

論文 RC造建物の損傷量に基づいた耐震修復性及び修復限界状態の評価に関する基礎研究

青木 貴*1・前田 匡樹*2

要旨: 地震被害を受けた建物の修復性・修復限界状態を適切に評価するためには、地震による建物の損傷度合いを把握する必要がある。本論文では、構造躯体及び非構造部材の修復費用を用いて、建物の損傷度合いを表す指標（損傷量指標）を提案し、構造特性の異なる建物モデルにこれを適用した。その結果、躯体及び非構造部材の特性による損傷量の違いを定量的に評価し、修復性に優れた建物の設計が可能となることが分かった。また、損傷量指標と地震動年確率分布によるライフサイクルコストを用いて、修復限界を評価する手法を提案し、建物の特性や供用年数を考慮した補修・建替の合理的な判断が可能である事を示した。

キーワード: 損傷量, 修復性能, 修復費用, ライフサイクルコスト, 修復限界

1. はじめに

建築物が地震被害を被った際、倒壊は免れても、建物に重大な損傷が生じ、補修による被災前と同等の耐震性能の確保が技術的には可能でも、建て替えた方が経済的な観点から合理的となる状況が起こり得る。そういった状況に際し、復旧方針の適切な判断をするために、また設計地震動に対する被害程度と復旧の容易性を考慮した設計を行うためにも、建物の「修復性」、及び「修復限界」の評価が必要となる。修復性は、定性的には「修復の容易さ」と捉えられるが、定量的な評価を行うとすれば、「地震動によって建物に生じる損失の大きさ」とすることが考えられる。この観点から、修復性の評価は、ひび割れ等の物理的な損傷の大きさ（損傷量）を用いて行う事が多い。五十嵐ら¹⁾や筆者ら²⁾は、部材の特性と損傷量との関係を定量的に評価する損傷量評価モデルに基づいて躯体の修復費用を算出し、新築費用との比で建物の地震時に生じる損失の度合いを算出する手法を提案した。本論文では、躯体に加え、非構造部材を含めた建物の全要素の新設に要する費用を基準として、建物の損傷の度合い（以下、損傷量指標 I_{dm} ）を算出する手法を提案した上で、同手法をパラメータの異なる建物モデル群に適用し、各パラメータが I_{dm} に与える影響を検討する。また前述の修復性の定義を用いると、修復限界は、「補修する際の損失が建替を行う際の損失を超過する状態」と定義できる。本論文では、建物の供用期間内に生じる地震動を考慮した修復限界評価法を提案し、建物モデルによる違いや I_{dm} との関係を検証していく。

2. 解析モデルの概要

はじめに、本論文にて用いる建物モデルについてその

概要を示す。建物モデルの概要を図-1、表-1に示す。

曲げ部材で構成される4層4スパンの純ラーメンフレームについて、崩壊メカニズム形成時にヒンジが生じ変形が進む層（以下、崩壊層）、及びベースシア係数 C_B ³⁾ をパラメータとした計10モデルを設定した。各部材は曲げパネ及びせん断パネによって置換し、各パネの復元力特性にはトリリニア型³⁾を用いた。ヒンジを生じさせない部材では、強度・剛性を十分大きく設定した。部材断面及び強度は、 C_B の増加に伴い大きくなるよう設定した。しかし、これによって降伏変形が変化すると、 I_{dm} の算出結果も変化してしまい、設定したパラメータが I_{dm} に与える影響を正しく評価できない。そこで本論文では、各部材の降伏変形 R_y はモデル間で等しく ($R_y=1/200$) した。後述する3章,4章にて提案する損傷量指標 I_{dm} 及び修復限界評価法をこれら建物モデルに適用し、建物の構造特性と I_{dm} 、修復限界状態との関係について検討する。

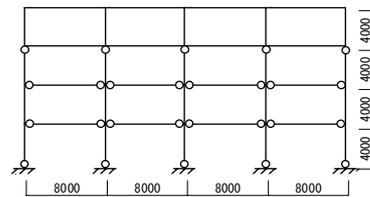


図-1 建物モデル概要 (1-3層崩壊, 単位: mm)

表-1 建物モデルの概要 (設定パラメータ)

モデル	1-03	2-03	3-03	4-03	1-04	1-05	1-06	4-04	4-05	4-06
崩壊層	1	1-2	1-3	1-4	1			1-4		
C_B	0.3				0.4	0.5	0.6	0.4	0.5	0.6

3. 損傷量指標 I_{dm} の算出

3.1 概要

損傷量指標 I_{dm} 算出の流れを図-2に示す。 I_{dm} は、構

*1 清水建設(株) 設計本部 (正会員)

*2 東北大学大学院 工学研究科 都市・建築学専攻 教授 博士(工学) (正会員)

造躯体の損傷量に加えて、恒川らの研究⁴⁾を参考に非構造部材の損傷量を考慮し、式(1)によって算出する。

$$I_{dm} = \alpha_S \cdot sI_{dm} + \alpha_R \cdot rI_{dm} + \alpha_A \cdot aI_{dm} \quad (1)$$

ここで、 sI_{dm} 、 rI_{dm} 、 aI_{dm} は、それぞれ躯体、変位依存型非構造部材、加速度依存型非構造部材の損傷量指標であり、骨組のPushOver解析を行った際の各ステップにおける層や部材の変形及び応力から算出される。建物全体の損傷量指標 I_{dm} は、これらを各々の再調達価格割合 α_S 、 α_R 、 α_A によって重みづけ平均することによって算出する。 I_{dm} は、非構造部材を含めた建物の全要素を新設するのに要する費用に対する修復費用の比で、地震時に生じる損傷の度合いを表しており、同一の大きさの地震動に対する I_{dm} が小さいほど、修復性に優れていると言える。以下に各項の具体的な算出手順を示していく。

3.2 構造躯体損傷量指標 sI_{dm} の算出

構造躯体損傷量指標 sI_{dm} は式(2)によって算出する²⁾。

$$sI_{dm} = C_{ti}/C_t = \sum C_{ki}/\sum C_k \quad (2)$$

ここで、 C_{ti} : i ステップにおける全部材の修復費用の和、 C_t : 全部材の新設部材への交換に要する費用（再調達価格）、 C_{ki} : k 番目の部材の i ステップにおける修復費用、 C_k : k 番目の部材の新設部材への交換に要する費用である。各部材の各ステップにおける修復費用 C_{ki} は、損傷量評価モデル²⁾によって残留ひび割れ幅・長さ、コンクリート剥落面積といった各損傷を求め、対応する修復費用単価を掛けることで求める。また部材の新設時費用 C_k は、体積に比例すると仮定し、式(3)で算出する。

$$C_k = C_0 + C_0 \cdot \kappa(V_k/V_0 - 1) \quad (3)$$

ここで、 C_0 : 基準部材²⁾の新設時費用で、 $C_0=246$ (万円)、 V_0 : 基準部材の体積で、 $V_0=0.8 \times 0.8 \times 4.0=2.56$ (m^3)、 V_k : k 番目の部材の体積、 κ : 比例係数である。文献⁵⁾では、建物の耐力 (C_B) と建設コストとの関係について検討を行っている。本論文ではこれを部材の体積と新設時費用との関係に置き換え、比例係数 $\kappa=1/3$ とした。

3.3 非構造部材の損傷量指標 rI_{dm} 、 aI_{dm} の算出

非構造部材を、非構造壁・建具などの変形によって損傷が生じる部材（以下、変形型部材）と、天井材・設備機器などのように加速度によって損傷が生じる部材（以下、加速度型部材）に分類して、それぞれの損傷量指標 rI_{dm} 、 aI_{dm} を求めることとした。 rI_{dm} 、 aI_{dm} は、PushOver解析による各ステップにおける各層の変形及び応力を用いて、小破や中破といった非構造部材の被災度が発生する確率を求め、これに各被災度における損失率を掛け、損失の期待値として、式(4)によって算出する。

$$rI_{dm} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \sum_{m=1}^m f_R(R_j, k) g(m), \quad aI_{dm} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^k f_A(A_j, k) g(m) \quad (4)$$

ここで、 n : 層数、 R_j, A_j : j 層の層間変形角及び応答加速度、 m : 各被災度、 $f_R(R_j, m)$ 、 $f_A(A_j, m)$: 各層の各被災

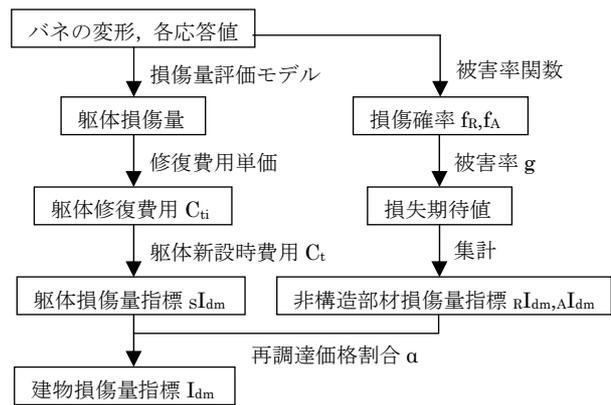


図-2 損傷量指標 I_{dm} 算出のフロー

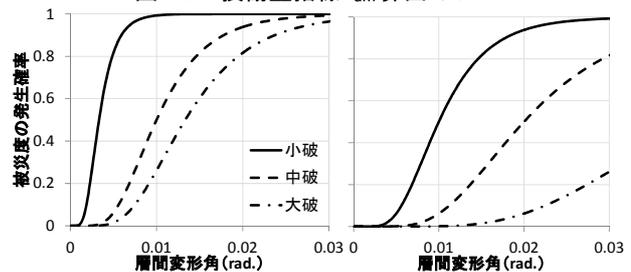


図-3 被害率関数（変形型部材、左：W、右：S）

表-2 被害率関数と損失率の設定

被災度	変形型部材		加速度型部材		損失率
	層間変形角		層の加速度		
	rad.	rad.	gal	gal	
小破	1/300	1/100	200	600	0.1
中破	1/150	1/50	400	1200	0.3
大破	1/75	1/25	600	1800	1.0

表-3 解析ケース

case	変形型部材	加速度型部材
W-W	W	W
W-S	W	S
S-W	S	W
S-S	S	S

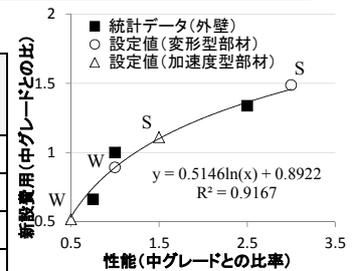


図-4 新設時費用の設定

度の発生確率、 $g(m)$: 各被災度における損失率である。損失率は新設時の費用に対する修復費用の比で、表-2に示す値を仮定した。また非構造部材の応答値（応答変形 R_j または応答加速度 A_j ）と各被災度の発生確率との関係（被害率関数）については、既往の研究^{6),7)}を参考にしつつ、比較的耐震性が低く脆性的な場合（タイプ W）と耐震性が高く被害が生じにくい場合（タイプ S）の2種類を設定し、それらの組み合わせによって表-3の4ケースを設定した。被害率関数の形状に関しては、文献⁶⁾を参考に、表-2に示す数値を平均値とした対数正規分布（変動係数 0.45）とした（図-3）。また非構造部材の新設時費用に関して、文献⁸⁾では、工事の統計データに基づき、部材のグレードに応じて新設時費用を算出する

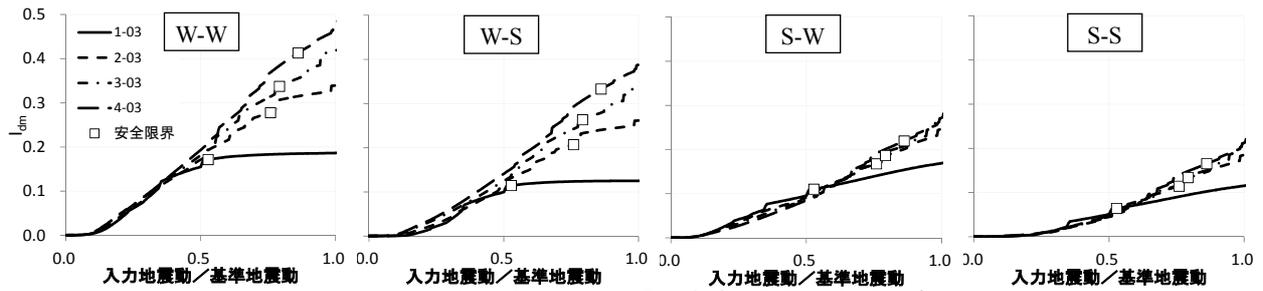


図-5 地震動大きさ-I_{dm}関係 (崩壊型の異なる4モデル)

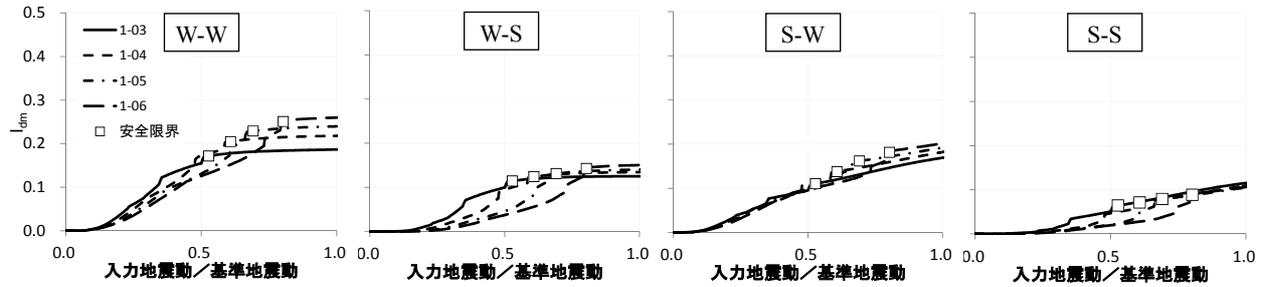


図-6 地震動大きさ-I_{dm}関係 (C_Bの異なる4モデル)

手法を示している。一方で文献7)では、部材のグレードに応じてその部材の性能、即ち被害率関数の平均値を設定している。これらの関係をプロットすると図-4(外壁について算出、図中■)のようになり、対数関数的な傾向があったことから、本論文では対数関数による近似曲線を用いて、各タイプにおける非構造部材の新設時費用を算出することとした(図中○, △)。

3.4 損傷量指標 I_{dm}の算出結果

2章で述べた建物モデルについて本評価手法を適用し、損傷量指標 I_{dm}を算出した。各モデルの I_{dm}と入力地震動/基準地震動との関係を図-5、図-6に、安全限界時の I_{dm}の内訳を図-7に示す。紙面の都合上、モデル4-04, 4-05, 4-06を除く7モデルの算出結果を示している。再調達価格割合に関しては、C_B=0.3、非構造部材に中グレードを用いた場合(図-4中、横軸が1.0の場合)に、α_S=0.4、α_R=α_A=0.3とし、部材断面及び非構造部材のケースに応じて、式(3)、図-4の関係をjを用いて補正した。図-5、図-6の横軸は、1質点系の耐力曲線と告示の応答スペクトルを用いて求めた各変位時点の地震動の大きさを、基準地震動の大きさで基準化しており、安全限界(図中の口、層間変形角=1/50rad.)での横軸の数値は、建築学会の耐震性能評価指針⁸⁾による保有耐震性能指標に相当する。各パラメータの違いが I_{dm}に与える影響を以下で検討していく。

(1) 崩壊型の異なる4モデル(1-03, 2-03, 3-03, 4-03)

図-5から、1層崩壊、1-2層崩壊、1-3層崩壊、全体崩壊とメカニズム時に崩壊する層の数(以下、崩壊層数)が増加するのに伴い、安全限界時の入力地震動の大きさが増加しており、建物の安全性が向上している事が見て取れる。一方で、caseW-W, caseW-Sにおいては、崩壊

層数の増加に伴い、同一の入力地震動に対する損傷量指標 I_{dm}が増加、即ち修復性が悪化している。これは、図-7から分かるように、変形型部材に脆性的なタイプWを用いた場合、崩壊層数の少ないモデルでは特定の層に変形が集中し、その層の被害が頭打ちになるため、変形型部材の損傷量指標_RI_{dm}が大きくなるのに対し、崩壊層数が多いモデルでは広範囲に大破に至る程の大きな被害が生じ、_RI_{dm}が大きくなるためである。一方、変形型部材に性能の高いタイプSを用いたcaseS-W, caseS-Sでは、特定の層に変形が集中しても被害が頭打ちにならず、崩壊層数が増加し被害の範囲が大きくなっても、被害は軽微であり_RI_{dm}はあまり増加しないため、モデル間の I_{dm}の差が他の2ケースに比べ小さくなっている。

(2) ベースシア係数 C_Bの異なる4モデル(1-03, 1-04, 1-05, 1-06)

図-6から、(1)と同様、崩壊メカニズム時のベースシア係数 C_Bが増加するのに伴い、安全性の向上が見られる。また、caseW-S, caseS-Sでは、C_Bの増加に伴い、同一の入力地震動に対する I_{dm}が減少、即ち修復性が向上している。これは、図-7から分かるように、加速度型部材にタイプSを用いた場合、C_B即ち応答加速度が増加しても加速度型部材に大きな被害が生じないため、_AI_{dm}の差が大きくなる事に加え、C_Bの増加に伴い同一の地震動に対する応答変位が小さくなることで、_SI_{dm}, _RI_{dm}が小さくなるからである。一方、加速度型部材に脆性的なタイプWを用いたcaseW-W, caseS-Wにおいては、C_Bの増加に伴い加速度型部材に大きな被害が生じ、_AI_{dm}が大きくなるため、他の2ケースと比較して、修復性の向上の度合いが小さくなる、あるいは悪化している。本論文で割愛した4-03, 4-04, 4-05, 4-06の結果について

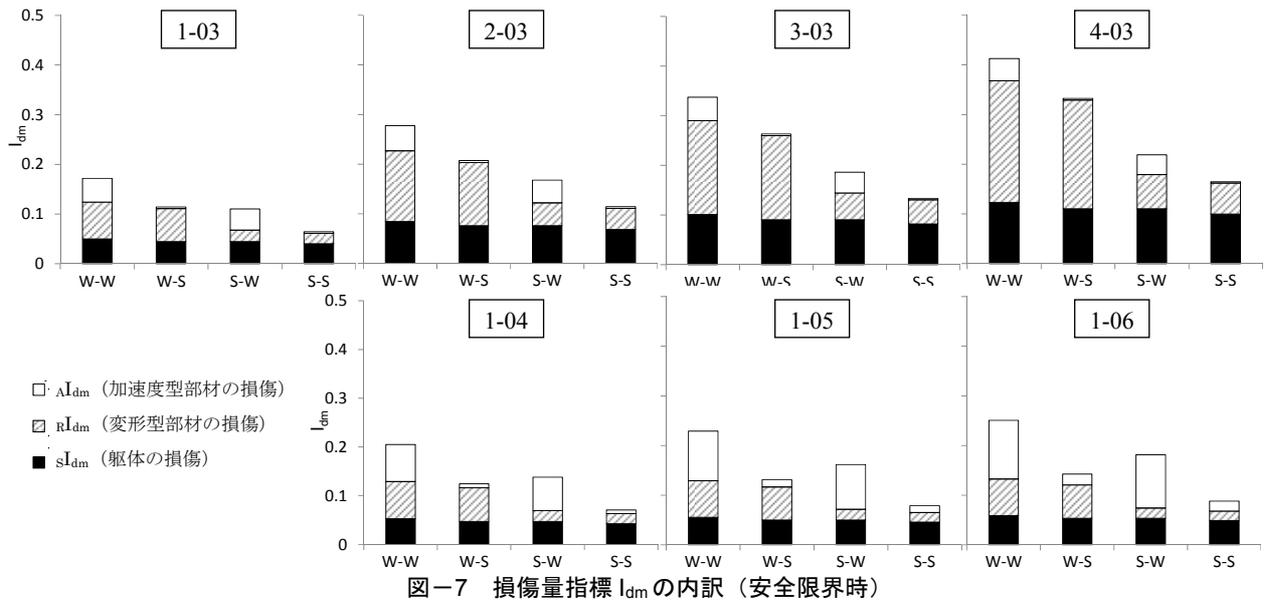


図-7 損傷量指標 I_{dm} の内訳 (安全限界時)

も、同様の傾向が見られた。

以上の事から、崩壊層数を増加させる靱性型の設計によって建物の安全性を確保する場合、変形型部材の性能が重要になり、ベースシア係数 C_B を増加させる耐力型の設計を行う場合には、加速度型部材の性能が重要になる、といったように、非構造部材の性能が I_{dm} に与える影響は建物の構造特性によって異なり、その被害率曲線や損失率の評価が修復性評価において重要であると言える。これに対し本手法を用いることで、躯体や非構造部材が損傷量に与える影響を定量的に評価し、設計地震動に対して I_{dm} を小さくする、即ち修復性に優れた建物の設計が可能であると考えられる。

4. 修復限界評価手法の構築

4.1 概要

本論文における修復限界状態を、「補修する場合の損失が建替えを行う際の損失を超過する状態」と定義し、補修と建替えそれぞれの供用期間内に生じる損失（ライフサイクルコスト：LCC）の大小によって修復限界評価を行う。なお後述するが、ここでの LCC は、修復限界評価を目的としており、一般的な LCC とは性質が異なる事に留意されたい。以下で評価手順を具体的に説明する。

4.2 評価手順

(1) LCC の算出

3章で算出した I_{dm} と入力地震動/基準地震動の関係を、修復費用 $C(w)$ と地震動大きさ w の関係に置き換える。一方で、地震動大きさ w の年確率分布を設定し、各地震動大きさの発生確率 $P(w)$ を求め、1年間の損失期待値 L_y を式(5)で算出する。

$$L_y = \int C(w) \cdot P(w) dw \quad (5)$$

地震動大きさの年確率分布に関しては様々な設定が

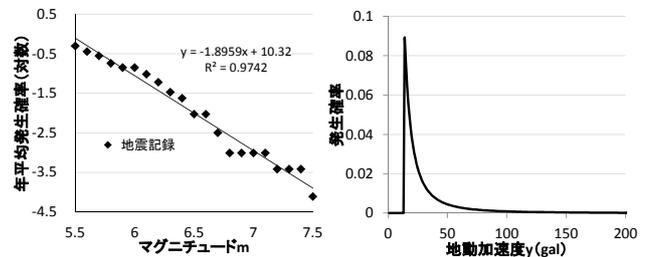


図-8 マグニチュードの線形近似

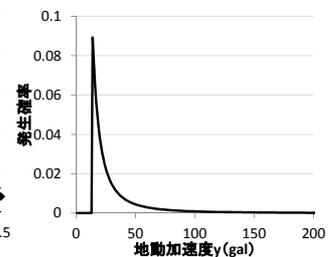


図-9 地震動年確率分布

考えられるが、本論文では文献9)を参考に、地震記録を図-8のように線形近似し、G-Rモデル⁹⁾によってマグニチュード m の確率分布を求め、式(6)のアテニュエーション式を用いて地動加速度 y の確率分布を算出する。

$$y = 15e^{1.4m} \cdot r^{-1.7} \quad (6)$$

r は震源からの距離であり、 $r=100\text{km}$ とした。地震記録には宮城県沖地震のものを用い、マグニチュード 5.5以上の地震を対象とした。地震動年確率分布の算出結果を図-9に示す。

L_y に新設時費用 L_0 と経年劣化による割増係数 γ を考慮して、経過年数 t に対する LCC を式(7)で算出する。

$$LCC = L_0 + \gamma \cdot L_y \cdot t \quad (7)$$

文部科学省が日本建築学会に委託した被災学校施設の被災度判定及び復旧方針の判定では、経年による減価償却の考え方を取り入れ、地震時の経過年数に応じて式(8)の係数 β で低減した建物の新築費用と修復費用を比較し、式(9)を満たす場合には建替としている¹⁰⁾。

$$\beta = 1 - 0.7 \times \text{経過年数}/60 \geq 0.3 \quad (8)$$

$$\text{修復費用} \geq \text{新築費用} \times (1 - \alpha_s + \alpha_s \beta) \quad (9)$$

右辺の $(1 - \alpha_s + \alpha_s \beta)$ は、躯体の価値のみを β によって低減している事を意味する。ここで、式(9)は式(10)の様に変形できる。

$$\text{修復費用}/(1 - \alpha_s + \alpha_s \beta) \geq \text{新築費用} \quad (10)$$

式(10)の左辺は、地震時の修復費用を見かけ上割り増している事を意味する。本論文では、将来のある時点に対して式(10)の両辺を比較する事を考え、式(11)で定める割増係数 γ を、将来の修復費用に乘じる事とした。

$$\gamma = 1/(1 - \alpha_S + \alpha_S \beta) \quad (11)$$

以上から、式(7)の LCC は実際の損失というよりは、修復限界評価を行うための見かけ上の損失を表していると言える。なお実際の建築物では、補修によって被災前の力学性能が完全には復旧されず、その後の地震による被害の進行が起こりうるが、本論文ではこれを考慮せず、補修により被災前の力学性能が回復されると仮定した。

(2) 修復限界状態の決定

修復限界決定手法の概念を図-10に示す。地震により被災した年を0年とし、残りの供用年数に対して式(7)を適用し、補修を行う場合と建替を行う場合のLCCを算出する。式(7)に関して、補修を行う場合は新設時費用 L_0 に地震時の修復費用を用いる。建替を行う場合は L_0 に新設費用を用い、地震時の経過年数は0年に戻ることとする。建替の場合、保有耐力 (C_B) や非構造部材の性能の向上など複数の案を検討し、定められた残り供用年数に対して、LCCが最小となる案を用いる。こうして算出した残り供用年数に対する双方のLCCの大小で、補修・建替の決定を行う。この時、図-10に示すように、曲線は下に凸の形状となる。これは、年数が大きい程、修復費用が大きい事に加え、 γ による見かけ上の損失の割増もなされるためであり、地震発生時に築年数を有する補修の場合は、特にその傾向が大きい。また、双方のLCCがちょうど等しい場合、その建物は修復限界に達したとすることができ、その際の修復費用が修復限界時費用、あるいは修復限界時 I_{dm} となる。即ち、対象建物のある地震動に対する I_{dm} が修復限界時 I_{dm} より大きければ、対象建物はその地震動によって修復限界を超過する事となる。

4.3 評価結果

2章、3章で示した解析ケースのうち、4-03及び1-03について、caseW-Wを既存建物として、修復限界時 I_{dm} の算出を行う。建替の案として、 C_B を増加させたケース ($C_B=0.3, 0.4, 0.5, 0.6$) と、非構造部材の性能を向上させたケース (W-W, W-S, S-W, S-S) の組み合わせを用い、崩壊型は既存建物から変化させないこととした。

(1) LCC算出結果

3章の結果を用いて、各ケースのLCCを算出した。4-03、1-03を既存建物とした場合を想定した各ケースについて、地震発生後の供用年数とLCCの関係をそれぞれ図-11、図-12に示す。図-11から、非構造部材の性能が向上するにつれ、新設時費用 L_0 (図中の横軸=0年時の費用) は大きくなるものの、その後の損失は小さくなり、曲線の傾きが小さくなっている事が分かる。また、

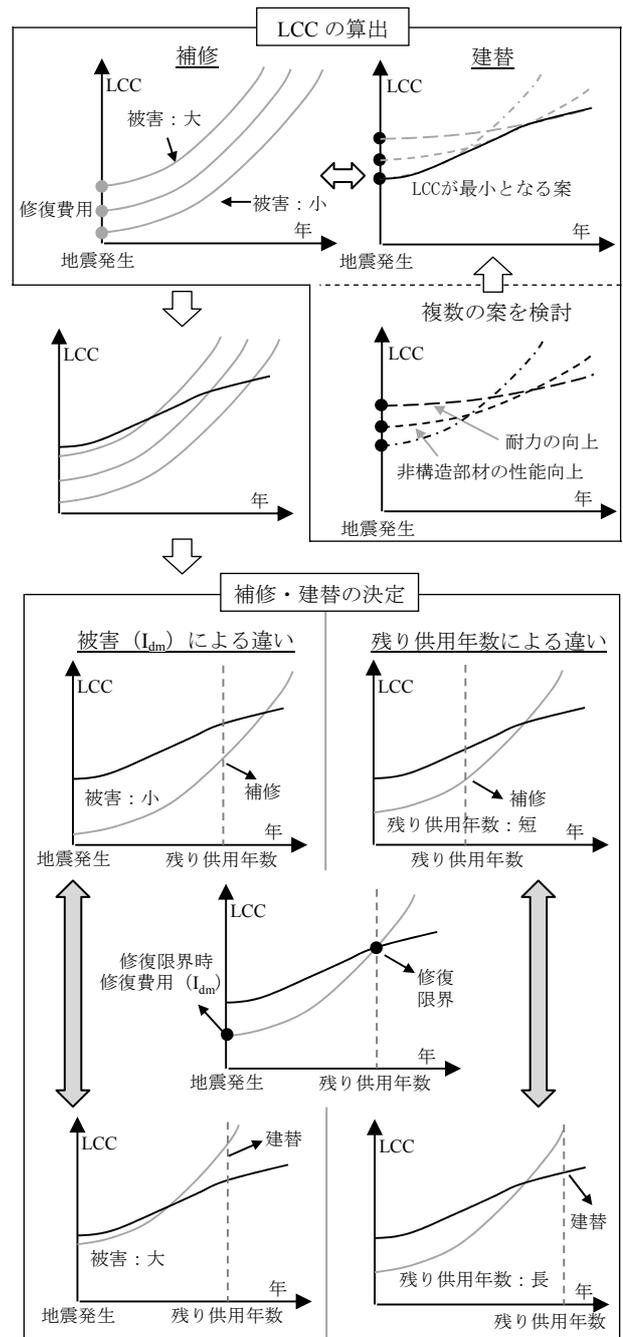


図-10 修復限界決定手法の概念

例えば C_B 、即ち応答加速度の小さい4-03では、変形型部材にタイプSを用いた場合にLCCが小さくなるのに対し、 C_B の大きい4-06では、加速度型部材にタイプSを用いた場合にLCCが小さくなるといったように、3章で述べた傾向が表れている。一方1層崩壊を想定した図-12では、崩壊層数が小さく変形による損傷が生じないため、加速度型部材にタイプSを用いた方が、LCCが全体的に小さくなる傾向にある。

(2) 修復限界時 I_{dm} の算出結果

各モデルの残り供用年数と修復限界時 I_{dm} の関係を図-13に示す。地震発生時の経過年数は、30年を仮定した。残り供用年数が多い、即ち長く使用する場合ほど、

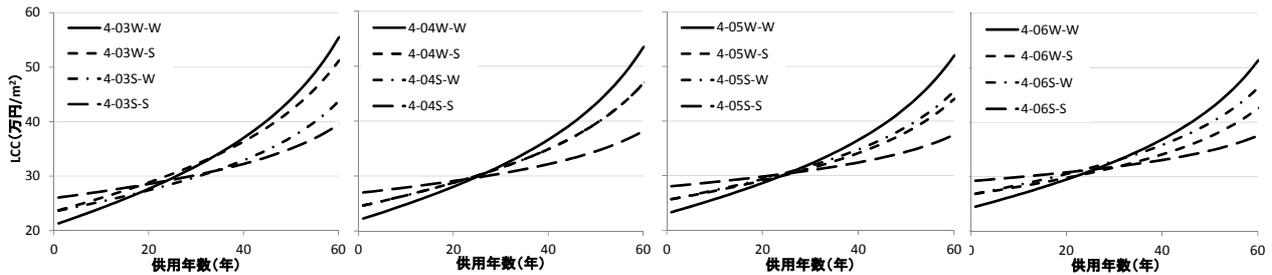


図-11 供用年数-LCC関係 (1-4層崩壊)

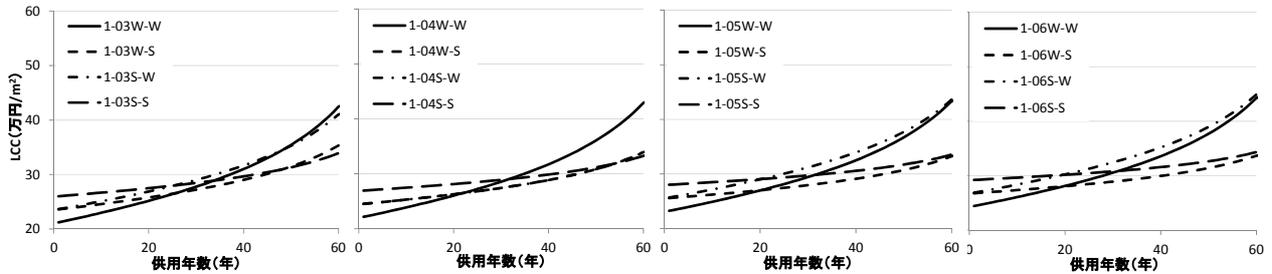


図-12 供用年数-LCC関係 (1層崩壊)

修復限界時 I_{dm} が小さくなっている。また、比較的損傷が生じにくい1-03の方が、4-03に比べ修復限界時 I_{dm} が大きい、即ち修復限界に至りづらい事が分かる。以上のように、本手法によって、建物の修復性の違いや残り供用年数を考慮した合理的な修復限界状態の設定が可能になると考えられる。しかしながら、修復限界時 I_{dm} の値は図-5、図-6と比較するとかなり大きく、地震動あるいは残り供用年数が非常に大きくない限り、修復限界に至らない結果となっている。これに関しては、補修による力学性能の低下や、建物形状や崩壊型の変化も含めた建替案の検討等、今後発展的な評価を行っていくことでより妥当な結果が得られることが考えられる。

5. まとめ

建物に生じる損傷量を定量的に評価する損傷量指標 I_{dm} を提案し、これと地震動年確率分布を用いて LCC を算出することで、修復限界状態を評価する手法を提案し、建物モデルの評価を行った結果、以下の知見を得た。

- (1) I_{dm} を用いることで、建物の構造特性や非構造部材の性能と損傷量との関係を考慮し、修復性に優れた建物の設計が可能である。
- (2) 修復限界時 I_{dm} を用いることで、建物の特性や供用年数を考慮し、補修・建替の合理的な判断が可能である。

参考文献

- 1) 五十嵐さやか, 前田匡樹: 曲げ降伏先行型 RC 柱・梁部材の損傷量に基づいた修復性能評価法の構築に関する研究, コンクリート工学年次論文集, vol.32, No.2, pp.859-864, 2010
- 2) 青木貴, 前田匡樹: RC 造建物の耐震修復性及び修復限界状態の評価を目的とした損傷量指標の提案と

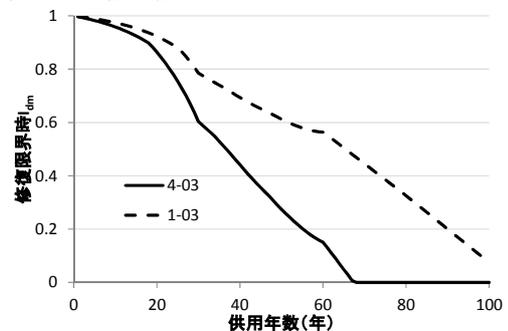


図-13 残り供用年数-修復限界時 I_{dm} 関係

建物モデルへの適用例, コンクリート工学年次論文集, vol.33, pp.913-918, 2011

- 3) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート構造の耐震性能評価指針(案)・同解説, 2004
- 4) 恒川裕史, 藤村勝, 佐藤吉之, 岡本肇: 部材レベルの弾塑性応答解析を用いた地震時最大予想損失率による RC 造構造物の耐震性能評価, 日本建築学会技術報告集, 第35号, pp.37-42, 2011.2
- 5) 神田順ほか: 地震荷重を変動させた時の各種建物の建設費について, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.15-16, 1994.9
- 6) 日本建築学会: 地震リスク評価とリスクコミュニケーション, 2011.6
- 7) 金子美香, 神原浩, 田村和夫: 非構造部材の耐震実験結果に基づく耐震性能の整理, 日本建築学会技術報告集, 第21号, pp.37-42, 2005.6
- 8) ジャパン・ビルディング・コスト・インフォメーション JBCI2010, 財団法人建設物価調査会, 2010
- 9) 柴田明徳: 確率的手法による構造安全性の解析, 森北出版, 2005
- 10) 日本建築学会: 文教施設の耐震性能等に関する調査研究 報告書, 2005