

災害後の建築物の機能維持・早期回復を目指した構造性能評価システムの開発

森田 高市¹・向井 智久¹・福山 洋²・加藤 博人²・斉藤 大樹¹

¹独立行政法人建築研究所 国際地震工学センター (〒305-0802 茨城県つくば市立原1)

²独立行政法人建築研究所 構造研究グループ (〒305-0802 茨城県つくば市立原1) .

本研究では、災害に対する安全性の評価だけでなく、地震等の災害発生後の機能維持や早期回復が可能となるような建築構造設計・評価体系（「新たな構造性能評価システム」と呼ぶ）の枠組みについて、提示し、具体の病院建物への適用例を示した。試評価の結果、地震波（JMA-KOBE NS（1995）と告示波）に対する損傷状態の評価と、修復費用・修復期間の推定が可能であった。

キーワード 機能維持，早期回復，構造性能評価，設計体系，データベース

1. 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。

本研究では、災害に対する安全性の評価だけでなく、地震等の災害発生後の機能維持や早期回復が可能となるような建築構造設計・評価体系（「新たな構造性能評価システム」と呼ぶ）の枠組み構築等について検討を行い、ここではその概要について紹介する。

2. 研究の背景

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。

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目立ってきており、さらに被災した建築物の利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。

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作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）」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²⁾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。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ころまではまだ到達していないのが現状である。

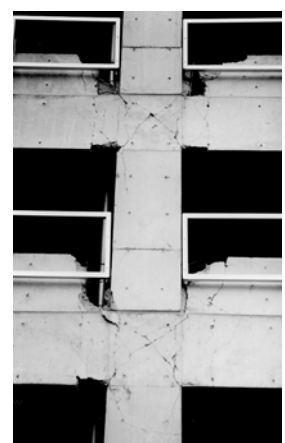
3. 建築物の機能維持／早期回復を目指した構造設計の考え方

この研究で提案する「新たな構造性能評価システム」のフローを図1に示す。従来、一般に行われてきた構造設計は、図中の破線より上の部分に相当する。設計する建築物に対して目標水準を設定し、部材算定を行った後、構造解析等によって建築物の地震に対する応答性状を評価する。応答値（変形や荷重）が建築構造物、あるいは部材の保有性能（限界値）以下に収まっていることもって構造安全性を確認し、構造計算は終了となる。

「新たな構造性能評価システム」で特徴的なのは図3の破線よりも下の部分、「機能維持・早期回復のシナリオ」と表示した部分である。構造計算結果から、「機能維持・早期回復」を評価する上で必要となる「損傷状態」、「機能障害」を推定する方法を提案している。構造部材だけでなく非構造部材や設備機器、什器も評価対象として地震後におけるそれぞれの状況を予測し、そこから、建築物の機能がどの程度阻害され、業務や生活の困窮度がどの程度になるか（という点にも着目した内容となっている機能喪失のシナリオ）。さらに、建築主や建築物の利用者が重視する修復費用や時間を積極的に耐震性能の評価尺度に導入できるように、修復性の評価方法も提案している（機能回復のシナリオ）。



(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

また、「新たな構造性能評価システム」を使用することになる構造設計者・技術者にとって運用しやすいシステムであること、さらに、建築主や一般市民が地震後の状態を理解できるように、工学量を平易に説明する表示

手段と情報伝達ツールについても検討を行った。

「新たな構造性能評価システム」の手順を説明する。

(1) 応答値の推定

機能継続性の評価に用いる構造計算方法は、時刻歴応答解析や限界耐力計算などの比較的精緻な方法によることとし、変位や加速度といった各層の応答値が工学量として得られるものとする。ここで、応答値が設計目標である限界値を上回らないことは、検証済みであるものとする。ここまでは従来の構造設計の範囲である。

(2) 損傷状態の推定

次に各層の応答値から構造部材、非構造部材、設備、什器等の応答値を求め、さらにそれらの損傷状態を推定する。この推定には、各要素の応答値と損傷状態を関係付ける「損傷評価データベース (DB)」が必要になる。

(3) 機能喪失の推定

さらに推定した損傷状態から、建築物が当初保有していた機能が、どの程度損なわれることになるかを推定する。これを行うためには、各要素の損傷状態と建築物の機能とを関係付ける「機能性評価DB」が必要になる。ここまでの「機能喪失のシナリオ」であり、当該建築物にどのような損傷が発生し、本来の機能がどの程度損なわれるかを、定量的に評価する手順である。

(4) 修復方法の選定

災害によって喪失した機能を、どの様な方法によって回復させるかの検討を行う。ここでは、部材毎に損傷程度に応じて適用可能な修復方法に関する情報、「修復性評価DB」が必要になる。

(5) 修復費用・修復時間の推定

同時に、喪失した機能を回復させるために要する費用と時間の推定を行う。ここでも、部材毎の損傷程度と各修復方法に応じた費用と時間に関する「修復性評価DB」が必要になる。

以上、(4)~(5)の段階が、「機能回復のシナリオ」であり、機能回復に必要な修復方法や修復費用、修復時間を評価するための手順となる。

「機能回復のシナリオ」によって示される修復費用や時間は、建築主、事業者や一般市民が生活困窮度や事業困難度を把握する上で必要な情報ではあるが、具体的な対策を施す動機付けとしては、必ずしも十分とはいえないかもしれない。重要なことは、建築主等が被害のシナリオを認識し、地震によって建築物がどのような状況になるかをよく理解して貰うことである。そのため、「機能喪失のシナリオ」や「機能回復のシナリオ」に加えて、日常生活に及ぼす影響や事業継続がどの程度困難になるかについて推定し、建築の専門家ではない建築主や一般市民が理解しやすいような形で説明するための「生活困窮度、事業困難度の評価」についても検討した。このような視点は、従来の構造設計ではあまり考慮されてこなかった内容であり、提案する「新たな構造性能評価システム」の特徴の一つであると考えている。

(6) ライフラインの情報

ライフラインの被害については、建築構造設計者が直接評価したり関与する範疇ではないが、地震後の生活状況や事業継続に大きな影響を及ぼすことから、出来るだけ生活困窮度、事業困難度の評価に反映することを目指している。地震によってライフラインがどのような状況

に陥るか、事前に情報収集やデータの蓄積を行う努力も必要になる。

(7) 生活困窮度、事業困難度の評価

「(3)機能喪失の推定」から得られる情報、「(5)修復費用・修復時間の推定」から得られる情報、「(6) ライフラインの情報」などを考え合わせて、地震後に生活がどの程度困窮するか、また、事業の継続がどの程度困難となるかについて推定する。

(2)~(5)の作業で必要となるデータベースが充実すれば、構造設計者は地震後の建築物の状態をより精度良く推定することが可能になり、修復に要する費用等を建築主や建築物の利用者に具体的に説明できるようになる。それを受け

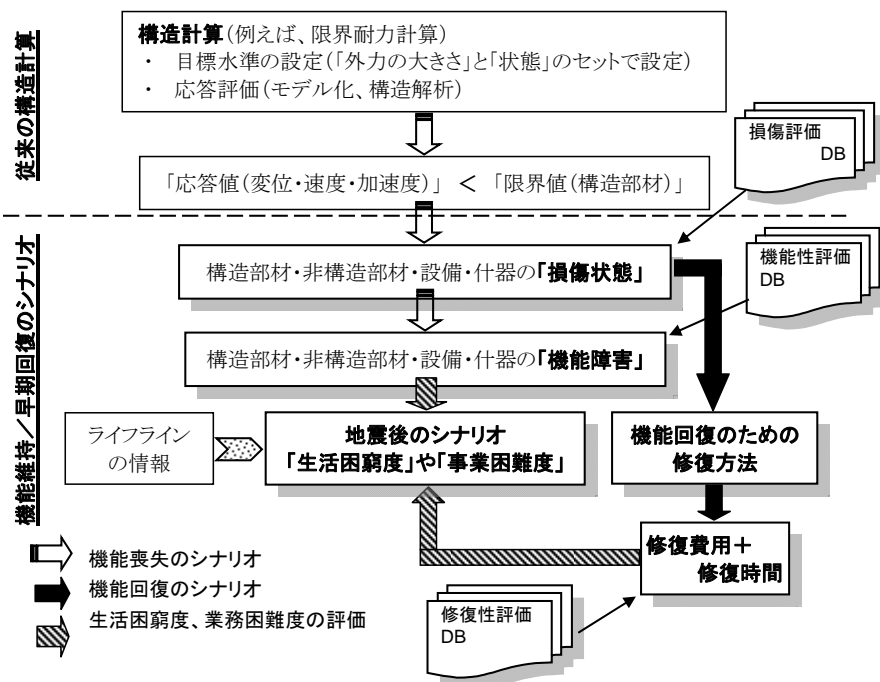


図1 新たな構造性能評価システムフロー

て、建築主等は建築物がそのような状態に陥らないように予め応答値を低減させるような方策を取り入れたり、非構造部材や設備機器の仕様や取り付け方向を改善したりするなどの対処方法を選択できるようになる。以上が、新しく建築物を設計する場合における「新たな構造性能評価システム」の使用目的である。

一方、既存建築物についても「新たな構造性能評価システム」を適用すれば、想定される地震に対する損傷状態と修復費用、生産設備などでは被災後の機能停止期間（ダウンタイム）を評価することが可能になり、予め耐震補強や設備等の改修を行っておけば被災後に修復するよりも経済的で効果的な対策を講じることができる。

4. 建築物の機能維持／早期回復を目指した構造設計の適用例

3. で示した方法により、実際の建物における修復費用と修復期間を算出した例を以下に示す。

(1) 損傷評価と修復性評価の流れ

検討の具体的な手順は、以下の通りである。（図2参照）

- 1) 質点系モデルにより時刻歴応答解析を行い、応答値（層加速度、層間変形角）を求める。
- 2) 層応答から部材の応答値を推定し、部材レベルの損傷評価のDB³⁾に基づき、各部材の損傷状態を推定する。
- 3) 各部材の損傷状態に対して、部材レベルの修復性評価のDB³⁾に基づき、修復方法と単位面積当たり修復人工（労務歩掛り）と費用係数 α ⁴⁾を決定する。
- 4) 3)より、各部位に必要な修復人工と費用係数 α

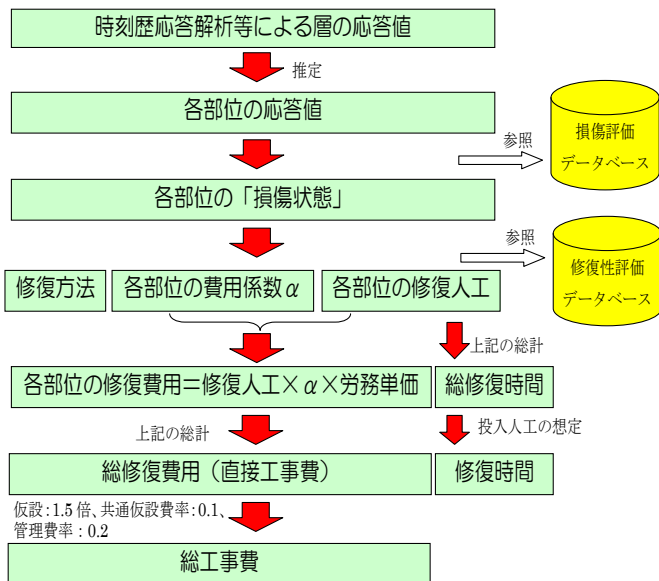


図2 試評価に適用したフロー

の算出を行う。これらをもとに各部位の修復コストを算出し、さらにこれらを集計することで修復コストの合計値（直接工事費）を算出する。

5) 専用仮設工事費を含めて、直接工事費の1.5倍として、共通仮設比率を0.1、管理費率を0.2として、総工事費を求める。

6) 各部位の修復人工を総計することによって総修復時間を算出し、一日当たりの投入人工を想定し、工程表を作成して、修復時間を求める。

(2) 評価対象建物

対象とした建物は、現存する病院⁵⁾をモデル化したものである。表1に建築概要を示す。

表1 建物概要

竣工年月	昭和55年(1980年)9月
規模	地下2階 地上8階 塔屋1階
延べ面積	7,974 m ²
構造種別	SRC (B2~3階) RC (4~P1階)
基礎構造	直接基礎

(3) 時刻歴応答解析

振動解析モデルは、1階を固定とする7質点系等価せん断モデルで、粘性減衰は1次固有周期に対して3%の瞬間剛性比例型とした。時刻歴応答解析の入力に用いた地震動は、文献2)に示した告示波4波と記録波4波であり、これらのうち、応答結果が大きいものと中程度のものと小さいものを選び、損傷評価と修復性評価を行った。損傷評価と修復性評価の対象とした地震波はJMA-KOBE NS (1995) と告示波（ごく稀・2種地盤相当、位相TAFT EW (1952)）とHACHINOHE NS (1968) (50kine相当) の3波である。層間変形角から部材角の推定は、立体増分解析により、最大層間変形角が応答結果と概ね一致する増分ステップの節点変位および節点回転角を用いて代表的な部材の部材角を計算した。表2に各階の最大層間変形角と代表的な最大部材角の例（JMA-KOBE, X方向）を示す。

表2 層間変形角と部材角（JMA-KOBE, X方向）

階	最大部材角		最大層間変形角	
	柱 (/1000)	大梁 (/1000)	耐力壁 (/1000)	層 (/1000)
R		1.12		
7	3.10	2.10	4.62	4.41
6	2.31	2.38	4.92	5.49
5	9.16	2.86	12.54	14.49
4	9.19	2.95	13.77	15.38
3	7.22	5.56	11.15	10.10
2	3.88	4.22	7.59	8.00
1	2.37	0.29	4.75	4.81

(4) 損傷評価と修復性評価

損傷評価・修復性評価DBを用いて、各部位の損傷状態および修復性に関する情報と応答量とを、表3に示すように対応づけた。表3に部材の損傷分類の修復人工、費用係数の例を示す。

表3に基づき、部材ごとの補修人工と修復費用を求めた。修復期間と修復費用を集計した例を表4に示す。なお、修復工事の労務単価は、全て14,000円/人日とする。

各DBに基づき、各階の構造部材、非構造部材、設備(配管等)、昇降機に関して、損傷評価・修復性評価を行い、集計した結果の例を表5に示した。

総工事費は、JMA-KOBE が約 7 億 2800 万円、kokujiL2-T-EW が約 2 億 6000 万円、HA-EW-50 が約 7700 万円となっ

表3 部材の損傷状態における修復情報 (RC 柱)

損傷分類	最大部材角	損傷状態	補修人工 (人日/㎡)	費用係数 α
0	1.25/1000 以下	無損傷～軽微	0.00	1.00
1	1.25/1000 ～ 2.5/1000	残留ひび割れ幅0.2mm未満	0.10	2.07
2	2.5/1000 ～ 5/1000	残留ひび割れ幅0.2～1.0mm程度	0.34	2.22
3	5/1000 ～ 10/1000	残留ひび割れ幅1.0～2.0mm コンクリートが僅かに剥落	0.64	2.35
4	10/1000 ～ 15/1000	残留ひび割れ幅2.0～5.0mm コンクリートの剥落多い	1.01	2.55
5	15/1000 以上	鉄筋産屈 内部コンクリートも崩れ落ちている	-	-

表4 部材の修復期間・修復費用の集計 (柱, JMA-KOBE)

階	階高 (m)	梁せい (m)	種別	代表断面		X方向						
				B (m)	D (m)	柱 (本)	損傷 分類	補修面積 (㎡)	補修人工 (人日/㎡)	費用係数	修復期間 (人日)	修復費用 (千円)
7	3.00	0.60	RC	0.50	0.50	36	2	86.4	0.34	2.22	29.38	913
6	3.00	0.60	RC	0.55	0.55	36	1	95.0	0.10	2.07	9.50	275
5	3.00	0.70	RC	0.55	0.55	37	3	93.6	0.64	2.35	59.91	1,971
4	3.00	0.70	SRC	0.65	0.65	35	3	104.7	0.64	2.35	66.98	2,204
3	3.00	0.70	SRC	0.65	0.65	28	2	83.7	0.34	2.22	28.46	885
2	3.40	0.70	SRC	0.75	0.75	24	1	97.2	0.10	2.07	9.72	282
1	3.50	0.80	SRC	0.75	0.75	20	0	81.0	0.00	1.00	0.00	0
X合計											204	6,529

表5 各部位の修復費用 (千円) とその総計

部位	JMA-KOBE	kokujiL2-T-EW	HA-EW-50
柱	17,486	8,872	2,093
大梁	2,317	223	0
耐力壁	21,776	7,070	122
外壁	24,368	9,501	193
窓	15,098	8,547	3,544
扉	19,036	9,131	9,131
間仕切り壁	8,881	7,344	3,722
天井	11,349	11,349	11,349
設備機器・配管	214,015	70,914	8,858
昇降機	38,984	450	450
直接工事費総計	373,310	133,401	39,462
総工事費	727,955	260,132	76,951
建築の割合(%)	32.2	46.5	76.5
新築工事の比(%)	34.4	12.3	3.6

た。そのうちの建築工事の割合は、JMA-KOBE が約 30%、kokujiL2-T-EW が約 50%、HA-EW-50 が約 80%と、地震が大きくなるに連れ、設備の割合が増える傾向にある。新築工事費 (現在の工事単価による推定値) との比では、最大の JMA-KOBE で 34.4%であった。建築工事期間は、仮に、建築 6 工種 (躯体、外壁、窓、扉、間仕切り、天井) 各 4 人、1 日あたり 6×4=24 人とすると、工事期間は、JMA-KOBE が約 6 ヶ月、JSL2-T-EW が約 3 ヶ月、HA-EW-50 が約 1.5 ヶ月であった。

5. まとめ

地震後の機能維持・早期回復を考慮に入れた建築物の耐震設計の基本的な考え方を整理し、その枠組みとして「新たな構造性能評価システム」を開発した。具体的な建物において、提案した方法を適用して、損傷状態の推定や修復費用・修復期間の評価が可能であることを確認した。この提案した方法を実務で実際に使用できるものとするためには、データベースの充実とさらなる評価精度の向上が課題である。今後も、これらの課題について検討していく予定である。

謝辞：本研究は「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」に関する全体委員会 (委員長：塩原等東京大学准教授) において、大学の研究者および (社) 日本建築構造技術者協会、NPO法人耐震総合安全機構などの協力を得て実施された。また、アンケート調査への回答や情報提供、実験への資材供与など多くの業界団体、企業にご協力をいただいた。ここに記して感謝申し上げます。

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) 内閣府中央防災会議：事業継続ガイドライン第一版，2005.8
- 3) 向井智久他：建築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 (その 7 損傷評価・修復性評価・機能性評価に資するデータベースの構築)，日本建築学会大会梗概集，2010.8
- 4) 衣笠秀行他：建築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 (その 8 修復性評価データベースに基づく修復費用・修復時間の算出)，日本建築学会大会梗概集，2010.8
- 5) 溜正俊他：建築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 (その 3 評価システムの適用例)，日本建築学会大会梗概集，p127-128，2008.9