

## 論文 完全弾塑性体の消散エネルギーに基づいた RC 部材の靱性評価

宮内 克之\*<sup>1</sup>

要旨：RCはりに対し、鉄筋比、コンクリート強度、せん断補強筋量、せん断スパン比を要因とした正負交番繰返し試験を行った。理想的な完全弾塑性体の繰返し载荷による消散エネルギーに基づいて、RCはりの消散エネルギーを標準化した。その結果、標準化された消散エネルギーは繰返し変位および繰返し回数に対してほぼ線形な関係があることが明らかとなった。さらに標準化された消散エネルギーに基づいた靱性の算定式を提案した。

キーワード：靱性、靱性評価、消散エネルギー、正負交番载荷、RCはり

## 1. はじめに

RC構造物の耐震設計においては、その構造物の塑性変形性能が的確に評価される必要がある。また地震動により被災したRC構造物の補修・補強等を考えた場合、変形性能の面からの損傷度の的確な把握も極めて重要と考えられる。そこで本研究においては、地震動のような正負交番繰返し荷重を受け、せん断破壊が卓越する部材および構造物を想定し、正負交番繰返し荷重を受け、最終的にせん断破壊するRCはりを対象として、鉄筋比、コンクリート強度、せん断補強筋量、せん断スパン比を要因とした実験を行い、非線形有限要素解析により求めた、理想的な完全弾塑性体の繰返し载荷による消散エネルギーに基づいて、RCはりの消散エネルギーを標準化した。さらに標準化された消散エネルギーに基づいた靱性の算定式を提案した。

## 2. 正負交番繰返し载荷試験

## 2. 1 実験概要

## (1) 使用材料および実験条件

実験に用いたはりの形状寸法を図-1に示す。供試はりはいずれも幅 $b=10$  cm、高さ $h=20$  cm、有効高さ $d=17$  cmの矩形断面を有し、全長160, 128 cmの複鉄筋単純はりである。各はりの条件を表-1に示す。本研究で採り上げた要因は、鉄筋比 $\rho$ 、コンクリート強度 $f_c$ 、せん断補強筋量 $\rho_w$ およびせん断スパン比 $a/d$ である。主鉄筋にはSD30(D13: $f_{sy}=3730\text{kgf/cm}^2$ , D16: $f_{sy}=3240\text{kgf/cm}^2$ , D19: $f_{sy}=3360\text{kgf/cm}^2$ )を、

せん断補強用の閉合スターラップにはD6( $f_{sy}=3370\text{kgf/cm}^2$ )を使用し、補強筋量は $\rho_w=0.51\sim 1.81\%$  (間隔は $s=3.5\sim 12.5\text{cm}$ )の範囲とした。なお本研究においては、曲げ降伏後最終的にせん断破壊するRCはりを対象としており、計算上は終局せん断耐力が終局曲げ耐力より大きくなる(一部を除く)ようにせん断補強が施されている。また曲げスパンに配置された横拘束筋にはD6の角形スパイラル筋

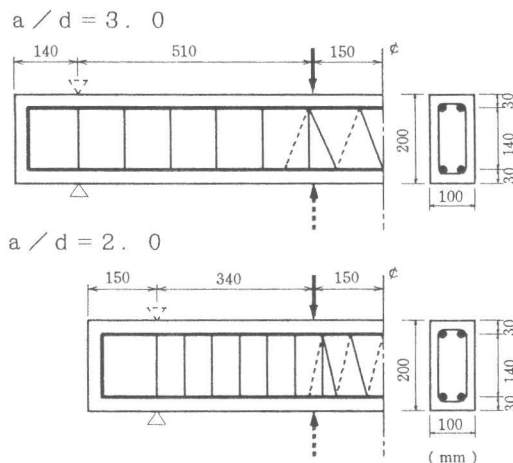


図-1 はりの形状寸法 (単位: mm)

\* 1 岡山職業能力開発短期大学校講師 工修 (正会員)

を用い、間隔はせん断補強筋と同一とした。コンクリートは、材令28日における目標強度が250, 350 kgf/cm<sup>2</sup>の2種類のものを使用した。

(2) 実験方法

載荷試験は原則として材令28日において実施し、一端正方向載荷ではりを降伏させ、そのときのスパン中央の変位 $\delta_y$ を基準にして、 $\delta_y$ ,  $2\delta_y$ ,  $3\delta_y$ ...と破壊もしくは変形が著しくて載荷不能となるまでそれぞれ5回(一部1, 10回)の正負交番繰返し載荷とした。試験中は、スパン中央および載荷点における変位と、せん断スパンにおける正負鉄筋位置間でのせん断変形量を測定した。また主鉄筋およびせん断変形測定位置でのスターラップ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-1 実験条件および実験結果一覧表

供試体 記号	鉄筋指数 $\rho \cdot f_{sy} / f_c$	コンクリ ート強度 $f_c$ (kg/cm <sup>2</sup> )	せん断 補強筋量 $\rho_w^{*1}$ (%)	降伏変位 $\delta_y$ (mm)	終局曲げ耐力 <sup>*2</sup> $P_u$ (tonf)		終局せん 断耐力 <sup>*2</sup> 計算値 $V_d$	標準化された 消散エネルギー		靱性率	
					実験値	計算値		①	②	実験値 $\mu_{exp}$	計算値 $\mu_{cal}$
I B100-3	0.275	276	0.63	3.88	8.66	7.48	8.54	0.866	0.738	2.83	-
I B75-3	0.304	249	0.84	4.25	9.22	7.44	10.26	0.770	0.556	2.89	3.16
I B60-3	0.304	249	1.06	3.88	9.33	7.44	12.09	0.848	0.593	2.97	3.40
I C50-3	0.192	289	1.27	3.34	6.52	5.61	13.63	0.663	0.579	5.51	5.62
II A75-3	0.375	302	0.84	4.70	13.34	11.02	10.86	-	-	-	-
II A50-3	0.310	365	1.27	3.58	11.08	11.12	14.75	0.690	0.476	4.19	3.68
II A40-3	0.252	450	1.58	4.38	12.60	11.25	17.77	0.757	-	4.29	6.15
II B100-3	0.208	365	0.63	4.18	8.70	7.61	8.83	0.887	0.659	2.87	3.57
II B75-3	0.233	325	0.84	3.73	8.84	7.55	10.54	0.621	0.494	4.22	3.67
II B65-3	0.198	383	0.97	3.63	9.30	7.63	11.84	0.596	0.378	5.19	4.31
II B50-3	0.212	358	1.27	3.58	8.75	7.60	14.30	0.618	-	5.59	5.14
N=1	0.212	358	1.27	3.88	9.26	7.60	14.30	0.610	-	8.50	7.74
N=10	0.190	398	1.27	3.16	8.16	7.64	14.41	0.824	-	4.09	4.29
II C125-3	0.165	336	0.51	3.50	6.40	5.68	7.19	0.767	0.553	3.64	3.72
II C100-3	0.140	397	0.63	3.40	6.27	5.76	8.45	0.576	0.507	5.53	4.17
II C75-3	0.165	336	0.84	3.25	6.14	5.68	10.12	0.663	0.518	5.23	4.38
II B50-2	0.185	410	1.27	3.67	13.92	11.51	14.45	0.964	0.553	2.62	2.53
II B40-2	0.196	386	1.58	2.63	14.32	11.46	17.12	0.855	0.515	2.97	3.50
II B35-2	0.196	386	1.81	2.73	14.46	11.46	19.08	0.542	0.340	4.07	-
II C75-2	0.184	302	0.84	2.63	10.50	8.45	10.02	0.680	0.408	3.71	3.07
II C60-2	0.158	352	1.06	2.38	9.98	8.55	11.99	0.553	0.383	5.39	4.06
II C50-2	0.158	352	1.27	2.13	9.84	8.55	13.82	0.575	0.431	5.27	3.90

・ 供試体の記号

I B 50 - 3



せん断スパン比( 2 :a/d=2.0 , 3 :a/d=3.0 )

スターラップ間隔(mm)

鉄筋比( A :3.37%, 2D19 B :2.34%, 2D16 C :1.49%, 2D13 )

コンクリートの目標強度( I :250kgf/cm<sup>2</sup>, II :350kgf/cm<sup>2</sup> )

- ・ \* 1 : せん断スパン中央における一組のスターラップにより計算される値
- ・ \* 2 : 計算値は、土木学会コンクリート標準示方書(平成三年度版)設計編による。
- ・ ① : 終局時変位( $\delta_u$ )の繰返し回数1回目における標準化された消散エネルギー
- ・ ② : 変位 $\delta_u + \delta_y$ での繰返し回数1回目における標準化された消散エネルギー

## 2. 2 実験結果および考察

実験結果を表-1に示す。供試体は一方向載荷においては曲げ破壊が先行すると思われるりも含め、すべてのはり引張鉄筋が降伏した後、せん断ひびわれが進展し破壊に至った。このような破壊形式を本研究ではせん断破壊と呼ぶ。a/d=2.0のりでは、初期段階から明瞭なせん断ひびわれが発生し、正反びわれの交差部を中心に腹部コンクリートが崩壊するという完全なせん断破壊を示した。また靱性も著しく小さかった（例えばII B50-2）。a/d=3.0の場合、鉄筋比p=1.49%のり（IC及びII Cのり）やせん断補強筋量が多いりについては、 $3\delta_y$ 程度まではせん断ひびわれの発展がみられず靱性に富んだものであったが（例えばIC50-3）、鉄筋比の比較的大きいもの（例えばIB60-3）、およびせん断補強筋量が少ないり（例えばII B75-3）については、 $2\sim 3\delta_y$ 辺りから急激にせん断ひびわれの増加を示し、せん断破壊を生じた。また急激なせん断ひびわれの増加を示した時点は、スターラップの降伏が確認された時点とよく一致していた。表-1における靱性率 $\mu$ の値は、終局時変位を引張鉄筋降伏時の変位で除したものである。終局時変位としては、所定の繰返し回数において耐力が降伏荷重を下回らなかった最大変位とした。

## 3. 消散エネルギーの定量化

### 3. 1 各履歴ループにおける消散エネルギーの標準化

部材が消散したエネルギーは、各供試体の荷重変位曲線における履歴ループの面積で表されるが、構造特性、断面特性および材料特性等が異なれば消散エネルギーも異なる。したがって何らかの方法により消散エネルギーを標準化する必要がある。ここでは図-2に示す応力ひずみ関係を有す理想的な完全弾塑性体（ $f_{sy}=3000 \text{ kgf/cm}^2$ ,  $E=2.0 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$ ,  $\nu=0.3$ ）の履歴ループを基準として各供試体の履歴ループの面積を標準化した。このように理想的な完全弾塑性体の消散エネルギーに基づいて標準化することにより、後述のように消散エネルギーが変位および繰返し回数に対して線形となり、靱性評価あるいは損傷度評価において効果的であると思われる。

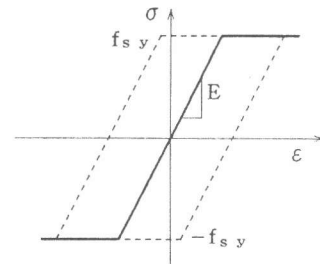


図-2 応力ひずみ関係

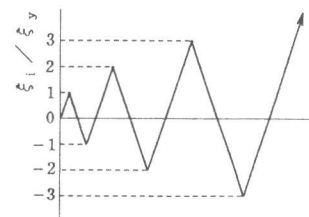


図-3 荷重履歴（解析用）

### (1) 理想的な完全弾塑性体の消散エネルギーと変位との関係

理想的な完全弾塑性体の標準化された消散エネルギーと変位との関係を、図-4に示す解析結果に基づいて次式により近似した。

$$W_i = \alpha_w \cdot \log(\xi_i / \xi_y) + \beta_w \quad (1)$$

ここに、 $W_i$  : 理想的な完全弾塑性体の標準化された  
消散エネルギー

$$W_i = W_i' / (\Phi_i \cdot \xi_i)$$

$W_i'$  : 理想的な完全弾塑性体の消散エネルギー

$\Phi_i$  : 変位  $\xi_i$  における荷重

$\xi_i$  : 理想的な完全弾塑性体の変位

$\xi_y$  : 理想的な完全弾塑性体の降伏変位

$\alpha_w$  : 係数  $a/d = 3$  のとき、 $\alpha_w = 1.69$

$a/d = 2$  のとき、 $\alpha_w = 1.68$

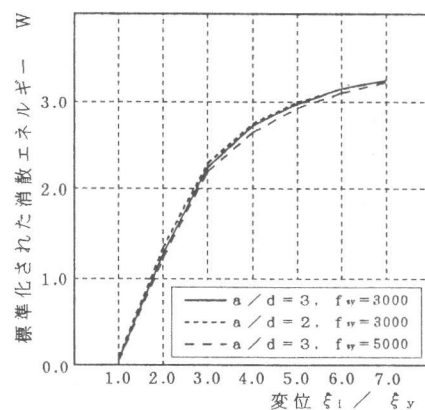


図-4 標準化された消散エネルギーと変位との関係（完全弾塑性体）

$\beta_w$  : 係数  $a/d=3$  のとき、 $\beta_w=0.187$   
 $a/d=2$  のとき、 $\beta_w=0.235$

ここで、 $W_i'$ 、 $\xi_i$ 、 $\Phi_i$  の計算にあたっては、RC はり供試体と同一の断面寸法、同一形状寸法を有する理想的な完全弾塑性体の単純はりにおいて、RC はり供試体における鉄筋位置と同一の位置が降伏する変位  $\delta_y$  を基準とし、図-3 に示す荷重履歴により得られる、変位  $\xi_i$  (荷重  $\Phi_i$ ) における履歴ループの面積を理想的な完全弾塑性体の消散エネルギー  $W_i'$  とした。また計算には汎用有限要素解析ソフトを使用し、8 節点平面応力要素を用いた非線形解析とした。なお、図-4 に一例を示すように、解析に当たっての要素分割の仕方、降伏点強度の違いが標準化された消散エネルギーに及ぼす影響は極めて小さかった。

(2) RC はり供試体の消散エネルギーの標準化

各供試体の標準化された消散エネルギー  $Q_i$  を次式により求めた。

$$Q_i = (Q_i' / (P_y \cdot \delta_i)) / W_i \quad (2)$$

ここに、 $Q_i'$  : 変位  $\delta_i$  における履歴ループの消散エネルギー

$P_y$  : RC はりの降伏荷重

$\delta_i$  : 実験における繰返し荷重変位

$W_i$  : 式(1)より求まる消散エネルギー

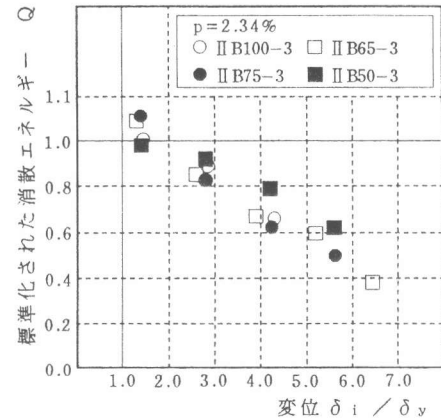


図-5 標準化された消散エネルギーと変位との関係 (RC はり)

4. 靱性率算定式の提案

4. 1 標準化された消散エネルギーと変位との関係の定式化

(1) 標準化された消散エネルギーと変位との関係

図-5 は、繰返し荷重回数5回の試験における1サイクル目の標準化された消散エネルギー  $Q_i$  と変位  $\delta_i / \delta_y$  との関係の一例を示したものである。これより標準化された消散エネルギーと変位との間には直線関係が認められる。従って次式の関係があるものと仮定する。

$$Q_i = k_N \cdot \alpha \cdot (\delta_i / \delta_y) + \beta \quad (3)$$

ここで  $k_N$  は繰返し回数の影響を表す係数で、後述の式(6)により表される。

(2) 係数  $\alpha$ 、 $\beta$  の定式化

$a/d=3.0$  の各供試体について式(3)を適用し、最小自乗法により係数  $\alpha$ 、 $\beta$  を求めた。図-6 は、係数  $\alpha$  とせん断補強筋量  $p_w$  および鉄筋指数  $p \cdot f_{sy} / f_c$  (以後  $q_s$  で表す) との関係を示したものであるが、他の条件が等しい場合、両者の間にはほぼ直線関係があるものと思われる。したがって係数  $\alpha$  と鉄筋指数  $q_s$  およびせん断補強筋量  $p_w$  との関係を次式により定式化した。なお各係数の算定にあたっては最小自乗法を適用し、 $\delta_y$  の繰返してせん断破壊に至った II A75-3 および横座屈を呈した I B100-3 を除く  $a/d=3.0$  の12体の供試体を用いて行った。

$$\alpha = \eta_\alpha \cdot (-0.377 \cdot q_s + 0.124 \cdot p_w - 0.157) \quad (4)$$

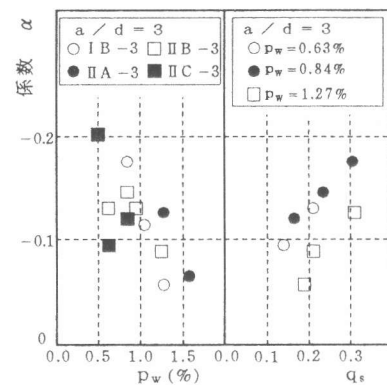


図-6  $\alpha \sim p_w$ 、 $\alpha \sim q_s$  関係

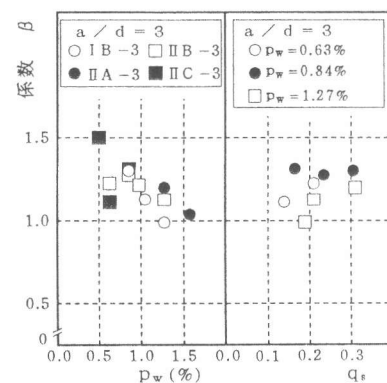


図-7  $\beta \sim p_w$ 、 $\beta \sim q_s$  関係

$\eta_a$  : a/dの影響を表す係数で式(10)で表される

同様に係数 $\beta$ と鉄筋指数 $q_s$ およびせん断補強筋量 $p_w$ との関係に関してほぼ直線関係が認められた(図-7)ので、係数 $\alpha$ と同様の手法により次式で定式化した。

$$\beta = \eta_{\beta} \cdot (0.562 \cdot q_s - 0.358 \cdot p_w + 1.43) \quad (5)$$

$\eta_{\beta}$  : a/dの影響を表す係数で式(11)で表される

#### 4. 2 繰返し回数による影響の定式化

供試体II B50-3において試験実施時の同一変位での繰返し回数 $N$ (以後、繰返し回数と呼ぶ)を1, 5, 10回としたときの係数 $\alpha$ ,  $\beta$ を求め、繰返し回数との関係を図示したものが図-8である。これより、係数 $\alpha$ は繰返し回数の影響を受けるが、係数 $\beta$ に関しては繰返し回数の影響を受けないことがわかる。そこで繰返し回数5回のを基準として次式により定式化した。

$$k_N = 1.09^{N-5} \quad (6)$$

#### 4. 3 同一変位内での繰返しによる低下率 $k_n$ の定式化

同一変位内での繰返しにより2回目以降消散エネルギーは低下する。この様子の一例を図-9に示す。図-9は、同一変位内での繰返し回数1回目の標準化された消散エネルギーに対する、繰返し回数 $n$ 回目の標準化された消散エネルギーの比 $k_n$ 、と同一変位内での繰返し回数 $n$ の関係の一例を示したものである。これより両者の間にもほぼ直線関係が認められる。従って、次式の関係があるものと仮定する。

$$k_n = \alpha_n \cdot (n - 1) + \beta_n \quad (7)$$

各供試体について式(7)を適用し、最小自乗法により係数 $\alpha_n$ ,  $\beta_n$ を求めた。その結果、係数 $\alpha_n$ と鉄筋指数 $q_s$ との関係および係数 $\alpha_n$ とせん断補強筋量 $p_w$ との関係に関してほぼ直線関係が認められた(図-10)ので、係数 $\alpha_n$ と鉄筋指数 $q_s$ およびせん断補強筋量 $p_w$ との関係を次式により定式化した。

$$\alpha_n = \eta_{\alpha n} \cdot (-0.458 \cdot q_s + 0.0466 \cdot p_w - 0.0261) \quad (8)$$

$\eta_{\alpha n}$  : a/dの影響を表す係数で式(12)で表される

また係数 $\beta_n$ に関しては鉄筋指数 $q_s$ およびせん断補強筋量 $p_w$ によらずほぼ一定値1.0であった(図-11)ので、

$$\beta_n = \eta_{\beta n} \cdot 1.0 \quad (\text{at } n = 1) \quad (9)$$

$\eta_{\beta n}$  : a/dの影響を表す係数で式(13)で表される

とした。

#### 4. 4 a/dの影響の定式化

a/dの影響については、a/d=3.0における各係数を補正する形で定式化した。すなわち各補正係数は、a/d=2.0の各供試体について式(3)を適用し、最小自乗法により係数 $\alpha$ ,  $\beta$ を求め、それぞれの比に対して、以下に示す係数を求めた。なお各係数の算定にあ

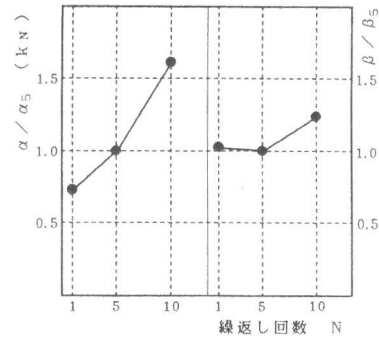


図-8 繰返し回数の影響

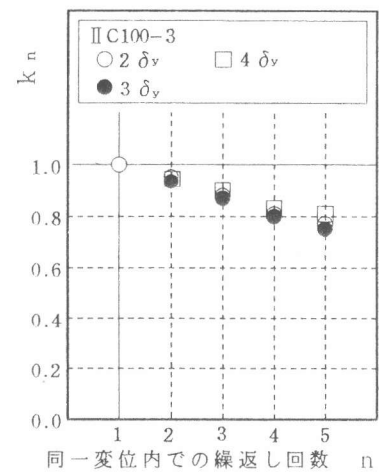


図-9  $k_n \sim n$ 関係

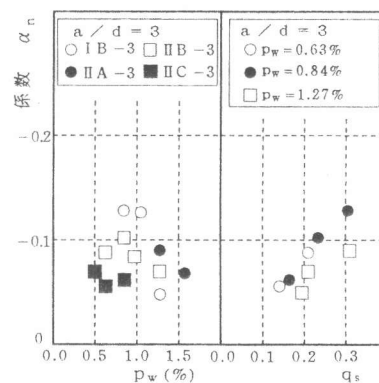


図-10  $\alpha_n \sim p_w$ ,  $\alpha_n \sim q_s$ 関係

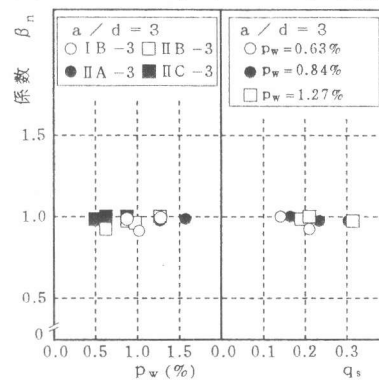


図-11  $\beta_n \sim p_w$ ,  $\beta_n \sim q_s$ 関係

っては、 $a/d=2.0$ の6体の供試体を用いて行った。また部材の靱性はせん断スパン比の減少に伴って、低下の割合は大きくなるものと考えられるが、ここでは直線関係を仮定した。

(1) 係数 $\alpha$ に対する補正係数 :  $\eta_{\alpha} = k_{\alpha} + (1 - k_{\alpha})(a/d - 2)$  (10)

$$k_{\alpha} = 0.542 \cdot q_s + 3.22 \cdot p_w - 1.03 \quad (1.8 \leq k_{\alpha} \leq 5.5)$$

(2) 係数 $\beta$ に対する補正係数 :  $\eta_{\beta} = k_{\beta} + (1 - k_{\beta})(a/d - 2)$  (11)

$$k_{\beta} = 8.18 \cdot q_s - 0.0624 \cdot p_w - 0.0124$$

(3) 係数 $\alpha_n$ に対する補正係数 :  $\eta_{\alpha_n} = k_{\alpha_n} + (1 - k_{\alpha_n})(a/d - 2)$  (12)

$$k_{\alpha_n} = 11.8 \cdot q_s + 3.00 \cdot p_w - 3.46 \quad (k_{\alpha_n} < 2.0 \text{ かつ } a/d \leq 2 \text{ のとき, } k_{\alpha_n} = 2.0)$$

(4) 係数 $\beta_n$ に対する補正係数 :  $\eta_{\beta_n} = k_{\beta_n} + (1 - k_{\beta_n})(a/d - 2)$  (13)

$$k_{\beta_n} = 0.940$$

#### 4. 5 変位靱性率の推定

本研究においては、終局時変位として所定の繰返し回数において耐力が降伏荷重を下回らなかった最大変位としている。また耐力が降伏荷重まで低下する変位は、終局時変位より $\delta_y$ 先の変位と思われる。従って終局状態における標準化された消散エネルギーは表-1の①、②の値の間にあるものと考えられる。そこで①、②の値の平均値0.61を考慮して、終局状態として $Q_0=0.60$ を仮定し、各供試体の条件により変位靱性率 $\mu$ を算定した。変位靱性率の算定は次の手順により行った。(結果を表-1に示す)

①終局状態として $Q_0=0.60$ を仮定

②式(3), (4), (5), (6)より $Q_0=0.60$ に相当する靱性率 $\mu'$  ( $=\delta_i/\delta_y$ )を計算

③ $\mu'$ より小さい変位においても繰返しにより $Q_0$ 以下に低下することが考えられるので、式(3)により $\mu'$ より $\delta_y$ だけ小さい変位 $\mu''$  ( $=\mu' - 1 = (\delta_i - \delta_y)/\delta_y$ )に対応した $Q_{i-1}$ を計算

④式(7), (8), (9)により同一変位内での繰返しによる低下率 $k_n$ を計算

⑤ $\mu$ の決定  $\mu = \mu'$  :  $Q_{i-1} \cdot k_n > Q_0$  :  $\mu''$ における繰返しにより $Q_0$ 以下に低下しない場合  
 $\mu = \mu''$  :  $Q_{i-1} \cdot k_n \leq Q_0$  :  $\mu''$ における繰返しにより $Q_0$ 以下に低下する場合

図-12に提案した手法による靱性率と、実験から得られた靱性率との比較を示す。靱性率が大きい範囲では若干ばらつきが大きくなるものの、両者はよく一致した。図中には、山田ら[1]の結果(繰返し回数:  $N=3$ )も合わせて示す。

#### 5. まとめ

理想的な完全弾塑性体の繰返し载荷による消散エネルギーに基づいて、RCはりの消散エネルギーを標準化し、消散エネルギーに基づいた変位靱性率の算定式を提案した。その結果、次のことが明らかとなった。

- (1) 標準化された消散エネルギーは繰返し変位および繰返し回数に対してほぼ線形な関係がある。
- (2) 標準化された消散エネルギーは同一変位における繰返しに対してもほぼ線形な関係がある。
- (3) 変位靱性率の算定式を既往の研究結果を用いて検証した結果、比較的精度よく推定される。

【参考文献】[1]山田昌昭・小林和夫・井上晋・九本博文：正負交番荷重を受けるRCはりのせん断補強効果に関する2・3の考察，土木学会第43回年次学術講演会講演概要集V，pp.626-627，1988.10

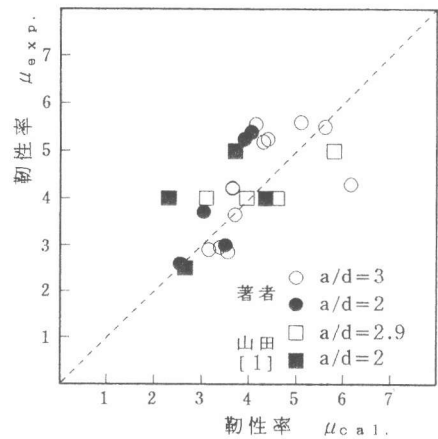


図-12 実験結果と算定値との関係