

論文 梁降伏型鉄筋コンクリート造建物のエネルギー吸収能力に基づいた全架構残存耐震性能の評価手法

権 淳日^{*1}・高橋 典之^{*2}・崔 琥^{*2}・中埜 良昭^{*3}

要旨：現在の構造設計の主流である梁降伏型鉄筋コンクリート造建物を対象として、建物のエネルギー吸収能力に基づき地震による建物の安全限界までの余裕度の減少度合（全架構耐震性能残存率）を算出する手法を提案した。また、工学量に基づき被災度を想定する特徴区間を定義して、全架構耐震性能残存率との関係について検討した。更に、部材の損傷状態から建物の全架構耐震性能残存率を算出する手法（略算法）を提案し、梁降伏型鉄筋コンクリート造架構の実験結果に適用した。その結果、2SH-64 試験体では略算法と精算法とが概ね対応したが、1SF 試験体では略算法が精算法より被災度を過大評価した。

キーワード：残存耐震性能評価、架構、エネルギー吸収能力、全架構耐震性能残存率、被災度区分

1. はじめに

国内では「震災建築物の被災度区分判定基準および復旧技術指針¹⁾」に基づき、地震により被災した鉄筋コンクリート造（以下：RC 造）建物の安全限界までの減少度合を残存耐震性能として評価し、被災度や継続使用に向けた復旧要否の判定を行っている。この手法では、表-1 のように部材に表出する損傷状態から損傷度を分類し、図-1 の定義により部材の損傷度に応じる耐震性能低減係数 η を算定して、建物の残存耐震性能を表す耐震性能残存率 R を算出する。また、表-2 のように耐震性能残存率 R と被災度との関係の目安が示されている。

しかし、この手法では鉛直部材である柱と壁の損傷のみを考慮し、各層ごとの耐震性能残存率 R の算出結果のうち、最も大きな値に基づき被災度を判定することを基本とする。また、耐震性能残存率 R の閾値は、1991 年版の被災度区分判定基準¹⁾の損傷割合 D を基本に、1978 年宮城県沖地震に際して定められた表-3 の定義²⁾による損傷パターン等も参考に判定された被災度区分結果に基づき設定されており、現在の構造設計の主流である梁降伏型 RC 造建物の震災後の残存耐震性能の評価および被災度区分判定への適用を想定していない。

近年、梁降伏型 RC 造建物の残存耐震性能の評価手法の提案を目的とした研究が進められつつあるが^{3),4)}、本研究では建物のエネルギー吸収能力に基づき全架構の残存耐震性能を表す全架構耐震性能残存率 SI_{margin} を定義し、梁降伏型 RC 造架構の実験結果に適用する。はじめに、工学量に基づき被災度の進展を表す特徴区間を定義し、全架構耐震性能残存率 SI_{margin} との関係について検討する。次に、目視による部材損傷から建物の全架構耐震性能残存率 SI_{margin} を算出する略算法を提案し、その妥当性を検証する。

表-1 部材の損傷度の分類¹⁾

損傷度	最大残留ひび割れ幅
I	0.2mm 未満
II	0.2~1.0mm 程度
III	1.0~2.0mm 程度
IV	2.0mm 以上
V	—

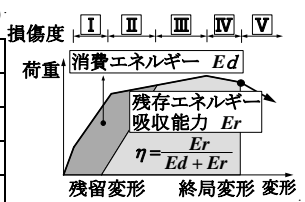


図-1 耐震性能低減係数¹⁾

表-2 建物の耐震性能残存率 R と被災度との関係¹⁾

耐震性能残存率 R (%)	被災度
$R \geq 95$	軽微
$80 \leq R < 95$	小破
$60 \leq R < 80$	中破
$R < 60$	大破
$R = 0$	倒壊

表-3 建物の被災度の定義²⁾

被災度	損傷状態	スケッチ
軽微 (I)	柱・耐力壁・二次壁の損傷が軽微か、もしくは、ほとんど損傷がないもの。	
小破 (II)	柱・耐力壁の損傷は軽微であるが、RC 二次壁・階段室のまわりに、せん断ひび割れが見られるもの。	
中破 (III)	柱に典型的なせん断ひび割れ・曲げひび割れ、耐力壁にせん断ひび割れが見られ、RC 二次壁、非構造体に大きな損傷が見られるもの。	
大破 (IV)	柱のせん断ひび割れ・曲げひび割れによって鉄筋が露出・座屈し、耐力壁に大きなせん断ひび割れが生じて耐力に著しい低下が認められるもの。	
倒壊 (V)	柱・耐力壁が大破壊し、建物全体または建物の一部が崩壊に至ったもの。	

*1 東京大学 工学系研究科 大学院生 (正会員)

*2 東京大学 生産技術研究所 助教・博士(工学) (正会員)

*3 東京大学 生産技術研究所 教授・工博 (正会員)

2. 全架構残存耐震性能の評価手法

2.1 全架構耐震性能残存率 SI_{margin} の定義

梁降伏型 RC 造架構における全架構残存耐震性能の評価手法の概念を図-2 に示す。単調載荷による架構の安全限界までのエネルギー吸収能力に対して、最大応答変形後の除荷時までの架構のエネルギー消費の後に残存するエネルギー吸収能力の量を比率で表し、全架構耐震性能残存率 SI_{margin} とする。

2.2 全架構耐震性能残存率 SI_{margin} の算定法 (精算法)

架構の水平耐力が最大水平耐力の 80% に低下する時を架構の安全限界と定め、架構を安全限界に至らしめる外力の大小で耐震安全性が定量的に表されるものとする。ここで、既往の研究に倣い^{5),6)}、仮想仕事の原理から地震動による外力仕事の内力仕事である架構のエネルギー吸収量と釣り合うものとする、架構のエネルギー吸収量の大小に基づき耐震安全性が評価される。

架構のエネルギー吸収量は架構の規模に応じて絶対量が異なり、単純に比較しても耐震安全性の良否を判断できるものではない。そこで、式(1)のように架構のエネルギー吸収量を基準化し、全架構耐震性能残存率 SI_{margin} とする。ここで、 $\sum E_{d,i}$: 最大応答変形後の除荷時変位までの部材 i のエネルギー消費量の総和、 $\sum E_{u,i}$: 架構の水平耐力が最大耐力の 80% 低下時まで部材 i が吸収したエネルギー量の総和である。

$$SI_{margin} = \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^n E_{d,i}}{\sum_{i=1}^n E_{u,i}} \right) \times 100 \quad (\%) \quad (1)$$

2.3 被災度の進展を表す特徴区間の定義

本研究では、工学量に基づき検討すべく、架構の骨格曲線に見られる特徴区間を被災度の進展を表す特徴区間と定義する (表-4 および図-3)。ここで、A~E 区間は従来の被災度区分における軽微~倒壊をそれぞれ想定している。

2.4 全架構耐震性能残存率 SI_{margin} の算定事例

1 層 2 スパンの RC 造 1/2 スケール平面試験体 (中央柱のせん断補強筋比 p_w が 0.64% の試験体で、以下: 2SH-64 試験体)⁷⁾、および、1 層 1×1 スパンの RC 造実大立体試験体 (以下: ISF 試験体)⁸⁾ の静的繰返し載荷実験結果を用いて全架構耐震性能残存率 SI_{margin} を算定し、特徴区間 A~E で区分される SI_{margin} の閾値について検討する。

(1) 実験結果の概要

各試験体の荷重-変形関係を図-4 に示す。表-4 に基づき各試験体の骨格曲線に現れる A~E 区間を定めると、2SH-64 試験体では、B 区間と C 区間の閾値 (区間変形量) はほぼ等間隔であるが、ISF 試験体では、B 区間より C 区間の閾値が広い間隔となっている。

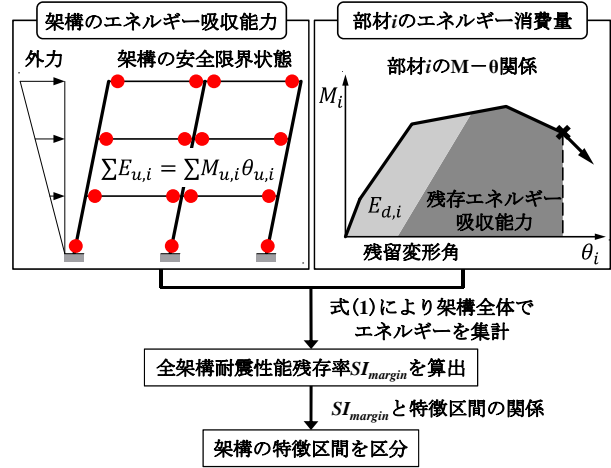


図-2 全架構残存耐震性能の評価手法の概念

表-4 架構の骨格曲線に見られる特徴区間の定義

特徴区間	定義
A区間	ひび割れ点を超えた部材が生じてから降伏点を超えた部材が生じるまでの区間
B区間	降伏ヒンジが架構内各所に進展し、メカニズム形成に至るまでの区間
C区間	架構が保有水平耐力を維持する区間
D区間	耐力低下域に入り、架構の水平耐力が最大耐力80%低下時に至るまでの区間
E区間	水平力支持能力を喪失するまでの区間

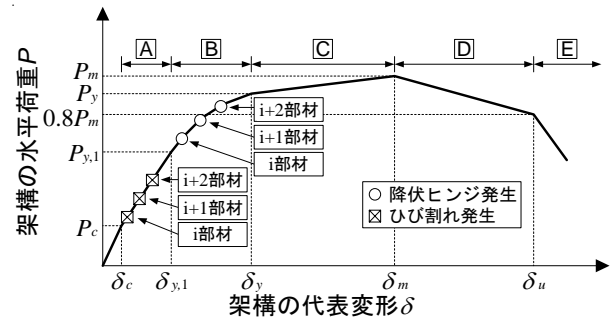


図-3 架構の特徴区間の概念

また、各試験体のエネルギー消費量の推移を図-5 に示す。両試験体とも、A, B 区間ではひび割れ・主筋降伏に伴い、エネルギー消費量が漸増し、C, D 区間ではエネルギー消費量の増加が最大応答変形角 (経験最大層間変形角) の増分とほぼ比例的な関係となる。

各試験体の損傷量測定終了時の損傷状況を図-6 に示す。2SH-64 試験体は腰壁の貫通破壊により中央柱が短柱化せず曲げ破壊に近い挙動となった。ISF 試験体は全て曲げ部材であるが、梁上面の計測における実験作業員の安全性を考慮して損傷量計測を経験最大層間変形角 2% で中断した。

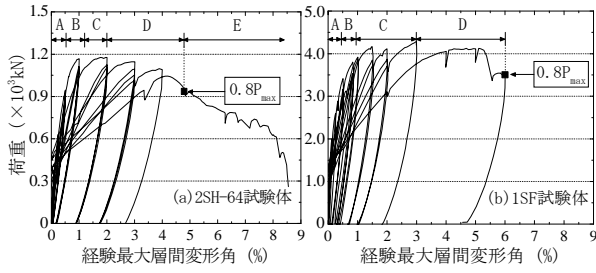


図-4 荷重-変形関係

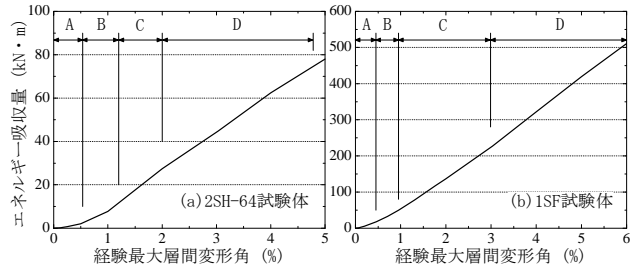
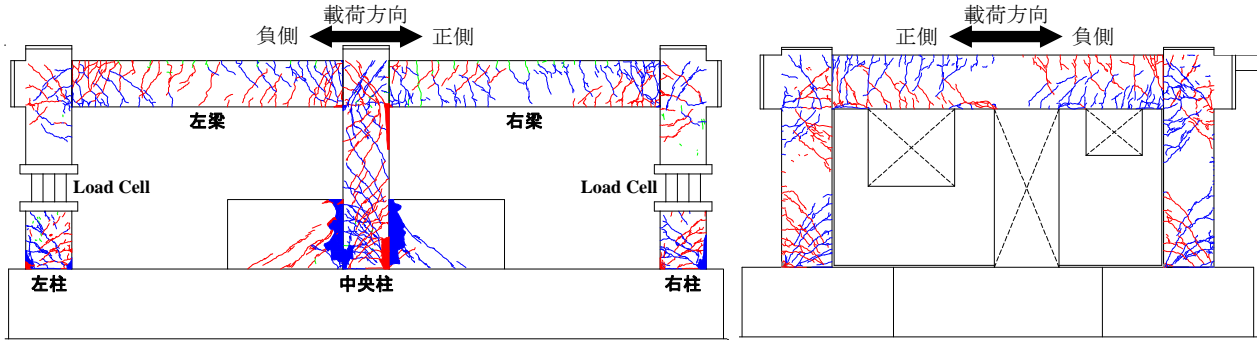


図-5 エネルギー消費量と経験最大層間変形角との関係



(a) 2SH-64 試験体 (1/2 スケール) の経験最大層間変形角 3.03%時 (b) 1SF 試験体 (実大) の経験最大層間変形角 2%時
図-6 損傷量測定終了時の損傷状況

(2) SI_{margin} 算定結果と被災度 (特徴区間) の関係

式(1)に基づき全架構耐震性能残存率 SI_{margin} を求め、被災度の進展を表す特徴区間との関係を図-7 に示す。あわせて、梁降伏型架構に対し梁の損傷度分類は柱の損傷度定義を用いて、略算法に基づき耐震性能残存率 R を求め⁹⁾、表-2に基づき判定した被災度区分と共に図-7 に併記する。従来の略算法による耐震性能残存率 R に基づく被災度区分判定は、梁降伏型架構の残存エネルギー吸収能力に対して被災度を過大評価することが分かる。

また、全架構耐震性能残存率 SI_{margin} と耐震性能残存率 R を対象に、両試験体の被災度を定量的に表す特徴区間 A~D の閾値を算出すると表-5 のようになる。両試験体の A 区間と B 区間を区分する全架構耐震性能残存率 SI_{margin} の閾値はともに 96%であるが、B 区間と C 区間および C 区間と D 区間を区分する全架構耐震性能残存率 SI_{margin} の閾値には違いが見られる。しかし、大きくばらついている耐震性能残存率 R と比べ、全架構耐震性能残存率 SI_{margin} は比較的閾値が近接している。そこで、限られたデータではあるが、対象とした 2 試験体では耐震性能残存率 R よりも全架構耐震性能残存率 SI_{margin} を用いたほうが被災度をより適切に評価できており、全架構耐震性能残存率 SI_{margin} は梁崩壊型試験体により適した指標であると考えられる。

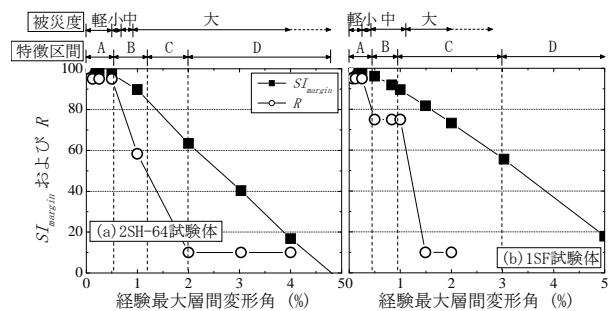


図-7 全架構耐震性能残存率 SI_{margin} と耐震性能残存率 R

表-5 特徴区間で区分される SI_{margin} と R の閾値

試験体名	特徴区間の区分					
	A~B 区間閾値		B~C 区間閾値		C~D 区間閾値	
	SI_{margin}	R	SI_{margin}	R	SI_{margin}	R
2SH-64 試験体	96%	95%	84%	48%	63%	10%
1SF 試験体	96%	80%	90%	75%	55%	—

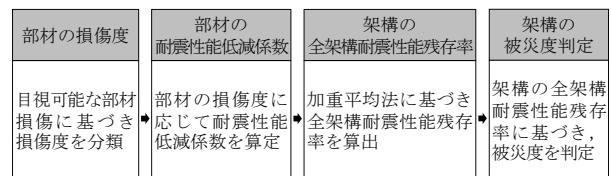


図-8 略算法による全架構残存耐震性能の評価手順

3. 全架構耐震性能残存率 SI_{margin} の略算法

3.1 概要

実際の被災現場では各部材の耐力やエネルギー消費量などの工学量および工学量変化を算定することが難

しい。そこで本章では、被災現場で目視可能な損傷量に基づいた架構の残存耐震性能の評価手法について検討を行い、全架構耐震性能残存率 SI_{margin} の略算法を提案する (図-8)。

3.2 梁の損傷度区分

部材の損傷度は本来、主筋降伏などの工学的状態変化に基づき定義されるべきであるが、被災現場では目視可能な損傷に基づき損傷度を定めざるを得ない。梁の損傷度区分については、1991年版の被災度区分判定基準において柱と同様の目視可能な損傷（ひび割れ幅）に基づく基準が適用されるとしているが、2001年版の被災度区分判定基準においては「若干緩やかに」柱の基準を適用することも考えられると言及している。

部材の損傷度区分において損傷度ⅡとⅢの区分のみが工学的状態変化を明示しておらず、最大残留ひび割れ幅を目安に区分されている。軸力の生じる柱部材と軸力の生じない梁部材とは、同じ残存耐震性能を有する状態であっても最大残留ひび割れ幅が異なり、軸力の生じない梁部材の最大残留ひび割れ幅が相対的に大きくなることと推測される。そこで、損傷度ⅡとⅢの区分が補強筋降伏により区分されると仮定し、1/2スケールの2SH-64試験体の実験結果（図-9）より工学状態と対応する目視可能な損傷量の目安を梁部材の損傷度区分として定めると表-6を得る。

ここで、次節以降の検討に用いるため、工学状態との対応関係はないが、従来より広く認知されている最大残留ひび割れ幅 1mm を損傷度の境界として追加し、工学状態に基づく損傷度Ⅱを目視可能な損傷に基づく損傷度ⅡとⅡ⁺に区分する（図-10）。

3.3 梁の損傷度に応じる耐震性能低減係数 η

部材の耐震性能低減係数 η を求める既往の方法¹⁰⁾に基づき梁の耐震性能低減係数 η を算出し、図-10の定義により分類した損傷度との関係を図-11に示す。ここで、梁の終局塑性率を8と仮定した。図-11より、損傷度の境界を示す耐震性能低減率 η （下限値）を求めると表-7のようになる。また、参考として柱部材の耐震性能低減率 η を表-7に併記する。

3.4 部材のエネルギー寄与係数

本来、架構全体のエネルギー消費量に対する各部材のエネルギー消費量の比を用いて各部材のエネルギー寄与係数を算定すべきであるが、本研究ではエネルギー消費量を逐一算出せずにエネルギー寄与係数 α を定める。

まず、ある特定の部材の降伏をもって架構がメカニズムに至る時、その特定の部材をクリティカル部材と定める。梁降伏先行型の架構において、1階柱脚部の降伏によりメカニズムに至る場合、1階柱部材がクリティカル部材となる。このとき、クリティカル部材の降伏モーメントに対するその他の部材の降伏モーメントの比を部材のエネルギー寄与係数 α とする。

降伏モーメントより算出されるエネルギー寄与係数 α が、降伏時のみならず、いずれの層間変形角においても

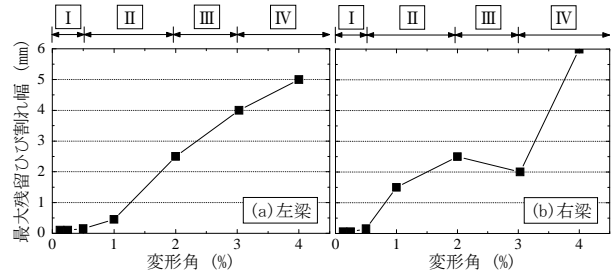


図-9 梁の損傷度と最大残留ひび割れ幅（2SH-64試験体）

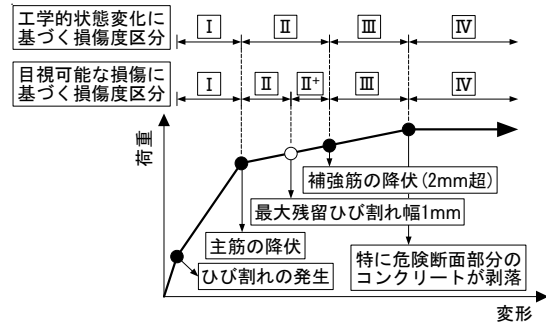


図-10 梁の損傷度の定義

表-6 梁の損傷度区分の定義

工学状態に基づく損傷度	境界となる工学状態	境界となる目視可能な損傷量	目視可能な損傷に基づく損傷度
I	主筋降伏	$w_{max} = 0.2mm$	I
II			II
	—	$w_{max} = 1mm$	II ⁺
	補強筋降伏	$w_{max} = 2mm$ 超	III
III	最大耐力	$w_{max} = 4mm$ 超 かぶりコンクリート剥落	III
IV			IV

w_{max} : 最大残留ひび割れ幅

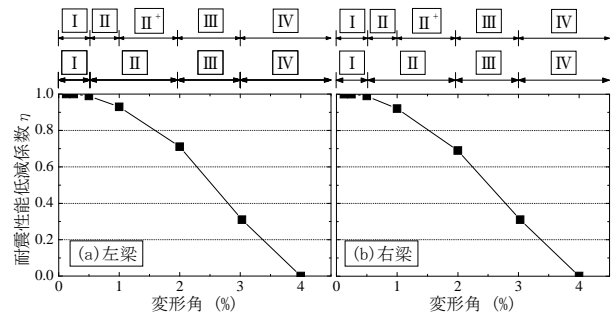


図-11 梁の損傷度と耐震性能低減係数 η （2SH-64試験体）

表-7 損傷度区分と耐震性能低減係数 η

梁の損傷度	η	柱の損傷度	η	
	(曲げ) 梁		曲げ柱	せん断柱
I	0.99	I	0.95	0.95
II	0.9	II	0.75	0.6
II ⁺	0.7	III	0.5	0.3
III	0.3	IV	0.1	0
IV	0	V	0	0

本来求めるべき各部材間のエネルギー消費量の比を近似しているか検討する。具体的には、クリティカル部材のエネルギー消費量に対する各部材のエネルギー消費量の比の推移が、降伏モーメントより算出されるエネルギー寄与係数算定値を近似すれば、いずれの層間変形角においても一定値として適用可能であると言える。

2SH-64 試験体を対象に、クリティカル部材のエネルギー消費量に対する各部材のエネルギー消費量の比の推移を求めると図-12を得る。図-12に降伏モーメントより算出されるエネルギー寄与係数算定値を併記する。図-12より、降伏モーメントより算出されるエネルギー寄与係数はいずれの層間変形角においても概ね適用可能であることが分かる。

ところで、略算法が運用される被災現場において部材のエネルギー寄与係数 α を算出することは困難なため、あらかじめ係数が設定されていると都合が良い。そこで以下の検討では、梁降伏先行型の架構に限定し、既往の実験結果を参照しながら、部材のエネルギー寄与係数 α の値を定める。柱部材の降伏によりメカニズムに至る2SH-64試験体の実験結果において、左柱(図-6(a)参照)をクリティカル部材と定めると、同断面の右柱のエネルギー寄与係数 α は1.0となる。中央柱は腰壁の破壊によって曲げ破壊の挙動を示したため、エネルギー寄与係数 α が1.0になるものと仮定する。右梁および左梁とも降伏モーメントの比よりエネルギー寄与係数 α は0.65と計算される。一方、梁部材の降伏によりメカニズムに至る1SF試験体の実験結果より、梁をクリティカル部材と定めると、柱のエネルギー寄与係数 α は1.39と計算される。

3.5 全架構耐震性能残存率 SI_{margin} の略算式

以上の検討結果より、全架構耐震性能残存率 SI_{margin} を簡便に求める略算式を式(2)のように定める。ここで、 k : 破壊形式に応じた部材種別(例えば、曲げ梁、曲げ柱、せん断柱等)、 α_k : クリティカル部材に対する部材種別 k のエネルギー寄与係数、 $\eta_{k,D}$: 損傷度 D となる部材種別 k の耐震性能低減係数、 $A_{k,D}$: 損傷度 D となる部材種別 k の部材数、 D : 損傷度のレベル (I~V) である。

$$SI_{margin} = \frac{\sum_k \alpha_k \cdot \sum_{D=1}^V (\eta_{k,D} \cdot A_{k,D})}{\sum_k \alpha_k \cdot A_k} \times 100 (\%) \quad (2)$$

図-8に示している略算法の評価手順に従い、表-6および表-7に基づき耐震性能低減係数 η を算定し、略算式(式(2))により全架構耐震性能残存率 SI_{margin} を算出する。全架構耐震性能残存率 SI_{margin} の算定結果に対し、工学量に基づく被災度の進展を表す特徴区間の閾値の目安(表-5)を適用することで、被災度(特徴区間)を略算法により判定することができる。

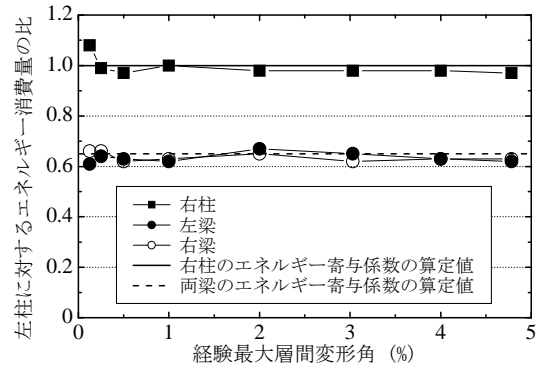


図-12 エネルギー消費量の比の推移 (2SH-64 試験体)

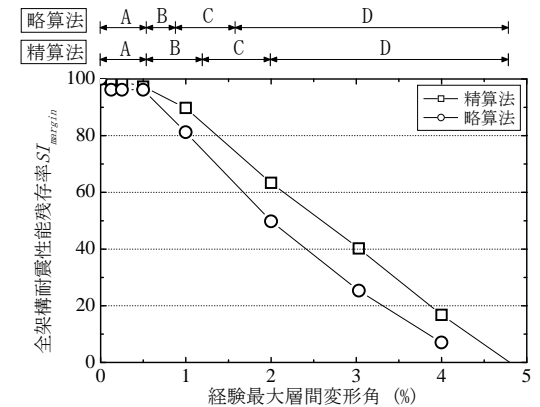


図-13 全架構耐震性能残存率 SI_{margin} の比較 (2SH-64 試験体)

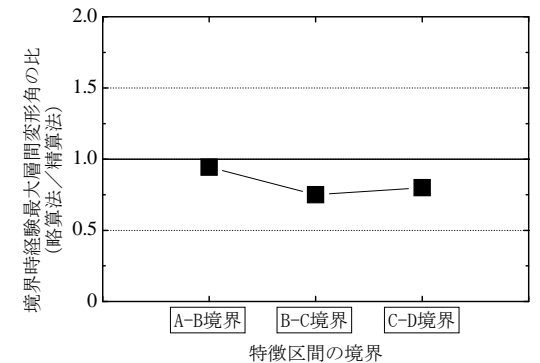


図-14 特徴区間境界時経験最大層間変形角の比 (2SH-64 試験体)

4. 精算法と略算法による SI_{margin} の比較

4.1 2SH-64 試験体

2章に述べた精算法および3章の略算法から求めた2SH-64試験体の全架構耐震性能残存率 SI_{margin} と被災度(特徴区間)の判定結果を図-13に示す。図-13より、精算法と略算法で全架構耐震性能残存率 SI_{margin} の算出結果が概ね一致しており、被災度(特徴区間)を区分する経験最大層間変形角も概ね対応した。

次に、精算法に基づき架構の特徴区間を区分する経験最大層間変形角に対し、略算法に基づき架構の特徴区間を区分する経験最大層間変形角の比を図-14に示す。略算法を適用した場合、B-C区間境界時経験最大層間変形角が小さくなるものの、A-B区間境界時およびC

—D 区間境界時経験最大層間変形角は精算法とほぼ等しい値となった。

4.2 1SF 試験体

1SF 試験体において、精算法および略算法から求めた全架構耐震性能残存率 SI_{margin} と被災度（特徴区間）の判定結果を図-15 に示す。図-15 より、精算法と略算法で全架構耐震性能残存率 SI_{margin} の算出結果が一致せず、略算法の方が被災度を過大に評価した。これは、2SH-64 試験体の実験結果から定めた梁の損傷度区分と耐震性能低減係数 η の関係（表-6 および表-7）を 1SF 試験体にそのまま適用しており、仮定した部材の終局塑性率の妥当性および最大残留ひび割れ幅に影響する部材の寸法効果を適切に考慮できていないことが影響したものと考えられる。

次に、精算法に基づき架構の特徴区間を区分する経験最大層間変形角に対し、略算法に基づき架構の特徴区間を区分する経験最大層間変形角の比を図-16 に示す。略算法に基づく各特徴区間の境界時経験最大層間変形角は、精算法による結果のおよそ 0.5 倍程度であった。安全側の評価とはいえ、継続使用に向けた復旧の要否判定に適用するためには、より適切な（2SH-64 試験体固有の特性に依存しない）梁の損傷度区分と耐震性能低減係数 η の関係を検討する必要がある。

5. まとめ

本研究では、架構のエネルギー吸収量に基づく全架構耐震性能残存率の評価手法について検討を行い、以下の知見を得た。

- (1) 精算法による全架構耐震性能残存率 SI_{margin} に基づき被災度（特徴区間）を区分する閾値を求めた。
- (2) 2SH-64 試験体を対象に、梁の工学状態に基づく損傷度区分および目視可能な損傷に基づく損傷度区分を定め、両者に対応する耐震性能低減率 η の関係を示した。
- (3) クリティカル部材のエネルギー消費量に対する各部材のエネルギー消費量の比は変形角によらず一定値となり、降伏モーメントより算出される各部材のエネルギー寄与係数と概ね一致した。
- (4) 2SH-64 試験体では略算法と精算法とが概ね対応したが、1SF 試験体では略算法が精算法より被災度を過大評価した。今後、様々な部材および架構の実験結果や地震被害を受けた建物の詳細な被害調査事例などを用い、寸法効果の影響や汎用性のある閾値の設定について検討する必要がある。

参考文献

- 1) 日本建築防災協会：震災建築物の被災度区分判定基準および復旧技術指針，1991.2 および 2001.9
- 2) 日本建築学会：1978 年宮城県沖地震災害調査報告，1980.2

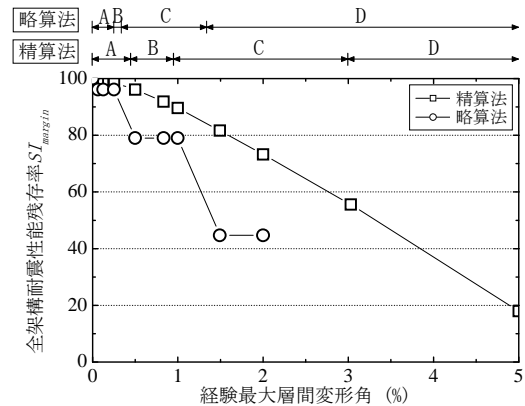


図-15 全架構耐震性能残存率 SI_{margin} の比較 (1SF 試験体)

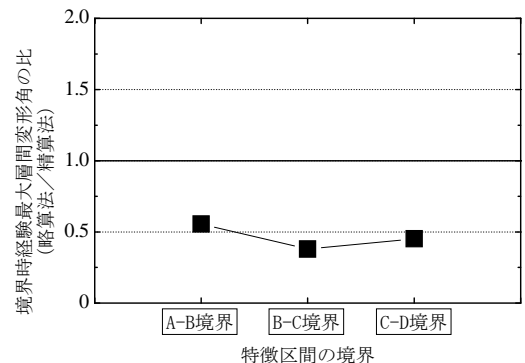


図-16 特徴区間境界時経験最大層間変形角の比 (1SF 試験体)

- 3) 包蘇榮, 松川和人, 前田匡樹：全体崩壊形建物の残存耐震性能評価法に関する研究，日本建築学会大会学術講演梗概集，C-2，構造IV，pp.703-704，2010.9
- 4) 三浦耕太, 前田匡樹, 松川和人, 高橋香菜子：部材耐力と減衰を考慮した RC 造 1 層架構の耐震性能に及ぼす各部位の影響度評価法，日本建築学会構造系論文集，Vol.77，No.678，pp.1283-1290，2012.8
- 5) 権淳日, 高橋典之, 崔琥, 中埜良昭：RC 造架構の耐震安全性と耐震修復性の相関モデルの提案 その 1 架構の耐震安全性と耐震修復性の定義，日本建築学会大会学術講演梗概集，構造IV，pp.655-656，2012.9
- 6) 李煥九, 権淳日, 高橋典之, 崔琥, 中埜良昭：RC 造架構の耐震安全性と耐震修復性の相関モデルの提案 その 2 相関モデルへの実験結果の適用，日本建築学会大会学術講演梗概集，構造IV，pp.657-658，2012.9
- 7) 東京大学生産技術研究所ほか：耐震診断法の高度化に関する検討報告書，2011.3
- 8) 建築研究所：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成果報告書，2011.1
- 9) 権淳日, 高橋典之, 崔琥, 中埜良昭：地震により被災した梁降伏型 RC 造架構の耐震安全性能の評価手法に関する研究，日本地震工学会大会梗概集，2012.11
- 10) 文野正裕, 前田匡樹, 長田正至：部材の残余耐震性能に基づいた震災 RC 造建物の被災度評価法に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.22，No.3，pp.1447-1452，2000