

3. 研究成果

3.1 性能設計ワーキンググループの研究成果

3.1.1 研究概要

(1) 研究目的

橋梁設計における設計基準は、従来から仕様規定型の記述が採用されてきた。今日、国際化への対応、多様な設計・工法への対応、維持管理・耐久性の重視、コスト縮減等の成果の早期導入などの必要性から、性能規定型の体系への移行が進められている。

平成14年に改訂された道路橋示方書も、段階的に性能設計に移行することが示されており、特にV耐震設計編では、性能設計を意識した構成や記述が大幅に取り入れられている。これは、1995年兵庫県南部地震での大規模な橋梁被災の教訓から示方書の記述を大幅に改める必要が生じたことにもよるが、橋梁の耐震設計は性能設計に移行することが合理的であるという判断があることも推定される。

性能設計とは細かい数値や手順として仕様を規定するのではなく、構造物に要求される性能を前面に出し、それを実現する設計の体系である。耐震設計では、設計地震が明確に一つの荷重強度として規定されるのではなく、確率的に幅をもって規定されることから、許容応力度法などによる仕様規定型の設計にはなじみにくい。むしろ、想定される地震動の規模や頻度と、それに応じて要求される橋の耐震性能を陽に規定する性能設計の体系が適する。これに加えて、1995年兵庫県南部地震以降設計地震動の規模も大幅に高められたため、新技術の導入促進など、性能設計の移行による耐震設計の合理化の進展も期待される。

このような背景により、今後の耐震設計においては性能設計の理解と普及に対する重要性が高まってきており、それに対する技術者の感心も高まっている。そこで、性能設計WGでは、性能設計に基礎を置く耐震設計について、先行する海外の文献を研究し、その考え方を学ぶこと、また、その内容を紹介して性能設計の概念の啓蒙に寄与することを研究目的とし、活動を行ってきた。

性能設計に関する文献としては、カリフォルニア州構造技術者協会 (SEAOC) の Vision 2000 報告書を選定した。当該文献は、建築物の耐震設計に性能設計を本格的に取り入れるものとして斬新であり、日本の性能設計の取り組みに与えた影響は大きい。本節では、Vision 2000 の主要部分の訳文を掲載し、その詳細を国内で紹介するものである。

(2) 研究内容

性能設計WGの研究内容は、WG会合を1ヶ月に1度程度開催し、WG各員に割り当てられた Vision 2000 の日本語訳の読合わせと、内容に関する討議、および性能設計全般に対する勉強・討議を行った。

Vision 2000 を翻訳した範囲は、性能設計の考え方を示した主要部分である、Part 1 の第1章と、Part 2 の第1章～第5章とした。翻訳したものは当報告書に掲載し、その詳細を国内に詳しく紹介するものとする。

また、現場見学・工場見学等の企画として、高欄の設計に性能設計が取り入れられていることから、日本鋼管ライトスチール(株)において工場見学会を実施し、高欄の性能設計に関する講習会を実施した。

3.1.2 Vision2000 の概要

Vision 2000 は、カリフォルニア州構造技術者協会 (SEAOC, ホームページ: <http://www.seaoc.org/>) により、「Vision 2000 - 性能に基づいた建築物の耐震工学(Performance Based Seismic Engineering of Buildings)」と題して1995年4月3日に発行された報告書である。

SEAOC は、次世代の性能設計による耐震設計法の枠組みを確立するために1992年にVision2000委員会を設置した。その最終目標は、「予測可能な耐震性能を有する構造物を提供し得る設計方法の枠組みを確立する」ことである。これは、「構造物の耐震性能を明確にし、塑性領域における設計手法の枠組みを確立する」とこと概括できる。

Vision2000委員会は1995年に上記報告書を発行し、設計ガイドラインや設計指針を整備してゆくことが期待されている。その成果はSEAOC青書に反映される予定である。

Vision2000報告書は下記の4つのPartから構成される。

Part 1 : 暫定的な勧告

Part 2 : 概念的枠組み

Part 3 : ノースリッジ地震により得られた予備的な教訓

Part 4 : 性能工学に向けた青書の更新

Part 1 では性能工学に関する定義と、耐震性能という概念を今日の設計基準に適用させるための暫定的な勧告が示されており、暫定的な勧告の目的は下記4項目にまとめられる。

1. 耐震設計と施工の性能水準の定義
2. 地震危険度と設計水準の関係を定義
3. 異なる建築物間の統一された目標性能の設定
4. 適用可能な手法を用いた設計手法を提案

Part 2 では将来の性能設計のためのガイドラインを作成するための概念的枠組みを示し、合せて設計手法や解析手法の概要が示される。ここでは、性能工学の方法論が以下のように概説される。

1. 概念的枠組み
 - ①目標性能の選択
 - ②地震による被害度の設定
 - ③概念・予備・実施設計実施
 - ④保有性能の照査・設計精査
 - ⑤施工の品質保証と維持管理
2. 設計手法…キャパシティデザインを基礎とする
3. 解析手法…非線形応答解析を中心とする

Part 3 では、ノースリッジ地震により得られた予備的な教訓が、Part 4 では SEAOC 青書を性能工学の概念に向けて更新する際のロードマップが示されている。

Vision 2000 は性能に基礎を置く耐震設計法に関する文献として筆頭に挙げられるものの一つであるが、特に、耐震設計における目標性能マトリクスを提示したことで知られている。これは、建物に要求される構造性能を、地震動レベルと損傷度の関係の中での位置付けとして直接的に表すものである。性能マトリクスは建物の種類により異なっており、通常の建物、重要あるいは危険物を収容する施設、安全上重要となる施設の3つに分類されている。このようなマトリクスを示した Vision2000 は、性能を意識した画期的な設計体系として、わが国の性能設計確立に大きな影響を与えている」と評されている。

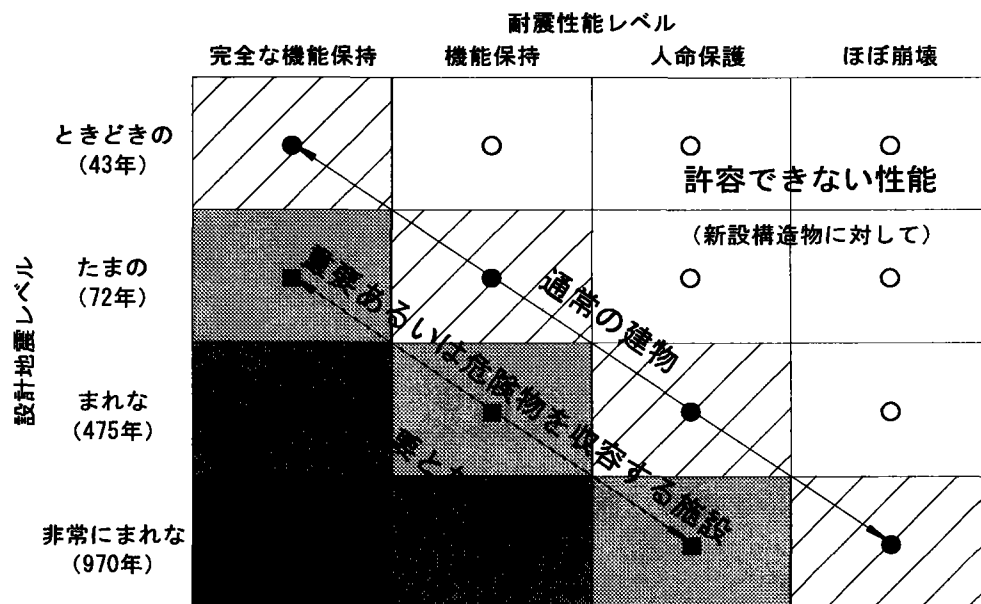


図-3.1.1 耐震設計における目標性能マトリクス

参考文献

1)高田毅士：建築界における確率論的構造設計の取り組みと将来への挑戦，土木学会確率・統計的意思決定に関するシンポジウム論文集, pp.39-43, 1998.12.

Performance Based Seismic Engineering of Building

性能に基づいた建築物の耐震工学

Volume I

Part 1: Interim Recommendations 暫定的な勧告

Part 2: Conceptual Framework 概念上の枠組み

Structural Engineers Association of California

カリフォルニア州構造技術者協会

1995年4月3日

内容一覧

Part 1：暫定的な勧告

Vision 2000 報告書の Part 1 では、予測可能で明確な耐震性能を有する建築物を得るための、工学的手順の暫定案を提示している。その内容は、性能工学の定義、性能レベルや地震被害レベル、建築物の耐震設計・耐震性評価の性能目標などの標準の定義、また現在利用可能な技術と設計手法を用いた、カルフォルニア州内における性能工学に向けて推奨された統一的な手順を含んでいる。

Part 2：概念的枠組み

Vision 2000 報告書の Part 2 では、性能工学を将来の耐震設計基準に組み込むのに必要な概念的枠組みを提示している。概念的枠組みは、予測可能な性能を有する構造物を実現するために必要となる、構造設計についての提案された構想のアウトラインを示している。その内容は、基準適合性を解析する手法などの実施可能な多くの設計手法を含んでいる。

Part 3：ノースリッジ地震のもたらした教訓

Vision 2000 報告書の Part 3 では、ノースリッジ地震において建築物が示した性能から得られた教訓を提示している。この情報の目的は、Vision 2000 で開発された性能規定条項をキャリブレーションすることにある。その内容は、既刊の報告書から抽出された、地震で得られた教訓に関する要約のデータベース、さまざまなコンサルタント事務所や公的機関によって実施された、特定の建築物の震災調査に関するデータベースを含んでいる。

Part 4：性能工学に向けた青書の更新

Vision 2000 報告書の Part 4 では、性能工学の概念と、ノースリッジ地震から得られた教訓を、将来の SEAOC 青書や建築基準の改訂版に組み込むための方法について、提唱案を提示している。その内容は、短期的業績－例えば 1994 年の UBC Emergency Code 改訂、1995 年青書改訂、1996 年 UBC Supplement 改訂－に加えて、SEAOC 青書を用いて、Vision 2000 によって提案された性能工学を将来の設計実務に組み込む方法についてのロードマップを含んでいる。

Performance Based Seismic Engineering of Building

性能に基づいた建築物の耐震工学

Part 1 : Interim Recommendations 暫定的な勧告

SEAOC Vision 2000 委員会

新しい世代の設計手法に対するニーズに応えるために、カリフォルニア州構造技術者協会(SEAOC)は、将来を見据えて、予測可能な耐震性能を有する構造物を提供し得る設計方法の枠組みを確立するために、特別委員会を設置した。Vision 2000 と呼ばれるこの委員会は、1992年の初審議から今日に至るまで、最終的な目標と、終了を宣言するまでのプロセスについて様々な努力を続けている。Vision 2000にはその枠組みを明らかにする他、適切な設計ガイドラインや設計指針を整備することも大いに期待されている。SEAOC地震工学委員会は、利用可能かつ適切な新しい概念を、将来のSEAOC青書に盛り込む方針である。

Vision 2000 委員会の第一ステップは、プロジェクトの活動領域を確立することであった。これらのプロジェクトの活動領域は、最終目標や使命を表す声明文に取り入れられた。Vision 2000 の最終目標は以下に示す通りである。

Vision 2000 委員会の最終目標は、予測可能な耐震性能を有する構造物を提供する設計手法の枠組みを確立することである。

この枠組みにより、人命保護、損傷許容性および機能性に関する課題が明らかにされる。これは、実際に用いる材料と施工が設計を正確に反映した場合には、合理的な信頼性をもって予測可能な耐震性能を有する構造物が建設されることを意図するものである。

第二ステップは、プロジェクトの短期および中・長期の事業計画とスケジュールを確立することであった。なお、この事業計画に関する資料はSEAOC事務局から入手可能である。

第三ステップは、本委員会の短期的な検討のすべての段階での成果が含まれる Vision2000 の報告書を取りまとめることであった。この報告書は、性能規定工学に関する定義、耐震性能という概念を今日の設計基準に適用させるための暫定的な勧告、将来の性能設計指針を作成するための概念的枠組み、ノースリッジ地震により得られた予備的教訓、SEAOC 青書を性能工学の概念に向けて更新する際のロードマップなどによって構成される。この報告書には以下に示す4つのPartが含まれる。

- Part 1 : 暫定的な勧告
- Part 2 : 概念的枠組み
- Part 3 : ノースリッジ地震により得られた予備的な教訓
- Part 4 : 性能工学に向けた青書の更新

1. 序 論

1.1 はじめに

この報告書は、予想可能で明確な耐震性能を有する建築物を得るための工学的手法に関する暫定的な勧告を提示している。これは、カリフォルニア州緊急対策本部の資金提供のもと、SEAOC Vision 2000 委員会により発表された。この暫定的な勧告は、新設建造物の設計、既設建造物の評価、補修、更新に従事している構造技術者が使用することを意図している。この報告書の一部は建築行政官、政策立案者、規制執行機関、建築物の所有者、借主にとっても有意義なものと言えよう。

1.2 目的

この性能工学に関する暫定的な勧告の目的は次に示す通りである：

1. 建築物の耐震設計と施工のための標準的な性能水準を定義する。性能水準は損傷状態を制限するものである。構造部材の損傷、非構造部材の損傷、建築物の中身の損傷、用地内有用物の損傷が、性能水準の定義において考慮される。性能水準は、想定された損傷が発生したときの、安全性、経済性、そして社会的な重要度を基準に選定されるべきである。
2. 参照する地震危険度と設計水準を定義する。ある特定の期間内に、ある特定の震源地区には多数の小規模地震、いくつかの中規模地震、少数の大規模地震が発生する可能性がある。性能工学の目指すところは、ある建築物と関連付けられた耐震危険度を、予め定義された許容レベルに制御することにある。この危険度は、想定されたレベルの地震が、その地震に対する建築物の応答と関連して、その建築物に影響を及ぼす確率で与えられる。建造物の用地に影響を及ぼす一連のスペクトルとして参照される耐震設計水準は、個々の建築物の設計において、危険水準を確認するために使われる離散的な確率事象である。
3. 占有期間、用途がそれぞれ異なる建築物に適用できる、一連の統一された設計性能目標を定義する。この設計性能目標は、設計において参照する、各々の地震動レベルに対する、一連の標準的な性能水準からなる。これらの性能水準に達するように設計、施工、維持された建築物は、耐震設計上の危険度が定量化されていることを意味する。
4. 現在適用可能な技術と設計手法を用いて、カリフォルニア州内において用いる性能工学のための統一された工学的な手法を提案する。

1.3 背景

現在、米国のほとんどすべての建築工事は、耐震構造条項を含む建築基準によって規制されている。現在施行されている主な建築基準には、統一建築基準 (ICBO、1994 年)、BOCA 基準 (BOCA、1993 年)、標準建築基準 (SBCCI、1993 年) がある。いずれも SEAOC 青書 (SEAOC、1990 年) または NEHRP 規定 (BSSC、1991 年) のいずれかに基づいており、これらは ATC 3-06 (ATC、1978 年) と密接な関係がある準拠基準である。したがって、これらの基準における耐震設計および耐震構造に関する規定は、ほぼ同一である。

これらの基準の主な目標は、比較的まれな大地震の際に、倒壊または大きながれきの落下に耐えるのに十分な健全性、強度、および靱性を持つ建築物を規定することによって、人命を保護することである。第二の目標は、より頻繁に発生することが予想される、より弱い地震における財産の被害の低減と建造物の機能の維持である。これらの基準は、過去の地震で建造物に生じた実際の損害の観察や多くの大学による広範囲な研究にもとづいて、経験的に作成された。大地震の後、技術者たちは、特にそのときに実施されていた基準に適合する建築物の性能に着目してその損害を観察した。許容できない損害が観察された場合は、将来の地震の際にそのような損害の再発を防止するために建築基準の規定が改定された。その結果、米国の地震活動地域で実施されている現行の建築基準は、適切に設計され、施工された建築物では十分な生命安全度を提供

すると信じられている。しかし、これらの基準は、一部の構造物に対しては、中小地震における財産の損害を最小化するという第2の目標については信頼性が低いと思われる。

近年、カリフォルニア州は、活発な地震活動と比較的近代な建築物が存在するために、意図された性能目標の達成におけるこれらの建築基準の効果を判断するための格好の実験場になっている。1989年に発生したマグニチュード7.1のロマプリエータ地震は、サンフランシスコ湾地区に影響を与えた。これは比較的大きなマグニチュードの地震であったが、位置および断層破壊特性は、持続時間が比較的短い強い地動であり、もっとも密集度の高いベイエリアでは、可能最大地震で予想されている地盤加速度の1/4~1/2の加速度が記録された。地震動は比較的小さかったが、ロマプリエータ地震は70億ドルを超える損害をもたらした。最新版の建築基準に従って設計された一部の近代構造物もきわめて甚大な破壊を受けたため長期間にわたって使用できなくなった。最近の建築基準に従って設計された近代なビルでは人命は失われなかったが、構造工学専門家と公共政策立案者の両者は、中程度の地震にしては発生した経済的損害が大きすぎると判断した。中程度の地震における財産および業務中断の損失を許容水準まで低減するという社会の要求条件に、よりよく応えられる新たな建築設計手法と施工方法の必要性が確認された。また、既存の建築物を診断し、修復するための手法の対象範囲を拡大する必要性も確認された。

SEAOCは、40年以上にわたって統一建築基準(UBC)に規定された耐震設計・施工規定の作成に積極的にかかわってきた。この作業の多くは、SEAOC地震学委員会の委員の自発的な努力によっておこなわれている。既存のUBC基準を維持し、諸問題に対応するには持続的な責任が生じるため、性能評価型の新たな耐震設計手法と施工方法の立案が地震学委員会の能力を超える大規模で長期に及ぶ努力を必要とすることが認識された。そのため、SEAOC理事会は、性能評価型の次世代耐震建築基準のための枠組みを作成するために1992年にVision 2000委員会を設置した。

Vision 2000委員会は、多くの地震学委員会の元委員長、および青書とNEHRF規定の両方の作成に活躍したSEAOC委員から構成された。1992-93年に、委員会は、性能評価型の次世代建築基準のための予備的な枠組みを作成した。この枠組みは、エネルギー平衡および非線形解析法を含めて、大規模地震を受ける構造システムの挙動の特性を把握するための新たに開発されつつある解析手法や方法を組み入れている。同時に、委員会は、さまざまな建築物の中でもっとも一般的な構造物のための簡便で信頼できる設計手法と施工方法の必要性も理解した。複数年度計画の原案が、この次世代基準の作成を進めるために作成された。

1994年1月に発生したマグニチュード6.7のノースリッジ地震は、ロマプリエータ地震よりもはるかに深刻な約200億ドルと推定される損害をもたらした。技術者と公共政策立案者は、今回も、比較的頻繁に発生する中程度の地震でこのような大きな損害を受けることは許容できないと判断した。カリフォルニア州緊急対策本部は、数百の建築物を補修・再建する必要性に直面し、現在使用できる性能照査型の設計手法と施工方法のための勧告を作成するためにSEAOCと契約した。この報告書は、その勧告を提示するものであり、これを性能規定型工学と呼んでいる。

1.4 暫定的な勧告

性能設計による耐震工学は、限界損傷レベルを特定するための、異なった強度の地震に耐え得る建築物を施工することを可能とするため、完全な設計、施工に対する支援活動の必要性を包含している。現在、様々な成功の度合でそれらが実行されているが、手順を統一的に書いた文書は存在しない。この暫定的なガイドラインは、将来策定されるであろう性能設計ガイドラインのための基礎を形作る、明文化された文書を提供することを意図している。

性能工学はプロジェクトの最初の概念設計に始まり、建物の供用期間を通して終わる手順である。それは、性能目標の選定、地域適合度の定義、概念設計、予備設計、最終設計、設計中の基準適合照査、設計精査、施工中の品質保証、そして建物の供用期間中の維持管理を含んでいる。いずれの段階も、設計の成功にクリティカルなものであり、選択された性能目標に見合ったレベルに位置づけられる必要がある。設計のみに関連したものだけでなく、すべての作業の局面を包含することから、性能設計ではなく性能工学が、この手順に最もふさわしい名前である。

暫定的な勧告と連結して、Vision2000 委員会は、各手順の鍵となる局面を完全に定義する、性能工学の概念的枠組みを開発し、基本的な系統立った構造物と、それに対する一連の設計手法を提案した。この成果は Vision2000 報告書の Part 2 として出版された。

この暫定的な勧告は、使用可能なガイドラインと基準を用いた性能工学の概念をすぐに取扱えるようにするために開発された。性能レベルと地震災害度の階層における性能目標の基本的な定義は、第2章：性能目標に関する勧告に示されている。性能工学のための暫定的な勧告は、第3章に示されている

1.5 制限

性能照査型耐震工学の手順においては、ある特定の地震動が発生した場合の建築物の性能を予測する能力を技術者が備えていることが仮定される。現在の知識や利用可能な技術では、ある特定の地震動を受けた特定の建築物の性能を正確に予測する能力に限界があり、不確定な要素が数多くある。不確定要因には以下のようなものがある。

- ・ 強度、持続時間、段階、発生頻度を含む地震動の定義
- ・ 地震動に対応する応答として構造物に生じる変形分布や応力分析の解析
- ・ 実際の配置、強度、変形、建設中およびその後の供用中における構造物のエネルギー吸収および逸散能力に関する知識
- ・ 特定の地震動に対する応答に際しての構造的および非構造的な要素に起こる特定の被害の決定

研究者や熟練した技術者は、これらの不確定な点を少しでもなくすよう、地震動や構造物の応答を評価するためのよりよい解析方法の開発、実験室での構造模型による試験、地震により実際の構造物に起こった被害の継続的観察を実施しながら、日々積極的に努力している。今日の地震による被害を予測する能力は 10 年前と比べると格段に上がってはいるが、信頼性にはいまだ限界がある。

本報告書に述べられている勧告は、予測可能で明確な耐震性能を持つ構造物をいかに建築するかに関する指針を技術者に提供しようとするものである。もちろんここで述べられている忠告に基づいて設計しても、その特定の構造物が希望どおりの成果を収められるということを保証するものではない。この報告書を利用する方は、本書に述べられている勧告の適用にあたっては、十分な注意と独自の判断をするべきである。本書は現在施行されている建築物に関する基準類の代用になるものではないし、そのように使うべきものでもない。

SEAOC、その会員、Vision 2000 委員会は、本書に述べられている勧告により設計された建築物の状態に関し、保証する義務は一切ない。

Performance Based Seismic Engineering of Building

性能に基づいた建築物の耐震工学

Part 2 : Conceptual Framework 概念上の枠組み

実施要領

はじめに

本報告書は、性能規定条項を開発するための3段階の提唱のうち、最初の段階に相当する、性能工学で用いる方法論を提示している。これは、1994年1月17日のノースリッジ地震に続いて、カリフォルニア州緊急対策本部が設置した、カリフォルニア州構造技術者協会のVision2000委員会によって準備された。

性能工学の方法論は、概念的な枠組み、実行可能な設計手法および、基準適合性についての解析手順という、3つの節により提示されている。概念的な枠組みは、許容できる性能をもつ建築物を構築するために必要な構造設計に関して、提案されたこれまでにない展望の概要である。この枠組みで対象とするのは、設計標準を定めるために、用地の受入可能性を確認するために、結果として施工報告書となる設計手法と基準適合性についての解析手順を開発するために、必要とされる品質保証プログラムのための条項に、そして、供用期間中の建築物の維持管理で必要とされる承認のために、必要とされる手順を定義するアウトラインである。

設計手法と、基準適合解析手法が、性能工学の過程における核心部分である。潜在的に多数の手法が考えられ、その中のいくつかは他者より適用する準備が整っている。これらの実行可能な設計手法は、第3章に記載されている。そして、関連する基準適合解析の手法は、第4章で定義されている。構造物の形式が多様であり、それらの地震応答が独特であるため、どのような設計手法や基準適合解析手法も、すべての建築物に適用することはできない。建築物の形式ごとにサブセットとして使用し、それぞれに固有の仮定により最良の表現ができるような、複数の設計手法が開発され、改良される必要がある。

概念的枠組み

性能工学は、予測可能な耐震性能を持った構造物を作り出すために必要とされる、工学的な作業のすべての範囲を包含する。ここで推奨される耐震工学の範囲は、性能設計における目的を選択すること、地震災害度解析、構造部材と非構造部材の耐震設計および解析、さらに設計および施工の品質保証、施工後の供用期間における構造物の維持管理と機能の監視までを含んでおり、現在の実施形態から大幅に拡張される。性能工学の概念的な方法論は以下の通りである：

性能規定目標：これは、想定される地震動のレベルと、それにより引き起こされると想定される損傷レベルについて選択されるもので、相応の限界値により表現される。

用地に対する適合度と地震災害度解析：これらは、建築物に適合しない用地の災害度を定義し、設計のために特定の地震動レベルを特徴づけ明確にするために、実施される。

設計手法：これは、概念設計、予備設計、最終設計と、基準適合解析を含む。概念設計においては、構造システムと非構造システムを選択し間取りや配置を思慮深く行うことであり、非線形応答を制御するためにシステムの中で塑性化する部材を特定するという設計上の鍵となる判断がなされる。予備設計では、当初の設計条件に応じて、初期の断面寸法を設定する。最終設計では、寸法を補正

し、じん性部材の詳細を決定する。基準適合解析は、各々の設計段階が終わった後に実施し、性能クライテリアにおける重要度から定義される、耐震性の許容値が満足されることを確認する。

品質保証：これは、拡張された設計の再吟味と施工の品質保証を含む。これらはいずれも、性能工学において不可欠なものである。構造物の維持管理は、その効果が低減してゆくであろう地震に抵抗する構造系の劣化と代替について、安全性を保証することを含んでいる。

性能工学は、危険性と不確実性を合わせ持っている。不確実性の要因は明確にされている必要がある。すなわち、危険性あるいは信頼性のレベルは、設計ガイドラインを開発してゆく中で、定量化される必要がある。

設計手法

修正されたいくつかの既存の設計手法と、いくつかの開発途上の新しい手法は、性能設計に適用することができる。総合設計法、変位ベース設計法、エネルギーベース設計法の各手法は、開発途上ながら将来使用可能な設計手法である。これらは、構造物の非弾性応答を直接扱うことができ、どんな性能目標にも使用可能である。

一般化された荷重・強度設計法、簡略化された荷重・強度設計法、規定型設計法は、弾性設計法を使う現行手法を修正して強化したものである。性能設計でこれらの手法を用いる場合、適用範囲は限定される。これらの手法は、一般的には高度な性能目標を有する複雑な構造物への使用のために開発されたものではない。

基準適合解析の手法

基準適合解析は、選定された性能目標を照査するために、各設計段階で実施される。適用可能なクライテリアは、各々の性能目標について定義された損傷レベルと関連した、構造物の応答パラメータ（変形、応力度、要求されるじん性率等）の制限値である。基準適合解析では、基準適合クライテリアの制限値と比較すべき、構造物の地震応答を算出するために、多種の線形ないし非線形解析手法を採用することができる。

現在一般的な線形解析法（例えば震度法、応答スペクトル法、モード解析法など）は、非線形応答の算出では応用範囲が限定される。現在限定的に使用されている部材弾性解析法では、構造部材に要求されるじん性率を評価するために許容塑性率が用いられる。

最新の解析手法として、キャパシティスペクトル解析法とブッシュオーバー解析法が挙げられる。これらの手法は、構造物に漸増荷重を作用させ、推定される所要の終局塑性変形量まで一連の塑性ヒンジの進展によって降伏させる解析を行なう。層間変位要求スペクトル解析法は、構造物の要求性能を解析するための発展途上の解析手法である。

動的非線形時刻歴解析法は、動的な地震応答の解析法としては最も適用範囲の広いものである。この技術は、設計入力地震動が作用する建築物の実際の性能を再現し、記録することもできる。

応用

ここで概説した概念的枠組みは、性能工学における次の段階において、工学的ガイドラインへと展開することができる。性能目標の選択、用地適合性、構造部材および非構造部材の耐震設計、設計と施工の広い意味での品質保証、構造システムの長期的維持管理などを含む現行手法を、より広い適用範囲に広げることで、その展開は可能となる。

設計手法を開発するには、非線形挙動を予想通りに制御するために、キャパシティデザインの原則を取り込むことが必要となる。解析手法は、非線形地震応答を直接扱うことになる。この点について、変位ベース設計法や、エネルギーベース設計法は、特に有望な新しい手法である。

単一性能水準の現行手法（弾性設計）から性能工学への移行は、適切にキャリブレートされたスムーズな

移行と、現行基準へのゆっくりとした導入により成功すると考えられる。Vision 2000 委員会では、1994 年中にこの移行をすべく、3つの報告書を作成した。「Part 1：暫定的な勧告」では、現在適用可能な設計ガイドラインと基準を用いた性能工学の手順を概説する。「Part 3：ノースリッジ地震の予備的な教訓」では、この経験に照らして設計手法や基準適合性照査をキャリブレートするのに有効な基礎的な建築物の性能データが得られたことを示す。「Part 4：性能工学に向けた青書の更新」では、目的達成のための移行過程について述べる。

1. 序 論

1.1 目的

この報告書は、概念上の枠組みと耐震構造物の性能工学の手法を提示するもので、耐震性能規定条項を作成する3段階の提唱の第1段階である。ここでは、定義可能な危険度レベルの範囲内で、予測可能であり制御可能な耐震性能を有する構造物の開発に適用可能な、いくつかの提案設計手法、いくつかの有効な解析方法についての基礎的な記述が含まれている。この報告書は、カリフォルニア州緊急対策本部によって資金提供されたカリフォルニア州構造技術者協会(SEAOC) Vision 2000 委員会によって作成されたものである。

ここで提示する枠組みは、耐震工学ガイドラインの文書を作成することと、次の段階において設計指針の条項にそれを取り入れることを意図している。この報告書は、ガイドライン開発の手引きを与えると共に、性能工学の概念が開発される際にそれを既存の耐震設計指針の条項に組み込む過程を促進することを意図している。さらに、本報告書は、技術者、建築家、所有者、興味を持つその他のコミュニティのメンバーに、性能工学の概念を紹介するために使用されるであろう。

1.2 背景

耐震設計手法は、単純な概念設計および限定された性能目標を備えた基本的なものを始まりとして、20世紀に発展してきた。地震に抵抗する構造物は、鉛直方向の荷重に抵抗するとともに、自重×震度の大きさの静的な水平力にも抵抗するように設計される、震度法の問題の開発と改善として、耐震設計手法は今世紀初めの初期の段階から1970年代まで発展してきた。1970年代のATC3-06プロジェクトは、広範囲の最近の調査および研究開発を行い、耐震工学手法の新しい方向を示した。そこでは、地震荷重および力学上の応答特性、土-構造物の動的相互作用の影響、構造物におけるじん性挙動の重要性とじん性を実現する構造細目を述べることの重要性を明らかにすることが含まれている。ATC3-06の概念は、耐震設計に明確に組み込まれてきた。

これらにより、多くの点で耐震設計は大きく改善された。しかし、1994年のノースリッジ地震は、その他の最近の地震と同様、耐震設計法に改良の余地があることを実証した。予想通りに、多くのより古い構造物は損傷したが、いくつかのより新しいコンクリート、鋼、粗石造、木造の構造物もひどく損傷した。非構造部材の損傷と、サービスの停止による損失は、構造物の損傷による損失よりもはるかに甚大であった。

最近の規準により提案され、ノースリッジ地震など最近の地震で実証された、人命に対する保護は比較的良く達成された。しかし、ノースリッジ地震の生じたタイミングがもしも悪かった場合には、結果はかなり悪くなっていたはずである。規準の性能目標と概ね一致するが、財産の損失は社会がこのような地震で予期するより明らかに大きく現れた。

近年の地震における構造物の性能は、より都合のよい、結果が予測できる改善された耐震設計アプローチの必要性を示している。さらに、耐震設計規準は、それらの始まりからATC3-06の概念を組み込む今日までの発展により、ますます複雑になり、また耐震設計の基本概念を不明瞭にして、設計必要条件を混乱させてきた。

予測可能な耐震性能を達成し得るよう耐震設計ガイドラインを改善すること、および基礎的な耐震設計の概念が透明で見通しがよくなるようにガイドラインを改めることが必要であることは明らかである。その必要性に呼応して、Vision 2000 性能工学の開発が始まった。

1.3 Vision 2000 の当初目標

Vision 2000 の作成計画は、概念段階、ガイドライン段階および設計基準段階からなる。この報告に示されているが、1995年に完成すべき短期目標は、構造物の性能規定型耐震工学における概念的枠組みを明らかにした文書を出すことである。1998年から2000年までの中期目標は、性能規定型耐震工学の指針の概念的枠組みを展開して、現在の耐震設計手法の概念に徐々に組み入れることである。2000年から2005年までの長期目標は、基準の中の指針を起草することおよび、耐震設計実務を通じて改善することである。これらの目標とタイムテーブルは、ATC3-06の近年の歴史を考えると明らかに野心的である。

4つのパートで報告されるように、短期計画は9つのタスクに分けられる。このPart 2の文書はA.2分科会の最終成果である。ここでは、性能規定型工学の概念的枠組みについて、および、設計手法と解析方法について述べている。Part 1はA.1分科会の研究成果で、性能工学並びに性能レベル・目標・地震危険度レベルを定義し、現状の設計規定を性能規定型工学に適用するため、暫定的な勧告をまとめた。その他のタスクの結果はPart 3、4で報告されている。

1.4 性能工学の定義

性能工学は「特定の地震動レベルと信頼性において、構造物がある限界状態または他の使用限界を越えて被害を受けないように、設計基準、適切な構造系、配置、形状を選定すること、構造部材および非構造部材の詳細を決定すること、施工品質と長期メンテナンスを保証し制御すること」と定義される。

損傷限界状態は性能レベルと呼ばれ、4つの特定のレベルが2.2節で定義されている。性能レベルは構造物を設計する性能目標を定義する地震動レベルとの組合せで示される。

1.5 性能工学の枠組みに関する文書

本報告書は構造物の耐震性能規定型工学のための概念的枠組みを提示する。第1章は序論で、性能工学の現段階の開発状況と先行プロジェクトの全体的な最終目標のアウトラインを示している。

第2章では、段階的な方法でとりまとめられたすべての概念的枠組みの概要を紹介する。概念的枠組みと方法論の概略は、すべての構造形式、すべての地震地域、いくつかの性能目標に対する新旧の構造物に適用するよう想定されている。耐震構造物の予測可能な耐震性能を達成するために、取り組まなければならない、鍵となる工学的な問題の全容を明らかにするために、概念的枠組みは構築されている。提案される枠組みは設計手法と基準適合解析を含んでいる。それぞれについて、有望ないくつかは、第3章および第4章で要約されている。

第3章では、6つの設計手法を紹介しているが、これらは最終的な方法論に含まれる可能性がある。6つの設計手法はそれぞれ独立して開発され、使用される。いくつかの手法は比較的多くのタイプの構造物、性能目標に適用される。

第4章では、基準適合解析を実行するための有望ないくつかの手法を要約している。これらは、設定された信頼性水準でその性能目標を構造設計が達成することを検討するのに用いられる。提示された基準適合解析手法は一般的に構造物の線形・非線形解析と、種々の構造応答パラメータの性能目標との比較からなる。

第5章は、性能工学の概念に関する結論と、性能工学の中期・長期的目標を達成するために今後の研究と開発がとるべき方向に関する勧告について述べている。

この論文の付録には、いくつかの設計手法の発展的な考察および参考資料が追加されている。これらの情報は、性能工学の開発の将来の段階でリソースとして組み込まれる。

2. 性能工学の概念的枠組

2.1 概要

本章では、概括的で段階的な方法論により、性能工学の概念的枠組みを説明する。本枠組みは、構造物の性能目標が既定の危険度レベル内におさまるような、予測および制御可能な構造設計に関する刊行物のすべてを包含するものである。その方法論を Figure 2-1 のフローチャートに示す。

ここで示される枠組みは、まず、ガイドラインへ発展させ、次に建築設計に適用可能になるよう規定・基準へと発展させなければならない。いくつかの概念は容易に発展するが、その他の概念は、利用できるようになるまでには、かなりの調査と試設計的な適用が必要となるであろう。今までの耐震設計業務から性能設計へと移り変わる段階において、現存の基準から新しい基準へと漸増的かつスムーズに発展すると思われる。

ここで述べる性能工学の方法論は、すべての地震発生地域における全型式の建築物に適用される。それは、一般的な建築設計を背景にして発展してきたが、橋梁などの建物でない構造物への適用も可能であろう。また、第一段階としては、新設構造物が対象であったが、何らかの制限を設けた形であれば既存構造物への適用も可能であろう。既存構造物への適用としては、同時並行的に開発が進められている ATC-33 や ATC-40 の案 122 のガイドラインで展開されている。

性能工学においては、まず、目標とする耐震性能を選定し、地震被害度の設定を行う。続いて、概念設計、予備設計および実施設計を実施し、設計保有性能の照査と設計精査を行ない、最終的には建設中の品質保証と建設後のメンテナンスを実施することになる。各ステップは、目標とする耐震性能に見合った設計の厳密さによって、過不足のない範囲で実施される。簡易な方法論は、耐震性能の低い単純な構造物に適用される。

この“設計”と“保有性能の照査”のステップは、選択された設計手法と目標とする耐震性能に依存してかわる。建築設計の手法には、第3章にて概略を示すように、総合設計法や変位、エネルギー、一般化された荷重・強度、簡略化された荷重・強度で規定された手法が含まれている。保有性能の解析手順の概要は第4章に示されている。それには一般的な弾性解析法や、要素弾性解析法、キャパシティブトルク解析法、プッシュオーバー解析法、動的非線形時刻歴応答解析法や層間変位要求スペクトル解析法が含まれている。

キャパシティブデザインの考え方は、適切な耐震設計の基本原則として採用されている。キャパシティブデザインにおいては、構造物の非弾性的挙動が、意図した塑性ヒューズ（塑性ヒンジ）の位置で塑性挙動を発生させることにより制御される。それらヒューズの構造細目は、それ以外の個所が弾性範囲にあるように、地震に対する要求じん性を達成するように定められる。

耐震設計のプロセスには、以下の多くの不確定要素が含まれている。地震被害度、解析手法や解析モデル、構造部材のばらつきや作業能力等がそれである。性能工学の技術では、これらの不確定要素を特定し、かつ定量化しなければならない。それにより設計の信頼性が評価され、周知されなければならない。

性能工学の方法論の各主要ステップについては、これから続くサブセクションにてより詳細に述べられている。これらの記述は自然な形に一般化され、かつ報告書の以降のセクションでより詳細に記述されている。各々のセクションは、いくつかの参考文献による詳細な適用例とともに、最終成果の一般的な記述として書かれている。各々は、性能工学の発展における次なる段階では、ガイドラインの文書として展開することが求められている。

2.2 性能目標の選択

性能工学の最初の段階は、設計のための耐震性能目標を選定することである。この選択は、受け入れる危険度を考慮してなされる。この選定は、クライアントの期待、地震被害に対する危険度、経済分析、そして容認できる危険度を考慮した上で、設計の専門家であるコンサルティングのもと、クライアントによりなされる。性能設計は、指針に示された最小値（通常は、まれに起きる地震に対しては人命保護のみ）から、考えられる最大の地震においても完全に機能保持するレベルまで、典型的に分布する。

性能目標は、地震動の予期されるレベルと、期待される性能のレベルの組合せである。ひとつの性能レベルはひとつの損傷状態であり、Figure 2-2 に示された考えられる地震損傷状態のスペクトルにおける、ひとつのはっきりした帯域である。性能レベルは、構造部材と非構造部材の損傷状態で定義される。また、占有者と、施設の有する機能に与える結果で定義される。この報告書では4つの性能レベルを明確にしており、この報告書の Part 1 で詳細に説明されている。性能レベルは以下の通りである：

- ・完全な機能保持 — 損傷は無視でき、施設は引き続き機能する
- ・機能保持 — 損傷は少なく、本質的でないサービスを止めることで施設は機能する
- ・人命保護 — 損傷は広範囲にわたり中規模で、人命は本質的に保護される
- ・ほぼ崩壊 — 人命保護は危機的、損傷は甚大だが構造物の崩壊は防止されている

Table 2-1 から 2-6 に、建物のさまざまな要素についてより詳細な性能レベルが定義されている。

与えられた地点の地震被害度は、特定の生起確率の地震による地盤の動きと関連づけられた被害度の組合せで表される。確率事象の4つのレベルは以下のように提案されている：

事象	再現期間	超過確率
ときどきの	43年	30年で50%
たまの	72年	50年で50%
まれな	475年	50年で10%
非常にまれな	970年	100年で10%

性能目標の終着点は一般的には多重的である。例えば、再現期間43年の地震に対しては完全な機能保持、475年の地震に対しては人命保護、970年の地震に対しては崩壊の防止などとなる。本報告書では、最小の目標と拡張目標が定義されている。

最小目標: 基本的な目標は、典型的な新しい建築物が最小限具備すべき性能目標として定義される。重要あるいは危険物を収容する施設と安全上重要となる施設（例えば病院と核取扱施設）に対しては最小限の目標が各々定義される。これらの3つの最小目標は、性能目標マトリクスの対角線として Figure 2-3 に示されている。

拡張目標: 最小目標に比べてよりよい性能かまたは低い危険性を与える他の目標は、クライアントの判断で選択される。これらの目標は拡張目標と呼ばれる。

選定された性能目標により、設計のための基準適合性のクライテリアが決定される。性能目標は性能レベルを表し、設計地震動の結果として予想される損傷レベルも表す。性能レベルは、層間変位とじん性要求値のような、計測可能な構造物の応答パラメータの制限値で決められる。性能目標が選定されると、関連する制限値は設計の後半で照査される基準適合性の基準値になる。定義された性能レベルと相関する応答パラメータの制限値は、研究を通して設定されるものである。基準適合性の基準値は2.6節でより深く考察される。

2.3 用地適合性および設計地震動

構造設計を開始する前段階として、当該プロジェクトに対して提案された性能目標を考慮して、用地適合性と地震災害度を解析しなければならない。存在する何らかの危険度を考慮して、提案された構造物に対する用地適合性を解析する。予想される構造解析および設計方法に適した形式で、地震動に関する設計基準が確立される。

用地適合性解析には、当該用地の地震特性、地盤種別、地震が発生する可能性の検討が含まれる。通常、解析には地盤性状および地形の決定、地震源および地動メカニズムの同定、液状化・津波およびその他の災

害（洪水や近隣施設からの火災など）の可能性の同定などが含まれる。

地震災害度解析では、すべてのクリティカルな地震源を考慮して、規定された設計事項に対して設計地震動を決定する。この地震動は時刻歴、加速度応答スペクトル、変位応答スペクトル、層間変位要求スペクトル、あるいは設計および解析手法に対して必要な場合にはその他の手段で表される。応答スペクトルは設計解析に応じて弾性あるいは非弾性となる。減衰については、完全弾性応答に対しては減衰比 2%、非弾性応答を仮定した慣用線形解析に対しては 5%とするが、非弾性解析あるいは特に減衰の大きい構造系に対しては 10%ないし 20%となることもあり得る。期待される地震動の継続時間の影響およびエネルギー規模についてはさらに検討して、設計において適切に考慮されなければならない。

中位の性能目標を持つ、単純で標準的な形態の建築物に対して、このステップは現行の設計コードと同様の手順に従うことになる。用地適合性解析は公的に入手可能な地図および共通の既知情報に基づいてなされる。地震災害度解析で得られる結果は建築行政官によって定められる地域係数以上の何ものでもないかもしれない。

2.4 概念設計

ひとたび性能目標が選ばれ用地適合性および地震動が確立したなら、構造設計を進めることができる。構造設計は、レイアウト、形態、構造系および材料の選択、基礎の選択、時には非構造系の選択をも含む、施設のトータルな概念設計から始まる。この概念設計の段階において、設計の実行可能性を決定する基本的な意思決定がなされる。

現代の耐震設計は地震の入力エネルギーのほとんどを構造物の非弾性応答により逸散するという考え方に基づいている。したがって、設計のこの段階において構造物の非線形挙動を考慮することは避けられない。非線形挙動を概略把握するため、および横方向外力に抵抗する構造系における延性リンクあるいは“ヒューズ”を指定するために、キャパシティデザインの原理が用いられるべきである。その構造系の他の部分が線形状態を保つものに対して、指定された“ヒューズ”は、降伏して地震の入力エネルギーを逸散することを期待される。概念的に概観することにより、構造物を故意に非弾性応答させることについて概念的に明確に理解できる設計チームが得られ、また、設計および品質保証プログラムの的を構造系内のクリティカルなリンクに絞ることができる。最終設計および詳細設計において、これらのクリティカルなリンクの詳細構造は、所要なじん性をもつように綿密に決定される。

概念設計段階において基本的な設計に関する意思決定をする場合、適切な耐震設計を行うために以下のガイドラインを考慮するべきである。

- 可能な個所では、単純で対称かつ一般的な形態を用いる。
- 重量構造でなく軽量構造を用いる。
- 細長比の大きい部材をなるべく利用しない。
- 耐震設計上の不確定性に対処するため、冗長性およびじん性のある構造とする。
- 損傷による永久変位が過大とならないよう、十分な剛性を持たせる。
- 損傷による加速度が過大とならないよう、十分な柔性を持たせる。
- 強度上はじん性（エネルギー逸散能力）および安定性を持たせ、しかも非弾性領域での繰り返し挙動における剛性を持たせる。
- 強度、剛性、冗長性、じん性は均一連続に分布させる。
- 基礎および地盤種別と適合する構造強度および剛性を持たせる。
- 比較的スパンを短く、柱間隔を狭くとる。
- 基礎の部分を含めて各高さレベルで鉛直部材同士を連結する。
- 非弾性応答を吸収するためのじん性のあるリンクシステムを用いることにより、非弾性挙動を制御するために、キャパシティデザインの原理を用いる。
- 設計戦略として、エネルギー逸散装置を用いることを検討する。
- 設計戦略として、免震装置を用いることを検討する。

概念設計は構造物の終局性能に強く関連するので、材料、形態および構造系に関する適切な限界を規定したガイドラインが各性能目標に対して必要となる。それらのガイドラインは概念設計段階において利用可能な項目で定義されなければならない。性能目標が増加すると制限レベルもまた増加する。またこの制限レベルは、延性材料からなる適切な構造詳細を持つ、標準的な形態の構造系の性能が、歴史的にきわめて優れていることを反映するものである。

2.5 予備・最終設計段階

性能目標が選択され、クリティカルな地震動が設定され、概念設計が決定すると、予備・最終設計が可能となる。設計手順は性能目標と設計・解析手法によって異なると考えられるが、考慮される基本的なステップと結果は同じものとなる。第3、4章で可能な設計・解析手法について概説する。

性能工学の主たる課題は、選択された性能目標に確実に構造物が合致するように、シンプルだが効果的な設計・解析・照査方法を開発することである。この報告書中で概説される設計課題に対するアプローチとして、よく知られた力/応力的手法、変位的手法、エネルギー的手法と基準適合照査で用いられる様々な弾性・非弾性解析手順を加味した慣用設計方法がある。

予備・最終設計段階は、性能目標に合致するための、骨組構造システムと非構造システムの数値化・具体化に関わる。性能目標は、合否基準としての工学用語—予測される損傷状態に結びついた構造応答パラメータ—toに翻訳されなければならない。合否基準、即ち応答パラメータの制限値が、設計の目標となる。これらには、層間変位と変形の制限、加速度と力の制限、降伏の制限、靱性の制限、そしてエネルギー逸散があり、これらは性能目標に合致した構造応答に見合うものでなければならない。これらの合否基準については2.6節にて議論する。

予備設計では、構造骨組部材の断面寸法決定と選択された基準に対する照査が行われる。断面寸法決定は、第3章で概説される手法の1つであるシステムティックな設計手法を用いて決定されることになる。これは、機能性、および人命保護あるいは崩壊防止という2つの基準に合致する設計をすることに関係する。予備的な部材寸法決定時は、概念設計で決められたキャパシティに沿った、期待通りの後弾性降伏パターンに適合するような部材形状とするべきである。

実施設計と構造詳細では、選択されたすべての性能目標を考慮しなければならない。弾性・非弾性ともに考慮し、応答パラメータの制限値と比較されるべきである。

キャパシティデザインにより設計された構造物では、じん性リンクとなる部分については許容可能な非弾性挙動を呈することを確認すべきである。設計地震動による構造応答を弾性限界から非弾性限界まで拡張するために、適切な靱性をもつ構造詳細でなければならない。じん性リンクとなる部分とその非弾性キャパシティを高める一方で、構造物の残りの部分は弾性域に留まるよう設計されるべきである。

非構造部材と付属物は構造物の弾性および非弾性変形に追従できるように設計されるべきである。非構造部材は構造システムから独立したもの、あるいは、建物の非弾性応答を加味した一体のものとして設計されるであろう。どちらの場合も、これらの要素は性能目標に合致するように設計・照査されなければならない。

2.6 各設計段階での許容度の照査

各設計段階において、選択した性能目標が満足されているかを確認するために、許容度の照査を行う。照査範囲や照査方法は、性能目標や設計方法によって異なるが、満足度の照査の基本的な考え方は同じである。

複数のパラメータによる構造物の応答を推定する際には、性能目標に合致し、許容度基準に満足しなければならない。許容度基準は、複数の構造応答パラメータの制限値から構成され、これらのパラメータは限定された入力地震動レベルに対応する損傷レベルあるいは性能レベルを満足するものとする。特定の建物に限定して、個別要素の設計は、異なる性能目標または同じ性能目標に対し、異なる応答パラメータまたは同じパ

ラメータによってコントロールできる。代表的な応答パラメータは以下の通りである。

- ・応力比
- ・層間変位と変形率
- ・構造物の加速度
- ・要求じん性率
- ・要求エネルギー逸散対キャパシティ

これらの応答パラメータの代表的な制限値は、個別要素の実験などの研究に基づいて設定した各々の性能レベルによって定められる。また、強震記録として過去の地震において、ある程度の損傷を経験した建物に対する分析により、制限値の目安を付けることも有効である。さらに、特殊な設計においても、適度なパラメータが性能レベルに合致しているか照査しなければならない。一般には、予備設計も最終設計も、少なくとも全体機能レベルおよび人命保護レベルに対し照査を行わねばならない。一部の構造物は、例えば、非地震地域では、崩壊寸前レベルで設計照査することが望ましい。一般的に、選定したすべての目標に対し、最終設計段階においては照査が行われる。また、構造部材のみならず非構造部材も照査される。多くの場合、構造部材設計の目標パラメータを満たす標準的な設計により、非構造部材が決められる。

簡便法あるいは慣用設計法では、建物管理者からのレビュー計画がない限り、許容度の照査が正式に行われなくてもよいであろう。但し、基礎となる設計要件を構築するような場合においては基準適合性の照査が必要となる。

基準適合照査の方法には、線形解析法も非線形解析法も関わる。応力比や層間変位をチェックするための線形解析法は、一般に知られており現在も広く用いられている。幾つかの簡便な非線形検討手法、例えばブッシュオーバー解析法は、第4章に概説される。

2.7 設計精査

設計手順において重要な品質保証方法は、資格を有する第3者による設計精査である。この設計精査とは、資格を有する第3者による詳細な精査と、建築行政による計画立案に対する精査を含む。

カリフォルニア州内にある学校、病院は、カリフォルニア州内にある他の建物と同じ水準で設計されている。今までの所それらの建物は地震に対して十分な性能を発揮している。その大きな理由として、設計段階における計画立案に対する厳密な精査と、架設段階における品質保証が挙げられる。

より単純な建物や、簡易的な設計に関しては建築行政官のみの精査になるであろう。しかしながら、建築行政官が設計の中身を理解し、計画立案に対して完全で有能な精査が出来ることも重要となる。

特別、特殊、重要な構造を含むすべての建物に対しては、第3者による詳細な精査が必要とされるべきである。そのような精査は設計、仮定、モデル化、解析、性能が発揮されたときの設計による効果を第3者が専門的な評価を実施するために、予備設計および最終設計の後に着手すべきである。

2.8 施工中の品質保証

設計の品質および解析の精密化にもかかわらず、施工中の十分な品質保証なしでは性能設計は成立しえない。

品質を保証するための手順には、設計の専門家、中身を吟味する照査者、建築行政官、専門の検査官、試験業者、請負者から成る連携が必要となる。設計の専門家は、設計思想が的確に理解されている事、建築物におけるクリティカルな部位が認識され、的確に構成されており、的確に検査と試験がなされている事を徹底させなければならない。建築行政官はすべての過程に法に基づいて関わり、そして、その過程が建築基準に従って構成されている事、専門的な検査、試験、構造上の監視が完全であることを確認しなければならない。

専門的な検査官は、設計の専門家の指示によって構造系におけるクリティカルな部位を検査し、それらの部位が計画に忠実に従って構成されていることを保証しなければならない。検査機関は施工された材料の品質と、専門の検査官の資格を確認しなければならない。

適度な性能目標を伴う単純な構造物または簡易的に設計された構造物に対しては、品質を保証するための内容を限定しても良い。多くの性能が求められる複雑な構造物に対しては、品質保証項目を詳細にしなければならない。どちらの場合においても、品質を保証するための作業計画は、登録された構造技術者によって定められるべきである。

2.9 建築物の維持管理と機能

性能工学は、竣工とともに役割が終わるわけではない。その責任の対象がほかに移るだけである。建築物の状態、構成、および使用目的は、構造物が年月を経るとともに進化する。将来の改修や改築によって、耐震システムが損なわれないことを保証するためには、所有者と建築行政官が注意深く管理し続けなければならない。さらに所有者は、構造物を適切に維持管理することで、部材の腐食や劣化がないことを保証する必要がある。また、使用方法が変わることによって、たとえば質量が著しく変化するような倉庫など、静的な活荷重が増加して、その結果、適切な解析・設計の妥当性の確認なしに建築物の動的応答が変わることがないようにする必要がある。

維持管理の条件は、採用する工法と選択された性能目標によって異なる。アクティブ型あるいはパッシブ型ダンパーなど先端技術を取入れた耐震設計、また劣化しやすい分解可能な材料などが期待どおりに機能するためには、適切な維持管理を定期的におこなう必要がある。この点では、従来の建築資材を使用する規定通りの設計の方が維持管理の要求は少ないと思われる。

2.10 不確実性、リスク、および信頼性

性能工学によって、程度が制限されたリスクと信頼性の範囲内で予測可能な性能を示す構造物を実現することができる。耐震設計の過程には、複数の不確実な要素がある。たとえば、地震動、設計・解析手法、およびモデル化の仮定などの不確実性があり、また材質、技量、施工の品質などのばらつきもある。さらに、材料の劣化、磨耗、構造的・非構造的な改修による構造物の経年変化などがある。

性能工学の重要な作業は、これら不確実な要素を認識、識別、定量化することによって、設計の専門家、発注者、法律家、および一般の人々がその信頼性とリスクの程度を認識し、把握できるようにすることである。

このため、性能工学は、必然的に、控えめな性能予測をしながら、既存の設計規則を徐々に改善した耐震設計指針にもとづいて開始される。その後、新しい設計と解析手法が開発され、地震記録からその耐震予測の正確さが証明されれば、設計指針が改正され、信頼性も次第に高まってゆく。

2.11 研究の必要性

性能工学のためのガイドラインに向けての、この概念的枠組みの開発には次のことが必要となるだろう。それは、かなりの新たな基礎研究、応用研究、キャリブレーション、設計トライアル、そして実際のガイドラインの準備である。最終目標に達成するためには、これらはバランスのとれた方法によって、それぞれの面で互いに包含され、立証されなければならない。

一般的に、この概念的枠組みに関する研究は次に示す広範囲にわたる領域において必要となる。

- ・ 4つの性能レベルとそれらの最低限の性能状態を定義するのに用いる特性値の妥当性を確認する。
- ・ 様々な地震地帯にある地域社会に対する、耐震設計と耐震性能が持つ社会的、経済的、および政治的なインパクトを考慮して、4つの地震災害度の定義が適切であるかを確認する。

- ・立地性能の適切な容認基準をそれぞれの性能目標に対する、許される沈下、側方流動、液状化、断層その他の点から制定する。
- ・地震災害度の特質を最適に与える実現可能な設計手法と、解析照査に必要な、適切な地震動パラメータを同定する。
- ・事業の開始時点で、性能工学のすべての面に焦点を当てた概念設計が可能なガイドラインを開発する。
- ・構造工学、地震工学全体の設計成果と完全に互換性があり、しかも事業財政の範囲を超えないような最適な設計手法と解析照査を特定し、開発する。
- ・現在行われていて成功した成果に基づいた適切なデザインレビューの鍵となる特質を特定し、適切なガイドラインを開発する。また、伝統的な建築部門の基本的な機能が様々な性能目標の達成に関係がある場合、それらを増大させるか変更する必要があるかどうかを決定する。
- ・過去に起こった地震における建築物の性能に基づき、施工品質が性能に関して持つ意味を決定する。また、性能目標のそれぞれに合わせて造られた建築物のために、最適な施工の品質保証計画のためのガイドラインを確立する。
- ・建築物の構造システムの生涯にわたるメンテナンスのために提供され規定を開発する。
- ・性能工学のために書かれたガイドラインや規定が本来持っている、リスクと確実性のレベルを系統的に定義する手段を開発する。そして、それぞれに対する受容基準を開発し、そのガイドラインに基づいて設計された建物の性能を監視することで、それらが決められたリスクと確実性以内で、予測できる性能の建物を生み出していることを保証しなければならない。

これらの研究の勧告はいくらか一般的なもので、ただ性能工学の鍵となる領域のそれぞれにおいて必要な研究と発展のレベルについて指摘をあたえるだけである。それぞれのケースにおいて、意図された技術の正確さと、定義された全体的な概念的フレームワークとの両立性、過去の地震において記録された建物の性能との持続性を実証するために十分な作業を行うことが重要である。

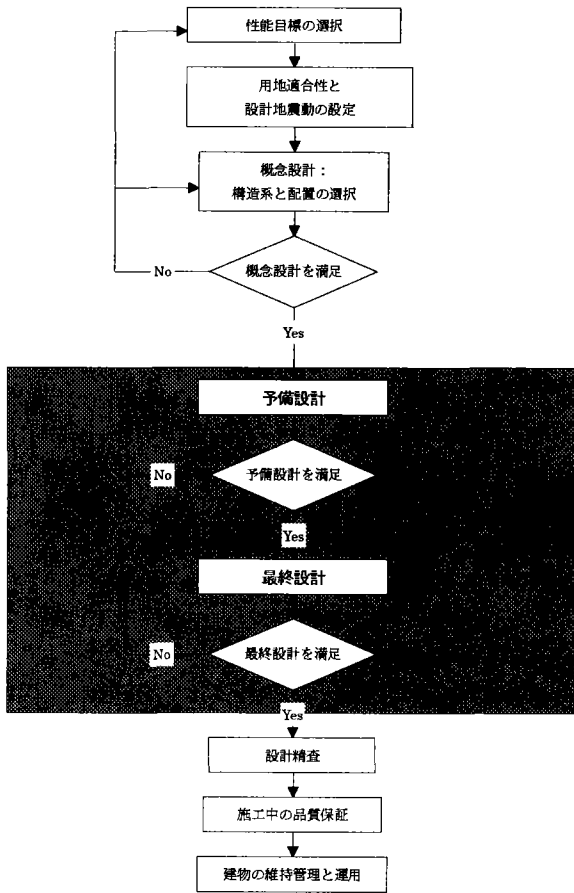


Figure 2-1:性能工学の方法論

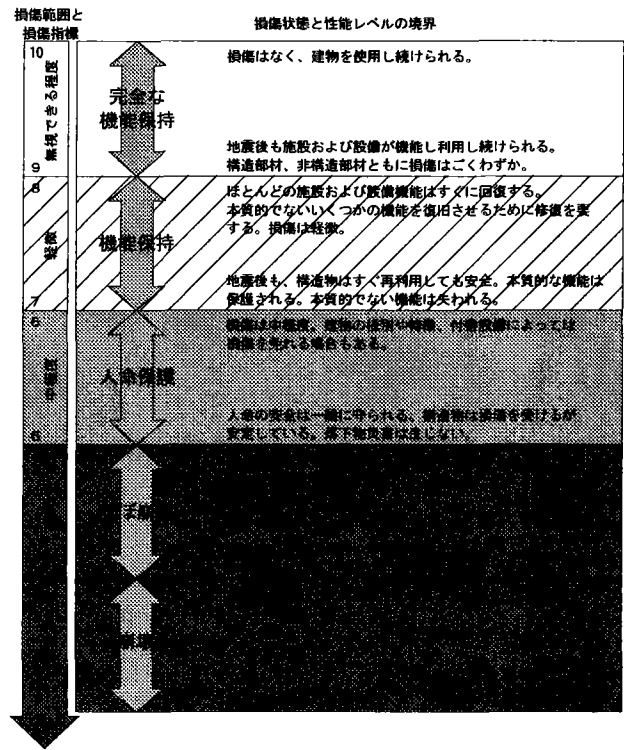


Figure 2-2:損傷状態のスペクトラム

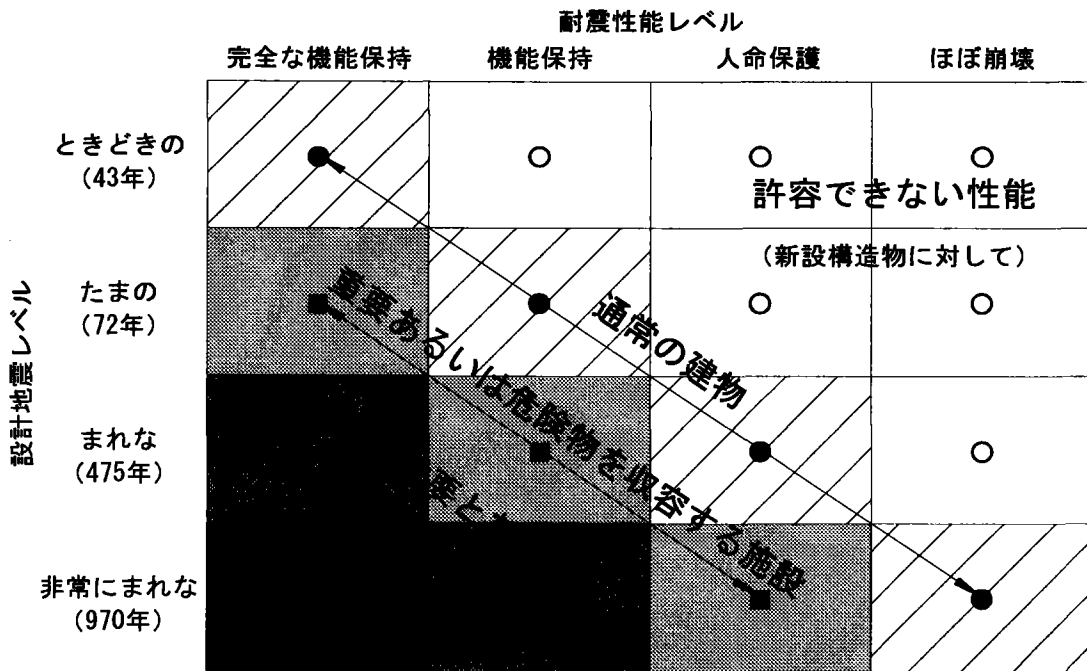


Figure 2-3:建築物のための耐震性能目標

Table 2-1a:性能水準と構造系に対する標準的な損傷度の記述

構造系に関する記述	性能レベル				
	10 完全な機能保持 9	8 機能保持 7	6 人命保護 5	4 崩壊寸前 3	2 崩壊 1
全体の構造物の損傷	無視できる	軽微	中程度	重大	完全
許容する最大層間変位角	<±0.2%	<±0.5%	<±1.5%	<±2.5%	>±2.5%
許容する残留層間変位角	無視できる	無視できる	<±0.5%	<±2.5%	>±2.5%
鉛直荷重支持部材の損傷	ごくわずか。	ごくわずか。	軽微から中程度であるが、自重を支持する能力は保持する。	中程度から重度であるが、部材は自重を支持しつづけることができる。	一部から全体にわたる自重を支持できない。
水平荷重支持部材の損傷	ごくわずか—一般的には弾性応答、強度または剛性の重大な損失はない。	軽微—ほぼ弾性応答、強度と剛性は元の状態を保つ。構造部材のわずかなひび割れ/降伏が生じ、修復は容易に可能。	中程度—残留強度と剛性は低下するが、水平方向の構造系は機能する。	残留強度と剛性はごくわずか。階層の崩壊メカニズムは生じないが、大きい永久変形。二次構造部材は完全に落下。	一部、あるいは全体が崩壊。主要部材は撤去が必要。
建築構造系の損傷	外装、ガラス、区画、天井、仕上げなどにごくわずかの損傷。脱落した部材は利用者により容易に補修可能。	建築構造系は軽微から中程度の損傷。重要で特に保護された用具は損傷を受けない。危険物質は漏洩しない。	建築構造系は中程度から重大な損傷、しかし大規模な落下物被害は生じない。危険物質の大規模な漏洩が生じる。	建築構造系は重大な損傷。移動したり落下する部材がある。	落下物災害がきわめて危険。部材の破壊。
非常口	重要でない。	非常に大きい障害はない。エレベーターは事後のわずかな作業により再始動可能。	非常口に大きい障害はない。エレベーターは長期間利用できない。	非常口に障害の恐れ。	非常口はかなり、または完全に塞がれる恐れ。

Table 2-1b:性能水準と構造系に対する標準的な損傷度の記述

構造系に関する記述	性能レベル				
	完全な機能保持	機能保持	人命保護	崩壊寸前	崩壊
機械/電気/配管/その他の機能系	機能保持。	機材の本質的機能は保持、防火と人命保護システムは機能する。他のシステムは補修が必要。必要に応じて一時的に機能が提供される。	いくつかの機材は破壊または転倒。多くのシステムは機能しない。配管、コンジットは破裂。	重大な損傷とシステムの永久的な崩壊。	一部、あるいは全体が崩壊。システムは永久に崩壊
付帯設備の損傷	付帯設備には軽微な損傷。危険物質は安全で損傷しない。	軽微から中程度の損傷。クリティカルな付帯設備と危険物質は安全。	付帯設備には中程度から重大な損傷。危険物質の大規模な漏洩。	付帯設備には重大な損傷。危険物質は内容できない。	付帯設備の一部あるいは全体が損失。
修復	必要ない。	所有者/居住者の利便性による。	可能であれば建物を閉鎖する。	修復できない恐れ。	不可能。
占有者への影響	影響ない。	連続して占有可。	短期間使用できないことがある。	永久に使用できない恐れ。	永久に使用不能。

Table 2-2a:性能レベルと許容される構造物の損傷—鉛直部材

部材	形式	性能レベル				
		10 完全な機能保持 9	8 機能保持 7	6 人命保護 5	4 崩壊寸前 3	2 崩壊 1
コンクリート構造	一次	損傷はごくわずか。	軽微なヘアクラック(0.02")、1、2ヶ所での降伏は許容される、圧壊しない(ひずみは0.003以下)。	梁の広範な損傷、じん性を期待する柱のかぶりの剥落とせん断ひび割れ (<1/8")。じん性を期待しない柱のかぶりの軽微な剥落。継手部のひび割れは 1/8"未滿。	じん性を期待する部材での広範なひび割れと塑性ヒンジの形成。じん性を期待しない柱の限定的なひび割れとかぶりの剥落。短柱の重大な損傷。	
	二次	損傷はごくわずか。	第一次と同様。	じん性を期待する部材の広範なひび割れと塑性ヒンジの形成。いくつかのじん性を期待しない柱における限定的なひび割れや重ね継手の損傷。短柱の重大な損傷。	柱(短くなっている可能性も)と梁の広範なかぶりの剥落。継手の重大な損傷。いくつかの鉄筋の座屈。	
鋼構造	一次	損傷はごくわずか。	1、2ヶ所での軽微な局所的な降伏。顕著な割れは生じない。部材の軽微な座屈または顕著な永久変形。	塑性ヒンジの形成、いくつかの梁要素における局部座屈、継手の重大な変形。	梁と柱の板材の広範な変形。大多数の接合部での割れ。	
	二次	損傷はごくわずか。	1、2ヶ所での軽微な局所的な降伏。割れは生じない。部材の軽微な座屈または顕著な永久変形。	梁と柱の板材の広範な変形。大多数の接合部での割れ。	梁と柱の板材の広範な変形。大多数の接合部での割れ。	
鉄骨構造	一次	損傷はごくわずか。	鉄骨の軽微な降伏または座屈。面外変形は生じない。	大多数の鉄骨が降伏または座屈するが、全体としては破壊しない。多くの継手は破壊。	鉄骨の広範な降伏と座屈。大多数の鉄骨とその接合部の破壊。	
	二次	損傷はごくわずか。	第一次と同様。	第一次と同様。	第一次と同様。	

Table 2-2b:性能レベルと許容される構造物の損傷－鉛直部材

部材	形式	性能レベル							
		10 完全な機能保持	9	8 機能保持	7	6 人命保護	5	4 崩壊寸前	3
コンクリートせん断壁	一次	損傷はごくわずか。		壁の軽微なヘアクラック(0.02")。連結梁に生じるひび割れは1/8"未満。		限定的な棒要素の座屈を含めた、いくつかの境界部の要素の損傷、打継目でのいくつかのずれ、開口部周辺の損傷、いくつかの圧壊と曲げひび割れ、連結梁の広範なせん断および曲げひび割れ、いくつかの圧壊。しかし、コンクリートは一般にその場に留まる。		大規模な曲げおよびせん断ひび割れと穿孔、打継目のずれ、広範な圧壊、開口部周辺の破壊、重大な拘束部材の損傷、連結桁の粉碎と事実上の分解。	
	二次	損傷はごくわずか。		壁の軽微なヘアクラック、打継目におけるいくつかの滑り跡、連結梁に生じるひび割れは1/8"未満、微小なかぶりの剥落。		大規模な曲げおよびせん断ひび割れ、打継目のずれ、広範な圧壊、開口部周辺の破壊、重大な拘束部材の損傷、連結桁の粉碎と事実上の分解。		板材の粉碎と事実上の分解。	
無補強石造壁	一次	損傷はごくわずか。		石造壁と化粧材の微小なひび割れ(<1/8")、1、2の角部の開口における化粧材の微小な剥落。		広範なひび割れといくつかの圧壊。しかし壁はその場に留まる。石材の落下はしない。開口部と角部における化粧材の広範な圧壊と剥落。		広範な亀裂と圧壊、表面材の部分的な落下。	
	二次	損傷はごくわずか。		第一次と同様。		第一次と同様。		広範な亀裂と圧壊、表面材の部分的な落下。	

Table 2-2c:性能レベルと許容される構造物の損傷－鉛直部材

部材	形式	性能レベル							
		10 完全な機能保持	9	8 機能保持	7	6 人命保護	5	4 崩壊寸前	3
URM 支持壁	一次	損傷はごくわずか。		石造壁と化粧材の微小なひび割れ(<1/8")、1、2の角部の開口における化粧材の微小な剥落。面外ずれは観察されない。		広範なひび割れ、石造壁の顕著な面内ずれと軽微な面外ずれ。		広範なひび割れ。表面材や化粧材の剥落、顕著な面内、面外ずれ。	
	二次	損傷はごくわずか。		第一次と同様。		第一次と同様。		第一次と同様。	
補強石造壁	一次	損傷はごくわずか。		微小なひび割れ(<1/8")。面外ずれは生じない。		壁を貫通する広範なひび割れ(<1/4")。いくつかの個別の圧壊。		圧壊、広範なひび割れ、開口部周りと角部の損傷、いくつかの石材の落下。	
	二次	損傷はごくわずか。		第一次と同様。		圧壊、広範なひび割れ、開口部周りと角部の損傷、いくつかの石材の落下。		板材の粉碎と事実上の分解。	
木張り壁	一次	損傷はごくわずか。		石膏やしっくい微小なヘアクラックの分布。		接合部の中程度のゆるみと部材の微小な分離。		接合部のゆるみ、釘の局所的な抜け、部材と板材のいくつかの分離、化粧材の破断。	
	二次	損傷はごくわずか。		第一次と同様。		接合部のゆるみ、釘の局所的な抜け、部材と板材のいくつかの分離。		外壁の剥がれ、内部補強材の割れと座屈、枠の分離と割れ。	
基礎	全般	損傷はごくわずか。		微小な沈下と無視し得る傾斜。		全体の沈下は6"未満、30ftごとの沈下の差分は1/2"未満。		大規模な沈下と傾斜	

Table 2-3:性能レベルと許容される構造物の損傷－水平部材

部材	性能レベル							
	10 完全な機能保持	9	8 機能保持	7	6 人命保護	5	4 崩壊寸前	3
鋼床版	損傷はごくわずか。		床版～骨組と床版材の間の連結部に損傷なし。微小な変形。		床版～骨組間やパネルどうしの溶接継手におけるいくつかの局所的な破壊、床版の微小な局部座屈。		いくつかのユニットの座屈をともなった大規模な変形、多くの溶接とシーム継手部の割れ。	
木床版	損傷はごくわずか。		締め金具の脱落や外壁、骨組の割れによるゆるみは観察されない。		いくつかの連結部の分離、外壁のゆるみ、締め金具の顕著なはずれ、骨組や外壁の割れ。		釘の部分的な抜けや板材の分離をともなう大規模な永久変形。	
コンクリート床版	損傷はごくわずか。		ヘアクラックの分布と、より大きい1、2箇所の微小なひび割れ(<1/8")。		広範なひび割れ(<1/4")と局所的な圧壊や剥離。		広範なひび割れと多くのひび割れを横切る顕著なずれ。	

Table 2-4:性能レベルと許容される損傷—建築部材

部材	性能レベル							
	10 完全な機能保持	9	8 機能保持	7	6 人命保護	5	4 崩壊寸前	3
外装材	損傷はごくわずか。		継手部の降伏、ある程度のひび割れまたは外装材のたわみ。		継手の重大な変形、外装材のひび割れの分散、たわみ、圧壊、粉砕、外装のある程度の破壊、パネルの落下は防がれる。		継手部と外装の重大な損傷、複数のパネルの落下。	
窓ガラス	一般的に損傷なし、独立したひび割れは可。		ある程度のガラスの割れ、落下物による災害は避ける。		広範囲なガラスの割れ、ある程度の落下物災害		一般的なガラスの粉砕と枠のゆがみ、広範囲な落下物災害。	
間仕切り	損傷はごくわずか、開口部にへアクラック。		開口部に 1/16"程度のひび割れ、角部の圧壊とひび割れ。		損傷の分散、複数の範囲における複数の重大なひび割れ、圧壊、破壊。		広範囲に及ぶ重大な破壊	
天井	一般に損傷はごくわずか、硬い天井では独立した吊りパネルのずれやひび割れ。		軽微な損傷、複数の吊り天井の裂け、パネルの落下、硬い天井の微小なひび割れ。		広範囲な損傷、吊り天井の落下、硬い天井の分散ひび割れ。		ほとんどの天井の損傷、ほとんどの吊り天井の落下、硬い天井の重大なひび割れ。	
照明建具	損傷はごくわずか、吊金具の変形。		軽微な損傷、ペンダントライトの損傷が生じる場合がある、落下物による災害は避ける。		多くの照明建具の損傷、特徴的な建具では落下物による災害は一般的には避ける (>±20 lbs)。		広範囲な損傷、落下物による災害の発生。	
扉	損傷はごくわずか。		軽微な損傷。		損傷の分散、障害物により扉が開閉不能となる場合がある。		損傷の分散、障害物により多くの扉が開閉不能。	
昇降装置	わずかな例外を除いて昇降装置は機能保持。		エレベーターは概ね機能保持、ほとんどは再始動可能。		複数のエレベーターが供用不可。		多くのエレベーターが供用不可。	

Table 2-5:性能レベルと許容される損傷—機械/電気/配管システム

部材	性能レベル							
	10 完全な機能保持	9	8 機能保持	7	6 人命保護	5	4 崩壊寸前	3
機械装置	損傷はごくわずか、すべてが供用可能。		軽微な損傷。本質的でない装置は機能しないものがある。		多くの装置が機能しない、滑動または転倒するものがある。		ほとんどの装置が機能しない、多くが滑動または転倒、複数のつり下げ装置の落下。	
ダクト	損傷はごくわずか。		軽微な損傷、しかしシステムは機能保持。		ダクトが破裂するものがある、支持部の損傷、しかしダクトは落下しない。		ほとんどのシステムが使用不能、ダクトが落下する場合がある。	
配管	損傷はごくわずか。		軽微な損傷。軽微な漏れは生じる。		継手においてパイプが破裂する場合がある、多くの支持部の落下、火災スプリンクラーの先端はほとんど落下しない。		多くのパイプの破裂、支持部の落下、配管システムが落下する場合がある。	
火災報知システム	機能すること。		機能すること。		機能しない。		機能しない。	
非常照明システム	機能すること。		機能すること。		機能すること。		機能しない。	
電気装置	損傷はごくわずか。		軽微な損傷、二次的なシステムにおいて絶縁機能の損失。		中規模の損傷、転倒に対しパネルは拘束されること、主要なシステムにおいて機能とサービスの停止が生じる場合がある。		広範囲な損傷とサービスの停止。	

Table 2-6:性能レベルと許容される損傷—付帯設備

部材	性能レベル							
	10 完全な機能保持	9	8 機能保持	7	6 人命保護	5	4 崩壊寸前	3
家具	影響はごくわずか。		軽微な損傷、滑動および転倒するものがある。		滑動、転倒、漏れ、破片の落下等による広範囲の損傷。		滑動、転倒、漏れ、破片の落下等による広範囲の損傷。	
事務用品	影響はごくわずか。		軽微な損傷、滑動および転倒するものがある。		滑動、転倒、漏れ、破片の落下等による広範囲の損傷。		滑動、転倒、漏れ、破片の落下等による広範囲の損傷。	
コンピューターシステム	機能すること。		軽微な損傷、滑動および転倒するものがある。ほとんどは機能する。		滑動、転倒、漏れ、破片の落下等による広範囲の損傷。		滑動、転倒、漏れ、破片の落下等による広範囲の損傷。	
ファイルキャビネット	損傷はごくわずか。		軽微な損傷、滑動および転倒するものがある。		滑動、転倒、漏れ、破片の落下等による広範囲の損傷。		滑動、転倒、漏れ、破片の落下等による広範囲の損傷。	
書棚	損傷はごくわずか。		軽微な損傷、転倒および本の飛び出しが生じる場合がある。		転倒、漏れ、破片の落下等による広範囲の損傷。		転倒、漏れ、破片の落下等による広範囲の損傷。	
特殊な棚およびキャビネット	損傷はごくわずか、転倒しない。		軽微な損傷、転倒しない、ファイルの飛び出しが生じる場合がある。		転倒、漏れ、破片の落下、溢れ等による広範囲の損傷。		転倒、漏れ、破片の落下、溢れ等による広範囲の損傷。	
美術品、蒐集品	軽微な損傷、転倒しない。		軽微な損傷、転倒しない、あるいは落下。		転倒、漏れ、破片の落下、水漏れ等による広範囲の損傷。		転倒、漏れ、破片の落下、水漏れ等による広範囲の損傷。	
危険物質	損傷はごくわずか、転倒および漏れは生じない。		損傷はごくわずか、転倒および漏れは生じない。		軽微の損傷；転倒と漏れは一般的に防止される。		重大な損傷、危険物質は放棄されるものがある。	

3. 性能工学における設計手法

3.1 概要

A. 設計手法の選択

性能工学の枠組みと方法論は、予測可能な耐震性能を有する構造物を実現するために必要な作業が包含されている。構造設計は、全体が工学的的方法論のステップの連続から成り立っている。設計を開始する前に、特定の性能目標を実現するのに適した、特定の設計手法を選択しなければならない。いくつかの改善可能な耐震設計手法が現存しており、性能設計に適用可能なように開発途上にあるその他の手法も存在している。それらのどの手法を用いても、選択された性能クライテリアに合致する構造物を設計することが可能となよう、一般的な方法論が構築されている。

性能設計は、第2章で示したような、概念設計、基本設計および最終設計のプロセスからなる。それは、建物の架構形式、構造システム、等級ごとの部材寸法と詳細、非構造部材などの選択を含んでいる。設計過程は、基準適合解析により補完される。設計手法と基準適合解析手法は、大体は独立に選択される。しかし、性能目標を達成する手法として、性能工学の文脈の中では一体のものである。

いくつかの実施可能な設計手法として、総合設計法、変位ベース設計法、エネルギーベース設計法、一般化された荷重・強度設計法、簡略化された荷重・強度設計法と規定型設計法を本章で要約している。これらの設計手法のより詳細な記述は、本報告書の付録と、引用された文献を参照されたい。これらの設計手法は、複雑さと適用性に違いがある。総合設計法と、変位ベース設計法、エネルギーベース設計法、一般化された荷重・強度設計法は、複雑で変則的な構造物を含む、すべての形式のプロジェクトに適用できる、より厳密で高度な手法である。簡略化された荷重・強度設計法は、適用が限定されるものの、単純で、より親しみやすい手法である。最後の2つの手法は、各々現在の耐震設計の方法を改善したものである。これらの可能な設計手法は、完全なリストを構成するわけではないが、複数ある一般的で有望な設計手法を代表するものである。

各々の開発された設計手法は、キャパシティデザインの哲学を反映して適用されるべきである。キャパシティデザインの要件は、2章で述べたように、特に概念設計と実施設計の段階で顕著に用いられることになる。

与えられたプロジェクトのための適切な設計手法は、性能目標などのファクターの数と、使用される構造システムの形式と複雑さによって選択する。一般に、低い性能クライテリアをもつ単純な建物は、単純な設計手法を使うことができる。性能目標をより多く要求する複雑な構造部は、一般に、より厳密な設計手法を必要とする。性能目標に対する設計手法と、構造システムや妥当性の照査との関係は、以下の節でより詳しく述べる。

B. 性能目標と設計手法の選択

設計手法の選択は、プロジェクトで選択された性能目標に対して、一貫したものでなければならない。性能クライテリアが多段階の設計と地震応答を精密に制御することを要求する場合、設計手法は、その要求に適合できるものでなければならない。

規定型設計法と簡略化された荷重・強度設計法は、本章で概要を述べる中では最も単純なものである。多くの建物にとって、それらは「通常の建物」に適合しており、いくつかの建物にとっては、「重要あるいは危険物を収容する施設」に合致している。

重要あるいは危険物を収容する施設、安全上重要となる施設、拡張された目的をもつ建物のような性能目標を要求する、他のより複雑な建物に対しては、一般化された荷重・強度設計法、総合設計法、エネルギーベース設計法を含む、より洗練された設計手法が用いられる必要がある。性能目標に対する多様な設計手法の実施可能な適用性は、Figure 3-1 に示されている。

C. 構造システムと設計手法の選択

設計手法の選択は、構造系の形式と複雑さに対しても、同様に一貫したものでなければならない。規定型設計法は、主に単純で標準的な、木造骨組や鋼管柱骨組のような軽量な骨組系で架構される構造物に適用するのがよい。現行の規準の保守的な工程により施工された建物も同様である。複雑で、変則的な構造系は、簡略化された荷重・強度設計法または一般化された荷重・強度設計法のような、より厳密な設計手法を必要とする。

D. 設計手法と妥当性解析の手順

各々の設計手法は、設計結果（妥当性クライテリアと、クリティカルな応答パラメータにより計測される）が性能目標に適合することを照査するための、基準適合解析を含んでいなければならない。規定型設計法は、応答パラメータが妥当かどうかを照査する必要がない例外的な手法である。規範的には、妥当性照査は必要性が生じた時点で行うべきであるが、独立して規範的に設計されたプロジェクトは、建築行政官により規準に適合していることが照査されたものと同等と見なされる。

他の設計手法は、クリティカルな応答パラメータのために正式な妥当性の照査が含まれている必要がある。これらの基準適合解析は、完全機能保持の性能レベルでは弾力的な応力と変形の照査により実施可能である。他の性能レベルでは、非線形挙動を考慮した非線形照査を行うことができる。簡略化された荷重・強度設計手法のような、より単純な設計手法は、非線形応答を安全側に推定・評価できる弾性照査が用いられる。妥当性解析手法は、第4章により詳細に述べる。

3.2 総合設計法

A. 概要

総合設計法は、その名のとおり、本報告書の中で最も汎用性のある耐震設計手法である。これは、ライフサイクルコストの最小化を考慮した確率的限界状態設計手法である。これは次のような概念により開発された。すべての建築物は少なくとも通常の建物の目標性能を満たすこと、さらに、理想的な耐震設計は、初期コストと地震時の損傷修復コストを含む、供用期間中のトータルコストが最小となるようにしなければならないという概念である。そこで、各地震動レベルにおける損傷影響を最小になるように設計を行う。ここで、4つの性能レベルの限界状態と、第2章で述べた概念的枠組に相当する4つの確率的地震動レベルを考慮する。

この手法は、建物構造系の汎用的な解析に基づいており、強度と変形の同時的な要求値と、それらが結合して、（構造および非構造部材を含む）建築構造系のエネルギーの要求値と許容値に及ぼす効果を計算する。

総合設計法は、どのような形式の建築物やどのような性能目標にも使用できるが、より簡単で実際的な設計手法をキャリブレーションするために用いるのがよいと考えられる。実設計では、変則的で複雑な、安全上重要となる構造物などを含む特殊なケースに使うことができる。

B. 方法論

総合設計の方法論は一般的な性能工学の方法論と同等である。そこには、Figure 3-2 に示すフローチャートの各段階での詳細な研究が含まれる。以下にその特徴を示す。

性能クライテリアの選択：総合設計法は、重要あるいは危険物を収容する施設や安全上重要となる施設または拡張された施設にのみ使用するのがよいが、どんな目標にも使うことができる。

用地適合性解析と設計地震動：計画されたプロジェクトに対する用地の危険度と適合度を特定するために、完全な用地解析が導入される。時刻歴、弾性応答スペクトルや非線形応答スペクトル、累積損傷係数は、継続時間の影響も含めた地震動のエネルギー量を考慮して決定される。

概念設計と基準適合照査：構造システムの選択、構造配置と構成、非構造システムの選択と配置は、2.4節にリストアップした耐震設計ガイドラインに従い注意深く考慮して行う。エネルギー概念と

エネルギー収支式には特別な配慮がなされる。

$$E_{\text{input}} = E_{\text{elastic}} + E_{\text{dissipated}} = (E_{\text{kinetic}} + E_{\text{strain}})_{\text{elastic}} + (E_{\text{damping}} + E_{\text{plastic}})_{\text{dissipated}}$$

概念設計の基準適合性は、第三者の検証で技術的完全性と経済的可能性が再照査される。

予備設計と基準適合解析照査：予備設計により必要な剛性が与えられる。設計手順は以下である。

1. 剛性と、損傷を制御するための周期 T_1 の概算
2. 必要な剛性に基づく初期寸法
3. 非線形スペクトルとすべてのクリティカルな荷重組み合わせを計算して、二段階設計（とくに完全な機能保持と人命保護クライテリア）における概算 T_1 を使った地震力の概算

限界応答パラメータの基準適合性は弾性動的、線形と非線形のプッシュオーバー解析法または非線形時刻歴解析等を、適切に使って照査する。パラメータの照査項目には変形、速度、トータル加速度強度、じん性率とエネルギー吸収量が含まれる。

非構造部材の予備設計：非構造部材は構造物の応答と結合した場合と結合しない場合（構造骨組みから分離された場合または組み込まれた場合）の両方で設計される。また非構造部材は構造解析モデルでは考慮される。

実施設計と基準適合照査：最終的な部材寸法と構造詳細は、エネルギー収支の概念をにより設計される。非構造部材の最終的な構造詳細と結合部の設計も行われる。基準適合性は最も適切な3次元非線形解析技術により照査される。設計者以外の者による精査を実施するのが好ましい。

品質保証：品質保証は、第三者による検証と設計図書の精査、設計専門家による施工の検査、専従技術者による試験、特別検査、施工品質管理が含まれる。

建築物維持管理：構造システムは、劣化と改築に対して守られるようメンテナンスされる。

C. 本設計手法の長所

総合設計の手法は、耐震設計上の問題のすべての重要事項を計算できる十分な手順を明示している。本手法に関する参考文献は、耐震設計上の問題に影響を及ぼす事柄について多くの参考となる情報を含んでいる。エネルギー均衡という概念は、設計とその細部で経済性を最適化できるよう、設計上の解に幅を与えている。また、この方法は性能目標に適合させることに対してかなり効果的であろう。本手法は、変則的な、特殊な、または重要な構造物に適用できるし、より簡単な設計方法を試みる際のキャリブレーションにも適用できる。

D. 本設計手法の短所

総合設計の手法を典型的な構造物の設計に対してそのまま用いることは、収集する必要のある情報と実行する必要のある解析が、広範囲で複雑であるため、現実的ではない。

E. 研究の必要性

総合設計法の研究の必要性は以下に要約され、付録Bでより詳細に議論されているが、性能設計における研究の必要性のすべての領域をカバーしている。

- ・以下を含む、信頼できる地震災害度のデータを開発すること：震源図、地震波伝導図、地震災害予測図、時刻歴波形の予測、地震被害額の予測、および多自由度系に適用するための一自由度スペクトルの調整。
- ・耐震性能においてクリティカルな応答パラメータの特定と、限界となる値の限定。
- ・より信頼できる荷重組み合わせ係数とその手法の開発。

- ・ねじり、高次モード、弱い階層に集中する要求じん性率の効果を説明するための、より信頼できる手法の開発。
- ・エネルギー概念とエネルギー均衡を考慮した、実施できる技術の開発。
- ・多様な材料および構造系のための、キャパシティデザインと構造詳細の設定方法の開発。すべての材料に関して、信頼できるじん性「ヒューズ」の構造詳細の開発。
- ・構造設計の応答予測の信頼度を増すための、基準適合解析の手順について改善を進めること。
- ・施工者・学術研究者・建築行政官および市民に、性能による耐震工学の目標、方法と意味について啓蒙すること。

F. 参考文献

Bertero, R.B., Bertero, V.V., *Tall Reinforced Concrete Buildings : Conceptual Earthquake-Resistant Design Methodology*, Earthquake Engineering Research Center Report No.EETRC-92/16, University of California, Berkeley, CA, 1992.

3.3 変位ベース設計法

A. 概要

変位ベース設計法は、変位または層間変位を制御することが構造物の性能を制御する鍵であると仮定し、耐震設計の出発点として、力ではなく変位を使用する。

従来の荷重ベースの耐震設計では、構造物は、低減された加速度応答とそれにより算出される荷重により、弾性的に設計される。変位または層間変位は、基準適合照査の一部としてその後に確認される。変位ベース設計法では、建物の設計を変位を制御するために行い、続いて荷重を照査することで、設計の過程が逆転している。この手法は、本節で簡潔に要約され、付録Cにてより詳しく議論される。

既設の建物を扱う場合、出発点としての構造物が既知であり、性能の指標が荷重ではなく変位あるという点が特に従来の設計と異なる。また、(耐震安全性が) 不十分な状態は、強度の代わりに剛性を付加することにより改善される。新設の建物については、初期の設計を決定するために構造部材を配分する根拠として、変位ベースのクライテリアを用いることができるが、この考え方は新しく、ほとんどの技術者にまだ知られていない。変位ベースの基準を備えた新しい構造設計に近づく 1 つの方法は、1994 年(Kowalsky-1994)に Kowalsky, Priestley および MacRae によって報告されている。この研究報告は一自由度系のコンクリート橋構造物を対象としている。これに続く研究は、多自由度系の構造物について進行中である。同手法は、変位が耐震性能の中で果たす重大な役割と、初期の一自由度系の手法について報告された成功を考えると、性能工学に適用するのに非常に有望である。より特別な仕様の建築構造物に対する代替手法は、付録Cに示される。

性能工学に適用する際は、変位ベース設計法は、選択された性能目標に適合する、目標となる終局、降伏および、サービスレベルごとの変位または層間変位を設定することにより始まる。目標変位は、予測される構造物の保有じん性率と一致する比率に調整するのがよい。実際の構造物を設計するために、等価剛性構造に対して、適切に減衰された弾性変位応答スペクトル (DRS) を用いる。減衰定数に対して調整された他のスペクトルも、選択された性能目標に対し適切な生起確率の地震動について設計するために、弾性範囲にある実際の構造物に使用する。

B. 方法論

変位ベース設計法で用いる方法論は、全面的に第2章で概説された総合設計法に類似している(実際の設計手法は荷重ベース設計法とは非常に異なる)。変位ベース設計法は以下のように要約することができる (Figure 3-3 を参照) :

性能クリテリアの選択 : 変位ベース設計法は、どの性能目標にも使用することができる。

用地適用性&地震動解析 : 完全な用地と地震危険度解析が行われる。弾性変位応答スペクトル(DRS)

は、想定される地震動に合わせて算出される。

概念設計と基準適合照査：構造部材と非構造部材を選択し、キャパシティデザインで用いられるじん性ヒューズとともに配置する。目標変位あるいは層間変位を含む初期のパラメータは、構造系における性能目標と減衰定数との関係により明確にされる。予測された変位は、適切な変位応答スペクトルにより照査される。

予備設計：部材寸法は、構造系の非弾性的な応答をモデル化するために、等価線形構造物を用いた目標変位から算出される。

1. 等価剛性構造物で用いる等価剛性の決定。
2. 算出された変位に基づいた設計荷重の決定。
3. 降伏耐力と鉛直荷重による部材の設計。
4. 仮定された弾性および終局変位と、要求じん性率の再照査（必要であれば再度設計を繰り返す）。

基準適合照査：設計手順では、変位、弾性応力およびじん性率を内部照査する。付加的な他の性能レベルおよび特別な危険度レベルでは、基準適合照査が必要になるだろう。

最終設計と基準適合照査：キャパシティデザインに従い、構造詳細を決定する。設計を確認するために性能の適合度を照査する。

品質保証と建築物の維持管理：一般的な方法論と同様。

C. 本設計手法の長所

変位ベース設計法は、構造物の塑性域での応答変位に直接焦点を当てていることから、荷重ベース設計法に対して、いくつかの有位性がある。

1. 構造物の被害度や性能の指標としては、荷重よりも層間変位の方が直観的に良く表現されており、設計の基礎である。
2. 非構造物や構造物の被害度は、変位層間を制御することでほぼ制御することができる。選定された性能レベルに対応する変位制限値は、設計目標となりうる。
3. 塑性変形とその結果から発生する構造被害度をよりよく制御することができる。
4. 要求じん性を直接的に見積もれる。また、構造詳細に対するよりよい基礎を与える。
5. P- Δ 効果を直接的に計算できる。
6. 層間変位によって発生する隣接構造物間の衝突を制御することができる。
7. 変位ベース設計法は、非線形応答と要求じん性に対する直接的な洞察と制御による耐震設計に、統一的で、合理的で、簡単な手法を提供する。

D. 本設計手法の短所

本手法の現時点での短所は、多自由度系に対する手法が開発されていないことである。ポイントは多自由度系に関する実用的な等価減衰の算定式を確立することにある。また、その適用に関して追加検討が必要である。

E. 研究の必要性

変位ベース設計法の開発には、次に示す研究が必要とされる。

- ・多自由度系への適用手順
- ・コンクリートせん断壁、木製の骨組やその他の構造系に対する設計手法
- ・実際の地震時の応答記録がある建築物による、設計方法のキャリブレーション
- ・多自由度系、様々な構造系、構造/非構造部材の結合に対する、実用的な等価減衰と等価周期との関係の研究

F. 参考文献

Kowalsky M.J., Priestley M.J.N., and MacRae G.A., *Displacement-Based Design*, Structural Systems Reserch Project Report No.SSRP-94/16, University of California, San Diego, 1994.

Qi, X., and Moehle, J.P., *Displacement Design Approach for Reinforced Concrete Structures Subjected to Earthquakes*, Report No. EERC91/02, University of California, Berkeley, 1991.

3.4 エネルギーベース設計法

A. 概要

エネルギーベース設計法は、損傷が全入力エネルギーに直接関連するという前提に基づくものである。地震動が特定の構造物および付属物を損傷させるポテンシャルは、その構造物に対する入力エネルギーおよびその構造物のもつエネルギー逸散性能に密接に関連すると推定される。

エネルギー入力、地震動の有効速度と継続時間、および地震動と構造物の相互作用の関数である。速度および継続時間は、設計で一般に用いられている加速度応答スペクトルでは考慮されていない。エネルギー的手法は、継続時間の効果、構造物の異なる周期での地震動のエネルギー量、繰り返し応答の間の構造系の劣化などをすべて考慮することができる。

エネルギーベース設計法では、まず、入力エネルギーあるいは要求性能を評価し、種々の周波数における想定される設計地震を評価する。そして、期待される要求性能よりも大きいエネルギー吸収あるいは逸散性能を持つように構造物は設計される。このような手法は、Housner により 1956 年に提案されたもので、近年特に注目を集めている。エネルギー的手法を用いるためには、設計地震動のもつエネルギー要求性能の評価、個々の構造要素へのエネルギー要求性能の分配、異なる要求性能レベルに対する、繰り返し履歴応答を呈する構造要素のエネルギー逸散性能の定量化などの方法を開発することが必要である。

設計に用いられる一般的なエネルギー式は次式で与えられる：

$$E_{input} = E_{elastic} + E_{dissipated} = (E_{kinetic} + E_{strain}) + (E_{damping} + E_{hysteretic})$$

入力エネルギーの絶対値は、基礎が変位する間に作用する、基礎部で構造物に作用する力によってなされる仕事である。構造物のエネルギー性能は、弾性エネルギー性能および、減衰および繰り返し塑性履歴応答に関連するエネルギー逸散性能の和で表わされる。

強い地震動を受ける可能性の高い地域においては、ほんのわずかな弾性応答の間に入力エネルギーを吸収するように構造物を設計することは経済的ではないため、塑性履歴挙動および減衰挙動を通じてエネルギーを散逸させるように耐震設計するべきである。十分なエネルギー逸散性能(繰り返し応答履歴)を有するじん性要素を利用することにより、塑性履歴挙動が構造物に取込まれる。じん性性能が限定されており、履歴挙動が構造系に劣化および損傷を生ずる場合には、ある種の構造物に対して魅力ある設計戦略として、エネルギー逸散装置を有効に利用することが、エネルギー的手法により示唆される。

B. 方法論

エネルギーベース設計法の概念的な方法論は、以下のようまとめることができる (Figure3-4 を参照)。

性能目標の選択：エネルギー手法はいかなる性能目標に対しても用いることができる。

用地適合性解析および設計地震動：用地の適合性は 2.3 節により解析される。使用性設計に対しては弾性設計スペクトルが展開される。非線形応答を含む他の性能設計に対しては、各構造要素のエネルギーを追跡評価するために時刻歴応答が算定され、エネルギー要求性能と比較される。

概念設計および基準適合照査：2.4 節に概説した方法で概念設計がなされる。エネルギー性能は弾性、履歴、減衰系に対して定性的に配分される。塑性変形および減衰性能によるエネルギー逸散が非線形エネルギー要求性能と平衡するように各々の系は選択され配置される。

予備設計および基準適合照査：最終設計および構造詳細において明確となる性能と適合しつつ、弾性性能が完全な機能保持レベルの要求性能を満足するように、構造物の形状配置が決定される。層間変位応答、強度要求性能、エネルギー要求性能は、性能目標の基準適合性が照査される。基準適合解析の手順には、完全な機能保持設計に対しては弾性解析 (弾性応答) が含まれ、他の性能レベルに対しては 3 次元非線形時刻歴応答解析 (非線形応答) が含まれる。

最終設計および基準適合照査：履歴エネルギー性能が履歴エネルギー要求性能を超えるように、じん性要素の構造詳細は決定される。エネルギー逸散減衰装置は、もし利用する場合には、その性能が減衰要求性能を超えるようにその構造詳細が決定される。

性能保証および維持管理：第 2 章に述べられた一般的な方法論と同様、エネルギー逸散装置を利用する場合には長期のメンテナンスが、特に必要であることに注意する必要がある。

C. 本設計手法の長所

エネルギーベース設計法では、期待される地震動のエネルギースペクトルおよび継続時間を含んで、損傷可能性を直接的に考慮することができる。構造要素の履歴挙動における劣化も考慮できることから、構造物に関する非線形要求性能を概念的によく理解する設計技術者を社会に提供することになる。性能規定型耐震設計および損傷制御に対して、将来有望な技術であるエネルギー逸散装置および免震技術の使用を認めることにつながる。

D. 本設計手法の短所

現時点では、エネルギーベース設計法は完全には開発されていないので、その実用性は未知である。以下に述べるようにエネルギー要求性能、特にエネルギー式のエネルギー性能に関する各項についてさらなる研究が必要である。実用的で効果的な設計手法が開発されるべきである。

E. 研究の必要性

エネルギーベース設計法に対する研究の必要性は、総合設計法に対するものと同様であるが、以下の領域において特に研究が必要とされる。

- ・地震動の構造物に対するエネルギー要求性能、および構造要素へのエネルギー要求性能の分配を予測する方法。
- ・信頼性のあるエネルギー性能および予測可能な履歴エネルギー逸散挙動をもつ要素を創造するための、信頼性の高い構造詳細決定方法の開発。

F. 参考文献

Blume, John A., *Elements of a Dynamic-Inelastic Design Code*, Proceedings of the Fifth World

3.5 一般的な荷重・強度設計法

A. 概要

荷重と強度に基づく手法には、今日もっとも共通に用いられている耐震設計手法が含まれる。この手法は Uniform Building Code、NEHRP およびその他の現行のモデルとなっている基準で用いられている。荷重・強度に基づく手法では、基部での横方向せん断力の最小値を決定し、静的あるいは動的な手法で建築物の高さ方向にわたってそれを分布させ、それによって発生する部材力に抵抗するのに十分な強度を持つ部材を設計し、十分なじん性をもつ鍵となる構造要素の詳細を決定する。

現在の設計基準で採用されている手法では、地震危険度を記述するために弾性応答スペクトルが通常用いられている。そして、構造物の非線形挙動を呈する性能を考慮するために、R 値により弾性応答スペクトルに基づいて算出される荷重を低減する。したがって、これらの低減された地震荷重とその他の荷重条件を組み合わせて作用応力（または降伏応力）レベルで構造設計はなされる。現在の設計手法では、50 年間での超過確率が 10% となる単一の地震レベルに対する計算のみが要求される。この強度設計では、現在の基準で要求されているシステム限界、構造詳細に関する要求、および品質保証目標と結びついて、基準内で記述されている性能要求が求められる（この性能は 2 章で定義された標準目標と同様のものである）。この手法は、横方向荷重に対して十分余裕をもって抵抗できる構造系として設計された、通常の構造物に対して性能目標を達成するために効果的である。

概念的な枠組みにおける課題に関する見通しを提示するために、現在の手法を修正して性能工学の最終目標に到達するよう、一般化された荷重・強度手法は拡張することができる。この手法には、以下のような修正項目が示されている。

- ・性能設計の概念を陽な形で組み込むこと
- ・適切な設計様式において、本書の 2.2 節で特定された 4 つの設計イベントを反映するように地震動特性を改良すること
- ・すべての範囲の性能目標を提示するために必要な多段階設計を導入すること
- ・非線形応答を予測し、非線形時刻歴、非線形応答スペクトルを用いる非線形設計法を包含すること（使用性設計のみが弾性となる）
- ・弾性および非線形応答の両者について適用可能性に関する基準を確立すること、および、設計手順に適用可能性解析を含めること
- ・設計範囲に、非構造要素の設計を含めること
- ・設計と施工における品質管理を改善すること
- ・構造物の寿命にわたって構造物のメンテナンスを行う手法を改良すること

一般的な荷重・強度設計法に関するより詳細な議論と手法の改良については、付録 E に収録している。

B. 方法論

改良された一般化荷重と強度に基づく手法のための方法論は Figure 3-5 に示されている。この方法は、2 章で議論された、一般化された性能工学の方法論と、以下のように比較しうる。

性能目標の選択：どのような性能目標を選択しても、一般化された荷重・強度手法を用いることができる。しかし、基準適合照査を実行するために弾性解析を組み込んでいるため、一部の構造形式に対して安全側に適用可能となるように、その結果をキャリプレートしなければならない。そうでない場合、大きな非線形要求性能が必要となる場合や、一部に非線形挙動が集中するような構造物には使用が限定される可能性がある。

用地適合性解析および設計地震動：弾性および非線形応答スペクトルを用いて、おのこの性能目標に対して完全な用地適合性解析を実施するとともに、用いる地震動の特性を決定しなければならない。

概念設計：一般化された荷重・強度手法は、2.4 節で述べた適切な耐震設計のためのガイドラインに適用できるように、ある種の骨組構造系に対して用いることができる。じん性“ヒューズ”システムにより非線形応答を制御するためには、キャパシティデザインの原理が適用されるべきである。

予備設計と基準適合照査：修正震度法と強度設計を用いて、完全な機能保持設計あるいは人命保護などのすべての性能目標を考慮する。

最終設計と基準適合照査：設計を完遂して構造詳細を決定し、適切な基準適合度の評価方法を用いてすべての設計目標を照査する。詳細設計はキャパシティデザインの原理に従わなければならない。

設計精査、性能保証および維持管理：一般化された方法論と同様

C. 本設計手法の長所

一般化された荷重・強度設計法の主な長所は、実務に携わる技術者が慣れ親しんでいること、および適用の容易さである。上記の概要を修正・改良することで、本手法は性能工学に適合することができる。キャパシティデザインの原理を用いることにより、概念の明確さと詳細設計の信頼性を改善することができる。単純な非線形の基準適合解析の手順により、構造物の非線形応答に対する理解を深め、同時に適確に制御することが可能となる。

D. 本設計手法の短所

現在用いられている荷重・強度による方法は、しばしば概念的に耐震設計を単純化しすぎることになり、構造要素を複雑にしすぎる。現在の方法は、線形弾性挙動に基づいており、また、構造形式にのみ依存する R 値という単純化したパラメータを通して、非線形挙動を考慮している。また、現在の方法は、すべての性能目標を達成するように述べているのにもかかわらず、直接的にはただひとつの性能レベルを提示しているのみである。

修正・拡張された一般化された荷重・強度設計法は、これらの限界に対して適用され、拡張されなければならない。

E. 研究の必要性

一般化された荷重・強度設計法に対する研究の必要性は、3.2 節で概要を述べた総合設計法に関するものと同等である。一般化された荷重・強度設計法について、特に以下の諸点についての研究がきわめて重要である。

- ・信頼性のある弾性および非弾性強度と変位応答スペクトルを開発すること。
- ・強度、荷重レベル、エネルギー消費、繰り返し降伏効果を考慮するように R 値を修正すること。
- ・ねじりと構造的な不連続による、じん性要求値の影響に関する研究。

3.6 簡略化された荷重・強度設計法

A. 概要

現行基準に近い荷重・強度設計法が、よくある相対的に単純な建築物の性能照設計のために開発されうる。そういった簡略化手法は簡便な数値解析によるべきであり、その適用性に関しては厳格な制約基準によりバックアップされるべきである。構造物の形状や大きさ、死荷重に乗じる地震荷重係数、構造詳細、非構造系、基礎形式、現場条件に関して制約条件は決められる。この手法は、基準に合致する建築物のすべての性能目標に適用可能となる。列挙されたような制約のもとでも、簡略化された手法が広範な標準的な建築物に適用できるものと予想される。

同様な簡略化手法が効果的であることが、アルゼンチンのサン・フワン市のケースで明らかになった。サン・フワン市は 1944 年に地震による被害を受け、簡便な基準に基づき再建された。1977 年に同様の地震が

起きたが、重大な損傷は受けなかった。

B. 方法論

簡略化された荷重・強度設計法は、Figure 3-6 のフローチャートに説明されている。また、その方法の詳細は付録 F に展開されている。その手法は現行基準の方法の拡張であるべきである。3.5 節で示した一般化された荷重・強度設計法と比較すると、主要な拡張として以下のものを含むべきである。

1. 予備／最終設計では、線形弾性解析を用いて人命保護の目標とすべきである。その方法の適用は、人命保護が設計を支配し、弾性応答が非線形応答のよい指標を与えると推定できる建物や現場に制限されるだろう。弾性応答から非線形応答を推定する方法を開発し、単純な手順に組み込むべきである。
2. 予備／最終設計のために基準適合照査を定義することは必要ないだろう。
3. 拡張された数値設計手順は現行の UBC あるいは NEHRP 条項の荷重・強度設計法に基づくべきである。それらは許容応力度設計よりむしろ強度設計を用いたり、3.5 節で論じた修正係数 R を用いている。

C. 本設計手法の長所

本設計手法の主な長所は、馴染み深いということと相対的に使用し易いということである。この手法は現行の手法によく似ており、適当に拡張することによって容易に実施できる。この手法は現行の手法に対していくつかの改良点が見られる。

それらの改良点には、

- ・キャパシティデザインの原理を明確に採用。
- ・概念設計や最終構造詳細への改良されたガイドライン。
- ・より現実的な信頼できる強度と変位応答スペクトル。
- ・よりよい実荷重の組み合わせへのガイドライン。
- ・施工における品質管理にたいする要求の改善。

簡略化された荷重・強度設計法は現行の手法を改良することにより、さらに効果的な性能工学に達することが可能である。

D. 本設計手法の短所

簡略化された荷重・強度設計法は、すべての建物あるいはすべての性能目標には適用できない。そこでは本手法により不必要な保守主義に至ることがあり、より洗練された手法が必要である。現行基準を発展させる際も、設計概念や設計プロセスを明確にすることなく、付加的な仕様要求で覆われてしまう結果になる恐れがある。

E. 研究の必要性

研究の必要性は、根本的には一般化された荷重・強度設計法と同じであるが、設計や基準適合性の照査手順における簡略化のために次に示す研究や開発が特に必要とされる。

- ・建物の形式、形状や現場条件に基づく適用可能性における制限。
- ・強度や変位の信頼できる弾性や非線形応答。
- ・地震動の持続効果を包含する簡便な手法。
- ・非線形挙動に適合させるよう、キャパシティデザインによるガイドラインの詳細化。

3.7 規定型設計法

A. 概要

現在、建設されている多くの小規模の居住ビルや商業ビルは、工学に基づく解析や設計を行わずに、規定型設計基準、例えば簡便な建築設計コードが一般に適用されている。近年、これらの規定型設計基準が比較

の大規模で複雑な構造物にも適用されており、絶えずに発生する地震に対し多様な要求に応えてきた。規定型設計手法の応用を広げるためには、工学的性能目標に合致した規定型設計基準の改良と開発が不可欠である。

提案された規定型設計法は、最も簡単に扱える性能型の設計手法となるべきであるが、設計においては最も厳しく制限のある手法である。規定型の概念は、簡単に扱える一連の独特な詳細仕様を開発し、技術者なしで基本的な性能目標を満足する単純な建築物の設計ができること。この手法は小規模、軽量、標準的な建物に限って適用できるが、構造システム、配置と構成、品質管理とその細目などの選定においてその制限を明記する。また、水平抵抗部材の寸法や間隔を決定する際には、詳細な事項が記載されたガイドラインを備え付けること。また、すべての荷重が確実に基礎へ伝達するように、せん断抵抗部材、アンカレジ、荷重の集中している部材に関しては、事前に検証されている細目を記載すること。設計上の不確実性を補うために、余裕のあるシステム構築や安全側をみた要求事項の決定も必要となる。計画照査や施工監理における建築管理者が行った品質保証にも強く依存する。

改良した規定型設計法は、各種単純な建物の耐震設計やアンカレジのような非構造部材への適用も可能である。

B. 方法論

一般的な性能型設計法に比べて規定型設計法は Figure 3-7 に示したように非常に単純化されている。その要点を以下に示す。

性能目標：基本的目標しか選択できない。

地域と地震危険度分析：地域または地区で区分し、地震区域のみが考慮される。

設計：規定型要求と細目は設計図や設計書に明記する。

品質管理と検査：建物管理者が要求仕様に合致か計画との照合や施工監理を実施。

建物の維持管理：建物管理者が建物の建て替えや改築のチェックを判断。

C. 本設計手法の長所

規定型設計法は専門知識や直接工学的な判断が必要とされず、小規模でかつ単純な建物の耐震設計のための簡単なガイドラインを提供するとともに、技術者なしで多くの建築物を建設するために合理的な耐震設計を行う。効率的な設計の推進と計画照査および基準の確実性の向上のため、ガイドラインには関連事項を詳細に記載する。

D. 本設計手法の短所

規定型設計法の短所については、視点が狭い、効率的なガイドラインの構築が困難、建物管理者の主観的な判断に強く依存するため、受け入れ検査や品質管理などが専従者に限られるなどが挙げられる。また、この手法は、簡単な建物に限定されるため適用範囲も狭い。分かり易いガイドラインの構築は困難であり、構造物の形状、不規則性、オフセット、不連続性などの千差万別な構造的な特徴を網羅するには限りがある。当設計手法の有効性も要求仕様の建物管理者の解釈や主張に強く依存する。個別設計、専従者の関与、施工監理などが実施しないと、建物管理者が重い馬車に乗っているように上手く進まない。

E. 研究の必要性

荷重・変形の挙動の決定や単独部材と組立構造の性能特性などの要求仕様を作成するためには、研究や力学的な検証が必要であり、具体的には以下のようなものである。

- ・木材や金属を用いた組立骨組構造、せん断壁、開口せん断壁、多層せん断壁

- ・土台、hold downs、シーズの形式、シェア・コネクター、新材料などの要素実験
- ・現場製作の製品、乾燥収縮、老朽化などの環境条件への対応
- ・過去の地震で経験した類似構造システムの性能の検証

過去に行われた代表的な構造物の詳細設計は、最小限の要求仕様の決定にも有効である。

		性能レベル			
		完全な機能保持	機能保持	人命保護	ほぼ崩壊
地震再現期間	ときどきの (43年)	CD, DB, EB FS, FS/S, PD			許容できない性能 (新設構造物に対して)
	たまの (72年)	CD, DB, EB FS, FS/S	CD, DB, EB FS, FS/S, PD		
	まれな (475年)	CD, DB, EB FS	CD, DB, EB FS, FS/S	CD, DB, EB FS, FS/S, PD	
	非常にまれな (970年)		CD, DB, EB FS	CD, DB, EB FS, FS/S	CD, DB, EB FS, FS/S, PD

注釈：	
CD - 総合設計法	FS - 一般化された荷重・強度設計法
DB - 変位ベース設計法	FS/S - 簡略化された荷重・強度設計法
EB - エネルギーベース設計法	PD - 規定型設計法

Figure 3-1: 設計法による性能目標

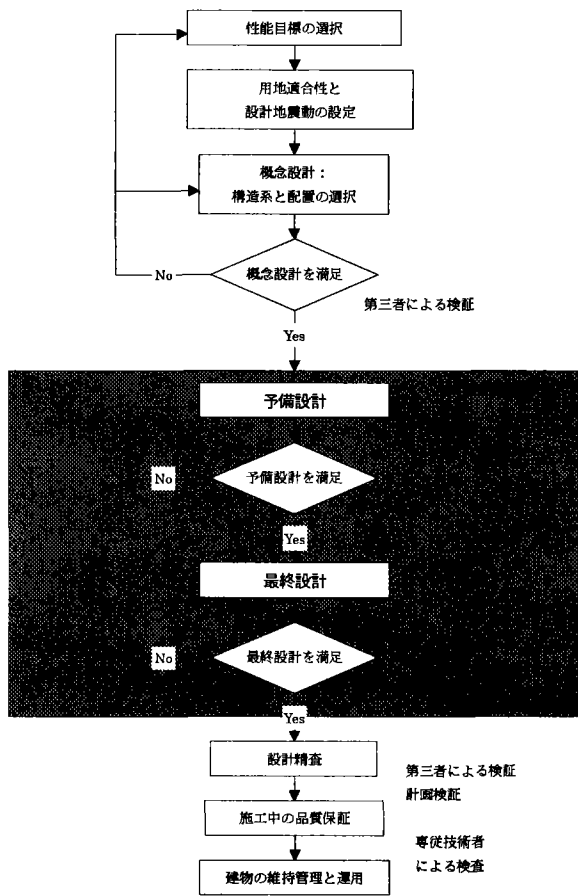


Figure 3-2: 総合設計法の方法論

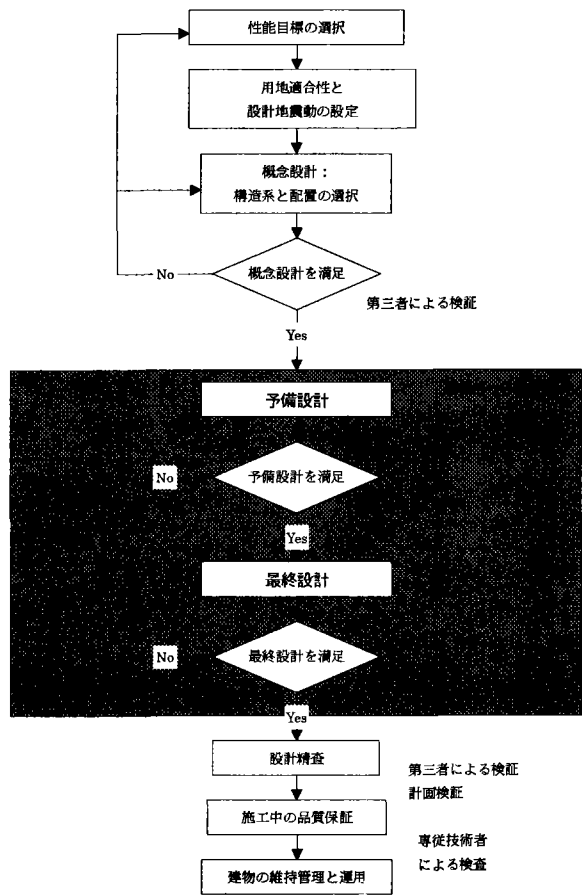


Figure 3-3: 変位ベース設計法の方法論

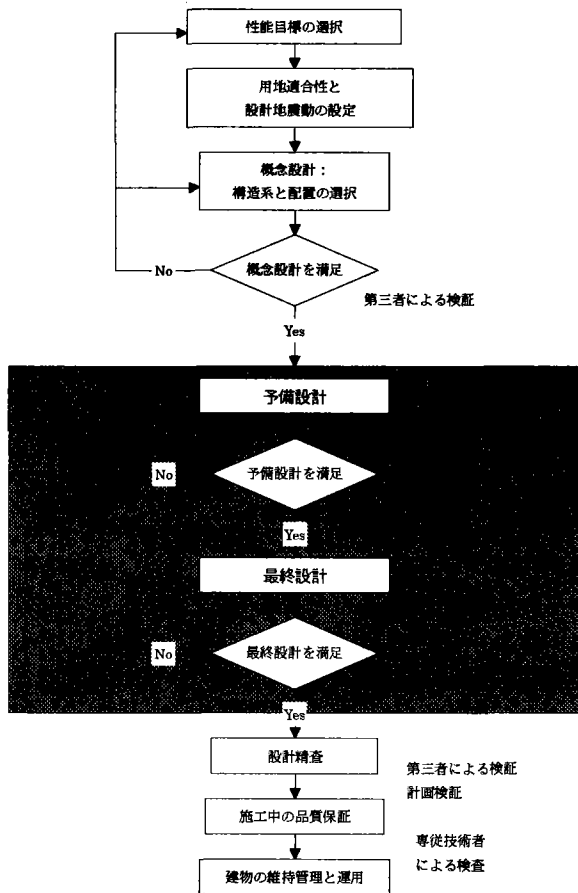


Figure 3-4: エネルギーベース設計法の方法論

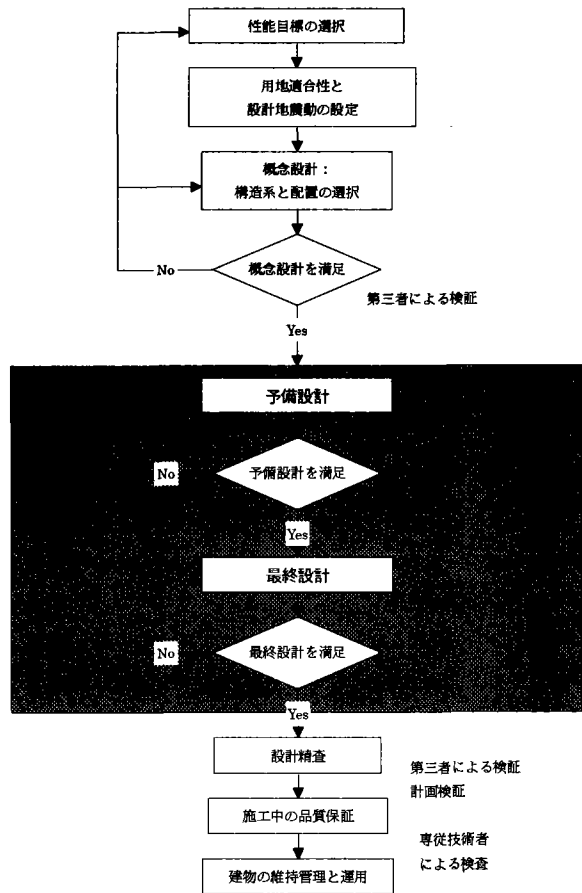


Figure 3-5: 一般化された荷重・強度設計法の方法論

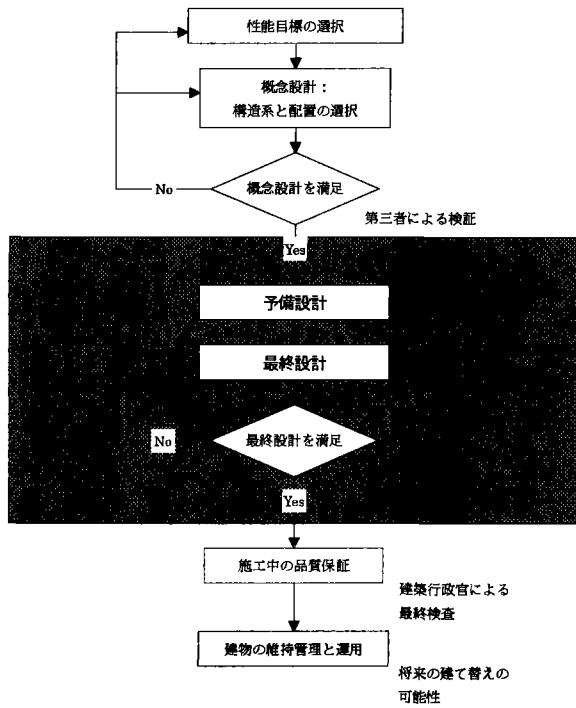


Figure 3-6:簡略化された荷重・強度設計法の方法論

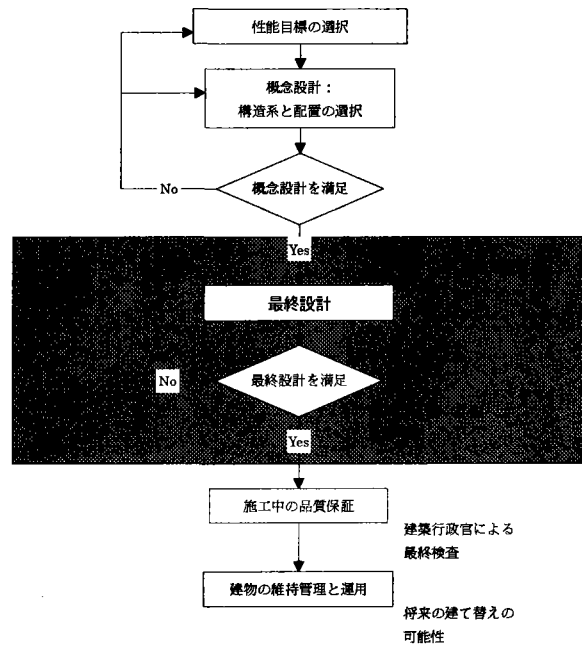


Figure 3-7:規定型設計法の方法論

4. 性能設計における基準適合解析

4.1 概要

性能工学の方法論において、耐震設計の照査のための重要な段階は、基準適合解析である。設計手法では、一つ以上の設計地震動における強度、変位、またはエネルギー吸収能力を求めることが一般的である。基準適合解析は、設計の妥当性を照査するために用いられる。設計目標および適合基準が満たされていることを照査するためには、構造設計を実施し、限界応答パラメーターを選定性能水準に対応するパラメーターの限界値と比較する。

各種の構造応答パラメーターの限界値が設計の適合基準を構成する。応答パラメーターは、構造応答の尺度であり、損傷水準と相関させることができ、したがって性能目標と相関させることができる。もっとも重要なパラメーターとしては、層間変位、変位、応力ひずみ比、じん性、消費エネルギー、加速度がある。一部のパラメーターについては限界値を本報告書に提示した。さまざまな構成材について適当なパラメーターを明確にし、設計解析に用いる性能水準別の限界値を定めるためには、この領域におけるさらなる研究と試験が必要である。

性能設計に適用できるいくつかの基準適合解析手法を本章にまとめて示す。これには、弾性解析法、部材照査型弾性解析法、キャパシテスペクトル法、プッシュオーバー解析法、簡易解析法、動的非線形時刻歴解析法、層間変位要求スペクトル法が含まれる。これらの手法は第3章に示す設計手法に用いることができ、それぞれ該当する構造系で用いられる。しかし、設計手法、構造系、選定性能目標によって適切な解析手法が異なることがある。たとえば、規定型設計法はこうした解析を必要としないが、安全性限界性能目標を選定するためには動的非線形時刻歴解析手法の適用が必要かもしれない。

提案されている解析手法を以下の節にまとめる。詳細な考察は付録に含まれており、一部の方法については参考文献を列挙する。これらの解析手法やそれに代わる方法の開発および改良については、将来の指針策定活動で取り組むことになろう。

4.2 弾性解析法

A. 概要

現在の大部分の耐震設計規定や耐震設計手法は弾性解析手法に基づいている。この手法は、震度法、応答スペクトル法、モード解析法そして弾性時刻歴解析の中で使われる静的および動的解析の手法を含んでいる。こうした方法は耐震工学の文献に詳細に書かれており、一般的によく理解され、広く使われている。

一般的に弾性解析手法は、モデル化が適切であり、地震動が正しく表されていると仮定すれば、構造物の弾性応答に関して非常に正確な情報を与えることができる。一般的に弾性応答域にある「完全な機能保持」の性能レベルのためには、弾性手法は適切な解析結果を与える。

その他の性能レベルにおいて塑性応答が許容される場合、弾性解析手法は注意して使わなければならない。現在の設計手法は、理想化された弾性応答から予期された塑性応答を外挿するために様々なR値や他の係数を使用する。このやり方は「ほぼ崩壊」や「人命保護」といった目標に適用するのにかなり成功している。塑性部材を正しく表現した構造物では弾性解析を使って、容認できる信頼性のレベルで、基本的な安定性目標を達成させることができる。しかしながら、設計の信頼性を改善させたり、損傷を限定した中間的な性能目標を達成させるためには、より優れた解析手段が必要である。弾性手法では構造物の塑性応答を直接的に解析したり、設計の妥当性を十分に評価するために塑性応答値を評価することはできない。

B. 本手法の長所

1. 弾性解析手法はよく知られていて、使いやすい。
2. 「完全な機能保持」の性能目標のためには有効な手法であり、荷重係数を用いることで、その他のレベルにおいてもある程度有効である。

3. 3次元動的解析では、ねじり応答や不規則な構造物の応答に対して、ある程度の洞察が得られる。

C. 本手法の短所

1. 弾性手法、特に動的手法の使用では、地震応答の塑性的な性質の理解を不明瞭にする事があり、数値解析に対する誤った信頼性を導く可能性がある。
2. 弾性モードの重ね合わせや時刻歴解析手法は、塑性応答や構造物の不規則性が大きくなればなるほど、妥当性が失われる。
3. 弾性応答から外挿した要素の使用は、かなりの不確実性を導入することから、性能設計の信頼性を制限してしまう。

D. 研究の必要性

- ・弾性応答から塑性応答を推定するための改善された解析方法と要素の開発。
- ・性能設計における弾性解析の適用についての適切な制限の開発。

E. 参考文献

SEAOC, *Recommended Lateral Force Requirements and Commentary*, 1990.

4.3 部材に基づく弾性解析手法

A. 概要

部材に基づく弾性解析手法は、現在の規準の基礎である線形解析手法の拡張である。それらは、部材毎を基礎とした要求じん性率の指標として適用できる。これらの手法は、重要な建築物のための Tri-Service マニュアル、エネルギー施設と中～高程度の危険物収容施設のための設計・評価ガイドラインに含まれる近年の耐震設計規準に採用されている。この手法の形式は、ATC-33 プロジェクト“建築物の耐震補強のためのガイドラインと解説”に採用される予定である。

基本的な手法は構造物の弾性解析を実施することである。地震動の入力は、非線形応答スペクトル、または非線形挙動の効果を見積るために係数倍された標準的な弾性応答スペクトルにより表される。解析的な研究に基づき、この解析により予測される構造物全体の変位が、現実の構造物の設計地震に対する応答で期待される変位を表しているということが前提となる。じん性挙動を示すために適切に詳細を決められた構造物の能力により、弾性解析により予測される個々の部材の応力は、実際の値より大きくなることが認められている。キャパシティに対する要求比は時に非弾性要求比 (IDRs) と呼ばれ、個々の要素における降伏キャパシティの弾性解析による要求強度の比として計算される。これらの比は、構造物の各種要素の設計地震により提示される要求じん性率の指標として採用される。IDRs の許容値は、提供される詳細設計の品質、全体的な構造的安定性に対する個々の部材の重要度、そして、研究機関での試験データにより実証された、大きな非弾性要求に抵抗する部材の能力に基づき定義される。

B. 本手法の長所

部材に基づく弾性解析手法は、大変簡便に使い、特に、全体の非弾性要求が適度であり構造物全般に分配されているなら、構造物の非弾性要求について推察できる。もし IDRs の現実的な許容値が設定されたなら、手法は使いやすく効果的になる。

C. 本手法の短所

部材に基づく弾性解析手法は、特に、構造物が一様でない強度と剛性の分布をしている場合、または、ねじれに対する不整から非弾性時に柔らかい層が進展する傾向がある場合、非弾性要求について実際の分布についてよい指標を提供できない。IDR 値に非弾性変形要求とその結果生じる個々の構造部材の挙動を関連させる直接的な方法がない。

D. 研究の必要性

さらに、以下の分野での研究が必要とされる：

- ・IDRs の現実的な許容値の設定、そして IDR 限界とこの報告書で確認された性能レベルを関連させること。
- ・本手法が妥当であるとされる、構造の規格、荷重、応答の条件の定義。

4.4 耐力スペクトル解析法

A. 概要

耐力スペクトル解析法は、支配的な地震時の地盤の動きに対する応答スペクトルの要求と、構造物の非弾性キャパシティを比較する方法である。構造物の非弾性応答は、構造物が連続的に軟化してゆく特徴がある。その剛性が低減すると、単調に増加する横荷重の応答に対して基本的な周期は長くなり、構造物に要求される強度は、より長い周期の構造系のための応答スペクトルの下降勾配に示されたように低下する。図解で説明されているように、その構造物が安定した状態で、増加する非弾性キャパシティがいったん減少する非弾性要求を越えている間は、構造設計が許容できると考えられる。

1985年の Tri-Service マニュアルは、耐力スペクトル曲線を描くことができ、応答スペクトル要求曲線と直接比較できる、耐力スペクトル法のあらましが述べられている。耐力スペクトルは、加速度と基本周期により描かれた、荷重-変位のプッシュオーバー曲線である。構造物は降伏点まで固定された基本周期により弾性的に対応する。その後、構造物はより大きな加速度により非弾性的に対応すると、構造物が柔軟性を持ち、周期が長くなった耐力スペクトル曲線が作画される。基準適合照査の方法としては、作画された耐力スペクトル曲線が、10%から20%まで減衰された構造物の非常にまれな地震に対する要求曲線と比較される。もし、耐力曲線が要求曲線と交差すれば、その設計は許容可能と判断される。その曲線が交差しなければ、構造物は人命保護や崩壊の観点より許容できない。

B. 本手法の長所

弾性法に比べ、耐力スペクトル法は構造物の非弾性応答に対して改善された洞察を与える。それは、非弾性応答により、構造物がさまざまなレベルの地震動を受け生じるであろう変位を評価している。

C. 本手法の短所

この方法は、弾性解析法よりも扱いが煩雑である。この方法の理論的根拠は議論の余地がある。

この方法は、正確な非線形応答を推定するための、高い等価減衰により調整された弾性変位応答スペクトルを使用している。この方法は瞬間的なタイプの地震動に対して危険側となる可能性がある。この方法は高次モードの影響と繰返しによる劣化を説明することができない。

D. 研究の必要性

本手法を改善するために、下記分野の研究がよりいっそう必要である。

- ・減衰を増加させた弾性応答スペクトルを使用することにより非線形応答スペクトルを再現することの信頼性。
- ・現在定式化されている人命保護やほぼ崩壊レベルだけでなく、4つの性能レベルの各々に対して耐力スペクトル法を応用する方法。
- ・衝撃的なタイプの地震動荷重を記述する方法。
- ・高次モードの影響と繰返しによる劣化を記述する方法。

E. 参考文献

Freeman, S. A., Nicoletti, J. P., Matsumura, George, *Seismic Design Guidelines Essential Buildings*, Proceedings, Eighth World Conference on Earthquake Engineering, San Francisco, 1984.

Mahaney, J. A., Paret, T. F., Kehoe, B. E. and Freeman, S. A. ,“The Capacity Spectrum Method for Evaluating Structural Response During the Loma Prieta Earthquake,” 1993 National Earthquake Conference, Memphis, TN, 1993.

4.5 プッシュオーバー解析法

A. 概要

プッシュオーバー解析法は、漸増荷重により多様な構造部材が順次降伏するような構造物の非線形応答を検討するためには、有用な技術である。よく使われる形式は、増加する変位により構造物の挙動をモニターする、単調な分布の（例えば三角形分布の）静的漸増荷重を用いる静的なプッシュオーバー解析である。この方法には、いくつかの明らかな限界がある。この手法では、弱い階層での塑性化の進展による荷重の再分配や、高次モード、三次元効果などを説明することができない。

許容されるクライテリアは、要求スペクトルを適用される構造物の終局（弾性+非弾性）変位が、構造物が弾性のままであるとした場合に得られる変位と関連づけられるという前提に基づいている。最初に降伏する要素は、モデルの中で解放され、解析は漸増荷重に復帰する。進展する降伏が構造的な不安定を引き起こすまで、連続した繰り返し計算の中で応力は累加される。要求じん性率は、降伏部材の中でモニターされ、曲げまたはせん断応力の限界値に対してチェックされる。もしも、構造物が、最初に不安定になることなく、またはそのじん性キャパシティを上回ることなく、その目標とする変位に達した場合、それは妥当であると判断される。そうでない場合は、再設計が行われる。

高次モードの効果を考慮することのできる拡張された手法は、スペクトル解析により決定された荷重分布を使うことである。構造物の多様な「柔軟化された」状態においてスペクトル解析が個別に実施される。

この手法は本報告の付録Gに詳説されている。

B. 本手法の長所

1. スペクトル応答により予備設計または最終設計が実施された場合、同様の数値モデルと設計スペクトルが基準適合解析で使用できる。
2. 本手法は、多くの技術者に親しみのある概念（スペクトル応答と弾性解析）を用いる。それはまた、技術者に連続的な降伏を視覚的に見せることができ、設計の修正のための洞察を与える。
3. 許容できるキャパシティ、すなわち様々な構造部材の終局状態は、地震動の継続時間の効果に応じて低減または修正することができる（例えば、履歴サイクルの数と振幅により）。
4. 本手法は、非線形時刻歴解析の数学的厳密さを欠いているにもかかわらず、鍵となる構造部材に仮定した時刻歴または複雑な履歴挙動における解析の鋭敏さのいくつかを避けることができる。

C. 本手法の短所

1. 地震荷重に対する限界状態は、多様な荷重組合せのもとで利用できるキャパシティに依存したものであるため、構造部材は、降伏後の状態を明らかにするために、かなりの「記述」が必要となる。
2. 多様な構造部材と接合部の許容できる限界状態に関して利用できるデータは非常に限られており、一般的には、深刻な地震応答を十分に代表しているとは言えない、研究機関での実験に基礎を置いている。

D. 研究の必要性

- ・多様な構造部材と接合部の限界状態に関する研究データ。そのデータは地震荷重および継続時間の多様な形式の効果を反映したものでなければならない。

- ・繰返し応答値の監視と限界状態を特定することを補助する、コンピュータプログラムの開発。
- ・目標変位と変位増分法に関する詳細な研究に基づき、改善された非線形プッシュオーバー解析手法の開発。

E. 参考文献

Newmark, N.M., and Hall, W.V., "Earthquake Spectra and Design", Monograph series by Earthquake Engineering Research Institute, Berkeley, CA, 1981.

Krawinkler, H., "Static Pushover Analysis", *Proceedings: SEAONC 1994 Fall Seminar on the Developing Art of Seismic Engineering*, San Francisco, CA, 1994.

Lawson, R.S., Vance, V. and Krawinkler, H., *Nonlinear Static Push-Over Analysis - Why, When, and How?*, Proceedings of the 5th U.S. Conference in Earthquake Engineering, Chicago, Vol. 1, p.283-292, 1994.

4.6 動的非線形時刻歴解析法

A. 概要

動的非線形時刻歴解析法は建築システム全体をモデル化し、動的応答を調べるのに用いる最も洗練された解析技術である。この手法は決められた時刻歴地震波に対して、構造物の動的応答を時間領域で順を追って解を得るものである。構造モデルでは材料の弾性と後弾性挙動を考慮し、重要な非構造部材の組み込みと地盤—構造物相互作用も考慮される。この解析は、不規則性や非線形挙動、振動モードの相互作用等の非常に詳細な構造物応答の情報を得ることができるが、地震波とモデル化に固有の不確かさがあるために、その結果は十分注意して扱わなければならない。

この解析法では洗練された3次元非線形コンピュータプログラムを必要とする。これは最近使用可能になったものである。これまでは研究や簡略な解析法の検証に使われてきた。十分にモデル化出来るどんな構造物にも使用できるが、現在は重要でシンプルな構造物のみを実用されている。性能目標の限界値に対する応答パラメータを照査するための妥当性の解析ツールとしては充分効果的である。線形および非線形双方の動的時刻歴解析の適用性の議論は付録文献Hに示す。

B. 本手法の長所

動的非線形時刻歴解析は応答パラメータや設計の妥当性の照査には最近使用可能となった最も強力なツールである。2.6章で述べた鍵となる応答パラメータすべてを照査する事が出来る。

C. 本手法の短所

この手法は比較的取扱いが難しく、費用もかかる。解析が正確であるためには汎用性のある、実物に近いモデル化が要求される。(解析に要する)力と数値の精緻さから、結果の信頼性を誤解するかもしれない。モデル化における仮定や地震波入力のわずかな変更が結果を大きく変えることがある。一般的にこの手法は過去の地震で観測された損傷を再現できない。

D. 研究の必要性

- ・非線形挙動や非構造部材の組み込み、地盤—構造物相互作用のより良いモデル化技術の開発。
- ・より良い設計入力地震動の開発。

4.7 変形要求スペクトル解析法

A. 概要

ノースリッジ地震や他の最近の地震の直下型地震動の影響から、遠く離れた領域と近い領域では構造への要求が全く違うことが証明された。ノースリッジ地震のような直下型の応答スペクトルは標準的なスペクトルの形とかなり似通っているが、時刻歴は大きく異なる。直下型の時刻歴は与える損傷の大きさ、長周期の

速度振幅、自由度の大きい地盤の変位で特徴付けられる。構造への影響は、高層階やときには下層階にも現れる。構造物全体の応答振幅は、弾性応答スペクトルで非常に良く予測できる。しかし、局所的な層間変位は簡便な技術で予測された値よりもかなり大きくなる（ノースリッジの低減衰構造では、5%オーダーの層間変位が記録されている）。この直下型現象は新しい手法である変形要求スペクトルで表現することができる（1994 Iwan）。この手法を用いて、さまざまな減衰レベルのパラメトリック解析により、高さや、層数を関数として、層間変位をプロットできる。

変形要求スペクトルは減衰や変形要求や一般的構造物の離れあるいは免震構造物の免震装置の変形耐力の必要条件の決定に用いることができる。

B. 本手法の長所

変形要求スペクトルは直下型地震動の傾向を表現し、直下型の影響を受ける構造物の設計法や、照査法を規定している。本手法は、変形の照査を可能にし、変形性能パラメータと関連付けることができる。本手法は、従来の応答スペクトルと関連の解析技術を組み合わせて使用すると簡便となるかもしれない。

C. 本手法の短所

この手法は、開発の初期段階であり、実証や改良するための追加調査が必要である。現在も、性能工学の手法のなかで整合をとるためのキャリブレーション手法は提案されていない。

D. 参考文献

Iwan, W.D., *Near-field Considerations in Specification of Seismic Design Motions for Structures*, Proceedings of the 10th European Conference on Earthquake Engineering, Vienna, Austria, 1994.

5. 結論と勧告

本報告書では、耐震性能を予測、達成可能な基礎的な耐震設計の概念と過程を、完全に明らかにするように耐震設計のガイドラインを改訂する必要があるとの認識から出発し、性能工学(PBE)の方法論を報じた。

性能工学の開発は、以下の事項により進展すべきであるということが、本報告書の結論である。

1. PBE は、耐震設計の概念および過程の明瞭さを維持しながら、予想可能な耐震性能を達成可能とするために、この報告書の中で明瞭に表現された概念的枠組みの中で開発される。
2. PBE は、単なる構造物の耐震設計だけではなく、特に非構造部材の耐震設計や施工の品質保証にも、供用期間における建物の維持管理状況と占有状況をモニターするのも同様に、枠組み内で問題のすべてに取り組まなければならない。
3. キャパシティーデザインの哲学は、耐震設計の優れた基礎原理として採用されるべきである。
4. PBE は、その目標を達成するために構造物の非弾性応答に直接取り組まなければならない。
5. PBE は、より高い性能目標を達成するために、設計において地震動を1段階より多く考慮しなければならない。
6. PBE は、一連の設計手法が設計の色々な問題、目標に取り組むことを可能にしなければならない。
7. PBE は、耐震設計の過程における不確実性の原因を特定し、PBE 設計の中で地震動を危険度および信頼度を定量化しなければならない。

さらに、PBE を実行するため、以下のステップにより性能設計ガイドラインと基準を開発してゆくことが、本報告書の勧告である。

1. PBE の開発で優先される次の段階は、性能照査型の耐震工学のガイドラインを開発する本報告書の中で示された、概念的枠組みを使用して進めるべきである。
2. ここに提案される設計手法や受入れ可能性の手法と、前途有望な代替手法は開発されるべきであり、ケースによっては改良されるべきである。
3. 様々な構造系および材料のためのキャパシティーデザインの手順が展開されているべきである。
4. 変位ベース設計法はさらに研究・開発されるべきである。
5. エネルギーベース設計法はさらに研究・開発されるべきである。
6. 構造系における受動的なエネルギー消散装置の使用は開発・促進されるべきである。
7. ガイドライン作成者および基準の開発者は、耐震設計の概念と手法が常に分りやすく、効果的であるという、ガイドラインの原理を保つべきである。
8. 指揮された研究開発は、この報告書の「研究ニーズ」セクションの中で識別された問題へ促進されるべきである。
9. 技術者、建築家、学者、公務員、建設業および大衆の教育プロセスは、直ちに始めるべきである。
10. PBE の概念と手法の蓄積により、現在の業務および現在の基準を PBE に適応させる推移過程は、直ちに始めるべきである。

この文書は耐震工学業務の進歩に寄与し、有効な性能照査型耐震工学の開発のプロセスを促進するのに役立つだろう。

3.1.4 訳語リスト

翻訳中に抽出した主要な単語とその約を下記に示す。

英語	訳語
acceptability analysis	基準適合解析
Basic Objective	通常の建物
blue book	青書
building official	建築行政官
building system	建物構造系
California Office of Emergency Service	カリフォルニア州緊急対策本部
capacity design	キャパシティデザイン
Comprehensive Design Approach	総合設計
conceptual design	概念設計
configure	配置する
configuration	架構形式
cumulative damage factors	累積損傷係数？
damageability	損傷許容度
damage stage	損傷度
design procedure	設計手法
ductility demand	要求じん性率
ductility fuse	じん性ヒューズ
drift	層間変位
effective stiffness	等価剛性
Enhanced Objective	拡張された施設
Essential/Hazardous Objectibve	重要あるいは危険物を収容する施設
fail	破壊
failure	破壊
final design	最終設計
flexural crack	まげひび割れ
Force/Strength Design Approach	荷重係数設計法
fracture	割れ
ground motion	地震動
incremental displacement methods	変位増分法
incremental loading	漸増荷重
incremental loading methods	荷重増分法
life safty	人命保護
limited state	限界状態
loss of service	サービスの停止
masonry infill wall	石造中空壁

nail	釘
performance based engineering	性能工学、性能照査型工学
performance objective	性能目標
predictable and defined seismic performance	予測可能で明確な耐震性能
preliminary design	予備設計
preliminary Northridge Lessons	ノースリッジ地震の予備的な教訓
probability exceedance	超過確率
public policy maker	公共政策立案者
recurrence interval	再現期間
redundancy	冗長性、代理機能性
regulatory agency	規制執行機関
Safety Critical Objective	安全上重要となる施設
seismic design	耐震設計
seismic hazard	地震災害度
seismic risk	耐震危険度
shrer crack	せん断ひび割れ
single step iteration	単段階反復法
Site Coefficient	現場係数
site sutability	用地適合性
spalling	(かぶりコンクリートの) 剥落
Standard Building Code	標準建築基準
Structural Engineers Association of California	カリフォルニア州構造技術者協会
substitute structure	等価線形構造物
system	構造系
target displacement	目標変位
tenant	借主
ultimate displacement	終局変位
Uniform Building Code	統一建築基準
upgrade	更新
veneer	化粧材
yield structures of predictable seismic performance	予測可能な耐震性能を有する構造物を提供する