

論文

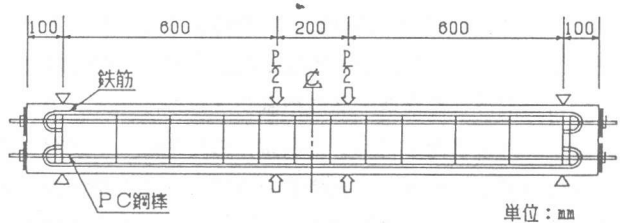
[2067] パーシャルPCはり部材の消散エネルギーに及ぼす載荷履歴の影響と損傷評価

井上晋\*1・服部篤史\*2・宮川豊章\*3・藤井学\*4

1. はじめに

現在, 設計レベルにおけるコンクリート構造物の耐震安全性は, 一方単調荷重下の変位靱性により照査されていることが多い。しかし, 正負交番の繰返し荷重となる地震荷重下では, コンクリート部材の靱性は単調荷重下と較べ著しく低下すること, コンクリート構造物の地震による損傷は構成部材の履歴吸収・消散エネルギーと密接な関係があることが知られており, 近年, 繰返し荷重作用による靱性の低下や履歴吸収・消散エネルギーを考慮した損傷評価指標が提案されつつある [1], [2]。しかし一方では, 部材の消散エネルギーに影響を及ぼす要因は多く, 特に, 載荷履歴が異なれば消散エネルギーの累積挙動が異なることが指摘されている [3]。

本研究では, 従来研究例の少ないパーシャルPC (以下PPC) はり部材を対象として, 載荷履歴が消散エネルギーの累積挙動に及ぼす影響を, 緊張率および横拘束筋体積比を要因として検討し, これらの諸要因と消散エネルギーの関係の定式化を試みるとともに, 消散エネルギーに基づく損傷評価の考え方を提案することを目的とした。



2. 実験概要

2.1 供試体

供試体には, 図-1 に示すように, PC鋼棒と鉄筋を断面内に対称複筋配置したPPC単純はり(幅×高さ×全長=10×20×160cm)を用いた。消散エネルギーに影響を及ぼす要因として, 本研究では, 緊張率 $\lambda$  ( $= A_p f_{py} / (A_p f_{py} + A_s f_{sy})$ ) および横拘束筋体積比 $\rho_s$  ( $= 1$ 本の横拘束筋の体積/横拘束筋1ピッチあたりに拘束されるコアコンクリートの体積)を選定した。これらの具体的な数値を表-1に示す。また, コンクリートの設計圧縮強度は400kgf/cm<sup>2</sup>とし, PC鋼棒, 異形鉄筋(SD295A)および $\phi 6$ 鉄筋は市販のも

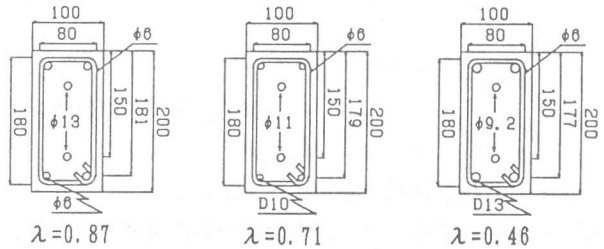
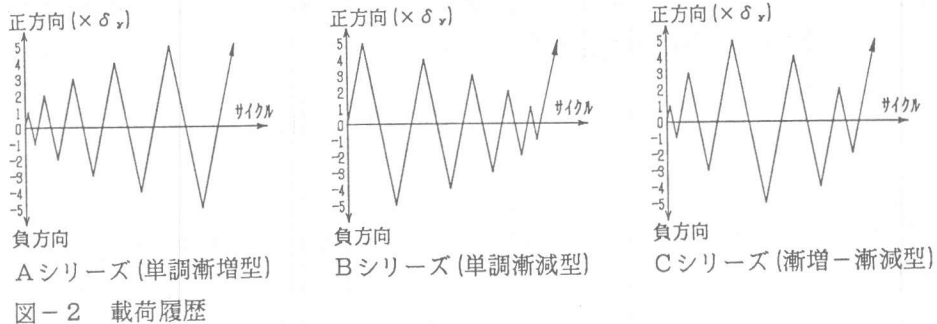


図-1 供試体の形状・寸法

表-1 試験要因の詳細

要因	数値
緊張率 $\lambda$	0.46, 0.71, 0.87
横拘束筋体積比 $\rho_s$ (%)	0.61, 1.22, 2.43

\*1 京都大学助手 工学部土木工学科, 工修 (正会員)  
 \*2 京都大学助手 工学部土木工学科, 工修 (正会員)  
 \*3 京都大学助教授 工学部土木工学科, 工博 (正会員)  
 \*4 京都大学教授 工学部土木工学科, 工博 (正会員)



のを用いた。なお、供試体断面の終局曲げ耐力は上記諸要因によらずほぼ等しくなるように設計するとともに、いずれもせん断破壊が先行しないように所要のせん断補強筋を配置した。上記の2つの要因と以下に示す荷重履歴の組合せにより、合計27体の供試体を作製した。

## 2. 2 荷重形式および荷重履歴

いずれの供試体においても、荷重形式は図-1に示すように、スパン140cmに対して、曲げスパン20cm、せん断スパン80cmの対称2点集中荷重荷重とした。また、荷重履歴としては、図-2に示すように、降伏変位の整数倍で変位を徐々に増加させる単調漸増型荷重 (Aシリーズ)、最初に大きな変位を与え、その後変位振幅を徐々に減少させる単調漸減型荷重 (Bシリーズ) およびこれらを混合した漸増-漸減型荷重 (Cシリーズ) の3つを選定した。なお、荷重試験は最初にAシリーズの荷重を行い、各供試体の終局時 (本研究では各変位振幅における耐力が最大耐力の80%に低下した時点) の荷重変位振幅を求めた後、各ステップの荷重変位振幅の総和がAシリーズと等しくなるようにBおよびCシリーズの荷重変位の増 (減) 分を定めた。

## 3. 試験結果および考察

### 3. 1 消散エネルギーに及ぼす各種要因の影響

#### (1) 消散エネルギーの無次元化

図-3に供試体の荷重-スパン中央変位 ( $P-\delta$ ) 履歴ループの一例を示す。消散エネルギーはこれらの履歴ループが囲む面積で表現される。本研究で用いた供試体のように、断面耐力と荷重スパンが等しい場合には、これらの値を直接比較しても問題はないと考えられるが、断面耐力や荷重スパンが異なれば、消散エネルギーは著しく異なる。したがって、ここでは断面耐力や載

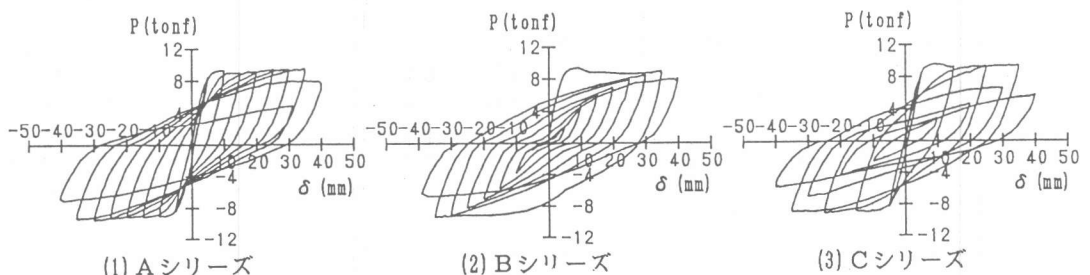


図-3 荷重-スパン中央変位履歴ループの一例 ( $\lambda=0.46$ ,  $\rho_s=2.43\%$ )

荷スパンが異なる部材間でも比較が可能なように、各変位における消散エネルギー（ $E_d$ ）を降伏荷重の計算値  $P_{ycal}$  と降伏変位の計算値  $\delta_{ycal}$  の積（ $P_{ycal} \delta_{ycal}$ ）を用いて次式のように無次元化したもの（無次元化消散エネルギー  $E_d'$ ）で考察を進めることとした。

$$E_d' = \frac{E_d}{P_{ycal} \delta_{ycal}} \quad (1)$$

(2) 無次元化消散エネルギーと载荷変位の関係

载荷変位と無次元化消散エネルギー  $E_d'$  の関係の一例を各シリーズごとに図-4に示す。なお、図中には以下に示す方法で求めた計算値を併記した。

Aシリーズでは、 $E_d'$  値は終局時に至るまで変位の増加とともにほぼ直線的に増加し、次式で定式化できることが明らかとなった。

$$E_d' = \alpha \left( \frac{\delta}{\delta_{ycal}} \right) + \beta \quad (\delta \geq \delta_{ycal}) \quad (2)$$

係数  $\alpha$ 、 $\beta$  は緊張率  $\lambda$  の影響を受け、実験結果より、

$$\alpha = -3.44\lambda + 3.82, \quad \beta = 5.89\lambda - 5.24 \quad (3)$$

$$(0.46 \leq \lambda \leq 0.87)$$

なる関係が得られた。なお、横拘束筋体積比  $\rho_s$  はその直線の勾配にほとんど影響を与えず、終局時の変位の大きさに影響を及ぼすことが明らかとなった。

一方、Bシリーズでは、 $E_d'$  値は変位の減少とともに二次関数的に減少することから、

$$E_d' = \gamma \left( \frac{\delta}{\delta_{ycal}} \right)^2 \quad (\delta \geq \delta_{ycal}) \quad (4)$$

と定式化することとした。式中の係数  $\gamma$  は緊張率  $\lambda$  および最初に履歴する最大変位  $\delta_{max}$  の影響を受け、本研究の場合次式が得られた。

$$\gamma = -0.016 \left( \frac{\delta_{max}}{\delta_{ycal}} \right) + 0.39 \quad (\lambda = 0.46) \quad (5)$$

$$\gamma = -0.034 \left( \frac{\delta_{max}}{\delta_{ycal}} \right) + 0.52 \quad (\lambda = 0.71) \quad (6)$$

$$\gamma = -0.092 \left( \frac{\delta_{max}}{\delta_{ycal}} \right) + 0.63 \quad (\lambda = 0.87) \quad (7)$$

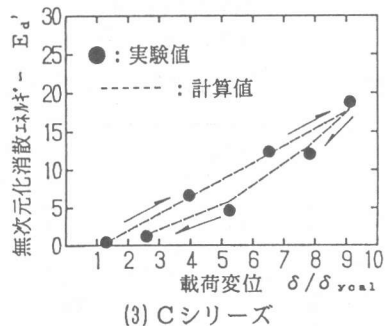
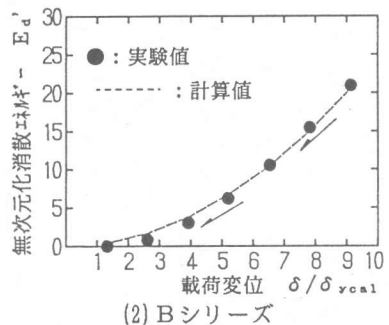
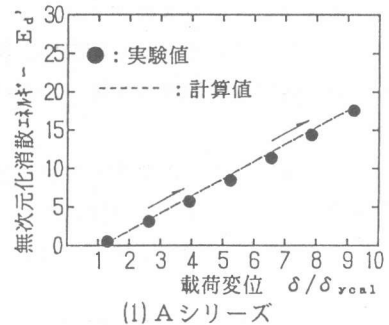


図-4 载荷変位と  $E_d'$  の関係  
( $\lambda = 0.46$ ,  $\rho_s = 1.22\%$ )

また、Cシリーズの消散エネルギーは、変位増加過程ではAシリーズと同様の、また変位減少過程ではBシリーズと同様の挙動を示した。したがって  $E_d'$  値は、変位増加過程では  $\delta / \delta_{yca1}$  の一次式として、また変位減少過程では  $\delta / \delta_{yca1}$  の二次式として定式化できることがわかる。

### (3) 無次元化消散エネルギーの累積挙動

図-5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 ( $\Sigma E_d'_{ult.}$ ) の値に及ぼす荷履歴の影響は緊張率  $\lambda$  の値によって異なり、図-5に示すように  $\lambda = 0.46$  の場合、Bシリーズのような単調漸減型荷下では、Aシリーズのような単調漸増型荷下の場合に較べその値が15%程度減少することがわかる。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、最初に大きな変位を受けるBシリーズのような荷下では、繰返し初期の段階で比較的大きな斜めひびわれが発生し、除荷時にこれらが残留することにより荷重-変位関係においてピンチ効果が卓越し、履歴ループの囲む面積が小さくなるためであると考えられる。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われが発生せず、ひびわれの回復性にも優れているため荷履歴の影響が顕著に現れなかったものと思われる。これらのことから、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思われる。

### (4) 終局時までの無次元化累積消散エネルギー

次に、Aシリーズの供試体について、終局時までの無次元化累積消散エネルギー  $\Sigma E_d'_{ult.}$  と緊張率  $\lambda$  および横拘束筋積比  $\rho_s$  の関係をそれぞれ図-6、図-7に示す。図より、 $\Sigma E_d'_{ult.}$

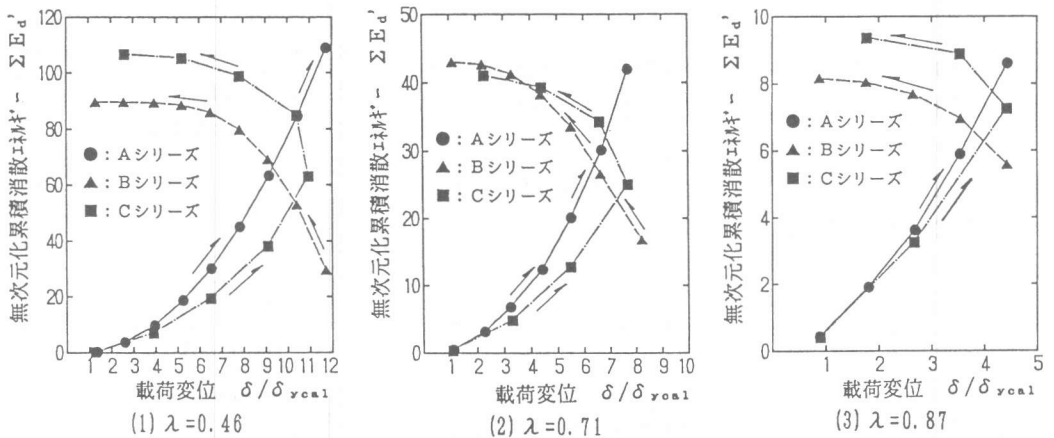


図-5 荷履歴が  $E_d'$  の累積挙動に及ぼす影響 ( $\rho_s = 2.43\%$ )

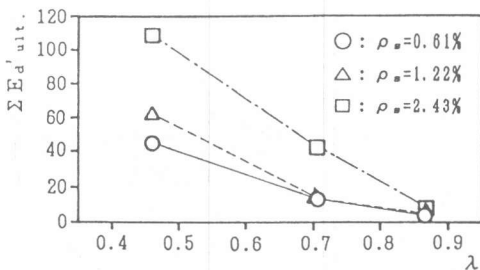


図-6  $\Sigma E_d'_{ult.}$  と  $\lambda$  の関係 (Aシリーズ)

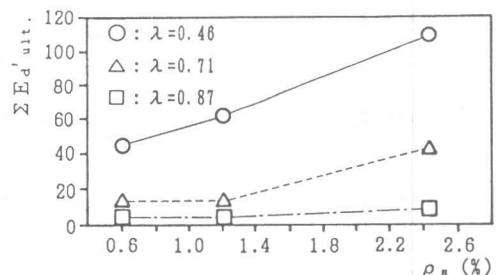


図-7  $\Sigma E_d'_{ult.}$  と  $\rho_s$  の関係 (Aシリーズ)

値は  $\rho_s$  が一定の場合は  $\lambda$  の増加とともに反比例的に減少し、一方、 $\lambda$  が一定の場合は  $\rho_s$  の増加とともに二次関数的に増加することがわかる。また、横拘束筋の配置によるエネルギー消散能の改善効果は緊張率が大きくなるほど小さくなり、緊張率  $\lambda$  と横拘束筋体積比  $\rho_s$  は互いに影響を及ぼし合うことから、 $\Sigma E_d'_{ult.}$  値を次のように定式化した。

$$\Sigma E_d'_{ult.} = a \rho_s^2 + b \left( \frac{1}{\lambda} \right) + c \left( \frac{\rho_s^2}{\lambda} \right) + d \quad (8)$$

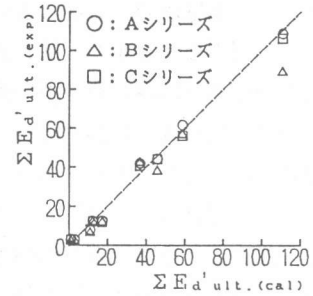


図-8  $\Sigma E_d'_{ult.}$  の実験値と計算値の比較

係数  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$  を A シリーズの結果を用いて最小自乗法により回帰したところ、 $a = -9.30$ ,  $b = 40.62$ ,  $c = 9.68$ ,  $d = -46.38$  ( $\Sigma E_d'_{ult.}$  の標準偏差 3.93) が得られた。(8) 式を用いた  $\Sigma E_d'_{ult.}$  値の計算値と実験値を比較したものを図-8 に示す。実験値と計算値はほどよく一致しており、終局時までの無次元化累積消散エネルギーはかなりの精度で推定できると考えられる。しかし、緊張率が 0.87 の場合は終局時までの無次元化累積消散エネルギーの実測値が他のものに較べかなり小さいため、誤差が大きくなる傾向があるとともに、B シリーズのような単調漸減型載荷下で緊張率が 0.46 程度と小さい場合には、前述のように  $\Sigma E_d'_{ult.}$  値が単調漸増型載荷下と較べ減少するため、より正確な評価を行う際には何らかの低減係数を設定することが必要であると考えられる。

### 3. 2 消散エネルギーに基づく損傷評価

地震によるコンクリート構造物・部材の損傷の程度を数値で表現できれば、震災後の補修・補強の一つの目安となる。損傷評価指標の一例としては、Parkらの Damage Index [1] がよく知られているが、ここでは、消散エネルギーに基づく損傷評価指標の可能性について述べる。

いま、損傷を表す指標として損傷指数 (DI) を次式のように定義する。ただし、 $DI = 0$  は部材がまったく損傷を受けていない状態、 $DI = 1$  は部材が終局時 (本研究では与えられた変位に対する耐力が最大曲げ耐力の 80% 以下に低下した時点) に至った状態を示すものとする。

$$DI = \frac{\Sigma E_d'}{\Sigma E_d'_{ult. cal}(A)} \quad (9)$$

ここに、 $\Sigma E_d'_{ult. cal}(A)$  は、式 (8) で計算される A シリーズのような漸増型載荷下での終局時までの無次元化累積消散エネルギーであり、 $\Sigma E_d'$  は実際に消散されたエネルギーである。すなわち、ある部材が終局時までに消散することのできる全エネルギーが既知ならば、地震荷重により実際に消散したエネルギーを  $P-\delta$  履歴ループより計算することにより、その損傷の程度をある程度評価することが可能となる。

図-9 に各載荷履歴における DI 値の変化の一例を示す。変位漸増型載荷下では載荷初期段階での損傷は小さく、変位の増加とともに累積損傷の増加率が大きくなること、変位漸減型載荷下では、最初のサイクルにおいて著しく部材が損傷し、その後の累積損傷の増加率は小さくなることわかる。なお、緊張率が 0.87 の場合は、載荷終了時点でも DI 値が 1 に至っていないが、これは式 (8) で計算される  $\Sigma E_d'_{ult. cal}(A)$  値が実測値よりも若干大きくなることによるものである。

また、漸減型荷重の場合の終局時までの無次元化累積消散エネルギーは、前述のように緊張率が小さい場合、漸増型荷重下と較べ小さくなり、逆に式(9)で計算されるDI値は若干小さくなることもある。したがって、この考え方の実部材への適用については、同一変位での繰返し回数の影響やその他の要因の影響を含め更なる検討が必要であると考えられる。

#### 4. まとめ

本研究より得られた主な結果をまとめると以下ようになる。

(1) PPCはり部材の各変位振幅における無次元化消散エネルギーは、変位増加過程では与えた変位の1次関数として、変位減少過程では変位の2次関数として定式化することができる。また、これらの式中の係数の値は、緊張率の値に影響を受ける。

(2) 終局時までの無次元化累積消散エネルギーは、横拘束筋体積比と緊張率の関数として定式化することができる。また、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い。

(3) 本研究で提案した方法により、PPCはり部材の地震による損傷をある程度定量的に表すことができる。しかし、より正確な評価を行うためには更なる検討が必要である。

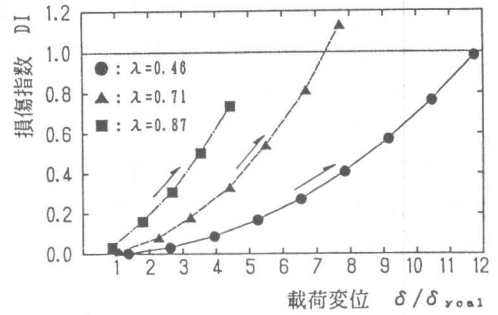
#### 参考文献

1) Park, Y. J. and Ang, A. H-S. :

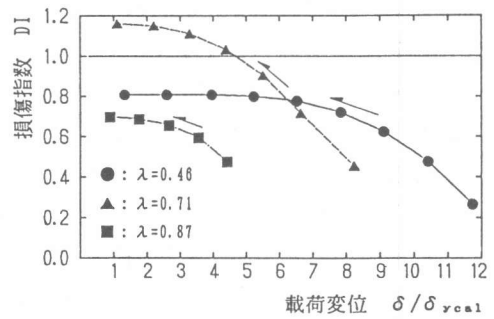
Mechanistic Seismic Damage Model for Reinforced Concrete, Journal of Structural Engineering, Vol. 111, No. 4, pp. 722-739, April 1985

2) Chung, Y. S., Meyer, C. and Shinozuka, M. : Modeling of Concrete Damage, ACI Structural Journal, Vol. 86, No. 3, pp. 259-271, May-June 1989

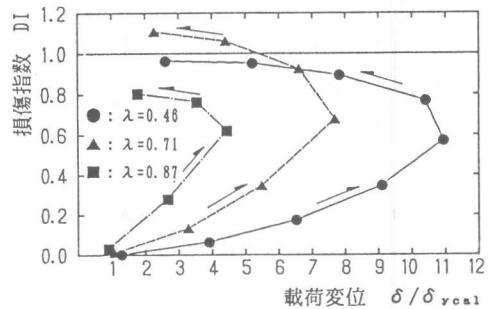
3) 川島一彦ほか：鉄筋コンクリート橋脚の動的特性に及ぼす荷重履歴の影響，土木技術資料，29-4，pp. 33-38，1987



(1) A シリーズ



(2) B シリーズ



(3) C シリーズ

図-9 損傷指数DIの変化 ( $\rho_s=2.43\%$ )