

[69] RC断面の二軸曲げ解析

正会員 黒 正 清 治 (東京工業大学)
 正会員 滝 口 克 己 (名古屋工業大学)
 正会員 ○小 林 克 巳 (東京工業大学)

1. 序

一般に、材料特性に基く鉄筋コンクリート断面の解析では、できるだけ簡単な仮定で実現象を説明できることが望ましいが、コンクリート及び鉄筋の材料特性をどの程度詳しくモデル化するかは、解析の目的に合っていることと両者のバランスがとれていることが重要である。

本論は、二軸曲げを受ける鉄筋コンクリート断面の曲げモーメント・変形関係⁽¹⁾を解析する際の、素材の応力・歪関係について述べたものである。解析の方法は、平面保持の仮定を用い、断面を小さな要素に分割し、各要素はそれぞれ独立に一軸応力を受けるものとし、各要素の応力と歪の関係を仮定して釣合い方程式を解くという方法⁽²⁾⁽³⁾である。試験体及びその断面の分割のし方を、図1. に示す。解析の対象とした図2 に示す実験結果は、偏心圧縮により軸2回りに一軸曲げ降伏モーメントの0.2倍を加えて一定に保ちながら、一軸曲げ降伏変形の2倍の一定変形振幅で軸1回りに繰返し曲げを加えたものである。

2. 簡単なモデルによる解析

最も簡単と考えられる仮定として、図3 に示す鉄筋は Bi-Linear 型、コンクリートは包絡線を e 関数、除荷及び再負荷を弾性とした応力・歪関係を用いて解析を行った。解析結果を図4 に示す。軸1回りの繰返し曲

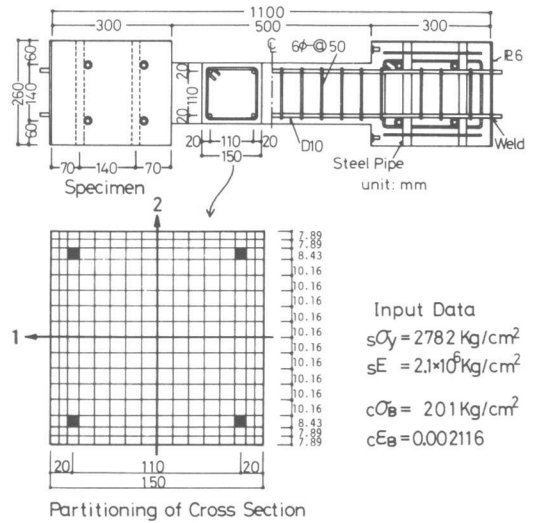


図1 試験体および断面分割

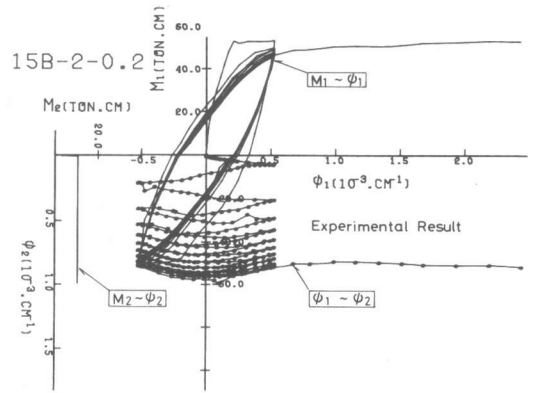


図2 実験結果

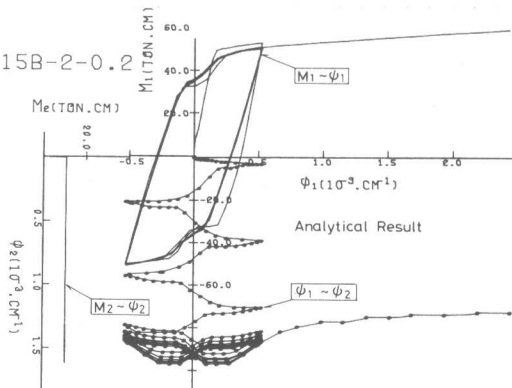


図4 解析結果

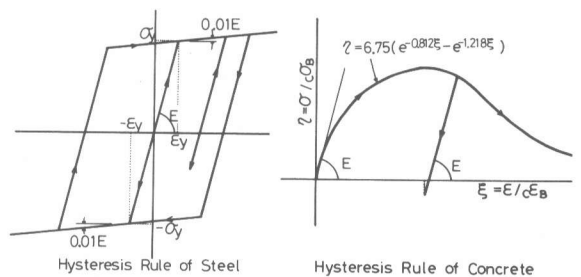


図3 鉄筋およびコンクリートの応力・歪関係

げによって、軸 2 回りの変形が増大していく傾向はとらえているが、軸 1 回りの 1 回の繰返しによって増大する軸 2 回りの変形量は実験結果と異なっている。また軸 1 回りの曲げモーメント・変形関係のループ形状には、仮定した鉄筋のループ形状の影響が強く現われてループ面積が大きくなっており、履歴吸収エネルギーを過大評価する結果になっている。

3. 詳細なモデルによる解析

3-1 コンクリートの応力・歪関係⁽²⁾⁽³⁾

包絡線は e 関数とする。除荷については、 $\eta = A\varepsilon^2 + B\varepsilon + C$ なる二次曲線で表わされるものとし、係数 A, B, C は除荷開始点 (ε_a, η_a) と残留歪点 $(\varepsilon_0, 0)$ を通ること及び $(\varepsilon_0, 0)$ における接線勾配が E_0 であるという条件から決定する。残留歪 ε_0 は、包絡線の原点における接線勾配を E とし、 $\eta = E\varepsilon$ 上に $(-\alpha, -E\alpha)$ なる点を考え、 (ε_a, η_a) と $(-\alpha, -E\alpha)$ を通る直線が $\eta = 0$ の直線と交わる点として決定し、ここで α は実験結果⁽⁵⁾ に基き $\alpha = 0.1175\sqrt{\varepsilon_a}$ とする。また $(\varepsilon_0, 0)$ における除荷二次曲線から求まる $E_0 \sim \varepsilon_a$ 関係から、 $E_0 = 2.7405(0.18)\varepsilon_a$ とした。再負荷については、 $\eta = E\varepsilon$ 上に点 $(-\beta, -E\beta)$ をとり $(-\beta, -E\beta)$ および $(\varepsilon_0, 0)$ を通る直線が除荷二次曲線と交わる点として D (ε_d, η_d) を求め、いかなる場合もこの D 点を通る直線で再負荷されるものとする。ここで $\beta = 0.1002\sqrt{\varepsilon_a}$ であり、実験結果⁽⁵⁾ に基いて決定した。再負荷の途中で除荷される場合には、除荷点と $(\varepsilon_0, 0)$ を通り、 $(\varepsilon_0, 0)$ における接線勾配が E_0 である二次曲線になるものとするが、D 点よりも歪の大きいところで除荷される場合には、包絡線上に仮定の除荷点 $(\varepsilon'_a, \eta'_a)$ を考えて、そこから除荷されているかの如く扱うものとする。引張応力については、引張強度に到るまで弾性とし、それ以後はひび割れを生じたものとして応力を零にする。

図 6 は本仮定と実験結果⁽⁵⁾ を比較したものである。

3-2 鉄筋の応力・歪関係

鉄筋の応力・歪関係は、横尾、中村の研究成果⁽⁶⁾ に基いて定式化した⁽³⁾。横尾、中村⁽⁶⁾ は実験結果を公称応力公称歪で整理しているために、引張側と圧縮側とで係数の異なる関係式を求めているが、その差異は、鉄筋コンクリート断面の解析に用いる上では殆んど問題にならないとの判断のもとに、定式化する上での簡便さを考えて引張側、圧縮側ともに同じ関係式で表わされるものとした。

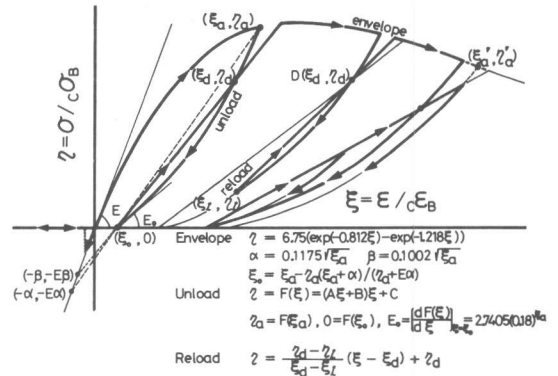


図 5 コンクリートの応力・歪関係

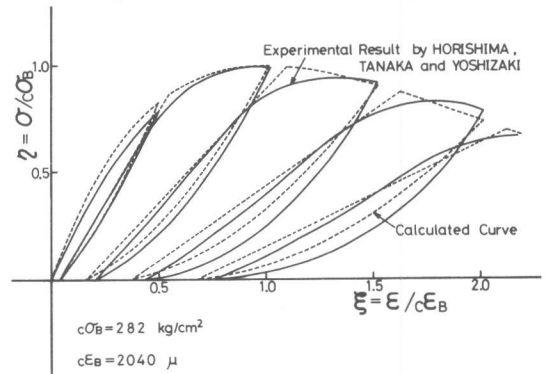


図 6 定式化したルールと実験結果の比較

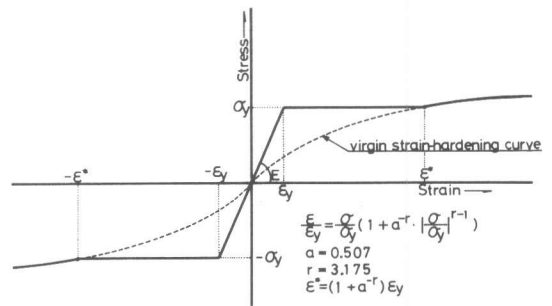


図 7-(1) 処女載荷曲線

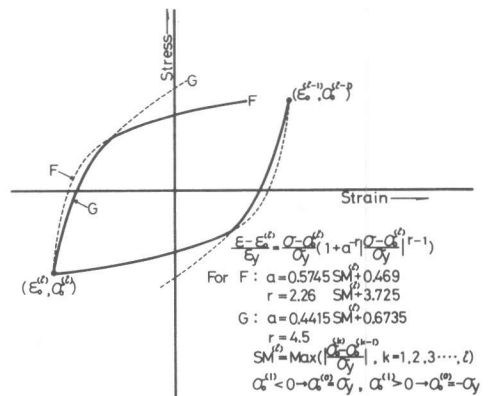


図 7-(2) 任意の点で反転する半サイクル曲線

図7-1) は処女載荷曲線で、弾性線、降伏棚、及び Ramberg-Osgood 関数で表わされる歪硬化曲線からなる。降伏応力 σ_y が与えられれば歪硬化開始点は一義的に定まり、降伏棚の長さが決まる。図7-2) は任意の点で反転する半サイクル曲線で Ramberg-Osgood 関数 F 及び G の2つ曲線を使って表わされる。関数 F 及び G の係数 a と r は過去の履歴の影響を表わすパラメーター $SM^{(i)}$ の関数となる。ここで $SM^{(i)}$ は過去の半サイクル曲線の無次元化応力振幅のうち最大値とする。降伏棚上で反転する半サイクル曲線は 図7-3) に示すように、

$|\sigma| \leq \sigma_y$ の範囲では Ramberg-Osgood 関数 F 及び G の2つの曲線を使って表わされる。係数 a と r は、過去に現われた降伏棚の長さの和を処女載荷曲線の降伏棚の長さで除した ε_i の関数とする。次に二次的な降伏棚を考えその長さは、処女載荷曲線の降伏棚の長さから過去に現われた降伏棚の長さの和を差し引いた長さとする。歪硬化曲線は 図7-3) に示した曲線 G と反対側径路の歪硬化曲線の交点 $(\bar{\sigma}_0^{(i)}, \bar{\sigma}_0^{(i)})$ 及び上述の二次的降伏棚の終点を通る Ramberg-Osgood 関数曲線とする。係数 r は前述の ε_i によって決定し、a は二次的降伏棚の終点を通るという条件で決定する。図8 は本ルールによる降伏棚上で反転する半サイクル曲線群を示したものであり、 $\varepsilon_i = 0$ では処女載荷曲線に一致し、 $\varepsilon_i = 1$ では 図7-2) の $SM^{(i)} = 2$ の場合に一致する。 $|\sigma| \leq \sigma_y$ の範囲で繰返しを受ける場合に、第2, 第3の降伏棚が現われるかどうかは実験的確認もないが、ここでは解析上のルールとして矛盾のないように適当な仮定を設けて定式化した。

直前回の歪振幅あるいは応力振幅が、それに先立つ歪振幅あるいは応力振幅に比べて小さい場合には、現径路は前々回の半サイクル曲線上に復帰して恰もその中間の履歴を経験しなかったかの如き現象(復帰現象)を呈する。本ルールでは 図7-4) に示すように直前回の半サイクルにおける応力振幅が過去の最大応力振幅をこえない限り、直前回の半サイクル曲線の出発点にもどる。そこで直前回の半サイクルにおける応力振幅が、過去の最大応力振幅をこえない場合には復帰現象を考えるものとした。同様に、降伏棚上から出発する半サイクル曲線上では、二次的降伏棚に到る以前で反転すれば、復帰現象を考えるものとする。図9 は異形棒鋼 D16 から削り出した試験片を用いて引張、圧縮繰返し載荷実験を行った結果⁽⁴⁾と本ルールを比較したものである。

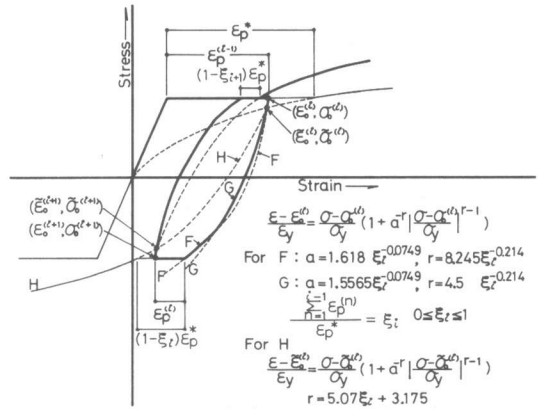


図7-3) 降伏棚上で反転する半サイクル曲線

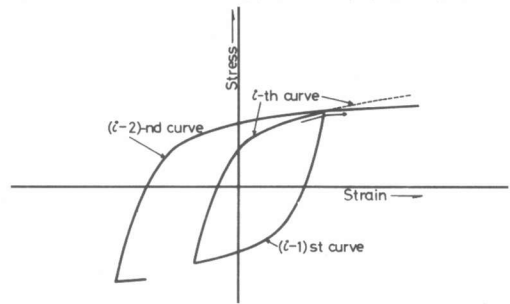


図7-4) 復帰現象

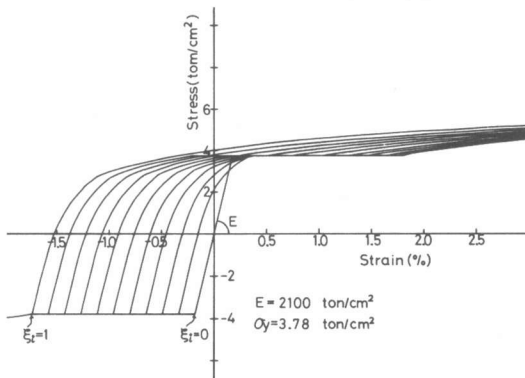


図8 降伏棚上で反転する半サイクル曲線群

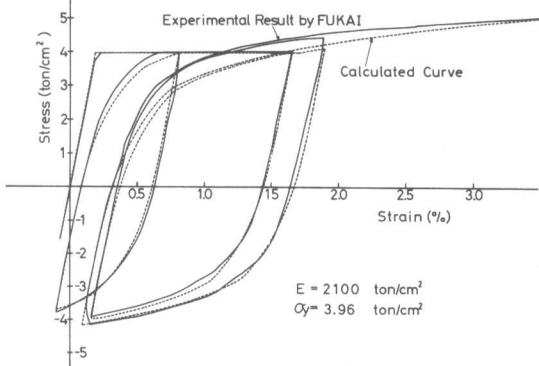


図9 定式化したルールと実験結果の比較

3-3 解析結果

以上、既往の実験結果に基づき、材料特性を詳細にモデル化して解析を行った結果を、図10に示す。実際の計算では、図5、図7に示したルールを細かな折線におこなおしたものを⁽⁷⁾を用いている。軸1回りの曲げモーメント・変形関係のループ形状ならびに軸2回りの変形が、軸1回りの繰返し曲げに伴って漸増し、一定値に収れんしていく様子、等、定性的にも定量的にも実験結果と良く一致した結果が得られた。

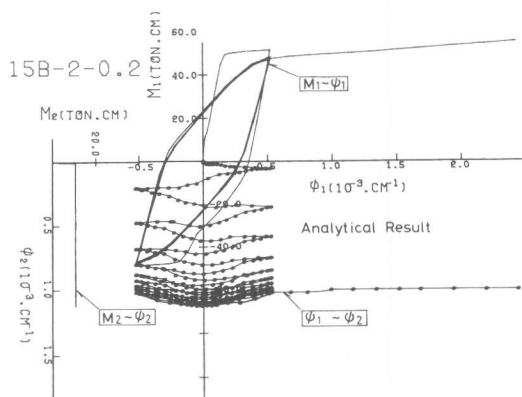


図10 解析結果

4. 結論

コンクリートおよび鉄筋に関して、簡単なルールを定めて行った解析では、軸1回りの曲げモーメント・変形関係のループ形状、軸2回りの変形の進行、ともに実験結果と異なっており、履歴吸収エネルギー量、破壊のすみ方、等の点で実際と異なった評価を下してしまう恐れがある。

材料特性を詳細にモデル化したルールを用いて解析した結果は実験結果と大変良く一致している。換言すれば実現象を正確に評価できる鉄筋コンクリート断面の曲げモーメント・曲率関係を、解析によって求める場合には、本論で定式化したくらい詳細な素材の応力・歪関係が必要だということである。

なお本解析の数値計算には、東京工業大学総合情報処理センター M-180 を使用した。

謝辞

鉄筋の応力・歪関係の定式化にあたり、京都大学教授・中村恒善博士には貴重な御意見をいただきました。心より感謝の意を表します。

コンクリートの応力・歪関係の定式化にあたっては、主として、堀島濤平、田中迪朗、吉崎征二諸氏の研究成果⁽⁵⁾を利用させていただきました。快く結果を利用させていただいたことに対し感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 滝口, 黒正, 岡田: 鉄筋コンクリート柱の二軸曲げ実験 I, II: 日本建築学会論文報告集 第229号, 昭和50年3月, pp. 25~33, 第247号, 昭和51年9月, pp. 37~43
- 2) 滝口, 黒正, 小林: 鉄筋コンクリート断面の二軸曲げ解析: 日本建築学会論文報告集 第250号, 昭和51年12月, pp. 1~8
- 3) K.Kobayashi, S.Kokusho and K.Takiguchi: Inelastic Behavior of Reinforced Concrete Members Subjected to Bi-Axial Bending Moments: Proc. AICAP-CEB Symposium, Vol. 2, Rome Italy, May 1979, pp.141-148
- 4) 深井 豊: 繰返し荷重を受ける鉄筋コンクリートばりの曲げ弾塑性性状に関する研究: 東京工業大学修士論文, 昭和44年3月
- 5) 堀島, 田中, 吉崎: 繰返し応力を受けるコンクリートの性状に関する研究: 大成建設研究所報, 昭和41年
- 6) 横尾, 中村, 小宮山, 河田: H形鋼材の非常履歴単軸応力歪関係式 第I部実験的研究, 第II部実験式: 日本建築学会論文報告集 第259号, 昭和52年9月, pp. 53~66, 第260号, 昭和52年10月 pp. 71~82
- 7) 黒正, 滝口, 小林: 二軸曲げせん断を受ける鉄筋コンクリート柱の曲げ変形解析: 日本建築学会大会学術講演梗概集, 昭和54年9月, pp. 1267~1268