

委員会報告 被災構造物の復旧性能評価研究委員会

白井 伸明^{*1}・中村 光^{*2}・衣笠 秀行^{*3}・河野 進^{*4}・小林 薫^{*5}

要旨：本研究委員会は、設計仮定値を上回る強い地震動に対しても、生じ得る損傷の程度を充分把握して、補修を考慮した経済的かつ安全な構造物の提供およびその設計法の構築を目指して活動を行った。委員会では、上記目的を達成するために、①復旧性を考慮した耐震設計法の枠組みの提案、②損傷評価および損傷制御に関して現存する規基準類や被災時の評価例の調査、③補修後構造物の性能評価法構築の基礎資料となる関連技術の調査・検討を行った。

キーワード：復旧性能、補修、損傷評価、損傷制御、経済性、力学性能

1. はじめに

兵庫県南部地震によるコンクリート構造物の大被害を受けて、これまでの設計体系に対する見直しが行われ、大地震に対しては降伏以降のエネルギー吸収を事前に考慮した靱性設計が明確に取り入れられるようになるとともに、性能評価型（照査型）設計への移行が進みつつある。性能評価型設計においては、「使用性」「修復性（復旧性）」「安全性」という要求性能を明確に定義し、それに対応した「使用限界状態」「修復限界状態」「安全限界状態」の各種限界状態を目標の水準に設定し、想定外乱に対し構造物の応答が設定した性能を満たすことを確認する必要がある。注目すべき点は、日常の使用に関わる使用性のほかに、地震などに対して財産の保全を図る「修復性（復旧性）」も基本性能として加わったことである。

このような背景のもと、2004 年度に FS（Feasibility Study）課題として「被災構造物の補修補強後の耐力変形状研究委員会」が設置され、一年間の調査研究活動で、被災構造物の復旧を体系的に考えることの必要性、そのための

幾つかの検討課題が明確にされた¹⁾。

本委員会は、「被災構造物の補修補強後の耐力変形状研究委員会」の活動に引き続き、「修復（復旧）性能を明確にした耐震設計法」の構築を目指して、被災構造物の損傷評価や補修後の性能評価などの関連する項目とともに、二年間の調査研究活動を行ったので、その成果の概要を報告する。

2. 委員会活動の概要と背景

補修・補強に関する研究や委員会は既に多くあるが、本研究委員会では、表-1 に示す委員により、「復旧（修復）性能を明確にした耐震設計法」の構築を目指した検討を行った。すなわち、これまでの大地震、特に兵庫県南部地震や新潟県中越地震などの被害性状などを教訓として、設計仮定値を上回る強い地震動に対しても、生じ得る損傷の程度を充分把握して、補修を考慮した、経済的かつ安全な構造物の提供およびその設計法確立の為の検討を行った。

委員会では、上記目的を達成するために、図-1 に示すような、経時劣化を生じるコンクリー

*1 日本大学 理工学部 建築学科教授 工博（正会員）

*2 名古屋大学 大学院 工学研究科 社会基盤工学専攻教授 博（工）（正会員）

*3 東京理科大学 理工学部 建築学科准教授 工博（正会員）

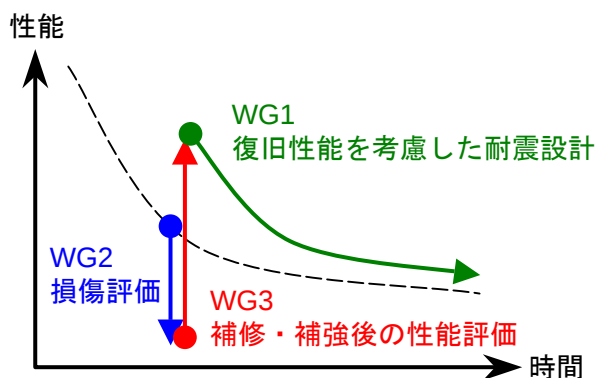
*4 京都大学 大学院 工学研究科 建築学専攻准教授 博（工）（正会員）

*5 東日本旅客鉄道株式会社 研究開発センター フロンティアサービス研究所 博（工）（正会員）

ト構造物の性能変化の概念に基づき、復旧性能を考慮した耐震設計 WG、損傷評価 WG、補修・補強後の性能評価 WG の三つの WG を作成し精力的に調査研究活動を行った。

表－1 委員会構成

委員長：白井伸明（日本大学）
副委員長：中村光（名古屋大学）
幹事：衣笠秀行（東京理科大学）、河野進（京都大学）、小林薫（東日本旅客鉄道）
委員：伊藤 睦（中部大学）、稲熊弘（JR 東海）、岡野素之（大林組）、河野隆史（竹中工務店）、北山和宏（首都大学東京）、斉藤成彦（山梨大学）、堺淳一（土木研究所）、鈴木計夫（大阪大学）、宗栄一（ショーボンド建設）、滝本和志（清水建設）、田才晃（横浜国立大学）、田嶋和樹（日本大学）、前田匡樹（東北大学）、牧剛史（埼玉大学）、向井智久（建築研究所）
通信委員：勝俣英雄（大林組）、北嶋圭二（青木あすなろ建設）、藤永隆（神戸大学）



図－1 WG の位置づけ

その背景としては、ある時間に地震作用により構造物が被災し、補修・補強を行いその後も供用を行う場合、構造物にどの程度の性能低下が生じたのかを正確に把握すること（**損傷の評価**）、適切な補修・補強を施しそれによって補修・補強後の構造物が所定の性能を回復しているかを判断すること（**補修・補強後の性能評価**）、および構造物の残りの供用期間と性能回復に必要な費用とを勘案し、経済的に無理のない補修・補強が行えるかどうかを確認すること（**復**

旧性能の評価）が重要となると考えたためである。さらには、設計段階において、これらのプロセスを事前に考慮して構造物を構築する必要性も将来的には必要と考えた。

表－2 報告書目次

1. 委員会の目的
 - 1.1 委員会の趣旨
 - 1.2 委員会の活動内容
 - 1.3 キーワード
2. 復旧性が問題となった被害事例の調査・分析
 - 2.1 土木
 - 2.2 建築
3. 損傷評価および損傷制御
 - 3.1 既存の損傷評価法の紹介
 - 3.2 損傷評価に関する研究の現状
 - 3.3 損傷制御
4. 被災構造物の補修後の性能評価
 - 4.1 被災構造物の補修について
 - 4.2 補修後の力学挙動に関する既往の研究事例
 - 4.3 補修後の力学的性能評価
 - 4.4 補修後構造物の動的挙動
 - 4.5 補修構造物の性能評価における今後の課題
5. 復旧性を考慮した耐震設計法
 - 5.1 復旧性を考慮した耐震設計法の必要性
 - 5.2 既往の耐震設計法における復旧性能の扱いに関する調査・比較
 - 5.3 復旧性を考慮した耐震設計の枠組み
6. まとめ

3. 委員会報告書の概要

本研究委員会の成果は、報告書として表－2 の目次のようにとりまとめた。報告書では主に以下の項目について取りまとめられている。

- ① 損傷評価および損傷制御に関して、現存する規基準類や被災時の評価例の紹介
- ② 補修後構造物の性能評価法の構築の為に必要となる、補修方法の留意点、最近の実験的な研究事例、既存の力学モデルによる補修後試験体実験の解析から適用性の検討結果
- ③ 復旧性能に関する関連項目や背景についての調査結果ならびに、復旧性を考慮した耐震設計法の枠組についての提案

次章以降では、上記①～③の項目として、報告書の三章から五章でとりまとめた内容の一部について略述する。

4. 損傷評価および損傷制御

三章では、損傷評価および損傷制御に関して、現存する規基準類や被災時の評価例、ならびに関連する研究の現状の調査結果について記述した。

4.1 規基準類における損傷評価法

建築分野では種々多様な新築および既存建物の性能評価を数多く行う必要性から、日本建築学会や日本建築防災協会などの関係団体は、規基準を発展させることで対応してきており、比較的誰にでも得られる形で情報が存在する。報告書では、建築分野で比較的良く用いられる国内外の規基準類として、「既存鉄筋コンクリート造建築物の耐震診断基準・同解説（日本建築防災協会）」、「震災建築物等の被災度判定基準および復旧技術指針（日本建築防災協会）」、「鉄筋コンクリート造建築物の耐震性能評価指針（案）・同解説（日本建築学会）」、「FEMA 356-Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings (ASCE)」についてとりまとめた。例えば、建築学会の耐震性能評価指針（案）では、設計された建物の耐震性能を指標によって表現して、従来のような基準レベルを上回っていることを確認するだけでなく、保有する耐震性能を確定値あるいは確率によって定量化している。この指針では、限界状態として使用性、修復可能性および安全性に対応する三段階を設定し、供用期間中に発生する可能性のある地震動によって建物がそれぞれの限界状態を超過する確率を求めており、限界状態における性能は主に変形に基づいて評価することが特徴である（図-2）。最終的には、建物が保有する耐震性能の指標を、限界地震動の強さに対する基準地震動の強さの比によって確定的に表現している。

これに対し、土木分野における被災後の性能評価に関しては、被災時における社会的・経済

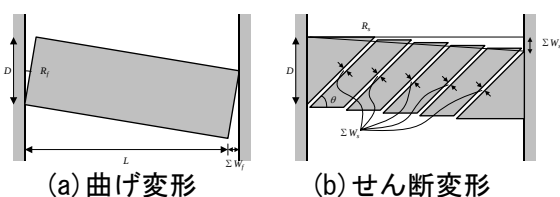


図-2 損傷評価に用いる梁部材変形モデル
(建築学会の指針²⁾より)

的要素を加味して判断する必要性から、事例ごとに損傷程度の判断や復旧方法を決めざるを得ず、損傷評価のマニュアルは固定されていない。地震が発生しても土木構造物が損傷しないのが理想的であるが、発生する地震の大きさは様々であり、既存の土木構造物を耐震補強したとしても、被災を受ける場合も想定される。被災した土木構造物を早期に復旧するためには、①当該構造物の耐震性能をあらかじめ推定し、損傷が発生しそうな部位を予測しておくこと、②損傷度を軽微にするため、必要により耐震補強を施しておくこと、③被災構造物に対する補修や補強の可否や供用の持続の可否の判定を迅速に行えるように、的確な損傷評価方法確立しておくこと、④損傷度に応じた補修方法あるいは取替方法を整備しておくこと、を整備する必要があると考えられる。報告書では、鉄道および道路のコンクリート構造物を例に、被災した土木構造物を早期復旧するための重要となる上記のファクターのうち、①～③の現状と課題について、詳しい説明を行なった（図-3）。

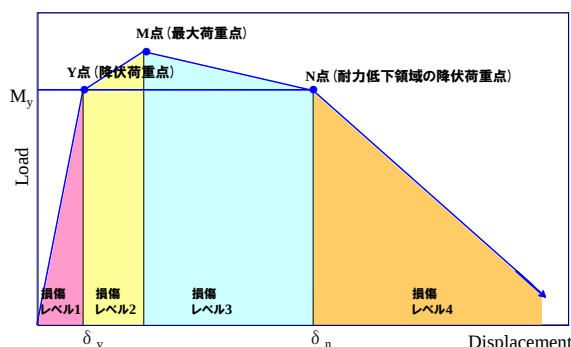


図-3 RC部材の荷重-変位履歴曲線と損傷程度との関係（鉄道構造物の例）

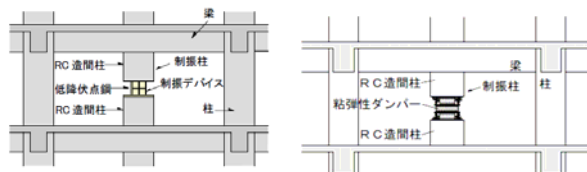
4.2 損傷評価・損傷制御に関する研究の現状

部材および構造物全体の限界状態の設定方法について「鉄筋コンクリート造建物の耐震性能評価指針（案）・同解説」を調査し、損傷評価との関係について整理した。また、海外における取組みの例として、構造物の安全限界状態である全体崩壊状態を決定するための方法論について触れるとともに、今後の展望として PEER の取組みを紹介した。

被災した構造物の残存性能の予測と評価としては、残留ひび割れ幅と部材変形の関係の評価、部材の残留ひび割れ幅と残存耐震性能の関係の評価、柱の擬似動的実験による残存耐震性能評価、地震応答解析による構造物の残存耐震性能評価に関して最近の研究事例を示した。

さらに、在来工法で補強された建物の耐震性能評価、実際に耐震補強された建物の被災事例、制振・免震装置などによって補強された骨組の地震時挙動、制振補強された建物の性能を簡易に評価する方法について紹介した。

地震時に構造物が被る損傷レベルが評価可能となれば、次のステップとして、如何にその損傷レベルを低減・抑制・制御するか、すなわち“損傷制御”の実現が重要となる。しかし、“損傷制御”と一概によんでも、損傷制御を目的とする技術は多岐にわたり、①免制震化等による構造物全体の損傷制御技術（図-4）、②P C化や鉄筋のアンボンド化等による部材の損傷制御技術、③繊維混入コンクリート等による損傷制御のための新しい材料技術、など対象は広範囲に及ぶ。そこで、“損傷制御”という名目で現在どのような研究が実施されているかについて研究の現状について調査した結果について記した。



(a) 制振デバイス (b) 粘弾性ダンパー

図-4 制振デバイス付き RC 造骨組の例³⁾⁴⁾

5. 被災構造物の補修後の性能評価

四章では、補修後構造物の性能評価法の構築を目指し、また今後の基礎資料に資する目的で、補修方法の留意点、最近の実験的な研究事例、既存の力学モデルによる補修後試験体実験の解析からその適用性の検討を行った。

5.1 補修後の力学挙動に関する既往の研究事例

(1) 補修後構造物の剛性評価に関する既往の研究

補修後構造物の剛性評価に関する研究について、過去約 20 年間に実施されたものを調査した。主な内容は以下の通りである。

- (a) 補修後の初期剛性は、無損傷時の全断面有効剛性よりも低下する。この原因としては、すべてのひび割れに樹脂を注入することができないこと、補修材（ひび割れ注入材、断面修復材）の弾性係数がコンクリートより低いことが考えられる。
- (b) かぶりコンクリートのみの置換では、元の性能に戻らない。
- (c) 補修後の耐力は、無損傷時の耐力と同等かそれ以上に回復する。この原因として、軸方向鉄筋のひずみ硬化および時効効果、補修材料の引張強度の貢献が挙げられる。

(2) 建築構造物における実験的研究例

建築構造物の最近の実験的研究として、①耐震補修・補強された RC 造 4 層立体フレーム構造の振動台実験⁵⁾、②SRC・RC 骨組み SRC 柱⁶⁾実験の概要を紹介した。

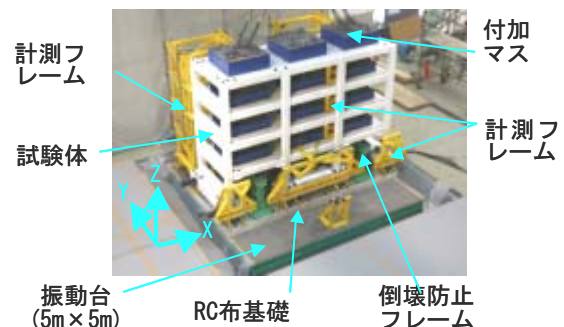


写真-1 試験体形状（損傷前）

RC 造 4 層立体フレーム構造の振動台実験⁵⁾では、4 層 1×3 スパンの 1/4 スケール模型で行

われている。補修補強前の試験体を写真-1に示す。実験結果は、採用した補修・補強工法はその目的に応じて効果を発揮し、実験の範囲内ではあるが、補修・補強後の挙動は部材実験の知見から推定してよいことが確認された。

(3) 土木構造物における実験的研究例

土木構造物を対象にした最近の実験的研究事例として、鉄道構造物を対象とした一連の交番載荷試験^{9)~10)}の概要を紹介した。

特に、損傷度をパラメータとした柱部材の補修効果の確認実験⁸⁾では、損傷度を变化させた柱部材に、同一の補修方法を行った場合の復元効果の確認が行われた。初期剛性、最大荷重ともに、損傷度が大きい試験体を補修したものほど復元率がよい結果であった。一方、変形性能については、損傷度が大きくなると復元率が悪くなるといった結果が得られた。

5.2 補修後の力学的性能評価

補修後構造物の性能評価法構築の基礎資料とするため、補修後試験体の実験結果をファバーモデルによる解析、部材レベルの力学モデルでの解析を行い、その適用性について検討を行った。主な検討結果は以下の通りである。

(1) ファイバー解析による補修後 RC 柱の検討

エポキシ樹脂モルタルにより断面修復が施され、再度正負交番載荷された鉄道構造物の RC 柱供試体に対して、ファイバーモデルにより正負交番載荷解析を行った。断面修復の効果は、軸方向鉄筋外側の領域に、エポキシ樹脂モルタルの材料特性を仮定して考慮した。

簡易な材料モデルの使用や補修後の柱基部の

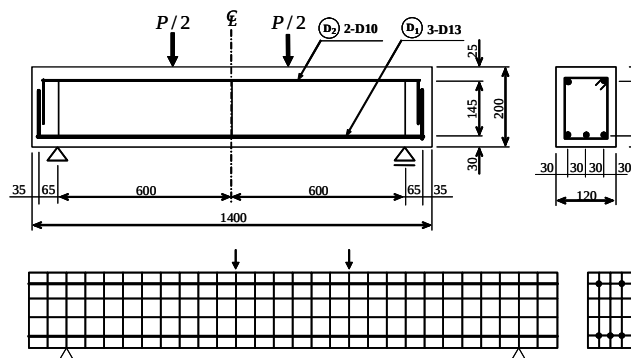


図-6 仮想 RC はりの諸元とメッシュ分割図

複雑な応力状態を再現していないこと等、解析では簡略化した条件を用いたが、水平力～水平変位関係における骨格曲線(図-5)は被災前、補修後ともに解析により一定の精度で再現できる結果を得た。補修後の曲げ剛性の低下については、軸方向鉄筋の初期弾性係数を 20%低減することにより、一定の精度で再現可能であった。また、軸方向鉄筋のひずみ硬化の影響を、降伏強度を 20%増加させることで考慮すると解析精度が向上した。

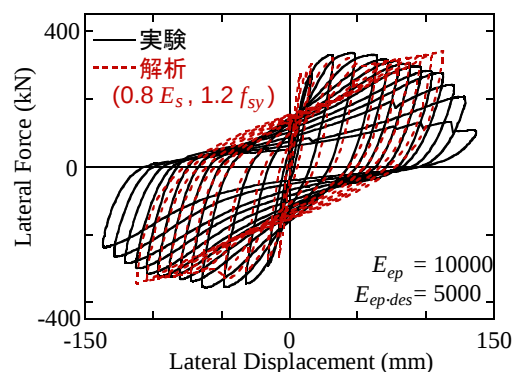


図-5 ファイバーモデル解析の一例

(2) ファイバー解析による補修後 SRC 部材の検討

可撓領域と弾性体からなる解析モデルを仮定し、断面分割法により補修した SRC 柱および骨組の挙動解析を行った。炭素繊維での拘束の影響をコンクリートの応力-ひずみ関係に考慮した。

初期剛性を実験値と整合するように可撓領域長さを $2.5D$ (D : 断面せい) にすると、実験挙動と解析挙動は概ね良い対応を示すことが確認された。

(3) FEM 解析による補修後 RC 梁の検討

図-6、図-7 に示すせん断破壊する仮想 RC

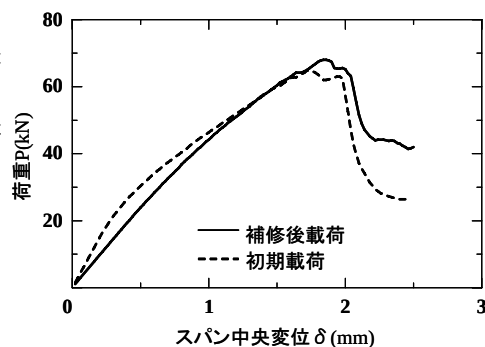


図-7 荷重-変位関係の比較

はり部材の補修後の載荷解析例を示す。解析手順は、初回載荷解析により仮想 RC はりをせん断破壊させた後に荷重を除荷し、損傷情報を出力する。補修後載荷解析では、この損傷情報を引継ぐと共に、補修作業をモデル化した後に、再度初回載荷時と同様な荷重を作用させた。ひび割れ注入のモデル化は、残留ひび割れ幅に応じて補修されたコンクリートのマクロな剛性の変化と、コンクリートの引張強度の回復とした。

本検討は、せん断破壊した RC はり部材に対して、ひび割れ注入した補修部材の性能評価を想定したものであるが、定性的には既往の実験で得られた知見^{11) 12)}とほぼ一致するような結果が予測された。

5.3 補修後構造物の動的挙動

(1) ファイバー解析による補修後 RC 柱の動的挙動に関する検討

補修後の鉄筋コンクリート柱の動的挙動評価のため、5.2(1)で記述したものと同一のモデルを用いて地震応答解析を行った。解析結果は、対象とした地震動に対して、補修後は応答変位で最大 27%増加し、最小で 36%低下した。構造物の曲げ性能と地震動の卓越周期の関係によって、被災前と補修後で応答特性が変化するものと考えられる。

(2) 補修後の影響を考慮した 5 層建物の動的挙動に関する検討

補修後の 5 層建築構造物を対象に、剛性の低下と補修後の耐力上昇を考慮した時刻歴応答解析から地震時の挙動に対する検討を行った。

スケルトンカーブで最大耐力点と仮定した部材角を越えるような応答の場合には、健全時と補修後のモデルによる違いが顕著に現れた。

解析は、全層にわたって被害を受けたものとし、全層で剛性を低下させて行っているが、実際は損傷のレベルによって剛性の低下量も異なる。また、非構造部材やスラブなども剛性に寄与するものと考えられる。実状に則したスケルトンカーブの設定に関しては今後の課題である。

6. 復旧性を考慮した耐震設計法

これまで一般的に、大地震に対して人命の保全を第一目標とした耐震設計が行われてきた。経済損失の軽減を目的に明確な設計目標（損傷限界）を設定し設計が行われてきたとは言い難い。来る大地震に対する経済損失を低減するためには、経済基盤を支える土木・建築構造物の復旧性能の確保を目的とした耐震設計法の確立が望まれる。

五章では復旧性能に関する関連項目や背景についての調査結果をまとめるとともに、復旧性を考慮した耐震設計法の枠組についての提案を行った。

6.1 復旧性能に関する国内外の状況

米国では、1989 年ロマプリーエータ地震、1994 年ノースリッジ地震の後、西海岸の大都市が膨大な経済損失を被ったことを背景に、第 1 世代の性能評価型設計である Vision2000 および FEAMA356 が、人命保護だけでなく建物の機能性の保全を目的に作成された。現在、第 2 世代の性能評価型設計法が ATC および PEER において開発されつつあり、そこでは、地震による「機能停止時間」や「復旧費用」が性能評価の重要な指標として扱われている。現在、25%完成度のものが公開されており、今後 7 年間かけて完成に向けて作業が行われる。

一方、経済界では地震時のリスク評価やそれへの対処方法として、PML や BCP といった概念が注目を集めるようになってきている。

PML (Probable Maximum Loss : 予想最大損失率) は地震リスクに対する不動産の資産価値を評価する際に使用される指標である。PML は、もともと保険業界で使われてきた指標で、米国の火災保険で保険情報の一つとして生まれ、その後、地震保険などの巨大災害のリスク評価でも用いられるようになった。日本の地震保険では、昭和 41 年の創設以来、総支払い限度額の設定指標として PML が用いられ、保険制度運営上の重要な指標となっている。また、建築業界・不動産業界では最近になって PML を用いるよう

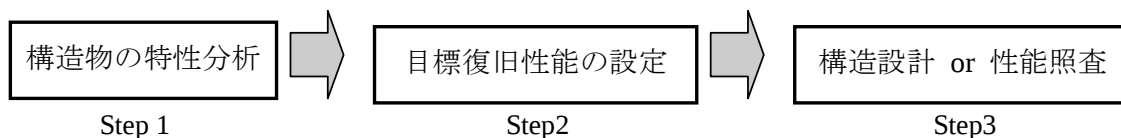


図-8 設計の流れ

になっており，その定義は「対象施設あるいは施設群に対し，最大の損失をもたらす再現期間475年相当（50年間で10%の超過確率）の地震が発生した場合の90%非超過確率に相当する物的損失額の再調達費（再建築費用）に対する割合」というものである。

BCP(Business Continuity Plan：事業継続性計画)は，新潟県中越地震で三洋電機が事業中断を余儀なくされ，その波及効果により巨額の経済損失を出したことを教訓に，急速に国内で注目を集めるようになったものである。BCPは，地震時における経済活動の中断を出来る限り短くし，経済損失を最小にすることを目的としたものであり，災害の想定，影響度とその損失の評価，重要業務が受ける被害の想定と重要要素(事業継続性を最も大きく脅かす要素)の抽出からなっている。

補修等の投資を決定する者（意志決定者）が情報として最も重要視する地震時の「機能停止時間」や「復旧費用」を，構造物の耐震性能指標の一つとして捉え，これらを目標とした設計法を模索することは世界的趨勢になりつつあると言える。

6.2 復旧性を考慮した耐震設計法の枠組

震災後の復旧性を考慮した耐震設計を行うためには，Step1：復旧性の面から設計対象構造物の特性を分析し，Step2：適切な目標復旧性能を定める，Step3：これに基づき構造物の設計あるいは性能照査を行うことが必要になる（図-8参照）。委員会では以上の3ステップのうち，ステップ1と2のあり方について検討を行った。

ここで示す設計法の枠組は次の3つの基本事項に基づくものとなっている。

①復旧性能を「経済的に無理なく復旧できる性能」と定義する。

②復旧性能の評価を復旧に要する費用と時間（復旧費用と復旧時間）に基づき行う

③復旧性能を安全性能とは独立の性能として捉える。

6.3 目標復旧性能の設定（Step2(図-8)）

経済的観点から考えると，回復された構造物の力学性能だけでなく，それに要した費用や時間を考慮し復旧効果を判断することが必要になる。構造物によっては，前者だけ，あるいは後者だけ考えればよいものもある。しかし，ほとんどの場合に双方を考慮する必要がある。そこで目標復旧性能を，図-9に示すような地震動レベル・復旧費用・復旧時間の3次元によって表示することを考える。

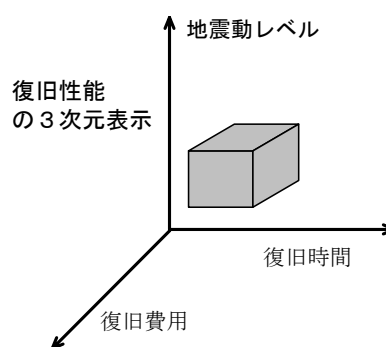


図-9 復旧性能の3次元表示

考える地震動レベルは，

中小地震（B）：数十年に一度

大地震（A）：数百年に一度

極大地震（S）：1000年に一度

の3レベルとし，復旧性を，次の4レベルで表現する。①ほとんど問題なし，②なんとか大丈夫，③ギリギリ許容，④許容できない。

これらを区切る復旧時間に関する境界を仮に，3日，3週，3ヶ月，また，復旧費用（復旧費用／初期建設費用）に関する境界を仮に，5%，15%，30%とする。これを「基本形」として図-10に示した。なお，これらの数値については，

十分な妥当性の検討を行う必要があり，その検討は図-8 で述べた「step1：構造物の特性分析」にあたるものであり次節で解説する。

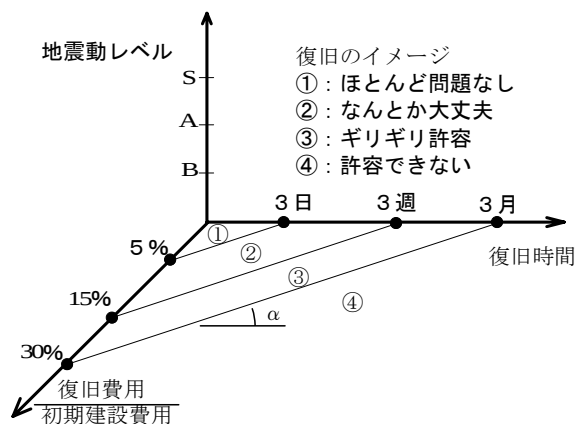


図-10 復旧性能の表示（基本形）

復旧性能は安全性能とトレードオフの関係にあることが考えられることから，得られた復旧性能が安全性能との関連でどのような位置関係にあるのかを検討する必要がある。この目的のため，さらに，地震動レベル・安全性能・復旧性能の3次元表示を行う必要がある。

6.4 復旧性能の面からの構造物の特性の分析 (Step1(図-8))

復旧性能の面から構造物の特性を分析し，その構造物に最適な構造設計を行うことが求められる。既存構造物の持っている復旧性能に関する特性分析を充分に行うことによって精度の高い復旧性能を意識した耐震設計が可能となる。

特性分析は次の4点について行う。

- ①復旧費用と復旧時間のどちらが重要か。
- ②許容できる復旧費用・復旧時間はどの程度か。
(復旧時間に関する境界3日，3週，3ヶ月，及び，復旧費用（復旧費用／初期建設費用）に関する境界5%，15%，30%は適切か)
- ③損傷が発生した場合，復旧費用と復旧時間のどちらが大きくなる構造物か。
- ④安全性と復旧性のバランスは適切か。

参考文献

- 1) 日本コンクリート工学協会：被災構造物の補修補強後の耐力変形状研究委員会報告書，

2005.

- 2) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建物の耐震性能評価指針（案）・同解説（日本建築学会），2004.
- 3) 和泉信之，竹中啓之，千葉脩，阿世賀宏：制振デバイス付きRC造骨組の耐震性能に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol. 24, No. 2, pp. 1057-1062, 2002.
- 4) 和泉信之，竹中啓之，千葉脩，阿世賀宏：粘弾性制振デバイス付きRC造骨組の耐震性能に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol. 25, No. 2, pp. 1363-1368, 2003.
- 5) 勝俣英雄，白井和貴，増田安彦，壁谷澤寿海：耐震補修・補強を施した鉄筋コンクリート造壁フレーム模型の振動台実験，コンクリート工学年次論文集，Vol. 28, No. 2, pp. 391-396, 2006.
- 6) 藤永隆，三谷勲，大谷恭弘，内田直樹，長谷川正雄：鋼・コンクリート合成構造骨組の耐力と変形性能に関する実験的研究，第5回複合構造の活用に関するシンポジウム講演論文集，pp. 189-196, 2003.
- 7) 稲熊弘，町田文昭，中嶋繁，滝本和志：実高架橋の柱部材を用いた補修効果確認実験，土木学会第57回年次学術講演会，V-122, pp. 243-244, 2002.
- 8) 稲熊弘，関雅樹：大損傷を受けたRC柱のエポキシ樹脂モルタルによる補修効果確認実験，土木学会第58回年次学術講演会，V-344, pp. 687-688, 2003.
- 9) 稲熊弘，関雅樹：損傷レベル4の大変形領域まで損傷させた鉄道高架橋RC柱の補修効果に関する実験的研究，土木学会構造工学論文集，Vol. 51A, pp. 769-780, 2005.
- 10) 元木澤知紀，稲熊弘：交番載荷試験における繰返し回数がRC柱の耐力低下に及ぼす影響，土木学会第58回年次学術講演会，V-358, pp. 715-716, 2003.
- 11) 宗栄一：震害を受けた鉄筋コンクリート部材のエポキシ樹脂注入による補修効果に関する実験的研究，土木学会年次学術講演会講演概要集第5部，38巻，pp. 381-382, 1983
- 12) 森濱和正，小林茂敏，高橋正志：ひびわれ注入およびその効果，日本道路会議論文，pp. 254-256, 1983