

[161] 純曲げを受ける RC 梁の破壊集中性に関する研究

正会員 小阪 義夫 (名古屋大学工学部)
 正会員 谷川 恭雄 (三重大学工学部)
 正会員 畑中 重光 (名古屋大学大学院)
 正会員 〇三輪 隆治 (名古屋大学大学院)

1. まえがき

RC 梁の塑性設計の際には、構成部材が十分延性的であり、かつ構造物が崩壊機構 (mechanism) を形成するに足るモーメントの再分布が行われることが前提となる。RC 部材の塑性変形挙動、とくにその延性性質 (ductility) を解析的に論ずるには、塑性ヒンジ領域における変形性能と塑性ヒンジ領域の広がり及び各種要因の影響を把握しておく必要がある^{1)~3)}。本報では、その第一段階として、RC 梁の等曲げモーメント区間内における塑性域の曲率分布について検討する。

2. RC 梁の曲げスパン内における破壊の集中性

RC 梁の曲げ靱性 (toughness) は、2 点集中荷重実験によって評価される場合が多い。この場合、等曲げモーメント区間断面の力学特性が均一であれば、同区間における任意断面のモーメント (M) - 曲率 (ϕ) 挙動は同一となる。すなわち、同区間における破壊は均等に生ずるはずである。しかし、通常、実験の際に観察される破壊は、ある領域に集中し、その領域は、通常の RC 梁のおよそ $(1 \sim 2) \cdot h$ (ここに、 h : 梁せい) となる。等曲げモーメント区間にこのような破壊域が集中する理由として、荷重点近傍の応力の不均等性、コンクリートおよび鉄筋の材質の不均質性およびコンクリート - 鉄筋間の付着の不均一性などが考えられる。これらの諸要因を確率変数として取り扱うことにより、破壊の集中位置と集中性を論ずることも可能であるが、本研究の目的にはなじまない。ここでは等曲げモーメント区間内の任意の位置に生じた "weakest link" に破壊が集中するものと仮定して、破壊領域の広がりおよび破壊領域における塑性変形挙動を求め、曲げスパン全域の塑性変形量を把握することにする。

3. 実験方法

RC 梁の曲げ荷重実験および角柱体の一軸圧縮実験を行った。RC 梁の曲げ荷重実験では表-1 に示すように、実験要因としてコンクリートの水セメント比 (W/C)、あばら筋のピッチ (S)、鋼繊維の体積混入率 (V_f)、引張鉄筋比 (P_t)、複筋比 (γ)、および荷重スパン (l_b) を取り上げた。RC 梁の配筋図を図-1 に示す。角柱体については、表-2 に示すように、実験要因として RC 梁の圧縮部に相当する要因を取り上げた。角柱体の寸法はすべて $9.7 \times 9.7 \times 19.4$ cm とし、横打ちによって製作した。

コンクリートの製作には、普通ポルトランドセメント、川砂 (5 mm 未満)、川砂利 (5~15 mm)、および鋼繊維 (フック付せん断ファイバー、形状: $0.5 \times 0.5 \times 30$ mm、引張強度: 7000 kg f/cm^2) を使用した。鉄筋の力学性質を表-3 に示す。コンクリートの練り混ぜは分割混練とし、鋼繊維を混入する場合は最初の混練時にミキサー内に散布した。試験体はすべて材令 3 日目に脱型後、実験室内

表-1 RC 梁の曲げ荷重実験の概要

Notation of specimen	V_f	W/C	P_t	γ	l_b	Shape & pitch of stirrup
55-A10-0.4 γ $l_s=10$ cm A type stirrup W/C=0.55	0	0.45	2.1	0	3h	A10
					2h	0, A10
					1.4	A10
					2.1	0, A5, A7.5, A10, B5, B10
55-0-2h $l_b=2h$ plain conc.	1.5	0.55	2.1	0	4h	0, A10
					0.19	A5, A10
					0.38	A10
					3h	A5, A10

[Notes] V_f : Volume fraction of steel fiber, W/C: Water-cement ratio, P_t : Tensile reinforcement ratio, γ : P_c/P_t , P_c : Compressive reinforcement ratio, l_b : Length of flexural span, h : Height of RC beam.

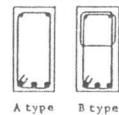


表-2 角柱体の一軸圧縮実験の概要

Notation of specimen	V_f	W/C	Bar*	Shape & pitch of hoop
55-A10 $l_s=10$ cm A type hoop W/C=0.55	0	0.45	$\phi 3$	0, A10
				0, A5, A7.5, A10, B5, B10
				D10, 0, A5, A10
55-A10-D10 $l_b=2h$ Bar*	1.5	0.55	$\phi 3$	0, A10
				0, A5, A10

[Notes] V_f : Volume fraction of steel fiber, W/C: Water-cement ratio, *: Longitudinal steel bar

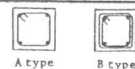


表-3 使用鉄筋の力学性質

Kind	f_y (kgf/cm ²)	f_u (kgf/cm ²)	ρ (%)
D13	4010	6000	24.1
D10	4050	5660	25.8
$\phi 4$ -H	5180	5420	21.3
$\phi 4$ -L	3310	3570	29.9
$\phi 3$	3860	4220	14.2

[Notes] f_y : Yield stress, f_u : Maximum stress, ρ : Elongation

にて空中養生を行った。試験体の個数は、梁試験体については原則として各要因毎に1体、主要な要因については2~3体とし、角柱体は各要因毎に3体とした。

梁試験体の荷重および曲率測定要領を図-2に示す。荷重は支持スパン9h (=174.2cm)の三等分点荷重とし、曲げスパン($l_b = 3h$)中央部の2hの領域を4分割した各区間の曲率を測定した。終局状態に至るまでの曲率の測定はコンクリートの打設時に各区間の境界にあらかじめセットした2本の鋼棒を介して梁の上下端面に計16個の変位計を取り付けて行った。また、荷重上昇域のひずみ分布は、梁試験体の上下面に貼付したワイヤー・ストレイン・ゲージにより測定した。せん断スパンには図-2に示すような鋼製枠を取り付け、せん断破壊を防止した。角柱体の一軸圧縮荷重には高剛性試験機を用い、毎分約 2×10^{-3} のひずみ速度で、縦ひずみが 15×10^{-3} に至るまで継続荷重した。縦ひずみは鋼製枠によって試験体に取り付けた変位変換器(測定長17.8cm)により測定した。

4. 実験結果とその考察

4.1 各区間のモーメント-曲率曲線

図-3(a)および(b)に各測定区間のモーメント(M/bd^2) - 曲率($d\phi$)曲線(以下、M- ϕ 曲線と略記)の実測例を示す。図中には、曲げスパン内の破壊状況が併示してある。これらの図によれば、実測のM- ϕ 曲線は曲率の測定位置によって著しく相違する。すなわち、終局状態(ここでは、 $d\phi$ の平均値が0.1の時点)に至るまで曲率が漸増する区間と、ある時点から曲率の増加が急減もしくは曲率が減少する区間が存在し、曲率が漸増する区間は破壊が進行する区間に相当する。このような曲げスパン内の曲率分布と、試験体の破壊状況との対応は他のすべての試験体についてもみられた。また、図には示していないが各区間の曲率-圧縮縁ひずみ関係および曲率-引張縁ひずみ関係はほぼ同一曲線上にあることから、区間毎の断面の力学性状に著しい不均質性はないものと考えられる。このことから上記のようなM- ϕ 曲線の分岐現象はモーメント低下域、すなわち圧縮部コンクリートのひずみ軟化域における不安定現象^{4)~7)}と対応すると考えられる。なおM- ϕ 曲線が分岐する時点の曲率の平均値は、破壊が延性的なほど大きくなる傾向がある。

図-4(a)および(b)は、それぞれ曲率測定域(2h)全区間の ϕ の測定値を平均して求めたM- ϕ 曲線(以下、平均M- ϕ 曲線と呼ぶ)とコンクリートの水セメント比(W/C)およびあばら筋のピッチ(S)との関係を示したものである。これらの図によれば、M- ϕ 曲線の延性率の大小関係は必ずしも用いたコンクリートの圧縮脆性の大小関係と対応していない。とくに45-A₁₀および55-A_{7.5}試験体では、破壊域が曲率測定区間外に及んだため、試験体の有する延性を過小評価することになったものと考えられる。

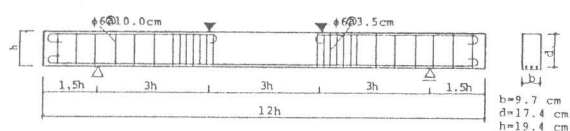


図-1 RC梁の配筋図

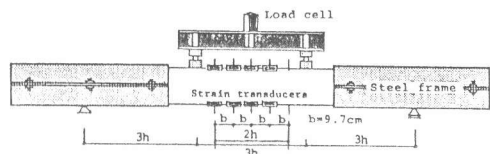
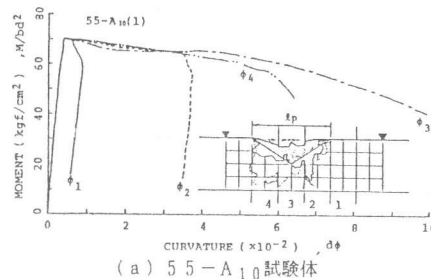
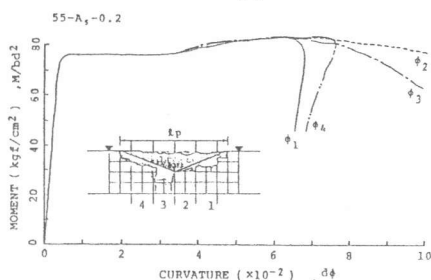


図-2 RC梁の荷重および測定方法

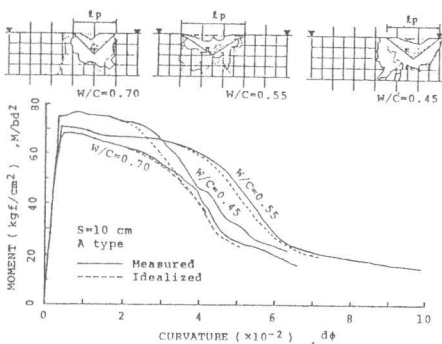


(a) 55-A₁₀試験体

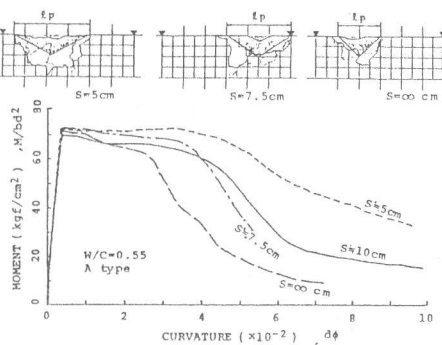


(b) 55-A_{5-0.2}試験体

図-3 各区間のM- ϕ 曲線



(a) 水セメント比(W/C)の影響



(b) あばら筋ピッチ(S)の影響

図-4 平均M- ϕ 曲線

4.2 理想破壊域モデル

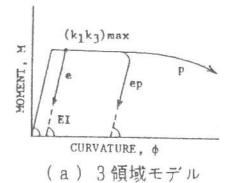
RC梁の曲げスパン内のM-φ曲線に及ぼす各種要因の影響を定量的に把えるため、曲げスパン内のM-φ関係を破壊の程度に応じて理想化する。理想化の手法としては、図-5 (a) および (b) に示す簡略モデルを適用する^{4)~8)}。ただし、非破壊領域ではコンクリートの圧壊以後除荷曲線上を戻るとする。コンクリートの圧壊は、例えば圧縮部コンクリートの応力-ひずみ曲線下の面積をひずみで除した平均応力が最大となる点、すなわち $k_1 k_3$ の最大値(ここに、 $k_1 k_3$: ストレスブロック係数)とすることができる。また除荷曲線の剛性は初期剛性と等しいものと仮定する。また、ここでは議論を簡単化するため、図-5 (b) に示す2領域モデルを適用する。このモデルの適用により、RC梁の曲げスパン内における塑性変形挙動の評価および推定は、破壊領域の長さ(l_p)および破壊領域内のM-φ関係を求めることに帰着する。

各区間のM-φ曲線の実測結果に基づいて曲げスパン内の理想化を行った。破壊域モデルとしては上記の2領域モデルを適用し、破壊が曲率測定区間外に出た場合および破壊領域と非破壊領域が共存する区間については、破壊領域における曲率分布が、それぞれ、破壊領域の中央を中心に対称、および二等辺三角形分布をなすものと仮定して曲率を算定した。また、非破壊領域の圧壊点は、各非破壊区間の圧壊時曲率の平均値とした。曲率測定域全区間のM-φ曲線の実測値の平均値と計算値との比較例を図-4 (a) に併示した。理想化は、ほぼ妥当であったことが分かる。

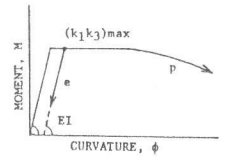
4.3 破壊領域長さ

図-6 (a) ~ (f) に理想化された破壊領域長さ(l_p)と本実験で取り上げた各種要因との関係を示す。図-6 (a) ~ (c) によれば、圧縮部コンクリートの靱性の増大と共に l_p の値が増加する傾向がみられる。図-6 (d) によれば、複筋比(γ)の増加に伴い l_p が増加し、その傾向は、あばら筋のピッチ(S)が小さいほど著しくなる。図-6 (e) によれば、本実験の範囲では、引張鉄筋比($P_t = 1.4 \sim 2.8\%$)が l_p の値に及ぼす影響はほとんどみられない。一般に、 P_t の値が増加すると、コンクリートの圧壊時の中立軸高さが増加することから、破壊領域の長さ(l_p)は増加すると考えられる。 P_t がより広範囲に変化する場合、かつあばら筋が存在する場合などについては、更に検討を要する。図-6 (f) によれば、本実験の範囲では曲げスパン(2h~4h)が l_p の値に及ぼす影響はほとんど認められない。しかしながら、設計断面によっては、 l_p の値が増大し、曲げスパン内全域に広がる場合も生ずる。その場合には破壊領域の広がり曲げスパン内に抑えられるため、破壊領域の挙動に載荷点の影響が及ぶものと考えられる。

図-6 (a) ~ (d) によれば、圧縮筋の存在も含め、曲げ圧縮部の靱性と l_p の値との間には、正の相関があるものと考えられる。ここではRC梁の曲げ圧縮部に相当するコンクリート供試体の一軸圧縮試験によって得られた応力(σ)-ひずみ(ϵ)曲線を用いて、曲げ圧縮部コンクリートの靱性と l_p の値との関係を調べてみる。図-7は、 $\epsilon = 1.5 \times 10^{-3}$ 時のタフネス($\sigma - \epsilon$ 曲線下の面積)を横軸に、 l_p の値を縦軸にプロットしたものである。図中の数字は、梁の試験体番号を示す。図によれば、曲げ圧縮部コンクリートの靱性と l_p の値との間にはかなり強い正の相関が存在する。



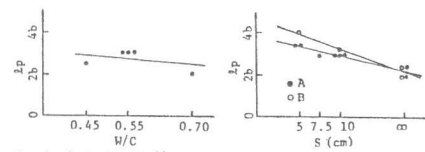
(a) 3領域モデル



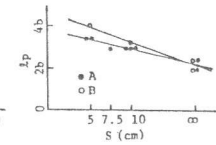
p: Plastic region
ep: Elastic-plastic region
e: Elastic region

(b) 2領域モデル

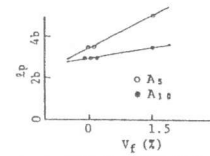
図-5 理想破壊モデル



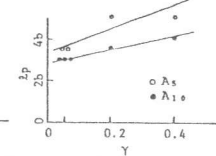
(a) 水セメント比



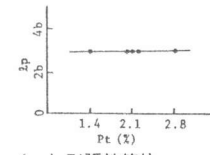
(b) あばら筋ピッチ



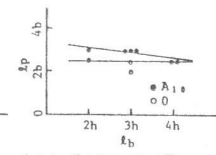
(c) 鋼繊維の体積混入率



(d) 複筋比



(e) 引張鉄筋比



(f) 曲げスパン長

図-6 破壊領域長さ(l_p)に及ぼす各種要因の影響

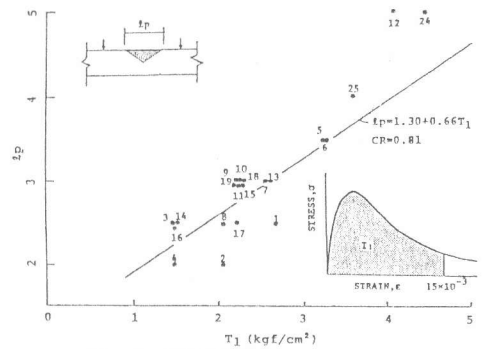


図-7 破壊領域長さ(l_p)に及ぼす曲げ圧縮部の靱性(T_1)の影響

4.4 破壊領域のモーメントー曲率曲線

図-8は前述の図-5(b)により理想化した破壊領域におけるM-φ曲線の平均値を示した例である。図によれば、破壊領域におけるM-φ曲線はどの試験体の場合も極めて延性的となり、本実験で取り上げた各種要因の影響は、全区間を平均したM-φ曲線の場合に比べてかなり小さくなる。また、図-4(b)でみられたM-φ曲線の延性率(ductility factor)と曲げ圧縮部コンクリートの靱性(toughness)の大小関係の不一致は、理想化した破壊領域においては解消されている。

図-9は、曲げ圧縮部コンクリートの靱性と破壊領域で平均化したM-φ曲線の延性率との関係をプロットしたものである。ここでは圧縮部の靱性として、 $\epsilon=15 \times 10^{-3}$ 時のタフネスを、断面の延性率として降伏時の曲率 ϕ_y に対するモーメント低下域における $0.8M_u$ (M_u :最大モーメント)時の曲率 $\phi_{0.8}$ の比 $\phi_{0.8}/\phi_y$ を用いた。図によれば、破壊領域の延性率と曲げ圧縮部コンクリートの靱性との間には強い正の相関がみられる。

4.5 破壊領域を含むモーメントー曲率曲線

図-10は、破壊領域における延性率 $\phi_{0.8}/\phi_y$ と破壊領域の長さ l_p との関係をプロットしたものである。若干ばらつきは大きいものの、両者の間には明確な正の相関が認められる。すなわち、RC梁の破壊領域における破壊の延性化は、破壊領域の広がりをも促進し、その結果、RC部材全体としての塑性変形能力が増大することになる。図-11には曲率測定域(2h)に破壊領域が存在するものとして算定した全区間のM-φ曲線の平均値を示す。

5. 結論

RC梁の等曲げモーメント区間内における塑性域の曲率分布について実験的に調べ、破壊領域長さおよび延性性質に及ぼす各種要因、とくに曲げ圧縮部の靱性の影響について考察した。その結果、以下の事項が明らかとなった。

(1) RC梁の等曲げモーメント区間内における破壊の集中性は顕著であり、同区間を破壊領域と非破壊領域に分割できる。

(2) RC梁の曲げ圧縮部の靱性と破壊領域長さおよび破壊領域における延性率との間には、かなり強い正の相関が存在する。

(3) RC梁の破壊領域における破壊の延性化は、破壊領域の広がりをも促進し、その結果、RC部材としての塑性変形能力が増大する。

[謝辞] 本研究に際し、御助力を得た、小池狭干助朗教授(愛工大)、堀部護君(名大4年)、森部一仁君(愛工大4年)、および横井真一君(愛工大4年)に深謝致します。

[引用文献] 1) 小阪・森田共著、鉄筋コンクリート構造、丸善、昭50、p. 385。 2) 森田・角、セメント技術年報、第23巻、昭44、pp. 580-586。 3) Corley, Jour. of ST-Div., ASCE, Vol. 92, ST5, Oct. 1966, pp. 121-146。 4) 鈴木・中塚・鈴木・横木、建築学会大会梗概集、昭53、pp. 1717-1720。 5) 小阪・谷川・山田・如中、セメント技術年報、第37巻、昭58、pp. 279-282。 6) 小柳・六郷・内田、セメント技術年報、第37巻、昭58、pp. 268-271。 7) 小阪・谷川・如中、材料、昭60、1、第34巻、376号、pp. 19-25。 8) Phipps, Magazine of Conc. Res., Vol. 28, No. 95, June 1976, pp. 85-100。

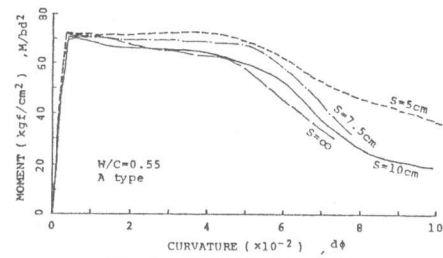


図-8 破壊領域のM-φ曲線

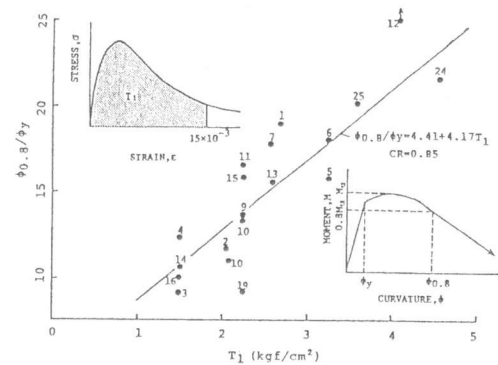


図-9 破壊領域の延性率($\phi_{0.8}/\phi_y$)に及ぼす曲げ圧縮部の靱性(T_1)の影響

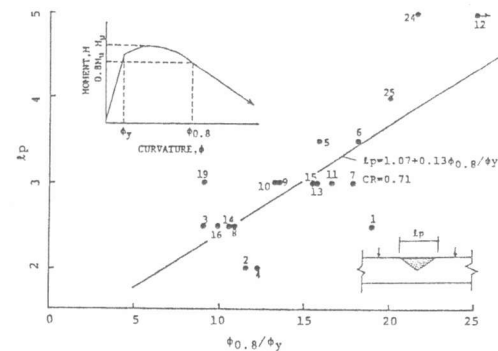


図-10 破壊領域長さ(l_p)と延性率($\phi_{0.8}/\phi_y$)との関係

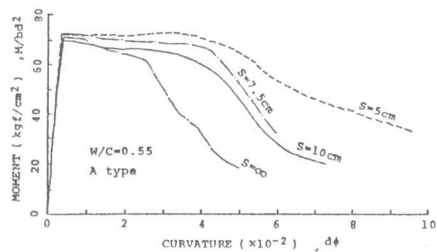


図-11 破壊領域を含むM-φ曲線