

震災後における建築物の迅速な機能回復に向けて

構造研究グループ 上席研究員 福山 洋

主任研究員 喜々津仁密

研究員 向井智久、岩田善裕

国際地震工学センター 上席研究員 齊藤大樹

目次

- I はじめに
- II 研究の背景
 - 1) 近年における地震被害の特徴
 - 2) 事業継続計画（BCP）に関する動向
 - 3) 被災後の迅速な機能回復を指向した構造性能評価の必要性
- III 「機能回復性」に基づく性能設計体系
 - 1) 機能回復性の定義
 - 2) 機能回復性に基づく設計検証フロー
 - 3) 関連する他の類似検討との比較
- IV 「機能回復性」に関する既往の検討と課題
 - 1) 日本建築構造技術者協会と共同で実施した建築物の機能回復に関する検討の概要
 - ① 検討内容と結果
 - ② 抽出された課題
 - 2) 平成 16 年新潟県中越地震による病院建築物の地震被害と復旧に関する検討
 - ① 入力地震動レベルと建築物の被害概要
 - ② 被災した建築物の復旧内容
 - ③ 抽出された課題
- V 「機能回復性」に関する新しい重点研究課題
 - ① 位置付けと目的
 - ② 研究内容
 - ③ 予想される成果
- VI おわりに
- 参考文献

I はじめに

建築物の設計において、災害時における人命の安全は最も重要な目標であり、最低基準である建築基準法にもそのために遵守すべき規定が設けられている。しかしながら、近年における

地震災害において、居住や活動の場である建築物の機能が損なわれるような重大な損傷が見られたことから、設計においては「建築物の機能を如何に維持するか」、もしくは、「低下した機能を如何に迅速に回復させるか」という観点が、安全性の観点

に加えて必要であるとの認識がなされるようになってきた。これは、内閣府の中央防災会議が、想定される東海地震、東南海・南海地震、および首都直下地震等による被害額をほぼ半減させるために、耐震化率の向上とともに企業に対して事業継続計画の策定を求めていることとも関連する。

このような状況を踏まえ、本稿では、“災害後における建築物の迅速な機能回復”を取り上げ、その背景と必要性、設計における位置づけと課題、および、既往の検討例について紹介する。特に、新たな定義である機能回復性を如何に従来の設計体系に取り入れていくかに重点を置いて論を進め、最後に、この目的のために次年度から開始を予定している重点研究課題の概要について紹介する。

II 研究の背景

1) 近年における地震被害の特徴

平成7年兵庫県南部地震では、多数の建築物が倒壊して多くの人命が失われただけでなく、さまざまな都市機能が麻痺するとともに避難所など自宅外での生活が長期間強いられる結果となった。これは、住宅建築物の多くが「すまい」としての機能を失った結果である。さらに、新耐震基準に基づいて設計された建築物において、法律の要求通りに倒壊を免れ人命は守ったが、構造躯体の損傷が激しくその修復費用が極めて高額であったことから、結局は取り壊され新しく建て直されるというケースも少なからず見られた（例えば写真1）。この事例は、設計において損傷制御や機能回復という観点を持つことの重要性を示している。

また、平成13年芸予地震、平成15年十勝沖地震、平成17年の宮城県南部の地震では大規模空間天井の落下被害、平成17年の福岡県西方沖地震¹⁾では事務所建築物の窓ガラスや集合住宅の壁や建具等の被害（写真2）がそれぞれ顕在化しており、これらの非構造部材の被害によっても構造骨組の被害事例の場合と同様に人命への危険性が生じる事例や、建築物の機能性や居住性の喪失によって被災後の継続的な供用が困難になる事例が散見されている。さらに、平成16年新潟県中越地震では、半導体工場内の生産設備の多くが被害を受け、設備等の物理的損失だけでなく被災後の機会損失や製品を供給している他企業への影響が甚大となる事態も見られた。

このように近年発生した地震による建築物の被害事例を見ると、建築物の所有者や使用者が災害時の状況を想定できておらず、そのため災害後の対策も立てられていない実態が浮き彫りとなった。こ



(a) 建物全体 (構造はRC造剛節架構)



(b) 柱のせん断破壊や損傷 (c) 梁や柱梁接合部の損傷

写真1 平成7年兵庫県南部地震により倒壊は免れたが大きな損傷を受けた新耐震設計の建築物



写真2 平成17年福岡県西方沖地震における共同住宅の廊下側非構造壁のひびわれ損傷

れについては、建築物の供給側にもそのような情報や専門知識を伝える努力が欠如していた可能性がある。また、兵庫県南部地震の際には構造骨組自体が大破したことの裏に隠れて比較的目立たなかった非構造部材や設備什器の被害が注目されてきており、さらに被災した建築物の使用者は直接的な躯体そのものの損失だけでなく被災したために生ずる間接的な経済損失等についても重視している点が特徴として挙げられる。

図1は、全世界で発生した大規模地震による死者数と経済損失額（現在の価値で表示）の推移である²⁾。これによると、大地震による死者数は減少してきているが、10年ごとの総計は未だ10万人近い数字にのぼり、依然として安全性の確保が最重要課題であることを示している。一方、経済損失額を見ると、社会・経済の成熟とともに近年その値が急増しており、このうちのある割合が建築物の損傷や機能の停止に起因するものであることを考えると、損傷の低減や機能回復の潜在的な需要は世界的にも高いことがわかる。

2) 事業継続計画 (BCP) に関する動向

今日では、上述のような地震被害の経験により、災害時にも事業が継続できることや、最も根幹となる業務の操業レベルを早急に災害前に近づけられるよう、事前の備えを行うことの重要性が企業の間で強く認識されてきている。

そして、災害時に重要な業務が中断しないこと、また万一事業活動が中断した場合であっても目標とする復旧時間内に重要な機能を再開させ、重大な損益や企業評価の低下等から企業を守るための戦略である「事業継続計画 (BCP: Business Continuity Plan) (図2)」が国内外で注目されている。我が国でも内閣府中央防災会議のもとに設置された「民間と市場の力を活かした防災力向上に関する専門調査会」が、平成17年8月に事業継続ガイドライン第一版³⁾とチェックリストを公表し、全ての企業に対してBCPの策定を求めた。我が国では、どのような自然災害等に遭遇しても重要な業務を中断させないという経営戦略に関する取組みが遅れているというのが今日の企業を取り巻く一般的な状況^{*1}であるが、このような取組みを進めれば当該企業自身のメリットだけでなく関連企業との取引を通

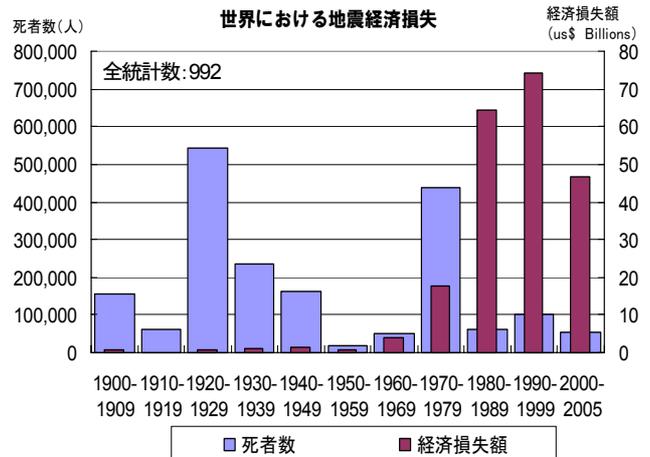


図1 20世紀に全世界で発生した地震被害による人的損失と経済損失

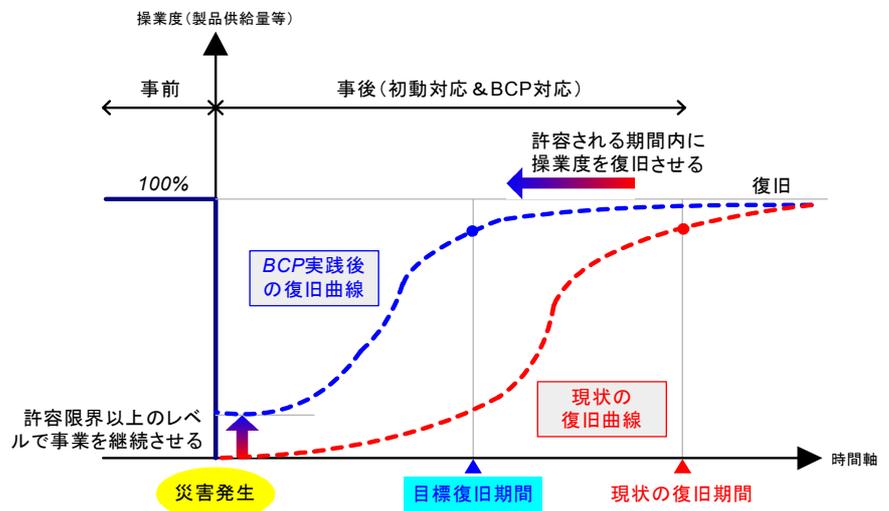


図2 事業継続計画 (BCP)

じた連鎖的な影響も少なくなり、災害の間接的被害額を減らすことが出来るというのが本ガイドライン作成の動機である。ガイドラインでは、はじめに想定する災害として地震を推奨し、その後段階的に想定する災害の種類を増やしていく現実的なアプローチを例示している。

そして平成18年2月には、本ガイドラインに基づいた事業継続計画を民間企業に普及させるための検討委員会が内閣府に発足している。ここでは、より具体的な業種別（建築物用途別）、規模別のガイドラインの作成に資する検討が進められている。また平成18年4月に原案が明らかになった「首都直下地震防災戦略」では、建築物の耐震

*1：日本の大企業でBCP作成済みは21.6%、作成中は22.7%。一方、米国の大企業でBCP作成済みは67.0%、作成中は28.0% (KPMG ビジネスアシュアランス(株), 2004)

化率（90%）や家具の固定率（60%）だけでなく、企業による事業継続計画の策定（大企業100%・中小企業50%以上）に関する数値目標も掲げられた。これにより、112兆円と推定される首都直下地震による経済被害額のうち、45.2兆円にのぼる間接被害額（生産活動の停止による被害額など）の軽減を目指す。これと、耐震化率90%の目標により得られる直接被害額（建築物の復旧に関する被害額など）の軽減と合わせて、全被害額を10年間で4割削減し、70兆円とすることが目標として掲げられている。

以上の政府による取組みだけでなく、最近では総合建設会社でも、例えば半導体生産施設のBCPを支援する地震リスク評価システムが実用化されており、損傷評価だけでなく復旧期間や費用対効果の評価まで対象とした構造設計技術の開発が進んでいるところである。しかしながら、それらの多くはこれまでの地震被害の統計的データを利用するものであり、個別建築物の応答と損傷および機能低下の関係にまで踏み込んで評価するというところまではまだ到達していないようである。

3) 被災後の迅速な機能回復を指向した構造性能評価の必要性

1) および2) に示した近年の地震被害事例及びそれに係る動向を踏まえると、以下に掲げる観点にしたがって建築物の構造性能を改めて捉え直した上で、被災後の迅速な機能回復を指向した新たな性能評価軸の提案（導入）が必要であると考えられる。

- ・機能回復性に対する共通概念の構築と一般への普及： 一般の方々のみならず構造設計者にも、機能回復に関する共通認識が不足していることから、まずは共通概念の構築が必要である。
- ・建築物ごとの機能や機能回復性に応じた構造性能評価： 建築物ごとに異なる損傷度合いや機能低下の状況を反映するためには、統計的なデータに基づく評価だけではなく、個別の建築物の機能や構成要素の違いを考慮した評価法の構築が必要である。
- ・架構の応答と建築物各部の応答および建築物機能への影響の関係整理： 構造部材に加えて非構造部材や設備・什器の被害も建築物の機能に及ぼす影響が大きいいため、架構の応答と建築物各部の損傷、

および、それらの建築物機能への影響の整理が必要である。

- ・損傷の修復方法に関する情報の整理： 建築物各部の損傷ごとに採用できる修復方法と、修復に要する期間や費用に関する評価用共通データの蓄積・整理が必要である。

III 「機能回復性」に基づく性能設計の体系

本章では、機能回復性の考え方を取り入れた構造性能設計体系（フレームワーク）の一つの例を示す。今後、これを基に議論が展開され、共通の概念が構築されることを期待する。

1) 機能回復性の定義

ここではII章の背景を踏まえ、地震後の建築物の機能回復のし易さを表す性能として「機能回復性」を新たに定義する。建築研究所は、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」（以下、新構造総プロ）において、性能設計における建築物の基本構造性能として、「使用性」、「安全性」、「修復性」の3つを掲げ⁴⁾、これら3つの基本構造性能に基づく設計プロセスの実現を世に促したが、本研究で定義する「機能回復性」の概念は、新構造総プロで定義された「修復性」の概念を拡張したもので、両者の間には主に以下の違いがある。

・新構造総プロでの「修復性」の概念： 地震後の建築物の「財産保全」を主な目的とし、建築物の損傷を、各性能評価項目で設定された建築物の物理的な修復限界に収めることで、地震後の建築物の修復のし易さを確保する。

・本研究での「機能回復性」の概念： 新構造総プロでの「修復性」の概念に加え、地震後に発生する建築物の修復費用と修復期間を、建築物の機能の観点から建築主が（設計者と合意して）定めた目標修復費用および目標修復期間に収めることで、地震後の建築物の機能回復のし易さを確保する。なお、事業継

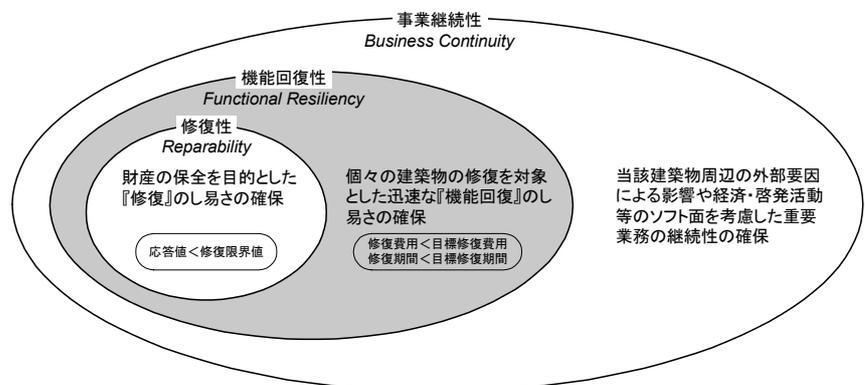


図3 「機能回復性」と修復性・事業継続性との関係

統計画（BCP）では、当該建築物周辺の被害やライフラインの被害なども想定するが、本検討での「機能回復性」の概念では、個別建築物の設計においてコントロールできる範囲を対象とし、これらの当該建築物外の要素に起因する影響は含んでいない。ここで提案する「機能回復性」の概念と修復性・事業継続性との関係を図3に示す。

2) 機能回復性に基づく設計検証フロー

1) で定義した「機能回復性」に基づく設計検証フローを、図4に示す。以下、図4のフローに沿って、設計検証プロセスの主要項目を概説する。

・START

・建築物用途

建築物機能は主としてその用途と密接な関係があり、また用いられる構造方法や建築物各部の仕様も建築物の用途に因ることから、「機能回復性」の設計においては建築物用途を陽に捉える方針をとる。

・事業継続計画（BCP）

「機能回復性」の最終的な検証は、修復費用と修復期間の2つの指標によって行われる。両指標の目標修復費用と目標修復期間の値は、事業継続計画（BCP）の中で、他の様々のリスク軽減措置（企業の分散、データのバックアップ、防災教育、ライフライン対策など）や企業の収益予測などを勘案して、建築主の要求値として割り出される。ただし、これらの要求値の割り出しは、構造設計者が建築主に対し、建築物の修復に関わる情報を積極的に提供した上で、設計者と合意の上で行われる必要がある。なお、事業継続計画（BCP）の対象建築物には、通常、集合住宅や防災拠点や避難所としての公共建築は含まれないが、ここでは、建築物の機能に着目することから、同様の考え方で目標修復費用と目標修復期間が定められる。

・基本構造性能

本研究で定義する「機能回復性」の概念は、新構造総プロで定義された「修復性」の概念を拡張したものである。ここでは、従来の「修復性」の概念との融合・連続性を図る意味から、まず従来の「修復性」のルートで設計検証を開始する。なお、使用性、修復性、安全性の3つの基本構造性能に対する設計検証の順序については、設計者の判断に委ねられる。

・目標性能水準

性能の目標水準は、想定する荷重外力とそれに対応する建築物の状態とのセットで設定される。

・修復性の1次検証までのプロセス

まず、構造体の断面寸法を決めた上で、構造体のモデル化、地震動のモデル化を行う。次に、設定されたモデルに対して応答評価を行い、損傷評価に必要な工学的指標（最大層間変形、応答加速度など）の応答値を算出する。また、非構造部材や建築設備、收容物についても、具体的な仕様の設定を行い、構造体の応答評価で求められた最大層間変形、応答加速度などの値に基づき、損傷評価に必要な工学的指標の応答値を算出する。最後に、損傷状態に関するデータベース^{*2}を用いて、目標性能水準で設定した建築物各部の物理的な修復限界状態を、対応する工学的指標の限界値に換算し、限界値と応答値を比較することで修復性の1次検証を完了する。この1次検証は、従来の修復性の性能評価項目に基づく検証である。ここでの建築物各部位の物理的な修復性の検証を通じて、間接的にある程度の経済性が確保されるが、この段階では、建築主が最も関心のある修復費用と修復期間の直接的な検証は行われない（この検証については、次の2次検証で対応する）。

・修復性の2次検証までのプロセス

1次検証までに明らかになった建築物の各部位の損傷状態を基に、まず、建築物全体の修復目標および計画の策定と修復方法の特定を行う。次に、特定された修復方法に対応する修復費用と修復期間を、修復方法に関するデータベース^{*3}から算出する。最後に、これらの値を、最初の事業継続計画（BCP）で割り出された目標修復費用および目標修復期間と比較することで、修復性の2次検証を完了する。もし、2次検証の結果がNGである場合は、再度、修復計画の策定をやり直し、同様のプロセスを行う（2度目の検証結果もNGで、修復計画の変更だけでは対処できないと判断される場合には、設計をはじめからやり直す必要がある）。

・性能表示

修復性の1次・2次検証を通じて確認された当該建築物の「機能回復性」の評価結果を、施主や使用者にわかりやすく説明する。

・END

*2：「損傷状態に関するデータベース」とは、構造体、非構造体の各部位の損傷状態と損傷を支配する工学的指標との関係や、実験データ等に基づいて集積したものである。現状では、特に、非構造体に関するデータベースが整備されていないため、今後、各建築物用途のボトルネックとなる部分を中心に、データを拡充していく必要がある。

*3：「修復方法に関するデータベース」とは、修復方法別の修復費用と修復期間のデータを、実験データ等に基づいて集積したものである。現状では、修復費用、修復期間ともに、データが不足しているため、今後、各建築物用途のボトルネックとなる部分を中心に、実験データを拡充していく必要がある。

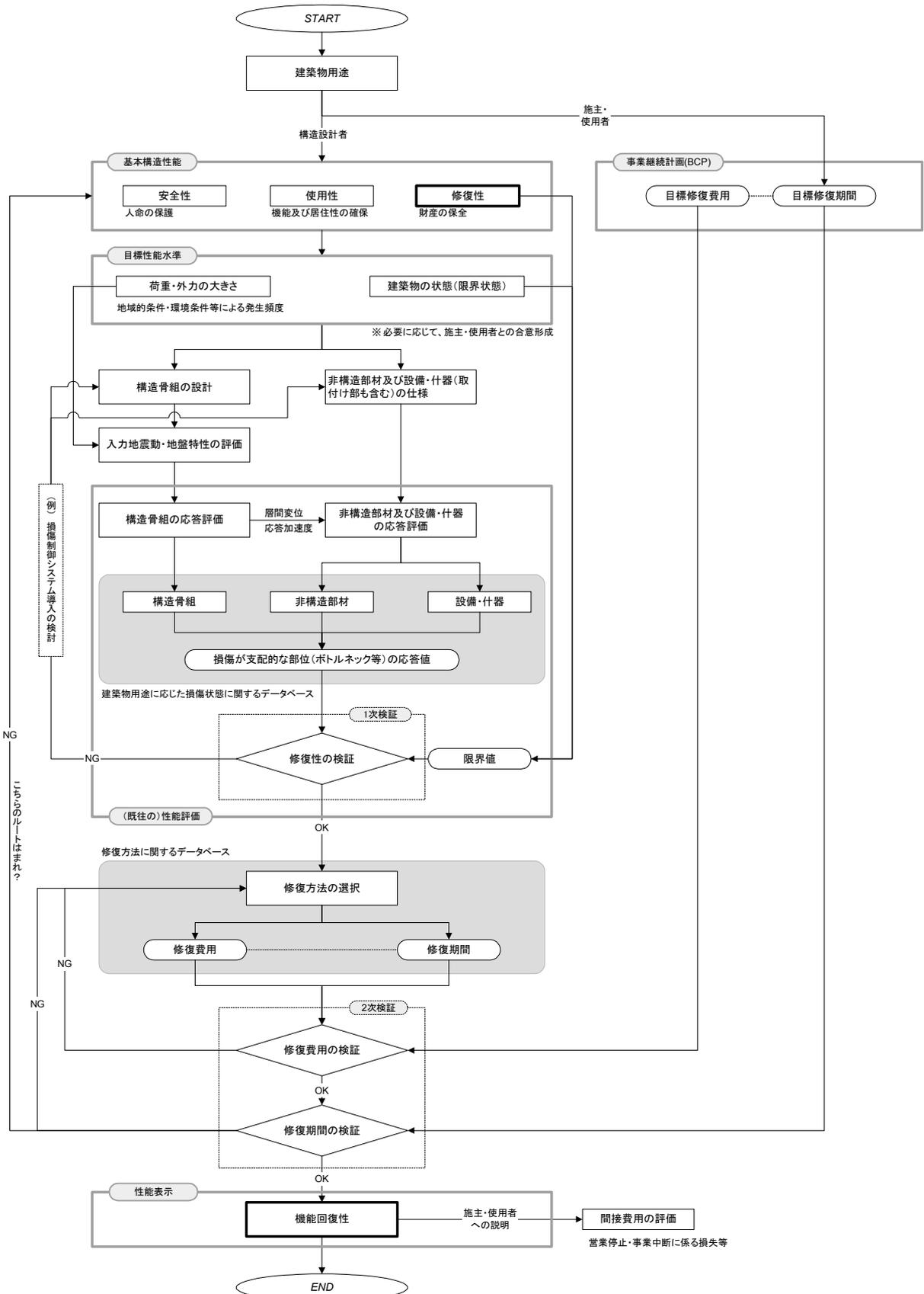


図4 「機能回復性」に基づく設計検証フロー

表1 復旧レベルと時間

T0	(復旧不要)
T1	3日以内
T2	3週間以内
T3	3ヶ月以内
T4	3ヶ月以上
T5	(復旧不能)

表2 復旧レベルと各部分の損傷状態 (生産施設)

復旧期間 レベル	T0	T1	T2	T3	T4	
構造 骨組	無被害	無被害	軽微な被害 弾性範囲で被害 が収まる程度	小破	中破・大破 残留変形が残り 補強が必要	
非 構造 部材	生産 エリア	無被害	無被害	軽微な被害 壁・天井の要補 修	小破 壁・天井の要補 修	中破・大破 残留変形が残り 補強が必要
	非生産 エリア	無被害	軽微な被害	小破	中破	大破
設備機器 什器備品	無被害 生産装置の点検 不要	無被害 生産装置の点検 後再稼動	軽微な被害 生産装置の軽微 な補修	小破 生産装置の要修 理・交換・調整	中破 特殊な生産装置 が損傷・要交換	

3) 関連する他の類似検討との比較

2) の「機能回復性」に基づく設計検証フローでは、新構造総プロで確立された性能設計法の枠組をベースとし、新たに定義された「機能回復性」という概念に基づき、建築主にとって関心の高い修復期間、修復費用の2つの指標の観点から、性能検証が行われる。同様の試みは米国においても現在進められており、FEMA273、FEMA356等⁵⁾に続く、次世代性能設計法としてのATC-58での活動⁵⁾を中心に、現在プロジェクトが進行中である。

ATC-58が目指す性能設計の特色は、設計者が評価できるだけでなく、多様の意思決定者にとって使いやすい性能指標を表示する点であり、具体的には、3つのD(Deaths, Dollars, Downtime)による性能指標が用いられる。このうち、DollarsとDowntimeについては、本研究の修復費用と修復期間に概ね対応しており、性能設計の展開における両プロジェクトの基本的な方向性は概ね一致していると考えられる。しかし、これらの性能指標の算出に必要な損傷状態に関するデータベースや修復方法に関するデータベースの設定方法や中身については、両国の異なる設計法などの背景から、今後、両プロジェクトの間に様々な違いが生じてくるものと考えられる。

その他、修復費用や修復期間の算出を目指す試みとしては、HAZUSを用いた手法⁶⁾、PML(Probable Maximum Loss)指標を用いた手法⁷⁾などが挙げられる。これらの手法で使用される損傷度を表す関数(通常、フラジリティーカーブと呼ばれる)は、過去の広域にわたる建築物の地震被災データを基に、主に特定の地域群・建物群の建築物を対象として、大胆に平均化された関数として提示されるのが一般的で、本研究の提案のように、建築物の個々の構造部位、非構造部材、建築設備、収容物とい

ったディテールにまで踏み込んで提示されるものではない。従って、これらの手法を個別の建築物に適用して算出される修復費用や修復期間の値は、特定の地域群・建物群における大まかなリスクの目安としては参考になるが、その予測精度が十分保証されているとはいえない(これらの手法から算出された値の正確さは、未だ、実大実験などで検証されていない)。

IV 「機能回復性」に関する既往の検討と課題

1) 日本建築構造技術者協会と共同で実施した建築物の機能回復に関する検討の概要

① 検討内容と結果

建築物の所有者等からの要求が高い被災後の機能確保や迅速な機能回復に資する基礎的な知見を得ることを主目的として、地震直後の建築物の事業継続性に加えて、防災拠点や避難所としての機能継続性や集合住宅での居住継続性の把握に関する検討を行った。具体的には、事務所・生産施設(工場)・病院・公共施設・集合住宅の5用途を対象として、復旧時間レベルを表1に示す6段階に分類した後、その復旧時間に応じた建築物の損傷状態を「構造骨組」、「非構造部材」、「設備機器」に分けて整理した。

その一例として、生産施設(工場)に関して検討した結果を表2に示す。同表では非構造部材は生産エリアと非生産エリアに分けて損傷状態を整理したが、生産施設で同じ復旧性能レベルを有するためには、地震に対する非構造部材や設備機器の性能が、構造骨組の性能と同等のレベルである必要があることが分かる。またT1レベルにおいて、設備機器や什器備品の損傷状態は無被害にも関わらず、生産装置の点検後の再稼動に復旧時間を要することにも注意が必要である。このことより、施設規

模によっては点検作業が支配的となり、復旧時間が長くなることもあると予想される。

② 抽出された課題

- ・ 建築物用途別に応じた検討は、ボトルネックとなる部位の把握、並びに、建築物の事業継続性や復旧性能の評価において必要かつ効果的である。
- ・ 天井や内外装材等の非構造部材や設備機器等による被害が事業継続に与える影響も大きいため、どのような工学量と対応付けるか整理した上で、構造骨組と併せてそれらの影響を設計時に考慮できる枠組を構築することが必要である。
- ・ 損傷状態に対応した復旧期間の定義に当たっては、広域的な被害の復旧やライフライン自体の復旧の考慮の有無に基づく条件付の整理が必要である。

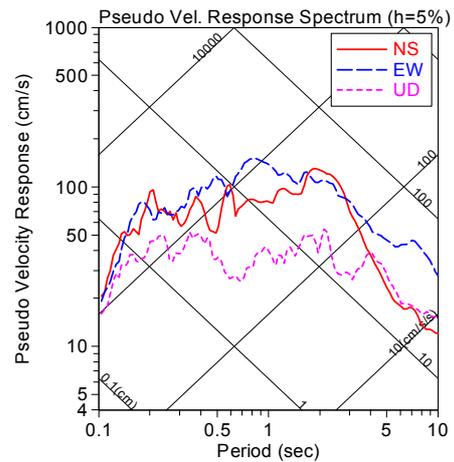


図5 5%擬似速度応答スペクトル（本震）

2) 平成16年新潟県中越地震による病院建築物の地震被害と復旧に関する検討

文献8)では、地震後の機能維持が必要となる建築物の耐震性に関する考え方を明らかにすることを目的として、平成16年新潟県中越地震による被害と復旧に関する多様でかつ有用な情報が得られた病院建築物を対象として、以下に示す項目について取りまとめた。

- ・ 免震建築物の地震時挙動と機能維持
- ・ 建設年代の異なる耐震建築物の被害性状と地震応答解析による被害原因の究明
- ・ 病院建築物の復旧工事および補修方法と費用

ここでは、上記項目の中から建築物の地震被害の状況と復旧工事の内容について紹介する。このような事例は、有用な情報として今後積極的に調査し蓄積すべきであろう。

① 入力地震動レベルと建築物の被害概要

本病院は震央に近い新潟県小千谷市内にあり、当該病院は近くに付属施設である免震構造の老人保健施設を有する。本地震では、この免震ピットに設置されていた地震計により、図5に示す記録（疑似速度応答スペクトル）が採取できており、1995年兵庫県南部地震における神戸海洋気象台の記録に似た極めて大きな地震動が建築物の基礎部分に入力していたことが分かる。

図6に被害を受けた病院建築物の平面概要を示す。当該建築物は竣工年代の異なる5棟の施設からなり、最も古い検査棟は昭和30年代であり、最も新しい本館は平成2年の竣工である。なお、検査棟と東棟を除く西棟・医局棟・本館の構造設計は何れも新耐震設計法による。これら5棟の建築物の被害概要は、

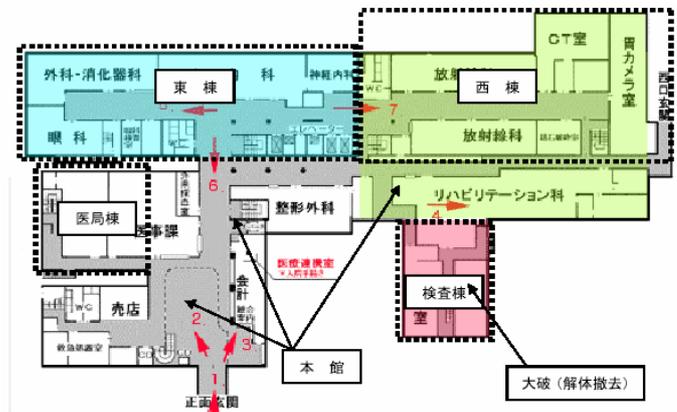


図6 建築物の平面概要

以下の通りである。

東棟

- ・ 全体的にひび割れが多く、西棟とのEXPJカバーが破損（2～8階）した。
- ・ 3、4階の階段部大梁がせん断破壊した。
- ・ 1、2階の耐震壁に2mm程度のひび割れが生じており、2階にせん断破壊の雑壁があった。
- ・ 5～8階の廊下部大梁に仕上 plasterの剥落があった。
- ・ 全体的に柱は健全であり、軸力の保持は出来ていた。

西棟

- ・ 袖壁が一カ所でせん断破壊していたが、全体として壁や柱のひび割れは小さく、構造体の被害は軽微であった。
- ・ 南面2階外壁の仕上モルタルが剥落していた。

本館・医局棟

- ・ 全体的として、構造体に大きな被害は見られない。
- ・ 一部外壁の仕上モルタルが破損した。

・EXPJ部の天井が垂れ下がった。

検査棟

・1、2階でそれぞれ2本の柱がせん断破壊した。せん断破壊した1階の柱は、コアのコンクリートが圧壊し、主筋が外側に座屈しており、軸力保持能力を喪失していた。

・東側の2本の1階の柱に、せん断ひび割れが生じた。

② 被災した建築物の復旧内容

一部の棟（検査棟）に大破の被害が生じたが、その他の棟に関しては構造体の被害レベルはおおむね「軽微」であった。そのため、頻発する余震の中で怪我人を受け入れ、緊急治療を行うことができた。その後、重症入院患者を他病院に移送した上で、電源車による電力供給および病院所有の非常用電源によって緊急治療を継続し、9日目の11月1日に内科が、16日目の11月8日に全科目での診療が可能になった（応急復旧完了）。入院患者等が一時避難した免震建築物の存在も、早期再開を支援した。しかし、この様に段階的に医療機能を復旧させたものの、総合病院として完全復旧したのは約5ヵ月後（159日目）の2005年3月31日であった。構造躯体が比較的軽微な損傷であっても、給排水や電気ガス等の設備系統の調査・補修、医療機器類の再調整、内外装等の補修など広範囲に及ぶ適切な手当が必要であり、医療機能を復旧させるには多くの業種と作業人工を要することを経験した。

そこで、ここでは総合病院施設が復活するまでの約5ヶ月に及ぶ工事記録を時系列で分析し、復旧業務の内容と導入人工の関連を述べる。

i) 応急復旧内容

電力は震災4日目に復旧し、その間、非常用電源（2日間）、電源供給車（2日間）の供給を受けた後、4日目の10月27日に復電した。その後、上水およびガスが震災9日目および10日目に復旧した。インフラ関係の復旧と並行して、建築物内では主に電気・衛生・空調の設備系統の緊急復旧作業が行われ、点検・補修・試運転等を経ておおむね3週間後に応急復旧が完了した。その間に要した人工を図7に示す。図より、震災一週間目と二週間目の二つのピークがあり、応急復旧作業に特徴があることが分かる。次に、図8は、日々の合計人工に占める各分野（空調・衛生・電気）の比率を示したもので、一週間目は主に電気設備分野、二週間目は主に空調設備に要する人工比率が大きいことが分かる。1～2日目の衛生設備の比率が大きいのは、これは消火栓等からの漏水対策に要した人工がほとんどであり、病院機能復旧に直接関連するものではない。以上から、医療機器本

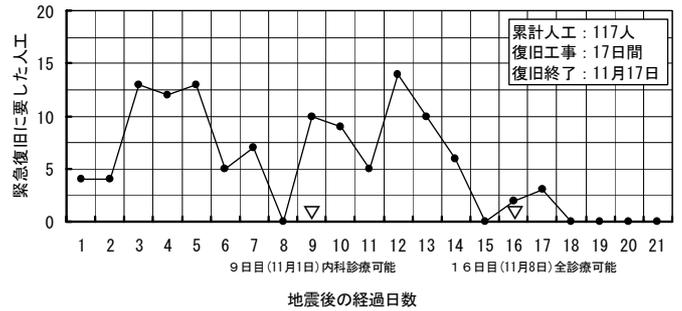


図7 応急復旧に要した人工の時系列表示

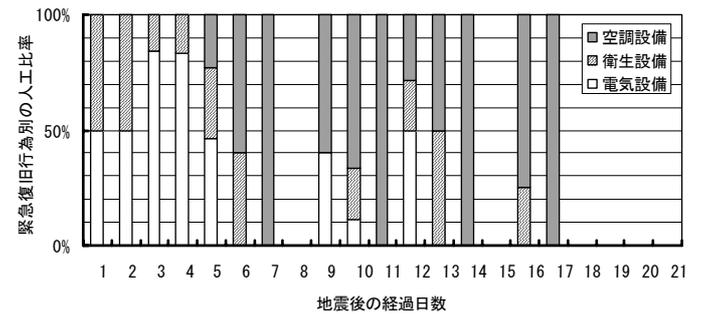


図8 応急復旧作業分野別人工比率の時系列表示

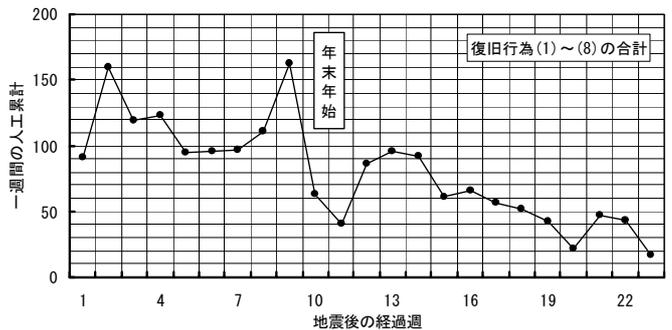


図9 完全復旧に要した人工の時系列表示

体の復旧作業を除けば、病院機能を復旧させる根幹は電力供給であり、次いで、冷温水供給などの熱源機器に関連する空調設備であると言えよう。

ii) 完全復旧に係わる業種と各復旧作業の比率

被災建築物の復旧に向けて多くの業種が関与した。例えば、調査専門の業種があるわけではないから、建具や仕上げ材の種類毎に専門業者が被災度を調査する。よって、関与する人数は膨大な数になる。一般に、建設工事では日々の職人の出入りを示す出面（デズラ：作業内容と専門業種別の人数）が基本データであり、本復旧工事においても詳細な記録があった。そこで、以降の分析を簡潔にするために、表3に示す様に全業種を7分野の復旧行為別に大別し、出面記録に基づいて夫々の人工を復旧行為別に再集計した。

地震発生時（10月23日）から7日間を第一週とし、以降の復旧工事完了までの23週について、週毎の人工の変化を図9に示した。第1～2週目にかけて主要設備の復旧が行われ、その結果、主要機能を応急的に回復して診療を開始した。その後、人工は低下するが100～120人工週で復旧作業は継続し、年末を控えた第9週目に再びピークを迎え、平均して一日当たり約160/7≒23人の人工が投入された。人工は年末年始の休暇で一時落ち込むが、再度、休暇明けの第12週目から約90人工週と上昇する。これは検査棟（大破）の解体作業が年明けから開始したためであり、この作業がおおむね収束に向かう第15週目から、復旧作業は徐々に収束に向かった。

全人工に占める各復旧作業の比率を図10に示す。当然ながら(5)改修の占める割合は大きく、約37%（検査棟の影響を除くと約45%）に達する。また、(8)管理は主に元受施工の社員人工であり約20%（検査等の影響を除くと約25%）にのぼり、頻発する余震の中で多種多様な職種と職人を統率し相当の人工を要したことが伺える。

③ 抽出された課題

上記の検討より、建築物の機能回復（事業継続・居住継続）に関して抽出された検討項目を以下に示す。

- ・建築物の用途別に、災害時に保有すべき性能を明らかにする。
（必要性能の抽出）

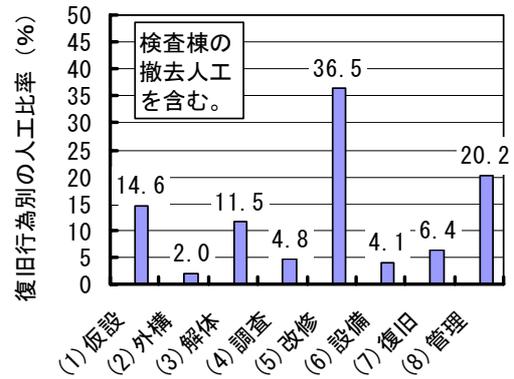


図10 全人工に占める復旧作業(1)～(8)の比率

- ・大地震動が作用した場合の建築物の損傷の状況を大型構造実験などにに基づき定量的に把握する。（構造実験による地震時損傷評価）
- ・建築物の地震応答解析により、建築物の揺れの大きさや損傷の程度を把握するために、建築構造モデル・解析手法をより高度化する。（応答評価（予測）手法の精緻化）
- ・建築物の損傷に対する修復技術および修復期間、さらに、修復後の建築物の性能を把握できる評価方法を開発する。（修復方法及び期間と修復後性能）
- ・復旧に関する日数や費用、業務停止に関わる損失の算定手法

表3 復旧工事に係わる業種一覧

復旧行為	作業内容	専門業種	
(1) 仮設	片付・養生, 足場設置, 片付け, 廃材運搬, 資材運搬, ガードマン, 嵩工, クレーン, 非常電源など	シーリング工, アスロック工, 嵩・土工, 造作大工, 鍛冶工, 板金工, サッシュ工, はつり工, 止水工, 防水工, 金物工, 塗装工, タイル工, 内装工, ガードマン, 硝子工, PT工, 測量士, クレーン, アンカー工, クリーニング工, 鉄筋工, E L V工 など	
(2) 外構	アスファルト舗装, 地割れ埋立, 不陸調整など		
(3) 解体	天井・壁解体, はつり, 地上解体, 基礎解体, 間仕切りなど		
(4) 調査	木製建具調査, SD調査, AW点検, プライント調査, 石貼り調査, 防水, 測量, 躯体調査, 医療機器調査など		
(5) 改修	EXP.J躯体・金物, 外壁クラック注入, 天井・壁張替, 塗装工事, 左官工事, タイル工事, 床・巾木・加張替, シーリング, 看板・サイン, アスロック外壁, 石貼り, 防水, 医療機器シールド, クリーニング, 鉄筋組立, 手摺など		
(6) 設備	空調, 衛生, 消火, エレベータ, 電気系統など		
(7) 復旧	初動対応（インフラ, 建築設備）		図7に対応
(8) 管理	工事監理, 作業所管理など		（元請建築社員）

を開発する。(災害時における損失の定量化)

- ・機能継続性のために社会から必要とされる構造技術を開発する。(損傷制御あるいは機能維持性能を有する建築構造)

V 「機能回復性」に関する新しい重点研究課題

前章までの検討と抽出課題を受け、建築研究所では平成19年度から新たに「**建築構造物の災害後の機能維持／早期回復を目指した構造性能評価システムの開発**」と称する重点研究課題を3年計画で立ち上げる予定である。本章では、その概要を紹介する。

① 位置付けと目的

II章で述べたとおり、今後の構造設計においては、耐震余裕度の評価だけでなく地震等の災害発生後の機能維持や早期回復を指向した修復性能の評価を求められるケースが増えてくると予想される。このような評価を行うためには、災害時に建築物がどのような応答状態にあり、それが建築物の機能にどのような影響を及ぼすか、さらにその損傷の修復にはどのような方法があり、どれくらいの修復期間と費用を要するかを明らかにする必要がある。

そこで本課題では、これらを実現するに当たり共通の概念と評価手法を開発する等総合的な技術開発を要する項目、すなわち「機能継続／機能回復性評価に関する枠組みとプロセスの構築」、「修復性評価のための設計用オープンアーカイブの構築」、「機能継続／機能回復性評価指針の策定」、および「構造性能の説明／表現手段の提案」を主要なテーマとして取りあげる。ただし、損傷を低減するような構造技術や効果的な修復技術などの開発はここでは直接には扱わない。それらは、今後さまざまな機関で開発されることを想定している。なお、設計用オープンアーカイブは、本課題のみで完成するものではなく、その後も継続的にデータを蓄積していくことが肝要である。特に、非構造部材や設備機器に関する情報は極めて限られ、これらを新たに実験等で調べて蓄積することも容易ではない。本課題では、構造部材を主体として、できることからデータの蓄積を行うという考えに基づいて活動する予定である。今後においても、関連する多くの機関によるためめ努力と協調が必要であろう。

検討に当たっては、建築物のオーナーやユーザーが重視する諸観点(企業の事業継続性や社会的責任、住宅の機能維持等)を積極的に構造性能の評価尺度に導入すること、また、一般の人々に対して構造性能の明快な伝達手段を提供することを念頭

に置いて、建築基準法の最低水準にとらわれない自由な構造性能水準へのインセンティブとなる機能回復性評価システムの提案を行う。

なお、本課題においては、通常の構造設計に機能継続や機能回復の観点を取り入れることを考えているため、個別の建築物についてその構成要素や仕様の違い等も考慮しながら評価することを目標としている。そのため、さまざまな建築物で得られた既往の被害データを平均化する、いわゆるフラジリティカーブを用いる方法は採用していない。これは、本課題の特徴のひとつでもある。

② 研究内容

1) 「機能継続性／機能回復性」評価に関する枠組とプロセスの構築

建築構造物が災害後においても機能維持できるような、または損傷等により機能障害が生じたとしても早期に回復できるような建築構造物の設計に資するために、新たに「機能回復性」評価の概念を提案し、その枠組とプロセスを構築する。具体的には既往の性能評価体系に加え、施主・使用者等が目標とする修復費用および期間に対して、建築物用途(機能)や修復方法に基づく検証プロセスが求められる。

2) 修復性評価のための設計用オープンアーカイブの構築

建築構造各部の被災時の状態と建築物の機能への影響、および修復の容易さ(困難さ)といった機能回復性を評価するために、これらに関する既往のデータを収集し、また、構造実験や振動台実験等を通して必要なデータの蓄積を行い、損傷状態や修復性評価に関するデータベースを作成する。ここで、機能回復性は建築物の種類や機能によって大きく異なるため、病院、事務所、工場、公共建築、集合住宅などのプロトタイプ建築物を設定し、それぞれの試設計に基づき抽出された典型的な構面に対するモデル架構の静的加力実験や、部分抽出モデルによる動的実験等を実施し、これにより、建築物各部の損傷状態とそれを表す工学量、およびそれらが建築物の機能へ及ぼす影響や修復に関する情報を取得し、これを設計用オープンアーカイブとして取りまとめる。

3) 「機能継続性／機能回復性」評価指針の策定

2)の設計用オープンアーカイブの情報を用い、1)の枠組みに従って具体的な建築物の「機能継続性／機能回復性」評価を行うための統一的な評価指針を策定し、提示する。また、病院、事務所、工場、公共建築、集合住宅などのプロトタイプ建築物を対象に試設計を行い、ここで提示する評価指針の検証を行う。

さらに、試設計の結果を評価の具体例として提示し、「機能継続性／機能回復性」評価の特徴をまとめるとともに、ポトルネットワークとなる評価項目に関する検討を行う。

4) 「機能回復性」に基づく構造性能の説明方法／表現手段の提案

1)～3)の検討結果を踏まえて、「機能継続性／機能回復性」に関する構造性能の説明方法及び表現手段の提案を行う。これらにより、建築物の施主や使用者等が目標とする修復費用や修復期間に応じた構造性能に対して、構造設計者がアカウンタビリティを遂行できるものと考えられる。また、「機能継続性／機能回復性」評価の内容や必要性を教育の場などで説明するために必要な内容を資料としてとりまとめる。

③ 予想される成果

本課題の期待されるアウトプットは下記の通りである。

- ・機能継続性／機能回復性の評価体系
- ・修復性評価のための設計用オープンアーカイブ
- ・機能継続性／機能回復性評価指針と評価例
- ・機能回復性に関する表現ツール・説明資料

これらにより、以下のようなアウトカムが期待される。

- a) 災害からの機能回復性を含む建築構造性能が、一般の建築物のオーナーやユーザーに理解される。
- b) 事業者が策定する事業継続計画（BCP）に本課題で提案する評価手法が反映され、復旧のための期間や費用が検討される。
- c) 住宅建築物の購入の際に災害からの機能回復性の観点が反映される。
- d) 高い機能回復性を有する構造物の建設が促進される。
- e) 機能回復性を高める技術開発が促進される。
- f) 建築物ユーザーの防災意識が高まる。

VI おわりに

本稿では、安全・安心を目的とした社会からの新たな要求として、震災後における建築物の迅速な機能回復を取り上げた。第Ⅱ章でも述べたように、近年の地震被害から顕在化された問題や、国家レベルでの防災戦略を踏まえると、被災後の機能維持／早期回復に関わる技術開発の必要性はますます重要性を増すと考えられる。今後、多くの関連する機関が継続的に協調しながら技術開発を進めていくことが望まれる。

次年度より開始予定の重点研究課題においては、関連する多くの機関で目的意識を共有し、有機的かつ効果的に活動を進め

る必要がある。社会が求める真の意味での性能設計体系の構築に向けて、是非とも広く関係各位のご協力をお願いしたい。

参考文献

- 1) 日本建築学会：2005年福岡県西方沖地震災害調査報告、2005.9
- 2) Center for Research on the Epidemiology of Disasters (CRED) の Emergency Disasters Data Base. (<http://www.em-dat.net/>)
- 3) 内閣府中央防災会議：事業継続ガイドライン第一版、2005.8
- 4) 建設省大臣官房技術調査室監修・(社)建築研究振興協会編：建築構造における性能指向型設計法のコンセプト－仕様から性能へ－、技報堂出版、2000.7
- 5) Applied Technology Council. ATC-58, Guidelines for Seismic Performance of Assessment of Buildings 25% Complete Draft, Redwood City, CA. 2005.11
- 6) Federal Emergency Management Agency, HAZUS99 technical manual, Washington D.C., 1999
- 7) (社)建築・設備維持保全推進協会・(社)日本ビルディング協会連合会：不動産投資・取引におけるエンジニアリング・レポート作成に係るガイドライン、2001.6
- 8) 福山洋、飯場正紀、斉藤大樹、向井智久、鴛田隆、溜正俊、太田俊也、福島順一、小山実、長島一郎：「平成16年新潟県中越地震における小千谷総合病院の地震応答に関する調査報告書」、建築研究資料、第105号、2007.1