

# 論文 曲げ降伏するRC造梁部材の地震時損傷評価のための実験的研究

梶原 唯史\*1・向井 智久\*2・野村 設郎\*3

**要旨**：本論では、地震時におけるヒンジ部材の損傷をエネルギー吸収で定量的に評価することを目標として曲げ降伏先行型RC造梁試験体を4体作成し、静的加力実験を行った。1体は地震時の損傷を再現するため、地震応答解析から得られた時刻歴応答変位位相に基づく载荷を、他の3体は両側及び片側定変位、両側変位漸増の繰返し载荷を行い、耐力低下時の履歴吸収エネルギーに着目して終局限界履歴吸収エネルギーを定義し、地震時におけるそれを算定した。また、エネルギー入力速度概念に基づくエネルギー吸収のモデル化と地震時の損傷を定変位振動に置き換えることの妥当性について検討した。

**キーワード**：ヒンジ部材の損傷、終局限界履歴吸収エネルギー、耐力低下、载荷履歴

## 1. はじめに

筆者らはこれまでに、地震時の繰返し挙動を考慮できる新たな耐震性能評価手法確立のため、設計用入力地震動を全入力エネルギー量EDと繰返し数NDで規定したエネルギー設計手法を提案し、その精度を解析的に検証してきた<sup>1)~4)</sup>。しかしエネルギー手法を実際適用するためには、建物の吸収エネルギー量、特に履歴吸収エネルギー量の把握が必要である。その際重要となるのが、エネルギー吸収性能と損傷との関係の把握にある。

そこで本論では、1)地震時のヒンジ部材のエネルギー吸収性能を把握するために、地震時のヒンジ部材の耐力低下点を規則的な繰返し载荷を行った試験体(以下、規則的履歴载荷試験体)の損傷から定義し、本震载荷を行った試験体の耐力低下点までの履歴吸収エネルギー(以後、終局限界履歴吸収エネルギー)を算出する。2)エネルギー入力速度概念及びエネルギー吸収のモデル化の妥当性を検討することを目的とし、規則的履歴载荷試験体の履歴吸収エネルギーを算出し、本震载荷試験体及び提案するエネルギー吸収のモデルとの比較検討を行った。

## 2. 予備地震応答解析

### 2.1 概要

解析対象とする建物は、梁間、桁行方向共に6.0m×3スパンの平面形状を有する4層の純ラーメンRC建物である(図-1)。部材断面、各階重量及び解析方法は文献5)を参照とする。尚、使用地震動はEl Centro NSで、最大速度を50kineに基準化している。また本論では、余震において建物が更に損傷することを考慮し、本震及び余震の2波を想定し、かつ余震は同位置震源にて本震とほぼ同等の規模で発生すると仮定し、本震の加速度を用いた。

### 2.2 応答結果

図-2に、最も大きく塑性化した2階梁端回転角の時刻歴応答を、最大応答値で無次元化した時刻歴応答結果を示す。

また筆者らは、地震動が瞬間的に入力する値

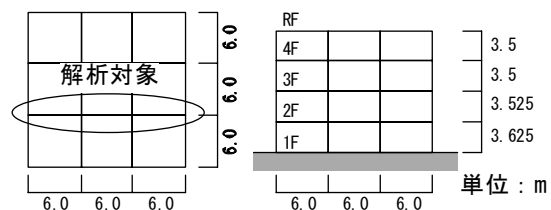


図-1 平面図及び軸組図

\*1 東京理科大学 理工学部 大学院生

\*2 独立行政法人 建築研究所 構造研究グループ 研究員 博(工)

\*3 東京理科大学 理工学部 教授・工博

が最大になる時に、建物の応答変形が最大に達する傾向に基づいて、図-3のエネルギー入力速度概念を示し、地震時のランダムな応答を定変位繰り返し振動に置き換えることで、等価な繰り返し数NDを算出<sup>1)</sup>している。本震時における建物モデルの繰り返し数ND(各層の平均値)をこの方法で算出すると2.6回であった。

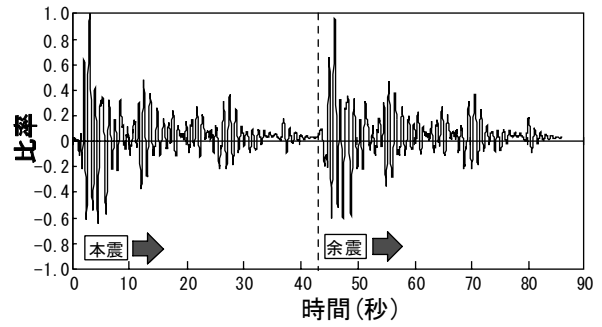


図-2 最大値で無次元化した時刻歴

### 3. 実験計画概要

4体の試験体は同形状・配筋のヒンジ部材であり、表-1に示すようにせん断余裕度が1.2程度であり、表-2に示す材料を用いて曲げ降伏後にせん断圧縮破壊するように設計した。図-4に示すように部材断面200mm×300mm、シアスパン700mmの梁部材で、せん断補強筋にはコアコンクリートの面積が算出できるよう歪みゲージを貼付している。パラメータは荷重履歴であり、(1)図-2で示した地震時の応答履歴(以下、本震・余震)、(2)左右均等な定変位繰り返し荷重(以下、両側定変位)、(3)一方向に片寄った定変位繰り返し荷重(以下、片側定変位)、(4)±5, ±10, ±20, ±30, ±40, ±50×10<sup>3</sup>rad.の漸増繰り返し荷重(以下、漸増)とする。また(1)から(3)の荷重履歴は正負の全振幅が80/1000rad.とし、漸増荷重の同変形角内での繰り返し数は2章の解析結果から算出されるND=2.6を参考に、3回とした。以後(2)~(4)をまとめて規則的履歴荷重試験体と呼ぶ。

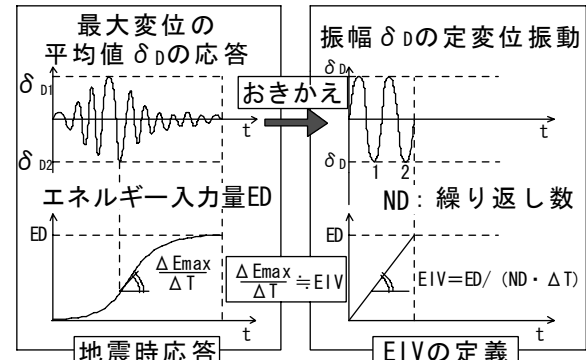


図-3 エネルギー入力速度概念

表-1 耐力算定一覧

		記号	単位	本震	両側定変位	片側定変位	漸増
せん断強度	靱性指針式	$Q_{su1}$	kN	152.3	148.4	151.9	148.2
	大野・荒川式	$Q_{su2}$		133.3	132.9	133.3	132.9
曲げ強度	精算解	$Q_{mu1}$	107.1	106.7	107.1	106.7	
	略算解	$Q_{mu2}$	111.4	111.4	111.4	111.4	
付着強度		$Q_{su}$		170.5	168.6	170.5	168.5
せん断余裕度1		$Q_{su1}/Q_{mu1}$		1.42	1.39	1.42	1.39
せん断余裕度2		$Q_{su2}/Q_{mu2}$		1.20	1.19	1.20	1.19

表-2 材料の力学的特性

		記号	単位	本震	両側定変位	片側定変位	漸増
コンクリート	圧縮強度	$\sigma_B$	N/mm <sup>2</sup>	21.87	21.18	21.80	21.15
	引張強度	$\sigma_t$		1.94	2.31	2.00	1.53
	ヤング係数	$E_c$		$2.61 \times 10^4$	$2.59 \times 10^4$	$2.61 \times 10^4$	$2.63 \times 10^4$
主筋 10-D13	降伏強度	$\sigma_y$	N/mm <sup>2</sup>	556			
	降伏歪み	$\varepsilon_y$		3271			
	ヤング係数	$E_y$		$1.89 \times 10^5$			
補強筋 2-U7.1	降伏強度	$\sigma_{wy}$	N/mm <sup>2</sup>	1470			
	降伏歪み	$\varepsilon_{wy}$		7266			
	ヤング係数	$E_{wy}$		$2.06 \times 10^5$			

### 4. 実験結果

#### 4.1 荷重-部材変形角関係

図-5に各試験体の荷重-部材変形角関係を示す。本震時において正側 $16 \times 10^3$ rad., 負側では $-24 \times 10^3$ rad.で主筋の降伏が見られ、その後最大振幅(正側 $48.9 \times 10^3$ rad.,負側 $-31.1 \times 10^3$ rad.)に至っても顕著な耐力低下は見られなかった。本震荷重の後、同試験体に余震に対応する荷重を行ったところ、正・負側共に約25%最大耐力が低下し履歴ループも細くなった。両側定変位、漸増荷重試験体では正・負側共にほぼ±15×

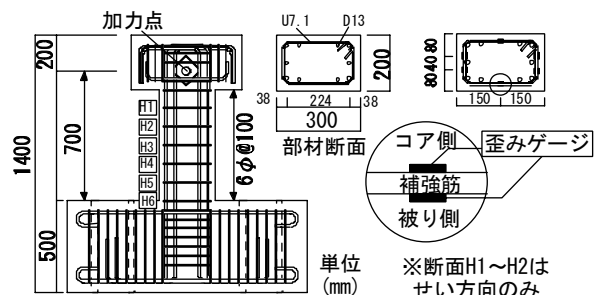


図-4 試験体概要

10<sup>3</sup>rad.において主筋の降伏が見られ、そのときの荷重は両側定変位試験体は正側が93kN, 負側が-115kN, 漸増荷重試験体は103kNと-107kNであった。片側定変位試験体は、+15×10<sup>3</sup>rad.において主筋が降伏し、そのときの荷重は

87.3KNであった。両側定変位試験体は正載荷側・負載荷側共に1サイクル毎に10%の一定な耐力低下が見られ、片側定変位試験体はサイクル毎に約15%の耐力低下を示した。漸増載荷試験体では $\pm 30 \times 10^3 \text{rad}$ までの同じ部材変形角のサイクル内においては1サイクル目から2サイクル目までに約10%の耐力低下を示したが、2サイクル目から3サイクル目にかけては耐力低下はほとんど見られなかった。そして $40 \times 10^3 \text{rad}$ の2サイクル目において負側の最大耐力が24%低下し、その後正側でも50%の耐力低下を示し、さらに変形が進んでも耐力が増加することはなかった。詳しい試験体の破壊性状は文献5)に示している。

#### 4.2 履歴吸収エネルギー

図-6に各試験体の履歴吸収エネルギーを示す。グラフには3章で算出した等価な繰り返し回数 $ND=3$ をもとに両側、片側定変位試験体では3サイクル、6サイクル終了時、漸増載荷試験体では $\pm 40 \times 10^3 \text{rad}$ 終了時の値を示した。

図より本震、余震時の履歴吸収エネルギー量に最も近い値を示したのは両側定変位試験体であることが分かる。実際の繰り返し数 $ND$ の値は2.6回であるため、両側定変位試験体の履歴吸収エネルギー量が本震、余震のそれよりも若干大きい値を示したものと思われる。以上より、本論で用いた地震動において地震時のランダムな応答を等価な繰り返し回数 $ND$ を用いて定変位振動に置き換えることで、部材の履歴吸収エネルギー量をほぼ推定できた。次に、試験体の履歴吸収エネルギー量をより詳細に検討するために図-7に両側・片側定変位、漸増載荷試験体の各サイクル毎の履歴吸収エネルギー(図-8)と $i$ サイクルから得られる最大荷重 $P_{max}$ の、部材の終局耐力 $P_{max}$ に対する割合(以下、耐力低下率)を示す。図には履歴吸収エネルギーを、そのサイクルで吸収したエネルギーと1サイクル前までに吸収したエネルギーの累積値を区別して示した。図より、漸増載荷試験体では14サイクルにおいて60%まで耐力が低下し、そこまでの履

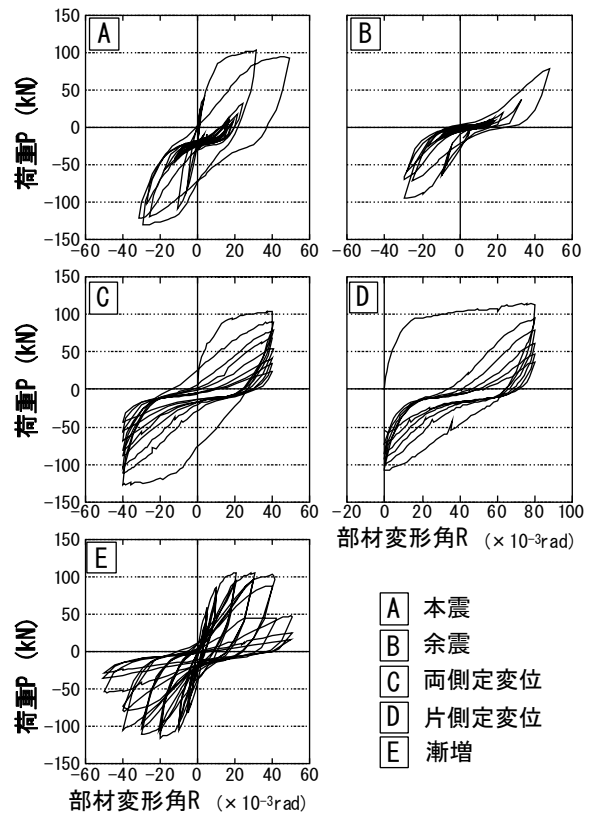


図-5 荷重-部材変形角関係

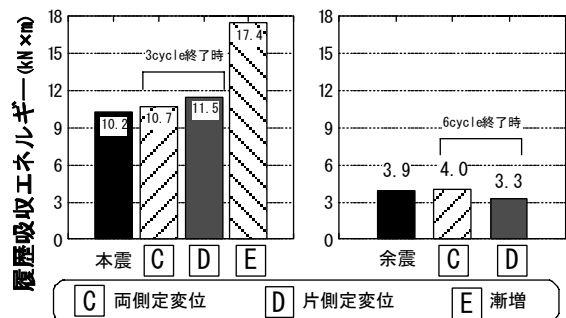


図-6 履歴吸収エネルギー

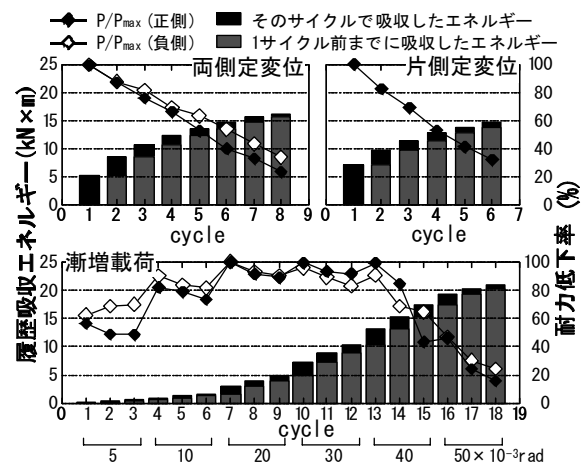


図-7 各サイクル毎の履歴吸収エネルギー

履歴吸収エネルギーは15.4kNmであった。そこで、両側、片側定変位試験体においても耐力が60%まで低下したときまでの履歴吸収エネルギーを

比較してみると、各々13.7kNm, 12.8kNmであり、全振幅が等しいにもかかわらず両側定変位試験体の方が耐力低下までの履歴吸収エネルギー量は大きい結果となった。また、図-7に示される各試験体のそのサイクルで吸収したエネルギーは同変形角のサイクル内では全ての試験体においてサイクル数が増加するにつれてエネルギー吸収量は減少している。

図-9に両側、片側定変位試験体の载荷サイクル毎の履歴吸収エネルギー量と2サイクル目のエネルギー量に対する比率を示す。図より1サイクル目の履歴吸収エネルギー量は片側定変位試験体が両側定変位のそれを上回るが、2サイクル以降はその関係は逆転する。また、その比率は2サイクル以降両試験体でほぼ一致した。

## 5. 地震時のヒンジ部材の耐力低下と終局限界履歴吸収エネルギー

本章では、地震時のヒンジ部材の終局限界履歴吸収エネルギーを定量的に表すために、先ず規則的履歴载荷試験体の耐力低下点を定義し、終局限界履歴吸収エネルギーを算出する。そしてその結果に基づき、本震载荷を行った試験体の終局限界履歴吸収エネルギーを算出し、比較検討を行う。

### 5.1 ヒンジ部材の耐力低下点

本節では両側・片側定変位試験体のヒンジ領域のせん断変形角、部材の軸方向変形を、明確な耐力低下が見られた漸増载荷試験体と比較することにより、両側・片側定変位試験体の耐力低下点について検討する。

#### (1) ヒンジ領域のせん断変形角

既往の研究において渡辺・松崎<sup>9)</sup>らは耐力低下していない段階ではせん断変形は全体変形の20%前後で一定となり、試験体が耐力低下するとせん断変形が増加することを示し、せん断変形角の増加と試験体の耐力低下との間に密接な関係があると述べた。そこで本論でも同様の検討を行うために図-10に両側・片側定変位、漸増载荷試験体のサイクル毎の耐力低下率と、ヒ

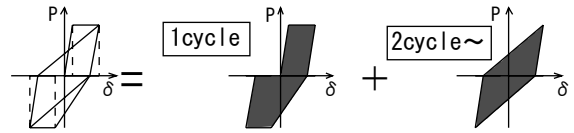


図-8 履歴吸収エネルギーの算出方法

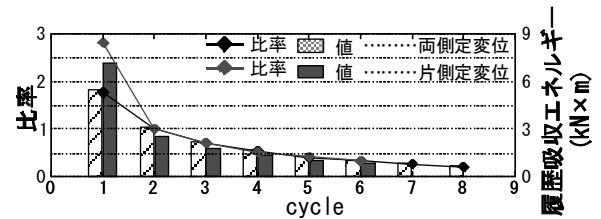


図-9 载荷サイクル毎の履歴吸収エネルギー比率

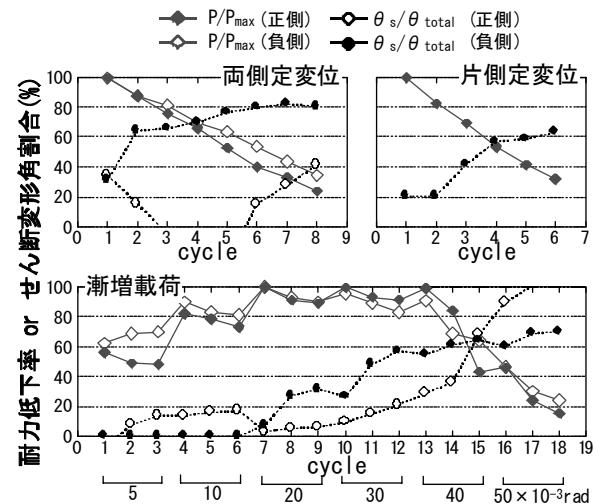


図-10 せん断変形角割合の推移

ンジ領域の全変形角に対するせん断変形角の割合を示す(以下、せん断変形角割合、算出方法は文献5)を参照)。漸増载荷試験体の明確な耐力低下が見られた負側の $-40 \times 10^{-3}$ radにおいてせん断変形角の割合が急激に増加し約60%に達している(14~15サイクル)ことが分かる。このことは本論の試験体においてもせん断変形角の増加と部材の耐力低下には密接な関係があることを示唆している。

そこで両側、片側定変位試験体においてせん断変形角割合が60%になるサイクルを耐力低下点と仮定すると、それぞれ2サイクル目、4サイクル目であった。全振幅が等しいにもかかわらず両側定変位試験体の方が片側定変位試験体に比べ少ないサイクルでせん断変形角割合が増加したことより、耐力低下の要因となるヒンジ領域のせん断変形は载荷履歴の影響を受ける事が分かる。また、図より両側定変位、漸増载荷試験体の正・負側でせん断変形角割合の推移が異

なることより、正負で部材変形角が等しい場合にもヒンジ領域の全変形に占めるせん断変形の割合は必ずしも同じではない事が分かる。

## (2) 部材の軸方向変形

市之瀬らは既往の研究<sup>7)</sup>において、試験体の軸方向歪みは繰返し载荷によって増加・蓄積され試験体の耐力低下点以降、その増加量が減少するという実験結果を得た。本項においても軸方向変形と耐力低下との関連性を検討ために、軸方向変形を試験体スタブに取り付けた変位計より算出される軸方向歪み  $\epsilon_L$  (算出方法は文献5))として示し、**図-11**に各試験体の軸方向変形の推移を示す。図より、漸増载荷試験体の耐力低下時には正側、負側共に軸方向変形の減少が始まっている。よって、本試験体においても部材の軸方向変形が始まる点を耐力低下点と仮定すると、両側定変位試験体では4サイクル目、片側定変位試験体では2サイクル目が耐力低下点と推測できる。

## 5.2 地震時の終局限界履歴吸収エネルギー

本節では本震、余震に対応した入力を行った試験体においても耐力低下点に関する検討を行うために**図-12**にせん断変形角割合及び軸方向変形の推移をステップ毎に示す。また図は各極大、極小値のうち $+5 \times 10^{-3} \text{rad}$ 以上の点のみ示した。ただし、せん断変形角の増加及び軸方向変形の減少が負側よりも先に生じたため正側のみを示す。図よりせん断変形角割合が60%に達し、軸方向変形が減少し始める点は本震時の166ステップでほぼ一致していることが分かる。

以上の検討によって定義された各試験体の終局限界履歴吸収エネルギーを**図-13**に示す。ただし、両側、片側定変位試験体はせん断変形角の増加、軸方向変形の減少のどちらかが最初に生じた点を耐力低下点とした。図より、本震载荷試験体の終局限界履歴吸収エネルギーは7.7kNmであり**図-6**において示した全履歴吸収エネルギー10.2kNmの約75%であった。各試験体の終局限界履歴吸収エネルギーを比較すると、漸増载荷試験体が最も大きな値を示し、両側定

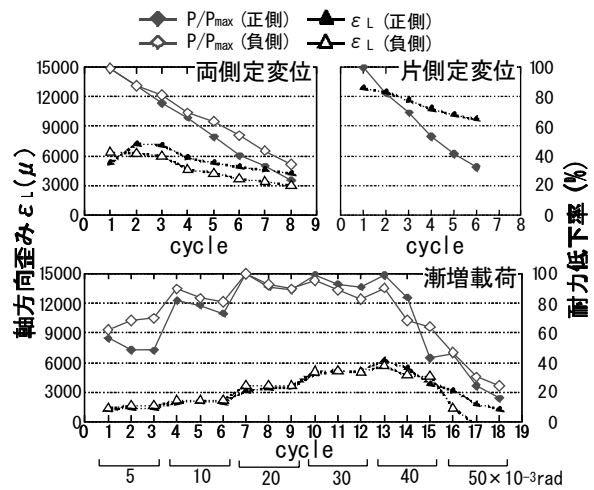


図-11 軸方向変形推移

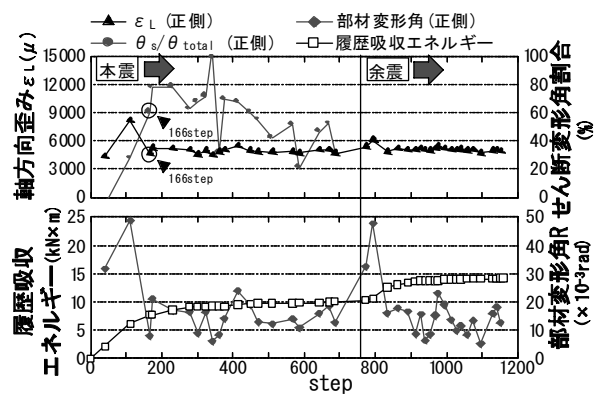


図-12 本震・余震時のせん断変形角割合及び軸方向変形の推移

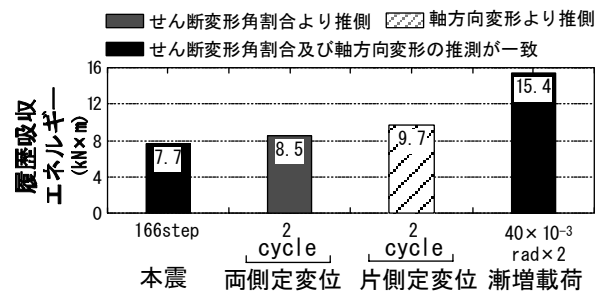


図-13 終局限界履歴吸収エネルギー

変位試験体の終局限界履歴吸収エネルギーが本震载荷試験体のそれに最も近い値を示した。

## 6. エネルギー吸収モデルの妥当性の検討

筆者らは**図-3**の方法でED, NDを算出する際に**図-14**に示すエネルギー吸収のモデル化を行っている。図中の $E_y$ は弾性歪みエネルギー、 $E_{ds}$ は1サイクル目に吸収される塑性歪み吸収エネルギー、 $E_c$ は2サイクル目以降に吸収される繰返し塑性歪み吸収エネルギー、 $E_i$ はiサイクル目のループ面積を示す。本章では両側、片側

定変位試験体を用いてこのエネルギー吸収モデルの妥当性を検討する。筆者らは両側定変位試験体のエネルギー吸収のモデル化を参考に、図-15において片側定変位試験体のエネルギー吸収を新たにモデル化した。そして、 $P_y$ ,  $\delta_y$ ,  $\delta_D$ には実験値を、除荷時剛性は $E_i$ が実験によって得られるループの面積に等しくなるように設定し、 $ND=3$ の時に得られる各エネルギーの値を表-3に示す。表より、両側、片側定変位試験体のどちらのエネルギー吸収のモデルも部材の吸収エネルギーを僅かに過小評価しているものの提案したエネルギー吸収のモデル化はおおよそ妥当であるといえる。同じく表中の $\xi$ （ループ面積係数で文献1）に詳述されている繰り返し塑性歪み吸収エネルギーの性能を表す係数）を比較すると、両試験体共にサイクル数の増加に伴い $\xi$ の値は減少していることが分かる。また、全振幅は等しいにもかかわらず両側定変位試験体の方が1サイクルにおける繰り返し塑性歪み吸収エネルギーの性能が良い事がわかる。すなわち、繰り返し塑性歪み吸収エネルギーも載荷履歴の影響を受けると考えられる。

## 8. まとめ

本論ではエネルギー入力速度概念に基づく予備解析で得られた載荷履歴をパラメータにとった4体の試験体について静的加力実験を行い、以下の知見を得た。1)地震時の全履歴吸収エネルギー量に最も近いエネルギー吸収量を示したものは両側定変位試験体であり、これによりエネルギー入力速度概念により地震時の損傷を等価な定変位振動に置き換える事がほぼ妥当であることを示した。2)地震時の終局限界履歴吸収エネルギーは全吸収エネルギーの約75%であり、地震時のそれに最も近いエネルギー吸収を示したのは両側定変位試験体であった。3)エネルギー入力速度概念において用いたエネルギー吸収のモデル化に従って両側、片側定変位試験体のエネルギー吸収量を算出し、実験値と比較することでその妥当性を示した。

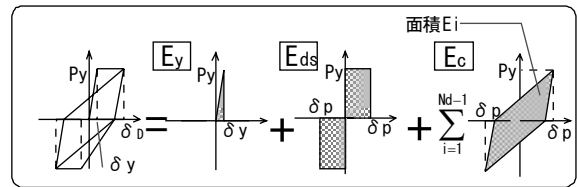
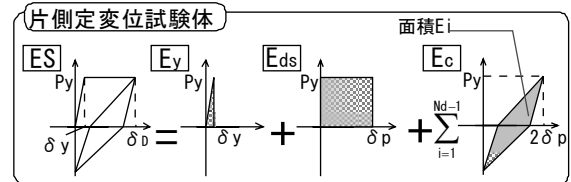


図-14 エネルギー吸収モデル  
(両側定変位試験体)



$P_y$ …降伏耐力  $\delta_y$ …降伏変位  $\delta_D$ …最大変位  $\delta_p$ …塑性変位 ( $\delta_D - \delta_y$ )

図-15 エネルギー吸収モデル  
(片側定変位試験体)

表-3 各歪みエネルギー

(a) 両側定変位試験体 (b) 片側定変位試験体

実験値	kNm	10.70
計算値	kNm	9.37
$E_y$	kNm	0.59
$E_{ds}$	kNm	3.52
$E_c$	kNm	5.27
$\xi$	2cycle	0.44
	3cycle	0.31

実験値	kNm	11.50
計算値	kNm	9.44
$E_y$	kNm	0.40
$E_{ds}$	kNm	4.69
$E_c$	kNm	4.34
$\xi$	2cycle	0.27
	3cycle	0.19

## 謝辞

高周波熱錬株式会社より高強度横補強筋ウルボンを製作・提供して頂き、ここに深く感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) 向井智久, 衣笠秀行, 野村設郎:「地震動を受けるRC構造物の限界応答変形量を保証するに必要な耐力算出法とその精度検証」日本建築学会構造系論文報告集532号, 2000.6, pp.137-143
- 2) 向井智久, 織裳慎一郎, 衣笠秀行, 野村設郎:「RC造ピロティ形式建物の制振補強手法に関する研究」, 日本建築学会構造系論文集563号 2003.1, pp.161-168
- 3) 向井智久, 衣笠秀行, 野村設郎「エネルギー入力速度概念に基づくRC造ピロティ建物の設計手法」日本コンクリート工学年次論文集,2002.6, Vol2.pp.25-30
- 4) 向井智久, 衣笠秀行, 野村設郎:「エネルギー釣合に基づくRC造梁降伏型建物の設計手法」日本コンクリート工学年次論文集,2003.7,Vol25, NO.2, pp.1-6
- 5) 向井智久, 梶原唯史, 野村設郎:「地震時におけるRC造ヒンジ部材の損傷評価のための実験的研究」日本建築学会関東支部研究報告集, 2004.3,
- 6) 渡辺英義, 是永健好, 中野克彦, 松崎育弘:「曲げ降伏後にせん断破壊するRC梁部材の靱性評価に関する実験研究」日本建築学会構造系論文集560号2002.10, pp.161-168
- 7) 梅村恒, 市之瀬敏勝, 松澤敦行:「載荷履歴と中子筋の有無がRC部材の復元力特性に及ぼす影響」コンクリート工学年次論文集, Vol.25 2003.7, pp.1093-1098
- 8) 向井智久, 衣笠秀行, 野村設郎:「RC構造物における塑性時の片寄りのメカニズムとその算出法」日本建築学会構造工学論文集Vol47B, 2001.3, pp.491-496