

[137] RC 梁部材の塑性ヒンジ部におけるコンクリートの 応力-ひずみ関係

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 (名古屋大学工学部)
 正会員 〇三輪 隆治 (清水建設構造設計部)

1. まえがき

筆者らは既報において、鉄筋コンクリート（以下、RCと略記）梁の等曲げモーメント区間における塑性域の曲率分布の性状を実験的に調べ、曲げ圧縮部のコンクリートの靱性が小さいほど梁の破壊域が集中する傾向のあることなどを明らかにした（図-1参照）¹⁾。一方、コンクリートは均等応力状態下にあっても、破壊は供試体内の限られた領域に集中する傾向があること、ならびに応力下降域のひずみの実測値は、ひずみの測定長および測定位置によってかなり異なることも、筆者らの別の実験により確かめている（図-2参照）²⁾。そのため、RC部材の曲げ解析の際、より精度の良い解析を行うためには、単に常用の標準供試体による一軸圧縮下の応力 (σ) - ひずみ (ϵ) 関係の実測結果を用いるのではなく、RC梁の当該部に相当する形状・寸法および拘束条件下にあるコンクリート供試体を用いて求めた応力-ひずみ関係を適用するのが適当である。

本報では、各種コンクリート角柱試験体を用いて一軸圧縮載荷時の応力-ひずみ関係を調べ、RC梁の断面解析の際、どのような供試体の応力-ひずみ関係の計測結果を適用するのが最も適当であるかを調べた。

2. コンクリート角柱体の応力-ひずみ曲線

2.1 実験の目的

この実験の目的は、RC梁の曲率測定区間の曲げ圧縮部コンクリートの応力-ひずみ関係を明らかにすることにある。ただし、比較の対象とするRC梁の等曲げモーメント区間には曲率計取付け治具の固定用鋼棒が埋め込まれているため¹⁾、ここでは、この埋込み鋼棒の影響も含め、コンクリートの応力-ひずみ関係に及ぼす各種要因の影響を調べる。

2.2 実験の概要

実験の概要を表-1に示す。実験要因として、水セメント比 (W/C)、帯筋のピッチ (S)、供試体の高さ-辺長比 (H/D)、鋼棒の有無、および端面摩擦の有無を取り上げた。供試体の断面はすべて9.7×9.7cm、打込み方向は横打ちとした。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 (5mm未満)、川砂利 (5~15mm)、φ4mm丸鋼 (降伏強度: 5180kgf/cm², 引張強度: 5420kgf/cm², 伸び率: 21.3%)、および鋼繊維 (フック付せん断フェイバー、形状: 0.5×0.5×30mm, 引張強度: 7000kgf/cm²) を使用した。コンクリートは、所要量の粗骨材、細骨材、セメント、および所要量の7割の水を約5分間混練した後、残りの水を加える分割混練とし、鋼繊維を混入する場合は最初の混練時にミキサー内に投入した。供試体は各要因毎に3体ずつとし、材令3日目に脱型後、実験室内 (温度: 26±3℃, 相対湿度: 63±10%) にて空中養生を行った。

表-1 実験の概要

Notation of specimen	V _f (%)	W/C	H/D	μ	Shape & pitch of hoop	
55-A5-0.4 μ=0.4 S=5cm A type hoop W/C=0.55	0	0.45	2	0.4	A _∞ *, A10	
			1	0	A _∞ , A10, A5	
		0.55	2	0.4	A _∞ *, A10, A5	
				0.4	A _∞ , A10, A7.5, A5, B10, B5	
			3	0	A _∞ , A10, A5	
		1.5	0.70	2	0.4	A _∞ *, A10
			0.55	2	0.4	A _∞ *, A10, A5

[Notes] V_f: Volume fraction of steel fiber, W/C: Water-cement ratio, H/D: Slenderness ratio, μ: Approximate value of coefficient of static friction between specimen and loading platen, *: Only for specimen without bolts.



A-type



B-type

載荷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} に達するまで継続載荷した。縦ひずみは、応力上昇域については鋼製棒によって試験体に取り付けた変位変換器（測定長 17.8 cm）により、応力下降域については載荷板間に取り付けた変位変換器により測定した。

2.3 実験結果

(1) 実測曲線の概要： 帯筋および埋込み鋼棒が角柱体の応力 (σ) - ひずみ (ϵ) 曲線に及ぼす影響を図-3に示す。図によれば、帯筋のピッチにかかわらず埋込み鋼棒の存在によって σ - ϵ 曲線はピーク点以後延性的となる。したがって、鋼棒を埋め込んだRC梁断面のモーメント-曲率関係の解析には、その影響を含む σ - ϵ 曲線を用いる必要がある。

(2) 表示式の提案： 解析に用いる σ - ϵ 関係の表示式について検討する。図-4は実測曲線をピーク点で一致するように無次元化した相対応力 ($S = \sigma / F_c$, F_c : 圧縮強度) - 相対ひずみ ($E = \epsilon / \epsilon_m$, ϵ_m : 圧縮強度時のひずみ) 曲線と、Popovicsによる表示式 (1式) から得られた S - E 曲線を比較したものである。

$$S = \frac{n E}{n-1 + E^n} \quad \text{----- (1)} \quad \text{ここに、} n : \text{実験定数。}$$

図によれば、(1)式では本実験で得られたようなピーク点以後の延性を十分に近似できない。そのため本報では、応力下降域の S - E 曲線に対し Popovics 式に修正を加えた次のような表示式を作成した。

$$S = \frac{n X}{n-1 + X^n} \quad \text{----- (2)} \quad \text{ここに、} X = a (E-1)^m + 1 \text{ (ただし、} E \geq 1 \text{)、} a, m, n : \text{実験定数。}$$

S - E 曲線および σ - ϵ 曲線について、本表示式 ($a=0.5$, $m=1.3$) による計算値と実測値との比較例をそれぞれ図-5 (a) および (b) に示す。これらの図から本表示式は実測の σ - ϵ 曲線を十分精度良く表示できることが分かる。

3. 角柱体の応力-ひずみ曲線の適用性

ここでは、高さ-辺長比が2の角柱体より得られた σ - ϵ 曲線の、RC梁の断面解析への適用性について検討する。

3.1 モーメント-曲率曲線の解析結果

前項の σ - ϵ 曲線の表示式を用いて解析したRC単筋梁断面のモーメント (M/bd^2) - 曲率 ($d\phi$) 曲線 (以下、解析曲線と略記) と破壊域の理想化によって実測値から推定した各区間 (破壊領域長さ (l_p))、2h 区間、および 3h 区間、ここに h : 梁せい) のモーメント-曲率曲線 (以下、 M - ϕ 曲線と略記) との比較例を図-6 (a) および (b) に

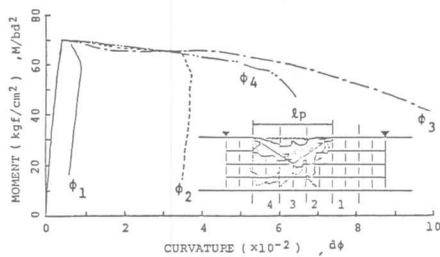


図-1 各区間の M - ϕ 曲線 (55-A₁₀ 試験体)

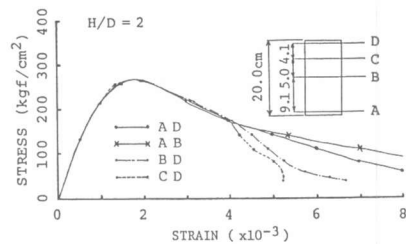


図-2 各測定区間より得られる σ - ϵ 曲線

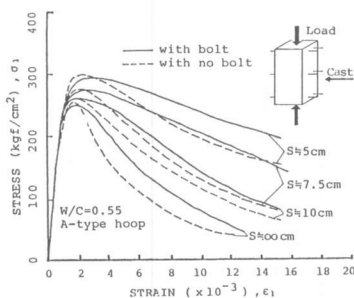


図-3 σ - ϵ 曲線に及ぼすあばら筋および鋼棒の影響

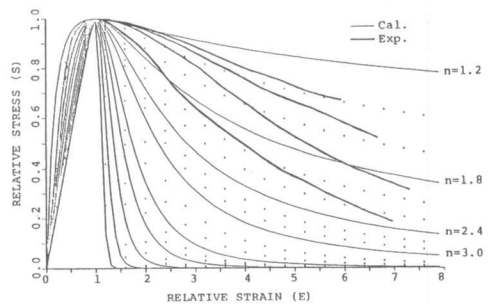


図-4 Popovics式による S - E 曲線

示す。図によれば、M-φ曲線の実測値(図中の点線)は測定区間のとり方によって著しく相違しており、今回提示のσ-ε曲線を用いて解析した曲線(図中の実線)はこれらの曲線の中に位置することが分かる。したがって、平面保持を仮定し、素材の力学特性として一軸下の応力-ひずみ関係を用いる通常の断面解析によって得られるM-φ関係を、部材の変形解析に適用する際には、解析曲線に相当する平均曲率が得られる区間を明確にしておくことが必要不可欠といえる。

3.2 対応測定区間

図-6と同様な比較を全試験体について行い、解析曲線とはほぼ等しい延性率(φ_{0.8}/φ_y、ここに、φ_{0.8}:モーメントが最大時の80%に低下した時点の曲率、φ_y:降伏時の曲率)のM-φ曲線が得られる曲率測定区間(ℓ_m、対応測定長と呼ぶ)を求めた。図-7は得られたℓ_mの値と曲げ圧縮部コンクリートの靱性(T₁)との関係をプロットしたものである。ここで、曲げ圧縮部の靱性指標としては、既報で、破壊領域長さ(ℓ_p)および破壊領域内のM-φ曲線の延性率と強い正の相関が認められた、ε=1.5×10⁻³時のコンクリート角柱体のタフネス(σ-ε曲線下の面積)を用いた。図によれば、T₁の値の増加に伴いℓ_mの値は減少しており、両者の関係式として下式が得られた。

$$\ell_m = 4.0 - 0.68 T_1 \quad \text{----- (3)}$$

図中に併示した模式図は、解析に用いたσ-ε曲線を計測したH/D=2のコンクリート角柱体をRC梁の曲げ圧縮部にそのまま配置したものである。ここで、便宜上、中立軸が梁せいの中央部に位置し、ひずみ勾配の影響がないと仮定すれば、対応測定長(ℓ_m)はhとなるはずである。図-7のような結果が得られた理由として、i) 曲げ圧縮部のσ-ε関係は、そのタフネスが小さいほどひずみ勾配の影響を受けやすく、ひずみ軟化域での性状が延性的になること、ii) 曲げ圧縮部のタフネスに応じて、破壊域が決定する時点における中立軸高さが変動すること、などが考えられる。すなわち、図-7中の模式図では中立軸がRC梁せいの中央部に存在するものと仮定しているが、中立軸高さ比が0.5以上であれば、図-8(a)に示すようにℓ_mの値が増加することになる。ここで曲げ圧縮部のタフネス(T₁)と中立軸高さ比(X₁)との関係をコンクリートの圧壊時に相当する時点、すなわちk₁k₃(k₁, k₃:ストレスブロック係数)の値が最大となる時点についてプロットしてみると図-8(b)のようになり、タフネス(T₁)の減少によって、中立軸高さ比(X₁)が増大する傾向が認められる。

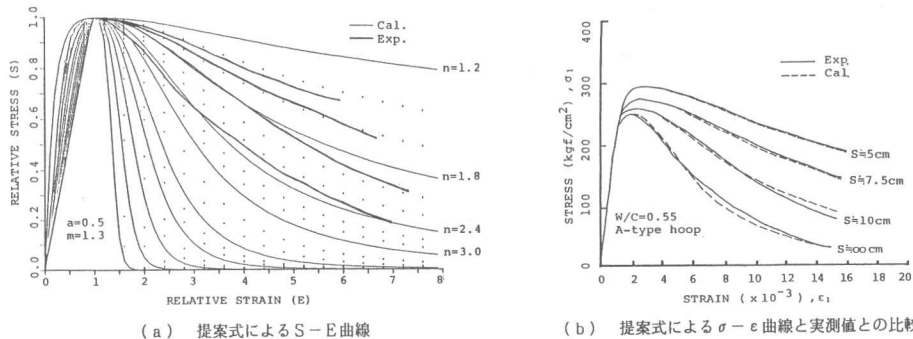


図-5 σ-ε曲線のモデル化

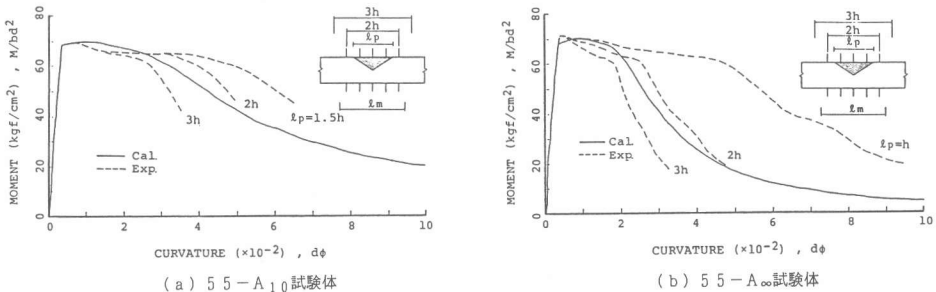


図-6 異なる測定区間より得られるM-φ曲線と解析曲線との比較

3.3 対応測定区間のモーメント-曲率曲線

(3)式を用いて得られる対応測定区間 (l_m) の実測曲率と解析曲率とを比較した例を図-9 (a) および (b) に示す。これらの図によれば、(3)式を用いることにより、 $H/D=2$ の供試体によって得られた $\sigma-\epsilon$ 関係を用いて解析した $M-\phi$ 関係と平均的にはほぼ同様の断面特性を有する区間を推定し得ることが分かる。

図-10 は筆者らが過去に行った実験の結果^{1), 3)} について上式の適用性を調べたものである。これらの実験では曲率は梁表面に取り付けた鋼製枠を介して測定する一般的な方法を探っており、曲率測定区間は 2h である。図によれば、(3)式を適用することにより、比較的良い推定値が得られている。

4. 結論

本報では、RC梁の等曲げモーメント区間におけるモーメント-曲率曲線の実測結果と、RC梁の曲げ圧縮部に相当するコンクリート角柱供試体の応力-ひずみ関係の実測結果を用いて解析的に求めたモーメント-曲率曲線との対応性を調べた。その結果、(3)式に示される対応指標を得た。(3)式を導入することにより、コンクリート供試体の応力-ひずみ曲線を用いたRC部材断面の塑性変形解析の精度を向上させることができよう。

【謝辞】本研究に際し、御助力を得た、田中雅之君(名大4年)、および鈴木衣夫君(愛工大4年)に謝意を表します。

また、本研究費の一部は、昭和60年度文部省科研費・奨励研究(A)によったことを付記する。

【引用文献】1) 小坂・谷川・畑中・三輪、コンクリート工学年誌、第7巻、昭60、pp. 641-644。

2) 小坂・谷川・山田・畑中、セメント技術年報、第37巻、昭58、pp. 279-282。

3) Kosaka, Tanigawa, and Hatanaka, Trans. of Archi. Inst. of Japan, No. 337, March 1984, pp. 15-26.

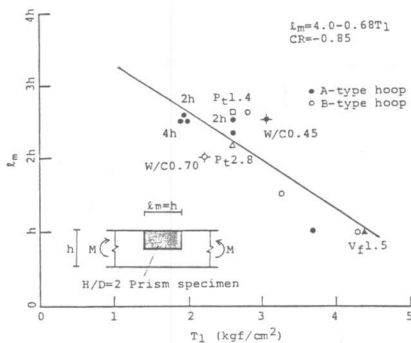
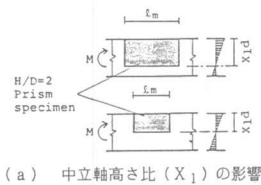
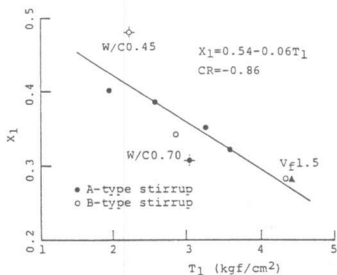


図-7 対応測定長 (l_m) に及ぼす曲げ圧縮部コンクリートの靱性 (T_1) の影響

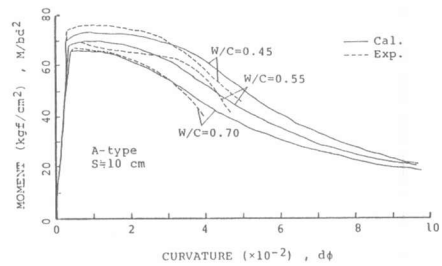


(a) 中立軸高さ比 (X_1) の影響

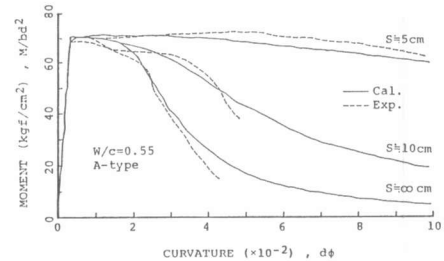


(b) $k_1 k_3$ 最大時の中立軸高さ比 (X_1) に及ぼす曲げ圧縮部コンクリートの靱性 (T_1) の影響

図-8 RC梁の曲げ圧縮部とコンクリート角柱体との対応性



(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-9 対応測定区間 (l_m) における $M-\phi$ 関係の実測値と解析値との比較

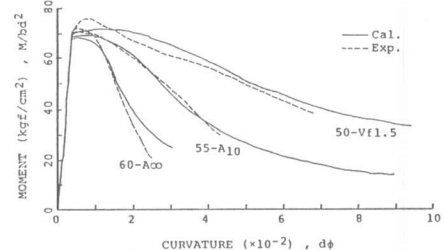


図-10 対応測定区間 (l_m) の表示式の適用性