

V—23 鉄筋コンクリート部材の非線形解析のためのモデル化について

北海道大学工学部 正員 志村 和紀

北海道大学工学部 正員 佐伯 昇

北海道大学工学部 正員 藤田 嘉夫

1. まえがき

昭和61年に制定された土木学会コンクリート標準示方書によれば、鉄筋コンクリート曲げ部材の断面破壊の終局限界状態に対する検討において用いる応力-ひずみ曲線として、コンクリートはHognestadモデルを基にしたものを、鉄筋については完全弾塑性モデルを用いて良いとされている¹⁾。しかし、実験によればコンクリートと鉄筋の付着応力や鉄筋のひずみ硬化の影響により計算値より高い耐力を示す場合があり、また、変形については、コンクリートに対する鉄筋の拘束効果により計算値の数倍の変形を生じる。従って、変形も含めたより正確な終局時の解析を行うためには、鉄筋とコンクリートのモデルとして上述の影響を考慮したものをを用いる必要がある。

本報告は種々の材料モデルを用いた解析結果と単純桁による実験結果を比較検討し、鉄筋コンクリート曲げ部材の非線形解析に適したモデルを得ることを目的とした。

2. 実験方法

実験に使用したコンクリートは早強ポルトランドセメントを用いたAEコンクリートとし、試験材令を14日、目標圧縮強度を $300\text{kg}/\text{cm}^2$ とした。鉄筋の材質はSD35とし、圧縮主鉄筋およびスターラップとしてD10異形棒鋼を、引張主鉄筋としては軸方向のひずみ分布を測定するためにD16異形棒鋼のリブ部分に溝を切った鉄筋を用いた。

試験桁は図-1(a)および表-1に示すように矩形断面とし、有効高さ $d=17\text{cm}$ と一定にし、かぶり c は2.2, 4.2 および 7.2cm と変化させ、スターラップ間隔 s を5 および 8cm とした。鉄筋比はいずれも $p=1.68\%$ 、 $p'=0.84\%$ とした。

載荷方法としては図-1(b)に示すように対称2点載荷とし、支間 $l=150\text{cm}$ 、載荷点間隔 $a=40\text{cm}$ とした。また、載荷点区間の引張主鉄筋の溝内にはワイーストレインゲージを 2cm 間隔で貼付し、鉄筋のひずみを測定し、コンクリート表面に貼付した標点の変位をコンタクトゲージを用いて測定し平均ひずみを求めた。さらに、載荷点の変位を変位計によって測定した。

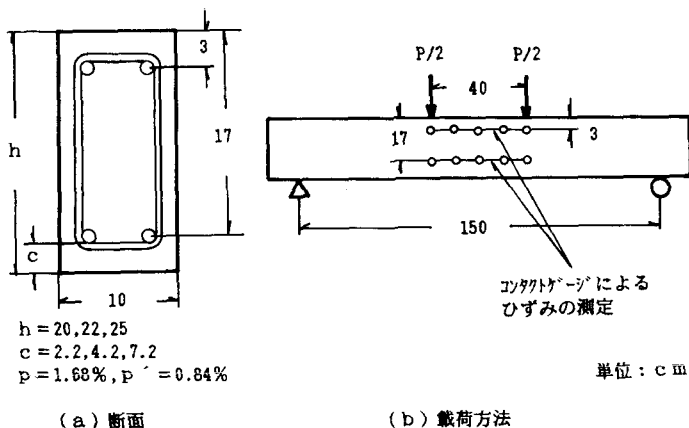


図-1 試験桁の寸法・載荷方法

表-1 試験桁の種類

試験桁	h cm	c cm	s cm	ρ
No.1	20	2.2	5	0.048
No.2	20	2.2	8	0.030
No.3	22	4.2	5	0.048
No.4	22	4.2	8	0.030
No.5	25	7.2	5	0.048

h: 桁高, c: かぶり, s: スターラップ間隔
 ρ : スターラップとコンクリートの体積比

3. 非線形解析

(1) 鉄筋の応力-ひずみ関係

鉄筋の応力-ひずみ関係は、図-2に示すようにひずみ硬化を考慮したtri-linear形とし、 $E_s = 1.9 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$ 、 $f_y = 4050 \text{ kg/cm}^2$ 、 $\epsilon_{sy} = 0.0021$ 、 $E_{sh} = 31400 \text{ kg/cm}^2$ 、 $\epsilon_{sh} = 0.026$ とした。

(2) コンクリートの応力-ひずみ関係

圧縮部コンクリートの応力-ひずみ関係としては図-3(a)に示すように標準示方書に示されている修正Hognestad model (TYPE-c I)¹⁾、修正Kent&Park model (TYPE-c II)²⁾およびひずみ軟化領域をCorleyの終局ひずみ³⁾までの下降直線としたTYPE-c IIIの3タイプを用いた。

引張部コンクリートの応力-ひずみ関係としては図-3(b)に示すように引張部コンクリートの応力を無視したTYPE-t I、終局引張ひずみ0.0001まで引張応力を考慮したTYPE-t IIおよび鉄筋とコンクリートの付着応力により引張剛性が高まる、いわゆるtension-

stiffening効果⁴⁾を考慮するため引張ひずみの軟化領域を設けたTYPE-t IIIの3タイプを用いた。

(3) 解析方法

解析方法としてはコンクリートと鉄筋の応力-ひずみ関係から繰返し計算により曲げモーメント-曲率関係を求め、これより図-4に示したような梁要素に分割した部材について各荷重段階のモーメントに対応する各節点の曲率を求め、次式によってたわみを求めた。

$$\delta_n = \Delta X^2 \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{\frac{1}{2}} (\phi_{j-1} + \phi_j) / 2 + CX$$

$$C = \Delta X \sum_{i=1}^{N/2} (\phi_{i-1} + \phi_i) / 2$$

[$m \leq N/2$, ΔX ; 要素巾, N ; 要素数]

なお、要素長さは一定とし分割数は1支間につき30、各要素の曲率分布は直線と仮定した。

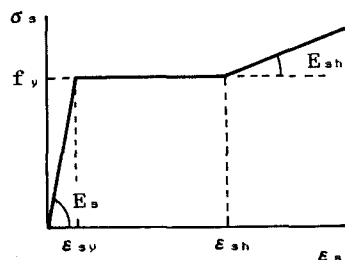
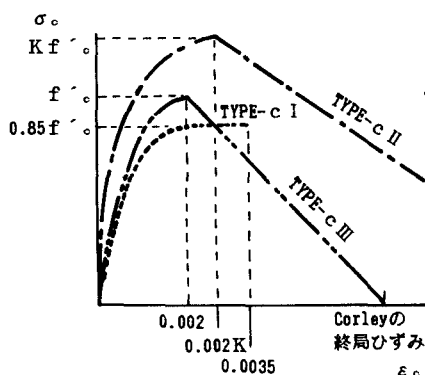
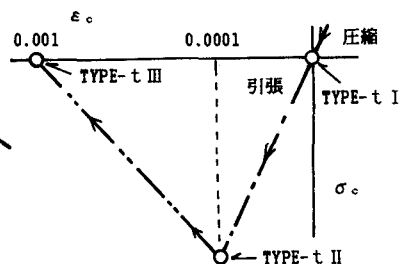


図-2 鉄筋の応力-ひずみ関係



(a) 圧縮部



(b) 引張部

図-3 コンクリートの応力-ひずみ関係

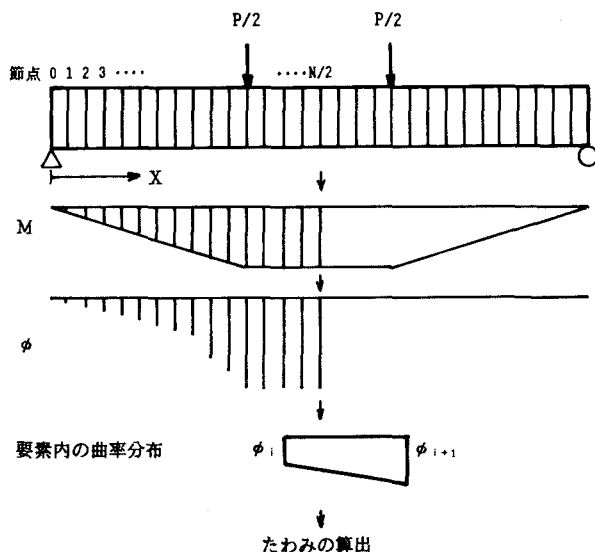


図-4 たわみの計算手順

4. 実験結果および考察

図-5に引張鉄筋のひずみ分布の測定例を示した。これによれば、ひびわれ位置付近においてひずみはピークを示す曲線となりコンクリートと鉄筋の付着によってコンクリートが引張力を負担していることが確認された。

圧縮部コンクリートの応力-ひずみ関係について検討するために、曲げモーメント-曲率関係の実験結果および解析結果を図-6に示した。圧縮部のモデルはTYPE-c I、TYPE-c IIおよびTYPE-c IIIを用い、引張部のモデルはTYPE-t IIを用いた。

修正Hognestad model (TYPE-c I) は比較的良く実験値と一致するが、終局曲率は $800 \times 10^{-6}/\text{cm}$ 程度であり、実験による曲率が $3000 \times 10^{-6}/\text{cm}$ 以上を示すのに比べ非常に小さいことが認められ、塑性変形挙動を把握する際には十分ではないことが示された。

修正kent&Park model (TYPE-c II) は引張鉄筋降伏後の耐力が実験値に比べ相当に大きくなることが認められた。このモデルは柱部材を対象とした実験から得られたものであり、本実験のような梁部材に適用した場合にはスターラップ量は柱部材における帯筋等に比べ少なく、また、作用力が異なっていることなどから、スターラップの圧縮部コンクリートに対する拘束による耐力増加および靱性の改善等の効果は小さくなると考えられる。

Corleyの終局ひずみを用いたTYPE-c IIIモデルは終局耐力付近で実験値を上回る傾向にあるものの、実験値と比較的良く一致した。

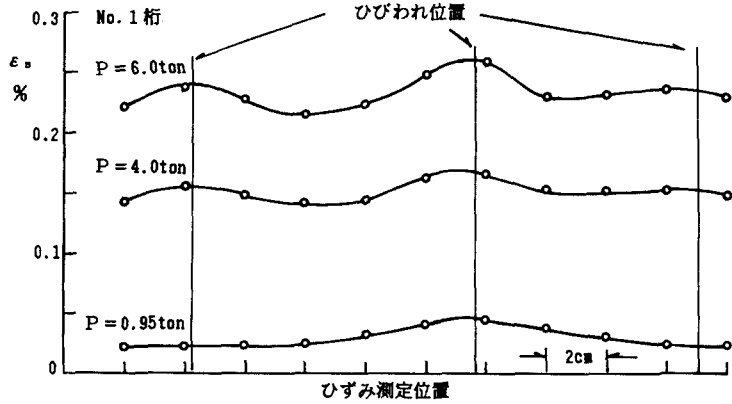


図-5 引張主鉄筋の軸方向ひずみ分布

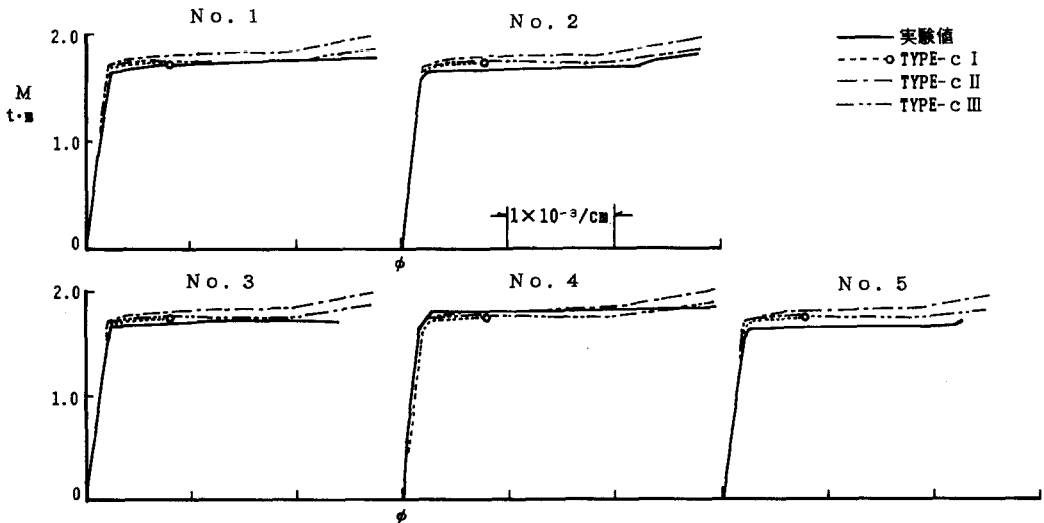


図-6 曲げモーメントと曲率の関係

引張部コンクリートの応力-ひずみ関係について検討するため、曲げモーメント-曲率関係に比べその影響が顕著に表れる荷重-たわみ関係を図-7に示した。引張部のモデルはTYPE-t I、TYPE-t IIおよびTYPE-t IIIを用い、圧縮部のモデルとしてTYPE-c IIIを用いた。これによれば、コンクリートの引張応力を無視したTYPE-t Iモデルはコンクリートのひびわれ発生点までは実験値に比べたわみが大きくなるものの、引張鉄筋の降伏点付近ではほぼ一致することが認められた。引張ひずみを、通常コンクリートの割裂試験で得られる終局ひずみ0.0001まで許したTYPE-t IIモデルはTYPE-t Iモデルの場合と大きな差はなく、ひびわれ発生による剛性低下点は実験値に比べ低いことが認められた。コンクリートと鉄筋の付着を考慮するためにひずみ軟化領域を設けたTYPE-t IIIモデルは、実験値と良く一致するものもあるが剛性を相当に高く評価しているものもある。これは鉄筋の溝内に貼付したひずみゲージの影響でコンクリートと鉄筋の付着性状が一定とならなかったためと考えられる。また、いずれのモデルも引張鉄筋の降伏後は同じ挙動を示すことが認められた。

また、別に行った1点荷重実験⁵⁾による耐力は解析値に比べ相当に大きくなる場合があり、2点荷重による本実験では認められなかった付着の影響が強く表れる場合があることがわかった。

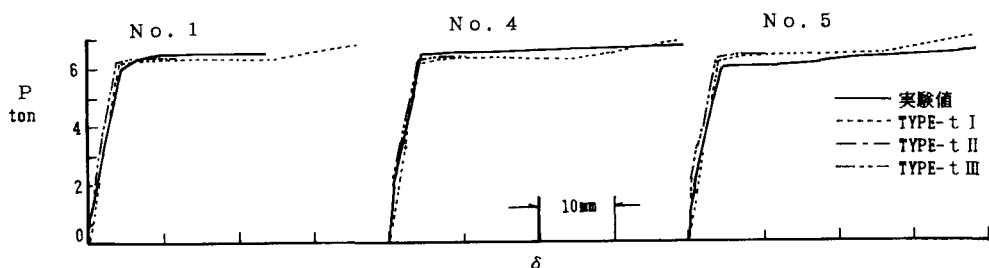


図-7 荷重と載荷点のたわみの関係

5. まとめ

(1) 土木学会コンクリート標準示方書に示されているコンクリートの応力-ひずみ曲線は塑性変形挙動を把握するためには不十分な場合があり、また、柱部材を対象とした実験から得られた例えば修正Kent&Park modelは耐力を過大に見積る。本実験の範囲内ではCorleyの終局ひずみを用いたTYPE-c IIIモデルが比較的良く実験結果と一致した。

(2) コンクリートの引張部の終局ひずみとして割裂試験による値を用いたモデルの場合、ひびわれ発生による剛性低下点は実験に比べ低くなることが認められた。

(3) 本実験の範囲内ではコンクリートと鉄筋の付着応力の影響は小さくしか表れなかった。

参考文献

- 1) 土木学会コンクリート標準示方書
- 2) Park, R., Priestly, M. J. N., Gill, W. D., "DUCTILITY OF SQUARE-CONFINED CONCRETE COLUMNS", Journal of the Structural Division, ASCE, Vol. 108, No. ST4, April, 1982
- 3) Corley, W. G., "ROTATIONAL CAPACITY OF REINFORCED CONCRETE BEAMS", Journal of the Structural Division, ASCE, Vol. 92, No. ST5, October, 1966
- 4) Chen, W. F., "PLASTICITY IN REINFORCED CONCRETE"
- 5) 志村, 佐伯, 藤田, "鉄筋コンクリート曲げ部材の塑性挙動について", 土木学会第41回年次学術講演会講演概要集 第5部