

2. 他分野（建築分野・コンクリート分野）の既往の研究のまとめ

性能照査型設計法の導入に向けて、建築分野では、平成7年度に総合技術開発プロジェクト「新建築構造体系の開発」を建設省建築研究所を中心に発足させ、3年間かけて調査・研究活動を精力的に実施し、その成果を報告書で公表している^{2.1~2.5)}。また、土木学会コンクリート委員会では、平成7年に示方書小委員会の下に、「2005年を目途に土木学会コンクリート標準示方書を大改訂するための中期ビジョンを討議し、そのための研究開発の方向を提案すること」を目的として幹事会が設置され、以後、積極的に性能設計に基づく全面改訂に向けた活動がなされており、平成12年1月には「平成11年版コンクリート標準示方書「施工編」－耐久性照査型－」が発刊されるに至っている^{2.6)}。

本章では、これら2つの先行分野で行われた調査・研究活動成果の概要をまとめ、鋼橋分野への性能照査型設計の導入に必要と思われる情報を整理することとする。

2. 1 建設省総合技術開発プロジェクト「新建築構造体系の開発」の成果のまとめ

本プロジェクトは、「消費者が自らが必要とする性能とコストを理解して建築物を求めることができ、また、技術の側にとっては、より自由度が高く、技術開発の促進や国際調和に対応することができ、これらの結果として、建築構造技術を取りまく経済の世界に市場原理が機能するような体系を確立すること」を目的として平成7年度に発足し、①性能を基盤とした建築構造設計体系、②建築構造に要求される性能の考え方、③性能の水準の設定と性能評価の枠組、④性能を基盤とした体系のための新たな社会機構の4つを研究課題として活動が行われた。具体的な調査・研究活動は、「目標水準分科会」、「性能評価分科会」、「社会機構分科会」の3つの分科会に分けて行われたので、ここでは、各分科会での活動成果の概要をまとめてみることにした。なお、活動内容の詳細については、章末に示した参考文献を参照いただきたい。

2. 1. 1 目標水準分科会

(1) 目的

目標水準分科会では、社会が建築構造に求める性能についての考え方の枠組の整理、性能とその水準を設定する考え方の整理、それらに関わる各種の調査研究を行うことを目的としている。

(2) 検討内容

平成7年度は、社会が建築構造に求める性能についての考え方の枠組の整理を行うことを目的として以下の検討を行っている。

- 性能水準の設定法・構造設計基準等に関する既往の研究の整理
 - ① 効用理論を用いた水準設定方法の可能性、②バックグラウンドリスクの観点からの建築構造に関わる生命危険度の把握、③現行基準で達成されている建築構造の性能のキャリブレーションによる評価方法
- 世界各国の設計規準等の調査
 - 耐震基準の整理と比較、用途係数・重要度係数設定に際しての考え方の調査
- 安全意識調査等に関する既往の調査研究の整理

- 地震時の被害と地震時の建築物の機能喪失が問題となった事例の整理

平成8年度は、建築基準法を性能規定化する法令改正の方針が決定されたのを受け、現行設計基準により設計される建築物の有する性能の水準を明確にすること、および、性能水準の設定方法について検討することを目的として以下の研究活動が行われている。

- 現行基準による建築物の構造性能水準の研究

現行耐震基準により設計された建築構造物の安全性を信頼性指標により評価

- バックグラウンドリスクに基づく建築構造の有するリスクに関する研究

現行基準による建築物の安全性の水準とバックグラウンドリスクとの比較、リスクに対する心理的認知に関する考察

- 社会が求める構造性能項目・性能水準に関する研究

地震時に生じうる現象把握のための地震被害シナリオの作成、一般住民や建築主等の「性能の表現方法」や「構造性能に対する要求」に関する意識調査

平成9年度は、平成8年度の研究を継続し、3年間の研究成果を報告書としてまとめることを目的として活動が行われ、以下に示すような成果が得られている。

- 1) 現行設計基準に基づいて設計・建設される建築物が有している、風荷重・積雪荷重・積載荷重に対する安全性水準を、シミュレーション手法を用いて評価し、信頼性指標（安全性指標） β で表示した。
- 2) 階段からの転落・風呂場での溺死・住宅火災・台風や地震などの自然災害等、建築物と関わる死亡リスクと、疾病など建築物に関係しないリスクとの比較を行い、その大小関係を明らかにした。
- 3) 医療・環境・交通などの分野におけるリスクアセスメントとリスクマネジメントの現状を調査し、リスク基準に基づいた判断方法のあり方・リスク基準の採用や適用に関する問題点・建築分野におけるリスク規制のあり方について考察を加えた。
- 4) 一般住民や建築主等の「性能の表現方法」や「構造性能に対する要求」に関する意識調査結果を整理し、一般建築の被害の受け止め方・建築物に関する知識や情報の提供のされ方等について分析した。
- 5) 性能の水準設定に大きく関与する要因を把握するため、水準設定に関わる概念の構造分析をISM手法を用いて実施した。
- 6) 性能の目標水準を設定する手法として、①総費用最小化による最適設計レベルの設定方法、②専門家の判断に基づく目標水準簡便設定手法を取り上げ、各々の具体的な設定手順を提示した。
- 7) 地震被害発生シナリオを基に、RC構造・SRC構造・S構造の住宅における地震時の人身危険度を、シミュレーション手法により推定した。

2. 1. 2 性能評価分科会

(1) 目的

性能評価分科会では、荷重条件、要求性能、性能評価の手法について工学的な側面から検討し「性能評価に基づく設計体系」を開発することを目的としている。

(2) 検討内容

平成7年度は以下の2項目について重点的に検討を行っている[2.1]。

- 性能評価に基づく設計体系の意義
- 性能評価に基づく設計の基本的枠組みの構築

平成7年度はとりあえず荷重として地震に限定して上記の設計法の枠組みの検討している。これを受けて平成8年度の検討方針として以下の6項目について検討を行った[2.2]。

- 目標性能の明示
- 荷重・外力の明示
- 荷重・外力に対応した建築物の性能表示
- 性能評価のための方法論の明示
- 性能表現の整備
- 既存の設計法との連続性の確保

以上の平成7, 8年度の成果に基づき、最終報告書[2.3]では分科会の検討内容を「評価基準(案)」としてまとめており、この評価基準(案)の目次を表-2.1.1に示す。

以下では表-2.1.1の目次に沿って、重要または特徴的と思われる点について検討内容の概要を説明する。

(a) 基本構造性能と性能評価項目

基本構造性能として(1)安全性、(2)修復性、(3)使用性の3つの性能を明示している。ここで、安全性と使用性については自明のことと思われるため説明を省略し、修復性についてのみ説明する。修復性とは構造物が外力による損傷に対する修復のしやすさを意味し、財産としての建築構造物の保全を目的とする性能である。したがって、修復性を確保するためには、例えば地震による構造物の損傷を適切な範囲に制御することなどが要求される。さらに、基準の解説において、これらの性能は時間軸上において説明されており、安全性、使用性の経時劣化、地震による損傷と修復・補修による性能の変化、修復・補修も含めたライフサイクルコストなどの検討も基本性能の観点から行えることを示している。

これらの基本構造性能は大別して「構造骨組」、「建築部材」、「設備機器」、「什器」、「地盤」の5つの評価対象について設定・照査する必要があることが明記されており、基本構造性能とこの5つの評価対象を組み合わせることで性能評価項目と呼んでいる。

(b) 限界状態の定義

表-2.1.2に示すように性能評価項目ごとに限界状態を定義している。限界状態の設定において特徴的な部分として什器に関する限界状態定義している点が挙げられる。建築構造物に固有の項目と考えられる。

さらに、地盤の終局状態を設定することで斜面の崩壊や液状化等による限界状態を取り込んでいる点も特徴といえる。

(c) 限界値と応答値の比較評価の方法

限界状態ごとに設定した限界値と荷重及び外力に対する応答値を比較するいわゆる照査式のフォーマットを解説において表の形で与えている。表はまず、基本安全性能である(1)安全性、(2)修復性、(3)使用性の3つの表に分かれており、さらに、各々の表の横軸は前述した性能評価項目、横軸は荷重の種類で分けられている。具体的な限界値の値は与えられて

いないが、照査式においてどのような物理量が使用されるかが、明記されている。また、もう一つの特徴として、現時点での技術において照査が可能なものとそうでないものが明記されている。特に、修復性においては対応不可能なものが現時点では多く、今後の検討課題として挙げられている。

表-2.1.1 評価基準（案）目次

1. 総則	4. 4風荷重
1.1 目的	4. 5地震動
1.2 用語	4. 6地盤に起因する荷重・外力
1.3 構造性能評価の流れ	4. 7その他の荷重
2. 目標構造性能	4. 8荷重および外力の組み合わせ
2.1 基本構造性能	5. 応答値の算定
2.2 性能評価項目	5. 1原則
2.3 性能の水準	5. 2載荷荷重に対する応答値の算定
3. 限界状態	5. 3積雪荷重に対する応答値の算定
3.1 限界状態の種類	5. 4風圧力に対する応答値の算定
3.2 安全限界状態	5. 5地震動に対する応答値の算定
3.3 修復限界状態	6. 限界値の設定
3.4 使用限界状態	7. 限界値と応答値の比較評価の方法
4. 荷重および外力	8. 性能の表示
4.1 固定荷重	
4.2 積載荷重	
4.3 積雪荷重	

表-2.1.2 性能評価項目と限界状態

	安全性 安全限界	修復性 修復限界	使用性 使用限界
構造骨組	鉛直支持能力を喪失しない	損傷が設定範囲に収まる	機能障害や感覚障害を生じない
建築部材	脱落・飛散しない	損傷が設定範囲に収まる	機能障害や感覚障害を生じない
設備機器	転倒・脱落・移動しない	損傷が設定範囲に収まる	機能障害や感覚障害を生じない
什器	転倒・脱落・移動しない	損傷が設定範囲に収まる	機能障害を生じない
地盤	崩壊や大規模な変状が生じない	損傷が設定範囲に収まる	機能障害や感覚障害を生じない

(d) 性能の表示

評価基準案において性能表示が以下のように義務づけられている。

「建築構造物の構造性能は、各性能評価項目ごとに評価のための設定条件と結果を用いて表示する。」

また解説において性能表示の例として建築士程度の技術者を想定した「構造性能評価書」

が示されており、さらにこれをかみ砕いて一般の人々が理解できるような性能表示の必要性が明記されている。

2. 1. 3 社会機構分科会

(1) 目的

社会機構分科会においては、他の分科会で検討された「性能評価」技術や「目標性能」の考え方を適用しながら、建築構造についての性能指向型の「設計実務」を実行可能なものにするために、必要な社会的仕組み（制度）、ルール、情報ストック・フロー等からなる「社会機構」を整備していくためのビジョンと方向性を明らかにする事を目的とした。

(2) 検討内容

社会機構に関する検討はまずアンケート等により社会機構の現況調査を行い、ついで性能指向型の実務設計のためのあるべき社会機構の検討を行っている。

(a) 社会機構の現状

性能指向型「設計実務」に関連する社会機構の現状として下記のような傾向が指摘されている。

- 構造性能に関する要求及び設計条件（目標性能）の設定
顧客から構造性能に関し要求されることは少ない。
- 設計仕様の作成と性能検証の方法
法令の定める最低限度の目標性能を設定する場合、その目標達成の確認は技術基準により行うか、もしくは行わない。
- 設計実務の遂行に係わる責任・リスク分担
設計業務の外注等により多数の組織により分担されることが多いが、責任の所在などについては不明瞭なまま契約することが多い。
- 設計実務者の適正に関する情報
構造設計技術者の技量に関する情報はほとんどない。
- 利用される技術的情報、技術ツールについて
技術基準は日本建築学会の基準等標準的なものに限定される。
電算プログラムがほとんどの物件で利用されており、一般的な建築物の場合、評定済みの一貫設計プログラムの利用率が高い。

(b) 性能指向型「設計実務」のための「社会機構」整備のためのビジョンと方向性 上記のような現状をふまえて、下記のような今後の課題が提言されている。

- 顧客の認識の向上
性能設計を普及させるためには顧客が建築構造物の構造性能に関する正しい認識を持ち、保有性能に見合った経済的負担をするようになることが最も重要である。
- 性能指向型にふさわしい設計実務慣行への変換
現在の設計実務は責任の所在が不明確などの前近代的な体質を残している。国際化、情報開示といった社会的要請からも、プロセス管理、責任の明確化等が必要である。

- 設計実務支援のための情報システム等の整備
性能指向型設計実務をサポートするためには極めて多様な技術情報が必要。それらを作成、評価、提供するための情報システムの整備が不可欠である。
- 建築構造技術者の意識・能力の向上
- 保険システムの整備
顧客にとって構造性能のメリットを顕在化させるためにも保有性能に応じた保険料率の設定が必要。
設計実務者の責任負担能力を補強する意味で、損害賠償責任保険制度の整備が必要。
- 建築構造以外の分野との連携
構造設計に限らず、施工管理等についても品質確保のために必要。
- 法令や公的機関の役割

2. 2 建築雑誌1998年2月号特集「性能規定と構造設計」²⁻⁷⁾のまとめ

建築雑誌1998年2月号では、「性能規定と構造設計—建築基準法改正の中で—」と題した特集を組み、3つの座談会で標記テーマについて専門家が意見交換を行っているので、ここでは、その中で重要と思われることを列記することにする。

2. 2. 1 座談会1：「性能規定化と構造設計」

- 1) 性能には
 - ・すぐに反応として出てくる性能とそうでない性能（例えば耐震性）がある
 - ・性能は解析や実験をしないと確認（検証）できない
 - ・すぐに測ることができない性能を、うまく評価する方法を探し出すことが難しい
- 2) 承認設計法の位置づけ
 - ・既に性能があると社会的に認められているみなし仕様を採用する
 - ・設計方法がわかる場合は自分の技術で、わからない場合は承認基準に従って設計
 - ・性能規定の一部に仕様規定が残っているのは構わない。その仕様が何のために、どういう性能を保証しているかが明確な仕様であればよい
- 3) 性能規定の採用上の問題点
 - ・安全性の保証、責任のありか、保険会社の介入
- 4) 建築主にとっての性能規定化
 - ・良い（優れた）建築物＝質の確保＋安価
 - ・耐久性、使用性、地震後に建物をすぐ使えるような状態をどのように維持するか

2. 2. 2 座談会2：「建築物の多様化と構造に求められる性能」

- 1) 建築における構造としての性能
 - ・耐久性に関する要求……スクラップ・アンド・ビルドかストックか
 - ・耐震性能……大地震時に壊れない 機能は維持したい 短期間で修復可能
- 2) 性能の差別化の必要性
 - ・性能をどういう形で表現し、どのように説明したらよいか重要

- ・性能の最低ラインを設けざるを得ないのではないか
 - ・現行基準をもとに、性能規定型の最低レベルの仕様設計を作って性能を明確にし、その検証方法も明確にすべき
- 3) 性能とコスト、性能評価と施工のばらつき
- ・損傷の程度に応じたコストの比較をして、わずかこのぐらゐのコストでこんなに損傷が抑えられるという提案ができればよい。
 - ・材料強度、製作・施工上等のばらつきが性能の評価に及ぼす影響の考慮が必要
 - ・確率論的な指標の導入
 - ・トータルとしての性能が実現できるようにするにはどうしたらよいか
- 4) 情報公開と性能表示
- ・正確な情報開示、何らかの統一的な性能表示の方法を確立する必要がある
 - ・建築物は現場対応の一品生産であるため、設計段階でなく完成品で評価すべき
- 5) 品質管理・検査のありかた
- ・検査および評価は誰が行うのがよいのか（設計者or第三者）
 - ・設計者、施工者の能力や技術レベルのばらつきをどのように捉えるか
- 6) 構造に求められる性能
- ・目標性能（ある確率で本当に壊さない、中の収容物も倒さない）から始める
 - ・性能規定化：設計の自由度の拡大と技術の発展、ただし責任もついてまわる

2. 2. 3 座談会3：「性能の確保・実現に向けて」

- 1) 設計者の責任・義務と主事の責任・権限
- ・建築士－建設省－持ち主の関係：責任の所在が明確でない
 - cf.) 医者－厚生省－患者の関係：医者が責任を取る
 - ・設計者、施工者の能力、技術レベルのばらつきをどのように捉えるか
必要最小限の規制は必要
- 例) 設計方法を2つのパターンに分ける
- ①自由な設計：ディテールに至るまで設計図書を全部責任持って完結させる
 - ②お決まりの設計：標準ディテール集から施工仕様まで社会が用意し、それを守る
- 2) 民間審査機関の位置づけと役割
- ・建築物は一度造ると壊したり撤去したりするのが大変なため、施工前のチェックが重要
 - ・利益の絡むところに信頼はなかなかおけない
 - ・目に見えるものに対する金銭的評価はするが、目に見えないもの、ソフトの面に対する価値に対してはあまりお金を出そうとしない傾向がある。
 - ・建築物は個人の所有であるが、税金を使つてのチェックはある程度有効
- 3) 予定性能と結果性能
- ・確認申請段階の性能(＝予定性能)と施工時の性能(＝結果性能)との関係
 - ・検査時と地震時で性能が異なつた場合の対応
同じ設計でも、あるものは破壊、別のものは破壊しない場合あり
→確率論での扱ひが不可欠か
 - ・社会は予定性能ではなく結果性能を買う

4) 保険制度の必要性と効用

- ・ PL法（製造物責任）は長期保証が必要 ……製品の品質＋メンテナンスの良否
- ・ フランスでは、施工者と発注者の両方が保険に加入しなければならない
- ・ 誰のために、どういう事態に対してかけている保険かを明確にすることが重要
- ・ 任意保険には信頼度の高い人ほど加入しているのが実情

5) 仕様規定から性能規定への変革

- ・ 設計の自由度が高くなる反面、その性能の評価と確認が難しい
- ・ 性能規定が十分に機能するためには、構造設計者の資質、資格、待遇、権限、責任に関する問題解決が不可欠

2. 3 コンクリート分野の動向

コンクリート分野での性能照査型設計の導入に向けた活動が適切にまとめられている資料として、本部会活動開始時点においては、「橋梁と基礎 1997年8月号」に掲載された「性能照査型設計法のゆくえ」²⁸⁾、および、土木学会平成9年度全国大会・研究討論会10資料「コンクリート構造物の次世代設計法のゆくえ」²⁹⁾の2編が適切であったため、ここでは、この2つの文献の内容を紹介することにする。

2. 3. 1 性能照査型設計法のゆくえ

(1) 性能照査型設計法導入の必要性とコンクリート分野での課題

性能照査型設計法を導入する必要性とコンクリート分野での課題については、以下のよう
にまとめ上げられている。

- ①社会システム上の様々な問題が顕在化するに従い、システムを有効に機能させるために必要な「照査システム」を構築しなければならないことが明確になってきた。
- ②「照査システム」は、関係する個人や組織、あるいは国がそれぞれ相互に認めることができる原理・原則に基づくものでなければならない。すなわち、何を拠り所にしたのかを明確にする必要がある。
- ③このような社会背景の中で必然性を持って生まれてきたのが性能照査型設計法であり、建設分野における1つの有力な手段である。
- ④現状では、許容応力度設計法・限界状態設計法が性能照査型設計法とみなせる。
- ⑤性能照査型は、今後の研究・開発により得られる情報・技術が様々なレベルで体系的に整理されることにより、極めて都合のよい設計法となり得る。
- ⑥コンクリート構造物の耐久性に関しては、現状では設計法と呼べるものがなく、性能照査型設計法の枠組みの中で耐久性をどのように扱うかが1つの大きな課題である。

(2) コンクリート構造物の性能照査型設計法の経緯・最近の動向と問題点

コンクリート構造物の性能照査型設計法の歴史的経緯と最近の動向、および、問題点をまとめると、表2. 3. 1のようになる。

表2.3.1 コンクリート構造物の性能照査型設計法の経緯・最近の動向、問題点・課題

	経緯・最近の動向	問題点・課題
欧州 1978～	各国独自の基準により構造物の設計を実施してきた。そのため、各国が基本的に合意できる内容により、基準・指針類の統一化を図った。	①体系的な設計法とするため、広範な照査技術の研究が必要 ②安全係数の取扱いは、当面、各国独自に対応
I S O 1995～	①全世界が受入可能な統一基準を作成 ②耐久性能が要求性能を上回ることを照査する ③耐久性の問題を力学的な問題と同じコンセプトに基づいて扱う	耐久性能の評価をどうするか
土木学会	①コンクリート委員会では性能照査型設計法を高く評価 ②コンクリート標準示方書設計編に限界状態設計法を全面的に導入 ③コンクリート標準示方書耐震設計編で耐震性能に対する照査を明確化 ・耐震性能1：地震後にも機能は健全で補修なしで使用可能 ・耐震性能2：地震後に機能が短期間で回復可、補強は不要 ・耐震性能3：地震によって構造物全体が崩壊せず ④地震動の分類 レベル1 従来より設定されていた地震力 レベル2 内陸直下型地震による地震動	現行のコンクリート標準示方書の構造設計に関する部分は、性能照査レベル、および、その方法が必ずしも体系的に整理されていない

<p>国際ワーク ショップ [ドイツ] 1996</p>	<p>①コンクリート構造物の「寿命設計」に着目 ②目標寿命に対する設計となるため、基本的には性能照査型設計議論のポイント 1) 環境条件と設計レベル 2) 施工が長期挙動に及ぼす影響 3) 品質評価</p>	<p>①コンクリート構造物の耐久性は環境条件により大きく異なるため、微気候特性の考慮が必要 ②コンクリート構造物の品質の正確な把握が必要 ③中長期的な挙動の正確な予測が現時点では困難なため、定期的な品質評価手法の開発が急務</p>
<p>日本コンクリート工業会 1995～</p>	<p>構造設計と耐久設計の統合に向けて、今後開拓すべき研究領域を明確にするための調査を実施 検討項目 ①時間軸に着目した構造物の挙動 ②初期欠陥や荷重・環境作用が構造物の耐力・耐久性に及ぼす影響 ③微気候を含む環境条件の評価 ④統合設計の枠組みの検討</p>	
<p>建築学会 1997～</p>	<p>設計基準強度に加え、耐久設計基準強度を考慮</p>	<p>コンクリートの品質と耐久設計基準強度との関係が不明確</p>
<p>建設省</p>	<p>(2.1に記述した総合プロジェクトと重複するため、ここでは省略)</p>	
<p>運輸省</p>	<p>①鉄道に関わる技術水準および許認可等の手続きの規制緩和を実施 1) 必要最小限の性能を定める基準への移行 2) 技術革新の進展、事業者の技術的経験の蓄積を踏まえた選択幅の拡大</p>	

(3) 性能照査型設計導入の利点

- ①設計の自由度を高くすることができる i.e. 景観的配慮が必要な構造物の設計に有効
- ②大きな設計枠組の中で、技術の発展レベルに応じた合理的な設計を可能にする
 - 1) マクロレベル：許容応力度設計法
 - 2) メゾレベル：理論的あるいは実験的に定量化した何らかの指標に基づいて照査するレベル（現有する技術の多くがこの範疇に含まれる）

3) ミクロレベル：材料および構造特性に関するモデル化に基づいて構造物の全体挙動を照査するレベル (ex.]有限要素法)
モデルの信頼度と解析技術レベルに大きく依存)

- ③新しい技術の適用を容易にする (技術の現状を明確にできる)
- ④構造・耐久性・景観に関する設計および施工計画の検討を統一的に扱うことが可能
i.e. 統合設計を可能にする
- ⑤コストダウンを可能にする

2. 3. 2 コンクリート構造物の次世代設計法のゆくえ

(1) 土木構造設計における性能照査型基準の方向

1) 概要

- ・限界状態を用いた性能判定の方法論
- ・「設計段階で構造物が複数の限界状態に到達しないことを確認することによって、要求性能の照査に代える」
- ・構造挙動を総合的に評価できる技術や知見を円滑に取り入れ、一層の合理化を図るには、一般的な枠組が要求されている
- ・「原子力発電所屋外重要土木構造物の耐震設計に関する安全性照査マニュアル」、「平成8年度標準示方書耐震設計編」は、耐震性能に関する性能照査型基準の枠組構築に向けた第一歩

2) 性能設計の枠組

構造/材料の詳細と施工法・維持管理計画が、施工性・経済性・景観・環境負荷の観点から満足いくものであり、施工中から長期に渡って構造物の機能と安全が満足されるように決定することを、客観的に評価して、第三者がわかるようにすることを要求するもの

3) 現行示方書

機能性・安全性：性能照査をパスする設計方法についての記述は、基本的には何もない (配筋詳細条項と設計例は除く)

施工性・耐久性等：材料設計と施工法により達成される性能を定量評価する方法は、原則として提示されていない (温度ひび割れ危険度を除く)

理想：

- ①構造設計は、構造物の機能・安全性のみならず、施工性や初期欠陥・長期耐久性、維持管理のし易さなど、要求される性能全てに関わる。
- ②耐久性能は、維持管理計画のもとに長期間の使用を経た場合の機能と安全性、及び美観等から具体的に照査される。

現実：

現行の技術で判定可能な複数の限界状態で、要求性能をブレイクダウンして判定する。

- ①使用開始時の構造材料諸元に基づいて「断面破壊の限界状態」を全ての部材で検討
- ②「鉄筋腐食に関する限界状態」を全ての部位で確認

当面の作業

現段階で不十分な照査技術のレベル向上に努力を注ぐことが第一義
近未来で持ちうる技術で性能照査基準を一度組み上げてみる

(2) 土木構造物の次世代設計法

1) 概要

コンクリート構造物の設計法に関し、国内外の最近の動向と次世代設計法の枠組みについて述べる

- ・次世代設計法として「性能照査型設計法」が最も適当(土木学会コンクリート委員会)
- ・耐久性に関する合理的な設計法がない
- ・建設コストと保証寿命の明確化が求められている

2) 設計法に関する最近の動向

表2.3.2に示す通り

3) 性能照査型統合設計

建設省：建築行政が直面する課題に対する現行の建築規制の見直し

- ・建築省総合技術開発プロジェクト「新建築構造体系の開発」
 - ・建築審議会「21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あり方について」諮問
 - ①規制の対象および内容に対する明確性、客観性の確保
 - ②建築主の自己責任に基づく多様な選択の確保
 - ③建築生産における各主体の役割の見直し
- 上記項目を満足する建築基準の策定が必要
- ・現行の「仕様規定」から「性能規定」に移行すべきと答申
 - ・この答申に基づいて建築基準法の改訂を決定

運輸省：鉄道に関わる技術基準および許認可等の手続きの規制緩和

性能基準とすることを明確にしている

- ①素材、仕様、規格を詳細に指定する基準から必要最小限の性能を定める基準への移行
 - ②技術革新の進展、事業者の技術的経験の蓄積を踏まえた事業者の選択幅の拡大
- ・仕様規定は、選択の余地がほとんどない技術レベル、あるいは、(高度な)技術に対する理解のレベルが低い場合に有効 i.e. 技術が発展して選択の幅が広がると、これらは有害な規制

4) 性能設計の利点

- ・設計の自由度を大きくすることができる
- ・大きな設計枠組みの中で、技術の発展レベルに応じた合理的な設計を可能にする
- ・新しい技術の適用を容易にする(技術の現状を明確にできる)
- ・構造・耐久性・景観に関する設計および施工計画の検討を統一的に扱うことが可能
 - i.e. 統合設計を可能にする
- ・コスト・パフォーマンスに基づく設計を可能にする
- ・資源の有効利用を可能にする

(3) 材料設計・開発の立場から

1) 概要

次世代の設計法では、要求性能を満足すれば材料の選定は自由。ここでのテーマは以下の3つ。

表2.3.2 設計法に関する最近の動向

基 準	設 計 法	概 要
道路橋示方書	許容応力度設計法	<ul style="list-style-type: none"> ・部材の断面に発生する応力の制限値が、どのような性能を確保しているかが明確でない ・構造物の安全性を一定水準以上に保つのに有効 ・性能照査型設計法の原始型
土木学会コンクリート標準示方書設計編	許容応力度設計法から限界状態設計法へ(昭和61年)	<ul style="list-style-type: none"> ・曲げ、軸力、せん断、ねじり：終局限界状態 ・ひび割れ、変位、振動：使用限界状態 ・曲げ、せん断：疲労限界状態
土木学会コンクリート標準示方書耐震設計編(平成8年)	耐震性能に対して照査	<ul style="list-style-type: none"> ・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(レベル1地震動)、鉄筋およびコンクリートに発生する応力度が材料の設計強度以下 ・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(レベル2地震動)、 構造物の地震時の応答解析あるいは残留変位が制限値以下 ・耐震性能3：地震によって構造物全体系が崩壊しない(レベル2地震動) 構造物が崩壊しないことを照査
欧州コード(EC2,1989年)	限界状態設計法	<ul style="list-style-type: none"> ・欧州の統合に伴う設計システムの整合性を図る ・欧州各国は、これまで独自の基準を用いてきているため、当面はその実態を踏まえた対応
ISO/TC71 コンクリートに関する専門委員会(1995年)		<ul style="list-style-type: none"> ・全世界が受け入れ可能な統一基準の作成開始(レベル1、1995年、米国主導) ・各国は、この基準に従い、各々の事情に合わせて、より詳細な基準を作成(レベル2) ・より実務的なマニュアルや指針の類はレベル3 ・日本は「想定耐用年数/耐久性」に関する規定の作成を担当、基本的な考え方は、耐久性能が要求性能を上回ることを照査

- ・使用者側と製造者側が議論して決めておくこと
 - ・製造上の問題点
 - ・これまでの材料開発、新材料を有効に利用するために必要なこと
- 2) 特殊セメントを利用する際の問題点
- ・製造過程、流通過程から特殊セメントは高価となり、多品種少量には不向き
 - ・生産プロセスが複雑、コンサルタントが必要 i.e. 材料屋は、特殊セメントと汎用セメントを明確に区別すべき
- 3) 新材料開発の問題点
- ・特許マインドの低さ：特許訴訟は対費用効果の割合でありあまり効果がない
i.e. 新材料を積極的に開発しても意味がない
特許庁の審査システムの改善（審査官と技術評価できる人間がペアに）
 - ・当面は汎用セメントを基本として、混和材料の利用により、要求性能を満足するような開発が中心
 - ① 添加装置などを含めた製造システムの開発が重要
 - ② 要求性能を材料屋が理解できる指標で、具体的に数値化する必要がある
 - ③ 新材料開発に際し、材料の価格はどこまで許容できるかを、要求性能と合わせて明確にする
 - ・多岐に渡る要求性能を満足させるために材料の種類を増やすことは経済性に劣るため、材料の統合により複合的な材料設計で機能を発揮するような材料開発手法が必要
 - ・材料の選定が自由になる分、品質保証システムの重要性が増す
(熱測定は、簡便で有効な方法の1つ)
- 4) 展望
- 現在提案されている次世代設計法は、材料屋にとっても大きなチャンスであると共に、技術者に自由が与えられ、コンクリート構造物はより性能の高いものになると思われる

(4) PCLNG貯槽の設計と施工について

1) 概要

都市ガスに使用する液化天然ガス(LNG)を安定供給する上で、保安レベルが高く、経済的で敷地の利用効率が高いLNG貯蔵システムを目指し、PC構造を応用した技術の開発を進めてきた。

PCLNG貯槽の設計法として限界状態設計法を採用

[理由]従来の許容応力度設計法では要求性能を定量的に照査することができない

2) PC容器構造に要求される性能

- ① 低温特性：低温下(−164℃)における十分な耐荷性能
破壊が瞬時に進む脆性破壊に対する抵抗性(低温脆性)
- ② 貯液性：構造体として安全、内槽から漏れた低温のLNGを確実に貯留
- ③ 耐久性：臨海部という厳しい環境条件下においても過度な維持管理なしで劣化しない
長期にわたって使用性を喪失する確率が低い

3) 検討内容と検討結果

- ① 低温特性に関する検討

[検討事項]

- a) 静的載荷したときのPC部材の最大耐荷力、変形量、ひび割れ性状
- b) 衝撃曲げ載荷したときのPC部材の抵抗力の大きさと、鋼材に不安定破壊がないこと
- c) 曲げ変形を拘束したPC部材の一面に極低温の貯蔵液が直接接触したときの現象の確認と、温度および温度応力挙動に関する数値解析方法の妥当性の検証

[検討結果]

- ・ PC部材は、常温から -164°C の温度条件において十分な荷重抵抗性能を示し、優れた靱性を有していることを確認
- ・ 冷熱衝撃を受けた後のPC部材の温度・応力挙動は、有限要素法による非定常・非線形解析により推定可能

②貯液性能に関する検討

- ・ 貫通ひび割れを有する部材の貯液性能に関する実験と数値シミュレーションを実施。数値シミュレーションでは、漏出ガス量を十分な精度で予測可能
- ・ 断面内に圧縮応力域を残すことにより、貯液性能を十分に発揮することを確認
- ・ 解析により十分な精度で、非定常かつ非線形な温度応力挙動の予測が可能
- ・ 内槽から漏液が生じた時にPC容器が満たすべき要求性能を、「部材断面に $X\text{cm}$ の圧縮応力域を残す」という限界状態に置き換えて照査

③耐久性

- ・ コンクリート構造物の耐久設計指針(素案)(土木学会、1989)により、耐久性能を定量的に評価

④設計、施工の合理化に関する検討

- ・ 高強度コンクリート $[60\text{N}/\text{mm}^2]$ を締固め不要な自己充填コンクリートで施工するのが有効

4)問題点

低温特性、品質検査システム、圧送・打設システム、ひび割れ制御対策実証実験と数値シミュレーションによる確認・確立

(5)鉄筋コンクリート建物の性能評価型耐震設計法

1)概要

コンクリート建物の耐震性能の評価方法としては既に耐震診断(鉄筋コンクリート造建築物の耐震診断基準・同解説、1990)が広く用いられ、最近では性能評価型に一步踏み出した設計指針(鉄筋コンクリート造建築物の靱性保証型耐震設計指針(案)・同解説、1997)も発表されている。性能評価指標のあり方を考えるとともに、既往の手法の問題点の指摘、将来像について述べる

2)現行耐震診断法の問題点

- ①一次診断：壁の多い建物を対象とした簡易的な方法
- ②二次診断：各階ごとに鉛直部材(柱・壁)の剛性・強度・変形性能を評価
 - ・ 層崩壊型の建物であっても、中高層建物での弱点階への変形集中が考慮できない
 - ・ 柱の曲げ圧縮破壊や付着破壊が考慮されていない
- ③三次診断：梁の強度の評価
 - ・ 斜め入力、高次振動モードや材料強度のばらつきなどにより、本当に梁の降伏が実現するかどうか不確定な場合が多い

- ・高層建築ほど梁降伏が有利になることも考慮されていない
- ・柱梁接合部のせん断破壊も考慮されていない
- ・多様な性能の表示は不可能

1977年以降、多少の改訂はあったが、最近20年間の研究成果が十分に反映されていない

3) 靱性保証型耐震設計指針の問題点

- ①構造計画（設計目標の設定、構造形式の選択、降伏機構の設定など）
- ②部材断面の設定（断面寸法、鉄筋量はもとより、配筋詳細まで設定）
- ③鉛直荷重に対する性能の確認
- ④地震荷重に対する性能の確認
 - ・数十年に1度の中小地震に対してほぼ無条件に継続使用が可能
 - ・数百年に1度の大地震に対して最低限の機能を維持し、補修すれば再使用できる
 - ・千数百年に1度の直下型極大地震に対して鉛直荷重の支持能力を保持する

設計指針には、上記④に関する手法のみが示され、断面の設定は設計者に任される

4) 全体的な問題点

- ・大地震、極大地震によって実際にどの程度の変形が生じるのか予測できない
- ・確率論的性能表示は不可能
- ・梁降伏型の整形建物のみを対象としている。層崩壊型建物や強度抵抗型建物、ねじれ振動が生じる建物には適用できない。

2. 4 鉄道関係の設計基準

鉄道関係の設計基準に関しては、平成4年10月に鉄道構造物等設計標準が限界状態設計様式に改訂されており、設計の対象とする限界状態に対応する性能を明記することで、性能照査型の設計法となっているとみなすことができる。

鉄道構造物の設計においては、事業者自身が構造物の設計基準・手法を決めており、要求される性能項目としては、安全性・健全性・使用性の3つが挙げられる。以下に、国鉄建造物設計標準・同解説(昭和58年4月)²⁻¹⁰⁾、および、鉄道構造物等設計標準・同解説(平成4年10月)²⁻¹¹⁾における要求性能に着目した照査方法を列挙する。また、表2.4.1に、鋼鉄道橋での要求性能とその照査方法を示す。

(1) 構造物設計基準(昭和58年4月)：許容応力度設計法

①設計荷重に対して安全

- ・主荷重（死荷重、列車荷重、衝撃等）
- ・従荷重（車両横荷重、制動、風荷重）
- ・その他（地震、衝突、温度変化等）

②供用期間中の繰返しに対して安全（疲労の検算）

在来線：60年 新幹線：70年 本四：100年

③走行安全

たわみ、横振れ

表2.4.1 鋼鉄道橋での要求性能とその照査方法

要求性能	安全性	健全性	使用性	その他
限界状態	<p>終局限界状態</p> <p>想定する最大荷重（設計荷重）に対して</p> <p>在来線:EA,M荷重 新幹線:NP荷重 +永久、変動、偶発 その他の荷重</p>	<p>疲労限界状態</p> <p>設計耐用期間中の繰返しに対して</p> <p>在来線： 60年 新幹線： 70年 本四： 100年</p>	<p>使用限界状態</p> <p>走行安全(脱線) 乗心地に対して たわみ、横振れ</p>	<p>美観、騒音、 振動、保守等 に対して</p>
照査式	$\gamma_i (S_d / R_d) \leq 1$ <p>γ_i: 構造物係数 S_d: 設計断面力 R_d: 設計断面耐力</p>	$\gamma_a \gamma_b \gamma_i \times (\Delta \sigma_d / \Delta \sigma_R) \leq 1$ <p>γ_a: 構造解析係数 γ_b: 部材係数 γ_i: 構造物係数 $\Delta \sigma_d$: 作用応力範囲 $\Delta \sigma_R$: 疲労許容応力範囲</p>	$\gamma_a \gamma_b \gamma_i \times (\delta / \delta_u) \leq 1$ <p>γ_a: 構造解析係数 γ_b: 部材係数 γ_i: 構造物係数 δ: たわみ量 δ_u: たわみの限度値</p>	<p>事業者や設計者等の判断に委ねられることが多い</p>

(2) 鉄道構造物等設計標準（平成4年10月）：限界状態設計法

①終局限界状態の照査

構造物または部材が破壊したり、大変形・大変位等を起こし、機能や安全を失わないように

②使用限界状態の照査

構造物または部材が過度の変形、変位、振動等を起こし、正常な使用ができなくなるように

③疲労限界状態の照査

構造物または部材が繰返し作用により疲労損傷し、機能を失わないように

[参考文献]

- 2-1) 建設省総合技術開発プロジェクト「新建築構造体系の開発」平成7年度報告書
(財) 日本建築センター、(財) 国土開発技術研究センター、平成8年3月。
- 2-2) 建設省総合技術開発プロジェクト「新建築構造体系の開発」平成8年度報告書
建設省建築研究所、(財) 日本建築センター、(財) 国土開発技術研究センター、平成9年3月。
- 2-3) 建設省総合技術開発プロジェクト「新建築構造体系の開発」総合報告書
建設省建築研究所、(財) 日本建築センター、(財) 国土開発技術研究センター、平成10年3月。
- 2-4) 建設省総合技術開発プロジェクト「新建築構造体系の開発」目標水準分科会報告書
建設省建築研究所、(財) 国土開発技術研究センター、平成10年3月。
- 2-5) 建設省総合技術開発プロジェクト「新建築構造体系の開発」社会機構分科会報告書
建設省建築研究所、(財) 日本建築センター、平成10年3月。
- 2-6) 前川宏一：改訂の動向・経緯、土木学会誌Vol.85,pp.30-31、2000年4月。
- 2-7) 特集「性能規定と構造設計ー建築基準法改正の中でー」、建築雑誌Vol.113, No.1418、1998年2月。
- 2-8) 堺孝司：性能照査型設計法のゆくえ、橋梁と基礎97-8, pp.73-83、1997年8月。
- 2-9) 土木学会平成9年度全国大会・研究討論会10資料「コンクリート構造物の次世代設計法のゆくえ」、平成9年9月。
- 2-10) 国鉄建造物設計標準・同解説、土木学会、昭和58年年4月。
- 2-11) 鉄道構造物等設計標準・同解説、鉄道総合技術研究所、平成4年10月。