

# [87] 鉄筋コンクリートはり部材の破壊過程とじん性評価

正会員 小柳 洽 (岐阜大学工学部)  
 正会員 六郷 恵 哲 (岐阜大学工学部)  
 正会員 〇岩 瀬 裕 之 (岐阜大学大学院)  
 山内 茂 (岐阜大学工学部)

## 1. まえがき

じん性は、単に強度だけでは評価しえない性質であり、材料レベルではねばり強さという概念でとらえられており、一般に材料が破壊を生じる際のエネルギー吸収能によって表わされている。

構造物や構造部材の力学的特性を表わす上では、単に強度ばかりでなく変形状も加えた評価が必要である。とくに耐震設計の分野では構造物の持つねばり強さが問題となり、これを評価するためのパラメタとしてじん性率がよく用いられている。じん性率は、構造物(あるいは部材や断面)の塑性変形能を表わす指標として、塑性変形の弾性変形に対する比によって表示されている。

本研究においては、鉄筋コンクリート(RC)はりのじん性(エネルギー吸収能)とその構成材料であるコンクリートおよび鉄筋のじん性との関係を明らかにするとともに、RCはりのじん性の評価方法を確立することを目的としている。

曲げを受けるRCはりについて考える。一定の変位に至る間のRCはりの吸収エネルギー $W_a$ は、RCはり内に蓄えられる回復性の弾性ひずみエネルギー $W_r$ と鉄筋の塑性変形やコンクリートの破壊に消費される非回復性の消散エネルギー $W_{it}$ とからなる。本研究では主として消散エネルギー $W_{it}$ を対象とし、RCはりの曲げ破壊の過程における消散エネルギーに果す鉄筋とコンクリートの役割を明らかにするため、3種類のコンクリートと3種類の鉄筋比を組み合わせた9種類の単鉄筋長方形はりについて載荷実験を行ない、荷重変位曲線ならびに消散エネルギーについての実験結果と計算結果との比較検討を行なった。

## 2. 実験ならびに計算方法

**供試体**：対象としたRCはり供試体の寸法は $10 \times 18 \times 170$  cmである。鉄筋の降伏とコンクリートの圧壊との関係を変化させる目的から鉄筋比は0.9%・2.6%・6.9%の3種類とし、それぞれD10 ( $\sigma_{sy} = 3780 \text{ kg/cm}^2$ )・D16 ( $\sigma_{sy} = 3930 \text{ kg/cm}^2$ )・D25 ( $\sigma_{sy}$ は測定せず)をおおの2本ずつ配置した。コンクリートには普通コンクリート ( $\sigma_c = 393 \text{ kg/cm}^2$ ・以下Nと略)・軽量コンクリート ( $\sigma_c = 395 \text{ kg/cm}^2$ ・以下L)・ファイバーコンクリート ( $\sigma_c = 489 \text{ kg/cm}^2$ ・以下F)の3種類を用いた。以上を組み合わせる9種類のRCはり供試体に対して検討を行なった。これらの供試体種別の名称はコンクリート種別と鉄筋径により表1に示すものとした。

**実験方法**：試験は、スパン125 cm (モーメントスパン25 cm・せん断スパン50 cm)の対称2点曲げとして、ある変位または荷重まで載荷を行ない除荷する過程を繰り返す漸増繰り返し載荷を行な

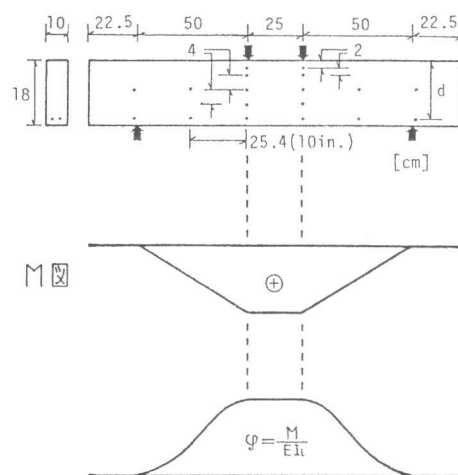


図1 はり供試体の寸法とモーメント図

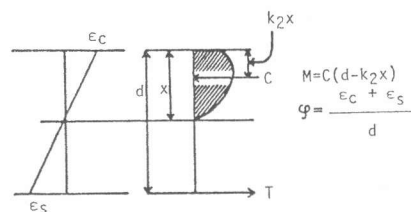


図2 ひずみ分布と力のつり合い

った。図1に示すように25.4cm間隔でコンクリート側面に標点プラグを貼り付け、各プラグ間の変形量を計測しモーメントスパン内での中立軸の位置・曲率分布および主鉄筋位置での変形量を求めた。エネルギーの定量化にあたっては、荷重変位曲線によって囲まれる面積をはり全体で消散したエネルギーの総和 $W_{it}$ として求めた。主鉄筋で消散したエネルギー $W_{is}$ は鉄筋の降伏によるものであるから、鉄筋位置におけるプラグ間の残留変形量と鉄筋の降伏荷重との積として求めた。

コンクリートで消散したエネルギー $W_{ic}$ は $W_{it}$ と $W_{is}$ との差として求めた。

**計算方法**：コンクリートの応力ひずみ曲線は、円柱供試体(φ10×20cm)の荷重試験により検長18cmの変位計を用いて実測によって求めた。その結果は図3に示すように下降部を含むものである。なお、応力ひずみ曲線の形状のみを比較するため、Fの圧縮強度を395/489倍してNおよびLと同等の圧縮強度レベルまで下げたもの(以下FMと略)も用いた。鉄筋の応力ひずみ曲線は図4-(b)とし、ひずみ硬化を無視した。

ひずみの平面保持の仮定と力の釣り合いから中立軸お

よび断面の曲げモーメント-曲率関係を求めた。次に各荷重段階での曲げモーメントを弾性計算によって求め、各モーメントに対応する曲率から弾性荷重法によって荷重点直下の変位を算定し、荷重変位曲線を作成した(図1参照)。はり全体で消散するエネルギー $W_{it}$ あるいは主鉄筋で消散するエネルギー $W_{is}$ ならびにコンクリートで消散するエネルギー $W_{ic}$ は図4-(a),(b),(c)に示すように、それぞれはりの荷重変位曲線あるいは鉄筋およびコンクリートの応力ひずみ曲線下の面積より求めた吸収エネルギーから、曲線の初期勾配と荷重あるいは応力より求めた弾性ひずみエネルギーを減じた値とした。

### 3. 結果と考察

**荷重変位曲線**：普通コンクリートを用いたはりの荷重変位曲線を図5に示す。実験値と計算値とを比較すると、はりの降伏点(鉄筋がD25のはりの場合は最大耐力点)までは両曲線はよく一致している。

実験ではコンクリートの圧壊による圧縮断面の欠落が進行するにつれて耐力が急激に低下するが、計算上で耐力が急激に低下する時点は変位の進行につれて鉄筋ひずみが増加から減少に転ずる時点である。以下この鉄筋ひずみが増加から減少に転ずる点をR点と呼ぶ。R点を図中の計算による荷重変位曲線上に示す。R点が現われる際のコンクリート圧縮縁ひずみ $\epsilon_{cr}$ はコンクリートの種類あるいは鉄筋比によって異なり、F・FM・N・Lの順に小さくなりまた鉄筋比が

表1 供試体種別と耐力

Series	Type of Concrete	Width b, cm	Effective Depth d, cm	Steel Ratio p, %	Maximum Load		
					Test		Calc.
					1	2	
					$P_t$ , ton	$P_c$ , ton	
N-10	Plain	10	15.5	0.92	4.0	4.0	3.2
N-16	Plain	10	15.2	2.61	9.1	9.3	8.1
N-25	Plain	10	14.7	6.88	16.0	15.1	12.6
L-10	Light W.	10	15.5	0.92	3.7	3.9	3.2
L-16	Light W.	10	15.2	2.61	8.3	8.8	8.1
L-25	Light W.	10	14.7	6.88	11.8	12.4	12.0
F-10	Fiber	10	15.5	0.92	4.2	4.1	3.2
F-16	Fiber	10	15.2	2.61	9.7	10.1	8.4
F-25	Fiber	10	14.7	6.88	16.4	16.8	17.0

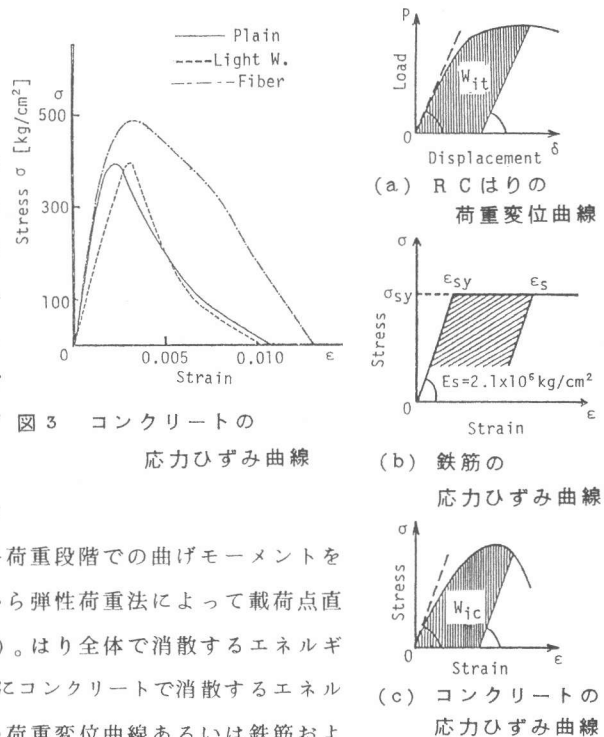


図4 消散エネルギー

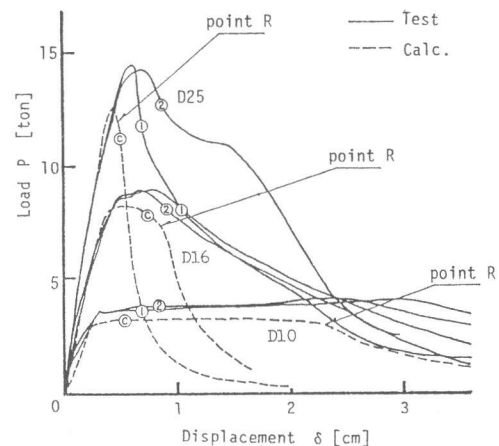


図5 荷重変位曲線 (普通コンクリートを用いたはり)

高くなるにつれて小さくなる。

消散エネルギー：〔実験値〕L-16を例にとって、はり全体の消散エネルギー $W_{it}$ 、鉄筋の消散エネルギー $W_{is}$ 、コンクリートの消散エネルギー $W_{ic}$ の実験値および計算値を図6に示す。 $W_{is}$ は降伏点以後急増するが、変位がある値以上になるとほとんど増加しなくなる。 $W_{it}$ および $W_{ic}$ の実験値が計算値より大きい理由としては、荷重変位曲線のヒステリシスループの違いや鉄筋とコンクリートとの間の付着破壊およびせん断による斜めひびわれの影響などが考えられる。

〔計算値〕コンクリートの応力ひずみ曲線から算定したコンクリートで消散するエネルギー $W_{ic}$ と鉄筋の応力ひずみ曲線から算定した鉄筋で消散するエネルギー $W_{is}$ （鉄筋が降伏しない場合は0）とを加えたものと、荷重変位曲線から算定したRCはり全体で消散するエネルギー $W_{it}$ とは各はりでよく合致し、鉄筋が降伏するはりの場合にはR点においてその差は3%以内である。

鉄筋が降伏するまでは $W_{is}$ は0であり、また、はり全体のエネルギー消散 $W_{it}$ （=コンクリートの消散エネルギー $W_{ic}$ ）もほとんど増加しない。降伏点以後R点までは $W_{it}$ および $W_{is}$ は急増するが、 $W_{ic}$ はほとんど増加しないままである。D25mmの場合には鉄筋は降伏せず、コンクリートのみがはり全体のエネルギー消散に寄与している。最大耐力点における $W_{is}$ の $W_{it}$ に対する割合は鉄筋がD10mmのはりの場合96~99%であり、D16mmの場合83~89%であった。最大耐力点からR点に至るまでにこの割合は漸減し、R点における割合はD10mmの場合89~94%・D16mmの場合69~81%であった。鉄筋ひずみが減少しはじめるR点以後は $W_{is}$ は増加せず、 $W_{it}$ の増分は $W_{ic}$ の増分に等しい。

N-10供試体のR点における $W_{it}$ を基準とし、これに対する他の供試体のR点における $W_{it}$ の比と鉄筋比との関係をコンクリート種別ごとに図7に実線で示す。さらにN-10供試体の最大耐力に対する他の供試体の最大耐力の比と鉄筋比との関係を破線で図7に示す。鉄筋比が高くなると、最大耐力が大きくなるにもかかわらず消散エネルギーは減少している。鉄筋比が高くなるにつれて破壊はぜい性的になるが、R点までの消散エネルギーはこのことをよく表わしている。また $W_{it}$ は応力ひずみ曲線の形状の影響を受け、F・FM・N・Lの順に少なくなる。

消散エネルギーの解析：図9に示すコンクリートの応力ひずみ曲線においてあるひずみ $\epsilon_c$ に至るまでに囲む面積 $S(\epsilon_c)$ は次式で与えられる（ $\epsilon_c$ までの平均応力を $\sigma_{ave}$ とする）。

$$S(\epsilon_c) = \sigma_{ave} \epsilon_c = \int_0^{\epsilon_c} \sigma(\epsilon) d\epsilon \quad (1)$$

図2に示すように曲げを受けるはり断面の圧縮力Cと引張力Tは、

$$T = pbd \sigma_{sy} \quad (2)$$

$$C = \sigma_{ave} x b = S(\epsilon_c) x b / \epsilon_c \quad (3)$$

となる。中立軸の位置 $x$ は  $x = \{ \epsilon_c / (\epsilon_s + \epsilon_c) \} d$  で与えられるので、圧縮力Cは次式で表わされる。

$$C = S(\epsilon_c) bd / (\epsilon_s + \epsilon_c) \quad (4)$$

力のつり合い（ $T=C$ ）より、

$$pbd \sigma_{sy} = S(\epsilon_c) bd / (\epsilon_s + \epsilon_c) \quad (5)$$

ゆえに、コンクリート上縁ひずみが $\epsilon_c$ のときの鉄筋ひずみ $\epsilon_s$ は次式で表わされる。

$$\epsilon_s = S(\epsilon_c) / p \sigma_{sy} - \epsilon_c \quad (6)$$

モーメントスパン内での単位長さ当りのはり断面について考えた場合、全体の消散エネルギー $W'_{it}$ は、コンクリートの消散エネルギーを $W'_{ic}$ 、

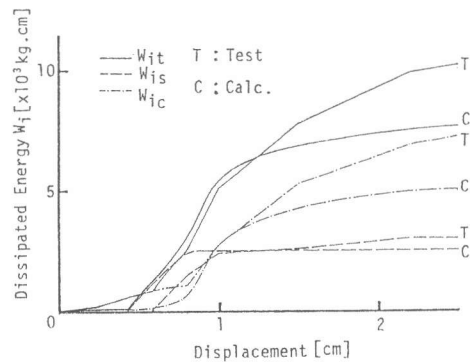


図6 消散エネルギー（L-16）

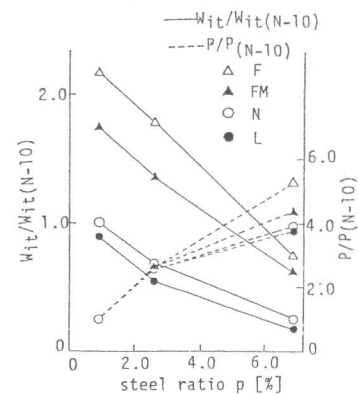


図7 消散エネルギーと耐力

鉄筋の消散エネルギーを  $W_{is}'$  とすると次式で与えられる。

$$\begin{aligned} W_{it}' &= W_{is}' + W_{ic}' \\ &= T (\epsilon_s - \epsilon_{sy}) + W_{ic}' \end{aligned} \quad (7)$$

(5) 式より、

$$W_{it}' = S(\epsilon_c) b d (\epsilon_s - \epsilon_{sy}) / (\epsilon_s + \epsilon_c) + W_{ic}' \quad (8)$$

鉄筋ひずみが降伏ひずみをはるかに越えている場合は  $\epsilon_s \gg \epsilon_{sy}$  であり、一方 R 点以前では消散エネルギー  $W_{it}'$  の大部分は鉄筋が受けもつため  $W_{is}' \gg W_{ic}'$  である。このような場合には、

$$\begin{aligned} W_{it}' &\approx W_{is}' \\ &\approx S(\epsilon_c) b d \end{aligned} \quad (9)$$

すなわち、モーメントスパン内の消散エネルギーは、 $\epsilon_c$  までに応力ひずみ曲線が囲む面積  $S(\epsilon_c)$  に比例することとなる。また、はり全体の消散エネルギー  $W_{it}$  の大部分がモーメントスパンに集中しているため、はり全体の消散エネルギー  $W_{it}$  は  $S(\epsilon_c)$  に比例することとなる。図 8 に実験ならびに計算による  $S(\epsilon_c)$  と  $W_{it}$  との関係を示す。図 8 から (9) 式の関係がほぼ妥当なことがわかる。

また R 点はコンクリート圧縮縁ひずみが増加しても鉄筋ひずみ  $\epsilon_s$  が増加しなくなる点であるから、

$$d \epsilon_s / d \epsilon_c = 0 \quad (10)$$

一方、(6) 式より、

$$d \epsilon_s / d \epsilon_c = (1 / p \sigma_{sy}) d S(\epsilon_c) / d \epsilon_c - 1 \quad (11)$$

ゆえに、R 点に対応するコンクリート応力  $\sigma_{cr}$  は (1) 式より、

$$\sigma_{cr} = p \sigma_{sy} \quad (12)$$

上式より R 点におけるコンクリートひずみ  $\epsilon_{cr}$  は、コンクリート応力  $\sigma_{cr}$  が下降域において  $p \sigma_{sy}$  と等しくなるひずみとして与えられる。(1) 式からこのひずみに対して  $S(\epsilon_{cr})$  が求まり、次いで (6) 式から R 点における鉄筋ひずみ  $\epsilon_{sr}$  が求まる。この  $\epsilon_{sr}$  は鉄筋消散エネルギー算定の適用限界を与える。

一定の  $p \sigma_{sy}$  の値に対応するコンクリート応力  $\sigma_{cr}$  に対応するコンクリートひずみ  $\epsilon_{cr}$  はコンクリートの応力ひずみ曲線に依存する。すなわち (6) 式から  $p \sigma_{sy}$  の値が同じであれば、コンクリート応力ひずみ曲線の下降が緩やかな F・FM・N・L の順に R 点での鉄筋ひずみ  $\epsilon_{sr}$  は小さくなり、消散エネルギーもこの順に少なくなる。また同じコンクリートであれば  $p \sigma_{sy}$  の値が大きいほど  $\epsilon_c$  が小さくなり、 $\epsilon_{sr}$  が小さくなるため消散エネルギーは少なくなる。

#### 4. 結論

本研究で得られた結果を要約すると以下ようになる。

- (1) 曲げを受ける RC はりの場合には、鉄筋ひずみが増加から減少に転じる点が存在する。この点を R 点と名付けると、鉄筋が降伏している場合には、R 点において鉄筋で消散するエネルギー  $W_{is}$  が増加しなくなり、また R 点をすぎるとはりの耐力は急激に低下する。
- (2) 鉄筋ひずみが降伏点ひずみをはるかに越えていれば、はり全体で消散するエネルギーは、コンクリート応力ひずみ曲線において、コンクリートひずみのはり上縁ひずみ  $\epsilon_{cr}$  に至るまでの曲線で囲まれる面積に比例する。
- (3) R 点におけるはり上縁ひずみ  $\epsilon_{cr}$  は、コンクリートの応力ひずみ曲線の下降域で応力が鉄筋比と鉄筋降伏点強度との積 ( $p \sigma_{sy}$ ) に等しくなるひずみと一致する。 $\epsilon_c$  が求まれば、コンクリートの応力ひずみ曲線と鉄筋比と鉄筋降伏点強度によって、R 点における鉄筋ひずみ  $\epsilon_{sr}$  が求まる。この  $\epsilon_{sr}$  は本論で述べた鉄筋消散エネルギーの算定式の適用限界を与える。

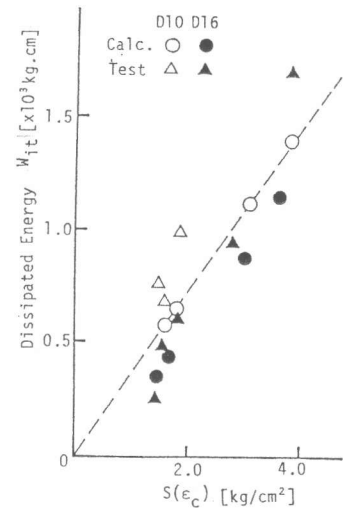


図 8 コンクリートの応力ひずみ曲線下の面積  $S(\epsilon_c)$  と消散エネルギー  $W_{it}$

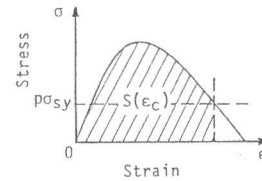


図 9 R 点に対応するコンクリートひずみ  $\epsilon_{cr}$