

これからの構造設計における信頼性設計の役割について

(株)地崎工業 土木部技術課 正会員 須藤 敦史

1. はじめに

様々な国際規格の整備が進んでいる状況の下、土木・建築構造物における設計規格の国際標準化においても世界貿易機関(WTO:World Trade Organization)は、「政府調達協定」や「貿易の技術的障害に関する協定(TBT 協定:Technical Barriers to Trade)」に基づいて、その加盟国に対して ISO(International Organization for Standardization:国際標準化機構)が推進している設計手法の基準となる包括的な規格として「構造設計の信頼性に関する一般原則(ISO2394)」¹⁾の採用を求めている。

しかし、これらの言葉は頻繁に聞かれるものの、実情はいろいろな情報が交錯して、その実体についてはあまり簡便かつ明確になっていないのも事実である。

そこで本論文では(1)構造設計の信頼性に関する一般原則(ISO2394)についての概略と解説、および(2) ISO2394 において基本的な設計手法となっている信頼性設計法(限界状態設計法)の基本事項を簡単に述べる。

2. ISO2394とは?

ISO2394 は設計コード作成のための包括的な指針(考え方)を記述したものであり、ISO2394 を直接用いて具体的な土木・建築構造物が設計できるものではない。ここで重要なことは ISO2394 が求めている土木・建築構造物の設計手法に対する基本(思想)概念である。

ここで ISO2394 に基づいた設計規格における一番の特徴は(1)限界状態設計法、(2)不確実性を確率で考慮した設計法である。

この限界状態設計法は、荷重・材料強度・構造解析手法などの種々の不確実性を考慮することにより(明確化・説明性)、許容応力度設計法が有する欠点を補う設計法であったため、1980 年代からアメリカ・カナダ・ヨーロッパ諸国などで広く採用されるようになった(グローバルスタンダード)

ここで限界状態とは、構造物が外力に対する抵抗を失うか、あるいは正常な使用が不可能となる状態を意味しており、限界状態設計法では構造物の損傷や破壊における各限界状態を信頼性理論の導入により許容破壊確率として表している。

また、ヨーロッパ諸国では金融・経済をはじめとする地域統合の動きの中で、CEN(ヨーロッパ規格委員会)では、Table. 1 に示す統一基準(Eurocodes²⁾)として限界状態設計法を使いやすく信頼できる構造物の設計法として定着させている。

このような背景の下、ISO において Eurocodes に類似した土木・建築の構造物における設計法の包括的な規格として ISO2394 の制定は自然の流れであると言える。(デファクトスタンダード)

ここでISO2394(構造物の信頼性に関する一般原則: General Principles on Reliability for Structures)

Table. 1 Eurocode0(設計の基本原則の目次)

序	
第1章	概論
第2章	要求条件
第3章	限界状態
第4章	構造物への作用力と環境作用
第5章	材料特性
第6章	幾何的特性
第7章	構造解析および抵抗力のモデリング
第8章	試験や品質管理法に基づく設計
第9章	部分係数法による照査

の目次をTable. 2に示す。

A Basic Consideration of Reliability for Global Standard of Structural Design

By Atsushi SUTOH

Table. 2 ISO2394（構造物の信頼性に関する一般原則）の目次

第0章 適用範囲	第7章 確率に基づく設計の原則
第1章 用語の定義	7.1 一般事項
1.1 一般用語	7.2 システム信頼性と要素信頼性
1.2 設計の関わる用語	7.3 要求信頼性レベル
1.3 荷重作用、荷重効果および 環境因子に関する用語	7.4 破壊確率の計算
1.4 構造物の応答、耐力、材料特性、 幾何学的寸法に関する用語	7.5 確率に基づく設計の実施
第2章 記号	第8章 部分係数による設計法
2.1 主文字	8.1 設計条件と設計値
2.2 添字	8.2 荷重作用の代表値
第3章 要求条件および概念	8.3 材料特性や地盤特性 の特性値
3.1 基本的要求	8.4 幾何学的数量の特性値
3.2 信頼性のレベル	8.5 荷重ケースと荷重の組合せ
3.3 構造設計	8.6 荷重効果および耐力
3.4 適合性	8.7 疲労の検証
3.5 耐久性と維持管理	8.8 キャリブレーション
第4章 限界状態設計法の原則	第9章 既存構造物の評価
4.1 限界状態	9.1 関連事項
4.2 設計	9.2 評価の原則
第5章 基本変数	9.3 基本変数
5.1 一般事項	9.4 調査
5.2 荷重作用	9.5 損傷を受けた場合の評価
5.3 環境因子	付録A 品質管理と品質保証
5.4 材料特性や地盤特性	付録B 永久作用、変動作用、 偶発作用の例
5.5 幾何学的数量	付録C 疲労のモデル
第6章 解析モデル	付録D 経験モデルに基づく方法
6.1 一般事項	付録E 信頼性に基づく設計の原則
6.2 モデルの種類	付録F 作用の組合せと作用値の評価
6.3 モデル化の不確実性	付録G 荷重組合せの例
6.4 実験モデルに基づく設計	付録H 定義の索引

その序文には「This International Standard constitutes a common basis for defining design rules relevant to the construction and use of the wide majority of buildings and civil engineering works, whatever the nature or combination of materials used.」と記述されている。

したがって、ISO2394 は土木・建築における構造物の設計規格に適用され、Table. 2 から判るように「限界状態設計法」や「部分係数法」などの信頼性設計を基本とした設計法が標準となっている。

ここで重要なこととしてISO2394 は、構造物の性能に関して明確（透明）性と説明性を維持するために、性能規定・照査型の設計規格である。

加えて、限界状態設計法は、各種の要求性能を構造物における限界状態と考えているため、性能規定型の設計を行う最も優れた設計法（少なくともその一つ）と考えられている。（自由化・多様化）

また、構造物の耐震性能に関する基本性能は、共用期間中に受ける荷重の程度・頻度（Table. 3）および構造物の重要度に応じて決定することが合理的であり、Fig. 1 に示すような性能マトリクスで構造物の要求性能が記述されている設計コード³⁾も存在する。

3. ISO2394 への取組み⁴⁾

このような背景の下で、学協会をはじめ各官公庁、企業者・民間業者にお

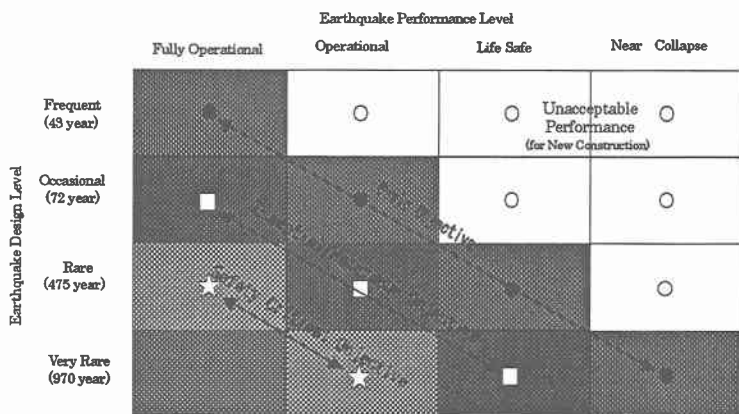


Fig. 1 性能マトリクス³⁾

Table. 3 設計地震レベル³⁾

設計地震レベル	再現期間	超過確率
Frequent	43years	50%in30years
Occasional	72years	50%in50years
Rare	475years	10%in50years
Very Rare	970years	10%in100years

Table. 4 土木建築にかかる設計の基本の概要

第1章 総 則	第3章 作 用
1.1 適 用	3.1 定 義
1.2 設計の基本	3.2 作用の分類
第2章 限界状態	3.3 各作用の扱い
2.1 全 般	3.4 荷重の組合せ
2.2 終局限界状態	第4章 耐 震
2.3 使用限界状態	4.1 耐震性能
2.4 修復限界状態	4.2 地震動レベルの明示法
	第5章 限界状態の照査法

Table. 5 許容破壊確率の設定方法

- 1) 事故統計に基づく方法
- 2) 現行設計示方書もしくは既存構造物の安全性との整合
- 3) 他の災害危険性との比較による方法（リスク分析）
- 4) 人的損失に対する危険回避に要する投資効果による方法（費用対効果）

Table. 6 ISOによって規定されている許容破壊確率 P_{fa}

安全階級	I	II	III	IV	V
許容破壊確率	10^{-6}	10^{-5}	10^{-4}	10^{-3}	10^{-2}

安 全 階 級

I：甚大な被害をもたらす水理構造物，II：鉄道橋や道路橋など公共施設
 III：オフィスビルやマンションなどの建築物
 IV：倉庫と送電線支持物，V：補助的な構造物

Table. 7 信頼性設計における各水準

レベルⅠ	限界状態設計法 信頼性理論に基づいて決めた部分安全係数によって照査 荷重強度係数設計法 種々の限界状態に対して構造物によらず目標信頼性を確保
レベルⅡ	安全性指標によって安全性を照査 ($\beta > \beta_T$ β ：安全性指標, β_T ：目標安全性指標)
レベルⅢ	破壊確率（信頼度）によって安全性を照査 ($P_f < P_{fa}$ P_f ：破壊確率, P_{fa} ：許容破壊確率)

いて ISO2394 へ対して様々な取り組みがなされ始めている。

ここでは具体的な例として建設省が取りまとめているガイドライン：「土木建築にかかる設計の基本」の一部を紹介する。ガイドラインの概要は Table. 4 に示すように主文・解説・参考・資料等から構成されている。

この中で以下に記述する3項目は注目すべき点である。

(1)設計の基本においては「構造物の安全性等の基本要求性能に影響を及ぼしを明示的に扱うことを基本とし、信頼性設計の考え方を基本とする。」としている。

(2)照査する限界状態の設定においては「適用可能な技術と妥当な経費および期間の範囲で修復を行えば継続使用を可能とすることが出来る限界の状態」とした修復限界状態を新たに規定している。

(3)地震動レベルの明示方法として、地震動レベルについては、再現期間あるいは非超過確率の明示を行うことおよび Fig. 1 のような耐震性能マトリクスの導入も原則としている。

4. 信頼性設計とは？

信頼性設計³⁾は「耐用期間において終局限界状態と使用限界状態の2つの限界状態に対して、様々な不確定要因を考慮した破壊モードにおける発生頻度を許容破壊確率以下にする設計法」である。

したがって、安全性を定量的に評価した設計を行うためには種々の不確定要因の基で合理的な許容

破壊確率 P_{fa} を設定す

ることが重要となり、一般的には Table. 5 に示すような項目で許容破壊確率の設定がなされる。

なお ISO では Table.

6 に示すような、構造物の重要度別の許容破壊確率の設定例を記述している。

ここで、構造物に対する技術的・社会的要因 (Table. 5) より構造物の許容破壊確率が決定されると、これを満足するように信頼性設計が行われる。信頼性設計は Table. 7 のように、部分安全係数を定めて設計を行う限界状態設計法・荷重強度係数設計法 (レベルⅠ)、信頼性指標 β が目標 β_T 以上となるように設計を行う手法 (レベルⅡ)、破壊確率 P_f が許容破壊確率以下となるように設計を行う手法 (レベルⅢ) の 3 つの設計水準がある。

荷重係数設計法は、終局状態の荷重係数 (安全率) を用いて設計された構造物は終局状態に対して同じ構造安全率を有する。しかし材料強度や荷重の大きさ、構造解析の不完全性に起因する不確定要因を材料安全率や荷重係数だけでカバーしており、不確定さの程度によっては安全性に対する余裕が異なる。そこで別々の安全係数の考慮が必要となり、さらに死荷重・活荷重・地震荷重などの荷重に対しても別々の安全係数を用いるのが合理的である。

そこで、限界状態設計法では材料強度・荷重係数と呼ばれる部分安全係数を用いると共に設計手法やその他の不確定要因に対しても部分安全係数を用いることで設計から施工までのシステム全体の安全性を照査するものである。これらの部分安全係数はあらかじめ規定された許容破壊確率以下あるいは目標信頼度 (目標安全性指標) 以上となるように決定されるため、これによって設計された構造物は、規模や部材の種類、各荷重の特性に関わらず規定された一定の目標信頼度を有することになる。

ここで ISO2394 付録 E では Table. 8 に示す「目標信頼性指標」の参考値が示されており、これらの許容破壊確率 (P_{fa}) は $\beta_T = 0$ ($P_{fa} = 50\%$)、

Table. 8 Target β values (lifetime-examples)

ISO2394 付録 E より

Relative cost of safety measures	Consequences of failure			
	Small	Some	Mode-rate	Great
High	0	1.5	2.3	3.1
Moderate	1.3	2.3	3.1	3.8
Low	2.3	3.1	3.8	4.3

1.3 (10%), 2.3 (1%), 3.1 (0.1%), 3.8 (0.01%弱), 4.3 (0.001%弱) となり、破壊による影響が小さく、かつ安全性向上の対策費が必要な構造物はで供用期間中の破壊確率を 50% としている。また ISO2394 に影響を与える Eurocodes では Table. 9 に示すような「目標信頼性指標」を規定している。

Table. 9 Eurocode0 (Tentative target reliability β indices related to the design life)

Relative cost of safety measures	Service-ability Limit States	Ultimate Limit States		
		Expected Consequences given a failure		
		Minor	Mode-rate	Large
High	1.0	2.8	3.3	3.8
Moderate	1.5	3.3	3.8	4.3
Low	2.0	3.8	4.3	4.8

「目標信頼性指標」を規定している。

5. 終わりに
「構造設計の信頼性に関する一般原則 (ISO2394)」は、信頼性評価に

基づく限界状態設計法 (移行段階の暫定手法として部分安全係数法) により構成されている。また要求性能を①構造物の信頼性指標 β によって評価、②影響度を安全性レベルを向上させるコストおよび重要度の対比によって差別化しており、土木・建築構造物における設計コードのための包括的な指針である。

参考文献

1) ISO; ISO2394:1998, General Principles on Reliability for Structures, 1998.
2) CEN; Eurocodes 1 Basis of design and actions on structures, Part 1, Basis of Design, 1996.
3) SEAOC Vision 2000 : Performance based Seismic engineering of buildings, 1995.4.
4) 土木学会, 技術推進機構, ISO 対策特別委員会; ISO 規格と認証制度, 「ISO への対応」に関する第 3 回シンポジウム講演資料集, 2000, 11.
5) 星谷勝, 石井清: 構造物の信頼性設計法, 鹿島出版会, 1986.