

# 論文 サブストラクチャー擬似動的実験による震災 RC 造建築物の残存耐震性能の評価

康 大彦<sup>\*1</sup>・田中 康介<sup>\*2</sup>・前田 匡樹<sup>\*3</sup>・井上 範夫<sup>\*4</sup>

**要旨:** 4 階建て RC 造建築物の 1 階柱を模擬した実大の柱試験体について、サブストラクチャー擬似動的実験を行った。入力地震動レベルを変化させて、柱の最大応答と残留ひび割れ幅などの損傷状況の関係を検討し、また、既往の静的実験結果と比較した。さらに、等価せん断質点系の地震応答解析結果と比較することにより、残存耐震性能の評価を行った。

**キーワード:** サブストラクチャー擬似動的実験, RC 柱, 残留ひび割れ幅, 損傷度, 残存耐震性能

## 1. はじめに

地震被害を受けた構造物の速やかな復旧や余震などに対する安全性の確認のためには、構造物の被害の程度、すなわち、被災度を精度よく評価することが非常に重要である。文野・前田ら<sup>1)</sup>は、RC 造建築物の被災度を被災後の残存耐震性能に基づいて評価することを提案し、部材の静的実験結果から部材の残留ひび割れ幅（損傷度）と残存エネルギー吸収能力の関係を定量化した。2001 年に改訂された日本建築防災協会の「震災建築物の被災度判定基準および復旧指針」<sup>2)</sup>（以下、被災度区分判定基準）では、被災度の評価に文野・前田らの提案が採用されている。また、鄭・前田らは 1 質点系の地震応答解析を行い、無損傷時と各レベルの損傷を生じさせたモデルの最大応答が終局変形に達する入力地震波の比率で構造物の残存耐震性能を評価した<sup>3)</sup>。

本研究では、これらの研究成果の検証を行うことを目的に、ほぼ実大の RC 柱の擬似動的実験を行い、文野・前田らの静的実験結果<sup>4)</sup>と比較及び鄭・前田らが提案した耐震性能低減係数の検討を行う。

## 2. 実験概要

### 2.1 実験の計画

実験では、図 - 1 に示すように 4 階建ての鉄筋コンクリート造建築物を想定し、実験対象としては変動軸力が少ない中柱とした。地震応答時の柱の残留ひび割れ幅などの損傷状況を逐次観察するために、試験体は実大に近い大きさとし、サブストラクチャー擬似動的実験を行った。つまり、1 階柱を実験部分、2~4 階の柱を解析部分とし、実験を行った。

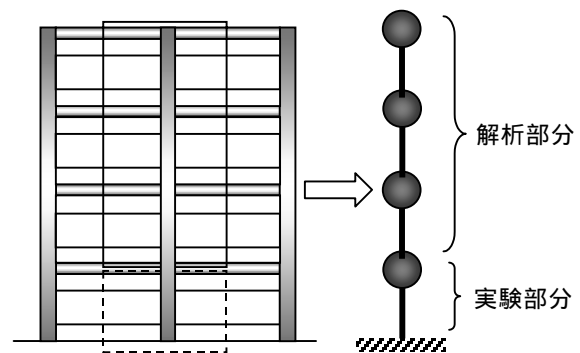


図 - 1 対象建物モデル

### 2.2 試験体

試験体は、前述のようにほぼ実大で、柱断面 400mm × 500mm、柱内法寸法 1500mm、せん断スパン比は 1.5 で、文野・前田が行った静的漸増載荷実験<sup>4)</sup>で用いた試験体（F45）と形状・

\*1 東北大学大学院 博士課程 (正会員)

\*2 東北大学大学院 修士課程 (正会員)

\*3 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)

\*4 東北大学大学院 教授 工学研究科 都市・建築学専攻 工学博士 (正会員)

配筋全て同一な3体とした。試験体の形状及び配筋図を図-2に、試験体構造諸元と材料特性を表-1, 2に示す。

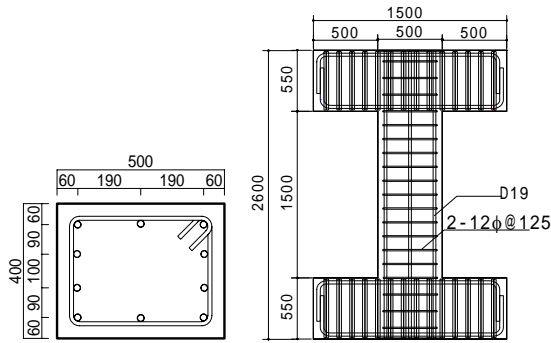


図-2 試験体形状及び配筋図(単位 mm)

表-1 試験体構造諸元

$B \times D$	$h_0$	主筋	$P_t$	せん断補強筋	$P_w$	N
400 × 500	1500	10 - D 19	0.57	2 - 12 @ 125	0.45	953

$B \times D$ : 幅(mm) × せい(mm),  $h_0$ : 内法寸法(mm),  $P_t$ : 引張り鉄筋比(%),  $P_w$ : せん断補強筋比(%), N: 軸力(kN)

表-2 材料特性

試験体	コンクリート		鉄筋		
	$\sigma_y$ (Mpa)	$\varepsilon_{cu}$ (%)	鉄筋径	$\sigma_y$ (Mpa)	$\varepsilon_y$ (%)
同一	27.2	0.18	D 19	364	0.187
			12φ	329	0.161

$\sigma_y$ : 圧縮強度,  $\varepsilon_{cu}$ : 圧縮強度歪度,  $\sigma_y$ : 降伏強度,  $\varepsilon_y$ : 降伏歪度

## 2.3 実験方法及び加力装置

### 2.3.1 加力装置

実験は東北大学実験棟において実施した。

加力装置を図-3に示す。図-3に示すように、水平ジャッキ1台と鉛直ジャッキ2台の計3台を用いて、試験体に逆対称曲げせん断力を作用させた。すなわち、水平ジャッキによりせん断力を加え、鉛直ジャッキにより、上スタブの回転を制御すると同時に軸力を載荷した。

試験体はPC鋼棒を用いて台座及び加力梁に試験体スタブを固定し、水平及び鉛直力を加えるようにした。

図-4に示すように油圧ジャッキの制御は、応答計算を行う制御コンピューターからコントローラーに命令を送信することにより自動で行った。命令を受信したコントローラーは、アンプを経由した変位と荷重の測定値をモニタリ

ングしながら油圧ジャッキを制御する。また、各データの計測は1Step分の加力が終了した時点で制御用コンピューターが計測用コンピューターに命令することにより行った。

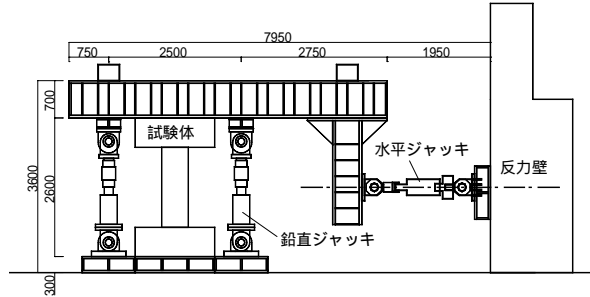


図-3 加力装置(単位 mm)

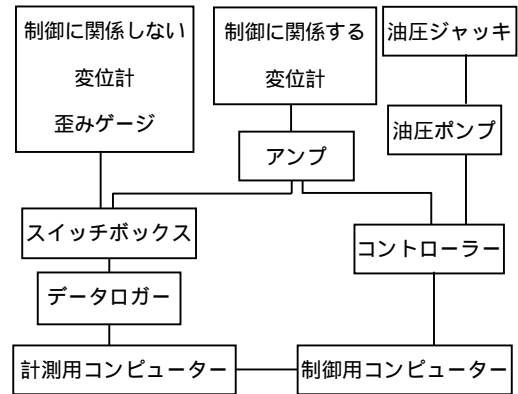


図-4 実験の構成

### 2.3.2 解析モデル

実験中に解く応答計算モデルは、腰壁・垂れ壁付きの梁部分は剛体と仮定したせん断型4質点系で、解析部分の復元力特性は図-5のように、降伏点までは原点指向型のTakeda型モデルとし、柱の断面・配筋に基づき設定した。図-6に各階の復元力の包絡線を示す。

応答計算により1ステップの変位を求め、実験部分は試験体を静的載荷により、強制変形させることで、解析部分は仮定した履歴モデルに基づいた数値的処理でそれぞれの復元力を取得し、次のステップの応答計算へ進む。したがって、実験部分については復元力モデルを仮定することなく試験体から取り組んで行う。なお、応答解析の時間刻みは0.005秒とし、粘性減衰マトリクスは計算モデルより決定した降伏時剛性マトリクスに比例させ、その時の1次固有周

期に対する減衰定数 2%とした。

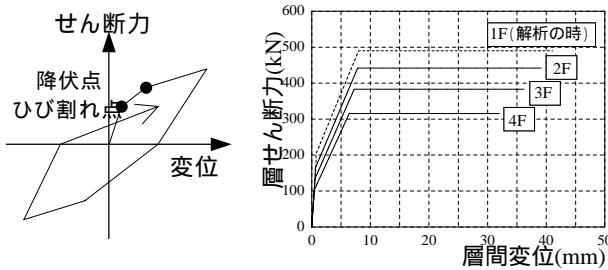


図 - 5 復元力モデル 図 - 6 履歴モデル

### 2.3.3 数値積分法

応答計算は、サブストラクチャー擬似動的実験に適した数値積分法として中島らにより提案されているオペレータ・スプリッティング法（以下 OS 法）を用いた<sup>5)</sup>。

OS 法は系の剛性を 2 つに分割し、一つの部分には陽的積分法を、もう一つの部分には陰的積分法を適用するという混合積分法である。

OS 法による応答計算の手順を図 - 7 に示す。

### 2.3.4 入力地震波

入力地震波は、1995 年兵庫県南部地震の神戸海洋気象台で記録された地震波（NS 成分）から主要動を含む 20 秒間を抜き出して使用した（図 - 8）。

実験は試験体 3 本について行い、表 - 3 のように入力倍率を変化させて地震波を入力した。

すなわち、試験体 PSD2、PSD3、PSD5 は、それぞれ 1 回目の入力で、被災度区分判定基準<sup>2)</sup>の損傷度 II, III, V に相当する損傷を生じさせ、試験体 PSD2、PSD3 については 2 回目の入力で破壊（損傷度 V）させて、各損傷度で部材に残存する耐震性能（以下、残存耐震性能）を評価することを計画した。（後述するように試験体 PSD2 は、1 回目の入力でほとんど損傷が生じなかったため、入力倍率を上げて 2 回目の入力を行って目標の損傷度を生じさせ、3 回目入

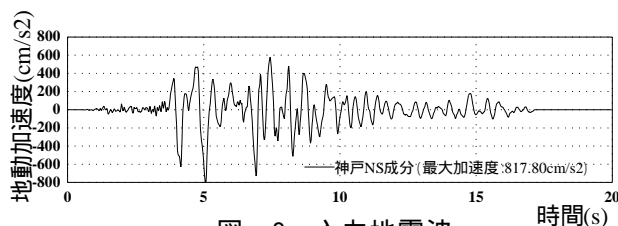
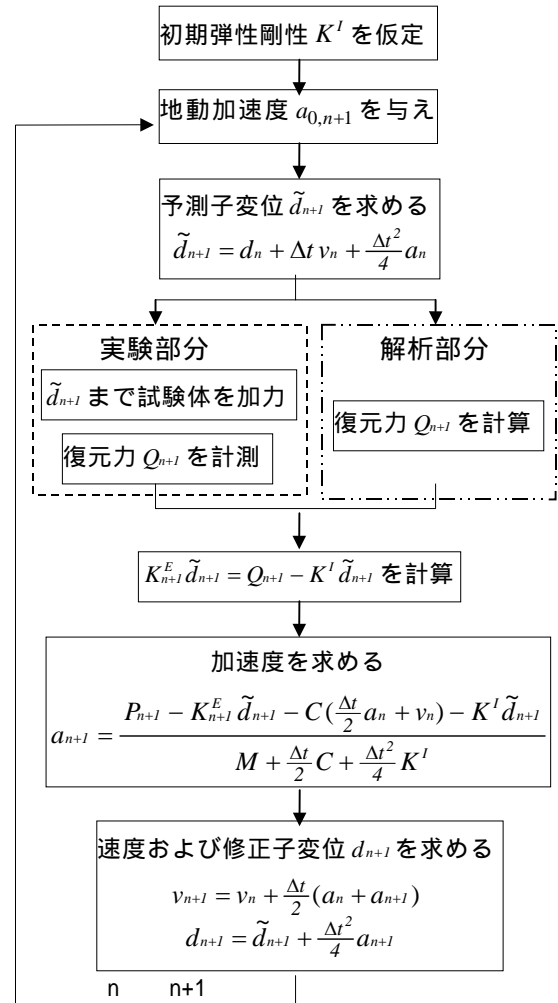


図 - 8 入力地震波



$M, C$ : 質量・減衰マトリクス

$K^I, K_{n+1}^E$ : 線形部分と非線形部分の剛性マトリクス

$a_0, a, v, d, P$ : 地動加速度, 加速度, 速度, 変位, 外力ベクトル

図 - 7 OS 法による応答計算の手順  
力で破壊させた)

表 - 3 入力レベル

試験体名	入力	目標損傷度	入力倍率
PSD2	1 回目	II	0.25 倍
	2 回目		0.41 倍
	3 回目	V	0.41 倍
PSD3	1 回目	III	0.50 倍
	2 回目	V	0.30 倍
PSD5	1 回目	V	0.60 倍

## 3. 実験結果

各実験の 1 階の層せん断力 - 層間変位関係を図 - 9 に、実験結果一覧を表 - 4 に示す。図 - 9 及び表 - 4 には、文野・前田らが行った同一試験体の静的漸増載荷実験結果もあわせて示した。また、図 - 10 には、変位 - 時刻歴を示す。

各試験体とも、最終的な破壊モードは付着割

裂破壊で、静的実験結果と同様であった。

試験体 PSD2 は、1 回目入力では最大応答変形角は弾性範囲に留まり(図 - 9(a)), 危険断面に若干曲げひび割れが生じたものの、ひび割れなどの損傷はほとんど見られず、目標とした損傷度 II には達しなかった。そこで、地震波の入力倍率を上げて 2 回目入力を行った。2 回目入力では、部材角 0.6% 程度で柱に曲げ降伏が生じ、その後曲げひび割れ、せん断ひび割れが徐々に拡大して、最終的には最大応答部材角 1.0% 程度の変形が生じ(図 - 9(b)), 損傷度 II 程度になった。3 回目入力では、5.4 秒から変形が一気に増大し、主筋に沿った付着割裂ひび割れが大きく開き耐力低下し、最終的に付着割裂破壊した(図 - 9(c), 図 - 10)。

試験体 PSD5 は、1 回目入力で、曲げおよびせん断ひび割れが生じた後、7 秒付近で一気に変形が増加して、付着割裂ひび割れが進展して、繰り返し変形により著しく耐力低下し破壊した。

試験体 PSD3 は、1 回目入力では 5.13 秒から曲げひび割れ、せん断ひび割れが進展し、7.59 秒で 33.6mm の最大変形が生じ、最終的には損傷度 III 程度であった(図 - 9(e))。2 回目入力では、1 回目入力とほぼ同程度の最大応答変形しか生じず、変形は増加しなかったが、試験体 PSD2 及び PSD5 のように、付着ひび割れが大きく開き、耐力が低下して最終的には付着破壊した(図 - 9(f))。

1 階部分の変位時刻歴の実験結果を、1 階部分を解析により応答計算した予備解析の結果と比較した図 - 10 を見ると、小振幅領域では、予備解析値と実験結果が比較的良く一致しているが、試験体が塑性範囲に入ると、実験値が解析値より若干大きい結果を示している。これは解析で用いた復元力モデルでは試験体の耐力低下を考慮していないためと考えられる。

図 - 10 は PSD2 の例を示しているが、PSD3、

PSD5 と同じ傾向が見られた。

表 - 4 実験結果一覧

試験体		$Q_y$	$Q_{max}$	$R_y$	$R_{max}$
PSD2	正	495	534	0.64	0.89
	負	-509	-534	-0.60	-0.96
PSD3	正	485	498	0.61	0.67
	負	-515	-541	-0.85	-1.76
PSD5	正	496	555	0.61	1.22
	負	-520	-556	-0.60	-0.78
静的	正	505	546	0.57	0.84
	負	-500	-530	-0.50	-0.81

$Q_y$ :降伏荷重(kN),  $Q_{max}$ :最大耐力(kN)

$R_y$ :降伏時部材角(%),  $R_{max}$ :最大耐力時部材角(%)

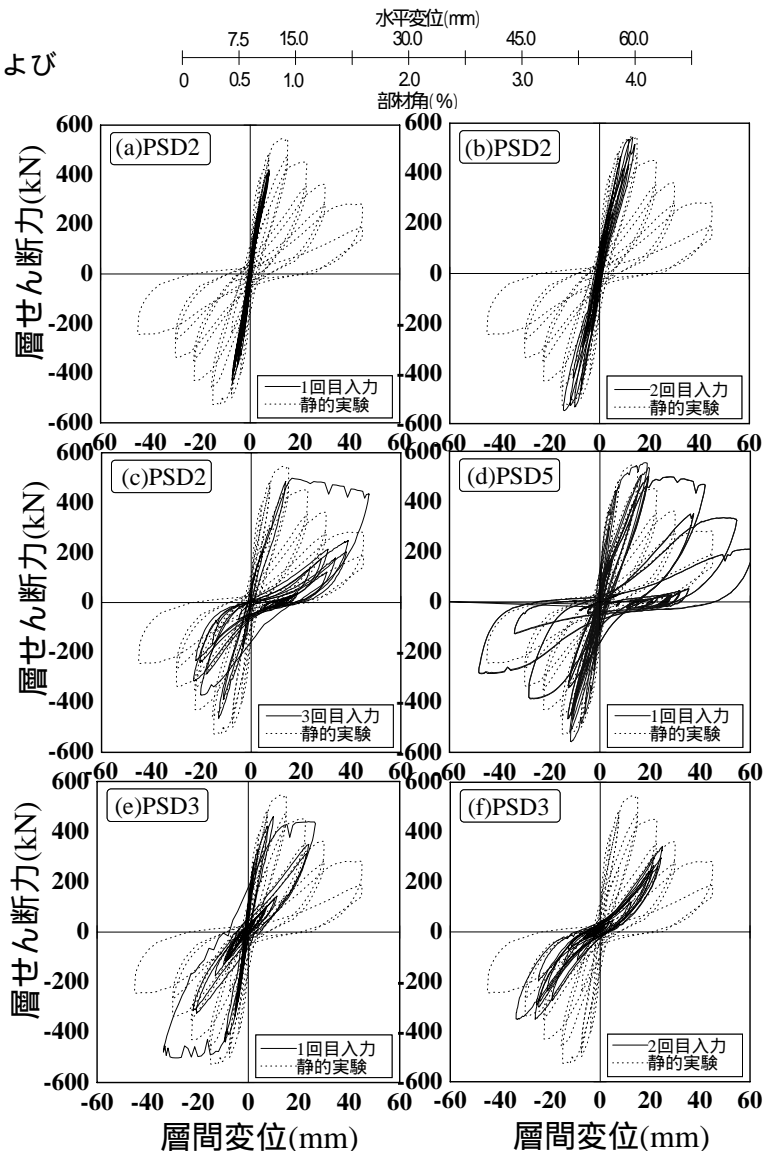


図 - 9 層せん断力 - 層間変位関係

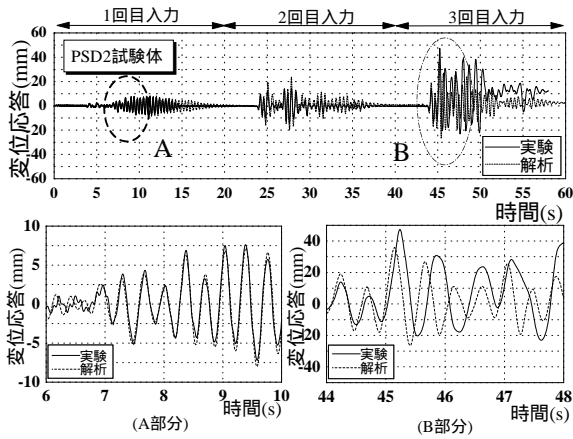


図 - 10 変位 - 時刻歴

#### 4. 擬似動的実験と静的実験による損傷度比較

文野・前田らは、文献 1), 4) で、RC 部材の静的漸増載荷実験から、部材の経験最大部材角と残留ひび割れ幅（損傷度）の関係を検討し、図 - 14 に示す残存エネルギー吸収能力から、各損傷度ごとの耐震性能低減係数 を定量化した。しかしながら、これらの実験は規則的に変位振幅を漸増させる変位履歴で得られた結果であり、地震応答時の不規則な変位履歴を経験した場合の検証が行われていない。各試験体について、部材角が 0.25%、0.5%、1%、1.5%、2%、2.5% を更新した後の除荷時（水平荷重が 0 のとき）について、曲げ、せん断ひび割れ幅（以下、残留ひび割れ幅）をクラックスケールで計測し、静的実験結果と比較した。各試験体について、各サイクルピーク時の部材角と最大残留ひび割れ幅の関係を図 - 11 に示す。

図 - 11 によると、曲げ、せん断ともに残留ひび割れ幅は、ピーク時部材角に比例的に増加する傾向が見られ、同程度の部材角に対しては、擬似動的実験と静的実験の残留ひび割れ幅は同程度である。

また、図 - 12 に示すように、試験体の地震波入力終了時と、最大応答部材角発生時のそれぞれの残留ひび割れ幅はほぼ同程度である。

以上から、文献 1), 4) で得られた部材の損傷度と耐震性能低減係数 の関係は、実地震波による不規則な変位履歴を経験した構造物の被災

度の評価にも概ね適用が可能と考えられる。

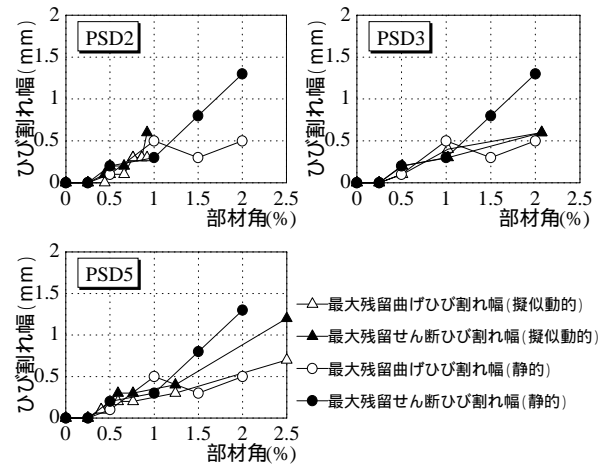


図 - 11 経験部材角 - ひび割れ幅関係

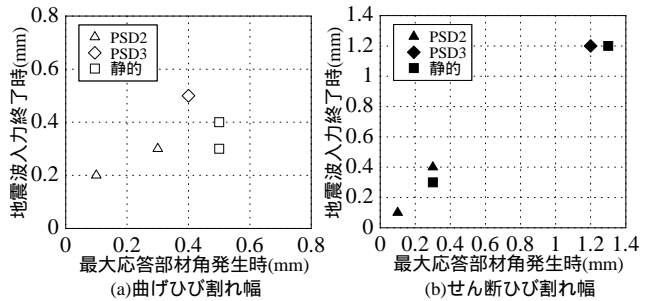


図 - 12 地震波入力終了時と最大応答部材角発生時のひび割れ幅関係

#### 5. 入力地震動レベルに基づく残存耐震性能の評価

被災度区分判定基準では、前述の文野・前田らの研究<sup>1)</sup>に基づいて、部材の耐震性能低減係数  $\eta$  を表 - 5 のように与えている。

表 - 5 耐震性能低減係数  $\eta$

損傷度	1)せん断柱	2)曲げ柱
I	0.95	0.95
II	0.6	0.75
III	0.3	0.5
IV	0.0	0.1
V	0.0	0.0

ここで、 $E_d$ :消費エネルギー、 $E_r$ :残存エネルギー吸収能力  
ここで、耐震性能低減係数  $\eta$  は、図 - 14 のような荷重変形関係の包絡線におけるエネルギー吸収能力に基づいて、式 (1) で定義される。

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

表 - 5 の  $\eta$  は、部材の残存エネルギー吸収能力に基づいて、残存耐震性能を評価したもので

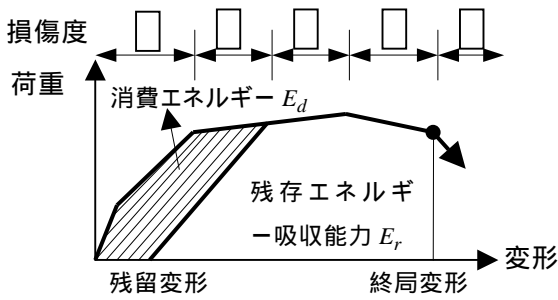


図 - 14 荷重 変形関係

あるが、建築物の耐える地震力の大きさを用いて、残存耐震性能を評価することも考えられる。すなわち、無損傷時に耐えられる（ちょうど終局限界に達する）地震力の大きさ  $A_0$  と、ある損傷度が生じた後に耐えられる地震力の大きさ  $A_{di}$  の比である式(2)を、残存耐震性能率  $R_{dyn}$  と定義する。

$$R_{dyn} = \frac{A_{di}}{A_0} \quad (2)$$

本研究の各試験体が、最終的に破壊したときの地震波入力倍率と実験開始時の損傷度の関係を図 - 15 に示す。試験体 PSD5 は、1 回目入力（無被害）で 0.60 倍の入力で破壊した。試験体 PSD2 および PSD3 は、それぞれ損傷度 II および III の損傷状態で、0.41 倍、0.30 倍の入力で破壊した。図 - 15 中には表 - 5 の耐震性能低減係数  $\eta$  も比較のためあわせて示した。

図 - 15 に示すように、式(2)で、1 回目入力で 0.60 倍の入力を  $A_0$ 、損傷度 II, III に対する  $A_{di}$  をそれぞれ 0.41, 0.30 とすると、表 - 5 のせん断柱の耐震性能低減係数  $\eta$  は、せん断スパン比が 1.5 である RC せん断柱の試験体を用いた本実験から得た耐震性能残存率  $R_{dyn}$  を概ね低めに評価している。

本研究では試験体数も 3 体で、検討した地震波も 1 波に限られているが、本研究の範囲では、2001 年に改訂された被災度区分判定基準の耐震性能低減係数  $\eta$  を用いて、地震被害を受けた RC 造の残存耐震性能の評価を行うと、被災後の建物が耐えられる入力地震動レベルを概ね安全側に評価することができるものと考えられる。

## 6. まとめ

被災度評価に関する研究成果の検証のため、4 階建ての RC 造の 1 階柱を想定し、サブストラクチャー擬似動の実験を行った。その結果、部材の損傷度と耐震性能低減係数の関係は、実地震波による不規則な変位履歴を経験した構造物の被災度の評価にも概ね適用可能と考えられる。また、本研究の範囲では、2001 年に改訂された被災度区分判定基準の耐震性能低減係数  $\eta$  を用いて、震災 RC 造の残存耐震性能の評価を行うと、被災後の建物が耐えられる入力地震動レベルを概ね安全側に評価しているのが確認できた。

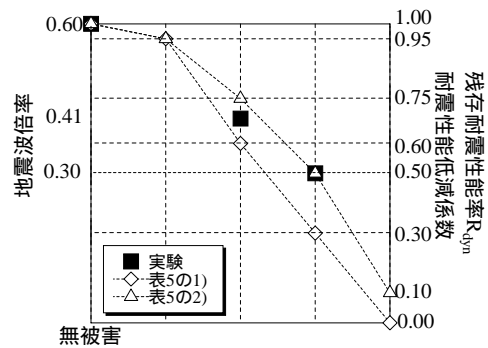


図 - 15 損傷度と地震波倍率関係

## 参考文献

- 1) 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報告集, 第 22 号, 第 3 巻, pp.1447 - 1452, 2000.
- 2) (財) 日本建築防災協会: 震災建築物の被災度判定基準および復旧指針, 2001.
- 3) 鄭文淑, 前田匡樹, 田才 晃, 長田正至: RC 造建築物の地震応答解析による残存耐震性能の評価, コンクリート工学年次論文報告集, 第 22 号, 第 3 巻, pp.1219 - 1224, 2000.
- 4) 文野正裕, 永山憲二, 前田匡樹, 田才 晃: RC 柱の損傷状態に基づく残余耐震性能の評価, コンクリート工学年次論文報告集, 第 23 号, 第 3 巻, pp.259 - 264, 2001.
- 5) 中島正愛, 石田雅利, 安籐和博: サブストラクチャー仮動的実験のための数値積分法, 日本建築学会構造系論文報告集, 第 417 号, 1990 年, 11 月, pp107 - 117