

# パーシャルプレストレストコンクリートはり部材の 正負交番荷重下の消散エネルギーと損傷評価

井上 晋\*・宮川豊章\*\*・藤井 学\*\*\*

本研究では、パーシャルプレストレストコンクリートはり部材を対象として、横拘束筋体積比、緊張率、コンクリート強度、鋼材指数およびせん断スパン有効高さ比が、異なる載荷履歴下の消散エネルギーに及ぼす影響を実験的に検討し、それらの関係を定式化した。さらに、終局時までの無次元化累積消散エネルギーを用いた損傷評価指標の考え方を提案し、履歴消散エネルギーに基づく損傷評価の可能性を示した。

**Key Words :** partially prestressed concrete, non-dimensional dissipated energy, loading history, mechanical degree of prestress, volumetric ratio of lateral confinement, damage evaluation

## 1. はじめに

コンクリート構造物の地震による損傷を定量的かつ的確に判断することは、その後の供用性の判定、補修・補強の必要性の判定の面からも非常に重要なことである。一般に、地震による損傷度の判定は、主として構造物の外観調査によって行われ、その結果と最大履歴応答変位を関連づけて、その後の残留変形性能を判定することが多い<sup>1)</sup>。現在、コンクリート構造物の耐震安全性は、構造物の有する変位じん性に基いて照査されることが多く、そのことを考慮すれば、残留変形性能と損傷の程度を関連づけることは非常に重要なことであると考えられる。一方、大地震時のような正負交番の超過荷重が作用する場合、コンクリート構造物およびそれを構成する各部材のじん性は著しく低下することが知られている。すなわち、荷重の繰返し作用による損傷の蓄積を正確にとらえることが、よりの確かな損傷評価につながるという。このような背景から、近年、繰返し荷重による損傷の蓄積を、構造物を構成する各部材の履歴消散エネルギーと結び付けて評価しようとするエネルギー的アプローチ<sup>2),3)</sup>や、低サイクル疲労の考え方をを用いて評価しようとする試み<sup>4)</sup>がなされ、これらの考えに基づく損傷の定量的評価指標が提案されつつある。

しかしながら、これらの損傷評価指標は、鉄筋コンクリート（以下RCと略記）部材の実験結果に基づくものがほとんどであり、プレストレストコンクリート（以下PC）を含め、パーシャルプレストレストコンクリート（以下PPC）に関してはほとんど研究がなされていないのが現状である。PPC構造はその設計の自由度の

高さから近年注目されており、ラーメン橋のはり部材のような地震力を受ける部材にも採用されることが多い。しかしながら、PPC部材の履歴消散エネルギーに影響を及ぼす要因は非常に多く、これらの部材の正確な損傷評価を行うためには、種々要因の影響を定量的に把握しておくことが前提条件となる。

本研究では、正負交番荷重下で曲げ破壊を呈するPPCはり部材の履歴消散エネルギーに及ぼす各種要因の影響を、著者らが行った実験結果<sup>5)~10)</sup>を用いて定量的にとらえるとともに、各部材が終局（破壊）時までには消散することのできる総エネルギー量に着目し、これを無次元化したものを用いてPPCはり部材の損傷を定量的に評価することを試みた。

## 2. 実験概要

### (1) 実験要因

PPCはりの塑性変形特性や履歴消散エネルギーに影響を及ぼす要因は数多くあるが、本研究ではその中でも比較的その影響が大きいと考えられる以下の5つを選定した。

a) 降伏ヒンジ領域に配置する横拘束筋体積比  $\rho_s$   
ただし、

$$\rho_s = \frac{\text{横拘束筋1本の体積}}{\text{横拘束筋1本あたりに拘束されるゴアコンクリートの体積}} \times 100 (\%) \quad \dots\dots\dots (1)$$

b) 緊張率  $\lambda$   
ただし、

$$\lambda = \frac{A_p f_{pv}}{A_p f_{pv} + A_s f_{sv}} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここに、

$A_p$  : PC鋼材断面積                       $f_{pv}$  : PC鋼材降伏点  
 $A_s$  : 鉄筋断面積                          $f_{sv}$  : 鉄筋降伏点

\* 正会員 工博 京都大学講師 工学部土木工学科  
(〒606-01 京都市左京区吉田本町)  
\*\* 正会員 工博 京都大学助教授 工学部土木工学科  
\*\*\* 正会員 工博 京都大学教授 工学部土木工学科

Table 1 Details of Test Variables

	A-Series	B-Series	C-Series	D-Series
$\rho_p$ (%)	0, 0.6, 1.2, 2.4	0.6, 1.2, 2.4	0.6, 1.2, 2.4	0, 0.6, 1.2, 2.4
$\lambda$	0.4, 0.7, 1.0	0.4, 0.7, 1.0	0.4, 0.7, 1.0	0.4, 0.7, 1.0
$f'_c$ (MPa)	40, 80	40	40	40, 80
$\sigma_{ps}$ (MPa)*	5, 8, 10, 12, 23	5, 8, 12	5, 8, 12	5, 8, 10, 12, 23
$q$	0.2, 0.25, 0.3, 0.4	0.25, 0.3	0.25, 0.3	0.2, 0.25, 0.3
$a/d$	2.3, 2.9, 3.5	2.3, 2.9, 3.5	3.5	3.5
number of specimens	6.3	1.9	9	2.4

\*  $\sigma_{ps}$ : introduced prestress

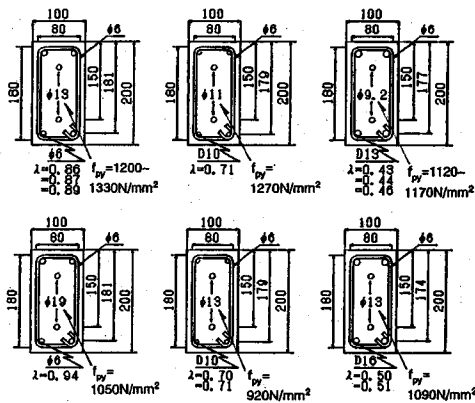
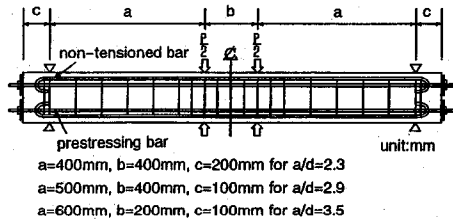


Fig. 1 Dimensions of Specimens

c) コンクリート強度  $f'_c$

d) 鋼材指数  $q$

ただし,

$$q = q_p + q_s = \frac{A_p f_{py}}{b d_p f'_c} + \frac{A_s f_{sy}}{b d_s f'_c} \quad (3)$$

ここに,

$d_p$ : PC 鋼材の有効高さ  $d_s$ : 鉄筋有効高さ

$b$ : 断面幅  $f'_c$ : コンクリートの圧縮強度

e) せん断スパン有効高さ比  $a/d$

これらの要因の値の詳細を、後述の各シリーズごとに Table 1 にまとめて示す。なお、いずれの供試体においても、断面内の PC 鋼材は導入直後の PC 鋼材応力が引張強度の 0.7 倍となるよう緊張した。これにより断面に導入される有効プレストレスは、圧縮強度 40 MPa のコンクリートの場合、 $\lambda=0.4, 0.7$ , および 1.0 に対してそれぞれ約 5 MPa, 8 MPa および 12 MPa, 圧縮強度 80 MPa のコンクリートの場合、 $\lambda=0.4$  および 1.0 に対してそれぞれ約 10 MPa および 23 MPa となる。

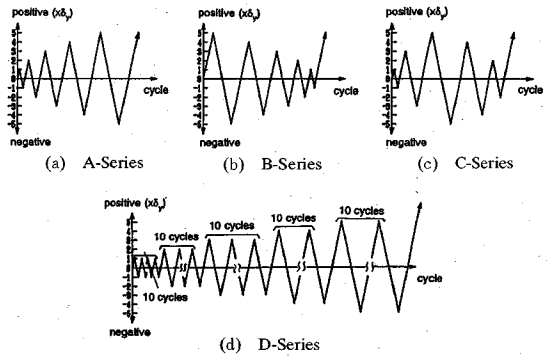


Fig. 2 Applied Loading Histories

## (2) 供試体

供試体は Fig. 1 に示すように、いずれも幅  $b=10$  cm, 高さ  $h=20$  cm の矩形断面を有し、断面内に PC 鋼材、鉄筋を対称複筋配置した (引張側 PC 鋼材の有効高さ  $d_p$  はいずれも 15 cm) 全長 160 cm の単純はりとした。軸方向鉄筋には原則として SD 295 A 異形鉄筋 ( $f_{sy}=350$  N/mm<sup>2</sup>) を用い、PC はりの場合は、組立筋として  $\phi 6$  mm 丸鋼 ( $f_{sy}=495$  N/mm<sup>2</sup>) を用いた (Table 1 では PC はりを  $\lambda=1.0$  として示しているが、組立筋を軸方向鉄筋として考慮すれば、 $\lambda$  は 1.0 より若干小さな値となる)。横拘束筋およびせん断補強筋には、いずれも端部 135° フック付  $\phi 6$  mm 閉合矩形フープ筋 ( $f_{sy}=490$  N/mm<sup>2</sup>) を用い、せん断補強筋間隔は、せん断破壊が先行しないよう、「土木学会コンクリート標準示方書・設計編」の規定に基づき算定した。また、PC 鋼材には PC 丸鋼棒 (A~C 種 1 号) を用い、ボンドタイプのポストテンションはりとした。

## (3) 載荷履歴

本研究では以下に示す 4 種類の載荷履歴を採用し、載荷履歴が消散エネルギーの累積挙動に及ぼす影響を検討することとした。

### a) A シリーズ

降伏変位 ( $\delta_y$ ) の整数倍で載荷変位を終局時 (後述) に至るまで徐々に増加させる単調漸増型載荷。ただし、各変位振幅における繰返し数は 1 回とする。なお、各供試体の降伏変位は、荷重-変位曲線の明確な折れ曲がり点を実験中に観察することにより定めたが、これらの変位は構成材料の応力-ひずみ関係ならびに鉄筋および PC 鋼棒の実降伏点を用いて計算した値 ( $\delta_{y,cal}$ ) よりも若干大きくなっており、鉄筋および PC 鋼棒のいずれも降伏していると考えられる。

### b) B シリーズ

A シリーズにおいて得られる各供試体の終局変位を最初に与え、その後の載荷変位を降伏変位の整数倍で徐々に減少させる単調漸減型載荷。ただし、各ステップの載荷変位の総和は A シリーズと等しくする。

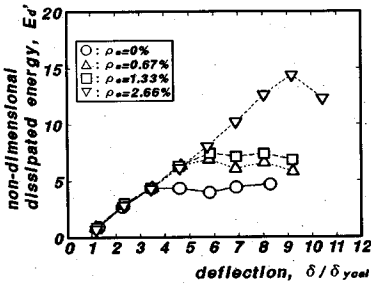


Fig.3 Effects of  $\rho_s$  on  $E'_d$ -value (A-Series,  $\lambda=0.70$ )

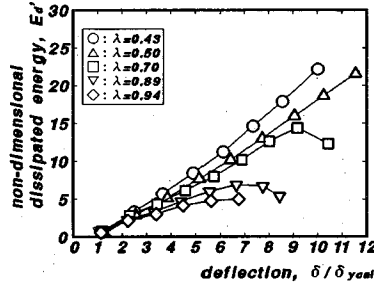


Fig.4 Effects of  $\lambda$  on  $E'_d$ -value (A-Series,  $\rho_s \cong 2.50\%$ )

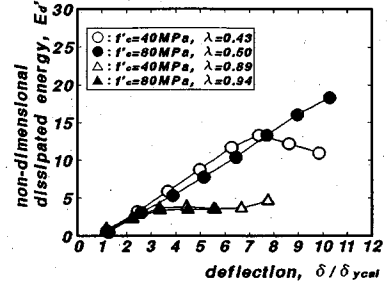


Fig.5 Effects of  $f'_c$  on  $E'_d$ -value (A-Series,  $\rho_s \cong 1.25\%$ )

c) C シリーズ

載荷変位を徐々に増加させた後、減少させる漸増一漸減型載荷。ただし、各ステップの載荷変位の総和はA, B シリーズと等しくする。

d) D シリーズ

降伏変位の整数倍の変位で10回ずつの繰返しを与える漸増繰返し載荷。

これらの詳細を模式図的に Fig.2 に示す。載荷形式はスパン 120 cm および 140 cm に対し、曲げスパンおよびせん断スパンを変化させた対称 2 点集中荷重載荷とした。なお、各シリーズとも所定の履歴終了後、最終的にはりの耐力が最大耐力の 50% 程度以下に低下するまで変位を徐々に大きくし、載荷を継続した。

3. 実験結果および考察

(1) 終局時の定義および消散エネルギーの無次元化

コンクリート部材の損傷を評価する際には、その部材の終局時を定義しておく必要がある。終局時の定義についてははまだ議論の多いところであるが、本研究では、最大耐力到達以降、各変位振幅における耐力が最大耐力の 80% まで低下した時点を終局時と定義した。なお、本研究で用いた供試体は、いずれも曲げ降伏後の繰返し回数の増加とともに曲げ圧縮部コンクリートの圧潰、はく落が進行し、終局時に到った。

一方、部材が消散したエネルギーは、各供試体の荷重-変位履歴曲線の囲む面積で表わされるが、断面形状や鋼材量が異なれば消散エネルギーも異なることから、これらの値を直接比較して論ずることはできない。したがって、各要因の影響を検討する際には、履歴曲線の各ループが囲む面積（消散エネルギー  $E_d$ ）を無次元化する必要がある。したがって、本研究では、次式のように各ループの囲む面積をそれぞれの供試体の降伏荷重の計算値 ( $P_{yca1}$ ) と降伏変位の計算値 ( $\delta_{yca1}$ ) の積で除すことにより無次元化し、それをを用いて各要因の影響を考察することとした。

$$E'_d = \frac{E_d}{P_{yca1} \delta_{yca1}} \dots \dots \dots (4)$$

ここに、  $E'_d$ : 無次元化消散エネルギー

$E_d$ : 消散エネルギー(各ループが囲む面積)

$P_{yca1}$ : 降伏荷重の計算値

$\delta_{yca1}$ : 降伏変位の計算値

(2) 消散エネルギーに及ぼす各種要因の検討

a) 横拘束筋体積比の影響

Fig.3 はAシリーズの供試体について、横軸に各載荷変位の降伏変位の計算値に対する比  $\delta/\delta_{yca1}$  を、縦軸に無次元化消散エネルギー  $E'_d$  を取り、横拘束筋体積比が  $E'_d$  値に及ぼす影響について調べたものの一例である。

Fig.3 によれば、緊張率が等しい場合、 $E'_d$  値は  $3\delta_{yca1}$  程度の変位まで、横拘束筋体積比によらず載荷変位の増加とともに直線的に増大することがうかがえる。しかし、それ以降の変位レベルでは、横拘束筋体積比が小さいほど早期に  $E'_d$  値の増加が停止あるいは減少し始めることがわかる。 $E'_d$  値が直線的に増加しなくなる点は、本研究で定める各供試体の終局時にほぼ対応しており、これらの結果は、横拘束筋体積比が小さいほど小さな変位で終局時に到り、それ以降の履歴ループで消散するエネルギーが小さくなることを示している。

b) 緊張率  $\lambda$  の影響

Fig.4 は横拘束筋体積比が 2.5% 程度の供試体について、緊張率が  $E'_d$  値に及ぼす影響を調べたものである。

図によれば、緊張率の増加とともに同一変位に対する  $E'_d$  値が小さくなること、すなわち、載荷変位の増加とともに  $E'_d$  値の増加率が小さくなることがうかがえる。このことは、緊張率の増加とともに導入プレストレスが大きくなり、その結果履歴ループの囲む面積が小さくなることに起因するものと考えられる。

c) コンクリート強度  $f'_c$  の影響

Fig.5 は、横拘束筋体積比がほぼ等しい供試体について、コンクリート強度が  $E'_d$  値に及ぼす影響を調べたものの一例である。図によれば、 $3\delta_{yca1}$  程度の変位まではコンクリート強度によらず  $E'_d$  値はほとんど等しく、また、それより大きい変位レベルではコンクリートの設計強度を 40 MPa としたもののほうが 80 MPa としたものよりも若干大きな  $E'_d$  値を示す傾向がうかがえる。しかし、

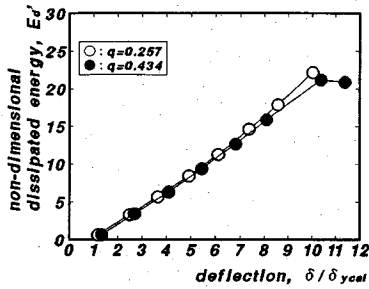


Fig.6 Effects of  $q$  on  $E_d'$ -value (A-Series,  $\lambda \cong 0.45$ ,  $\rho_s \cong 2.50\%$ )

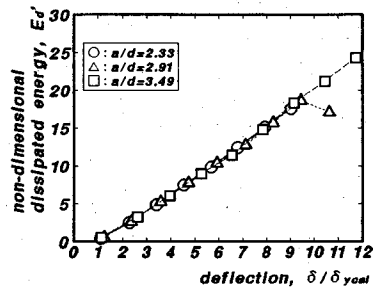


Fig.7 Effects of  $a/d$  on  $E_d'$ -value (A-Series,  $\lambda = 0.46$ ,  $\rho_s = 2.43\%$ )

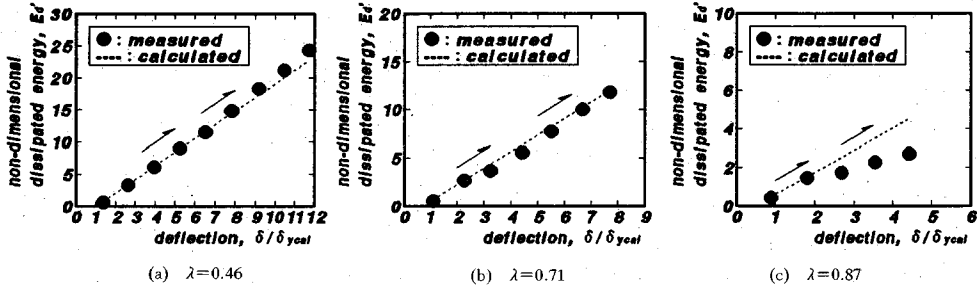


Fig.8 Examples of Relationship between  $E_d'$  and  $\delta/\delta_{yca1}$  (A-Series,  $\rho_s = 2.43\%$ )

ここで比較した供試体の緊張率は前者で0.43(0.89), 後者で0.50(0.94)であり, 後者の方が若干大きくなっていることを考慮すれば, コンクリート強度が  $E_d'$  値に及ぼす影響は横拘束筋体積比や緊張率に較べ小さいものと考えられる。

d) 鋼材指数  $q$  の影響

Fig.6は, 横拘束筋体積比, 緊張率およびコンクリート強度がほぼ等しい供試体について, 鋼材指数が  $E_d'$  値に及ぼす影響を調べたものである。図より明らかなように, 鋼材指数が0.257と0.434の間で各変位レベルの  $E_d'$  値に顕著な相違はなく, 他の要因が一定の場合, 鋼材指数が  $E_d'$  値に及ぼす影響はかなり小さいと考えられる。

e) せん断スパン有効高さ比  $a/d$  の影響

Fig.7に  $a/d$  の異なる供試体の  $E_d'$  値を比較したものの一例を示す。図から明らかなように, 同一変位振幅における  $E_d'$  値は  $a/d$  によらずほとんど等しいことがわかる。  $a/d$  が異なる場合, 各変位振幅における作用せん断力は異なるが, 本研究で用いた供試体では, それぞれの最大作用せん断力に対して補強を施したため, 結果的に曲げが卓越し,  $E_d'$  値に差異が生じなかったものと考えられる。したがって, 最終的に曲げ破壊を呈するPPCはりでは  $a/d$  が  $E_d'$  値に及ぼす影響は小さいといえる。

(3) 異なる荷重履歴下のエネルギー消散特性

前述のように,  $E_d'$  値に及ぼすコンクリート強度  $f_c$ ,

鋼材指数  $q$  およびせん断スパン有効高さ比  $a/d$  の影響は横拘束筋体積比  $\rho_s$  や緊張率  $\lambda$  が及ぼす影響に較べてきわめて小さいと考えられる。そこで, ここでは横拘束筋体積比と緊張率の影響のみに着目して, 各荷重履歴下の消散エネルギーの累積挙動を検討することとした。

a) A シリーズ

Fig.8にAシリーズの供試体の無次元化消散エネルギー  $E_d'$  と荷重変位  $\delta/\delta_{yca1}$  の関係の一例を示す。Fig.3で示したように, 横拘束筋体積比は  $E_d'$  値が直線的に増加しなくなる変位, すなわち終局時の変位を決定することのみに影響を及ぼすと考えられ, その初期直線領域の勾配は, 緊張率が等しい場合横拘束筋体積比によらずほぼ等しい。一方, Fig.4に示したように, 横拘束筋体積比が等しい場合,  $E_d'$  値の増加勾配は緊張率の影響を受け, 緊張率が大きいほどその勾配は小さくなる。以上のことから, Aシリーズのような変位漸増型の荷重を受ける供試体の, 降伏変位以降破壊に至るまでの各変位における  $E_d'$  値を次式のように直線で近似することとした。

$$E_d' = \alpha \frac{\delta}{\delta_{yca1}} + \beta \quad (\delta \geq \delta_{yca1}) \dots \dots \dots (5)$$

ただし,  $\alpha, \beta$  は緊張率  $\lambda$  の関数

Aシリーズの63供試体について係数  $\alpha, \beta$  と緊張率  $\lambda$  の関係を調べたものを Fig.9に示す。これらの係数と緊張率の関係を線形関係とみなし, 次式を得た。

$$\alpha = -2.43\lambda + 3.25 \quad (0.43 \leq \lambda \leq 0.94) \dots \dots \dots (6)$$

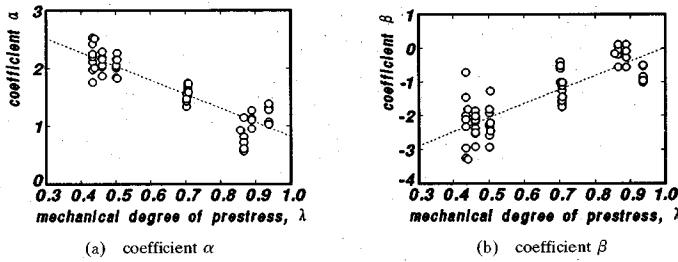


Fig.9 Relationships between Coefficients  $\alpha$ ,  $\beta$  and  $\lambda$

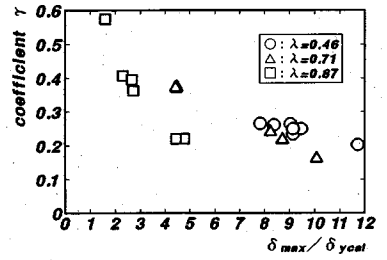


Fig.11 Relationship between Coefficient  $\gamma$  and  $\delta_{max}/\delta_{ycal}$

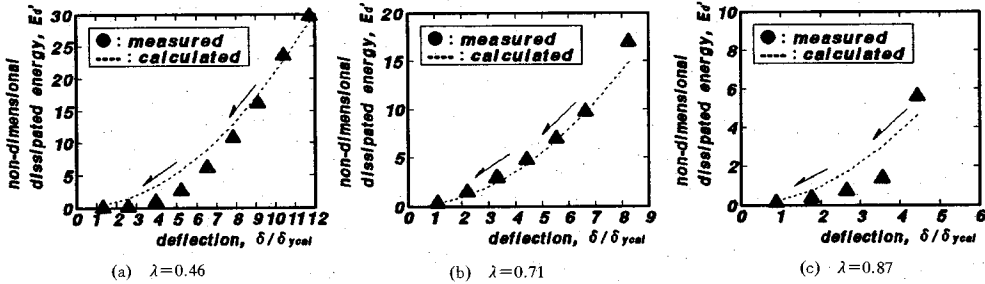


Fig.10 Examples of Relationship between  $E_d'$  and  $\delta/\delta_{ycal}$  (B-Series,  $\rho_s=2.43\%$ )

$$\beta = 4.17\lambda - 4.15 \quad (0.43 \leq \lambda \leq 0.94) \dots\dots\dots (7)$$

これらの式を用いて求めた A シリーズ供試体の各変位レベルにおける  $E_d'$  の計算値を Fig.8 に併記する。 $E_d'$  値の比較的大きい範囲で若干のばらつきは見られるものの、計算値は実測値をよく推定していることがうかがえ、各変位 1 回ずつの漸増正負交番繰返しを受けるはり部材の終局時までの無次元化消散エネルギー値は、上述のような考え方によりかなり正確に推定できることがわかる。なお、 $E_d'$  値が大きい範囲でのばらつきは、部材が終局時に近づくエネルギー消散過程に不安定現象が生じ、 $E_d'$  値と与えられた変位との間に線形関係が成り立たなくなり、線形関係を仮定した上述の計算方法からの誤差が若干大きくなることにより生じたものと考えられる。

b) B シリーズ

Fig.10 に B シリーズの供試体の荷重変位と無次元化消散エネルギーの関係の一例を示す。図より、 $E_d'$  値は荷重変位の減少とともに多変関数的に減少することがうかがえ、ここでは簡便化のために、緊張率によらず二次関数のような二次関数で近似することとした。

$$E_d' = \gamma \left( \frac{\delta}{\delta_{ycal}} \right)^2 \quad (\delta \geq \delta_{ycal}) \dots\dots\dots (8)$$

Fig.11 に係数  $\gamma$  と  $\delta_{max}/\delta_{ycal}$  ( $\delta_{max}$ : 最初のサイクルで与えた最大変位) の関係を示す。図に示すように係数  $\gamma$  は緊張率  $\lambda$  および  $\delta_{max}$  の影響を受け、19 体の供試体の試験結果より次式が得られた。

$$\gamma = 1.494 \left( \frac{\delta_{ycal}}{\delta_{max}} \right) + 0.083 \quad (\lambda = 0.46) \dots\dots\dots (9)$$

$$\gamma = 1.488 \left( \frac{\delta_{ycal}}{\delta_{max}} \right) + 0.038 \quad (\lambda = 0.71) \dots\dots\dots (10)$$

$$\gamma = 0.879 \left( \frac{\delta_{ycal}}{\delta_{max}} \right) + 0.036 \quad (\lambda = 0.87) \dots\dots\dots (11)$$

Fig.10 に式 (8)~(11) を用いて算出した無次元化消散エネルギーの計算値を併記する。図からわかるように、緊張率  $\lambda$  が 0.87 の場合、実測値と計算値の差が若干大きい。これは、緊張率の増加とともに  $E_d'$  の絶対値そのものが減少するため、結果として相対誤差が大きくなること、および、ここでは  $E_d'$  値と荷重変位の関係を緊張率によらず全て二次関数で近似したが、実験における最大変位  $\delta_{max}$  と次の荷重変位との間の  $E_d'$  値の低下率は、緊張率の増加とともに若干大きくなる傾向がうかがえ、荷重変位と  $E_d'$  値の関係が、緊張率の増加とともに二次関数から三次関数へと近づいていくことによるものと思われる。

c) C シリーズ

Fig.12 に C シリーズの供試体の  $E_d'$  値と荷重変位の関係の一例を示す。これらより、 $E_d'$  値は変位増加過程においては A シリーズと同様に直線的に増加し、変位減少過程においては B シリーズと同じく多変関数的に減少することがうかがえる。Fig.12 に前述の式 (5)~(11) を用いて算出した無次元化消散エネルギーの計算値を併記したが、計算値と実測値はほどよく一致し、C シリーズのような漸増-漸減型荷重の場合においても、無次元化消散エネルギーは、変位増加過程においては荷重変位の一次関数として、また、変位減少過程では二次関数としてほぼ定式化できることが示された。

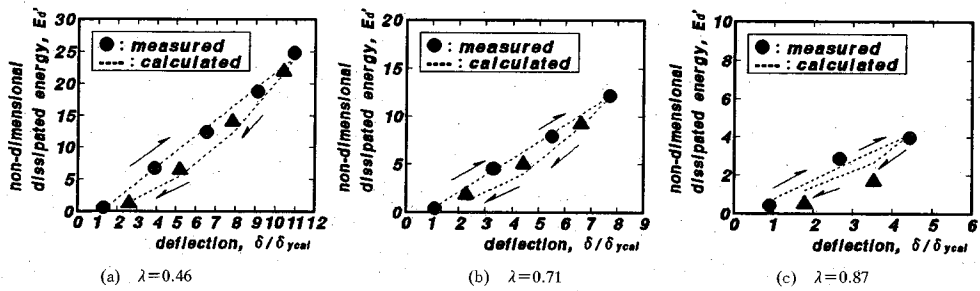


Fig.12 Examples of Relationship between  $E_d'$  and  $\delta/\delta_{yca1}$  (C-Series,  $\rho_s=2.43\%$ )

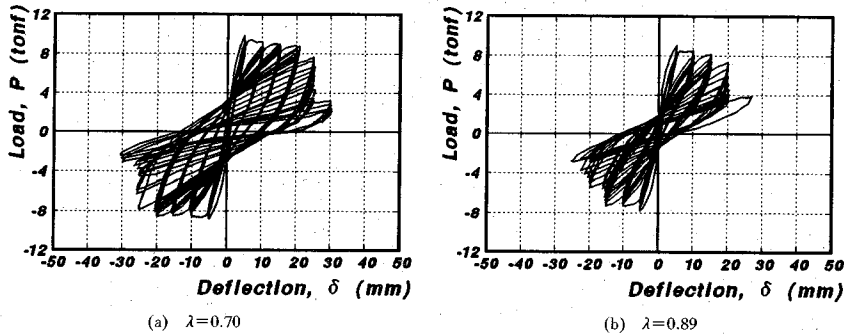


Fig.13 Examples of Load-Deflection Hysteresis Loops (D-Series,  $\rho_s \approx 2.50\%$ )

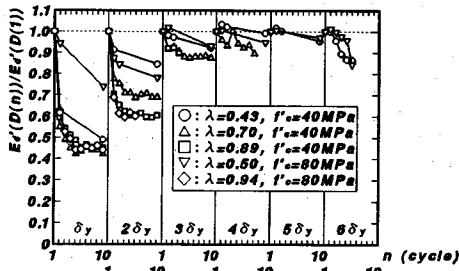


Fig.14 Changes of  $E_d'(D(n))/E_d'(D(1))$  with Repeated Cycles (D-Series,  $\rho_s \approx 2.50\%$ )

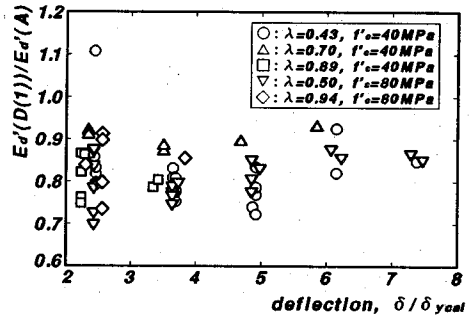


Fig.15 Relationship between  $E_d'(D(1))/E_d'(A)$  and  $\delta/\delta_{yca1}$

#### d) D シリーズ

Fig.13 に D シリーズの供試体の荷重一変位履歴曲線の一例を示す。また、Fig.14 は D シリーズの供試体の各変位における 1 回目の繰返し時の  $E_d'$  値に対する  $n$  回目の  $E_d'$  値の比の変化を表わしたものの一例である。さらに、Fig.15 は、D シリーズの供試体の終局時までの各変位における 1 回目の繰返しサイクル時の  $E_d'$  値と対応する A シリーズの供試体の同一変位における  $E_d'$  値の比を変位レベルごとに示したものである。

Fig.14 に示すように、 $1\delta_y$  程度の小さい変位レベルでは、同一変位 10 回の繰返しのうち、1 回目の繰返し、すなわち処女載荷における  $E_d'$  値が最も大きく、2 回目の繰返し時の  $E_d'$  値は 1 回目の  $E_d'$  値の 60~80% 程度まで減少する。また、その後 10 回までの繰返しの間で

$E_d'$  値は減少し、最終的に 1 回目の 40~60% 程度まで減少する。また、 $2\delta_y$  の変位レベルでも同様の傾向を示すが、この場合の減少率は  $1\delta_y$  の場合と較べて若干小さくなる。一方、 $3\delta_y$  以上終局時に至るまでの変位レベルでは、1 回目の繰返し時と 2 回目の繰返し時の  $E_d'$  値はほとんど差がないものが多く、また、10 回目の繰返し時においてもその減少率は 10% 程度となり、 $1\sim 2\delta_y$  の場合と若干異なる性状を示している。なお、供試体の耐力低下が急激に進行するような破壊近傍の変位レベルでの繰返しにおいては、 $E_d'$  値は繰返し数の増加にとともに急激に減少することがうかがえる。以上の傾向は、すべての供試体について共通して認められた。

一方、Fig.15 に示されるように、 $2\delta_y$  以降終局時に至るまでの変位レベルでは、緊張率や横拘束筋体積比に

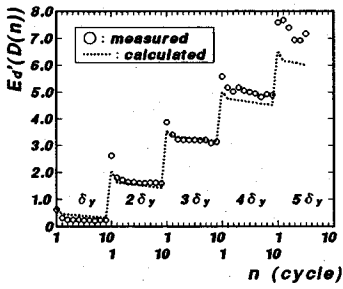


Fig.16 Example of Changes of Measured and Calculated  $E_d'$ -value ( $\lambda=0.70, \rho_s=2.66\%$ )

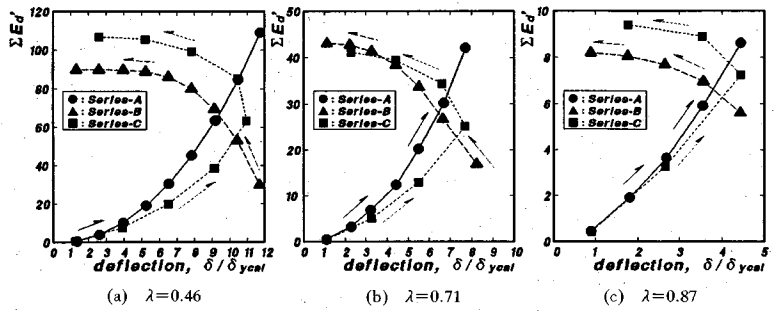


Fig.17 Effects of Loading Histories on  $\sum E_d'$  ( $\rho_s=2.43\%$ )

関係なく、Dシリーズの供試体の各変位1回目の繰返しサイクルでの  $E_d'$  値は対応するAシリーズの供試体の  $E_d'$  値の80%程度に低下することが認められた。このことは、ある変位での繰返しサイクルにおいて消散されるエネルギーは、その変位よりも小さな変位での繰返し载荷の影響を受けることを示唆しているものと考えられる。

以上のことを考慮して、ここでは本研究のDシリーズのように各変位10回程度の繰返しを受ける場合、ある変位の  $n$  回目のサイクルにおける  $E_d'$  値を実験結果より推定することを試みることにした。

同一変位での繰返し载荷における  $E_d'$  値の変化は、前述のように、与えた変位レベルによって若干異なる。しかし、ここでは簡便化のために、 $E_d'$  値の減少率は1回目のサイクルから2回目のサイクルにおいて最も大きく、以後の繰返しサイクルでは直線的に減少すると仮定し、その減少率は変位によって異なるものとする。また、Dシリーズの  $2\delta_y$  以上の各変位の1回目のサイクルにおける  $E_d'$  値は対応するAシリーズの供試体の同一変位における  $E_d'$  値より減少し、その減少率は変位レベルによらず一定であると仮定する。

以上の仮定のもとで24体の供試体の実験結果を用いて解析した結果以下の式が得られた。

①  $\delta = \delta_y$  のとき  
 $E_d'(D(1)) = E_d'(A) \dots \dots \dots (12)$

$E_d'(D(n)) = 0.7E_d'(D(1)) - \frac{0.2}{8}(n-2)$   
 $(2 \leq n \leq 10) \dots \dots (13)$

②  $\delta = 2\delta_y$  のとき  
 $E_d'(D(1)) = 0.83E_d'(A) \dots \dots \dots (14)$

$E_d'(D(n)) = 0.8E_d'(D(1)) - \frac{0.1}{8}(n-2)$   
 $(2 \leq n \leq 10) \dots \dots (15)$

③  $\delta \geq 3\delta_y$  のとき  
 $E_d'(D(1)) = 0.83E_d'(A) \dots \dots \dots (16)$

$$E_d'(D(n)) = 0.95E_d'(D(1)) - \frac{0.05}{8}(n-2) \quad (2 \leq n \leq 10) \dots \dots (17)$$

ここに、 $E_d'(A)$ :式(5)で計算される対応するAシリーズの供試体の  $E_d'$  値

このような方法により求めたDシリーズの供試体の各変位、各繰返しサイクル時の  $E_d'$  値の計算値と実測値を比較したものの一例を Fig.16 に示す。同図によれば、無次元化消散エネルギーの計算値は、 $2\delta_y$  以降の各変位の最初の繰返し時の  $E_d'$  値を実測値より若干小さく見積もる傾向があり、その結果として  $5\delta_y$  程度の大きな変位における誤差が若干大きくなるものの、実測値の変化を比較的良好に表現している。したがって、ここで述べた方法により、Dシリーズのように同一変位で10回程度の繰返しを受ける場合においても、各変位、各繰返しサイクル時での無次元化消散エネルギーを適度な精度で推定することが可能であると考えられる。

(4) 終局時までの無次元化累積消散エネルギーに及ぼす各種要因の影響

これまで述べてきた方法により、PPC はり部材の各変位段階および各繰返しサイクル時での無次元化消散エネルギーはかなりの精度をもって推定可能であることが示された。しかし、部材に与えられた変形に対する全消散エネルギー量を前述の方法で算定しても、各部材が破壊に至るまでに消散することのできる総エネルギー量が未知であれば、与えられた荷重履歴に対する損傷の程度を評価することは困難である。そこで、ここでは終局時までの無次元化累積消散エネルギー ( $\sum E_{d'_{ult}}$ ) に及ぼす横拘束筋体積比  $\rho_s$ 、緊張率  $\lambda$  および载荷履歴の影響を検討しそれらの関係を定式化することを試みた。

Fig.17 は、終局時に至るまでの無次元化消散エネルギーの累積挙動に及ぼす载荷履歴の影響を調べたものの一例である。終局時までの無次元化累積消散エネルギー ( $\sum E_{d'_{ult}}$  値) に及ぼす载荷履歴の影響は緊張率  $\lambda$  の値によって異なり、 $\lambda=0.46$  の場合には、Bシリーズのような単調漸減载荷下では、Aシリーズのような単調漸

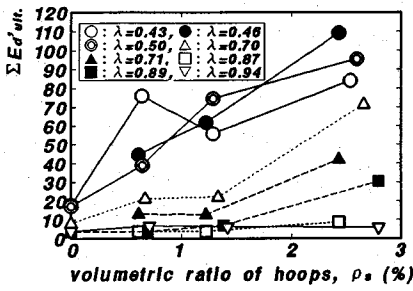


Fig.18 Effects of  $\rho_s$  on  $\Sigma E'_d{}_{ult.}$ -value (A-Series)

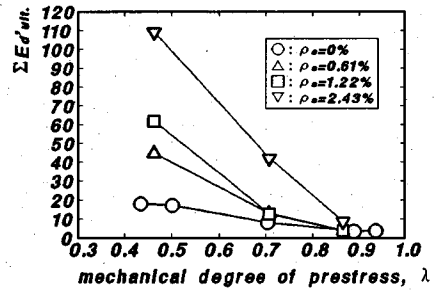
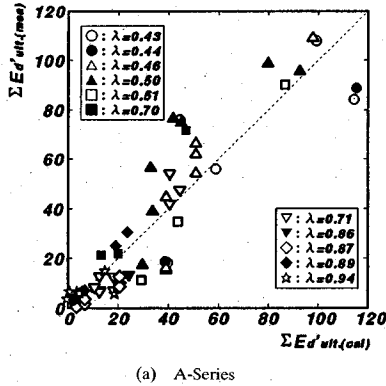
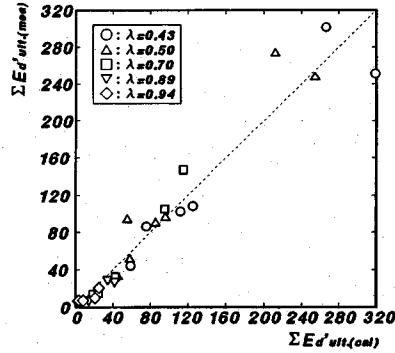


Fig.19 Effects of  $\lambda$  on  $\Sigma E'_d{}_{ult.}$ -value (A-Series)



(a) A-Series



(b) D-Series

Fig.20 Comparison between  $\Sigma E'_d{}_{ult.}(mea)$ -values and  $\Sigma E'_d{}_{ult.}(cal)$ -values

増載荷下に比べその値が15%程度減少することがうかがえる。これは、 $\lambda=0.46$ の場合は導入プレストレスが比較的小さいため、最初に終局変位に近い大きな変形を受けるBシリーズの場合、最初の繰返しサイクルにおいて発生した比較的大きな斜めひび割れが除荷時においても残留し、荷重-変位関係においてピンチ効果が卓越することにより履歴ループの囲む面積が減少することによるものと考えられる。一方、高緊張率の場合はプレストレスの効果により大変形下でも顕著な斜めひび割れが発生しにくく、ひび割れの回復性にも優れていることから、載荷履歴の影響が顕著に現れなかったものと考えられる。これらのことから、載荷変位振幅の総和が等しい場合、載荷履歴が消散エネルギーの累積挙動に及ぼす影響は緊張率 $\lambda$ の増加とともに小さくなると考えられる。

Fig.18にAシリーズの供試体の $\Sigma E'_d{}_{ult.}$ 値と横拘束筋体積比 $\rho_s$ の関係を、また、Fig.19に $\Sigma E'_d{}_{ult.}$ 値と緊張率 $\lambda$ の関係を示す。Fig.18より、緊張率がほぼ等しいグループ内では、 $0 \leq \rho_s \leq 2.80\%$ の範囲で $\Sigma E'_d{}_{ult.}$ 値は $\rho_s$ 値の増加とともにほぼ二次関数的に増大するが、その増加率は緊張率 $\lambda$ の影響を受けることがうかがえる。一方、Fig.19より、 $\Sigma E'_d{}_{ult.}$ 値は横拘束筋体積比がほぼ等しい場合、 $0.43 \leq \lambda \leq 0.94$ の範囲で $\lambda$ 値とほぼ反比例的な関係にあり、また、その減少率は $\rho_s$ 値が大きいくほど大きくなるがうかがえる。すなわち、PPC

はり部材の終局時までの無次元化累積消散エネルギーには、横拘束筋体積比と緊張率の両者が相互に作用して影響を及ぼしていると考えられる。なお、これらの傾向はA~Dのいずれのシリーズでも共通して認められるが、A~CシリーズとDシリーズでは各変位振幅における繰返し数が異なるため、 $\Sigma E'_d{}_{ult.}$ 値そのものは繰返し数を10回としたDシリーズの供試体の方が大きくなっている。

以上の結果より、ここでは、 $\Sigma E'_d{}_{ult.}$ と $\rho_s$ および $\lambda$ の関係を、AおよびDシリーズに分けて最小自乗法により次式のように求めた。なお、BおよびCシリーズについては、前述のように、緊張率が小さい場合をのぞいて $\Sigma E'_d{}_{ult.}$ 値に大差のないことからAシリーズに準じるものとした。

a) Aシリーズ

$$\Sigma E'_d{}_{ult.} = -5.52\rho_s^2 + 32.48\left(\frac{1}{\lambda}\right) + 7.44\left(\frac{\rho_s^2}{\lambda}\right) - 35.20 \quad \dots \dots \dots (18 a)$$

( $\Sigma E'_d{}_{ult.}$  値の標準偏差: 13.52,  $\rho_s$  は % 表示)

b) Dシリーズ

$$\Sigma E'_d{}_{ult.} = -29.39\rho_s^2 + 45.69\left(\frac{1}{\lambda}\right) + 30.28\left(\frac{\rho_s^2}{\lambda}\right) - 46.44 \quad \dots \dots \dots (18 b)$$

( $\Sigma E'_d{}_{ult.}$  値の標準偏差: 24.01,  $\rho_s$  は % 表示)



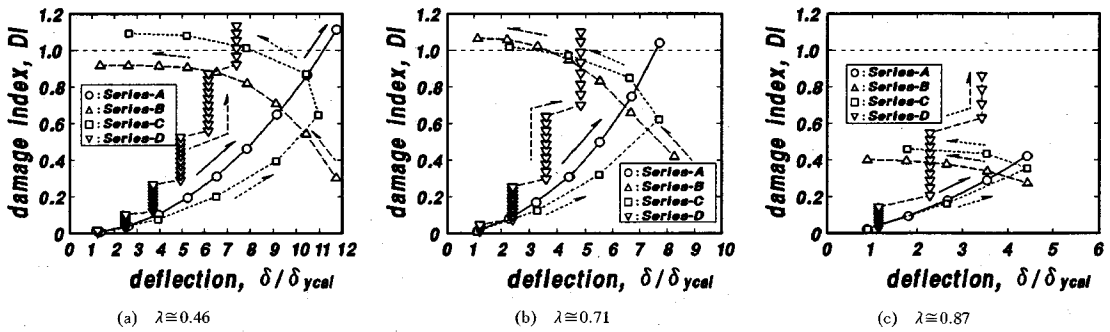


Fig.21 Examples of Changes of DI ( $\rho_s \approx 2.50\%$ )

式 (18 a, b) を用いて算出した終局時までの無次元化累積消散エネルギーの計算値 ( $\Sigma E'_d \text{ult. (cal)}$ ) と実測値 ( $\Sigma E'_d \text{ult. (mea)}$ ) を比較したものを Fig.20 に示す. この図に示すように,  $\Sigma E'_d \text{ult.}$  値への影響要因を横拘束筋体積比と緊張率のみに絞ったため, 多少のばらつきは認められるものの, 終局時に至るまでの無次元化消散エネルギーは式 (18 a, b) を用いることにより, ある程度の精度を持って推定できることがうかがえる.

(5) 消散エネルギーに基づく損傷評価指標に関する一提案

ある部材が終局時までに消散することのできる総エネルギー量が既知であるならば, 载荷荷重により実際に消散したエネルギー量と比較することにより, 損傷を定量的に表すことができると考えられる. ここでは, 損傷指数 (DI) を次式で定義し, その適用性について検討することとした.

$$DI = \frac{\Sigma E'_d}{\Sigma E'_d \text{ult.}} \dots \dots \dots (19)$$

ここに,

$\Sigma E'_d \text{ult.}$ : ある部材が終局時までに消散することのできる無次元化総エネルギー

$\Sigma E'_d$ : 部材が実荷重により消散した無次元化累積エネルギー

$DI=0$  は, 既存の損傷評価指標<sup>2), 4)</sup>と同様に, まったく損傷を受けていない状態,  $DI=1$  は, 終局時, すなわち本研究では, 耐力が最大耐力の 80% 以下に低下した時点を示す. なお,  $\Sigma E'_d \text{ult.}$  値は, 本研究で示したように, 同一変位振幅における繰返し数が異なればかなり異なる. このことは, 同一変位振幅で 2 回目以降の繰返し载荷により消散されるエネルギーが部材の損傷に及ぼす影響の程度は, 各変位において 1 回ずつの繰返しを受ける場合のそれと異なることを示すものである. したがって, 実用的な観点からは, 基本となる载荷下 (例えば本研究における A シリーズ) の  $\Sigma E'_d \text{ult.}$  値に対し, 同一変位で数回の繰返しを受ける場合には, 実際に消散したエネルギーの損傷への影響度について何らかの低減係数

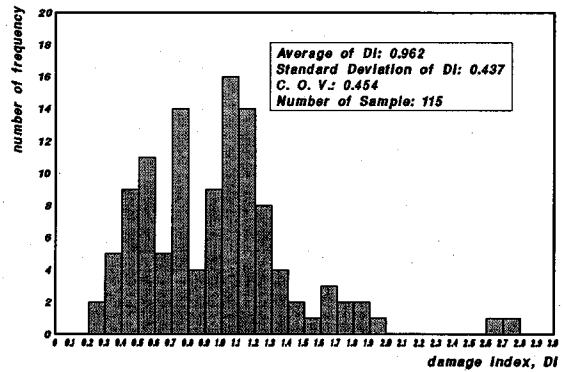


Fig.22 Statistics of DI at the Ultimate State

を設定し, それによって修正した  $\Sigma E'_d$  値を用いて損傷度を判定することが望ましいといえるが, ここでは, D シリーズの  $\Sigma E'_d$  値は修正することなくそのまま用いて, また,  $\Sigma E'_d \text{ult.}$  値は式 (18) によって各シリーズの供試体ごとに計算したものをを用いて DI 値を計算することとした.

Fig.21 に DI の変化の一例を示す. この図に示すように, D シリーズのように各変位で 10 回の繰返し载荷を行った場合は, A シリーズのように各 1 回の繰返しを受ける場合に比べてかなり小さい変位振幅で DI 値が 1.0 に近い値に達し, 繰返し载荷による損傷の蓄積がうまく表現できているといえる. また, B シリーズの場合は, 最初に変形を受けるため, それによる DI 値が 0.3~0.4 とかなり大きくなり, それ以降, 与える変形が小さくなるにしたがって, DI 値の増加率は小さくなるがうかがえる. なお, 緊張率  $\lambda$  が 0.87 程度以上 (PC はり) の場合, 終局時の DI 値がいずれのシリーズの供試体においても 1.0 に達しない場合が多い. これは, 緊張率が大きい場合,  $\Sigma E'_d \text{ult.}$  値そのものが緊張率が小さい場合と比べてかなり小さく, 式 (18) で算出される  $\Sigma E'_d \text{ult.}$  の計算値と実測値の相対誤差が大きくなる (緊張率が大きい場合は式 (18) は実測値を過大評価する傾向にある) ことによるものと考えられる.

Fig.22 に全供試体 (115 体) について, 実験において

終局時と判定された時点における  $DI$  の計算値の度数分布を示す。  $\sum E_d / u_{ult}$  の計算値と実測値の相対誤差の  $DI$  値に及ぼす影響はこの図にも現れており、115体の供試体の終局時の  $DI$  の平均値は1.0に近いものの、変動係数が44%程度とかなり大きい。とくに、緊張率が1.0に近く、横拘束筋体積比が小さいものほど誤差が大きくなる傾向が見受けられた。これらのことは、終局時までの無次元化累積消散エネルギーに及ぼす各種要因の影響には不確定要素が多く含まれること、とくに横拘束筋を有しないPCはりのように、破壊形式がぜい性的となる場合、終局時近傍のエネルギー消散特性を精度よくとらえることが困難となることに起因するものと考えられる。したがって、今後は本研究で考慮しなかった要因の影響も含めてその精度を向上させることが必要であると考えられる。

#### 4. 結 論

本研究では、PPCはり部材の正負交番荷重下の消散エネルギーに及ぼす各種要因の影響を定量的にとらえるとともに、終局時までの累積消散エネルギー量に着目して、履歴消散エネルギーに基づく損傷評価を試みた。得られた主な結果は以下のようである。

(1) PPCはり部材の正負交番荷重下の無次元化消散エネルギーについては、緊張率ならびに横拘束筋体積比の影響が支配的である。コンクリート強度、鋼材指数およびせん断スパン有効高さ比の影響は、前二者に比べかなり小さい。

(2) 変位増加過程における無次元化消散エネルギーは、荷重変位の一次関数として、変位減少過程では荷重変位の二次関数としてほぼ定式化できる。また、これらの式中の係数の値は、主として緊張率の値に影響を受け、横拘束筋体積比は終局時の変位に影響を及ぼす。

(3) 各変位で10回の繰返しを受ける漸増型荷重下では、繰返し回数の増加にともない無次元化消散エネルギーは減少するが、その度合いは荷重変位によって異なる。さらに、各変位の第1サイクルでの無次元化消散エネルギーは、各変位で1回ずつの繰返しを受ける場合に比べて低下する。

(4) 終局時までの無次元化累積消散エネルギーは、緊張率が小さいほど、また、横拘束筋体積比が大きいほど大きく、これらの関数としてほぼ定式化することができる。また、荷重変位の総和が等しい場合、荷重履歴が終局時までの無次元化累積消散エネルギーに及ぼす影響は緊張率が小さいほど大きくなる傾向がある。

(5) 本研究で提案した方法により、PPCはり部材の正負交番荷重下の損傷をある程度定量的に表すことができる。しかし、より正確な損傷評価を行うためには、各種要因の影響に関して更なる検討が必要である。

#### 参 考 文 献

- 1) 土木研究センター：建設省土木構造物の震災復旧技術マニュアル(案), 1986年.
- 2) Park, Y.J. and Ang, A.H.-S. : Mechanistic Seismic Damage Model for Reinforced Concrete, Journal of Structural Engineering, Vol.111, No.4, pp.722~739, 1985.
- 3) 魚本健人ほか：繰返し曲げを受けるRC梁の消費エネルギーによる破壊特性評価, 土木学会論文集, No. 460, pp. 85~91, 1993年.
- 4) Stephens, J.E. and Yao, J.T.P. : Damage Assessment Using Response Measurements, Journal of Structural Engineering, Vol.113, No.4, pp.787~801, 1987.
- 5) Kobayashi, K. et al. : Inelastic Behavior of Partially Prestressed Concrete under Reversed Cyclic Loading, Proc. of the 5th Canadian Conference on Earthquake Engineering, pp.841~848, 1987.
- 6) 井上晋ほか：正負交番作用荷重下におけるPPC部材の塑性変形特性について, 土木学会第42回年次学術講演会講演概要集, 第5部, pp. 232~233, 1987年.
- 7) 以後有希夫ほか：パーシャルPC部材の正負交番繰返し荷重下の耐荷特性, 土木学会第42回年次学術講演会講演概要集, 第5部, pp. 610~611, 1988年.
- 8) 井上晋ほか：横拘束筋のコンクリートはり部材への適用, セメント・コンクリート論文集, No. 43, pp. 340~345, 1989年.
- 9) 井上晋ほか：パーシャルPCはり部材の消散エネルギーに及ぼす荷重履歴の影響と損傷評価, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.15, No. 2, pp. 401~406, 1993年.
- 10) 福島祐治ほか：パーシャルPCはり部材の消散エネルギーに及ぼす各種要因の影響, 平成5年度関西支部年次学術講演会講演概要, V-5-1-V-5-2, 1993年.

(1993.9.22 受付)

## ENERGY DISSIPATION OF PARTIALLY PRESTRESSED CONCRETE BEAMS UNDER REVERSED CYCLIC LOADING AND THEIR DAMAGE EVALUATION

Susumu INOUE, Toyoaki MIYAGAWA and Manabu FUJII

The effects of mechanical degree of prestress, volumetric ratio of lateral confinement, compressive strength of concrete, steel index and shear span effective depth ratio on the energy dissipation properties of partially prestressed concrete beams were investigated under different loading histories. Relationships between these test variables and non-dimensional dissipated energy were derived based on the test results. It was also indicated that seismic damage of partially prestressed concrete beams could be evaluated quantitatively by the proposed damage index based on hysteretic dissipated energy.