

研究ノート

# 横拘束筋を有する鉄筋コンクリート はりの靱性評価について

岡山職業訓練短期大学校 宮内 克之

## Study on Evaluation of Flexural Ductility of Reinforced Concrete Beams with Transversely Confining Reinforcement

Katsuyuki Miyauchi

**要 約** 耐震設計上或は材料の有効利用の面から靱性設計が望まれるが、その際部材の靱性の適切な把握と評価が重要課題である。しかし靱性の定量的評価或は靱性の評価尺度に関する研究はあまり多くなく、統一されていないのが現状である。従来靱性の評価尺度としては主に靱性率が用いられてきたが、本研究では部材の靱性をより適切に二次元的に評価するため、荷重変位曲線において降伏点変位までで囲まれる面積 $W_E$ と、降伏点変位から終局変位までで囲まれる面積 $W_P$ の比として、塑性エネルギー吸収能 $Q = W_P / W_E$ を定義し、靱性評価の尺度とした。

また横拘束筋として角形スパイラルを有する鉄筋コンクリートはりに対して鉄筋比、横拘束筋間隔、横拘束筋量、コンクリート強度、有効高さを要因とする繰返し載荷試験を実施し、塑性エネルギー吸収能と各要因との関係を調べた。その結果、塑性エネルギー吸収能は鉄筋比が増大すれば低下すること、コンクリート強度が大きくなれば増大すること、更に横拘束筋間隔が広がると低下することが明かとなった。しかし横拘束筋量、有効高さについては明確な関係は得られなかった。

### I まえがき

鉄筋コンクリート構造物の耐震設計上あるいは材料の有効利用の面から靱性設計が望まれる。また鉄筋コンクリート構造物についても限界状態設計法が採用されるに至り、部材の塑性域における変形能力即ち靱性の適切な把握と評価が重要な課題となってきている。一方曲げ部材の靱性改善の一方策として圧縮側コンクリートの横拘束が挙げられる。現在までにスパイラル筋、フープ筋等種々の形状のものが考案され、既に一部は実用化されている<sup>(1)</sup>。

しかしながら今日までの靱性に関する研究を見ると、コンクリート部材及びコンクリート構造物の靱性改善の方法に関する研究は数多くみられるものの<sup>(2)</sup>、靱性の定量的評価あるいは靱性の評価尺度に関する研究はあまり多くなく<sup>(3)</sup>、統一されていないのが現状である。

この様な状況を踏まえ、本研究においては、横拘束筋と

して角形スパイラル筋を有する鉄筋コンクリートはりに対して変位制御による繰返し載荷試験を実施し、靱性の評価尺度として塑性エネルギー吸収能の定義を行い、実験結果を用いて塑性エネルギー吸収能に及ぼす各種要因の影響について論じた。

### II 実験概要

実験に用いた各はりの条件を表-1に、はりの形状寸法を図-1に示す。E、Fはりにはスパン190cm、それ以外のはりはスパン132cmである。横拘束筋として、D6(一部 $\phi 6$ :  $\sigma_{sy} = 3,370 \text{ kgf/cm}^2$ ) 5cmピッチ、D10( $\sigma_{sy} = 3,490 \text{ kgf/cm}^2$ ) 5cm, 7.5cm, 10cmピッチの4種の角形スパイラル筋を用い、せん断スパン比はすべて  $a/d = 3.0$ とした。せん断スパン及び載荷点付近には $\phi 6$ の閉合スターラップを5cmピッチで配置し、せん断に対して十分に補強した。これにより供試はりはすべて曲げ破壊を生じた。なお横拘束筋及びスターラップを所定の位置に固定するため、 $\phi 6$ を圧縮側に配置した。引張鉄筋にはSD30を使用し、コンクリートの配合は表-2に示す2種類のものを使用した。

鉄筋及びコンクリートの強度試験結果を表-1に併せて示す。なおコンクリート強度は供試はりと同条件で養生を行った載荷時材令における値である。

表-1 RCはり供試体の条件一覧表

配合	はりの種類	引張主鉄筋			横拘束筋		コンクリート $\sigma_c^*$
		p (%)	p/po	$\sigma_{sv}^*$	径-間隔	pc (%)	
I	A-1	4.55	1.111	3200	$\phi 6-5$	1.14	252
	B-1	3.37	0.898	3340	D6-5	1.27	240
	B-2	3.37	0.927	3370	D10-5	2.85	234
	B-3	3.37	0.968	3360	D10-7.5	1.90	215
	B-4	3.37	0.968	3360	D10-10	1.43	215
	C-1	2.34	0.640	3410	D6-5	1.27	240
	C-2	2.34	0.578	3200	D10-5	2.85	247
	C-3	2.34	0.602	3210	D10-7.5	1.90	234
	C-4	2.34	0.564	3140	D10-10	1.43	247
	C-5	2.34	0.675	3420	$\phi 6-5$	1.14	224
	D-1	1.49	0.492	3590	$\phi 6-5$	1.14	214
	E-1	1.96	0.512	3240	D6-5	0.84	234
	F-1	2.12	0.614	3360	D6-5	0.84	215
II	B-2	3.37	0.729	3350	D10-5	2.85	334
	B-4	3.37	0.693	3340	D10-10	1.43	360
	C-2	2.34	0.500	3320	D10-5	2.85	334
	C-4	2.34	0.493	3400	D10-10	1.43	360

注: \* ;  $\text{kgf/cm}^2$   
 po ; 終局状態でのつり合鉄筋比

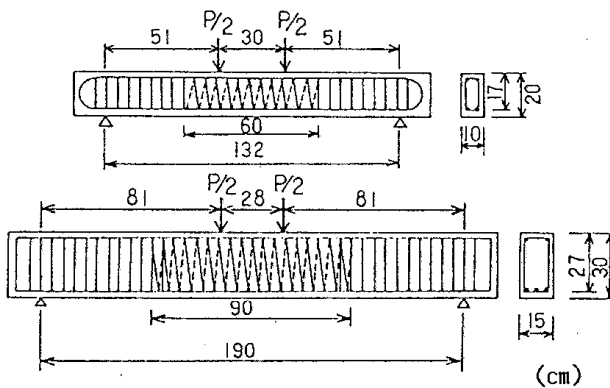


図-1 はりの形状寸法

表-2 コンクリートの配合

配合	粗骨材の最大寸法 (mm)	スラブの範囲 (cm)	空気量の範囲 (%)	水セメント比 W/C (X)	細骨材率 s/a (X)	単位量 ( $\text{kg/m}^3$ )			
						水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G
I	20	8±2	2.0	60	47	195	325	830	1062
II	20	8±2	2.0	50	47	195	300	805	1030

載荷試験は原則として材令28日において電子式万能材料試験機を使用し、変位制御方式により降伏点変位 $\delta y$ , 1.5 $\delta y$ , 2 $\delta y$ , 3 $\delta y$ ・・・においてそれぞれ10回<sup>(1)</sup>の一方方向繰返し載荷を行った。試験中はスパン中央及び両載荷点の支点との相対変位を変位計により計測し、鉄筋及びコンクリート各部のひずみを電気抵抗線式ひずみゲージにより測定した。

表-3に試験結果の一覧を、図-5, 7, 9に試験より得られた荷重変位曲線の一例を示す。なお図中における曲線は繰返し回数1回目における包絡線で示してある。

表-3 実験結果一覧表

配合	はりの種類	降伏モーメント $M_v(\text{tfm})$	降伏点変位 $\delta v(\text{mm})$	降伏時の曲率 $\phi v(1/\text{m})$	塑性エネルギー吸収能	
					$Q_{exp}$	$Q_{est}$
I	A-1	3.162	##7.20	-	1.43	1.24
	B-1	2.675	5.81	0.0436	5.14	5.07
	B-2	2.749	5.81	0.0284	6.05	5.66
	B-3	2.711	6.26	0.0342	1.87	2.02
	B-4	2.675	6.16	0.0404	1.05	1.24
	C-1	2.101	4.87	0.0196	8.46	7.98
	C-2	1.907	4.78	0.0329	8.38	8.55
	C-3	1.969	4.00	0.0240	7.14	7.91
	C-4	1.935	4.42	0.0240	8.12	7.70
	C-5	2.035	##4.41	-	7.37	7.67
	D-1	1.520	##4.01	-	9.39	8.70
	E-1	6.885	5.00	0.0143	8.63	8.80
	F-1	6.998	5.66	0.0179	8.04	8.44
II	B-2	3.014	6.00	0.0341	7.23	7.71
	B-4	2.820	5.60	0.0300	6.16	6.05
	C-2	2.030	4.10	-	9.08	8.80
	C-4	1.966	4.50	0.0486	8.26	8.27

注: \* ; スパン中央での変位, \*\* ; 載荷点での変位

### III 塑性エネルギー吸収能の定義

鉄筋コンクリート部材の靱性評価を行うためには、その評価尺度を定義しておく必要がある。従来靱性の評価尺度としては、終局変位 $\delta u$ を曲げ降伏点変位 $\delta y$ で除した靱性率  $\mu = \delta u / \delta y$  を使用した例が多い<sup>(3)</sup>。また履歴吸収エネルギーや累積吸収エネルギーなど荷重変位曲線において、その囲む面積でもって評価を行った例<sup>(4)</sup>もある。

ところで一般的に靱性とは部材や構造物が有する塑性変形能力と考えられ、部材や構造物の諸特性だけから一義的に定まるものではなく、作用する荷重の大きさや性質の影響を受けるものと考えられる。従って靱性の評価尺度としては靱性率のように一次元的な変形量のみで評価するものよりも、吸収エネルギーのように荷重~変位といった二次元的評価を行う方がより適切であると考えられる<sup>(5)</sup>。しかしながら履歴吸収エネルギーは部材や構造物の持つ変形性能の絶対的評価であり、他の部材や構造物との比較検討が行われにくい欠点がある<sup>(5)</sup>。また累積吸収エネルギーは変形の比較的小さい領域で多数回の繰返

し載荷を行えば当然増加する<sup>(6)</sup> ため靱性評価の尺度としては不適当と思われる。

そこで本研究においては、

- ①靱性をより適切に、二次元的に評価できること。
- ②実験より得られる荷重変位曲線を用いて簡単に求めることができること。
- ③他部材との比較検討が容易に行えること。

の3点を考慮して、図-2で定義される塑性エネルギー吸収能 $Q = W_p / W_E$ を靱性評価の尺度とした。ここで $W_E$ は部材の曲げ降伏点変位 $\delta_y$ までの荷重変位曲線(スパン中央での荷重変位曲線で、繰返し回数1回目における包絡線。以後同様)で囲まれる面積、 $W_p$ は部材の曲げ降伏点変位 $\delta_y$ より終局変位(限界変位) $\delta_u$ までの荷重変位曲線で囲まれる面積である。

部材の変形による仕事量は、部材が吸収するエネルギー量と等価であると見なせる。これは載荷点を通して部材に加えられた荷重と、載荷点における変位との積による外力の仕事量に等しい。従って、本来部材の吸収エネルギーを論ずる際には、載荷点における荷重変位曲線を使用すべきであるが、図-3に示すように、スパン中央における荷重変位曲線を用いて算出した塑性エネルギー吸収能と、載荷点における塑性エネルギー吸収能とは大差ないので、本研究においては簡単のためスパン中央の値を用いた。また吸収エネルギーの比を用いることにより、供試体寸法の影響をほとんど除去できたものと考えられる。

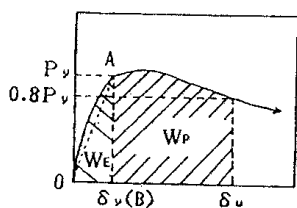


図-2 塑性エネルギー吸収能の定義

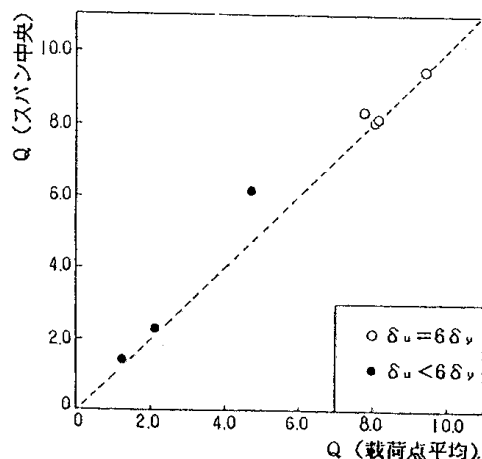


図-3 塑性エネルギー吸収能の測定位置における比較

この様に評価尺度として塑性エネルギー吸収能 $Q$ を定義する場合、部材の曲げ降伏点変位 $\delta_y$ 及び終局変位 $\delta_u$ を明確に定義しておく必要がある。部材の曲げ降伏点としては、一般的に荷重変位曲線上に現れる明瞭な折れ曲がり点と考えられている。本研究における実験の場合、全てのはりにおいてまず引張鉄筋が降伏し、続いて変形が大きくなるに従って圧縮側コンクリートが圧潰するという破壊状況を示したことを考慮して、本研究においても荷重変位曲線上の明瞭な折れ曲がり点を曲げ降伏点とし、それに対応する変位を部材の曲げ降伏点変位 $\delta_y$ とした。これはひずみゲージにより測定された引張鉄筋の降伏点ともよく一致した。

次に終局変位 $\delta_u$ についてみると、小柳ら<sup>(7)</sup>は、変位の増加につれて増大した引張鉄筋のひずみが減少に転ずる点を降伏終了点と呼び、降伏点と共に物理的に明確な意味を持つ点として靱性評価の基準点に用いている。しかし一般的には、荷重変位曲線上の下降域において、荷重が $0.8P_u$ あるいは $P_y$  ( $P_u$ :最大耐力,  $P_y$ :降伏荷重)に低下した時の変位を終局変位 $\delta_u$ としている例が多い<sup>(8)</sup>。この様に終局変位 $\delta_u$ の定義に関しては、研究者により分かれるところであるが、本研究における載荷試験の結果を見ると、比較的過多鉄筋を有するはりにおいては、降伏荷重 $P_y$ と最大耐力 $P_u$ とがほぼ等しいこと(例えば図-5のA-1, B-1)。一方降伏点以後耐力の増加を呈したはりも圧縮側カバーコンクリートの剥落により $P_y$ 以下に耐力が低下すること(例えば図-5のC-1, 図-9のB-2, B-3)を考慮して、終局変位としては、荷重が $0.8P_y$ に低下した時の変位とした。また変位が $6\delta_y$ に達するまでに荷重が $0.8P_y$ 以下に低下しなかったはり供試体は、それ以上の変位における載荷に対しても十分な耐力を維持したため $\delta_u = 6\delta_y$ とした。以上の定義に従い求めた各はりの塑性エネルギー吸収能 $Q_{exp}$ を表-3に示す。

なお本研究で定義した塑性エネルギー吸収能を用いて靱性を評価する場合、図-2に示す $W_E$ は全ての供試体について求めた結果  $\triangle OAB$ の面積の約1.28倍であったこと、更に $6\delta_y$ まで降伏荷重を維持した時 $W_p$ が $\triangle OAB$ の面積の10倍になることを考えると、大変形域においても十分なる靱性を有すと言うことは、概ね $Q \geq 8.0$ と考えられる。

#### IV 塑性エネルギー吸収能 $Q$ に及ぼす各要因の影響

##### 1 鉄筋比 $P$ の影響

図-4に鉄筋比 $P$ と塑性エネルギー吸収能 $Q$ との関係

を全供試体について示す。また図-5には一例として横拘束筋がD6-5cm,  $\phi 6$ -5cmピッチの供試体(配合 I,  $d=17$  cm)についての荷重変位曲線を示す。一般に鉄筋比  $P$  が増大し、過多鉄筋になるに従って靱性は低下するが、本実験結果も鉄筋比が大きくなると塑性エネルギー吸収能  $Q$  は低下した。しかしながら B, C シリーズを見るとわかるように、塑性エネルギー吸収能  $Q$  は鉄筋比  $P$  のみによって決まるものではなく、コンクリート強度や横拘束筋の特性によっても影響を受けるものと考えられる。

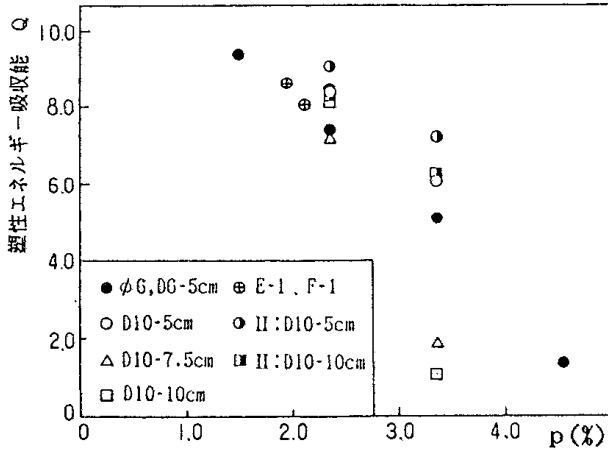


図-4 塑性エネルギー吸収能と鉄筋比との関係

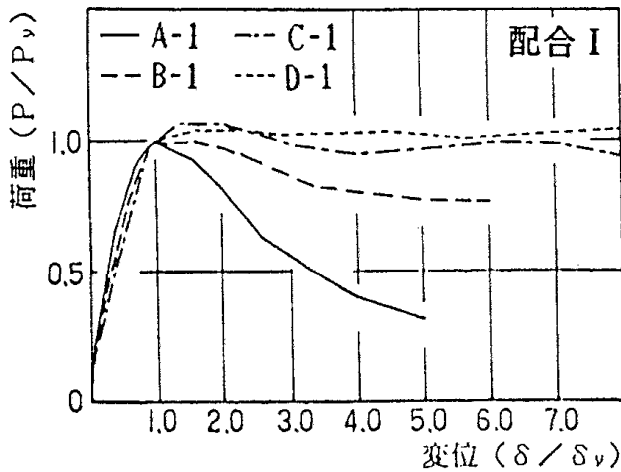


図-5 鉄筋比の影響

2 コンクリート強度  $\sigma_c$  の影響

図-6 に塑性エネルギー吸収能  $Q$  に及ぼすコンクリート強度の影響を見るために配合と  $Q$  との関係を示す。また図-7には配合別の荷重変位曲線を示す。図-6, 7よりわかるようにコンクリートの圧縮強度  $\sigma_c$  が大きくなると塑性エネルギー吸収能  $Q$  は大きくなった。特に B-4 においては著しく靱性が增大した。これは  $\sigma_c$  が増すことにより終局状態でのつり合鉄筋比  $P_0$  が増大し、実際の鉄筋比  $P$  が見かけ上小さくなる、即ち  $P/P_0$  が小さくなるためと考えられる。

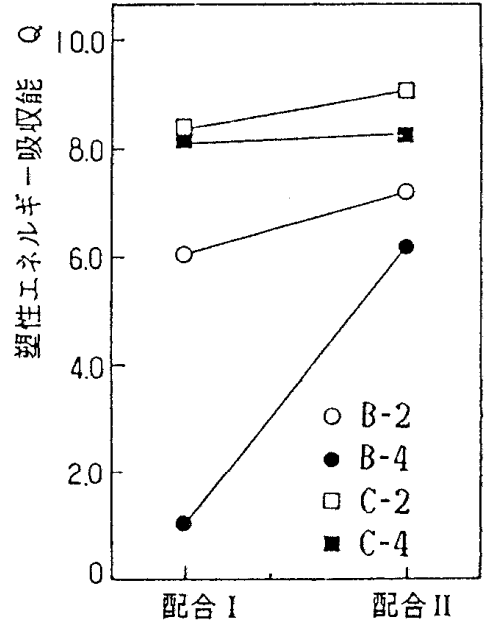


図-6 塑性エネルギー吸収能とコンクリート強度との関係

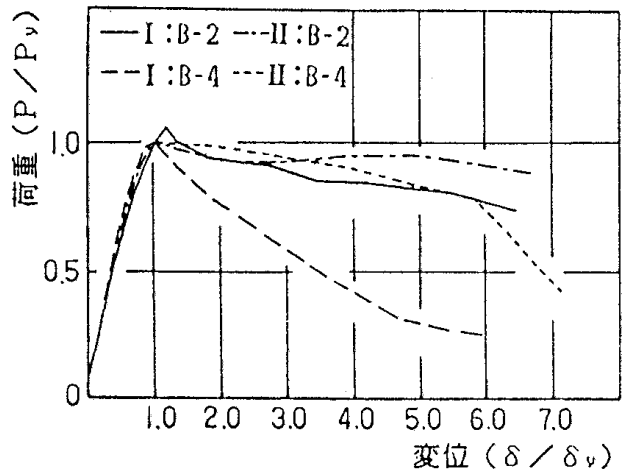


図-7 コンクリート強度の影響

3 横拘束筋間隔  $s$  の影響

図-8 に横拘束筋間隔  $s$  と塑性エネルギー吸収能  $Q$  との関係を示す。また図-9には一例として配合 I の B, C シリーズの荷重変位曲線を示す。これより B シリーズのように比較的過多鉄筋を有するはりにおいては、間隔  $s$  が大きくなると靱性が著しく低下することがわかる。これは変形が大きくなると、圧縮側コンクリートの破壊、脱落が横拘束筋の間で進行するためだと考えられる。しかしながら C シリーズのように比較的鉄筋比のはりでは本質的に靱性に優れているので  $s$  による影響はほとんどみられなかった。

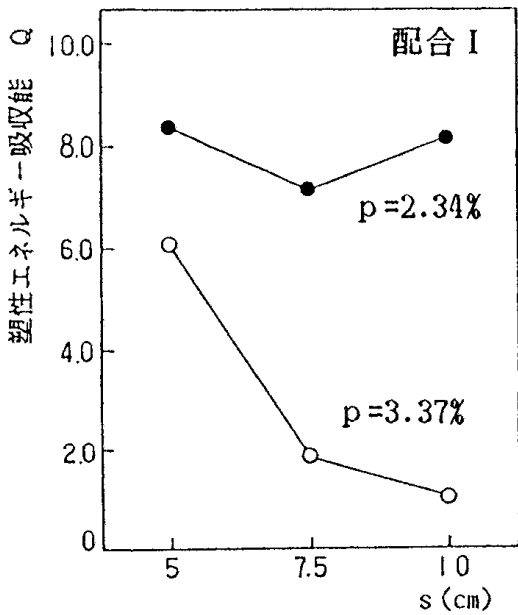


図-8 塑性エネルギー吸収能と横拘束筋間隔との関係

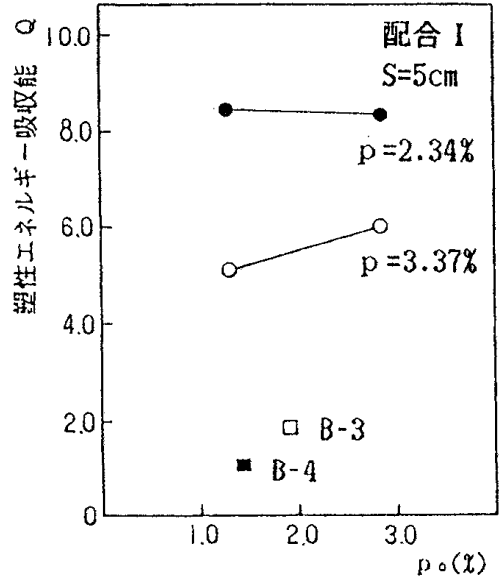


図-10 塑性エネルギー吸収能と横拘束筋量との関係

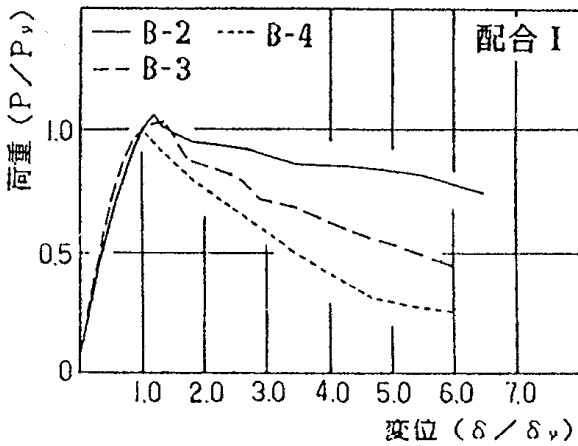


図-9 横拘束筋間隔の影響

#### 4 横拘束筋量 $p_c$ の影響

図-10に  $p_c = 2xA_{sc}/b \cdot s$  で定義される横拘束筋量  $p_c$  と塑性エネルギー吸収能  $Q$  との関係を  $s=5\text{cm}$  のものについて示す。ここで  $A_{sc}$  は横拘束筋の断面積、 $b$  ははり幅である。これを見ると比較的過多鉄筋を有するはり (Bシリーズ) においては  $p_c$  の増加に伴い  $Q$  は増大する傾向にあるものの明確な差は認められなかった。なお図-9にはB-3、B-4も併せて示したが、両はりの塑性エネルギー吸収能  $Q$  が小さいのは横拘束筋量  $p_c$  よりむしろ横拘束筋間隔  $s$  の影響と思われる。

#### 5 有効高さ $d$ の影響

図-11に有効高さ  $d=27\text{cm}$  のE、Fはりとは、これとほぼ同じ条件を有すると思われる  $d=17\text{cm}$  のはり (C-1、C-5、D-1) との塑性エネルギー吸収能  $Q$  の比較を示す。これを見る限り本実験の範囲では有効高さ  $d$  による影響はないようである。

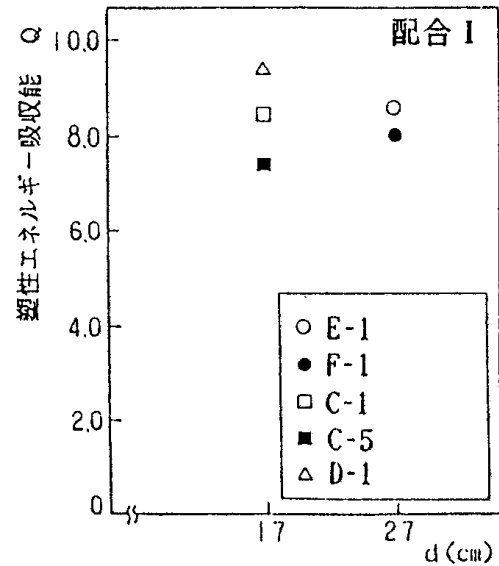


図-11 塑性エネルギー吸収能と有効高さとの関係

## V 結 論

本研究により次のような結論を得た。

- (1) 従来の靱性評価尺度である靱性率  $\mu$  に代わって、より適切であると考えられる二次元的評価を行うため、降

伏点変位 $\delta y$ と、 $\delta y$ から終局変位 $\delta u$ までの荷重変位曲線で囲まれる面積の比として塑性エネルギー吸収能 $Q$ の定義を行った。この場合本研究においては $\delta u$ としては耐力が $0.8P_y$ に低下した時点の変位とした。また塑性エネルギー吸収能により靱性を評価する場合、大変形域においても十分な靱性を有すと言うことは概ね $Q \geq 8.0$ と考えられる。

(2) 塑性エネルギー吸収能 $Q$ とこれに影響を及ぼすと考えられる各要因との関係について調べた結果、鉄筋比が大きくなるほど $Q$ は低下した。またコンクリート強度 $\sigma_c$ が高いほど $Q$ は大きくなったが、これは $\sigma_c$ の増大に伴い終局状態でのつり合鉄筋比が増大し、実際の鉄筋比が見かけ上小さくなるためと考えられる。更に鉄筋比の大きいはりにおいては、横拘束筋間隔 $s$ が広がるほど、横拘束筋量 $P_c$ が小さくなるほど塑性エネルギー吸収能は低下した。しかしながら本実験の範囲では有効高さ $d$ による影響はみられなかった。

今回の研究ではせん断スパン比 $a/d$ や繰返し回数の影響が考慮されていないこと、また評価尺度としての塑性エネルギー吸収能の定義においても一方向の繰返し載荷試験に基づいているため、地震荷重のような正負交番載荷を受ける部材に直接適用できるかどうかは疑問である。今後はこの分野についての実験や解析、検討が必要であると考えられる。

(注)

- (1) 鈴木計夫：コンクリート住宅への新しい試み（コンファインドコンクリートとPC工法の応用）、セメントコンクリート、NO.448, 1984年6月, P.36-47
- (2) 例えば、藤井学・阿河俊夫、他：過多鉄筋コンクリートばりの横拘束筋によるじん性改善、土木学会論文集, 第348号/V-1, 1984年8月, P.77-86
- (3) 例えば、町田篤彦・陸好宏史・豊田和彦：鉄筋コンクリート部材の塑性変形能定量化に関する研究、土木学会論文集, 第378号/V-6, 1987年2月, P.203-212
- (4) 例えば、井上晋・小林和夫、他：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, 1987年9月, P.232-233
- (5) コンクリート構造物の靱性とその評価法に関するコロキウム、日本コンクリート工学協会, 1988年3月, P. I-114-115

- (6) 藤掛一典・大野友則・西岡隆：鉄筋コンクリートラメンのエネルギー吸収容量に関する実験的研究、土木学会論文集, 第390号/V-8, 1988年2月, P.113-121
- (7) 小柳治・六郷恵哲・岩瀬裕之：RCはりの曲げ破壊過程と曲げじん性に及ぼす材料特性の影響、土木学会論文集, 第348号/V-1, 1984年8月, P.153-162