

[84] 複鉄筋コンクリートはりの靱性評価

正会員 小柳 治 (岐阜大学工学部)
 正会員 六郷 恵哲 (岐阜大学工学部)
 正会員 内田 裕市 (岐阜大学大学院)
 正会員 〇岩 瀬 裕之 (岐阜大学大学院)

1. まえがき

コンクリート構造物や構造部材には耐力ばかりでなく十分な靱性が必要とされている。靱性は材料レベルにおいては、一般に材料が破壊を生じる際の消散エネルギー量や吸収エネルギー量(消散エネルギー + ひずみエネルギー)で表わされるエネルギー吸収能力によって評価することが多い。構造物および部材レベルにおいても靱性を構造物や部材のもつエネルギー吸収能力で評価することは可能である。筆者らは、曲げを受ける単鉄筋はりの破壊過程において、はり上縁ひずみが増加し曲率が増加しても引張鉄筋ひずみが増加から減少に転ずる点(R点)が存在し、この点までにはり全体で消散するエネルギー量ははりの靱性をよく表わしていること等を報告した¹⁾。R点は降伏点や最大耐力点とならんではりの塑性変形を特徴づけ物理的に明確な意味をもつ点である。

本研究においては、より一般化して複鉄筋を対象とし、曲げ荷重を受けるはりの靱性におよぼすコンクリートならびに鉄筋の材料特性、鉄筋量および軸力の影響について解析した。さらに、コンクリートの種類と圧縮鉄筋量の異なる複鉄筋はりの載荷実験を行い、解析的に導いた結果との比較を行った。

2. 解析

(a) R点 コンクリートの圧縮応力ひずみ曲線において、あるひずみ ϵ_c にいたるまでの曲線によって囲まれる面積 $S(\epsilon_c)$ は次式で与えられる。

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

部材軸に直角な断面に作用する圧縮力 C と引張力 T は、圧縮鉄筋と引張鉄筋が降伏している場合には、

$$T = p b d \sigma_{sy} \quad (2)$$

$$C = S(\epsilon_c) b x / \epsilon_c + p' b d \sigma_{sy}' \quad (3)$$

となる。ここに p, p' は引張および圧縮鉄筋比、 $\sigma_{sy}, \sigma_{sy}'$ は引張鉄筋および圧縮鉄筋の降伏点強度、 b, d ははりの幅および有効高さである。ここで引張鉄筋ひずみを ϵ_s とすると中立軸位置 x は、 $x = \{\epsilon_c / (\epsilon_s + \epsilon_c)\} d$ で与えられ、(3)式は、

$$C = S(\epsilon_c) b d / (\epsilon_s + \epsilon_c) + p' b d \sigma_{sy}' \quad (4)$$

となる。軸圧縮力を N とすると外力と内力のつりあい ($N = C - T$) より、

$$N = S(\epsilon_c) b d / (\epsilon_s + \epsilon_c) + p' b d \sigma_{sy}' - p b d \sigma_{sy} \quad (5)$$

すなわち、はり上縁ひずみが ϵ_c のときの引張鉄筋ひずみ ϵ_s は、

$$\epsilon_s = S'(\epsilon_c) / (p \sigma_{sy} - p' \sigma_{sy}' + N / b d) - \epsilon_c \quad (6)$$

R点のはり上縁ひずみが増加しても引張鉄筋ひずみ ϵ_s が増加しない点であるから、R点では $d \epsilon_s / d \epsilon_c = 0$ であり、(6)式より、

$$d \epsilon_c / d \epsilon_c = \{ d S(\epsilon_c) / d \epsilon_c \} / (p \sigma_{sy} - p' \sigma_{sy}' + N / b d) - 1 \quad (7)$$

したがって、R点に対応するはり上縁応力 σ_{cr} は、(1), (7)式より、

$$\sigma_{cr} = p \sigma_{sy} - p' \sigma_{sy}' + N / b d \quad (8)$$

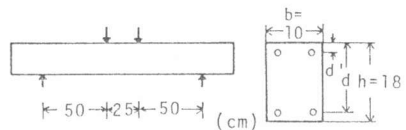


図-1 はりの形状

上式より、R点におけるはり上縁ひずみ ϵ_{cr} は、コンクリートの圧縮応力ひずみ曲線において、応力が下降域で $\{p\sigma_{sy} - p'\sigma_{sy}' + N/bd\}$ に等しくなる点のひずみとして与えられる。R点における引張鉄筋ひずみ ϵ_{sr} は(8)式をもとに(6)式から求まる。ただし(8)式が成立するのは、はり上縁応力がゼロとなる前、すなわちコンクリート応力がゼロとなるひずみ ϵ_{cu} にはり上縁ひずみ ϵ_c が達する前に圧縮鉄筋が降伏する場合である。 ϵ_c が ϵ_{cu} に達した後に圧縮鉄筋が降伏する場合、R点はコンクリート圧縮合力および圧縮鉄筋力の総和が減少しはじめる点と考えれば、圧縮鉄筋が降伏する点とR点とは一致する。圧縮鉄筋が降伏する時のはり上縁コンクリートひずみ ϵ_{cc} および引張鉄筋ひずみ ϵ_{sc} は以下のように求まる。

圧縮鉄筋位置を d' とすると、圧縮鉄筋ひずみ ϵ'_s は次式で表わされる。

$$\epsilon'_s = \epsilon_c (1 + d'/d) - \epsilon_s d'/d \quad (9)$$

圧縮鉄筋降伏時 ($\epsilon'_s = \epsilon'_{sy}$) の引張鉄筋ひずみ ϵ_{sc} は、圧縮鉄筋降伏時の上縁ひずみを ϵ_{cc} とすると、

$$\epsilon_{sc} = \epsilon_{cc} (d - d')/d' - \epsilon'_{sy} d/d' \quad (10)$$

となる。一方、(6)式より、

$$\epsilon_{sc} = S(\epsilon_{cc}) / (p\sigma_{sy} - p'\sigma_{sy}' + N/bd) - \epsilon_{cc} \quad (11)$$

(10)、(11)式より圧縮鉄筋降伏時の ϵ_{sc} と ϵ_{cc} が求まり、 ϵ_{cc} が ϵ_{cu} より大きければ ϵ_{cc} がR点時の計算上の上縁ひずみとなる。

以上のようにして、R点におけるはり上縁ひずみ ϵ_{cr} および引張鉄筋ひずみ ϵ_{sr} が求まる。 ϵ_{sr} が過大になり鉄筋の破断時の平均ひずみ ϵ_{sf} を越える場合には、R点が生ずる前に引張鉄筋が破断する。引張鉄筋の破断時のはり上縁ひずみ ϵ_{cf} は(6)式の左辺を ϵ_{sf} とおくことによって求まる。

(b) 消散エネルギー はりが曲げ破壊を生ずる場合には、はり全体で消散するエネルギー W_{it} の大部分はモーメントスパン ℓ_m に集中すると考えられる。はり全体で消散するエネルギー W_{it} は、引張鉄筋で消散するエネルギー W_{ist} 、圧縮鉄筋で消散するエネルギー W_{isc} 、およびコンクリートで消散するエネルギー W_{ic} の和であり、次式で与えられる。

$$W_{it} = W_{ist} + W_{isc} + W_{ic} \quad (12)$$

鉄筋の応力ひずみ曲線を完全弾塑性体のもとと仮定すれば、

$$W_{ist} = pbd \sigma_{sy} (\epsilon_s - \epsilon_{sy}) \ell_m \quad (13)$$

$$W_{isc} = p'bd \sigma_{sy}' (\epsilon'_s - \epsilon'_{sy}) \ell_m \quad (14)$$

また、(5)式より、

$$W_{ic} = \left\{ S(\epsilon_c) / (\epsilon_s + \epsilon_c) + p'\sigma_{sy}' - N/bd \right\} bd \ell_m (\epsilon_s - \epsilon_{sy}) \quad (15)$$

となる。一方、 W_{ic} は、コンクリートの弾性係数を E_c とすると、

$$\begin{aligned} W_{ic} &= \left[\int_0^{\epsilon_c} \{ S(\epsilon) - \sigma(\epsilon)^2 / 2 E_c \} d\epsilon \right] b \times \ell_m / \epsilon_s \\ &= \left[\int_0^{\epsilon_c} \{ S(\epsilon) - \sigma(\epsilon)^2 / 2 E_c \} d\epsilon \right] bd \ell_m / (\epsilon_s + \epsilon_c) \end{aligned} \quad (16)$$

となる。以上より、はり全体で消散するエネルギー W_{it} は、次式で表わされる。

$$\begin{aligned} W_{it} &= S(\epsilon_c) bd \ell_m (\epsilon_s - \epsilon_{sy}) / (\epsilon_s + \epsilon_c) + p'bd \ell_m \sigma_{sy}' (\epsilon_s - \epsilon_{sy}) + p'bd \ell_m \sigma_{sy}' (\epsilon'_s - \epsilon'_{sy}) \\ &\quad + \left[\int_0^{\epsilon_c} \{ S(\epsilon) - \sigma(\epsilon)^2 / 2 E_c \} d\epsilon \right] bd \ell_m / (\epsilon_s + \epsilon_c) - N \ell_m (\epsilon_s - \epsilon_{sy}) \end{aligned} \quad (17)$$

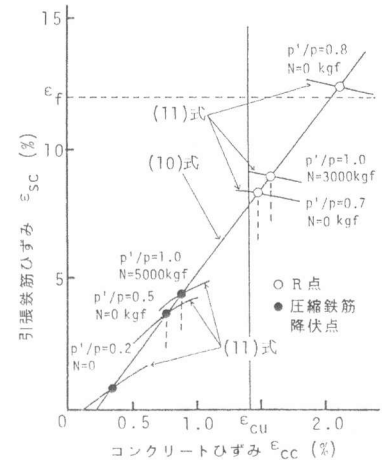


図-2(a) 圧縮鉄筋降伏時のひずみ

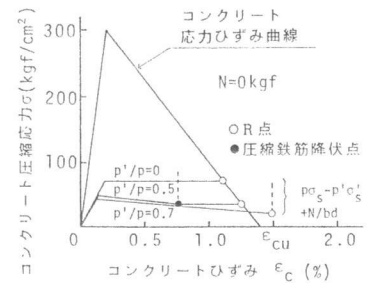


図-2(b) 応力ひずみ曲線とR点

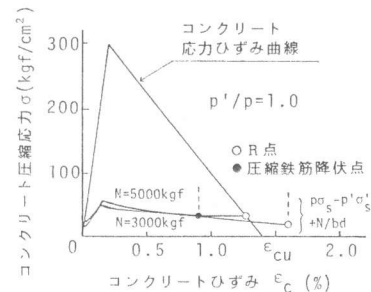


図-2(c) 応力ひずみ曲線とR点

(17)式第1項ならびに第4項より、 $S(\epsilon_c)$ が大きいほど、すなわちコンクリートが粘り強いほど W_{it} が増加することがわかる。圧縮鉄筋が W_{it} におよぼす効果には、圧縮鉄筋が塑性変形することによる効果((17)式第3項)のほか、圧縮靱性の増加により引張鉄筋の消散エネルギーを増加させる効果(同第2項)がある。また逆に、軸圧縮力が作用することによって引張鉄筋の消散エネルギーは減少する(同第5項)。なお、コンクリートならびに圧縮鉄筋で消散するエネルギー W_{ic}, W_{isc} におよぼす軸圧縮力の影響については考慮していない。

(c)計算例 図-1に示すはり部材を考える。コンクリートの圧縮応力ひずみ曲線の形状は図-2 (b),(c)に示すように三角形とし、鉄筋の応力ひずみ曲線は完全弾塑性とした。引張鉄筋比 p を 2.0%と一定にし、圧縮鉄筋比 p' を変化させて、はりの荷重変位曲線および消散エネルギーを計算した。さらに、一定軸圧縮力下で曲げ荷重を受けるはり部材についても軸圧縮力を変えて検討した。

はりの荷重変位曲線の計算例を図-3 (a), (b)に示す。軸圧縮力が無い場合において、 p'/p が小さい場合 ($p'/p=0.5$)には ϵ_c が ϵ_{cu} に達する以前に圧縮鉄筋が降伏するため、R点は $\sigma_{cr} = p\sigma_{sy} - p'\sigma_{sy}'$ に対応する ϵ_{cr} で生じる。しかし p'/p が高くなる ($p'/p=0.7$)と ϵ_c が ϵ_{cu} を越えた後、圧縮鉄筋が降伏する点がR点となる。対称断面 ($p'/p=1.0$)の場合には圧縮鉄筋は降伏しないのでR点は存在しない。しかし軸圧縮力が作用する場合、対称断面でもR点は存在する。図-2 (a) に圧縮鉄筋が降伏したときのはり上縁ひずみ ϵ_{cc} と引張鉄筋ひずみ ϵ_{sc} との関係を示し、図-2 (b), (c)に $p\sigma_{sy} - p'\sigma_{sy}' + N/bd$ と ϵ_c との関係を示す。 $p'/p=0.2, 0.5$, で軸圧縮力が無い場合、および $p'/p=1.0$ で軸圧縮力が大きい (5000kgf) 場合には、 ϵ_c が ϵ_{cu} に達する前に圧縮鉄筋が降伏するのでR点でのはり上縁ひずみ ϵ_{cr} は(8)式から求まる。 $p'/p=0.7, 0.8$ で軸圧縮力が無い場合、および $p'/p=1.0$ で軸圧縮力が小さい (3000 kgf) 場合には、R点でのはり上縁ひずみ ϵ_{cr} は圧縮鉄筋降伏時のはり上縁ひずみ ϵ_{cc} となる。引張鉄筋の破断時の平均ひずみ ϵ_{sf} を 1.2% と仮定すると、 $p'/p=0.8$ で軸圧縮力の無い場合、および $p'/p=1.0$ で軸圧縮力が 1000kgf の場合には、圧縮鉄筋の降伏によってR点が生ずる以前に引張鉄筋が破断する。このことは、R点が生ずる時の引張鉄筋ひずみ ϵ_{sr} とはり上縁ひずみ ϵ_{cr} の計算結果を示した表-1よりわかる。

表-1に、R点までに消散した各エネルギー $W_{it}, W_{ist}, W_{isc}, W_{ic}$ の計算結果を示す。はり全体で消散するエネルギー W_{it} の大部分は引張鉄筋における消散エネルギー W_{ist} が占めている。また W_{ist} は圧縮鉄筋比が増加すると増大し、逆に軸圧縮力が大きくなれば減少する。さらに、圧縮鉄筋で消散するエネルギー W_{isc} は極めて小さい。

3. 載荷実験

(a)実験概要 以上の解析結果をふまえて、

コンクリートの種類および圧縮鉄筋比を変化

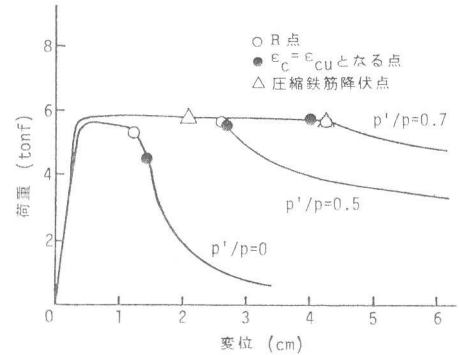


図-3(a) はりの荷重変位曲線

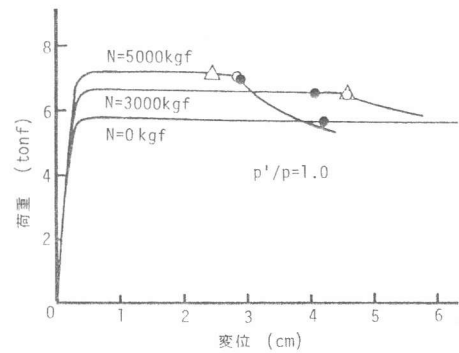


図-3(b) はりの荷重変位曲線

表-1 R点時のひずみと消散エネルギー(計算値)

p' (%)	p'/p	N (kg)	$p\sigma_{sy} - p'\sigma_{sy}' + N/bd$	ϵ_{cr}	ϵ_{sr}	Dissipated Energy (kgf.m)			
						W_{it}	W_{ist}	W_{isc}	W_{ic}
0	0	0	72.0	0.011	0.017	55.9	40.7	—	14.5
0.4	0.2	0	57.6	0.012	0.024	76.8	59.9	3.0	13.3
1.0	0.5	0	36.0	0.013	0.045	133.0	118.1	4.8	9.5
1.2	0.6	0	28.8	0.013	0.060	168.3	157.3	2.6	7.6
1.4	0.7	0	21.6	0.015	0.082	227.4	218.7	0	7.3
1.6	0.8	0	14.4	0.021	0.124	342.0	330.0	0	8.6
2.0	1.0	0	0	—	—	—	—	—	—
0	0	1000	78.7	0.011	0.014	52.7	34.2	—	16.0
0	0	3000	92.0	0.011	0.011	44.4	24.3	—	18.2
0	0	5000	105.3	0.010	0.008	40.9	17.1	—	18.5
1.0	0.5	1000	42.7	0.012	0.036	114.9	93.8	5.2	9.9
1.0	0.5	3000	56.0	0.012	0.025	94.8	62.9	7.3	13.1
1.0	0.5	5000	69.3	0.012	0.018	76.4	43.6	8.0	15.8
2.0	1.0	1000	6.7	0.044	0.273	781.1	732.5	0	9.5
2.0	1.0	3000	20.0	0.016	0.089	284.9	236.4	0	7.6
2.0	1.0	5000	33.0	0.013	0.050	184.1	130.4	7.9	8.9

$b=10.0$ $d=15.0$ $d'=2.0$ (cm) $\sigma_{sy}=\sigma'_{sy}=36.0$ (kgf/mm²) $p=2.0$ (%)

させたはりについて載荷実験を行った。引張鉄筋比 p は 1.64% とし $D 13 \text{ mm}$ ($\sigma_{sy}=36.0 \text{ kgf/mm}^2$) を 2 本用いた。圧縮鉄筋比 p' は 0, 0.92, 1.64% の 3 種類として、0.92% の場合には $D 10 \text{ mm}$ ($\sigma_{sy}=35.9 \text{ kgf/mm}^2$) を 2 本、1.64% の場合には引張鉄筋と同じ $D 13 \text{ mm}$ を 2 本用いた。コンクリートには、普通コンクリート ($\sigma_c=370 \text{ kgf/cm}^2$)、鋼繊維補強コンクリート ($\sigma_c=458 \text{ kgf/cm}^2$) の 2 種類を用いた。表-2 にこれらの実験条件を示す。

表-2 はり供試体の種類

	Concrete σ_c (kgf/cm ²)	d (cm)	p (%)	σ_{sy} (kgf/mm ²)	d'	p'	σ'_{sy} (kgf/mm ²)
N-0 N-10 N-13	(Plain) 370	15.4	1.64	36.0	0	0	—
F-0 F-10 F-13	(Fiber) 458				2.5	0.93	35.9
					2.7	1.64	36.0
					0	0	—
					2.5	0.93	35.9
					2.7	1.64	36.0

各はりについて数回の漸増繰返し載荷を行い、載荷・除荷曲線で囲まれる面積を求め、はり全体で消散したエネルギー W_{it} とした。また、コンクリート側面に標点プラグを貼り、引張鉄筋位置および圧縮鉄筋位置における残留変形量を計測し、残留変形量と鉄筋の降伏荷重との積を引張鉄筋および圧縮鉄筋で消散したエネルギー W_{ist} , W_{isc} とした。

(b)結果と考察 はりの荷重変位曲線(包絡線)を図-4(a)(b)に示す。普通コンクリートを用いた N-0, N-10, N-13 のはりの場合、圧縮鉄筋比の増加に伴ってはりの降伏後の高荷重レベルにおける変形量が大きくなった。N-0 ならびに N-10 のはりの場合、引張鉄筋のひずみが増加しなくなる点すなわち R 点が存在したが、N-13 のはり(大変形となり載荷点ローラーがずれたため載荷中止)では R 点は生じなかった。鋼繊維補強コンクリートを用いた F-0,

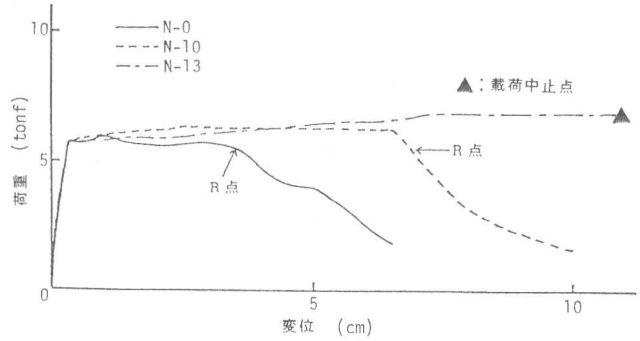


図-4(a) 普通コンクリートはりの荷重変位曲線

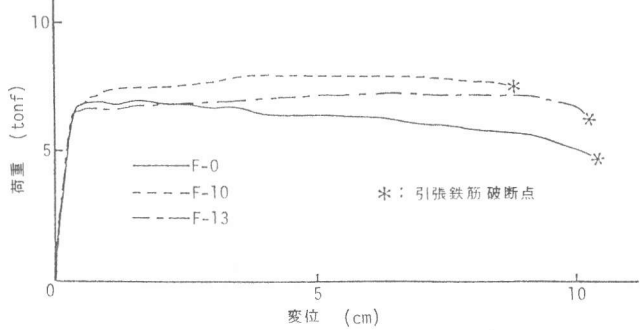


図-4(b) 鋼繊維補強コンクリートはりの荷重変位曲線

F-10, F-13 のはりの場合、いずれも降伏後の高荷重レベルでの変形量が大きくなり、R 点は存在せずに引張鉄筋が破断した。引張鉄筋の破断直前の平均ひずみ(検長: 25cm)は約 13% であった。

N-0, と N-10 のはりについて、消散エネルギーとはりの変位との関係を図-5 に示す。R 点が存在するこれらのはりでは、R 点において引張鉄筋の消散エネルギー W_{ist} は増加しなくなった。圧縮鉄筋の消散エネルギー W_{isc} は W_{ist} よりはるかに小となった。

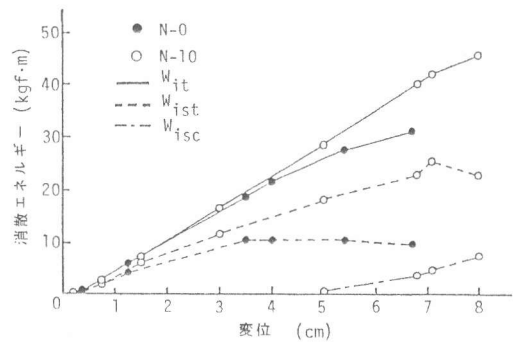


図-5 消散エネルギー(普通コンクリートはり)

4. 結論

本研究で得られた結果を要約すると次のようになる。

- (1) 曲げと軸圧縮力とを受ける複鉄筋はりの破壊過程において、引張鉄筋ひずみが減少に転ずる点 (R 点) が存在する。この R 点以後、はりの耐力は急激に低下する。R 点におけるはり上縁ひずみ ϵ_{cr} および引張鉄筋ひずみ ϵ_{sr} は、コンクリートの圧縮応力ひずみ曲線とはりの断面条件から求めることができる。
- (2) R 点まではり全体の消散エネルギー W_{it} におよぼす圧縮鉄筋の効果のうち、圧縮鉄筋それ自身が塑性変形することによる効果は極めて小さいが、引張鉄筋で消散するエネルギー W_{ist} を増加させる効果は大である。また、軸圧縮力が作用すると引張鉄筋の消散エネルギー W_{ist} は減少する。

《参考文献》 1) 小柳ほか: 第 4 回 コンクリート工学年次講演会講演論文集, pp. 345~348, 1982 年。