

[2054] RC はりの降伏終了点に関する一考察

高井茂信^{*1}・岩瀬裕之^{*2}・六郷恵哲^{*3}・小柳 治^{*3}

1. はじめに

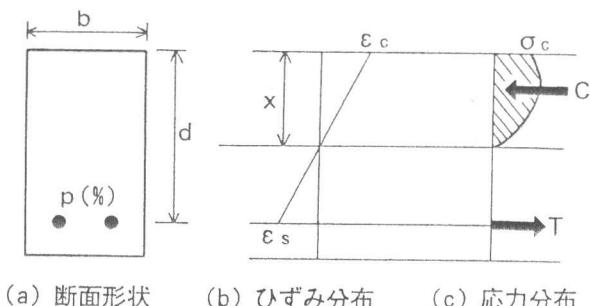
鉄筋コンクリート構造物の設計においては、韌性の概念を導入することが重要であり、韌性を設計に導入するためには、韌性の定量化の方法を確立することが必要である。

筆者らは曲げを受けるRCはりを対象として、エネルギー吸収能を用いて韌性を評価する方法について報告している⁽¹⁾。また韌性を評価する着目点として降伏終了点を提案しこれを解析的に求めた。降伏終了点は、曲げを受けるRCはり断面の破壊過程において、引張鉄筋のひずみが増加から減少に転ずる点である。前報では、鉄筋の応力ひずみ曲線は降伏後の応力が一定の完全弾塑性体として解析を行ったが、本研究では、降伏後応力が増加するいわゆる加工硬化がある曲線形状⁽²⁾や連続繊維補強材のような降伏点が存在しない曲線形状でも取り扱えるように拡張した。また簡単な数値計算を行い鉄筋（補強材）の応力ひずみ曲線の形状がRCはりの破断限界鉄筋比、降伏終了点および消散エネルギーに及ぼす影響について検討した。

2. 降伏終了点の解析

図-1に示すような最も簡単な長方形断面単鉄筋はりで考える。

図-2に示すコンクリートの圧縮応力ひずみ曲線の形状を $g(\varepsilon)$ とする。この曲線において、あるひずみ ε_c に至るまでの応力ひずみ曲線によって囲まれる面積を $S(\varepsilon_c)$ とする。



$$S(\varepsilon_c) = \int_0^{\varepsilon_c} g(\varepsilon) d\varepsilon \quad (1)$$

図-1 単鉄筋はり断面

一方鉄筋の応力ひずみ曲線の形状を $f(\varepsilon)$ とする。曲げを受けるはりの部材軸に直角な断面に作用する引張力 T と圧縮力 C は

$$T = p b d f(\varepsilon_s), \quad C = \frac{S(\varepsilon_c) b x}{\varepsilon_c} \quad (2)$$

*1 岐阜大学大学院 工学研究科土木工学科専攻（正会員）

*2 関ヶ原工業㈱、工博（正会員）

*3 岐阜大学教授 工学部土木工学科、工博（正会員）

となる。ここに p は引張鉄筋比、 b , d ははり断面の幅および有効高さ、 x は中立軸位置、 ε_c ははり上縁ひずみ、 ε_s は鉄筋の引張鉄筋ひずみである。中立軸の位置 x は

$$x = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_s + \varepsilon_c} d \quad (3)$$

で与えられ、式(2)は

$$C = \frac{S(\varepsilon_c)}{\varepsilon_s + \varepsilon_c} b d \quad (4)$$

で表される。力のつり合い $C = T$ より

$$p b d f(\varepsilon_s) = \frac{S(\varepsilon_c)}{\varepsilon_s + \varepsilon_c} b d \quad (5)$$

はり上縁ひずみが ε_c の時の引張鉄筋ひずみ ε_s は次式で表される。

$$\varepsilon_s = \frac{S(\varepsilon_c)}{p f(\varepsilon_s)} - \varepsilon_c \quad (6)$$

式(6)を変形して

$$(\varepsilon_s + \varepsilon_c) p f(\varepsilon_s) = S(\varepsilon_c) \quad (7)$$

降伏終了点は、はり上縁ひずみ ε_c 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 $d\varepsilon_s/d\varepsilon_c = 0$ となり、式(7)を両辺微分し、 $d\varepsilon_s/d\varepsilon_c = 0$ とすると

$$p f(\varepsilon_s) = g(\varepsilon_c) \quad (8)$$

式(6)、(8)を満足する ε_c と ε_s が、降伏終了点におけるはり圧縮縁ひずみ ε_{cr} と引張鉄筋ひずみ ε_{sr} となる。応力ひずみ曲線の形状が複雑な場合は繰り返し計算によって ε_c と ε_s を求める必要がある。鉄筋の応力ひずみ曲線が完全弾塑性体（降伏強度 σ_{sy} ）とすると、式(8)の左辺は $p \sigma_{sy}$ となり、降伏終了点におけるはり上縁ひずみは、コンクリート応力ひずみ曲線の下降域において、応力が $p \sigma_{sy}$ に等しくなる点のひずみとして与えられる。

3 破断限界鉄筋比 p_f

鉄筋比が小さいと、載荷の進行に伴い引張鉄筋ひずみが増大し、降伏終了点が生じる以前に引

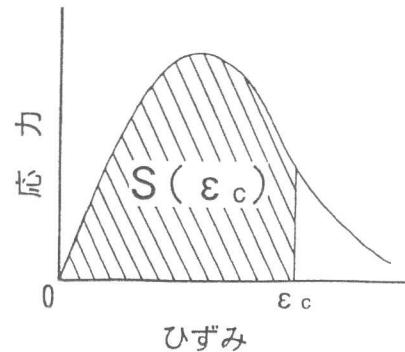


図-2 コンクリートの応力ひずみ曲線

張鉄筋が破断する。引張鉄筋の破断が生ずる限界（最小）の鉄筋比を破断限界鉄筋比 p_f とする。

破断限界鉄筋比 p_f は、引張鉄筋の降伏終了点と破断点が一致する場合の鉄筋比と考えることができる。式（6）において、 $\varepsilon_s = \varepsilon_{sf}$ 、 $f(\varepsilon_s) = \sigma_{sf}$ として式（6）を満足する ε_c 、 p が求めれば、このときの p が破断限界鉄筋比 p_f となる。鉄筋の応力ひずみ曲線を図-3に示すような6種類として破断限界鉄筋比 p_f を求め表-1に示す。コンクリートの応力ひずみ曲線は図-4に示すような曲線下の面積と強度が異なる4種類を用いた。計算に用いた鉄筋の応力ひずみ曲線は次の6種類とする。

- ① 完全弾塑性体とし、降伏後強度の増加はない。破断ひずみは鉄筋コンクリート用棒鋼の規定を参考にして16%とする。
- ② ①と同じ完全弾塑性体とし、破断ひずみを20%とする。
- ③ コンクリート中にある鉄筋は、コンクリートとの付着の影響により降伏踊り場が無くひずみの増加とともに強度が増加する⁽²⁾。これをモデル化し、降伏後破断まで直線的に強度が増加すると仮定し、破断強度は5,000kgf/cm²とする。
- ④ 降伏点がなく破断ひずみが小さい連続繊維補強材を想定して破断強度を10,000kgf/cm²、破断ひずみを2%とする。

表-1 コンクリートおよび鉄筋の応力ひずみ曲線と破断限界 p_f

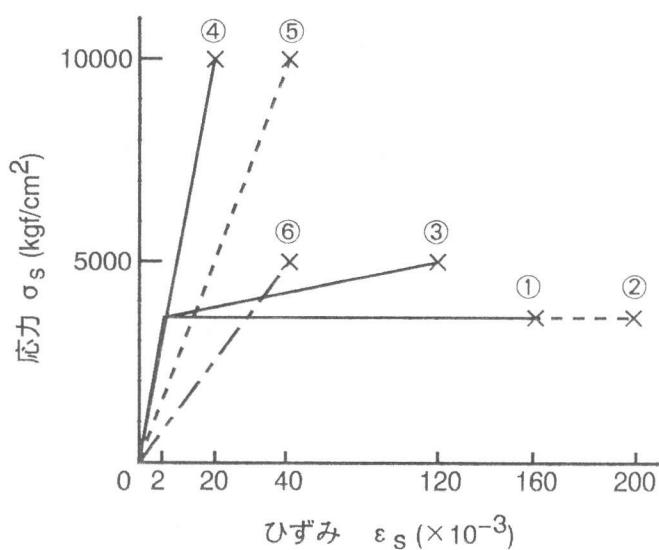


図-3 鉄筋の応力ひずみ曲線

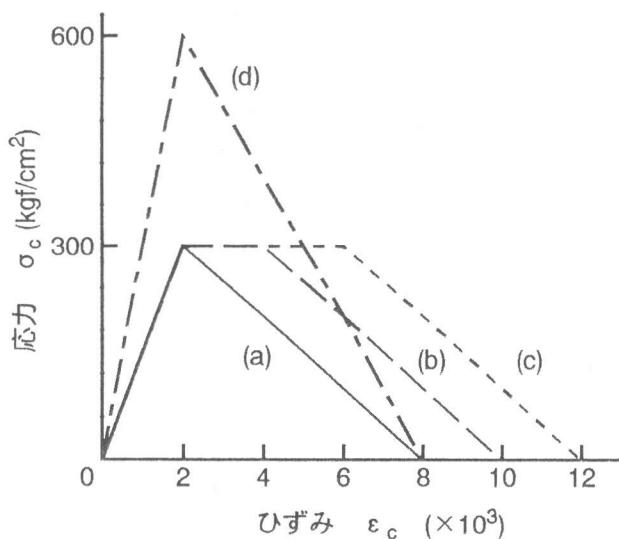


図-4 コンクリートの応力ひずみ曲線

コンクリート 応力ひずみ曲 線の種類	応力ひずみ曲 線下の面積 (kgf/cm²)	破断限界鉄筋比 p_f (%)					
		図-3 ①	図-3 ②	図-3 ③	図-3 ④	図-3 ⑤	図-3 ⑥
図-4 (a)	1.2	0.20	0.17	0.19	0.25	0.44	0.50
図-4 (b)	1.8	0.30	0.24	0.28	0.36	0.61	0.78
図-4 (c)	2.4	0.39	0.31	0.36	0.47	0.77	0.94
図-4 (d)	2.4	0.40	0.32	0.37	0.50	0.87	1.00

⑤ ④と同じ破断強度で、破断ひずみを4%とする。

⑥ ⑤と同じ破断ひずみで、破断強度を $5,000 \text{kgf/cm}^2$ とする。

表-1より、コンクリートの応力ひずみ曲線下の総面積に破断限界鉄筋比はほぼ比例している。また破断限界鉄筋比には、鉄筋の破断強度ばかりでなく、破断ひずみも大きく影響する。

4 断面の消散エネルギー

(1) 降伏終了点までの断面の消散エネルギー式

消散エネルギーは応力ひずみ曲線（あるいは荷重変位曲線）下の面積で表される加力エネルギーから弾性ひずみエネルギーを差し引いたもので定量化される。

ここで、引張鉄筋の応力ひずみ曲線の形状を $f(\varepsilon)$ 、ヤング係数を E_s 、一方 W_{itr} は、コンクリートの応力ひずみ曲線において除荷時のヤング係数を初期ヤング係数 E_c と等しいと仮定し、引張応力やせん断応力の影響を無視すると、はり断面で消散するエネルギー W_{itr} は、次式で表される。

$$W_{itr} = p b d \left\{ \int_0^{\varepsilon_{sr}} f(\varepsilon) d\varepsilon - f(\varepsilon_{sr})^2 / 2E_s \right\} + \int_0^{\varepsilon_{cr}} \{ S(\varepsilon_c) - g(\varepsilon_c)^2 / (2E_c) \} d\varepsilon b d / (\varepsilon_{sr} + \varepsilon_{cr}) \quad (9)$$

[引張鉄筋の消散エネルギー]
[コンクリートの消散エネルギー]

(2) 消散エネルギーについての数値計算による検討

降伏終了点に至るまでの断面の消散エネルギー W_{itr} に及ぼす引張鉄筋比 p 、および鉄筋の加工硬化の影響について、

数値計算により検討する。

はり断面は図-5

(a) に示すように長方形とし、幅 $b = 10 \text{cm}$ 、有効高さ $d = 15 \text{cm}$ 、コンクリートの応力ひずみ曲線の形状は、計算を簡単にするためと降伏終了点までの消散エネルギーは応力ひずみ曲線の形状についてで

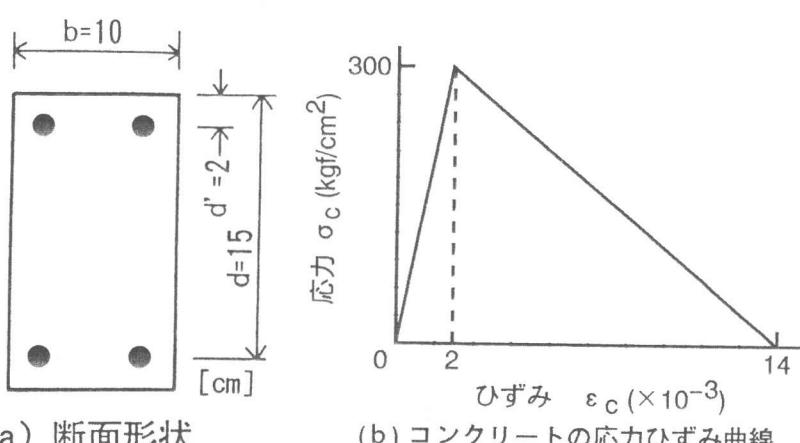


図-5 数値計算に用いた断面形状とコンクリートの応力ひずみ曲線

はなく、主に応力ひずみ曲線下の面積に関係することから、図-5(b)に示すように三角形とし、圧縮強度 $\sigma_{cu} = 300 \text{kgf/cm}^2$ 、応力が0となる最終ひずみを $\varepsilon_{ce} = 0.014$ とする。鉄筋比は0.4~4.7%に変化させた。引張鉄筋の応力ひずみ曲線は(i)では図-3①に示す完全弾塑性体のものとし、降伏強度 $\sigma_{sy} = 3,600 \text{kgf/cm}^2$ 、ヤング係数 $E_s = 2.0 \times 10^6 \text{kgf/cm}^2$ 、降伏ひずみ $\varepsilon_{sy} = 0.0018$ とする。また、(ii)では、図-3③に示す降伏までは(i)と同じ形状とし、降伏後は破断までひずみの増加にともなって直線的に強度が増加するものとする。破断強度は $\sigma_{sf} = 5,000 \text{kgf/cm}^2$ 、破断ひずみは $\varepsilon_{sf} = 0.12$ とする。断面の消散エネルギー W_{itr} 、引張鉄筋における消散エネルギー W_{istr} 、コンクリートにおける消散エネルギー W_{icr} を計算し、結果を表-2に示す。

表-2 降伏終了点における各消散エネルギー (数値計算)

Case	計算条件 p (%)	降伏終了点における				降伏終了点までの消散エネルギー		
		中立軸 x_r (cm)	コンクリート		引張鉄筋	全体	W_{istr} kgf·m/m	コンクリート
			応力 σ_{cr}	ひずみ ε_{cr}		W_{itr} kgf·m/m		
i	0.4	1.38	14.4	0.0134	0.1321	297	281	16
	0.5	1.72	18.0	0.0133	0.1030	293	273	20
	1.0	3.27	36.0	0.0126	0.0451	271	234	37
	1.5	4.68	54.0	0.0118	0.0260	245	196	49
	2.0	6.01	72.0	0.0111	0.0166	220	160	60
	2.5	7.26	90.0	0.0104	0.0111	192	125	67
	3.0	8.41	108.0	0.0097	0.0076	167	95	72
	4.0	10.51	144.0	0.0082	0.0035	110	36	74
	4.7	12.00	169.0	0.0072	0.0018	70	0	70
ii	0.4	1.80	18.9	0.0132	0.0973	260	239	21
	0.5	2.12	22.6	0.0131	0.0794	260	236	24
	1.0	3.63	40.4	0.0124	0.0388	252	212	40
	1.5	4.99	57.9	0.0117	0.0235	233	182	51
	2.0	6.24	75.3	0.0110	0.0154	210	150	60
	2.5	7.42	92.6	0.0103	0.0105	189	119	70
	3.0	8.53	110.0	0.0096	0.0073	161	90	71
	4.0	10.61	144.9	0.0082	0.0034	107	35	72
	4.7	12.02	169.3	0.0072	0.0018	70	0	70

(i)の場合、鉄筋比 p が高くなり降伏限界鉄筋比 p_y に近づくに従って引張鉄筋の消散エネルギー W_{istr} は減少し、コンクリートの消散エネルギー W_{icr} が増加するが、鉄筋比 p が2.0%以下では断面の消散エネルギー W_{itr} の70%以上を引張鉄筋の消散エネルギーが占めている。鉄筋比 p が小さい場合 ($p = 0.4\sim1.5\%$) には、引張鉄筋の消散エネルギー W_{istr} ならびに断面の消散エネ

ルギー W_{itr} は、鉄筋比 p の影響はほとんど受けずほぼ一定となっている。

(ii)の場合、(i)と同様に鉄筋比が高くなるに従って引張鉄筋の消散エネルギー W_{istr} は減少し、コンクリートの消散エネルギー W_{icr} が増加する。また、鉄筋比 p が小さい場合($p = 0.4 \sim 1.5\%$)には、引張鉄筋の消散エネルギー W_{istr} ならびに断面の消散エネルギー W_{itr} は、鉄筋比 p の影響はほとんど受けずほぼ一定となっている。

鉄筋の加工硬化を考慮した(ii)の場合、考慮しない(i)の場合に比べて降伏終了点における引張鉄筋ひずみは小さくなっている。また全体の消散エネルギー W_{itr} 、引張鉄筋の消散エネルギー W_{istr} も少なくなっている。逆にコンクリートの消散エネルギー W_{icr} は増加している。

5 まとめ

本研究において得られた結論は以下の通りである。

- (1)曲げを受けるRCはり断面の破壊過程を特徴づける点である引張鉄筋の降伏終了点について、前報では鉄筋の応力ひずみ曲線は完全弾塑性体として取り扱ったが、本研究では加工硬化がある曲線形状や連続繊維補強材のような降伏点が存在しない形状でも取り扱えるように拡張した。
- (2)降伏終了点と鉄筋の破断点とが一致するような鉄筋比を破断限界鉄筋比と定義し、コンクリートおよび鉄筋の応力ひずみ曲線形状が破断限界鉄筋比におよぼす影響について検討した。破断限界鉄筋比はコンクリートの応力ひずみ曲線下の面積にほぼ比例している。また、破断限界鉄筋比は鉄筋の破断強度ばかりでなく破断ひずみも大きく影響する。
- (3)降伏終了点に至るまでの断面の消散エネルギーに及ぼす鉄筋比および加工硬化の影響について検討した。加工硬化を考慮した場合、考慮しない場合に比べて降伏終了点における引張鉄筋ひずみ、全体の消散エネルギー、引張鉄筋の消散エネルギーは減少する。逆にコンクリートの消散エネルギーは増加する。

参考文献

- (1) 小柳 治・六郷恵哲・岩瀬裕之：RCはりの曲げ破壊過程と曲げ韌性に及ぼす材料特性の影響、土木学会論文集、No. 348, V-1, pp. 153-162、1984. 8
- (2) 小柳 治・六郷恵哲・岩瀬裕之：コンクリート中の鉄筋の応力ひずみ関係と曲げを受けるRCはりの終局挙動、土木学会論文集、No. 384, V-7, pp. 83-92、1987. 8