

論文 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建物モデルへの適用例

青木貴*1・前田匡樹*2

要旨：「修復性」の評価に対する需要の高まりを受け、地震時に RC 造建物に生じる損傷量を解析的に評価する損傷量評価モデルを用いて、それらの修復費用から建物の損傷度合い（損傷量指標）を算出する手法（精算法）を提案した。更に各部材の損傷度から簡便に損傷量指標を算出する指標（略算法）を提案し、崩壊型の異なる建物モデルに両手法を適用した。その結果、各保有耐震性能指標における両モデルの損傷量指標に大きな差が見られ、両モデルの修復性能が異なる事が分かった。また、略算法の結果が精算法のそれと良好に対応しており、修復性能及び修復限界状態の評価手法として有用な手法となり得ると考えられる。

キーワード：修復性能評価、修復限界、修復費用、損傷量、損傷度

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る場合がある。その際、補修して被災前と同等の耐震性能を確保することが技術的には可能であっても、経済的な観点から建て替えた方が合理的となる状況が起こり得る。そういった状況に際し、復旧方針について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、地震動に対して建物にどの程度の損傷が生じるか、即ち建物の「修復性」の定量的な評価が重要となる。また修復性の評価に基づいて、補修による性能確保が建て替える場合に比べて経済的に許容される限界、即ち「修復限界状態」の適切な設定を行う必要がある。

建築学会の耐震性能評価指針¹⁾では、修復限界状態を表-1 によりに定めているが、層の限界状態によって規定しており、層毎の損傷度合いの分布を考慮できない点、また十分な知見がないことから各損傷度の部材割合（表中 a, b, c. 表の（）内は各数値の目安）が設計者あるいは性能評価を行う者の判断に委ねられており、建物の損傷の度合いをイメージしづらい点で問題がある。五十嵐ら²⁾は、躯体の損傷量を定量的に評価する損傷量評価モデルに基づいて建物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害の度合いを算出する手法を提案したが、修復費用と新築費用の対応関係が曖昧、評価手法がやや煩雑といった課題が残された。

本研究では、建物の全部材が新設を要する程の損傷を負った時の修復費用を基準として、建物の損傷度合い（損傷量指標 I_{dm} ）を算出する手法（以下、精算法）を提案し、崩壊系の異なる骨組に同手法を適用する。その際、保有耐震性能と I_{dm} の関係を明らかにすることで、両建物の修復性能に対する検討を行うとともに、現行の手法によ

表-1 耐震性能評価指針による修復限界

層の限界状態	部材の損傷度				
	I	II	III	IV	V
使用限界	—	0%	0%	0%	—
修復限界 I	—	a (30) %	b (20) %	0%	—
修復限界 II	—	—	c (50) %	0%	—
安全限界	—	—	—	—	0%

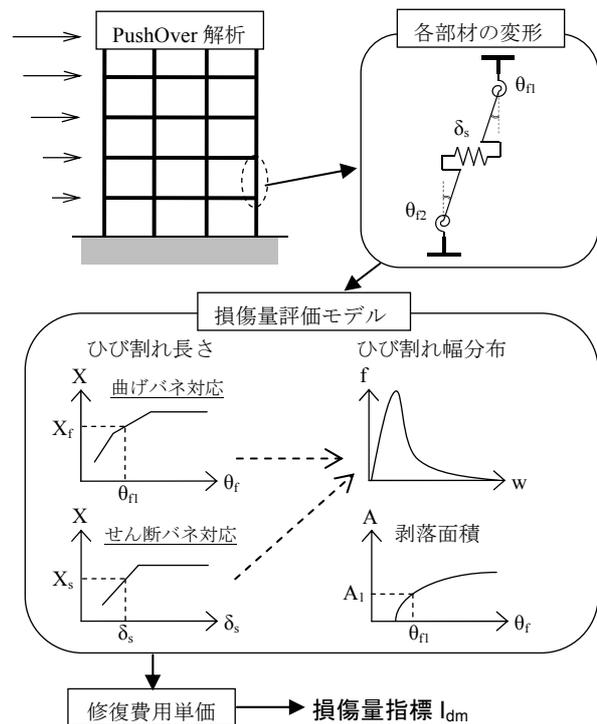


図-1 精算法による修復性能評価法の概要

る修復限界状態との比較を行う。また、被災建物の損傷状態を早急に把握することを意図し、各部材の損傷度から I_{dm} を簡便に算出する手法（以下、略算法）を提案し、精算法による結果との比較検討を行う。

*1 東北大学大学院 工学研究科 都市・建築学専攻 大学院生（正会員）

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

2. 精算法

2.1 評価手法の概要

精算法による損傷量指標算出の概要を図-1に示す。骨組のPushOver解析による各部材の変形に対して損傷量評価モデルを適用し、ひび割れ長さ、コンクリート剥落量等の損傷量を算出する。これら損傷量に修復費用単価をかけ、建物の修復費用を算出し、これと全部材の新設に要する費用との比により、各ステップの損傷量指標 I_{dm} を算出する。以下に各々の手順の詳細を示していく。

2.2 損傷量評価モデル

(1) 概要

五十嵐らが提案した梁・柱部材の損傷量評価モデル³⁾に修正を加えたものを用いる。損傷量評価モデルは、ひび割れ長さ評価モデル、ひび割れ幅分布関数モデル、コンクリート剥落面積評価モデルからなり、部材モデルにおける曲げバネの回転角及びせん断バネの変形から各々の損傷量を算出するものである。本論文において修正を加えたのは、図-2に示すように、ひび割れ長さをヒンジ領域の曲げせん断ひび割れ長さ X_{fh} 、非ヒンジ領域の曲げひび割れ長さ X_{fuh} 及びせん断ひび割れ長さ X_s に分類し、解析による曲げバネの回転角 θ を曲げひび割れ長さ X_{fh} 及び X_{fuh} と、せん断バネの変形 δ をせん断ひび割れ長さ X_s と対応させることとした点である。ただし、部材は曲げ降伏先行型を仮定し、せん断破壊は生じないものとする。各点における具体的な式等のモデルの詳細、及び実験結果を用いたモデルの妥当性評価に関しては、文献³⁾を参考にされたい。

(2) 部材モデルの損傷量評価

後述する略算法及び建物モデルの解析に先立ち、パラメータの異なる部材のモデルに対して損傷量評価モデルを適用し、各パラメータが損傷量に与える影響を検討する。部材モデルの概要を表-2に示す。モデルは断面寸法、部材長さ及び軸力をパラメータとした柱2種類、梁3種類の計5体である。各モデルのヒンジ領域、非ヒンジ領域の曲げ終局時の総ひび割れ長さを表-3に示す。C-NHとC-NLの総ひび割れ長さを比較すると、C-NHがC-NLの0.9倍程度となっている。これは軸力が大きくなると圧縮領域が大きくなりひび割れ発生領域が小さくなることによる。一方、G-0、G-1、及びG-2を比較すると、部材長さが大きくなると非ヒンジ領域のひび割れ本数の増加により、また部材寸法が大きくなるとひび割れ1本あたりの長さ及びヒンジ領域のひび割れ本数の増加により、総ひび割れ長さが大きくなる事が分かる。これら寸法によるひび割れ量の傾向をまとめると図-3の様になり、この評価結果が実現象に促していると考えられる。

2.3 損傷量指標の算出

建物の損傷量指標 I_{dm} を式(1)で定義する。

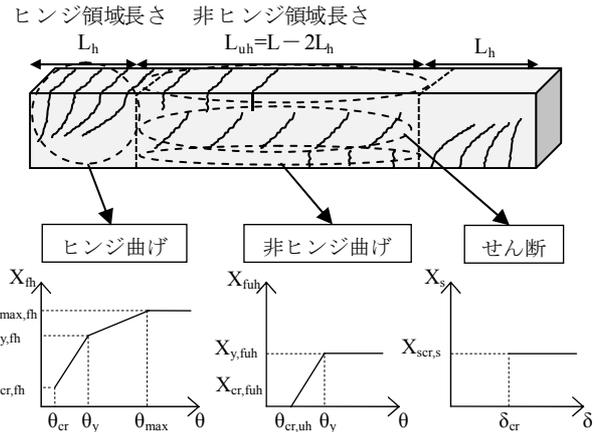


図-2 ひび割れ長さ評価モデルの概要

表-2 部材モデル

モデル	C-HN	C-LN	G-0	G-1	G-2
断面(mm)	800×800		600×800		900×1200
部材長さ(mm)	4000		8000	12000	8000
Fc(N/mm ²)	24				
主筋	16-D38 SD490		5+2-D25 SD390		
横補強筋	4-D16@60 SD590		4-D10@80 SD390		
軸力比	0.16	0.04	0.0		

表-3 各モデルの総ひび割れ長さ

モデル	総ひび割れ長さ (m)		
	ヒンジ領域	非ヒンジ領域	合計
C-NH	155.7	21.7	177.4
C-NL	168.8	24.8	193.6
G-0	158.2	39.0	197.2
G-1	158.2	73.2	231.4
G-2	374.6	7.5	382.2

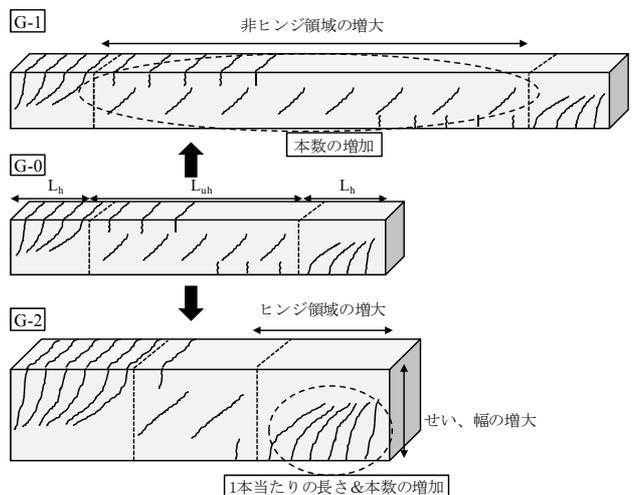


図-3 ひび割れ性状の傾向

$$I_{dm} = C_{ti}/C_t = \sum C_{ki} / \sum C_k \quad (1)$$

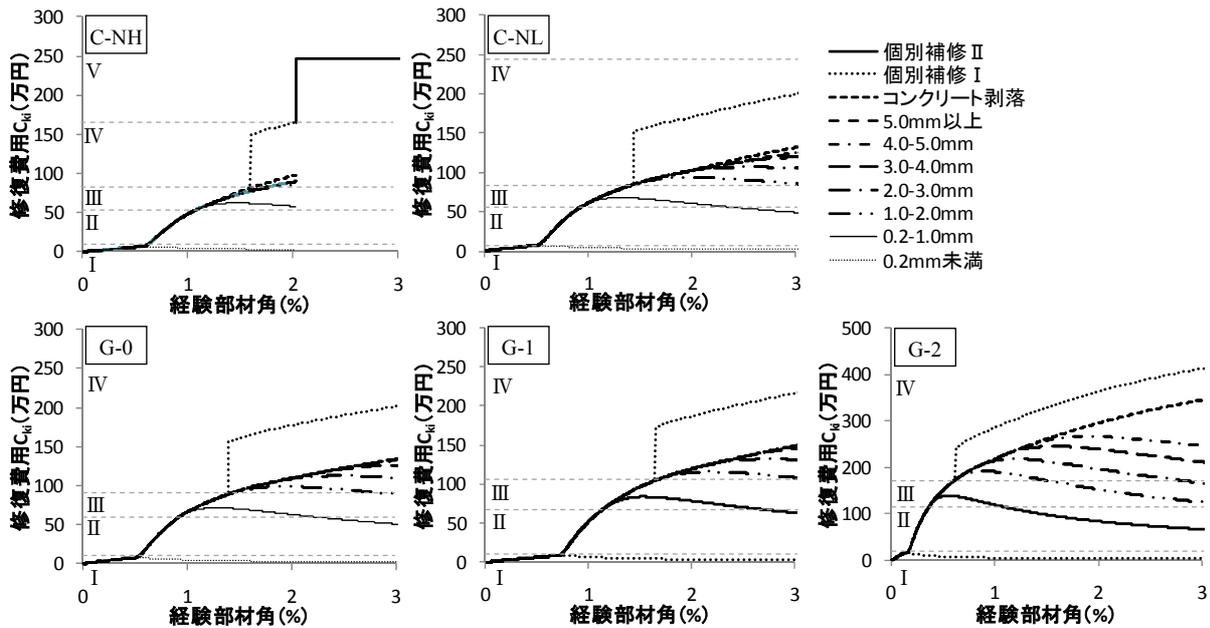


図-4 修復費用 C_{ki} —経験部材角関係

ここで、 C_{ki} : i ステップにおける全部材の修復費用の和、 C_{ki} : k 番目の部材の i ステップにおける修復費用、 C_t : 全部材の新設部材への交換に要する費用、 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。

各ステップの修復費用 C_{ki} は、損傷量評価モデルによって求まる各損傷に、対応する修復費用単価を掛けることで求める。修復費用単価は、前田らの研究⁴⁾における1995年兵庫県南部地震の被災RC造学校校舎の復旧工事例を参考に、表-4の様に設定した。単価は直接工事費のみ考慮し、間接工事費は含んでいない。個別補修I及びIIは、それぞれ損傷度IV及びVの時に発生するものとする。尚、費用単価は、市場の状況や工事のケースによって変動することが考えられ、工事記録等の資料が統計的にも十分でないことから、本論文で示す値が必ずしも妥当でない可能性があるが、本論文では現状の資料に則し、表のように設定した。また、実際の建物の修復費用には、躯体の他に、非構造部材や設備機器などの修復費用もあり、むしろこれらの方が高額になる場合もある。しかしながらこちらも資料が十分でないため、本研究では、前田らの研究を参考に、躯体以外の修復費用は躯体のそれに比例すると仮定し I_{dm} を算出することとした。なお、損傷度Vの個別補修にあたる費用 C_k は部材の規模によって異なると考えられるため、C-NLを基準部材とし、それに対する体積の比を用いて式(2)の様に定める。

$$C_k = C_0 \times (V_k/V_0) \quad (2)$$

ここで、 C_0 : 基準となる部材 (C-NL) の新設時費用で、 $C_0=246$ (万円)、 V_0 : 基準となる部材の体積で、 $V_0=0.8 \times 0.8 \times 4.0=2.56$ (m^3)、 V_k : 対象とする部材の体積である。個別補修Iにあたる費用も部材によって異なると考えられるが、ここでは簡単のため定数を使用する。

表-4 修復費用単価

損傷レベル	補修工法	修復費用単価 (万円)
0.2mm 未満	エポキシ樹脂摺込	0.2 (/m ²)
0.2~1.0mm	エポキシ樹脂注入	0.73 (/m)
1.0~3.0mm		0.9 (/m)
3.0~5.0mm		13.0 (/m)
5.0mm 以上		15.0 (/m)
コンクリート剥落	コンクリート剥離補修	6.7 (/m ²)
個別補修 I	フープ筋取替等	67.8 (/本)
個別補修 II	部材打ち替え	C_k (/本)

2.2(2)の各モデルの修復費用 C_{ki} と部材角の関係を、各損傷度時の費用と併せて図-4に示す。損傷度の判定に関しては、損傷度I~IVは損傷量評価モデルによる最大ひび割れ幅で、損傷度Vは曲げバネの回転角と中立軸位置から算出したコアコンクリートの圧縮歪によって判定した。各損傷度に至る変形角、またその時の修復費用がモデル毎に異なることがわかる。この要因としては前者には剛性の違い、後者には部材寸法によるひび割れ性状の違いが挙げられる。軸力の大きいC-NHは圧壊により損傷度Vに至っているが、他のモデルでは損傷度IVに留まる結果となった。実際にはこれらの部材は、変形角の増加により曲げ降伏後のせん断破壊が生じ、損傷度Vに至ることが考えられるが、修復性能を評価する範囲の変形角においては、せん断破壊は生じないこととし、本論文では考慮しない。また、高軸力のC-NHにおいても、コンクリートの剥落による修復費用の増加は軽微であることから、ひび割れに対する補修、及び個別補修に要する費用が全体の修復費用に対して支配的であると言える。

3. 略算法

3.1 評価手法の概要

被災建物に対して補修・補強による復旧か、改築かの復旧方針を決定・検討する際、それに要する時間が長くなるとその間の経済損失が大きくなるものになるため、早急な判断が必要になる。またその際には、ひび割れ等の損傷量の実測など詳細な調査によらず、損傷状態を目視で簡略に判断できる指標（例えば損傷度）から建物の損傷度合いを判断する必要がある。ここでは、各部材の損傷度から簡便に建物の損傷量指標を算定する略算法を提案する。略算法の概要を図-5に示す。各々の部材の損傷度から部材レベルの損傷量指標 I_k を求め、それを部材体積で重みづけし、損傷量指標 I_{dm} を算出する（式(3)）。

$$I_{dm} = \sum(I_k \times V_k) / \sum V_k \quad (3)$$

I_k は対象部材の損傷量指標であり、2.2の損傷量評価の結果を考慮し、寸法等から損傷度毎に式(4)で求める。

$$I_k = I_0 C_0 \sqrt{A_k/A_0} (\alpha L_{hk}/L_{h0} + \beta L_{uhk}/L_{uh0}) / C_k \quad (4)$$

ここで、 I_0 ：基準となる部材（C-NL）の損傷量指標、 A_0 、 L_0 、 L_{h0} 、 L_{uh0} 、 D_0 ：基準となる部材の断面積、部材長さ、ヒンジ領域長さ、非ヒンジ領域長さ、部材せい、 A_k 、 L_k 、 L_{hk} 、 L_{uhk} 、 D_k ：対象とする部材の断面積、部材長さ、ヒンジ領域長さ、非ヒンジ領域長さ、部材せいである。 α 、 β はそれぞれヒンジ領域、非ヒンジ領域の変化が損傷量に与える影響の割合を考慮した係数で、表-3のひび割れ長さの比を考慮し、 $\alpha = 7/8$ 、 $\beta = 1/8$ とする。

ある部材のヒンジ領域長さ L_h を、吉岡らの研究⁵⁾を参考に、せん断スパン比 M/QD と部材せい D によって式(5)及び式(6)で定める。

$$\begin{cases} L_h = 0.5(M/QD)D & (1 \leq M/QD \leq 3) \\ L_h = 1.5D & (3 \leq M/QD \leq 5) \end{cases} \quad (5)$$

$$L_h = 1.5D \quad (3 \leq M/QD \leq 5) \quad (6)$$

ここで逆対称形の曲げモーメント分布を仮定すると、せん断スパン比は部材長さとし、式(5)の L_h は部材長さ L に比例する。そこで、ヒンジ領域長さの比 L_{hk}/L_{h0} を、部材の細長比 (L_k/D_k) によって式(7)及び式(8)で定める。

$$\begin{cases} L_{hk}/L_{h0} = L_k/L_0 & (L_k/D_k < 6) \\ L_{hk}/L_{h0} = D_k/D_0 & (L_k/D_k \geq 6) \end{cases} \quad (7)$$

$$L_{hk}/L_{h0} = D_k/D_0 \quad (L_k/D_k \geq 6) \quad (8)$$

また、非ヒンジ領域長さの比 L_{uhk}/L_{uh0} は、部材長さの比 L_k/L_0 とほぼ等しいこととし、これを用いる。

(4)式の構成を図-6に示す。 I_k は、基準部材の修復費用 $I_0 C_0$ をその部材の寸法によって補正し修復費用を求め、新設時の費用 C_k に対する割合として算出する。基準部材には、圧縮力によるコンクリートの圧壊と、引張力によるひび割れ幅の拡大の双方が見られることから、C-NLを用いることとした。部材寸法による補正では、部材断面積の比による損傷量の変化 ($\sqrt{A_k/A_0}$) 及び部材長さによる損傷量の変化 ($\alpha L_{hk}/L_{h0} + \beta L_{uhk}/L_{uh0}$) を考慮する。

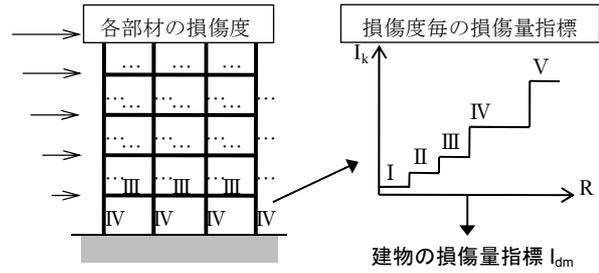


図-5 略算法による修復性評価の概要

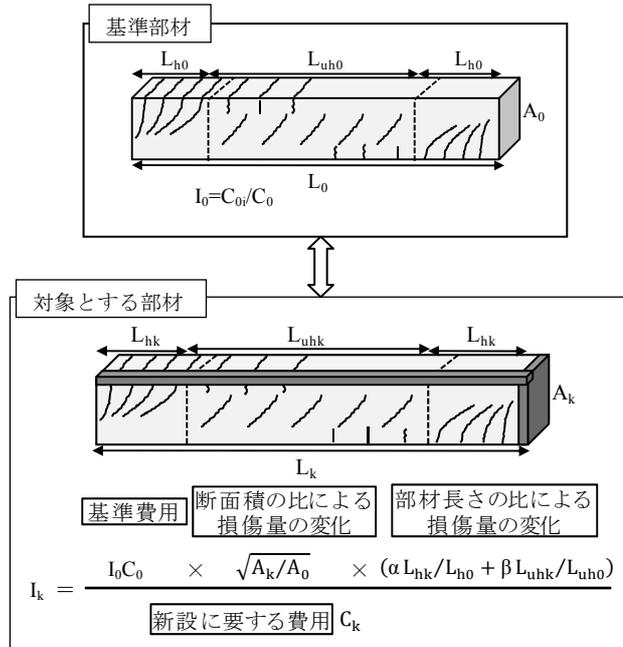


図-6 部材の損傷量指標 I_k 算出式の構成

表-6 基準損傷量指標 I_0 の設定

損傷度	I	II	III	IV
精算による損傷量指標 (%)	1.5	13.1	28.8	64.7
基準損傷量指標 I_0 (%)	2	15	30	70

断面積比の平方根をとっているのは、部材幅とせいの双方の影響を統合して評価していることを意味する。なお、損傷度Vに至る際の I_k は、式(4)によらず100%とする。

3.2 部材モデルの解析による基準損傷量指標の決定

2.2で示した部材モデルに略算法を適用し、式(4)における基準となる損傷量指標 I_0 の決定、及び各部材における略算法の妥当性の検証を行う。なお精算法による部材レベルの損傷量指標は、式(1)において $k=1$ (部材数=1)として求めた。

各モデルにおける損傷量指標一部材角関係を図-7に示す。略算法モデルにおける基準損傷量指標 I_0 は、C-NLの精算法による各損傷度時の損傷量指標の中央値を用いて表-6の様に定めた。各部材モデルにおいて、略算法による各損傷度時の損傷量指標が精算法と良好に対応しており、部材レベルの損傷量指標として式(4)が適用可能であると言える。

4. 建物モデルの試評価

4.1 評価対象

(1) 建物モデルの概要

建物モデルに対して、2章及び3章で示した手法により損傷度指標を算出し、修復性の検討及び現行の修復限界状態との比較を行う。建物モデルの概要を図-8に示す。モデルは層崩壊型(Sモデル)と全体崩壊型(Tモデル)の2モデルであり、双方とも4層4スパンである。崩壊メカニズム形成時のベースシア係数として、Sモデルは0.6、Tモデルは0.3を目標としている。柱・梁の断面は表-2のC-NL(あるいはC-NH)及びG-0を想定し、目標ベースシア係数を満足するよう、各強度を設定した。両モデルは崩壊メカニズム形成時の層毎の損傷度合いが著しく異なり、耐震性能評価指針¹⁾における各層の部材の損傷割合によって規定する修復限界状態決定法では、妥当な評価ができないことが予想される。

(2) 静的荷重漸増載荷解析

解析対象建物に対して、 A_i 分布によるPushOver解析を行った。図-9に各モデルのベースシア係数-層間変形角関係を示す。図に示す修復限界IIは、表-1の $c=50\%$ にあたるステップ、安全限界はいずれかの層の層間変形角が $1/50\text{rad}$ に至る直前のステップとした。Sモデルでは1層に変形が集中しているのに対し、Tモデルでは全層に変形が生じているのが分かる。

4.2 修復性能の検討及び現行の修復限界との比較

図-10に両モデルのPushOver解析による各層の変位を1質点型に縮約した際の代表変位と、躯体修復費用との関係を示す。Sモデルでは1層柱に損傷が集中し費用が頭打ちになるのに対し、Tモデルでは全層の部材に損傷が生じ、修復費用が高額になる。これは前述した各層への変形の集中度合いの違いと対応する。

精算法と略算法による各モデルの損傷量指標と保有耐震性能指標¹⁾との関係を図-11に示す。ここで保有耐震性能指標とは、各ステップの代表変形における入力地震動(応答)と基準地震動の比で表され、主に安全性の観

点から、その変位時点での建物の耐震性能を表す指標である。図に示す各層の修復限界は現行の手法による層の限界値であり、表-1の $c=50\%$ にあたる。

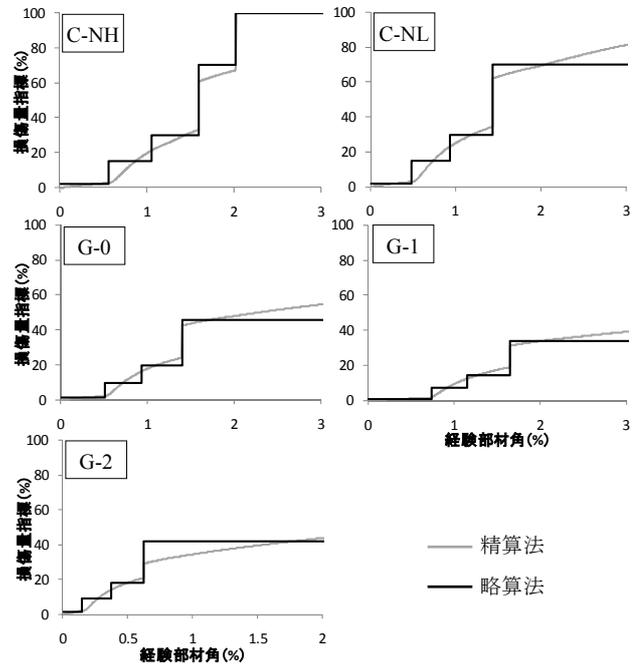


図-7 部材モデルの損傷量指標-経験部材角関係

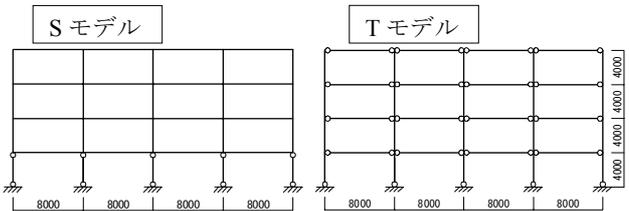


図-8 建物モデル概要

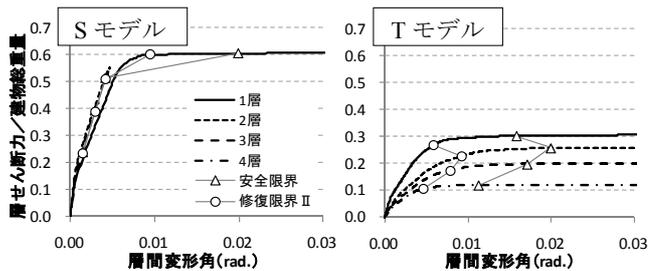


図-9 ベースシア係数-層間変形角関係

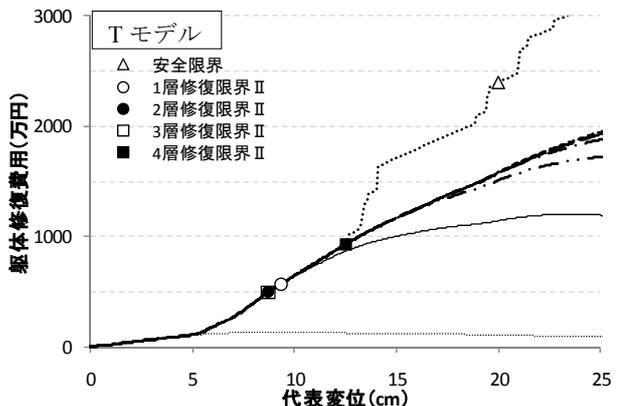
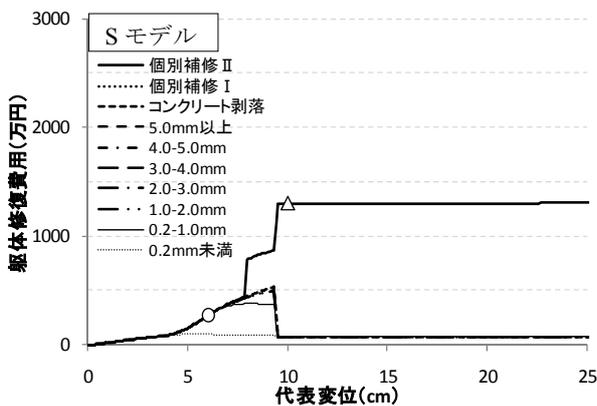


図-10 躯体修復費用-代表変位関係

各保有耐震性能指標におけるSモデルの損傷量指標がTモデルの半分程度と小さいことから、同じ耐震性能を有する際に建物の損傷度合いが異なることになり、Sモデルが修復性の点でTモデルより優れていると考えることができる。また略算法を適用した結果、精算法とほぼ同様の結果が得られており、被災建物の修復性能評価において略算法による評価が有効であると考えられる。各保有耐震性能指標における損傷量指標を若干過大評価する傾向にあるが、略算法では逆対称形の曲げモーメント分布を仮定しており、部材の両端の損傷量が常に等しいのに対し、精算法では基本的に両端の損傷量が異なることが原因と考えられる。

表-7 に現行の手法で規定される各限界状態における損傷量指標を示す。また、図-12 に現行の手法による修復限界状態IIと、本手法（精算法）の $I_{dm}=10\%$ における層毎の損傷量指標の内訳を示す。表-7 において、修復限界IIに対する両モデルの損傷量指標に差異が見られる。現行の手法では、いずれかの層が限界状態に至った時点で建物の修復限界とするため、図-12 に示すように他の層の損傷状況を考慮できない。また、前述の前田らが調査した復旧工事例⁴⁾では、(修復費用/新築費用)が最も大きい例で10%強程度であったのに対し、表-7 の修復限界IIに対する損傷量指標は小さめの値となっている。一方、図-12 に示すように、例えば $I_{dm}=10\%$ を修復限界として設定すると、建物全体の損傷量から限界状態を決定するため、層毎の損傷度合いのばらつきを考慮することができる。このことから、損傷量指標を用いることで修復限界状態の適切な設定が可能になると思われるが、具体的に I_{dm} =何%を修復限界として設定すべきかに関しては、所有者の意思決定によるところもあり、修復費用単価に関するデータの蓄積や損傷量指標の精度向上など課題も多い。これに関しては十分な検討が必要である。

5. まとめ

RC 造建物の修復性能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を行い、崩壊型式の異なる建物モデルに適用した結果、以下の知見を得た。

- ・各保有耐震性能指標に対して、層崩壊型のSモデルの損傷量指標が全体崩壊型のTモデルに比べ小さくなっていることから、Sモデルが修復性の点で優れると考えられる。
- ・本手法による損傷量指標を修復限界状態の一つの目安として考えれば、層毎の損傷度合いのばらつきを考慮した性能評価が可能である。
- ・略算法を適用したところ、精算法と良好に対応する結果を得たことから、被災建物の修復性能評価のツールとして略算法が有効な手段と成り得る。

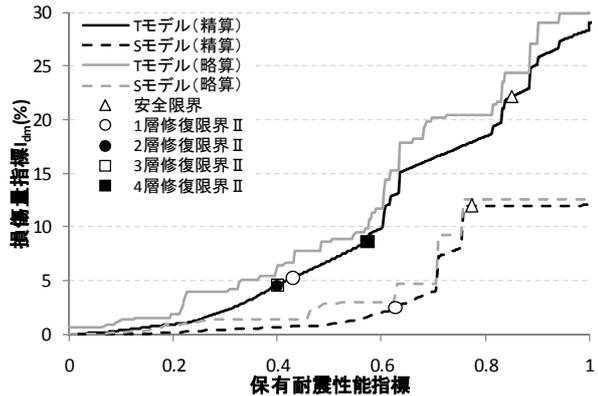


図-11 損傷量指標 I_{dm} の推移

表-7 各限界状態における損傷量指標 (%)

モデル	修復限界II		安全限界
	最小値	最大値	
S	2.5	2.5	12.0
T	4.6	8.6	22.1

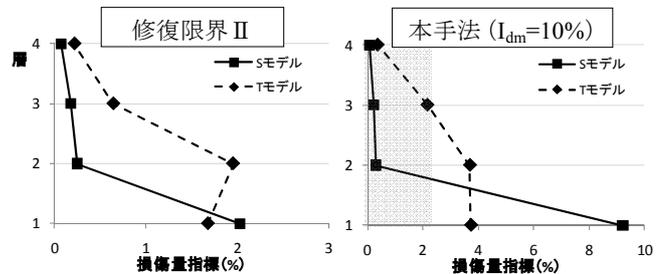


図-12 層毎の損傷量指標の内訳

尚、損傷量指標によるより一般的・具体的な修復性能及び修復限界状態の評価に関しては、本論文では十分な検討を行うに至っていないため、今後の課題としたい。

参考文献

- 1) 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，2004
- 2) 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
- 3) 五十嵐さやか，金順実，曹炳玟，前田匡樹：ひび割れ量評価モデルによる RC 造柱・梁部材の損傷評価，第 13 回日本地震工学シンポジウム論文集，pp.597-604，2010.11
- 4) 前田匡樹，本多祐子，康大彦：地震被害を受けた鉄筋コンクリート造建物の被災度と修復コスト，日本地震工学会 第 11 回日本地震工学シンポジウム論文集，第 2 巻，pp.2103-2106，2002.11
- 5) 吉岡研三，岡田恒男，武田寿一：鉄筋コンクリートの変形性能の向上に関する研究 第 2 報 破壊機構並びに補強筋の歪分布について，日本建築学会論文集，第 282 号，pp.37-45，1979.8