら各国の合意を得ることの困難性その他の紆余曲折があったことが容易に想像できる。実際、CPD においては 1992 年には建設製品の分野でも域内市場内での自由流通、すなわち建設製品での CE マーキングの表示を実現することが目指されていたにもかかわらず、各基本的要件に関する「解釈文書」が合意・制定されたのが 1994 年にまでずれ込んでしまい、近年になってやっと最初の hEN とこれに対応する CE マーキングを表示した建設製品（セメント等）の市場流通が実現したのである。

また、各建設製品の特性が、「性能指向」の概念で建設物の基本的要件と関係付けられたことにより、各製品の hEN 等も「性能」に着目して規定される場合が多いこととなった。この場合、次のことに留意する必要がある；

- ① 従来の「製品規格」とは異なり、一般に hEN 等では製品の性能水準に対する要求は規定される必要がない。要求される性能特性の項目のみでよい場合が多い。例えばコンクリートや鋼材の単位断面積あたりの強度が低いものであっても、断面積を確保することによって部材の耐力を確保することが可能…といったトレードが可能であり、強度の等級や最低限を設ける必要は必ずしもない。

- ② 従って、これらの製品の CE マーキングは、従来の製品規格への適合マーク（JIS 等）と異なり、当該製品が一定以上の性能特性を有することを証するマークとはならない。CE マーキングには当該製品が有する性能特性の値が合わせて表示されることになる。
- ③ CPD では、各国における気候・風土の差異等を考慮し、基本的要件に関する建物の性能特性に関していくつかの等級を設定すべき場合で、かつそれとの相関が正当化される場合にのみ、製品の hEN 等における等級等の設定が正当化される。これは対応する「解釈文書」すなわち設計法・性能評価法において、建設物の性能と製品の性能との相関が完全にはパラメトリックな関係として定式化されていない場合に該当するとも考えられる。すなわち、例えば建設物の耐火性能の要求水準に関する「耐火等級」とそれに対応する部材の「耐火等級」といった例に見られるような関係である。

2. 2 EUROCODE の戦略と動向

2. 2. 1 ユーロコード策定の目的と策定経緯

- ① 1975 年、欧州委員会は、建設工事物の設計について、各国の基準等にとって代わることを意図した一式の調和技術基準を制定することを決定し、第 1 世代のユーロコードは、80 年代末から 90 年代にかけ、ENV（プレ EN：試行欧州規格）として制定されるようになった。
- ② 制定された ENV には、各国毎に（法令等の上で）求められる安全性のレベルの違い等を反映して、各国が任意にその値等を設定することができる「Box Value」という概念が導入された。その各 Box Value に各国で適用したいと意図する値や方法・式等を入れたものが、National Application Document（NAD）であり、これを含んだ一式が、各国版 ENV として刊行され、各方面での試用に付されることになった。
- ③ ENVs の試行の経験を踏まえ、CEN と委員会を通じた各国は、ユーロコードの欧州規格バージョン、すなわち EN EUROCODE（以下、「EN-EC」という。）の策定に最終的に踏み切ることにした。ENV から EN-EC へのもっとも大きい変更点は、Box Value を廃止し、EN-EC の中で明示的に国毎の選択又は値の決定が許容される数値、等級、方法等として指定された事項について、Nationally Determined Parameters（NDP）とし、EN-EC の各国版に付けられる National Annex において、その数値等を規定することとした。

2. 2. 2 ユーロコードの技術基準としての意味・役割

ユーロコードは、委員会と CEN との協定（BC/CEN/03/89）をベースとして、マンデートを通じて CEN に委任されている。その結果、ユーロコードには、建設製品指令等に基づく hEN ではないが欧州規格 EN の位置付け（EN-EC）を与えられる。このことにより加盟各国は、下記のような目的のための参照文書として、出来上がった EN-EC を規制や公的発注上、何らかのかたちで尊重することとなる；

- ① 建築物と土木構造物の、建設製品指令の基本的要件（ERs）、特に ER1：物理的抵抗性及び安定性及び ER2：火災時の安全への適合を立証する手段として
- ② 建設工事物及び関連エンジニアリング業務に関する発注・契約条件を規定するための基礎として
- ③ 建設製品のための調和技術仕様（hENs/ETAs）の策定の枠組として

2. 2. 3 ユーロコードの構成枠組み

- ① EN-EC の体系は、図 - 4 のように「共通編」(☆印：原則、荷重・外力、耐震、…)と「材料別各論編」(★印：コンクリート、鋼、木、…)とに分類されている。
- ② さらに、それぞれの EN-EC は、「建築物」とその他の施設工作物・構造物(「橋梁」、その他)等にわかれて規定され、それぞれ PART を構成することになる。
- ③ 各 PART はそれぞれ別々のプロセスで策定されている。また、例えば“実際の”コンクリート構造物の設計には、EC2 だけでは足りず、EC0、EC7 そして場合によっては EC8 の関係 PART を適用することが必要になる。このような、設計対象物に着目した場合の所要 PARTs の集合を、EN-EC の「パッケージ」と呼ぶ。
- ④ この各パッケージに含まれる PARTs の全てが策定完了する時期を、パッケージの策定完了予定日 (DoA) とし、この時点から起算してしかるべき期間後に、関連する各国の規格類を廃止又は修正すべき時期を算定することとした。
- ⑤ ユーロコードを各国において施行する各国の規格は、CEN が刊行したユーロコード(各 Annex を含む。)のテキスト全体に加え、各国版のタイトルページ及び前書きで構成され、各国版 National Annex が付けられる場合もある。
- ⑥ 「本文」は、「総則 (General)」、「要求事項 (Requirements)」、各種の Principles、Methods 等で構成。「付属文書」は、
 - * Annex A で、工事物のタイプごとに適用すべきルールを規定 (Normative)。うち Annex A1 が建築物、A2 が橋梁
 - * Annex B 以降で、各種の補足、解説等を添付 (Informative)

☆EUROCODE	0	: 原則
☆EUROCODE	1	: 荷重・外力
★EUROCODE	2	: コンクリート構造物
★EUROCODE	3	: 鋼構造物
★EUROCODE	4	: コンクリート・鋼混合構造物
★EUROCODE	5	: 木構造物
★EUROCODE	6	: 組積造構造物
☆EUROCODE	7	: 基礎・地盤設計
☆EUROCODE	8	: 耐震設計
★EUROCODE	9	: アルミニウム構造物

図 - 4 ユーロコードの構成

2. 3 ISO 等を通じた国際調和

2. 3. 1 建築分野の主要な国際標準化活動

ISO における国際標準化の活動は、各専門分野毎に分かれた TC さらにはその下の標準化の領域毎の SC でマネジメントされ、実際の個々の国際標準の策定は WG で担当される。TC、SC には各国の構成団体(わが国の場合は日本工業標準調査会 JISC)が申し出により P (積極参画) または O (オブザーバ) メンバーとなることができる。P メンバーとなれば標準原案の承認のための投票権を有するため、各段階の原案は回付されてくるが、原案の内容に影響力を行使しようとしたら少なくとも WG のメンバーになることが必須であり、理想的であれば WG のプロジェクトリーダーをとることが必要である。

建築分野は、多くの分野 (ISO/TC ; 図 - 5 参照) において、従前から材料・製品以外の領域、例えば設計方法や部材・材料の性能評価の手法、「性能」その他の概念・考え方に関する国際標準の策定が進められてきている。例えば次のようなものがある ;

- ① TC98 (構造物の設計の基本) では、特に耐震分野でわが国が主導的な活動を行っており、1988 年にはわが国が WG の主査を務め、ISO3010 (構造物への地震作用) を制定させた。また、EUROCODE やわが国の「土木・建築にかかる設計の基本」のベースともなっている ISO2394 (構造物の信頼性に関する一般原則) 等の制定やメンテ

ナンスに当たっている。

- ② TC92（火災安全）では、火災発生・成長、耐火構造・区画等のモデルや試験法等の国際規格の制定を進めており、各国の建築基準で採用される試験法等のベースとなりつつある。また SC4（火災安全工学）では、性能指向の火災安全検証法に関するモデル・評価法の検討が進められている。
- ③ TC59（ビルディング・コンストラクション）は、建築物の設計・生産に関係する種々の事項や、性能指向の基準や規格を策定するためのモデル等を提供している。特に SC3（建築物の機能的要求と性能）が策定した ISO6240 等の一連の“建築物のための性能規格”は、各国の性能指向の建築基準や関連製品規格等に大きな影響を与えている。わが国も創設メンバーとなっている SC15（住宅の性能標準）では、構造安全、火災安全等性能項目毎の住宅の“性能記述”の方法についての国際標準化を進めている。これらは、住宅の性能表示にも、住宅の建築規制基準にも共通する事項を扱っており、こうした重要な事項の国際標準化のあるべき姿に関して、日・豪・米等で論争を続けてきている。

今後、EU における建設製品に関する調和欧州規格や EUROCODE における設計標準、材料仕様の扱い等も注視しながら、関連する国際標準化の方向性が、特定の国・産業界の利益だけにつながることがないよう、かつ今後さらに進展すると考えられる性能指向の建築基準の方向性と矛盾する結果を生まないよう、わが国としても的確かつ積極的な国際標準化活動へ取組み参画することが、よりいっそう必要となってきていると思われる。

TC	名 称	TC の概要
10	製図、製品の確定方法、関連文書	建築製図に関する基本分野
17	鋼/鉄筋及びプレストレストコンクリート用鋼	構造上重要な建築材料に関すること
21	消防器具	防火上重要な警報器等に関すること
35	ペイント及びワニス	鋼材等の耐久性上重要な塗料等に関すること
43	音響	建築物の遮音等に関すること
45	ゴムとゴム製品/製品/積層ゴム	免震構造建築物等に使用するゴムに関すること
59	ビルディングコンストラクション	建築生産・性能に係る基本分野
61	プラスチック	防火上重要な建築材料に関すること
71	コンクリート、鉄筋コンクリート及びプレストレストコンクリート	RC 建築物の材料・製品及び構造設計等に関すること
74	セメント及び石灰	構造上重要な建築材料に関すること
77	繊維強化セメント製品	防火上重要な建築製品に関すること
89	木質系パネル	構造上重要な建築製品に関すること
92	火災安全	建築物の防火関連規定に関すること
98	建築設計の基本	建築物の構造の基本的な分野に関すること
146	室内空気質	室内空気環境の保全に関すること
160	建築用ガラス	構造上重要な建築材料に関すること
162	ドア及び窓	住宅等の性能上重要な建築製品に関すること
163	断熱	省エネルギー上重要な建築材料に関すること
165	木構造	木造建築物の構造に関すること
167	鉄鋼及びアルミニウム構造物	S 造、アルミニウム造の建築物の構造に関すること
178	リフト、エスカレーター及び動く歩道	エレベーター、エスカレーター、小荷物専用昇降機に関すること
179	組積造	組積造の建築物の構造に関すること
182	地盤工学	地盤の安全性、試験法等に関すること
189	陶磁器質タイル	建築物の機能上重要な建築材料に関すること
205	建築環境設計	省エネルギー等の環境に配慮した建築設計の基本に関すること
218	木材	構造上重要な建築材料に関すること
219	フロアーカバーリング	建築物の床仕上げ材料に関すること

図 - 5 建築分野に関連の深い主要 TC

港湾基準の国際化対応について

—信頼性設計による性能規定型基準をめざして—

国土技術政策総合研究所 港湾研究部長 山本修司

1. はじめに

国際標準化機構 ISO の TC98 では、国際規格としての「構造物の設計の基本」が議論されている。一方、欧州においては欧州標準化委員会 CEN が EU 内の統一規格として Eurocodes を策定している。そこでは、我々が 100 年以上にわたって使用してきた安全率を用いる設計法や許容応力度設計法に代わって、信頼性設計をベースとした性能規定型基準が主流となりつつある。そのため、港湾の技術基準についても ISO 等の国際規格との整合性を図る必要があると考えている。

本稿では、①構造物の設計法に関する国際的動向、②港湾基準の国際整合の必要性、③港湾分野における ISO 等への対応状況、④港湾基準の改正の方向、⑤防波堤の設計に関するコードキャリブレーションについて紹介する。なお、港湾基準改正の基本的考え方については、今後各方面における議論により内容に変更がありえる。

2. 構造物の設計に関する国際的動向¹⁾

WTO/TBT 協定の発効に伴い、ISO (International Organization for Standardization) で策定される国際規格は、国内規格の基礎として採用することが求められている。また、ISO は Eurocodes を策定している CEN(European Committee for Standardization)と極めて密接な関係にある。1991 年に ISO と CEN との間で結ばれたウィーン協定によれば、CEN で先行的に規格策定作業が行われる規格について、ISO は規格策定作業を行わず、CEN での作業結果が ISO の規格原案となる。地域規格である欧州規格 EN (European Normalization) がそのまま国際規格となる道が用意されている。

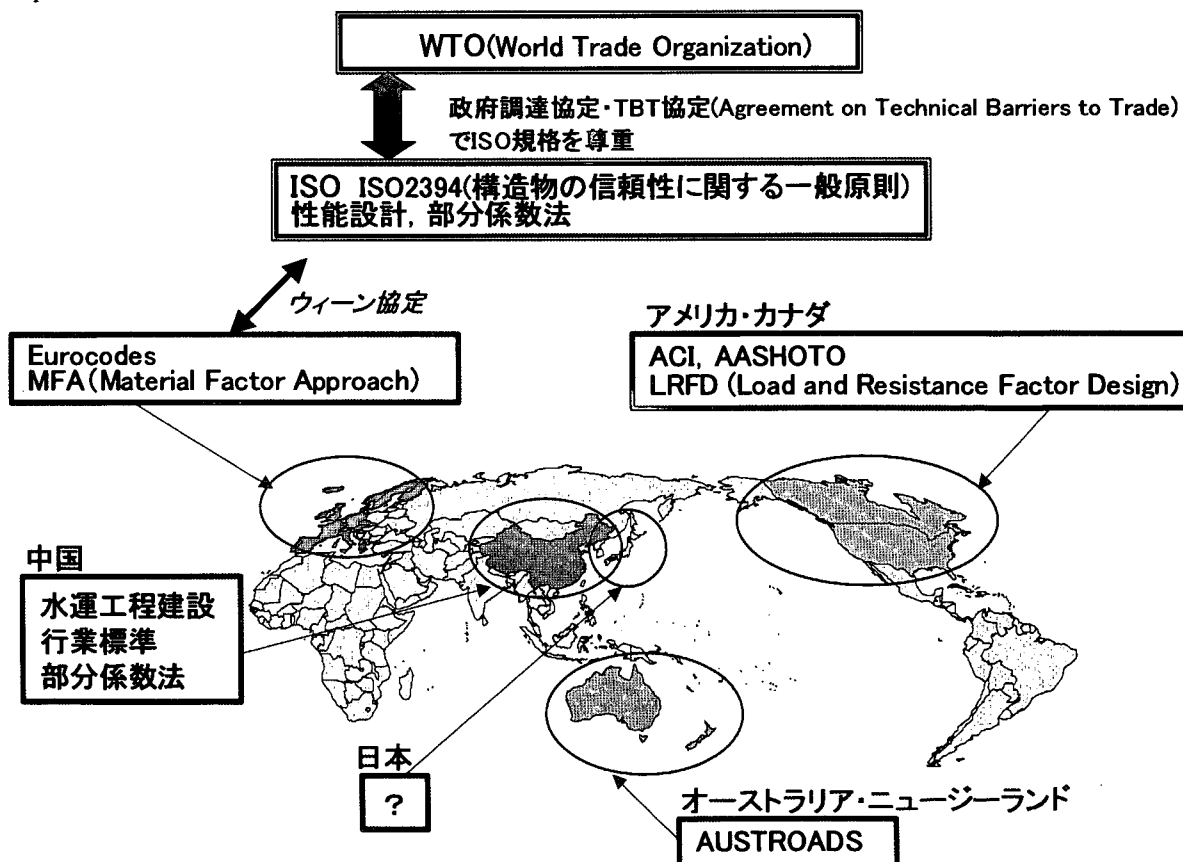


図-1 設計法を巡る国際的動向

表-1 TBT 協定第 2 条 (抜粋)

2.4 Where technical regulations are required and relevant international standards exist or their completion is imminent, Members shall use them, or the relevant parts of them, as a basis for their technical regulation...

2.8 Wherever appropriate, Members shall specify technical regulations based on product requirements in terms of performance rather than design or descriptive characteristics.

表-2 ISO2349 基本的要求事項 (抜粋)

Structures and structural elements shall be designed, constructed and maintained in such a way that they are suited for their use during the design working life and in an economic way. In particular they shall, with appropriate degrees of reliability, fulfill the following requirements:

- they shall perform adequately under all expected actions (serviceability limit state requirement);
- they shall withstand extreme and/or frequently repeated actions occurring during their construction and anticipated use (ultimate limit state requirement);

ISO/TC98 が作成した ISO2394 General principles on reliability for structures (構造物の信頼性に関する一般原則) は、各種の作用 (荷重) の考え方や構造物の信頼性評価に関する一般原則を記述している。構造物とその各部は、構造物の設計供用期間を通して、使用限界状態と終局限界状態に対して要求される性能を有する必要がある。その信頼性は、部分係数法あるいはより直接的な指標である安全性指標や破壊確率により評価される。ISO2394 は設計の原則や基本的事項をとりまとめたものであり、実際の設計作業を行うためには、もっと具体的な記述が必要となる。そのため、TC/98/SC2/WG8 (幹事国；オーストラリア) が General framework for structural design (構造設計の一般的枠組み) の策定作業を開始している。その内容には十分に関心を払う必要がある。

一方、CEN は構造物の設計の基本を記述した EN1990 Basis of Structural Design や EN1991 Action on structures を策定しているが、その内容は概ね ISO2394 と同じである。

3. 港湾の施設の技術上の基準の国際整合性^{2), 3), 4), 5)}

港湾の施設の技術上の基準 (以下、港湾基準) を信頼性設計をベースにした性能規定型基準に変更するとともに、ISO 等の国際規格との整合を図ることの必要性を例示すると以下のとおりである。

3.1 国内建設プロジェクトにおける貿易摩擦の回避

- ・ WTO/TBT 協定の遵守

3.2 建設に関する国際市場の確保競争

- ・ 欧州…国際規格化を手段として市場を獲得 (Eurocodes の ISO 規格化)
- ・ 東南アジア…ISO 規格を自国の規格へ導入する動き
- ・ 中国…WTO 加盟を機に国際規格の導入 (交通部は、Laws of International Standardization of the People's Republic of China に基づいて、2000年6月に Technical codes for port engineering を完成。設計法として部分係数法を採用)
- ・ 日本…国内市場から国外市場へ

3.3 関連技術や資材等の国際的調和と流動性の向上

- ・PIANCにおける防舷材の性能試験法と設計法
- ・外国製品の利用によるコスト縮減

3.4 技術の進歩が生かされる技術基準体系

- ・地盤調査方法や土質試験法等の精密化と地盤設計
- ・波浪観測や波浪推算法等の精密化と防波堤の設計
- ・新型式の構造物を採用することによるコスト縮減

4. 港湾分野における ISO 等への対応状況

4.1 ISO/SC3/WG8 Actions from waves and currents (波・流れの作用)

波・流れの作用は防波堤や護岸の設計において最も基本的事項である。また、この分野の日本の研究成果は、BS6349 Maritime Structures 等に採用されるなど国際的にも高く評価されている。従って、この WG については、重大な関心を寄せるとともに十分に国際貢献できるものと考えている。日本からは、合田良実 横浜国立大学名誉教授が WG メンバーとして参加している。今年 12 月、第 3 回会議において WG ドラフトの全体骨子が議論された。

波の不規則波浪としての取り扱い、極値波浪統計解析、港湾・海岸構造物の性能設計等が議論されている。参考 1 に WG ドラフトの目次案を紹介する。

4.2 ISO/SC3/WG10 Seismic actions on geotechnical works (地盤基礎構造物への地震作用)

既に規格化されている ISO3010 Bases for design on structures – Seismic actions on structures – (構造物の設計の基本 – 構造物への地震作用) は、その適用が建築物や類似の構造物に限られており、地盤と構造物との地震時相互作用に大きく影響される岸壁やトンネル等の構造物を対象としたものではない。このため、井合進 京都大学教授が主査となって標記の WG が発足した。参考 2 に WG ドラフトの目次案を紹介する。この他、ISO/TC71/SC4 で担当していた Performance and assessment requirements for structural concrete や ISO/TC156/WG10 の Cathodic protection of buried and immersed metallic structures 等、港湾に関係の深い内容については、国内審議団体を通じて意見・修正案等を提出してきた。

5. 現在の港湾構造物の設計の考え方

5.1 港湾基準の体系

港湾構造物の設計は、「港湾の施設の技術上の基準（以下、港湾基準）」に従って行われる。港湾基準は昭和 54 年に策定された後、平成元年、平成 6 年、平成 11 年の 3 度の改訂が行われた。このうち、平成 6 年の改訂は一部のみの改訂であり、全面的な改訂はほぼ 10 年おきに行われてきたといえる。

過去の改訂のうち、平成 11 年の改訂においては、性能設計に関する国内外の動向を踏まえつつも、時間的な制約もあり、基本的には仕様規定型の基準となっている。しかしながら、鉄筋コンクリート構造物の限界状態設計法の導入、係留施設(岸壁)のレベル 2 地震動に対する変形照査の考えの導入、および直杭式栈橋の保有水平耐力法による耐震性能照査などは盛り込まれた。

現在「港湾基準」として認知されているものは日本港湾協会より発刊されている「港湾の施設の技術上の基準・同解説」⁶⁾である。同書に記載されている内容は、港湾基準(枠囲みの一部)、その解説、及びその参考である。このうち、強制力があるものは港湾基準のみであり、解説及び参考は一切強制力を有するものではない(しかしながら、参考の部分まで強制力のある「基準」であると認識されている場合が多い)。現在の港湾基準において、例えば耐震設計に関する部分については、震度法における地域別震度、地盤種別係数、重要度係数は基準であるが、岸壁の設計法の詳細は基準ではない。

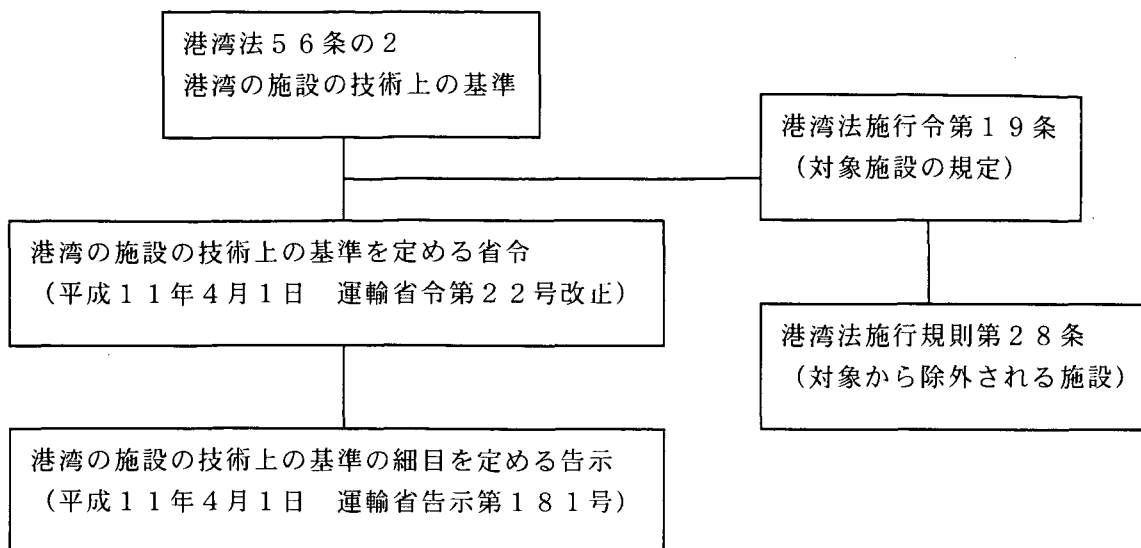


図-2 港湾の施設の技術上の基準の法令上の体系

5.2 港湾構造物の現行設計法

港湾構造物は、一部を除いて許容応力度設計法あるいは安全率を用いた設計法で設計されている。この設計法は、以下のような特徴を有する。

- (1) 許容応力度設計法とは、「材料の公称基準強度（応力度）を適当な安全率で除した値を許容応力度とし、設計荷重による計算応力度が、この許容応力度を超えないことを照査する設計方法」である。
- (2) 許容応力度設計法の問題点

許容応力度設計法または安全率を用いた設計法は、伝統に裏打ちされ、莫大な実績をもつ極めて優れた方法であるが、以下のような不満足な点もある。

- ① 安全率や許容応力度自身が、構造物の信頼性の絶対的尺度になっていない。すなわち、構造物の設計を行うときの不確実性をカバーする安全率の値が試行錯誤の結果、経験的に決められている。したがって、この方法では、例えば、抗の鉛直支持力の安全率が3であり、斜面の円形すべりの安全率が1.5であるからといって、前者が後者より2倍安全であるとはいえない。
- ② 防波堤の滑動に対する安全率は、波力作用と滑動抵抗力の両方の不確実性を考慮して1.2としている。従って、波力公式が精密になったから安全率を下げようとしても、安全率をいくらにすればよいか検討がつかない。

6. 港湾基準改訂に向けた取り組み

6.1 性能設計

性能設計という用語と信頼性設計という用語が港湾技術者の間で一体的に使われる場合が多いようで、技術者間に若干の混乱があるように見受けられる。ここでは2つの用語の整理をしておきたい。

まず、性能設計とは、「構造物に要求する性能を明確にし、その性能を達成する設計法」ということができる。ここで、基準に従った設計行為を考えた場合に、要求性能が基準（＝強制）であり、基準（要求性能）を達成する方法（設計法）は設計行為に加担する者が独自の判断で選択できるスタイルを次期港湾基準では想定している。

その際に、強制力がかかるのは要求性能だけとなるため、この要求性能はできる限り明確に、定量的に示す必要があると考えられる。単に「～の荷重作用に対して安定であること」と示しただけでは、どのように安定であるのか不明であり、設計を行うことができないためである。要求性能としては、例えば、「耐用期間中の荷重効果による構造物のシステム破壊確率を 2×10^{-2} 以下にする」、
「ある特定の荷重効果により構造部材の幾つかは降伏するが、システム破壊は生じない」

といった性能を示す必要があると考えられる。次に要求性能を照査する際に、これを確定的に照査する方法と、確率的に照査する方法の2通りが考えられる。後者が信頼性設計法である。

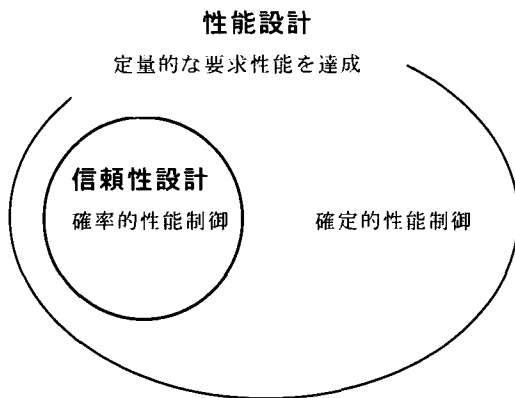


図-3 性能設計と信頼性設計

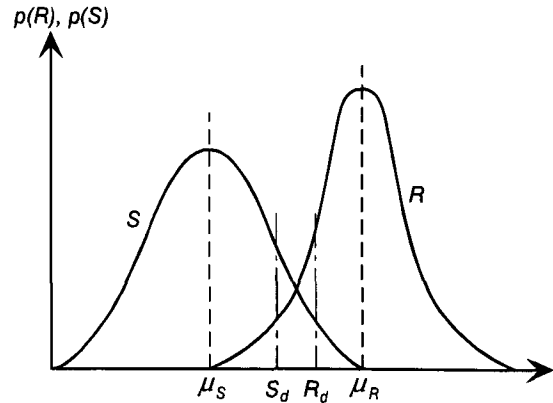


図-4 信頼性設計

6.2 信頼性設計

構造物の設計においては、耐力と荷重効果の値を何らかのモデルを用いて計算し、耐力が荷重効果を上回ることを確認する。従来の設計法では、耐力及び荷重効果を構成する因子の値をある値に確定的に定めて、確定的な耐力設計用値 R_d と荷重効果設計用値 S_d の値を比較して安全性照査を行うが、 R_d 及び S_d は、それぞれの確率分布における超過確率として定められたものではなかったため、設計される構造物の破壊に対する安全性が定量的に明確ではなかった(図-4)。こうした従来型の設計法に替わり、確率論を援用して構造物の破壊(損傷)する可能性を定量的に制御する方法が信頼性設計法である。信頼性設計法には3つのレベルがある⁷⁾(表-3)。もっとも用いられる頻度の高いものがレベル1の方法であり、ISO2394に位置付けられたのもこの方法である。なお、安全性指標とは破壊の可能性を表す指標で、この値が大きいほど安全であることを示す。

表-3 信頼性設計法の3つのレベル¹²⁾

レベル	安全性照査式	基準パラメータ
レベル3	$p_f \leq p_{f,d}$	破壊確率
レベル2	$\beta \geq \beta_T$	安全性指標
レベル1	$R_d \geq S_d$	設計用値

レベル1信頼性設計法の安全性照査式(性能関数)の基本を示すと式(1)のようになる。

$$\gamma_R R_k \geq \gamma_S S_k \quad (1)$$

ここに、 γ_R : 耐力に関する安全係数、 γ_S : 荷重効果に関する安全係数、 R_k : 耐力の特性値、 S_k : 荷重効果の特性値

式(1)に分離係数 α_R 、 α_S を導入することにより、安全係数が式(2)~式(3)により得られる。ここに、分離係数は、FORM(First Order Reliability Method)を適用することにより性能関数の線形化近似を行う際に得られる値である。

$$\gamma_R = (1 - \alpha_R \beta_T) \frac{\sigma_R}{\mu_R} \frac{\mu_R}{R_k} \quad (2)$$

$$\gamma_s = (1 + \alpha_s \beta_T \frac{\sigma_s}{\mu_s}) \frac{\mu_s}{S_k} \quad (3)$$

ここに、 μ 及び σ は、その添字の変数に関するそれぞれ平均値及び標準偏差であり、 β_T は目標安全性指標である。このように、レベル1の信頼性設計法では、構造物の破壊確率を直接扱った計算は行わないが、破壊確率が許容値以下になるように設定した安全係数を用いて設計計算を行うことによって、安全性をコントロールしている。

なおレベル2の信頼性設計法は、安全性指標の値そのものを判定基準とするものである。すなわち、設計される構造物の安全性指標を算出し、これが目標値を上回ることを確認する。

$$\beta \geq \beta_T \quad (4)$$

6.3 港湾基準改訂の基本的考え方

上述したように性能規定型設計法においては、要求性能のみが基準として強制される内容となり、基準達成の方法は設計者（ないしは発注者）に委ねられることとなる。ただし、方法を一切示さないことは設計者の便を考慮すると現実的とはいえないであろう。したがって、標準的と考えられる設計法を参考として記述しておくスタイルが現実的と考えている。このため、信頼性設計法によるコードキャリブレーションの実施が必要である。

その際に最も重要な点は、確率論に基づいたキャリブレーションを実施すること、及びキャリブレーションされた設計法により要求性能が満足されることを合理的な指標を用いて示すことであると考えられる。形式的に、従来の設計法と同程度の断面になるように安易に部分安全係数を設定したのでは、信頼性設計法の合理性が発揮されることは無く、単に設計者の手間を増やしただけになってしまうことが懸念される。信頼性設計法の導入の意義は構造物の安全性のばらつきを減少させることであるが、形式的なキャリブレーションを行ったのでは、設計される構造物の安全性はそれ以前の設計法による場合の安全性と同程度にばらつくと考えられる。

さらに、信頼性設計法は与えられた性能関数の枠内で合理的な方法を与えるものであることに注意が必要である。性能関数がかならずしも実際の破壊メカニズムと調和的でない場合には、信頼性設計法の適用により設計が合理化される可能性は低いであろう。

今後の設計法の展望を示したものが図-5である。設計を標準的なものと特殊なものに大別して考える。ここで、特殊な設計とは、特に重要な構造物や特に安全性照査を綿密に行うことが要求される構造物の設計のことを指す。技術基準及びマニュアルが対象とするのは主に標準的な設計であり、標準的な設計は、レベル1信頼性設計法を中心とした性能設計に書き換えられることが期待される。特殊な設計については、模型実験や高度な数値解析による確定論的な性能設計に加えて、レベル2以上の信頼性設計法の採用が期待される。

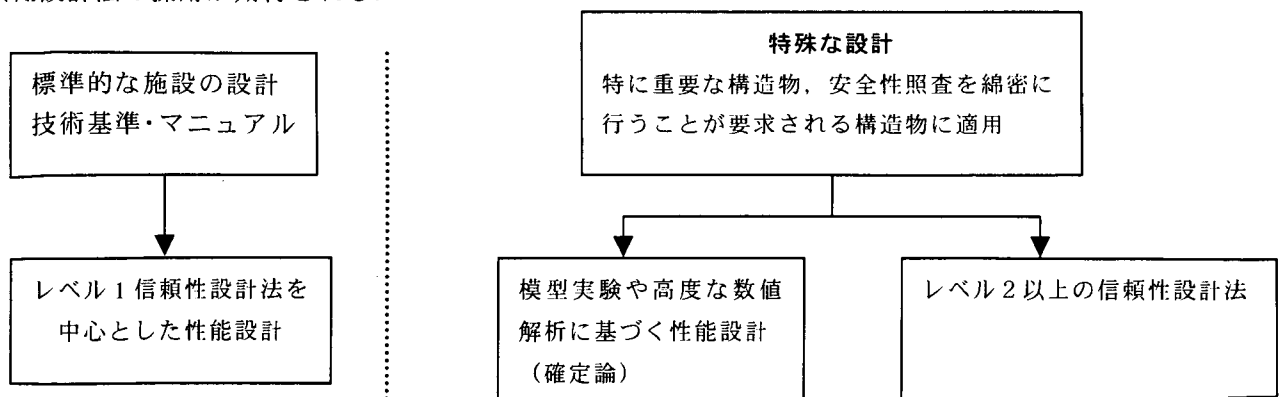


図-5 設計法の将来展望

6.4 ケーソン式防波堤の外的安定への信頼性設計法の適用例^{9), 10), 11)}

(1) 概要

レベル1及びレベル2の信頼性設計法によって防波堤の外的安定設計を行う手法を検討した例について紹介する。全国における防波堤の設計事例をもとに、現行設計法による安全性水準を滑動・転倒・支持力破壊の3つの破壊モードを考慮したシステム安全性指標により検討した。さらに、信頼性設計法によるコードキャリブレーションを行い、キャリブレーション結果の合理性を検証した。また、レベル1及びレベル2の方法の適用性の相互比較をあわせて行った。

(2) 現行設計法による安全性水準

防波堤の外的安定に関係する設計因子のうち、確率変数として扱うべき因子を抽出し、それぞれの従う確率分布を表-4のように推定した。基本的に各設計変数とその設計用値の比の値は正規分布に従うと仮定し、設計変数の平均値と設計用値の比の値 α と、変動係数 V によって分布を表している。水深変化の緩急は1/30以下の場合を緩勾配、1/30を超える場合を急勾配とする。波力関係のうち波浪変形計算精度、砕波変形精度、波力算定式推定精度は模型実験をもとに求められた確率分布であり、沖波波高推定精度は推定値である。潮位は過去50年間の全国の沿岸域における高潮に基づく既往最高潮位H.H.W.L.とさく望平均満潮位H.W.L.の比の値 r_w の地域区分に従い分類した。

現行設計法による防波堤の外的安定水準を評価するため、近年の全国における防波堤の設計事例76例を地域的及び設計条件的に偏りのないように広範囲から収集した。滑動・転倒・支持力の3つの破壊モードについて現行設計法に準じて性能関数を定義し、Hasofer-Lindタイプ⁸⁾の安全性指標を算出した。図-6に、滑動、転倒、支持力の各破壊モードに対する現行設計法の安全率と安全性指標の関係を示す。滑動または転倒については、安全率と安全性指標は概ね正の相関関係にあるが、支持力についてはばらつきが大きく、安全率から安全性指標を精度良く推定することは困難であることがわかる。3つの破壊モードに対応する安全性指標の相互の相関は低く、滑動がほとんどの断面で支配的なモードであることが分かった。この被災モードの傾向は、実際の被災傾向と整合的である。

次に、破壊モード相互の相関が低いことを考慮し、3つの破壊モードを考慮したシステム破壊確率を、各モードを完全独立と仮定してシステム破壊確率を算出した。システム破壊確率をもとに算出されるシステム安全性指標の分布を図-7に示す。システム安全性指標は1.71~3.63の範囲にあり、平均値は2.41である。この値は、実際の防波堤の破壊事例より推定される平均的な安全性指標と調和的であり、システム安全性指標は適切に算定されたものと判断される。

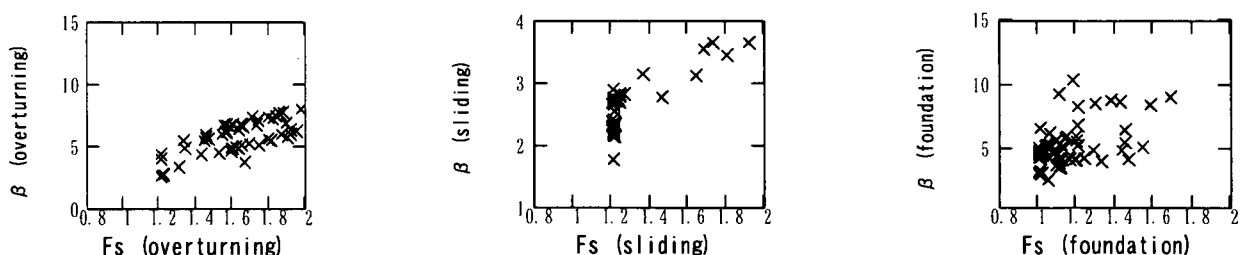


図-6 安全性指標と安全率の関係

信頼性設計法によるコードキャリブレーションにあたり、目標安全性水準の定め方としては、平均値設定のキャリブレーションにおいては破壊確率の平均値を目標値とし、最低水準設定のキャリブレーションにおいては、5%超過確率に相当する破壊確率(2.30×10^{-2})とする。この値は、システム安全性指標の分布に正規分布を当てはめて得られる5%非超過安全性指標1.99をもとにして設定した。また、防波堤はどのような破壊モードが生じても基本的には原型復旧されることから、目標安全性指標は各破壊モードに対して同じ値とする。

表-4 設計因子の従う確率分布

	α	V
波力		
沖波波高推定精度	1.00	0.10
波浪変形計算精度		
水深変化緩	0.97	0.04
水深変化急	1.06	0.08
砕波変形推定精度	0.87	0.10
波力算定式推定精度		
ケソン式混成堤	0.91	0.19
消波ブロック被覆堤	0.84	0.12
潮位		
$r_{wl}=1.5$	1.00	0.20
$r_{wl}=2.0, 2.5$	1.00	0.40
摩擦係数	1.06	0.15
単位体積重量		
鉄筋コンクリート	0.98	0.02
無筋コンクリート	1.02	0.02
中詰砂	1.02	0.04
基礎地盤	1.00	0.03
基礎地盤強度	1.00	0.10

注) α : 平均値の偏り (平均値/設計用値)

V : 変動係数

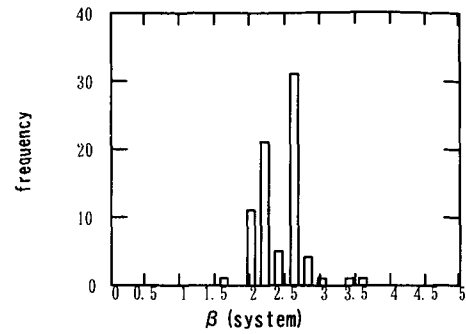


図-7 システム安全性指標の分布

(3) レベル2信頼性設計法によるキャリブレーション

レベル2信頼性設計法においては本来、目標安全性指標をちょうど満足する設計を行うことが可能であるが、防波堤の外的安定においては破壊モードが複数あることから、卓越モード以外の安全性指標は目標値を上回るため、キャリブレーションを行って最適な目標安全性指標を設定する必要がある。レベル2信頼性設計法の適用にあたり、2.00~2.55の範囲で0.05刻みで目標安全性指標を変化させてFORMを用いた試設計を行った。すべての破壊モードについて式(4)を満足する最小の堤体幅を算出し、その堤体幅に対する各破壊モードの安全性指標を算出し、これをもとにシステム破壊確率を算出する。得られた値に対して、平均値ベースのキャリブレーションにおいては式(5)に示すようにシステム破壊確率目標値に対する各断面のシステム破壊確率の分散最小案を、最低水準ベースのキャリブレーションについては式(6)に示すようにシステム破壊確率に関する現行設計法と信頼性設計法の5%超過確率の差の絶対値最小案を最適案として採用する。

$$\sum (P_{fi} - P_{fr})^2 \rightarrow \min \quad (5)$$

ここに、

P_{fi} : システム破壊確率の目標値, P_{fr} : 信頼性設計法によるシステム破壊確率

$$\left| P_{f5\%p} - P_{f5\%r} \right| \rightarrow \min \quad (6)$$

ここに、

$P_{f5\%p}$: 現行設計法によるシステム破壊確率の5%超過確率

$P_{f5\%r}$: 信頼性設計法によるシステム破壊確率の5%超過確率

解析結果を図-8に示す。水平軸は目標安全性指標であるが、左端の現行と記した部分は現行設計法による値であることを示す。鉛直軸にはシステム安全性指標の平均値及び5%非超過確率値、および

現行設計法による堤体重量を 1.0 とした場合の信頼性設計法による堤体重量の平均値を示している。目標安全性指標を下げるに従って、システム安全性指標、堤体重量比も比例的に下がることが分かる。図-9 に、各キャリブレーション条件の最適案の判定結果を示す。平均値キャリブレーションについては目標安全性指標 2.45 のケースが、最低水準キャリブレーションについては目標安全性指標 2.20 のケースが適合する。前者の堤体重量比平均値は 0.99 とほぼ現行設計法と同じに保たれており、建設コストは変えずに合理的な設計が行えることを示している。後者の堤体重量比平均値は 0.94 であり、現行設計法と比較して平均的に 6% の建設コスト縮減が可能になる。各キャリブレーション条件の信頼性設計法と現行設計法による安全性指標分布の比較を図-10 に示した。

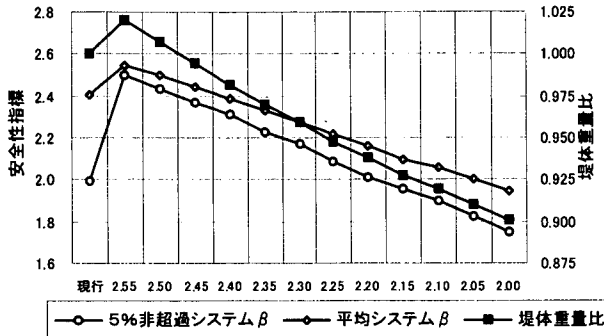


図-8 解析結果 (レベル2)

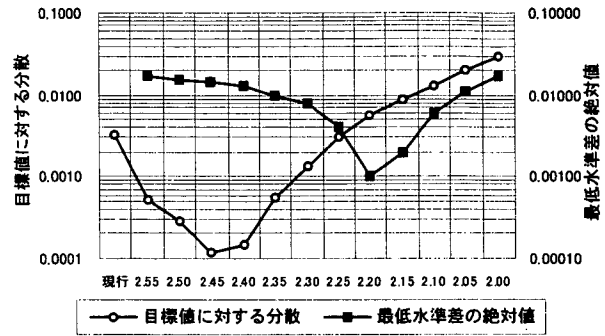
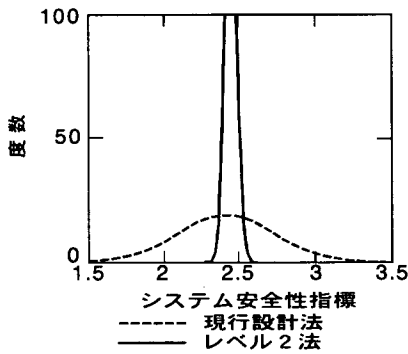
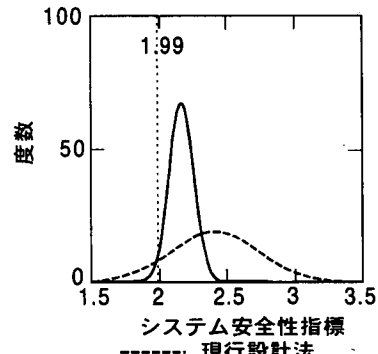


図-9 最適案の判定 (レベル2)



(a) 平均値設定



(b) 最低水準設定

図-10 キャリブレーション結果

(4) レベル1 信頼性設計法によるキャリブレーション

レベル1 信頼性設計法によって滑動・転倒・支持力の各破壊モードに対する安全性照査式を書き下すと、それぞれ式(7)~式(9)のようになる。

$$\gamma_f f_k \left(\sum_i \gamma_{W_i} W_{ik} - P_{Bd} - \gamma_{P_U} P_{Uk} \right) \geq \gamma_{P_H} P_{Hk} \quad (7)$$

$$a \sum_i \gamma_{W_i} W_{ik} - b P_{Bd} - c \gamma_{P_U} P_{Uk} \geq d \gamma_{P_H} P_{Hk} \quad (8)$$

$$\frac{\sum \left\{ \left[\gamma_c c'_k s + (\gamma_{w_r} w'_k + \gamma_{q_r} q_k) \gamma_{\tan \phi'} \tan \phi'_k \right] \times \frac{\sec \theta}{1 + \tan \theta \gamma_{\tan \phi'} \tan \phi'_k / F_f} \right\}}{\left\{ \sum (\gamma_{w_s} w'_k + \gamma_{q_s} q_k) \sin \theta + e \gamma_{P_H} P_H / r \right\}} \geq F_f \quad (9)$$

ここに、記号 γ はその添え字に関する安全係数であり、添字 k 及び d はそれぞれ特性値及び設計用値であることを表す。その他の記号については以下の通りである。

f : 堤体底面と基礎との摩擦係数, W_i : 堤体を構成する材料(鉄筋コンクリート, 無筋コンクリート, 中詰砂)の重量(kN/m), P_B : 堤体に作用する浮力(kN/m), P_U : 堤体に作用する揚圧力合力(kN/m), P_H : 堤体に作用する水平波圧合力(kN/m), a : 堤体重量合力の作用線から堤体前趾までの距離(m), b : 浮力の作用線から堤体前趾までの距離(m), c : 揚圧力合力の作用線から堤体前趾までの距離(m), d : 水平波力の作用線から堤体底面までの距離(m), c' : 有効応力に基づく見かけの粘着力(kN/m²), s : 分割細片の幅(m), ϕ' : 有効応力に基づく見かけのせん断抵抗角($^\circ$), w' : 分割細片の重量(kN/m), q : 分割細片に作用する上載荷重(kN/m), θ : 分割細片の底面となす角($^\circ$), e : 水平波力のアーム長(m), r : すべり円弧の半径(m), F_f : 支持力に関する安全率

浮力設計用値 P_{Bd} はケーソンがフーチングを有しない場合、式(10)により得られる。

$$P_{Bd} = \rho_w g (\gamma_{w\lambda} w \lambda_k + h) B \quad (10)$$

ここに、 ρ_w : 海水密度(t/m³), g : 重力加速度(m/s²), $w\lambda$: 設計潮位(m), h : 堤体設置水深(m), B : 堤体幅(m)

支持力安全性照査については、上載荷重と分割細片の重量を考慮するが、これらは耐力と荷重の双方に影響し、かつ影響の度合いが異なるため、安全係数の値も異なることになる。また、堤体構成重量、揚圧力、浮力の安全係数は、滑動と転倒とでそれぞれの特性値が性能関数に及ぼす影響が異なるため、これらの安全係数も異なった値となる。支持力安全性照査の安全率は確定的に扱い、現行設計法と同様に収束計算により求める。各モードに対する安全係数は、性能関数に式(2)~式(3)で述べた分離係数を導入することによって設定する。これらの値は安全性指標の算出の際に算出されるが、76の断面を対象にしているため、断面ごとに値にばらつきが生じる。このためここでは、性能関数を線形近似展開する際に生じる高次の項を無視することによって、例えば滑動については式(11)のように設定した。

$$\begin{aligned} \gamma_f &= (1 - \alpha \alpha' \beta_T V_f) \mu_f / f_k \\ \gamma_{W_i} &= (1 - \alpha \alpha' \alpha'' \beta_T V_{W_i}) \mu_{W_i} / W_{ik} \\ \gamma_{P_U} &= (1 + \alpha \alpha' \alpha'' \beta_T V_{P_U}) \mu_{P_U} / P_{Uk} \\ \gamma_{w\lambda} &= (1 + \alpha \alpha' \alpha'' \beta_T V_{w\lambda}) \mu_{w\lambda} / w \lambda_k \\ \gamma_{P_H} &= (1 + \alpha \beta_T V_{P_H}) \mu_{P_H} / P_{Hk} \end{aligned} \quad (11)$$

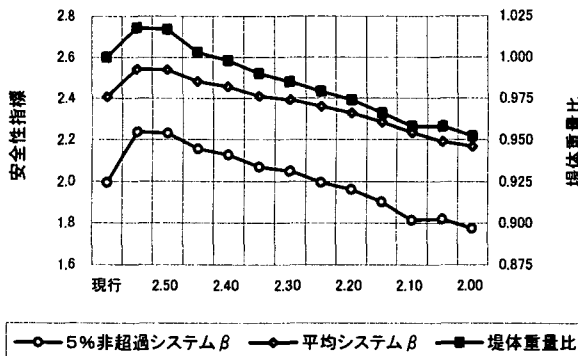


図-11 解析結果 (レベル1)

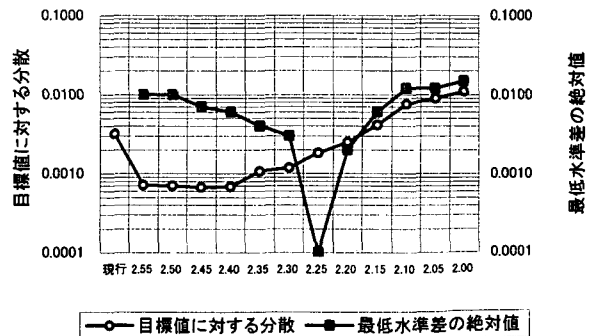
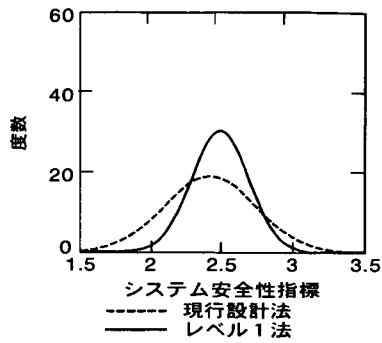


図-12 最適案判定 (レベル1)

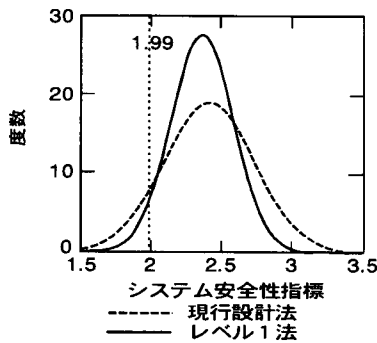
表-5 設計法の提案
レベル1

安全係数		平均値 設定	最低水準 設定	
滑動	水平波圧 γ_{PH}	混成堤・緩	1.08	1.05
		混成堤・急	1.20	1.17
		消波ブロック堤・緩	0.93	0.91
		消波ブロック堤・急	1.04	1.02
	摩擦係数 γ_f		0.87	0.88
	揚圧力 γ_{PU}	混成堤・緩	0.92	0.91
		混成堤・急	1.02	1.00
		消波ブロック堤・緩	0.82	0.81
		消波ブロック堤・急	0.90	0.89
	潮位 γ_{Wl}	$\gamma_{Wl} = 1.5$	1.17	1.15
		$\gamma_{Wl} = 2.0 \sim 2.5$	1.34	1.31
	自重 γ_{Wi}	鉄筋コンクリート	0.96	0.96
無筋コンクリート		1.00	1.00	
中詰砂		0.99	0.99	
転倒	水平波圧 γ_{PH}	混成堤・緩	1.08	1.05
		混成堤・急	1.20	1.17
		消波ブロック堤・緩	0.93	0.91
		消波ブロック堤・急	1.04	1.02
	揚圧力 γ_{PU}	混成堤・緩	0.99	0.97
		混成堤・急	1.09	1.07
		消波ブロック堤・緩	0.87	0.85
		消波ブロック堤・急	0.96	0.95
	潮位 γ_{Wl}	$\gamma_{Wl} = 1.5$	1.24	1.22
		$\gamma_{Wl} = 2.0 \sim 2.5$	1.48	1.44
	自重 γ_{Wi}	鉄筋コンクリート	0.96	0.96
		無筋コンクリート	1.00	1.00
中詰砂		0.97	0.98	
支持力	水平波圧 γ_{PH}	混成堤・緩	0.99	0.97
		混成堤・急	1.09	1.07
		消波ブロック堤・緩	0.87	0.85
		消波ブロック堤・急	0.96	0.95
	上載荷重 γ_q	滑動側	0.81	0.81
		抵抗側	0.72	0.72
	自重 $\gamma_{u'}$	滑動側	1.04	1.03
抵抗側		0.98	0.98	
$\tan \phi'$	$\gamma_{\tan \phi'}$	0.92	0.92	
C'	$\gamma_{c'}$	0.88	0.89	

*緩/急は海底勾配1/30未満/以上



a) 平均値設定



b) 最低水準設定

図-13 キャリブレーション結果

レベル2

安全性指標		平均値 設定	最低水準 設定
目標安全性指標 β_T	滑動	2.45	2.20
	転倒	2.45	2.20
	支持力	2.45	2.20

分離係数 α , α' , α'' , α''' は、耐力と荷重効果の標準偏差の比の値が 1.0 に近い場合の近似値である 0.70 をすべての安全係数に採用した。レベル 2 信頼性設計法の場合と同様に、式(7)~式(9)を満足する最小の堤体幅を算出し、その堤体幅に対する各破壊モードの安全性指標を算出し、これをもとにシステム破壊確率を算出する。目標安全性指標 β_T についてもレベル 2 の検討と同様とした。解析結果を図-11 に示す。水平軸および鉛直軸は図-8 と同じである。レベル 2 の結果と比較すると、目標安全性指標の変化に対するシステム安全性指標及び堤体重量比の変化の度合いが鈍いことが分かる。これは、複雑な性能関数を持つ破壊モードに対するレベル 1 の方法の破壊制御性能の限界を示しているものと考えられる。図-12 には、各キャリブレーション条件の最適案の判定結果を示す。平均値キャリブレーションについては目標安全性指標 2.45 のケースが、下限値キャリブレーションについては目標安全性指標 2.25 のケースが適合する。これはレベル 2 の方法の場合とほぼ同じ結果となった。平均値キャリブレーションの堤体重量比平均値は 1.00 であり、現行設計法と建設コストは変わらないが、

目標値に対する分散には1オーダーの差があり、現行設計法よりも合理的な設計が行える。下限値キャリブレーションの堤体重量比平均値は0.98であり、現行設計法と比較すると2%程度の建設コスト縮減が可能になる。各キャリブレーション条件の信頼性設計法と現行設計法による安全性指標分布の比較を図-13に示した。これまでの結果をまとめて、表-5にレベル1及びレベル2の信頼性設計法による設計手法の提案を示す。

7. 今後の課題

性能規定型・信頼性設計型の港湾基準策定のためのコードキャリブレーション実施にあたり解決すべき課題として以下があげられる。

①目標安全性の設定

信頼性設計法においては目標安全性水準をどのように定めるかが最重要課題である。その際の最も有力な方法は、防波堤の例で示したように、過去の設計法における平均的な安全性水準に一致させる方法である。しかしながら、これまでの防波堤及びケーソン式岸壁の被災事例から推定される破壊確率は、それぞれ 7×10^{-3} 及び 5×10^{-2} である^{9),11)}。6.4ではこの安全性水準を目標値としてキャリブレーションを行った事例を示したが、これらの値は目標安全性としてはたして妥当な水準といえるのであろうか？

実際のところ、現行設計法の各施設の安全性水準は、それぞれ別個に工学的判断により定められてきた。このため、現行設計法の平均水準が妥当なものといえるのか、例えばライフサイクルコスト¹²⁾などの観点から検討を実施する必要があると考えている。

②力か変形か：設計体系の構築

これまでの設計法は力の釣合いに基づく性能関数を評価することが多かった。しかしながら、構造物の荷重応答は非線形であることが多いため、力の釣合いではなく、変形に基づく方向に設計の規範をシフトすべきだという議論が一般的になりつつある。その場合には、信頼性設計法の導入にあたって変形が制御対象となり、変形の確率的評価を行う必要があるが、一般的に変形の確率評価を行うことは困難である。さらに、変形を指標とした設計計算を標準化することは設計業務に対する負担を増加させることが予想される。そこで、設計計算は力を規範とした信頼性設計法とし、必要に応じて設計断面について変形などを確定的に照査するスタイルが妥当ではないかと考えている（変形照査で許容値をクリアできない時は断面変更を行うが、最適化は行わない）。その場合に、力に基づく設計と変形の照査が大局的には調和的な結果となるような体系を構築しておく必要があると考えられる。

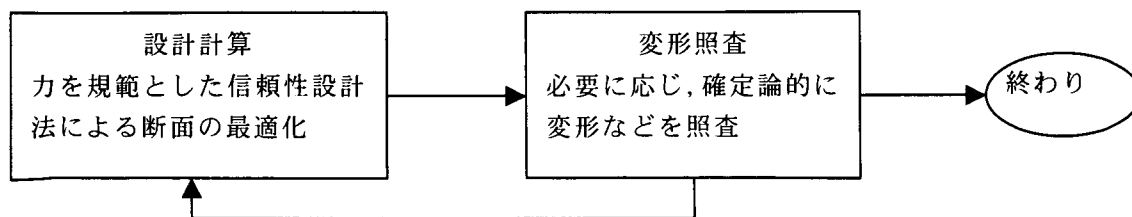


図-14 標準的な設計法の体系イメージ

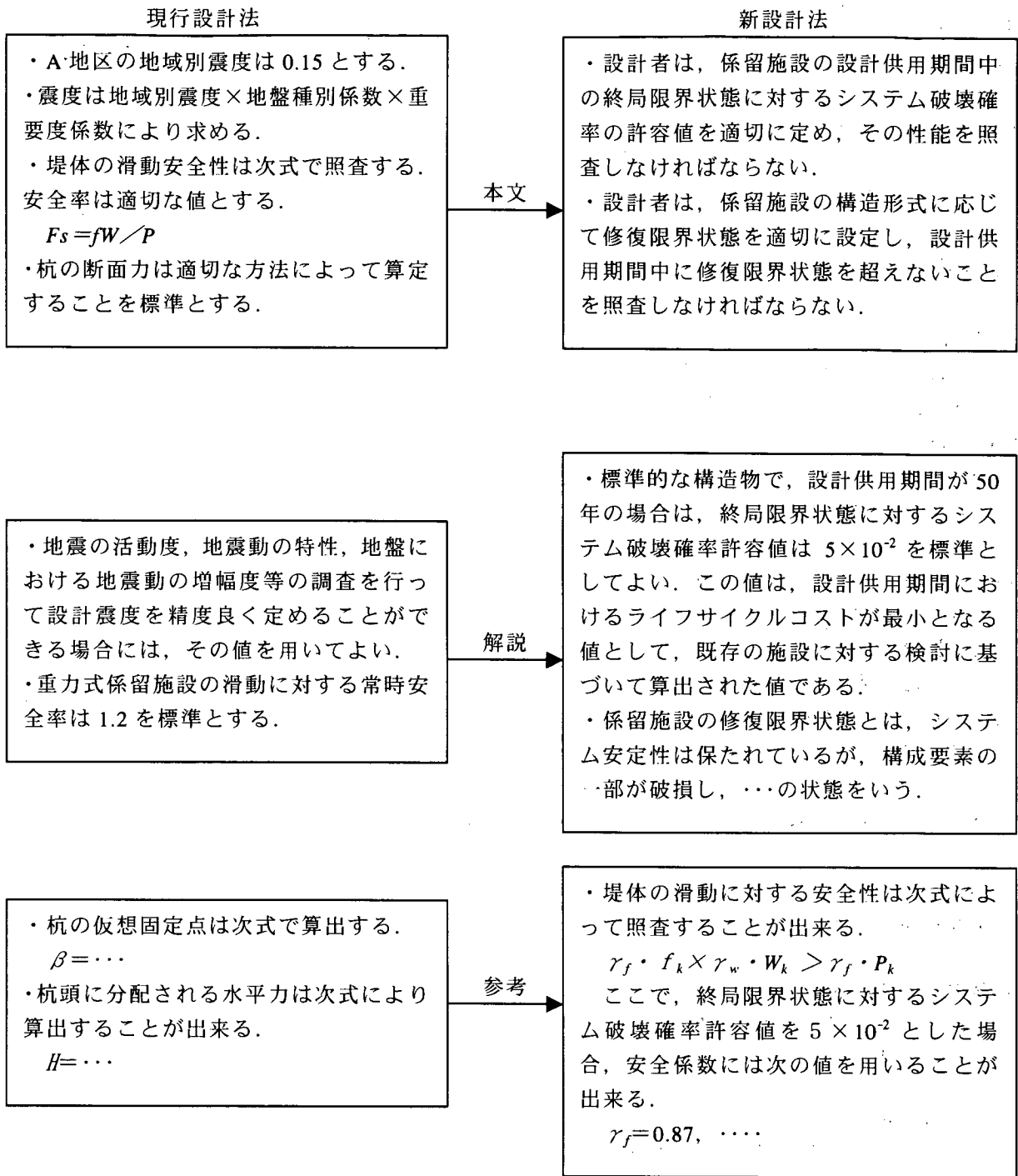


図-15 新設計法のイメージ

8. おわりに

本稿では、港湾基準の性能規定型基準に向けた改訂動向をとりまとめ、新設計法のイメージを図-15に示した。解決すべき課題は山積しているが、合理的な設計法構築に向けて進んでいきたい。各方面からのご意見をいただければ幸いである。なお、本稿は、長尾港湾施設研究室長が鋼構造と橋に関するシンポジウム（2002.8）で発表した論文に加筆修正したものである。また、合田良実横浜国立大学名誉教授及び井合進京都大学教授から、ISO/TC98/WG8 及び WG10 の作業状況について情報を提供していただいた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1)山本修司：港湾構造物の設計における国際規格の適用とその課題，港湾技術研究所講演会講演集，pp. 119-130, 1999.
- 2)山本修司，森屋陽一：港湾分野における運輸省の取り組み，「ISO への対応」に関する第3回シンポジウム-ISO規格と認証制度-講演資料集，pp. 31-43, 土木学会，2000.
- 3)山本修司：港湾の技術基準の国際化対応について，港湾空港技術特別講演会 in 仙台，講演集，pp. 53-68, 2001.
- 4)山本修司：アジア各国の技術基準事情，土木ISOジャーナル，Vol. 8, 2002.
- 5)山本修司，菊池喜昭：港湾構造物の性能規定型設計コードについて，基礎工 Vol. 29, No. 8, pp. 25-29, 2001.
- 6)運輸省港湾局監修，日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説，1999.
- 7)星谷 勝，石井 清：構造物の信頼性設計法，鹿島出版会，1986.
- 8)Hasofer, A. M. and Lind, N. C. : Exact and Invariant Second moment Code Format, Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE, Vol.100, No.EM1, pp.111-121, 1974.
- 9)長尾 毅，吉浪康行：信頼性解析によるケーソン式防波堤の外的安定性評価，構造工学論文集Vol.47A, pp.305-312, 2001.
- 10)長尾 毅：ケーソン式防波堤の外的安定に関する信頼性設計法の適用，土木学会論文集，No.689, I -57, pp.173-182, 2001.
- 11)長尾 毅，吉浪康行，佐貫哲朗，嘉門雅史：ケーソン式岸壁の外的安定に関する信頼性設計法の適用，構造工学論文集 Vol.47A, pp.293-304, 2001.
- 12)長尾 毅：破壊確率を考慮した防波堤の期待総費用最小化に関する研究，第4回構造物の安全性・信頼性に関する国内シンポジウム(JCOSSAR2000)論文集，pp.441-448, 2000.

参考1 ISO/SC3/WG8 Actions from waves and currents

1 Scope

2 Normative reference

3 Terms and definitions

4 Symbols

5 Design parameters

5.0 Examination of uncertainties related to wave and current action

5.1 Water levels

5.1.1 Tides

5.1.2 Storm surges

5.1.3 Joint probabilities of waves and high water level

5.2 Waves

5.2.1 Wave heights and periods

5.2.2 Wave spectra

5.2.3 Extreme wave statistics

5.2.4 Wave transformation

5.2.4.1 Wave shoaling

5.2.4.2 Wave refraction

5.2.4.3 Wave diffraction

5.2.4.4 Wave breaking

5.2.4.5 Wave reflection

5.2.4.6 Other transformations

5.2.4.7 Wave crest elevation and wave kinematics

- 5.3 Currents
 - 5.3.1 Current parameters
 - 5.3.2 Interaction between currents and waves
- 6 Wave and current action on fixed structures
 - 6.1 Armour units on mound breakwaters
 - 6.2 Wave action on vertical and composite structures
 - 6.3 Wave actions on coastal dikes and seawalls
 - 6.4 Wave and current actions on cylindrical members and isolated structures
 - 6.5 Wave and current actions on piers
 - 6.6 Wave action on other structures
- 7 Wave interaction with floating structures in shallow water
 - 7.1 Floating breakwaters
 - 7.2 Ships at moorings
 - 7.2.1 Berthing operation
 - 7.2.2 Ship loads onto mooring
 - 7.2.3 Interactions between multiple floating bodies
 - 7.3 Buoys
 - 7.4 Wave power devices
- 8 Scour at structures by action from waves and currents
 - 8.1 Local scour
 - 8.1.1 Piles: single and multiple
 - 8.1.2 Square or circular bodies
 - 8.1.3 Walls and long bodies caisson
 - 8.1.4 Rubble mound structures
 - 8.2 Scour protection with toe protection
 - 8.3 Down-drift erosion and general bed movements
- 9 Performance-based design of maritime structures
 - 9.1 General approach
 - 9.2 Mound breakwaters
 - 9.2.1 Conventional rubble mound breakwaters
 - 9.2.2 Berm breakwaters
 - 9.3 Caisson breakwaters
 - 9.4 Coastal dikes
 - 9.5 Other structures

Annex A

Annex B

Bibliography

参考 2 ISO/SC3/WG10 Seismic actions on geotechnical works

Foreword

Introduction

1 Scope

2 Normative references

3 Terms and definitions

4 Symbols and abbreviated terms

5 Principles and abbreviated terms

5.1 Principles

- 5.2 Procedure**
- 6 Evaluation of earthquake motions, liquefaction potential, and fault displacement**
 - 6.1 Objective**
 - 6.2 Seismic hazard analysis**
 - 6.3 Site response/liquefaction analysis**
 - 6.3.1 General**
 - 6.3.2 Empirical analysis**
 - 6.3.3 Site specific pseudo-static analysis**
 - 6.3.4 Site specific dynamic simplified analysis**
 - 6.3.5 Site specific dynamic detailed analysis**
 - 6.4 Spatial variation**
 - 6.4.1 General**
 - 6.4.2 Simplified analysis**
 - 6.4.3 Site specific simplified analysis**
 - 6.4.4 Site specific dynamic analysis**
 - 6.5 Seismic fault displacement**
- 7 Procedure for evaluating seismic actions**
 - 7.1 Analysis type and model**
 - 7.2 Seismic actions for pseudo-static analysis**
 - 7.2.1 Simplified analysis**
 - 7.2.2 Detailed analysis**
 - 7.3 Seismic action for dynamic analysis**
 - 7.3.1 Simplified analysis**
 - 7.3.2 Detailed analysis**
- 8 Seismic actions for pseudo-static analysis**
 - 8.1 Seismic actions for simplified analysis**
 - 8.1.1 Seismic actions from a superstructure**
 - 8.1.2 Seismic actions of ground without spatial variation**
 - 8.1.3 Seismic actions of ground with spatial variation**
 - 8.1.4 Earth and fluid pressures**
 - 8.1.5 Seismic actions on soil mass**
 - 8.1.6 Effects of soil liquefaction and ground failure**
 - 8.1.7 Effects of fault displacement**
 - 8.2 Seismic actions for detailed analysis**
 - 8.2.1 Detailed pseudo-static analysis**
 - 8.2.2 Seismic actions for a seismic deformation model**
 - 8.2.3 Seismic actions for a seismic coefficient model**
 - 8.2.4 Effects of liquefaction and ground failure**
- 9 Seismic actions for dynamic analysis**
 - 9.1 Seismic actions for simplified analysis**
 - 9.1.1 Seismic actions from a superstructure**
 - 9.1.2 Seismic actions of ground without spatial variation**
 - 9.1.3 Seismic actions of ground with spatial variation**
 - 9.1.4 Seismic actions on sliding block model**
 - 9.2 Seismic actions for detailed analysis**
 - 9.2.1 Seismic actions for a soil-structure system**
 - 9.2.2 Effects of soil liquefaction and ground failure**

土木・建築における技術基準の動向と展望

性能設計導入へのアプローチ

—道路関係基準の場合—

国土交通省国土技術政策総合研究所
企画部評価研究官 西川和廣

1. 性能規定導入に向けた道路分野の動き

国際的な技術基準統合への動きの中で、技術基準の性能規定化への気運が高まっているが、この傾向には分野によってかなり温度差がある。道路事業に関連した分野では、電子技術分野に踏み込んだITSが、いわゆるデファクトスタンダード獲得へのしかし、別の観点から技術基準の性能規定化への志向が強まっている。ここでは既に性能規定化を意識して既に基準の改定が実施された「防護柵」、「舗装」、「道路橋」における取り組みについて紹介し、実務への導入における課題について述べることにしたい。

2. 車両用防護柵の性能規定と確認試験¹⁾

2.1 改訂の背景

平成10年11月、「防護策の設置基準の改定について」が建設省道路局長より各道路管理機関の長に対して通達され、同時に「車両用防護柵性能確認試験方法について」が道路局道路環境課長から通達された。

改訂の背景には、車両制限令の改訂による車両の大型化に対応する必要があったことに加え、画一的な防護柵形式・構造に対し、地域特性や景観に配慮した多様性が要求されるようになったことがある。また、国際的な性能規定化への動きと国内における研究成果の蓄積が挙げられている。

2.2 新基準の概要

新基準における性能規定の要点は、以下のように要約される。

- (1) 防護柵は性能で規定すること
- (2) 性能を満足する防護策は標準仕様として認知すること
- (3) 道路管理者は性能を確認して利用すること

その方法として、

- ・「車両用防護柵標準仕様」に登録されていること
- ・確認試験の結果が規定を満足していること

が規定されている。

また、防護柵の性能として以下の項目が規定されている。

(1) 車両の逸脱防止性能

1) 強度性能

2) 変形性能

(2) 乗員の安全性能

(3) 車両の誘導性能

1) 横転の防止

2) 離脱速度の低減

3) 離脱角度の制御

(4) 構成部材の離散防止性能

性能の確認方法としての確認試験要領が示されている。

1) 試験供試体

2) 衝突条件（車両重量、速度）

3) 計測項目及び計測方法

4) 試験結果のとりまとめ

2.3 実務への導入

要求される機能が比較的シンプルな事もあり、新基準は解りやすい構成になっている。しかし、実際に性能確認試験を通じて新たに開発された防護柵は3例程度に止まっているとのこと。その原因は期待される需要に対して試験に要する費用が高いこと、試験が可能な機関が限定されることなどが上げられている。また、新基準移行に先立って精力的な研究開発が行われ、多くの構造が「車両用防護柵標準仕様」に掲載されたことで、新たな技術開発に対するインセンティブが薄れていることも考えられる。

3. 道路舗装の性能発注^{2) 3) 4)}

3.1 背景

道路構造令（第23条）が平成13年4月に改訂され、車道及び側帯の舗装に関する省令が同6月に制定された。これにともなって、平成13年6月29日「舗装の構造に関する技術基準」が通知され、その補完と運用を助けるため、平成13年9月25日「舗装の構造に関する技術基準・同解説」が刊行された。また、設計・施工における舗装関係者の理解と判断を支援する実務的なガイドブックとして、平成14年2月1日「舗装設計施工指針」が刊行された。

我が国の舗装技術は、（社）日本道路協会の発行する、アスファルト舗装要綱、セメントコンクリート舗装要綱および簡易舗装要綱がリードしてきたが、次第にバイブル化し、負の側面もみられるようになった。舗装を取り巻く環境も、事業目的の明確化・透明性の向上、ニーズの多様化・高度化、建設コストの縮減、環境・安全の重視、歩行者への配慮などが求められるようになり、上記の指針類が発刊されることになっ

た。

3.2 性能設計と性能発注

指針では、性能規定と発注の関係を強く意識した内容となっているのがひとつの特徴であろう。表-1に示すように、仕様規定と性能規定による発注の概念の違いを説明するとともに、性能規定による発注についても、その自由度の大きさにより3段階の方法が例示されている。

表-1 仕様規定と性能規定の概念

発注形態	完成系の性能	各層の品質	施工方法	設計方法
仕様規定	規定せず	厚さ、締固め度等	作業基準等	TA法
性能規定(1)	性能指標	厚さ、締固め度等	作業基準等	TA法
性能規定(2)	性能指標	舗装構成と性能確認方法のみ		規定せず
性能規定(3)	性能指標	規定せず	規定せず	規定せず

3.3 性能の設定と設計

舗装の設計にあたっては、考慮すべき条件を整理し、ライフサイクルコスト等を評価する舗装の設計期間、(2) 疲労抵抗性の対象となる計画交通量、(3) 確保すべき性能指標等、目標を設定する。

設計方法としては、(1) 疲労破壊抵抗性に着目した構造設計、(2) 透水性能に着目した構造設計方法が示されており、(1)については①経験に基づく設計方法と②理論的設計方法が示されている。さらに、(3)信頼性を考慮した構造設計や(4)補修の構造設計についても示されている。

表-2 目標設定のための調査項目と性能指標の例

調査分類	調査区分	調査項目の例	性能指標の例
道路の状況	気象	気温	塑性変形輪数(わだち)
		降水量、降雪量	浸透水量、すりへり量
	道路区分	機能分類	塑性変形輪数、浸透水量
		勾配	すべり抵抗値
交通の状況	交通量	大型車交通量	疲労破壊輪数、塑性変形輪数
		設計速度等	平坦性、すべり抵抗値
	沿道	居住状況、周辺利用状況	騒音値、振動レベルなど

3.4 性能の確認

性能の確認には、設定した性能指標の値を直接確認する方法(表-3)と、出来形・品質で間接的に確認する方法(表-4)が、発注形態によって種々選択できるようにな

っている。例えば性能指標が複数の場合、一部の性能は性能指標の値の確認で行い、残りは出来形・品質の確認で行う事も可能になっている。さらに、一定の期間経過後に、性能の確認を行う方式も示されている。指針には、性能の確認方法と合格判定値の例などが記述されている。

表-3 性能指標の直接確認

確認対象	性能指標	確認方法
路面	平坦性	3mプロフィールメータ、路面性状測定車
	浸透水量	現場透水量試験
	すべり抵抗値	すべり抵抗測定車、DFテスター、振り子式スキッドレジスタンステスタ
	騒音値	路面騒音測定車
表層	塑性変形輪数	ホイールトラッキング試験
構造	疲労破壊輪数	促進載荷装置による繰り返し載荷試験

表-4 性能指標の間接的確認

確認対象	性能指標	確認方法
路面	すりへり減量	ラベリング試験
	骨材飛散抵抗	カンタプロ試験
構造	疲労破壊輪数	①供試体による繰り返し載荷試験 ②過去の実績

3.5 現場導入の実態

指針や補完的な便覧類、さらに各種講習会などが盛んに行われているが、どうしても実績が多く、性能確認が容易な工法にシフトし、必ずしも新しい工法の適用へのインセンティブが十分には働いていないようだ。

4. 道路橋示方書の性能規定化⁵⁾

4.1 改訂の経緯と背景

道路橋示方書はこれまでに何度メンテナンス改訂を重ねてきているが、平成14年4月から施行された最新改訂版は、「性能規定」への移行を基本理念としており、主な背景は以下の4項目に集約される。

①国際化への対応

国際化といえは外国企業の参入とわが国の技術者が海外で活動することを視野に入れなければならないが、わが国の技術基準は仕様書的な色彩が強く、新たな技術提案を受け入れにくい印象を与え、技術者の国際競争力の強化を阻んできた嫌いがある。一方、外国から見ると、経験則に基づいた仕様規定の占める割合が多く、不透明な印象

を与え、非関税障壁との誤解を生むおそれがある。

さらにISOにおける技術基準の国際統一化の動き（SI単位への移行を含む）もひとつの背景である。

②構造等の多様化への対応

利用者の要求が多様化し、構造形式、造形、景観、環境との調和等への対応が不可欠になるとともに、これらを実現するために発注・契約の形態も多様化しつつある。しかし、仕様規定中心の旧示方書が、新技術の導入において障害になっているケースが見られ、より柔軟な基準への移行が望まれていた。

③維持管理、耐久性の重視

維持管理の時代と言われるようになってから久しく、旧示方書にも「耐久性に考慮して」、「維持管理に便利な」等の表現はあるが、大半が精神論的で、具体性に欠けることが耐久性のある橋づくりが進まない要因となっていた。耐久性に関係する規定は、その妥当性の確認に長期間を要すること、施工や維持管理の良否に左右されることなど難しい点があるが、たとえ不十分でも、具体性のある規定を設けることで、今後設計、建設される橋がよりよい方向にシフトするもの期待できる。

④コスト縮減等の成果の早期導入

近年のコスト縮減努力の結果、従来とは発想の異なった橋梁構造や設計の考え方が出てきている。しかし、安易に見かけだけ真似をすると耐久性に問題が出るおそれがあるものがある。同時に、優れた構造でありながら、示方書に位置づけられていないというだけの理由で、せっかくの技術が活かされないという問題も存在している。

4.2 二段階改訂の必要性

改訂作業にはスピードが重要な意味を持つ。しかし、経済構造や制度が複雑に絡み合った中で、混乱を最小限に押さえ、新しい規定の考え方が円滑に導入されることも必須の条件である。そこで採用することにしたのが以下に述べる二段階の改訂スケジュールである。

第一段階は、短期間に示方書の性格を性能規定の方向に向けることを最重点と考え、「みなし適合仕様」という概念の活用することとした。すなわち、旧示方書の条文及び解説（場合によっては行間）の中から、それぞれの条項における要求事項を探り出して冒頭に記述し、それまでの規定をみなし適合仕様としてそのまま残そうというものである。この際表現などの不完全さは許容することにした。

このことにより、示方書の性質は、「この通りしなければならない」から「この通りでもよい」へ180度変わることになると同時に、これにより大半を占める中小事業に対しての混乱を回避することが可能となった。

第二段階（今後）では、性能照査型の規定としてより完全な形への移行を目指すことになるが、これにはかなりの時間を要することになる。ここではそれらについての詳細を述べる余裕はないので、主な項目を列挙するにとどめたい。

- ・道路橋示方書の法令上の明確化、局長通達から省令へ、基準と標準仕様の分離
- ・編構成の再考、橋としての要求性能・検証方法を規定する編と、部材設計に関する規定との分離など
- ・委員会の再構成（検証方法、みなし適合仕様の認証機関として）
- ・書式の変更、国際共通語になりつつある部分安全係数設計法の書式へ

4.3 各編の改訂概要

以下に性能規定に関連する各編の改訂概要を列挙する。

I 共通編

- ・設計の基本理念を明示
 - －使用目的との適合性、構造物の安全性、耐久性、施工品質の確保、維持管理の容易さ、環境との調和、経済性
 - －とくに耐久性については、供用期間100年を設計の目安とし、経済性にはライフサイクルコストを含むものとした
- ・付属物として扱われていた支承、伸縮装置を別条項とし、要求性能を明示
- ・示方書各条項の要求性能を可能な限り明示するとともに、既往の条文を「みなし仕様」とする基本方針を提示

条文の書きぶりの一例

6.6.1 鋼材のかぶり（Ⅲコンクリート橋編）

- | |
|---|
| <p>(1) コンクリートと鋼材の付着を確保し、鋼材の腐食を防ぎ、火災に対して鋼材を保護する等のために必要なかぶりを確保するものとする。</p> <p>(2) かぶりは、鉄筋の直径以上かつ表-6.6.1の値以上とする場合には、(1)を満足するとみなしてよい。</p> |
|---|

表-6.6.1 最小かぶり（省略）

II 鋼橋編

- ・耐久性についての章を新設、疲労と腐食について記述
 - －「道路橋疲労設計指針」（(社)日本道路協会）の適用可能
 - －防食の要求性能、塗装以外の手法を併記
- ・RC 以外の各種床版をまとめて規定
 - －PC 床版、合成床版、鋼床版
 - －輪荷重走行試験機による標準疲労試験法を例示
- ・部材精度と架設完了後の精度を規定し、仮組立の位置づけを明確化
 - －仮組立は最終精度を確保するために必要ならば行う
- ・50mm を超える極厚板の溶接部非破壊検査の充実

Ⅲコンクリート橋編、Ⅳ下部構造編

- ・耐久性の検討の章を新設
 - － 死荷重作用時の鉄筋の許容応力度（ひび割れ防止）
 - － 別指針であった「塩害対策」を強化して導入
 - － ポステンPC 橋のグラウト材料に関する規定を改訂
- ・要求性能の明記（例：鋼材のかぶり）
 - － コンクリートとの付着、腐食防止、火災からの保護

Ⅴ耐震設計編

- ・設計の対象とする地震動と耐震性能を明示
 - － レベル1、レベル2－Ⅰ（プレート境界型）、－Ⅱ（直下型）
 - － (1) 健全性を失わない、(2) 損傷が限定的で速やかに復旧(3) 致命的とならない
 - － 各部材の限界状態を具体的に記述
- ・動的設計法の適用範囲の拡大
 - － 複雑な挙動をする橋、鋼製橋脚など静的設計が限定
- ・上部構造に対する耐震性照査法を新規に規定

4.5 実務への適用

基準が性能規定化したからといって、橋の設計にすぐに大きな変化を生じることは始めから想定していない。昨今、総合評価型の発注方式や、詳細設計付きの発注（DB）など、受注者の提案を伴う発注を促進しているが、示方書おける高い自由度とより明確な要求性能の表記により、その方針を後押ししているものと考えている。

5. 性能設計導入の現状と課題

道路事業関連の3種の技術基準の動向を見てきたが、一般に、国際化への対応（一応謳ってはいるが）よりも、以下のような内的要求が基準改訂の後押しをしているように見受けられる。

- － 要求の多様性（景観、環境（LCA）、耐久性（LCC）、材料etc.）
- － コスト（発注形態、過大な仕様レベル、ローカルルールetc.）
- － 新技術の活用促進（画一的な異様規定による縛り、実績主義etc.）

また、より複雑な構造や高度に発展した解析ツールの活用を念頭に置いた、より高度な設計法への指向、すなわち、信頼性設計、限界状態設計、部分安全係数法etc.への指向も、基準改訂への推進力となっている。

一方、性能発注、性能設計、性能規定は以下の関係にあるものと考えている。

性能発注←→性能設計←→性能規定

性能規定（基準）と性能発注（仕様）は決まり事であり、その間において技術者が腕をふるうのが性能設計ということになる。性能発注と性能規定の隙間が極端に狭いのが標準設計であるが、現在この隙間を出来る限り開いて、本来技術者の持つ能力を最大限引き出し、設計本来の目的を達成しようとする事が求められている。

いずれにしても性能規定化の目的とすることは、環境負荷や維持管理負担の軽減など、国民の多様な要求への対応を可能とすることであり、手段であって目的ではないことを忘れてはならない。

このためには、民間技術者の技術力向上の努力が重要であるが、発注者側の審査能力を高めることが新技術の導入に対するハードルを低くし、最終的なコスト負担の軽減に資することになることも同程度に重要であり、官における業務形態の転換も視野に入れておくべきであろう。

6. おわりに

技術基準について考えるとき、「失敗学」を提唱されている畑村洋太郎東京大学名誉教授の著書「失敗学の法則」（文藝春秋社刊、2002年5月15日）が非常に参考になった。本書では、過度のマニュアル化のもたらす失敗の法則が取り上げられている。すなわち、マニュアルは小さな失敗を防ぎ、無駄を省くために整備されるが、マニュアルへの依存は思考停止を招き、逆に大きな失敗の原因となるとされる。対処法としては、常に対象とするもの全体を見渡す事の出来る技術者がいて、絶えず技術の見直しと新たなチャレンジを行うことを行うこととされる。技術基準は、自ら成長し続けるしくみを持つものでなければならぬと筆者は考えている。

参考文献（正確な情報についてはこちらを参考にされたい）：

- 1) 安藤、森：車両用防護柵の性能規定と確認試験方法、土木技術資料Vol. 43-5、2001 5
- 2) 羽山：「舗装設計施工指針」，「舗装施工便覧」発刊の背景、舗装2002 7
- 3) 竹田、田井：「舗装設計施工指針」の発刊、舗装2002 7
- 4) 古財：「舗装施工便覧」の概要、舗装2002 7
- 5) 中谷ほか：小特集道路橋示方書改訂、橋梁と基礎Vol. 36 No. 7、2002 7