

# 論文 RC 造建築物の地震応答解析による被災度と残余耐震性能の関係

鄭 文淑\*1・前田 匡樹\*2・田才 晃\*3・長田 正至\*4

**要旨:** 昨年の研究<sup>[1]</sup>で筆者らは、柱の部材実験結果に基づく簡略なモデル化により、部材のひび割れ幅（損傷度）と残余耐震性能（残余エネルギー吸収能力）との関係を定量化し、各部材の残余耐震性能から被災前後の建物の耐震性能を求め、その割合から被災度を評価する方法を提案した。本研究は、1 質点系弾塑性モデルを用い地震応答解析を行い、地震により様々なレベルの被害が生じた RC 造建築物について、被災後の残余耐震性能を評価し、部材実験による残余耐震性能との比較検討を行う。

**キーワード:** 震災 RC 造建物, 被災度, 損傷, 残余耐震性能, 地震応答解析

## 1. はじめに

地震被害を受けた鉄筋コンクリート造構造物の余震に対する安全性や、合理的な復旧計画の立案のためには、被災前後の構造物の耐震性能を正確に評価することが重要である。そのため、筆者らはこれまでに、既往の部材実験結果に基づく簡略なモデル化により、部材のひび割れ幅（損傷度）と残余耐震性能（残余エネルギー吸収能力）との関係を定量化し、各部材の残余耐震性能から被災後の建物の耐震性能を求め、被災前の耐震性能との割合から被災度を評価する方法を提案した<sup>[1,2]</sup>。被災後の耐震性能は各部材の耐力を損傷度に応じた耐震性能低下係数  $\eta$  を求め、各部材耐力を  $\eta$  により低減して算定する。ここで、本実験で、変形性能をパラメータとした RC 柱部材の正負繰返し加力を行い、荷重変形関係包絡線に単純化して部材の耐震性能低下係数を求めるとともに、変形性能による影響を調べる。また、実際の構造物は地震により瞬間的な破壊力と継続時間内の繰返し载荷を受けるので、静的载荷試験とは差があると思われる。部材実験で求めた耐震性能低下係数  $\eta$  がどの程度妥当性があるかを検討するため、1 質点系の弾塑性地震応答解析を行う。実験で得られる

耐震性能低下係数と 1 質点系弾塑性モデルによる地震応答解析で求められる耐震性能低下係数との比較検討を行う。

## 2. 柱部材実験による残余耐震性能の評価

### 2.1 実験概要

試験体は、4 階建て鉄筋コンクリート造建物の 1 階中柱を想定したほぼ実大の試験体 3 体である。試験体一覧を表-1 に示す。各試験体は一定軸力下（軸力比 0.2）で静的漸増载荷を行った。各試験体の荷重変形関係を図-1（図中の破線は RC 規準<sup>[3]</sup>による曲げ終局強度計算値、鎖線は  $0.8Q_{max}$  ( $Q_{max}$ : 最大耐力) である。) に、実験結果の一覧を表-2 に示す。ここで、終局塑性率は部材の耐力が最大耐力  $Q_{max}$  の 80% 低下した変形を限界部材角  $R_u$  と定義し求めた。

表-1 試験体一覧

試験体	b×D	L	主筋	$P_t$	横補強筋	$P_w$	$n_0$
F-75	400 × 500	1500	10-D19	0.57	2-12φ@75	0.75	0.2
F-45			12-19φ	0.71	2-12φ@125	0.45	
F-19					2-12φ@300	0.19	

b×D: 幅×せい(mm), L: 内法スパン(mm),  
 $P_t$ : 引張鉄筋比(%),  $P_w$ : 横補強筋比(%),  $n_0$ : 軸力比

\*1 横浜国立大学大学院 工学研究科 計画建設学専攻 (正会員)

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

\*3 横浜国立大学大学院 助教授 工学研究院 建築学 博士(工学) (正会員)

\*4 横浜国立大学大学院 教授 工学研究院 建築学 工学博士 (正会員)

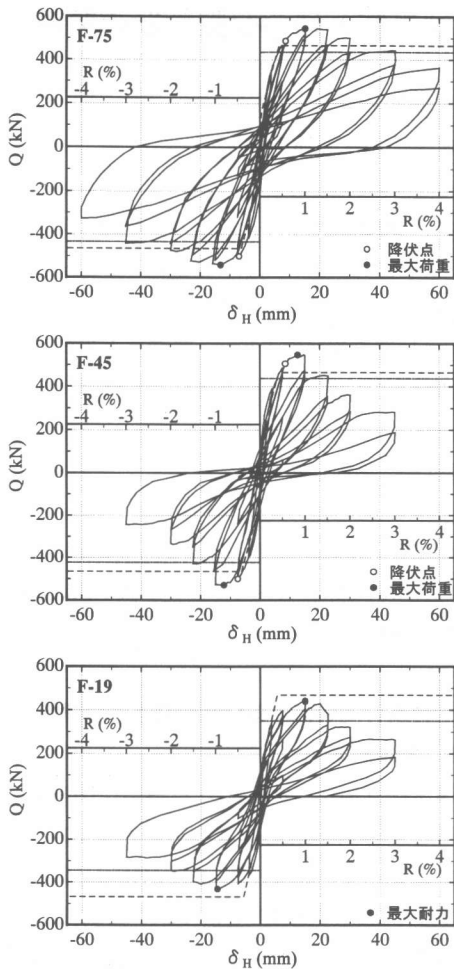


図-1 せん断力と水平変形の関係

表-2 実験結果一覧

名称	正負	Q <sub>y</sub>	Q <sub>max</sub>	R <sub>y</sub>	R <sub>max</sub>	R <sub>u</sub>	μ	破壊モード
F-75	正	486	544	0.57	1.01	2.0	3.5	曲げ降伏後
	負	-502	-543	-0.46	-0.88	-3.0	6.5	付着破壊
F-45	正	505	546	0.57	-0.84	1.5	2.6	曲げ降伏後
	負	-500	-530	-0.50	-0.81	-1.5	3.0	付着破壊
F-19	正	—	439	—	1.00	1.5	—	曲げ圧縮
	負	—	-432	—	-0.96	-2.0	—	破壊

Q<sub>y</sub>: 降伏荷重(kN), Q<sub>max</sub>: 最大耐力(kN), R<sub>y</sub>: 降伏時部材角(%), R<sub>max</sub>: 最大耐力時部材角(%), R<sub>u</sub>: 限界部材角(%), μ: 塑性率

## 2.2 耐震性能低下係数 η の定義

筆者らの既往の研究[1, 2]では、図-2のように部材の荷重-変形関係曲線を理想化して、部材が消費したエネルギー E<sub>d</sub> と残余エネルギー吸収能力 E<sub>r</sub> から、式(1)で耐震性能低下係数 η を評価することを提案している。

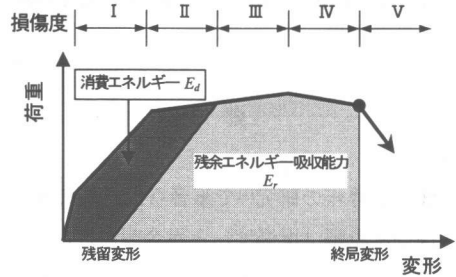


図-2 耐震性能低下係数 η の定義の概念

$$\eta = \frac{E_r}{E_d + E_r} \quad (1)$$

## 2.3 塑性率と損傷度の関係

式(1)で定義された耐震性能低下係数 η と実験結果から求めた各試験体の塑性率と復旧技術指針<sup>[4]</sup>による損傷度(ひび割れ幅による)の関係を表-3に示す。F-75は曲げ降伏先行型で十分な変形能力をもつ試験体で、終局塑性率4~5程度、F-45は終局塑性率3程度の変形能力をもつ試験体である。F-19は、曲げ降伏前にせん断破壊するように設計した試験体で、丸鋼主筋のスタブからの抜け出しが卓越し曲げ圧縮破壊し、主筋降伏には至らなかった。

表-3 試験体の塑性率と損傷度の関係

Cycle	F-75		F-45		F-19				
	η	μ	損傷度	η	μ	損傷度			
1/400	0.97	0.44	無被害	0.95	0.47	無被害	0.95	—	I
1/200	0.93	0.88	I	0.88	0.88	I	0.88	—	II
1/100	0.73	1.76	II	0.61	1.76	II	0.65	—	II
1/67	0.52	2.63	III	0.27	2.67	III	0.30	—	III
1/50	0.27	3.49	IV		3.52	IV		—	IV
1/30		5.25	IV						

## 3. 地震応答解析による残余耐震性能の評価

### 3.1 解析モデル

実際の地震時には構造物に正負繰返し応答変形が生じるが、これを図-2のような片押しの荷重変形関係包絡線に単純化して部材の耐震性能低下係数 η を評価することの妥当性を検証するために、1質点系の弾塑性地震応答解析を行った。

解析対象構造物は図-3に示すような鉄筋コン

クリート造4層のピロティ構造を想定し、これを簡単のため2階より上を完全に剛とした1質点系にモデル化した。1階の柱断面およびは2に示した部材実験と同一の柱とする。1層分の重量は、243kN（積載荷重を含む単位重量 12kN/m<sup>2</sup>、柱の支配面積 4.5m×4.5m とする。）とした。

バネの復元力特性は、Takeda モデル（除荷時剛性低下係数  $\alpha=0.4$ ）<sup>[7]</sup>と、F-75 の試験体が塑性率 4 の時、等価粘性減衰係数  $heq$  が等しくなるように設定した Takeda slip モデル（スリップ剛性低下係数  $\lambda=0.4$ ）を用いた。表-4 にそれぞれの  $heq$  を示す。

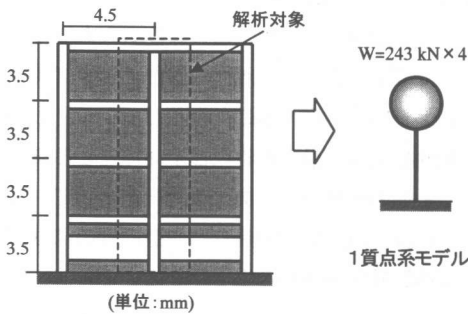


図-3 モデル

表-4 等価粘性減衰係数  $heq$

実験値	Takeda モデル	Takeda slip モデル
0.140	0.204	0.140

\* 塑性率 4 の時

解析モデルは図-4 に示すように、表-3 に示した部材実験による各試験体の塑性率と部材の損傷度の関係に基づいて、F-19 の試験体は終局塑性率 1.5、F-45 は 3.0、F-75 は 4.0 と設定し、塑性変形性能の異なる 3 種類の解析モデルを設定した。ひび割れ強度は計算値により、降伏荷重は実験結果に基づきそれぞれ 170kN、500kN と設定した。初期剛性は、曲げおよびせん断剛性を考慮して求め 240kN/mm、降伏点割線剛性は実験結果より 57kN/mm（降伏時部材角=1/200）とした。解析モデルの終局周期は F-19 が 0.30sec、F-45 は 0.43sec、F-75 は 0.49sec である。また、降伏後剛性は初期剛性の 0.001 倍とした。

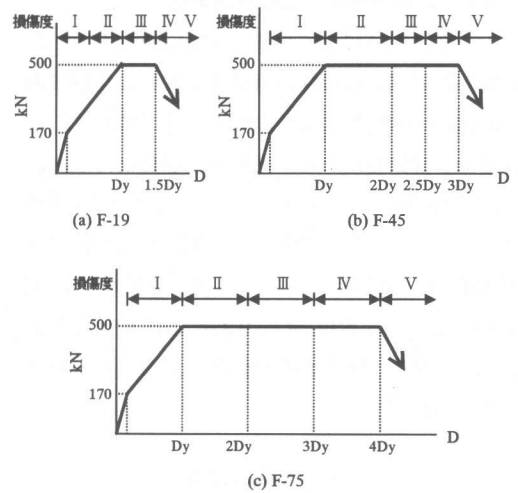


図-4 解析モデル

### 3.2 解析方法及び耐震性能低下係数 $\eta_s$

地震応答解析による残余耐震性能を評価するために、異なる倍率の地震波を 2 回入力する。実験で得られた塑性率と損傷度の関係に基づき、図-5 に示すように、1 回目入力の地震波倍率を変化させ、各損傷度になる地震波倍率と、終局変形に至る地震波倍率  $S_{LR}$  を求める。この結果を用い、各損傷度の状態から連続して 2 回目の地震波を入力した時の終局変形に至る地震波の倍率  $S_R$  ( $S_{1R}$ ,  $S_{2R}$ ,  $S_{3R}$ ) を求める。ここで、 $S_{LR}$  に対する  $S_R$  の割合を応答解析による耐震性能低下係数  $\eta_s$  として式 (2) のように定義する。

$$\eta_s = \frac{S_R}{S_{LR}} \quad (2)$$



図-5 概念図

### 3.3 入力地震動および計算方法

入力地震動は観測波 2 波と模擬地震動を用いた。観測波は El Centro 波(1940)の NS 成分, 兵庫県南部地震(1995)の神戸海洋気象台(略称, Kobe)の NS 成分の 2 種類を用いた。模擬波は建築物荷重指針<sup>[6]</sup>の設計用応答スペクトルに適合する模擬波<sup>[5]</sup>WAVE-1 (海洋型)を用いた。表-5 に各地震波の地動最大値と継続時間を示す。数値計算には Newmark の  $\beta$  法を用い( $\beta=0.25$ ), 0.01 秒刻みで計算した。減衰は瞬間剛性比例型で弾性時の減衰定数は 3%とした。

表-5 地動最大値

地震波	最大加速度 ( $\text{cm/s}^2$ )	継続時間 (sec)
WAVE-1	262.2	0~20
KOBE	821.0	0~20
El Centro	341.7	0~20

ここで, 応答変位に影響を及ぼす地震動の性質について考察するため, 図-6 に各地震動の最大速度を 50Kine に基準化した時の減衰 5% と 20% の変位応答スペクトルを示す。図中の  $T_c$  は解析モデルの弾性周期 (0.13sec),  $T_y$  は降伏周期 (0.25sec),  $T_u$  (塑性率) は終局周期を示す。各周期による変位応答を減衰 20% で比較すると, 終局周期において KOBE 波が一番大きく, 次に El Centro, WAVE-1 となって, KOBE 波が他の地震波に比べ大きい応答値が予測される。

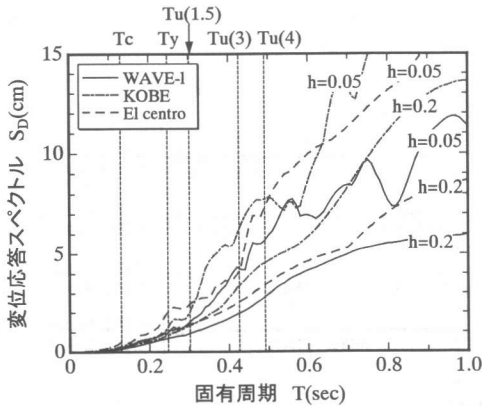


図-6 変位応答スペクトル

### 4. 解析結果

#### 4.1 地震波倍率の変化

解析モデルに対して, 入力地震波の倍率を 0.01 倍刻みで変化させた時の, 最大応答塑性率の変化を図-7 に示す。復元力特性を Takeda モデルとした場合, 模擬波 (WAVE-1) は 265gal~380gal の範囲で, 地震波倍率の変化が小さいうちに最大応答塑性率 1~4 まで達し, 地震加速度の大きさも他の 2 波に比べて小さい。KOBE 波は 378gal~525gal の範囲で最大応答塑性率が変化する。El Centro 波は 287gal~540gal の範囲で他の 2 波に比較するとより広い範囲に渡って各最大応答塑性率に達する。復元力モデルを Takeda slip モデルとした場合は, 全体的に Takeda モデルの場合よりも入力加速度が小さくなる。これは, 履歴曲線がスリップすることにより応答が増えることを示している。しかし, KOBE 波は, 最大応答塑性率 4 のところを比較すると他の地震波よりあまり変化が生じていない。これは, KOBE 波の場合は履歴曲線のスリップによる影響が小さいことを示している。

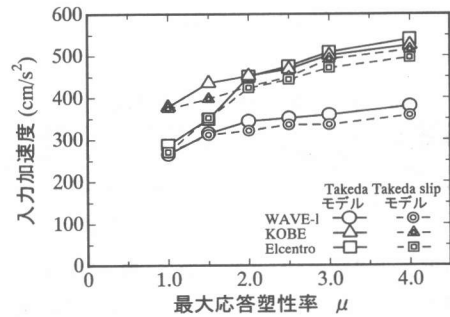


図-7 塑性率と地震加速度の関係

図-8 に各解析モデルによる地震波倍率と最大応答塑性率の関係を示す。図中の黒丸は地震波を 1 回だけ入力した時の結果を示す。この結果を元に, 図-4 の解析モデルに示す変形性能が異なる F-75 (終局塑性率 4.0), F-45 (終局塑性率 3.0), F-19 (終局塑性率 1.5) の各損傷度に対応する最大応答変形を生じる地震波を入力する。その後, 連続して地震波を入力した時の, 2 回目の入力地震波の倍率と最大応答塑性率を求め示した。これは

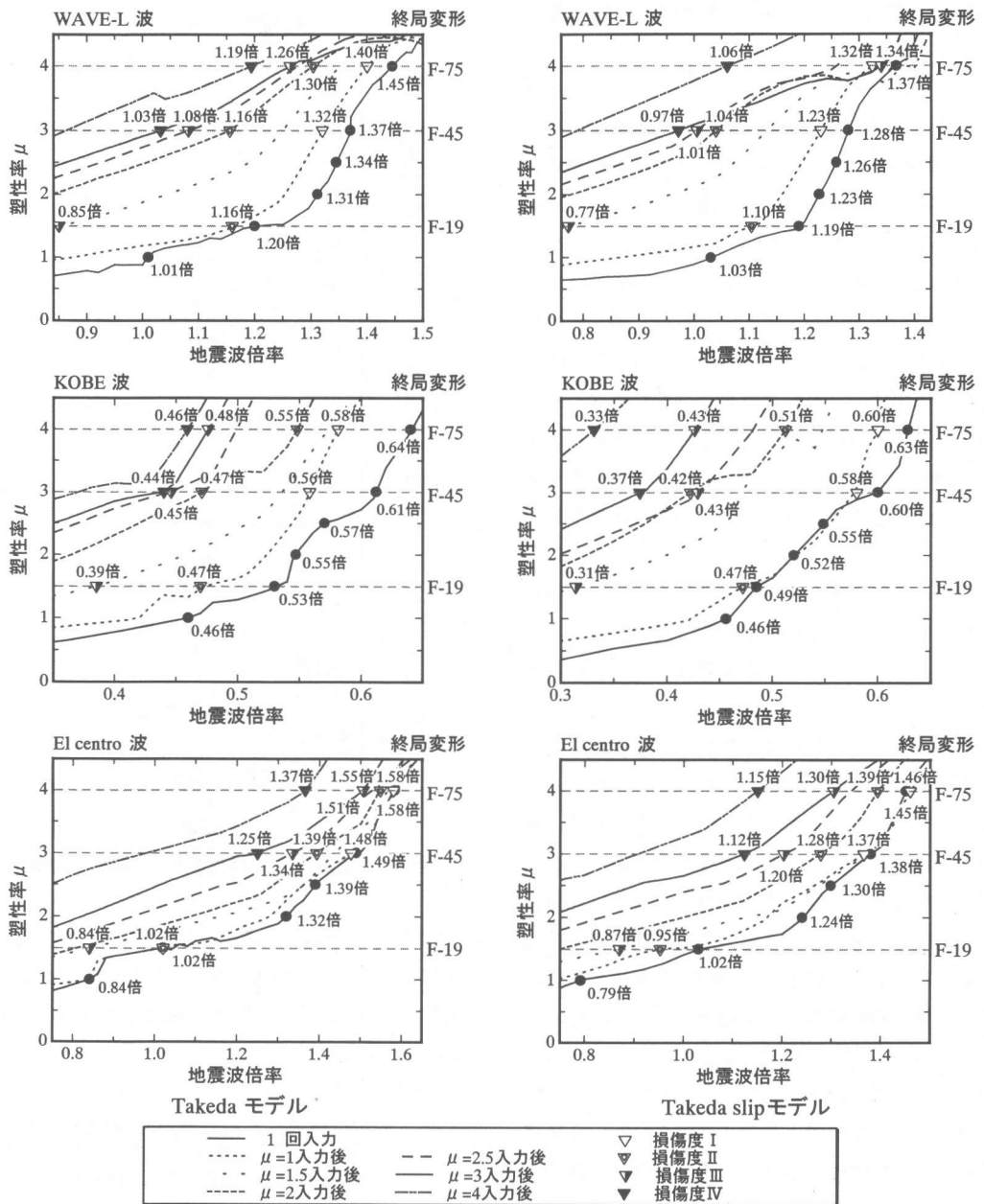


図-8 各解析モデルによる地震波倍率と塑性率の関係

一度ある損傷度の地震を経験した構造物が、また地震を受けた場合、前回の地震により構造物の耐震性能は低下していると考えられるので、それを応答解析上で実現するのが目的である。しかし、復元力モデルが耐力低下を考慮していないため、各最大応答塑性率に達する耐力は小さくならない

ので変形性能による影響はそれほど現れていない。また、図のように地震波によって差はあるが、復元力モデルを Takeda slip モデルとした場合、Takeda モデルによる場合よりも最大応答塑性率に至る地震波倍率が小さくなる。これは最大応答塑性率が大きいほどその傾向は大きい。

## 4.2 耐震性能低下係数の解析結果と実験結果の比較

以上の結果を用い、図-9に各損傷度ごとの部材実験と地震応答解析により求めた耐震性能低下係数の関係を示す。各地震波による解析結果を比較するとEl Centro波は、損傷度が大きくなっても耐震性能低下係数 $\eta_s$ はあまり小さくならないが、KOBE波は一番大きい変化を示し、WAVE-Iの場合は両方の中間の値を示す。これは、図-6に示した変位応答スペクトルからわかるように、KOBE波が他の2波に比べ終局周期が大きくなるほど、変位応答が大きくなるためと思われる。また、TakedaモデルとTakeda slipモデルを比較するとTakeda slipモデルを用いた場合が各損傷度に対する $\eta_s$ が小さくなった。これは地震波の性質にもよるが、履歴面積が小さくエネルギー吸収能力が低下するほど応答が増えるので、履歴面積が小さいTakeda slipモデルの方がより大きい変位応答を表している。

また、黒丸で示した実験値と応答解析から得られる耐震性能低下係数 $\eta_s$ の下限値を比較すると損傷度I程度までは概ね実験値と対応するが、それ以後は損傷度が大きくなるほど解析値が大きく評価された。実際構造物は地震によりスリップとともに繰返し載荷による耐力低下も同時に生じるので、これらの影響を含めた解析モデルを用いればより地震時の構造物の挙動が正確に表れると考えられる。ここで、繰返しを考えていない片押しでの包絡線で求めた実験値が耐力低下などを考えていないものの解析値より低く評価された。今後構造物の残余耐震性能を考える時、安全側を考えて実験値を目安に評価してもよいと思われる。

## 5. まとめ

地震波を2回入力することによって応答解析による耐震低下係数を求めることができた。また、実際構造物は地震力と受けると変形が進み、主筋の付着劣化やひび割れによるスリップ性状や耐力低下が生じるのでそれらの影響を解析に反映すれば、より地震時の構造物の挙動が正確に表れると

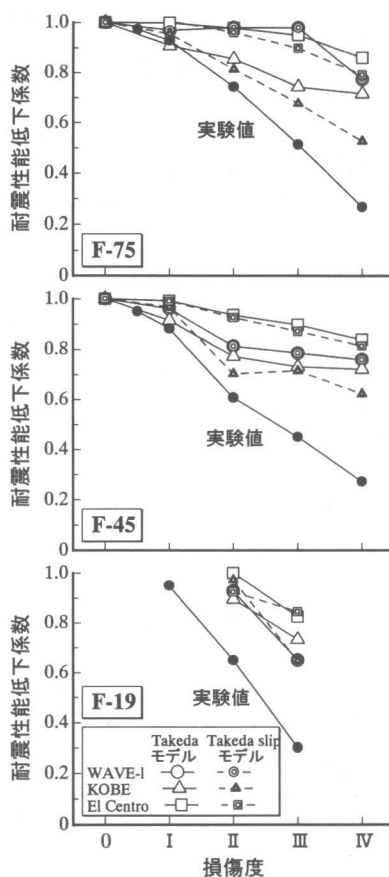


図-9 損傷度と耐震性能低下係数の関係

考えられる。また、実験値と比較すると、解析値の下限値で比べても低く評価されたので、安全を考えて実験値を目安に残余耐震性能を評価してもよいと考えられる。

## 【謝辞】

応答解析に使用した模擬地震波 WAVE-I は、東北大学助手の堀則男博士に提供して頂いた。ここに記して、深く感謝いたします。

## 【参考文献】

- 1) 前田匡樹：日本建築学会関東支部「耐震診断・耐震改修に関するシンポジウム」, 2000年
- 2) 文野正裕他：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報告集, 第22巻 3号, pp1447-1452, 2000年
- 3) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説一許容応力度設計法一, 1999.11
- 4) 日本建築防災協会：震災建築物等の被災度判定基準および復旧技術指針(鉄筋コンクリート造編), 1991年.
- 5) 井上, 堀他：1自由度質点系による鉄筋コンクリート構造物の地震時応答変形推定手法, 日本建築学会学術講演梗概集, pp689-692, 1999年.
- 6) 日本建築学会：建築物荷重指針・同解説, 1997年
- 7) Takeda, T et al : Reinforced Concrete Response to Simulated Earthquakes, Journal of the Structural Division, ASCE, Vol.96, No.ST12, pp.2557-2573, Dec. 1970