

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

EFFECTS OF MATERIAL PROPERTIES ON FLEXURAL FAILURE PROCESS AND FLEXURAL TOUGHNESS OF REINFORCED CONCRETE BEAMS

小柳 洽*・六郷恵哲**・岩瀬裕之***

By Wataru KOYANAGI, Keitetsu ROKUGO and Hiroyuki IWASE

The effects of material properties (concrete and steel), cross-sectional properties (reinforcement ratios and dimensions) and axial loads on the cross-sectional dissipating energy up to yield-ending point of RC beams are theoretically investigated. The dissipating energy of RC beams increases with an increase in both toughness (area under stress-strain curve) of concrete and compression reinforcement ratio. When $p\sigma_{sy}$ (tension reinforcement ratio; yield strength of steel) is relatively small, $p\sigma_{sy}$ has little effects on the dissipating energy of RC beams. Equations for calculating upper and lower limits of tension reinforcement ratio for ductile failure of RC beams are presented by using toughness of concrete. Dissipating energy W_{ti} , and plastic rotation capacity ϕ_p ($=W_{ti}/M_u$) are proposed as toughness parameters of RC beams.

1. ま え が き

鉄筋コンクリート構造物の設計においては、構造物の安全性の評価をより明確化するうえで、耐震設計ばかりでなく他の終局限界状態の設計に対しても、靱性の概念を導入することが重要であると考えられる。靱性を直接に設計に導入するためには、靱性の定量化の方法を確立するとともに、靱性に及ぼす各種要因とその影響を明確にすることが重要である。

本研究は、曲げを受ける鉄筋コンクリートはり（以下、RC はりと略）を対象として、力学エネルギーの概念を用いて一般的な靱性の評価方法を確立することを目的とするものである。まず RC はりの曲げ破壊過程を特徴づける点として引張鉄筋の降伏開始点、降伏終了点、破断点を取り上げ、降伏開始点から降伏終了点まで、あるいは降伏開始点から破断点までのエネルギー吸収能を、RC はりの断面要素であるコンクリートおよび鉄筋の破壊性状と結びつけて検討した。さらに RC はりの断面特性としての鉄筋比と材料特性としてのコンクリートの

応力ひずみ曲線とを変化させたはりの載荷実験結果ならびに簡単な数値計算結果を対比検討するとともに、RC はり断面の靱性を評価するためのパラメーターを提案した。

2. RC はりの破壊過程と靱性

(1) 靱 性

材料の靱性は、材料の力学的特性の中で、単に強度だけでは表現できないいわゆる粘り強さという概念でとらえられるものであり、破壊を生ずるときに必要とされる仕事量、換言すればエネルギー吸収能で表わされる¹⁾。破壊は、降伏・強度破壊・破断・崩壊など種々の点で特徴づけられる1つの過程（総称して破壊過程という）であることから²⁾材料の靱性を評価するうえでは、強度破壊点や破断点などの破壊過程の中の目的とする点までの加力エネルギーあるいはこれから弾性ひずみエネルギーを差し引いた消散エネルギーによって靱性が定量化される³⁾。これらのエネルギーの定量化は、具体的には Fig. 1 に示すように、単位体積当たりについては着目点に至るまでの応力ひずみ曲線で囲まれる面積をもとに、また系全体については同じく荷重変位曲線で囲まれる面積をもとに行うことができる。たとえば、繊維補強コンクリートの試験方法に関する JCI 規準においては、織

*正会員 工博 岐阜大学教授 工学部土木工学科
(〒501-11 岐阜市柳戸 1-1)

**正会員 工博 岐阜大学助教授 工学部土木工学科 (同上)

***正会員 工修 岐阜大学助手 工学部土木工学科 (同上)

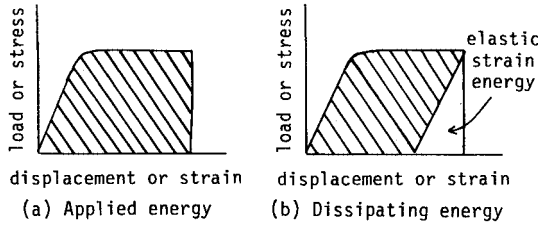


Fig. 1 Toughness evaluation.

維補強コンクリートの圧縮靱性を、圧縮変形がひずみに換算して0.75%となる限界点に至るまでの荷重変位曲線下の面積で表される圧縮タフネス、ならびにその限界点までの平均耐力を応力に換算して得られる換算圧縮強度とによって定量化することを提案している⁴⁾。

なお、RC部材の塑性挙動の検討にあたっては、コンクリートの圧縮靱性をストレスブロック係数によって評価する方法が広く用いられており、ストレスブロック係数に関する詳細な検討が行われている^{5),6)}。

RCはり部材の靱性についても、上述の材料に対する場合と同様であり、部材の破壊過程を特徴づける所要の点までの加力エネルギーあるいは消散エネルギーによって定量化することが可能である。

(2) RCはりの破壊過程

曲げを受けるRCはりの荷重変位曲線はFig. 2にみられるように、一般に曲げひびわれ発生点、引張鉄筋の降伏開始点、強度破壊(最大耐力)点などで特徴づけられる。曲げモーメント曲率関係も荷重変位曲線と同様な性状を有するため、以下特に断らない限りは一般化された荷重変位曲線として両者を合わせて議論する。

実験では、強度破壊点が明確である場合もあるが、強度破壊点に対して変位が1対1に対応しない場合もあり、この場合には破壊限界点としての強度破壊点の物理的意味が不明確となる。

ここで、強度破壊点をこえてからのいわゆる下降域を含めたはりの挙動を考える。強度破壊点以降は耐力は低下するが、引張鉄筋比が後述の降伏限界鉄筋比以下の場

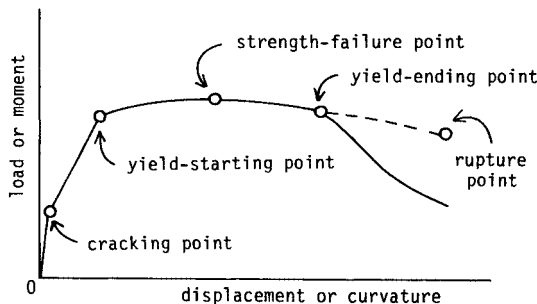


Fig. 2 Failure process of RC beams.

合には、一般にそれほど急激ではない。荷重の進行に従って上縁コンクリートが圧壊するが、荷重を続けると圧壊が進行し圧縮部分のコンクリートのはく落が圧縮縁からはり内部へ進展し中立軸が下降する。さらに荷重を続けると、変位の増加につれて増加していた引張鉄筋のひずみが減少に転ずる点が存在する⁷⁾⁻¹⁴⁾。この点は、引張鉄筋が降伏を生じている場合には鉄筋に対して除荷が生じ降伏が終了する点である。本研究においてはこの点を降伏終了点と名づける。降伏終了点は、後述のように荷重実験においてRCはりの耐力低下が急激に生ずる点とほぼ一致した。

鉄筋比が比較的小さい単鉄筋はりや、引張鉄筋比と圧縮鉄筋比との差が比較的小さい複鉄筋はりの場合には、荷重の進行に伴い引張鉄筋ひずみが著しく増大し、降伏終了点が生ずる以前に引張鉄筋が破断してしまう。この点を、破断点と名づける。

逆に鉄筋比が高く引張鉄筋が降伏しない場合でも、コンクリートの圧壊の進行によって鉄筋ひずみが増加から減少に転ずる点が存在するが、本研究においては鉄筋の降伏変形によるエネルギー消散について検討することを目的としているので、降伏以前に引張鉄筋のひずみが減少しはじめる点はこちらでは取り扱わないこととする。

引張鉄筋比が比較的小さい場合には、曲げを受けるRCはり内で消散するエネルギーの大部分が引張鉄筋の降伏によるものであるという実験結果^{7),8)}を考慮すると、引張鉄筋の降伏終了点ならびに破断点は、降伏開始点とならびRCはりの破壊過程を特徴づける物理的に明確な意味を有する点であるとともに、RCはりの靱性評価の基準点として最適であると考えられる。

3. 降伏終了点

(1) 降伏終了点の解析結果

引張鉄筋の降伏終了点における引張鉄筋の応力 σ_{sr} とひずみ ϵ_{sr} 、ならびにはり上縁コンクリートの応力 σ_{cr} とひずみ ϵ_{cr} が次のように表わされることを著者らは解析的に明らかにした¹⁴⁾。なお、付録にこの解析の主要な部分を示す。

$$\sigma_{sr} = \sigma_{sy} \dots \dots \dots (1)$$

$$\epsilon_{sr} = S(\epsilon_{cr}) / \{ p\sigma_{sy} - p'\sigma'_{sy} + N' / (bd) \} - \epsilon_{cr} \dots \dots \dots (2)$$

$$\sigma_{cr} = p\sigma_{sy} - p'\sigma'_{sy} + N' / (bd) \dots \dots \dots (3)$$

ϵ_{cr} : コンクリートの応力ひずみ曲線の下降域において応力が σ_{cr} となる点のひずみとして与えられる (Fig. 3 (a) 参照)

ここに、 p 、 p' は引張鉄筋比および圧縮鉄筋比、 σ_{sy} 、 σ'_{sy} は引張鉄筋および圧縮鉄筋の降伏強度、 b 、 d はRCはり断面の幅および有効高さ、 N' は軸圧縮力である。 $S(\epsilon_{cr})$ は Fig. 3 (a) に示すように、コンクリート

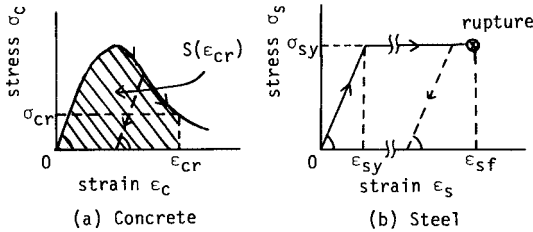


Fig. 3 Stress-strain curves of concrete and steel.

の応力ひずみ曲線においてひずみ ϵ_{cr} に至るまでの応力ひずみ曲線によって囲まれる面積である。ここでは簡単のため、鉄筋の応力ひずみ曲線は Fig. 3 (b) に示すように完全弾塑性体のもと仮定するとともに、降伏終了点において圧縮鉄筋はすでに降伏しているものと仮定している。

なお、ひずみ硬化を含む鉄筋の応力ひずみ曲線の形状の影響については、数値計算によるシミュレーション手法等により別途検討することとし、ここでは扱わない。

(2) 降伏終了点に関する従来の研究

従来、RC はり断面の塑性回転能やエネルギー吸収能といった靱性に関する検討は強度破壊点までを対象としたものが多い。しかしながら、前述のように強度破壊点は明確でない場合が少なくないこと、またコンクリート構造物全体の靱性を検討する際には断面の強度破壊点以降の靱性をも考慮してよい場合が多いこと、などの理由で、近年、大変形領域である強度破壊点以降をも含む靱性の評価も行われるようになってきた。

はり断面の靱性を考えるうえでの限界点としては、強度破壊点を越えてさらに変形が増大し耐力が再び降伏開始点における耐力まで低下する点¹⁵⁾や上述の引張鉄筋の降伏終了点がある。

Iqbal ら⁹⁾は、曲げを受ける RC はりにおいてコンクリートの圧壊が進み中立軸が低下した後は引張鉄筋のひずみが減少することを指摘している。鈴木らは、曲げを受ける PC 部材断面の終局限界点として、断面の曲率は増加するにもかかわらず鋼材のひずみが減少しはじめる点を提案し、断面のエネルギー吸収能はこの終局限界点までのエネルギー吸収量によって評価すべきことを提示する¹⁰⁾とともに、終局限界点に及ぼすコンクリートならびに鋼材の影響を解析ならびに実験の両面から明らかにしている^{11), 12)}。さらに鈴木らは、上記の終局限界点とならんで鋼材の破断による限界点を取り上げその算定式を提示するとともに、これらの限界点に及ぼす各種要因の影響を広範な数値計算結果を用いて示している¹³⁾。著者ら^{7), 8)}は、RC はりの曲げ破壊過程において引張鉄筋のひずみが減少しはじめる点が存在することを実験的に明らかにするとともに、引張鉄筋の降伏開始点から降

伏終了点までのエネルギー消費量あるいはこの間の変位量を用いて RC はりの靱性を評価することを提案している。

本研究においては、引張鉄筋が降伏または破断する限界の鉄筋比の算定ならびにはり断面の消費エネルギーの算定に、鈴木ら^{10)~13)}が用いているストレスブロック係数に代わって、コンクリートの応力ひずみ曲線下の面積すなわちコンクリートの材料特性としての圧縮靱性の値を直接用いることにより、より簡単な計算式を提案している。

4. 限界鉄筋比

(1) 降伏限界鉄筋比 p_y

鉄筋比が高く引張鉄筋が降伏しないいわゆる過鉄筋の場合には、引張鉄筋の降伏開始点も降伏終了点も存在せず引張鉄筋の塑性変形による消費エネルギーはゼロとなる。ここでは、引張鉄筋の降伏が生じなくなる限界の鉄筋比を降伏限界鉄筋比 p_y と名づけ、 p_y の算定式を示すとともに、従来用いられている終局限界状態におけるつり合い鉄筋比 p_0 との比較を行う。

降伏限界鉄筋比は、引張鉄筋の降伏開始点と降伏終了点とが一致する場合の鉄筋比と考えることができる。すなわち、式 (2) で与えられる降伏終了点における引張鉄筋ひずみ ϵ_{sr} を降伏ひずみ ϵ_{sy} とおくことにより、降伏限界鉄筋比 p_y は次式で与えられる。

$$p_y = |S(\epsilon_{cr}) / (\epsilon_{sy} + \epsilon_{cr}) + p \sigma_{sy} - N' / (bd) / \sigma_{sy} \dots (4)$$

上式に含まれるはり上縁コンクリートひずみ ϵ_{cr} は式 (3) を介して引張鉄筋比の関数となるため、降伏限界鉄筋比 p_y の算定にあたっては、式 (3), (4) を用いて簡単な収束計算を行うこととなる。 $\sigma'_{sy} = \sigma_{sy}$ の場合には

$$p_y = S(\epsilon_{cr}) / (\epsilon_{sy} + \epsilon_{cr}) \sigma_{sy} + p' - N' / (bd \sigma_{sy}) \dots (5)$$

となる。降伏限界鉄筋比 p_y は、コンクリートの靱性が大となると増加し、軸圧縮力 N' が大となると減少する。また、引張鉄筋比 p と圧縮鉄筋比 p' との差 $(p - p')$ が、

$$p - p' \leq S(\epsilon_{cr}) / (\epsilon_{sy} + \epsilon_{cr}) \sigma_{sy} - N' / (bd \sigma_{sy}) \dots (6)$$

であれば、引張鉄筋は降伏する。 $p' = 0, N' = 0$ の場合には、

$$p_y = S(\epsilon_{cr}) / (\epsilon_{sy} + \epsilon_{cr}) \sigma_{sy} \dots (7)$$

となる。

従来用いられている終局状態におけるつり合い鉄筋比 p_0 は、引張鉄筋の降伏とコンクリートの圧壊とが同時に生ずるときの引張鉄筋比と定義され、 $p' = 0, N' = 0$ の場合、次式で与えられる。

$$p_0 = \bar{\sigma}_c \epsilon_{cu} / (\epsilon_{sy} + \epsilon_{cu}) \sigma_{sy} \dots (8)$$

ここに、 $\bar{\sigma}_c$ ははり圧縮域の平均圧縮応力である。 ϵ_{cu} はコンクリートの圧壊ひずみであり、一般に計算上は簡単

のため $\epsilon_{cu} = 0.0035$ とする場合が多いが、 ϵ_{cu} をコンクリートの圧縮強度の関数とする場合¹⁶⁾もある。

RC はりの曲げ破壊過程においては、はり上縁コンクリートの圧壊点は実験上必ずしも明確に定めうる点ではないにもかかわらず、つり合い鉄筋比 p_0 を求めるためにはコンクリートの圧壊ひずみ ϵ_{cu} の値を一義的に決めなければならない。これに対し、降伏限界鉄筋比 p_y の算定においては、引張鉄筋が降伏するか否かのみを判定しているためコンクリートの圧壊点を定義する必要がなく、しかもコンクリートの材料特性としての靱性 $S(\epsilon_{cr})$ を直接反映させることができる。

例として、コンクリートの応力ひずみ曲線が Fig. 4 (a) ~ (d) に示す形状で、 $\sigma_{sy} = 400$ MPa、鉄筋のヤング係数 $E_s = 200$ GPa、降伏ひずみ $\epsilon_{sy} = 0.002$ 、 $p' = 0$ 、 $N' = 0$ の場合について降伏限界鉄筋比 p_y ならびにつり合い鉄筋比 p_0 を式 (7)、(8) で計算し Table 1 に示す。つり合い鉄筋比に比べ、降伏限界鉄筋比の方がコンクリートの靱性の効果をよく反映していることが Table 1 の結果よりわかる。

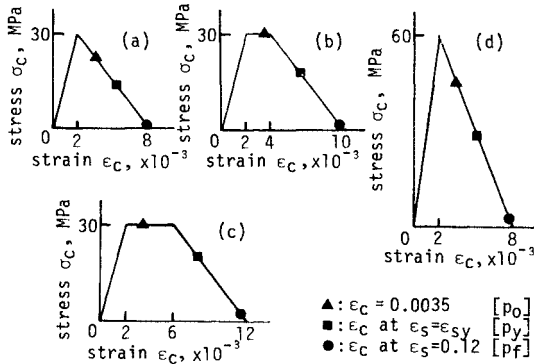


Fig. 4 Stress-strain curves of concrete for calculation of p_0 , p_y and p_r .

Table 1 Reinforcement ratios p_0 , p_y and p_r .

type of stress-strain curve of concrete	reinforcement ratio		
	balanced p_0 , %	yield-limit p_y , %	rupture-limit p_r , %
(a) in Fig. 4	3.15	3.49	0.23
(b) in Fig. 4	3.41	4.39	0.35
(c) in Fig. 4	3.41	5.00	0.45
(d) in Fig. 4	6.31	6.97	0.47

(2) 破断限界鉄筋比 p_r

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張鉄筋が破断してしまう場合がある。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_r と名づける。破断限界鉄筋比 p_r 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、式 (2) において ϵ_{sr} を引張鉄筋の破断ひずみ ϵ_{sr} とおくことにより、次式で与えられる。

$$p_r = \{S(\epsilon_{cr}) / (\epsilon_{sr} + \epsilon_{cr}) + p' \sigma'_{sy} - N' / (bd)\} / \sigma_{sy} \dots (9)$$

$\sigma'_{sy} = \sigma_{sy}$ の場合には、次のようになる。

$$p_r = \{S(\epsilon_{cr}) / (\epsilon_{sr} + \epsilon_{cr}) \sigma_{sy}\} + p' - N' / (bd \sigma_{sy}) \dots (10)$$

破断限界鉄筋比 p_r は、降伏限界鉄筋比 p_y の場合と同様に、コンクリートの靱性ならびに圧縮鉄筋比が大となると増大し、軸圧縮力 N' が大となると減少する。引張鉄筋比 p と圧縮鉄筋 p' との差 $(p - p')$ が

$$p - p' < \{S(\epsilon_{cr}) / (\epsilon_{sr} + \epsilon_{cr}) \sigma_{sy}\} - N' / (bd \sigma_{sy}) \dots (11)$$

であれば、圧縮鉄筋の座屈が生じないかぎり降伏終了点以前に引張鉄筋は破断し、破断限界鉄筋比 p_r は存在しない。終局状態において引張鉄筋の破断を避けたい場合には、 $(p - p')$ を式 (11) の右辺の値以上とする必要がある。

$p' = 0$ 、 $N' = 0$ の場合には、次式となる。

$$p_r = S(\epsilon_{cr}) / (\epsilon_{sr} + \epsilon_{cr}) \sigma_{sy} \dots (12)$$

引張鉄筋の破断ひずみ ϵ_{sr} を 0.12 とし、降伏限界鉄筋比 p_y の計算に用いたのと同じ材料の条件で破断限界鉄筋比 p_r を計算し Table 1 に示す。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する。

降伏限界鉄筋比 p_y を上限とし破断限界鉄筋比 p_r を下限とする範囲に引張鉄筋比 p があれば ($p_y > p > p_r$)、引張鉄筋は降伏しかつ破断しない。 p_y ならびに p_r を考慮して定めた所定の範囲内におさまるように鉄筋比 p を制限することにより、はりの曲げ破壊時の靱性のある程度考慮した設計が可能となる。引張鉄筋比に上限と下限を設けることにより RC はりの靱性を確保する考え方は ACI 439 委員会により提案されている¹⁷⁾、本研究においては、コンクリートの圧縮強度と圧壊ひずみに代わって靱性そのものを用いるより合理的な上下限の算定式を提案した。

5. 断面の消散エネルギー

(1) 消散エネルギーについての解析による検討

RC はり断面のエネルギー吸収能、すなわちはりの単位長さ当たりのエネルギー吸収能の算定は、一般にモーメント曲率 ($M - \phi$) 関係に基づきしかも強度破壊点までを対象として行われることが多い¹⁸⁾。本節においては、RC はりの構成要素であるコンクリートならびに鉄筋の破壊性状に基づき、引張鉄筋の降伏終了点ないしは破断点までのはり断面のエネルギー消費量を計算するための算定式について検討する。

a) 降伏終了点までの断面の消散エネルギーの厳密式

引張鉄筋の降伏開始点から降伏終了点までの間にはり断面で消散するエネルギー W_{itr} は、引張鉄筋の消散エネルギー W_{istr} 、圧縮鉄筋の消散エネルギー W_{iscr} 、およびコンクリートの消散エネルギー W_{icr} の和として次式で与えられる。

$$W_{itr} = W_{istr} + W_{iscr} + W_{icr} \dots\dots\dots(13)$$

鉄筋の応力ひずみ曲線を、除荷時のヤング係数が初期ヤング係数に等しい完全弾塑性体のもとと仮定すると、

$$W_{istr} = pbd\sigma_{sy}(\epsilon_{sr} - \epsilon_{sy}) \dots\dots\dots(14)$$

$$W_{iscr} = p'bd\sigma'_{sy}(\epsilon'_{sr} - \epsilon'_{sy}) \dots\dots\dots(15)$$

となる。ここに、 ϵ_{sr} は式 (2) で与えられる降伏終了点における引張鉄筋のひずみである。 ϵ'_{sy} は降伏終了点における圧縮鉄筋のひずみであり、圧縮鉄筋位置を d' とすると ϵ_{sr} ならびにはり上縁コンクリートひずみ ϵ_{cr} より、

$$\epsilon'_{sr} = \epsilon_{cr}(1 - d'/d) - \epsilon_{sr}d'/d \dots\dots\dots(16)$$

で与えられる。

一方、 W_{icr} 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率 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、次式で与えられる。

$$W_{icr} = \int_0^{\epsilon_{cr}} \{S(\epsilon_c) - \sigma(\epsilon_c)^2 / (2E_c)\} d\epsilon_c b x_r / \epsilon_{cr} \dots\dots\dots(17)$$

降伏終了点における中立軸位置 x_r は、

$$x_r = \epsilon_{cr}d / (\epsilon_{sr} + \epsilon_{cr})$$

で与えられるので、

$$W_{icr} = \int_0^{\epsilon_{cr}} \{S(\epsilon_c) - \sigma(\epsilon_c)^2 / (2E_c)\} d\epsilon_c bd / (\epsilon_{sr} + \epsilon_{cr}) \dots\dots\dots(18)$$

となる。上式において $\{ \}$ 内は、圧縮ひずみが ϵ_c の位置におけるはり断面の単位面積当たりの消散エネルギー（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）である。

以上より、はり断面で消散するエネルギー W_{itr} は、

$$\begin{aligned} W_{itr} &= pbd\sigma_{sy}(\epsilon_{sr} - \epsilon_{sy}) + p'bd\sigma'_{sy}(\epsilon'_{sr} - \epsilon'_{sy}) \\ &+ \int_0^{\epsilon_{cr}} \{S(\epsilon_c) - \sigma(\epsilon_c)^2 / (2E_c)\} d\epsilon_c bd / (\epsilon_{sr} + \epsilon_{cr}) \\ &= bd[p\sigma_{sy}(\epsilon_{sr} - \epsilon_{sy}) + p'\sigma'_{sy}(\epsilon'_{sr} - \epsilon'_{sy}) \\ &+ \int_0^{\epsilon_{cr}} \{S(\epsilon_c) - \sigma(\epsilon_c)^2 / (2E_c)\} d\epsilon_c / (\epsilon_{sr} + \epsilon_{cr})] \dots\dots\dots(19) \end{aligned}$$

となる。式 (19) から明らかなように、RC はり断面の消散エネルギーには、コンクリートの圧縮強度は直接影響を及ぼさず、コンクリートの応力ひずみ曲線下の面積すなわち靱性が影響する。また、コンクリートならびに鉄筋の材質が同一で、鉄筋比ならびに軸圧縮応力

(N'/bd) が一定ならば、RC はり断面の消散エネルギーは断面寸法 (bd) に比例することとなる。

b) 降伏終了点までの断面の消散エネルギーの近似式

後述の計算結果ならびに実験結果からわかるように、降伏終了点に至るまでの断面の消散エネルギー W_{itr} の大部分を引張鉄筋の消散エネルギー W_{istr} が占めており、圧縮鉄筋の消散エネルギー W_{iscr} ならびにコンクリートの消散エネルギー W_{icr} が W_{itr} に占める割合は相対的に小さい。また、式 (14)、(15)、(18) からわかるように、 W_{istr} の計算は、 W_{iscr} や W_{icr} の計算に比べ簡単である。このため、引張鉄筋比が降伏限界鉄筋比以下の、通常の RC はりに対しては、断面のエネルギー吸収能を近似的に引張鉄筋の降伏変形による消散エネルギー W_{istr} によって評価することを提案する。つまり、

$$\begin{aligned} W_{itr} &\approx W_{istr} \\ &= p\sigma_{sy}bd(\epsilon_{sr} - \epsilon_{sy}) \dots\dots\dots(20) \end{aligned}$$

と近似する。引張鉄筋の降伏終了点におけるひずみ ϵ_{sr} は式 (2) で与えられるので、

$$\begin{aligned} W_{itr} &\approx p\sigma_{sy}bd \left\{ \frac{S(\epsilon_{cr})}{p\sigma_{sy} - p'\sigma'_{sy} + N'/(bd)} - (\epsilon_{cr} + \epsilon_{sy}) \right\} \\ &\dots\dots\dots(21) \end{aligned}$$

となる。この式より、RC はり断面の消散エネルギーはコンクリートの靱性 $S(\epsilon_{cr})$ ならびに圧縮鉄筋比 p' の増加により増加し、軸力 N' の増加により減少することがわかる。すなわち、RC はり断面の消散エネルギーに対する圧縮鉄筋の寄与としては、圧縮鉄筋自体が塑性変形することのほかに、引張鉄筋の塑性変形を増大させる効果があることがわかる。また、 p ならびに σ_{sy} を増加させても断面のエネルギー吸収能は増加せずむしろ減少することを小阪ら¹⁸⁾は数値計算の結果から指摘しているが、このことは式 (21) により解析的に証明できる。さらに $p'=0$ 、 $N'=0$ の場合、

$$W_{itr} \approx S(\epsilon_{cr}) - (\epsilon_{cr} + \epsilon_{sy})p\sigma_{sy}bd \dots\dots\dots(22)$$

よって、 $p\sigma_{sy}$ ($=\sigma_{cr}$ 、式 (3) 参照) が比較的小さい単鉄筋はりの場合には、式 (22) の $\{ \}$ 内の第 2 項は第 1 項に比べ十分小さくなる。 $p > p_r$ で引張鉄筋が破断しないならば、

$$W_{itr} \approx S(\epsilon_{cr})bd \dots\dots\dots(23)$$

となる。すなわち、 $p\sigma_{sy}$ が比較的小さい単鉄筋はり断面の消散エネルギーは、コンクリートの靱性 $S(\epsilon_{cr})$ とはりの断面寸法 bd の大きさにはほぼ比例し、鉄筋比 p ならびに鉄筋降伏強度 σ_{sy} の影響をほとんど受けないことが式 (23) よりわかる。すなわち、後述の Table 2 の計算結果からもわかるように、 p が相対的に大きくなれば、 ϵ_{sr} が小さくなるため W_{itr} は p の影響をほとんど受けない。同様に、 σ_{sy} が大きくなった場合も ϵ_{sr} が小

さくなり W_{itr} は σ_{sy} の影響をほとんど受けない。

式 (19)~(21) にみられるように、本研究においては、RC はり断面のエネルギー吸収能の算定式を、材料特性に立脚し、しかも実験定数や係数を用いることなく従来の算定式^{(7), (8)}に比べきわめて簡明に導くことができた。算定式が簡明になった理由としては次の点が挙げられる。

- (i) RC はり断面のエネルギー吸収能力を加力エネルギーではなく消散エネルギーによって評価したこと、
- (ii) エネルギー吸収の終了点を引張鉄筋の降伏終了点としたこと、
- (iii) コンクリートの破壊性状を、圧縮強度 σ_{cu} ならびに圧壊ひずみ ϵ_{cu} に代わって、靱性すなわち応力ひずみ曲線下の面積 $S(\epsilon_{cr})$ によって表示したこと、
- (iv) さらに、式 (20), (21) については、RC はりのエネルギー吸収能を引張鉄筋の降伏変形による消散エネルギーで代表させたこと。

c) 破断点までの断面の消散エネルギーの近似式

鉄筋比 p が破断限界鉄筋比 p_f より小さい場合には、降伏終了点が生ずる以前に引張鉄筋が破断する。この場合のはり断面で消散するエネルギー W_{itr} は、その大部分を引張鉄筋の塑性変形による消散エネルギー W_{istr} が占めていると考えれば、式 (20) の ϵ_{sr} を ϵ_{sf} とおくことにより、次式で与えられる。

$$W_{itr} \approx W_{istr} = p\sigma_{sy}bd(\epsilon_{sf} - \epsilon_{sy}) \dots\dots\dots(24)$$

破断点までの断面の消散エネルギー W_{itr} は、式 (20)

で与えられる降伏終了点までの断面の消散エネルギー W_{itr} の上限である。

(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 、圧縮鉄筋比 p' ならびに軸圧縮力 N' の影響について、数値計算により検討する。

はり断面は Fig. 5 (a) に示すように長方形とし、幅 $b=10$ cm、有効高さ $d=15.0$ cm、圧縮鉄筋位置 $d'=2.0$ cm とする。コンクリートの応力ひずみ曲線の形状は、Fig. 5 (b) に示すように三角形とし、圧縮強度 $\sigma_{cu}=30$ MPa、応力がゼロとなる最終ひずみ $\epsilon_{ce}=0.014$ とする。引張鉄筋の応力ひずみ曲線は Fig. 3 (b) に示すような完全弾塑性体のものとし、降伏強度 $\sigma_{sy}=\sigma'_{sy}=360$ MPa、ヤング係数 $E_s=200$ GPa、降伏ひずみ $\epsilon_{sy}=0.0018$ とする。断面の消散エネルギー W_{itr} 、引張ならびに圧縮鉄筋における消散エネルギー W_{istr} 、 W_{iscr} ならびにコンクリートにおける消散エネルギー W_{icr} を式

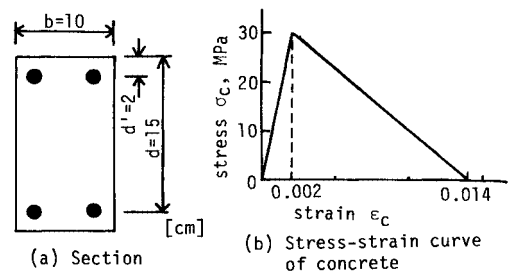


Fig. 5 Conditions for calculation.

Table 2 Calculated dissipating energies at yield-ending point.

case	conditions				stress, strain and neutral axis position at yield-ending point					dissipating energies at yield-ending point			
	p %	p' %	p'/p	N' kN	x_r cm	σ_{cr}	ϵ_{cr}	ϵ_{sr}	ϵ'_{sr}	W_{itr} J/m	W_{istr} J/m	W_{iscr} J/m	W_{icr} J/m
(i)	0.4	0	0	0	1.381	14.4	0.0134	0.1321	-	0.297	0.281	-	0.016
	0.5	0	0	0	1.715	18.0	0.0133	0.1030	-	0.293	0.273	-	0.020
	1.0	0	0	0	3.276	36.0	0.0126	0.0451	-	0.271	0.234	-	0.037
	1.5	0	0	0	4.683	54.0	0.0118	0.0260	-	0.245	0.196	-	0.049
	2.0	0	0	0	6.011	72.0	0.0111	0.0166	-	0.220	0.160	-	0.060
	2.5	0	0	0	7.256	90.0	0.0104	0.0111	-	0.192	0.125	-	0.067
	3.0	0	0	0	8.410	108.0	0.0097	0.0076	-	0.167	0.095	-	0.072
	4.0	0	0	0	10.51	144.0	0.0082	0.0035	-	0.110	0.036	-	0.074
	4.7	0	0	0	12.00	169.0	0.0072	0.0018	-	0.070	0	-	0.070
(ii)	2.0	0.4	0.2	0	4.972	57.6	0.0117	0.0236	0.0070	0.299	0.235	0.011	0.052
	2.0	0.8	0.4	0	3.836	43.2	0.0122	0.0355	0.0059	0.423	0.364	0.018	0.042
	2.0	1.2	0.6	0	2.656	28.8	0.0128	0.0595	0.0032	0.662	0.623	0.009	0.030
	2.0	1.6	0.8	0	2.181	14.4	0.0212	0.1246	0.0018	1.359	1.326	0	0.033
(iii)	2.0	0	0	20	6.974	85.6	0.0106	0.0122	-	0.178	0.112	-	0.066
	2.0	0	0	40	7.813	99.2	0.0100	0.0092	-	0.149	0.080	-	0.070
	2.0	0	0	60	8.689	112.8	0.0095	0.0069	-	0.128	0.055	-	0.073
	2.0	1.0	0.5	20	4.358	49.6	0.0120	0.0293	0.0065	0.369	0.297	0.025	0.047
	2.0	1.0	0.5	40	5.391	63.2	0.0115	0.0205	0.0072	0.287	0.202	0.029	0.055
	2.0	1.0	0.5	60	6.337	76.8	0.0109	0.0149	0.0075	0.234	0.142	0.031	0.062
	2.0	2.0	1.0	20	2.178	13.6	0.0221	0.1301	0.0018	1.419	1.386	0	0.034
	2.0	2.0	1.0	40	2.526	27.2	0.0129	0.0637	0.0027	0.707	0.669	0.010	0.029
	2.0	2.0	1.0	60	3.669	40.8	0.0124	0.0383	0.0056	0.476	0.394	0.041	0.040

(14)~(19)に基づき、次の3通りの場合について計算し、結果を Table 2 に示す。

(i) 圧縮鉄筋比 $p'=0$ 、軸圧縮力 $N'=0$ 、で引張鉄筋比 p を 0.4~4.7% に変化させた場合、

(ii) 軸圧縮力 $N'=0$ 、引張鉄筋比 $p=2.0\%$ とし、圧縮鉄筋比 p' を 0.4~1.6% に変化させた場合、

(iii) 引張鉄筋比 $p=2.0\%$ 、圧縮鉄筋比 $p'=0, 1.0, 2.0\%$ とし、軸圧縮力 N' を 20, 40, 60 kN に変化させた場合。

なお、上記のコンクリートならびに鉄筋を用いた軸圧縮力のない単鉄筋コンクリートはりの降伏限界鉄筋比 p_y ならびに破断限界鉄筋比 p_r (ただし引張鉄筋の破断ひずみ $\epsilon_{sr}=0.12$ とした場合) は、それぞれ 4.7%, 0.44% である。

(i) の場合 ($p'=0, N'=0, p=0.4\sim 4.7\%$)、鉄筋比 p が降伏限界鉄筋比 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 W_{istr} が占めている。鉄筋比 p が小さい場合 ($p=0.5\sim 1.5\%$) 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 の影響をほとんど受けずば一定となるが、この計算結果は、式 (22) をもとに検討した解析結果に一致する。

(ii), (iii) の場合の計算結果から明らかなように、圧縮鉄筋比 p' の増加につれて消散エネルギー W_{itr} 、

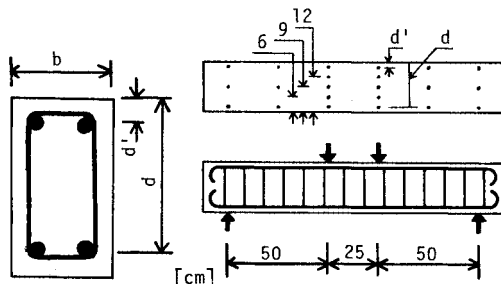


Fig. 6 Beam specimen.

Table 3 Test conditions.

name	section			concrete		reinforcement			
	b cm	d cm	d' cm	kind	σ_{cu} MPa	p %	σ_{sy} MPa	p' %	σ_{sy} MPa
N-0	10	15.4	-	plain	36.3	1.64	353	0	-
N-10	10	15.4	2.5	plain	36.3	1.64	353	0.93	352
N-13	10	15.4	2.7	plain	36.3	1.64	353	1.64	353
F-0	10	15.4	-	fiber	44.9	1.64	353	0	-
F-10	10	15.4	2.5	fiber	44.9	1.64	353	0.93	352
F-13	10	15.4	2.7	fiber	44.9	1.64	353	1.64	353

plain: plain con., fiber: steel fiber reinforced con.

W_{istr} は著しく増加し、軸圧縮力 N' の増加につれて W_{itr} 、 W_{istr} は減少する。複鉄筋はりで圧縮鉄筋比 p' が大きい場合および軸圧縮力が存在する場合を除き、断面の消散エネルギー W_{itr} の大部分を引張鉄筋の消散エネルギー W_{istr} が占める。軸圧縮力がない単鉄筋はりで鉄筋比 $p=0.4\%$ の場合、軸圧縮力がない複鉄筋はりで $p-p'=0.4\%$ の場合ならびに、軸圧縮力 $N'=20$ kN、 $p=2.0\%$ 、 $p'=1.0\%$ の場合には、破断ひずみ ϵ_{sr} をたとえば 0.12 とすると、計算上の降伏終了点における引張鉄筋ひずみ ϵ_{sr} はこの破断ひずみより大となる。すなわち、これらの場合には、降伏終了点が生じる以前に引張鉄筋が破断することとなる。

(ii), (iii) のいずれの場合についても、圧縮鉄筋の降伏変形による消散エネルギー W_{iscr} は、引張鉄筋ならびにコンクリートの消散エネルギーに比べきわめて小さい。

(3) 消散エネルギーについての載荷実験による検討

前述の解析結果ならびに数値計算結果の妥当性について検討するため、コンクリートの種類ならびに圧縮鉄筋比を変化させた 6 種類のはりについて載荷実験を行った。

RC はりの断面形状ならびに載荷スパンを Fig. 6 に示す。コンクリートには、普通コンクリートならびに鋼繊維補強コンクリート (鋼線切断繊維: 引張強度 = 1.29 GPa, 寸法 = $\phi 0.5 \times 30$ mm, 2% 混入) を用いた。引張鉄筋比 $p=1.64\%$ とし D 13 mm ($\sigma_{sy}=353$ MPa, $\sigma_{su}=516$ MPa, 伸率 = 25.8%) を 2 本用いた。圧縮鉄筋比 p' は、0, 0.92, 1.64% の 3 種類とし、 $p'=0.92\%$ の場合には D 10 mm ($\sigma_{sv}=352$ MPa, $\sigma_{su}=501$ MPa, 伸率 = 27.6%) を 2 本用いた、 $p'=1.64\%$ の場合には引張鉄筋と同じ D 13 mm を 2 本用いた。実験条件を Table 3 に示す。

RC はりの変位 (たわみ) は載荷点位置で計測し、荷重と変位との関係を X-Y レコーダーに記録した。コンクリート (2 種類) ならびに圧縮鉄筋比 (3 種類) の異なる 6 種類、合計 12 本のはりについて数回の漸増繰返し載荷を行い、各除荷点に至るまでの載荷曲線と除荷点からの除荷曲線で囲まれる面積を求め、はり全体 (単位長さ当たりではない) で消散したエネルギー W_t とした。またはり側面のコンクリート上に Fig. 6 に示すように標点プラグを貼り、引張鉄筋位置ならびに圧縮鉄筋位置における残留変形量の総和 (両支点間) を計測し、残留変形量の総和と鉄筋の降伏荷重との積をはり全域の引張鉄筋ならびに圧縮鉄筋で消散したエネルギー W_{st} および W_{sc} とした。コンクリートで消散したエネルギー W_c は ($W_t - W_{st} - W_{sc}$) として定量化した (文献 7), 8) 参照)。

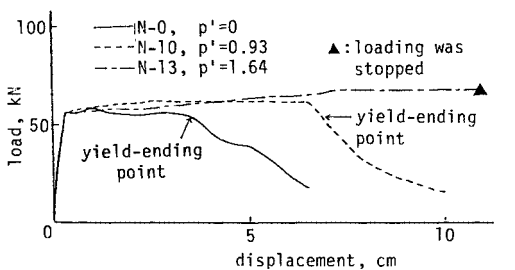
同一条件で試験した 2 本のはりの荷重変位曲線の形状

は、ほぼ同一となった。Fig. 7には、各条件について1本ずつのはりの荷重変位曲線を示す。

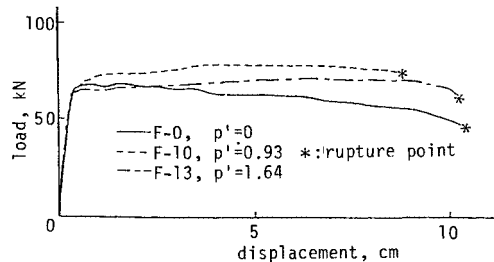
普通コンクリートを用いたはりの場合、圧縮鉄筋比 p' の増加に伴ってはりの降伏後の高荷重レベルにおける変位量が大きくなった。N-0のはり ($p'=0\%$) ならびに N-10のはり ($p'=0.92\%$) の場合、引張鉄筋のひずみが増加しなくなる点すなわち降伏終了点が存在し、この点のはりの耐力低下が急激に生ずる点とほぼ一致した。

N-13のはり ($p=p'=1.64\%$) では、変形が大となり荷重点ローラがずれ荷重を中止したが、本実験の範囲内では降伏終了点は存在しなかった。

鋼繊維補強コンクリートを用いたはりでは、いずれも降伏後の高荷重レベルにおける変位量が大きくなり、降伏終了点は存在せずに引張鉄筋が破断した。鋼繊維補強コンクリートを用いたはりの場合いずれも、引張鉄筋の破断直前の平均ひずみ(検長: 25 cm)は約 13% であった。



(a) Beams made with plain concrete



(b) Beams made with steel fiber reinforced concrete

Fig. 7 Load-displacement curves of RC beams.

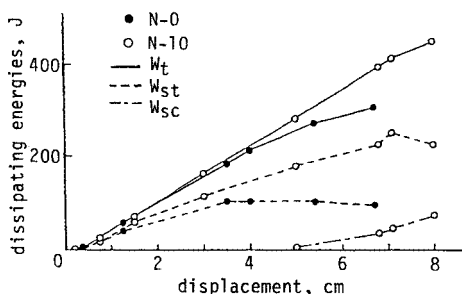


Fig. 8 Dissipating energies of RC beams.

普通コンクリートを用いた N-0のはりと N-10のはりについて、消散エネルギー W_t , W_{st} , W_{sc} とはりの変位との関係を Fig. 8 に示す。降伏終了点が存在するこれらのはりにおいては、降伏終了点において引張鉄筋の消散エネルギー W_{st} は増加しなくなった。圧縮鉄筋の消散エネルギー W_{sc} は引張鉄筋の消散エネルギー W_{st} よりはるかに小となった。降伏終了点におけるはり全体の消散エネルギー W_t の大部分を引張鉄筋の消散エネルギーが占めた。

6. 靱性パラメーター

5. において、RC はり断面のエネルギー吸収能を、引張鉄筋の降伏開始点から降伏終了点ないしは破断点までの引張鉄筋の消散エネルギーによって評価することを提案した。現行のひびわれや最大耐力などの限界状態とともに、今後靱性を対象とした RC はり断面の設計方法の確立が重要であると考えられる。靱性を考慮した断面設計を行う場合には靱性パラメーターが必要となるが、本研究により、たとえば次のようなパラメーターが考えられる。

(i) 断面の消散エネルギー W_u

$$W_u = \min\{W_{ur}, W_{ud}\} \dots \dots \dots (25)$$

すなわち、引張鉄筋の降伏変形をもとにして、式 (20) で与えられる降伏終了点までの断面の消散エネルギー W_{ur} または式 (24) で与えられる破断点までの断面の消散エネルギー W_{ud} のうち、いずれか小さい方である。

(ii) 断面の塑性回転角 ϕ_p

$$\phi_p = W_u / M_u \dots \dots \dots (26)$$

すなわち、引張鉄筋の降伏開始点から、降伏終了点または破断点までの間の断面の塑性回転角であって、断面の消散エネルギー W_u を最大曲げモーメント M_u で除した値である。

7. 今後の課題

今後、本研究で提案した RC はりの靱性評価方法の精度をさらに高め、取扱いを容易にするとともに適用範

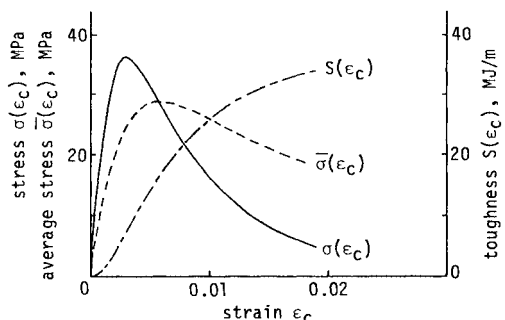


Fig. 9 Expressions of properties of concrete.

囲を広げるためには、なお検討が必要であると考えられる。

まず鉄筋については、加工硬化の影響、破断ひずみの値、圧縮鉄筋の座屈についての検討をする必要がある。コンクリートについては、はり圧縮部における応力ひずみ関係と円柱供試体から求めた軸圧縮下の応力ひずみ曲線との関係について検討を必要とする。なお、応力ひずみ曲線下の面積 $S(\epsilon_c)$ や平均応力 $\bar{\sigma}_c(\epsilon_c) = (S(\epsilon_c)/\epsilon_c)$ を用いた計算を行う場合には、コンクリートの力学特性を、応力ひずみ $(\sigma_c(\epsilon_c) - \epsilon_c)$ 関係だけでなく、Fig. 9 に例を示すように、 $S(\epsilon_c) - \epsilon_c$ 関係や $\bar{\sigma}_c(\epsilon_c) - \epsilon_c$ 関係によって表示しておく为好都合である。

一般に、はりの破壊域の広がりは载荷条件にも依存するが、はり断面の靱性とはり全体の靱性との関係づけるには、この破壊域の広がりについての検討が必要である。

8. ま と め

本研究においては、曲げを受ける RC はりの破壊過程を特徴づける点として、引張鉄筋の降伏開始点、降伏終了点、破断点を取り上げ、これらの点をもとに、RC はりの破壊性状と鉄筋比との関係、ならびに RC はり断面のエネルギー吸収能に及ぼす材料特性と断面特性の影響について検討するとともに、RC はり断面の靱性を評価するためのパラメーターを提案した。得られた主な結論は次のとおりである。

(1) 曲げを受ける RC はりについて、引張鉄筋の降伏が生じる限界の降伏限界鉄筋比 p_y ならびに破断が生じる限界の破断限界鉄筋比 p_f を算定する式を、コンクリートの靱性すなわち応力ひずみ曲線下の面積を用いた形式で提示した。

(2) 降伏終了点までに RC はり断面で消散するエネルギーを算定するための式を導くとともに、この断面の消散エネルギーに及ぼすコンクリートならびに鉄筋の材料特性および断面特性の影響について解析的に検討したような結果を得た。

RC はり断面の消散エネルギーには、コンクリートの強度は直接は影響せず、コンクリートの靱性が影響する。

RC はり断面の消散エネルギーに対する圧縮鉄筋の寄与としては、圧縮鉄筋自体が降伏変形することのほか引張鉄筋の降伏変形を増大させる効果がある。なお、数値計算結果ならびに载荷実験結果からは、前者の効果は小さく、後者の効果が大きいことが明らかとなった。

$p\sigma_{sv}$ が比較的小さい単鉄筋はりの断面の消散エネルギーは、コンクリートの靱性とはり断面の寸法 bd の大きさにほぼ比例し、鉄筋比 p や鉄筋の降伏強度の影響をほとんど受けない。

(3) 鉄筋比と軸圧縮力を変化させた数値計算の結果、ならびにコンクリートの種類と圧縮鉄筋比を変化さ

せた载荷実験の結果より、通常、断面の消散エネルギーの大部分を引張鉄筋の降伏変形による消散エネルギーが占めることが明らかとなった。

(4) RC はり断面の靱性を評価するためのパラメーターとして、引張鉄筋の降伏開始点から降伏終了点あるいは破断点に至る間の断面の消散エネルギー W_{it} ならびに W_{it} をもとに算定される塑性回転能 $\phi_p (= W_{it}/M_u)$ を提示した。

付録 降伏終了点における応力とひずみの算定

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 に至るまでの応力ひずみ曲線によって囲まれる面積を $S(\epsilon_c)$ とし、一方、鉄筋の応力ひずみ曲線を完全弾塑性体のもので仮定する。部材軸に直角なはり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ともに降伏している場合には、

$$T = pbd\sigma_{sv} \dots\dots\dots (A \cdot 1)$$

$$C = S(\epsilon_c)bx/\epsilon_c + p'bd\sigma'_{sv} \dots\dots\dots (A \cdot 2)$$

となる。ここに p 、 p' は引張および圧縮鉄筋比、 σ_{sv} 、 σ'_{sv} は引張鉄筋および圧縮鉄筋の降伏強度、 bd ははり断面の幅および有効高さ、 x は中立軸位置、 ϵ_c ははり上縁ひずみである。引張鉄筋ひずみを ϵ_s とすると x は、

$$x = \epsilon_s/(\epsilon_s + \epsilon_c)d \dots\dots\dots (A \cdot 3)$$

で与えられ、式 (A・2) は

$$C = S(\epsilon_c)bd/(\epsilon_s + \epsilon_c) + p'bd\sigma'_{sv} \dots\dots\dots (A \cdot 4)$$

となる。軸圧縮力を N' とすると外力と内力とのつり合い ($N' = C - T$) より、

$$N' = S(\epsilon_c)bd/(\epsilon_s + \epsilon_c) + p'bd\sigma'_{sv} - pbd\sigma_{sv} \dots\dots\dots (A \cdot 5)$$

となる。したがって、はり上縁コンクリートひずみが ϵ_c のときの引張鉄筋ひずみ ϵ_s は、次式で与えられる。

$$\epsilon_s = S(\epsilon_c)/\{p\sigma_{sv} - p'\sigma'_{sv} + N'/(bd)\} - \epsilon_c \dots\dots\dots (A \cdot 6)$$

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、

$$d\epsilon_s/d\epsilon_c = 0 \dots\dots\dots (A \cdot 7)$$

式 (A・6) より、

$$\{dS(\epsilon_c)/d\epsilon_c\}/\{p\sigma_{sv} - p'\sigma'_{sv} + N'/(bd)\} - 1 = 0 \dots\dots\dots (A \cdot 8)$$

$dS(\epsilon_c)/d\epsilon_c$ はコンクリートの応力ひずみ曲線において、ひずみが ϵ_c のときのコンクリート応力 σ_c である。

したがって降伏終了点に対応するはり上縁応力 σ_{cr} は、

$$\sigma_{cr} = p\sigma_{sv} - p'\sigma'_{sv} + N'/(bd) \dots\dots\dots (A \cdot 9)$$

で与えられる。また、降伏終了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の下降域において、応力が $\{p\sigma_{sv} - p'\sigma'_{sv} + N'/(bd)\}$ に等しくなる点のひずみとして与えられる。

一方、降伏終了点に対応する引張鉄筋の応力 σ_{sr} は降伏強度 σ_{sv} であり、引張鉄筋ひずみ ϵ_{sr} は式 (A・6) に

において $\epsilon_c = \epsilon_{cr}$ とおくことにより次式で与えられる

$$\epsilon_{sr} = S(\epsilon_{cr}) / \{ p\sigma_{sy} - p'\sigma'_{sy} + N' / (bd) \} - \epsilon_{cr} \dots (A \cdot 10)$$

なお、はり上縁ひずみ ϵ_c が上記の ϵ_{cr} に達しても圧縮鉄筋が降伏していない場合には、さらに ϵ_c が増大し、圧縮鉄筋が降伏する点（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）が引張鉄筋の降伏終了点となる。したがって、いずれにしても引張鉄筋の降伏終了点においては圧縮鉄筋は降伏している。

圧縮鉄筋が降伏するときのはり上縁ひずみ 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、圧縮鉄筋降伏時の引張鉄筋ひずみ ϵ_{sc} とはり上縁ひずみ ϵ_{cc} との関係は適合条件より

$$\epsilon_{sc} = \epsilon_{cc}(d - d') / d' - \epsilon'_{sy} d' / d' \dots \dots \dots (A \cdot 11)$$

となる。一方、式 (A・6) のつり合い条件より、

$$\epsilon_{sc} = S(\epsilon_{cc}) / \{ p\sigma_{sy} - p'\sigma'_{sy} + N' / (bd) \} - \epsilon_{cc} \dots (A \cdot 12)$$

式 (A・11) ならびに式 (A・12) より、圧縮鉄筋降伏時の ϵ_{sc} と ϵ_{cc} が求まる。 ϵ_{cc} が前述の ϵ_{cr} よりも大きい場合には、降伏終了点におけるはり上縁コンクリートひずみは ϵ_{cc} となりコンクリート応力は ϵ_{cc} に対応する応力（ゼロまたはほとんどゼロ）となる。このときの引張鉄筋ひずみは ϵ_{sc} 、応力は σ_{sy} である。

以上のようにして、降伏終了点におけるコンクリートならびに引張鉄筋の応力とひずみが求まる。式 (A・10) または式 (A・12) で与えられる引張鉄筋ひずみが鉄筋の破断時の平均ひずみ ϵ_{sr} を越える場合には、降伏終了点が生ずる以前に引張鉄筋が破断する。

軸圧縮力 N' がなく、圧縮鉄筋比 p' が引張鉄筋比 p に近く、かつコンクリートの応力ひずみ曲線の下降域において応力が急激にゼロとなるように応力ひずみ曲線を仮定した場合には、 $\epsilon_{sc} > \epsilon_{sr}$ となることが計算上あり得る。しかし $p > p'$ の場合、降伏終了点に至るまでに圧縮鉄筋は降伏しており降伏終了点における引張鉄筋ひずみは式 (A・10) で与えられるものと仮定する方が取扱いが容易となり好都合である。

参 考 文 献

- 1) 小柳 洽・六郷恵哲：コンクリートの破壊と靱性評価，コンクリート工学，Vol. 20, No. 4, pp. 8~14, 1982年4月。
- 2) Bieniawski, Z. T. : Mechanism of Brittle Fracture of Rock, Part 1-Theory of the Fracture Process, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Vol. 4, pp. 395~406, 1967.
- 3) 小柳 洽・六郷恵哲・内田裕市：コンクリートの破壊現

- 象の安定性とその計測，コンクリート工学，Vol. 20, No. 6, pp. 83~89, 1982年6月。
- 4) JCI 規 準：繊維補強コンクリートの圧縮強度及び圧縮タフネス試験方法（案），コンクリート工学，Vol. 21, No. 3, pp. 4~5, 1983年3月。
- 5) 谷川恭雄・畑中重光：靱性改善のための複合技術とその動向，コンクリート工学，Vol. 21, No. 5, pp. 14~22, 1983年5月。
- 6) 六車 照：鉄筋コンクリート断面の破壊時コンクリート圧縮縁ひずみに関する研究，材料，第24巻，第260号，pp. 441~446, 1975年5月。
- 7) 六郷恵哲・岡田 清・小柳 洽：鉄筋コンクリートはりの曲げ破壊過程に関するエネルギー的考察，土木学会第33回年講概要集，第5部，pp. 245~246, 1978年9月。
- 8) Okada, K., Koyanagi, W. and Rokugo, K. : Energy Dissipation in Flexural Failure Process of Reinforced Concrete Beams, Memoirs of Fac. of Eng., Kyoto Univ., Vol. 42, pp. 209~227, April, 1980.
- 9) Iqbal, M. and Hatcher D. S. : Post-crushing Behavior of Unbound Concrete Beams, J. of Str. Div., ASCE, Vol. 11, No. ST 11, pp. 2303~2316, Nov. 1975.
- 10) 鈴木計夫・藤岡正見：プレストレストコンクリート曲げ部材断面の終局域特性について一終局限界点の設定とその特性，セメント技術年報，31巻，pp. 447~481, 1977年。
- 11) 鈴木計夫・中塚 信・藤岡正見：プレストレスト鉄筋コンクリート（PRC）曲げ部材断面の終局域特性について一算定式と算例による考察一，セメント技術年報，第32巻，pp. 436~439, 1978年。
- 12) 鈴木計夫・中塚 信・榎本秀文・角 一行：PCおよびRC梁部材の終局域特性について，セメント技術年報，第34巻，pp. 433~437, 1980年。
- 13) 鈴木計夫・中塚 信・阿波野昌幸：PRC梁部材断面の終局限界点とその特性，セメント技術年報，第36巻，pp. 470~473, 1982年。
- 14) 小柳 洽・六郷恵哲・内田裕市・岩瀬裕之：複鉄筋コンクリートはりの靱性評価，第5回コンクリート工学年講論文集，pp. 333~336, 1983年。
- 15) 矢村 潔：鉄筋コンクリートはり部材の塑性挙動とその設計への適用に関する基礎的研究，京都大学博士論文，1979年。
- 16) Hognestad, E., Hanson, N. W., McHenry, D. : Concrete Stress Distribution in Ultimate Strength Design, ACI J. Proc. Vol. 52, No. 4, pp. 455~480, 1955.
- 17) ACI Committee 439 : Effect of Steel Strength and of Reinforcement Ratio on the Mode of Failure and Strain Energy Capacity of Reinforced Concrete Beams, ACI J. Proc. Vol. 66, No. 3, pp. 165~173, 1969.
- 18) 小阪義夫・森田司郎：鉄筋コンクリート構造，丸善1975.

(1984. 2. 9・受付)