

正会員 尾坂芳夫 (東北大学工学部)
 正会員 鈴木基行 (東北大学工学部)
 正会員 〇原 隆一 (東北大学大学院)

— まえがき —

従来、用いられて来た弾性理論に基づく許容応力度設計法では、安全率を用いることで安全性が保障されて来た。しかしその安全率も理論的な相拠とせしい経験的な量であるし、同様、公称荷重などもあいまいな量である。

そこで、近來重要視されて来たのか、荷重・耐力などをすべて確率量であると考えて安全性を検証する方法である。この方法では、公称荷重、公称強度、その他の係数など設計上必要な量と確率論的背景を与え、なおかつ最終的には、やはり変わった破壊確率を与えることで安全性の検証を行なうことを目的としている。

破壊確率は $P(R \leq S)$ (R は耐力、 S は荷重) で与えられるものであるが、この場合、破壊確率を計算する際、 R と S を同次元の量と変換しておくことが必要である。一般に耐力は終局モーメントなどの荷重作用で表わされ、荷重は 10 ton といった荷重の量で表わされている。そこでこの論文では、荷重から荷重作用への変換を念頭におき、RC 構造物 (=ここでラ- \times - \times) の非線形解析を行ない、後々多少の考察を行なっている。

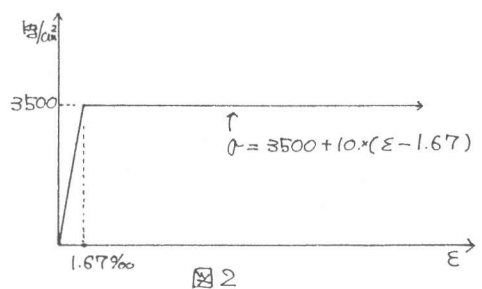
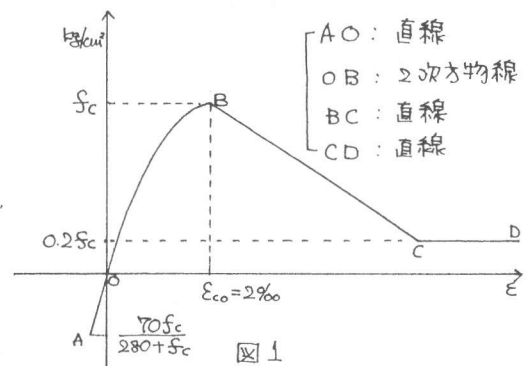
非線形解析は、その自体非常に困難を有するものであるが、ある種の単純化がよぎなくされており、その確かさの検証は不可能であるのが現状である。(したがってより一般的な仮説に基づく方法を確立することは、重要な構造物をより正確に設計するために必要だけでなく、実際の設計に上記の簡単な方法を用いることの妥当性を検証するのにも有効である。

非線形解析においては、多大な計算量を必要とするので、電子計算機を利用して計算を行なっている。この論文では、地震荷重を受ける平面ラ- \times - \times の解析が行なわれており、高さ数 m の高さのラ- \times - \times であること、ごまる限り荷重分割を多く取るなどの仮定のもと、荷重増分法による解析を行なっている。また構造物の変形が回転だけによるものだと考えて、以下の解析は各軸力に関する曲げモーメント-曲率図(以後 $M-\phi$ 図と呼ぶ)を基礎として行なわれている。

— 解析上の仮定 —

$M-\phi$ 図の計算は、ベルヌーイの平面保持の仮定およびコンクリートとスチールの応力-歪曲線を基礎として行なわれている。よく知られているように材料の力学特性は通常ランダム性を有するのであるが、この論文ではそのようなランダム性は無視し、平均的な図を基礎として計算が行なわれている。平均的な図を用いるのが良いか、それとも安全側の図を用いるのが良いかという問題については後々若干の考察が加えられている。

コンクリートの応力-歪曲線については、図1に示してある通りであり、ひずみ ϵ が 0 から 2% までは放物線とし、2% より大きい歪に対しては下り勾配の直線に近似し、応力が $0.25f_c$ になったからは、 ϵ 軸に平行な直線としたものである。ここで 2% より大きい歪での下り勾配は、スターラップの間隔、スターラップ量によって決まってくるものである。なおコンクリートの引張り応力を考えている点に



注意を要する。ここで f_c は円柱伏試体の平均強度である。実際は、スチールとコンクリートの間の付着の問題が特別に考慮される必要があるが、この論文では考えていない。

スチールの応力-歪曲線は、図2に描かれている通りで、 $f_s = 3500 \text{ kg/cm}^2$, ヤング率 $E = 2100000 \text{ kg/cm}^2$ とした。

— M-φ図の作製 —

まず始めに、矩形鉄筋コンクリート断面についてのM-φ図を作製した。記号・寸法等については、図3に示してあるので参照されたい。モーメントは、断面の高さhの中心で計算されている。

矩形断面を図4のようにn分割(この場合n=100)し、要素iに働くコンクリートの圧縮力 N_i は、要素iの中心に線荷重として働くものと考えて、与えられた歪分布のときのコンクリートの受けもつ軸力 N_{con} , 曲げモーメント M_{con} を計算している。すなわち

$$N_{con} = \sum_{i=1}^n N_i$$

$$M_{con} = \sum_{i=1}^n N_i l_i \quad (l_i \text{は断面の中心から要素の中心までの距離で中心より上を正とする。})$$

次に鉄筋についても、与えられた歪に対する軸力 N_{st} , 曲げモーメント M_{st} を計算すれば、その断面の受けもつ軸力 N , 曲げモーメント M が計算される。

図5 M-φ図のフローチャート

次に与えられた軸力 N_{give} に対するM-φ図のプログラムの作製に移るわけだが、図5にそのフローチャートを示したので参照されたい。ここで計算上曲率φを無次元化して

$$\varphi = \varepsilon_c + \varepsilon_s$$

として計算している。

終局曲げモーメントを計算するに際し、コンクリート、スチールの終局値をひびきでそれぞれ $\varepsilon_c = 3.5\%$, $\varepsilon_s = 10.0\%$ とした。 ε_c , ε_s のどちらが終局値をさまに取るかで、終局モーメントが変わるわけであるが、その様子を卓線と示してある。一方鉄筋の終局を $\varepsilon_s = 1.67$ (降伏点)とするときの様子を一点卓線と示したが、交点AはWhitneyの均合鉄筋比にはほぼ一致している。

— 曲げ剛性の決定 —

以上のようにしてM-φ図が決定されたわけだが、一般的な形状を図7の実線と示した。この図を見るとコンクリートのひび割れ時($\varphi = \varphi_{p1}$)と鉄筋の降伏時($\varphi = \varphi_{p2}$)で曲線α特性が変化しており

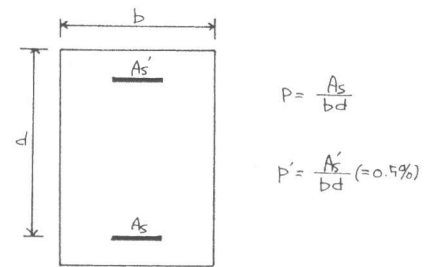


図3

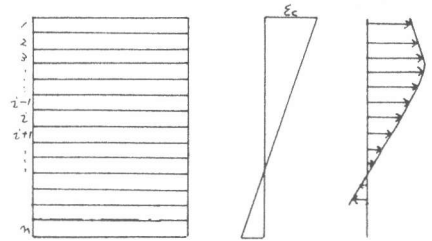


図4

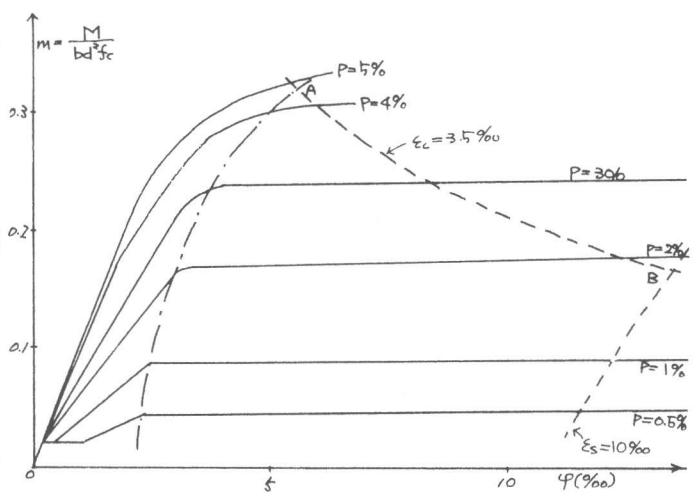
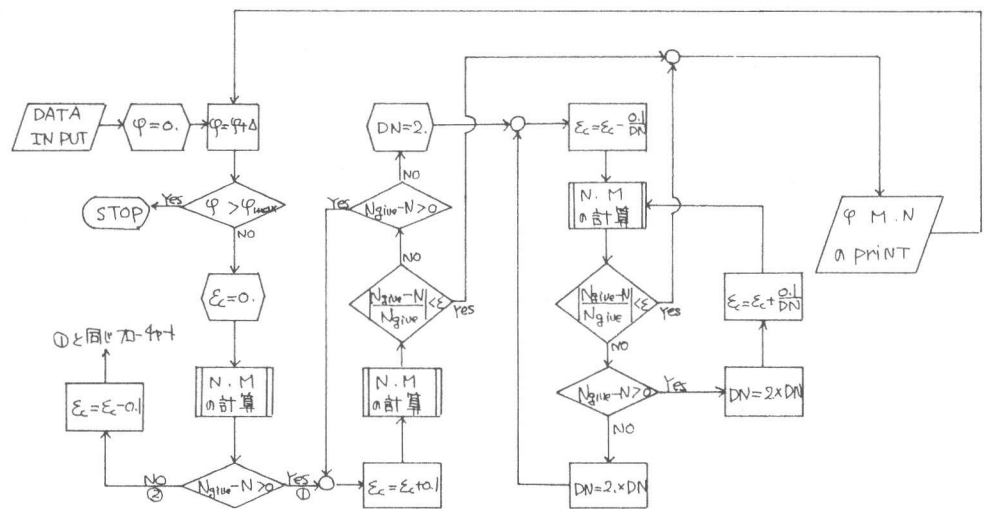


図6 M-φ図

また、それ以外のところは直線変化とみなすことができるといふ考慮から、計算上の単純化として直線のようにAB間を直線で結び、tri-linearとし、曲げ剛性の変動を三直線の傾きで決定するとしていた。従ってAB間では多少安全側の選択となったわけである。なお軸力が増加するにつれてM-φ図は上記のtri-linearな形状に近づくことが確かめられている。

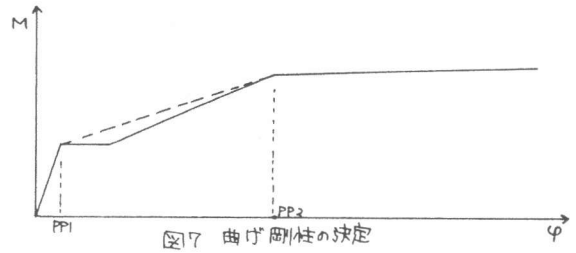


図7 曲げ剛性の決定

続いて図8・図9はそれぞれコンクリートの応力-歪曲線における ϵ_{co} 、 f_c を変えたときのM-φ図の変動を示したものであり、図8では、上記のような曲げ剛性の取り方をする限りあまり影響はないように思われる。また図9では、 f_c が大きいほど剛性の変化する曲げモーメントの値が数% ($f_c=240$ kg/cm²と $f_c=350$ kg/cm²とはおよそ5%) 大きくなるが、剛性自体はあまり変わらないのでびび割れ後の構造物の挙動にはあまり影響しないようである。しかしびび割れ前の剛性については、たとえば $f_c=350$ kg/cm²と $f_c=300$ kg/cm²とは20%前後のちがいが見られる。

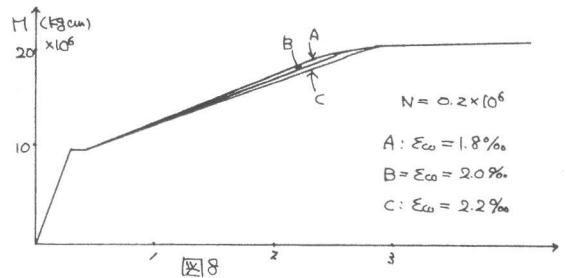


図8

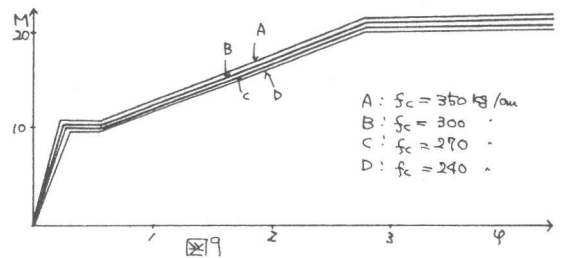


図9

なお、図1の直線BCのちがいによる影響を考察すべしだが、今解析しようとしている対称鉄筋配置 ($A_s = A'_s$) の場合には、通常はコンクリートの歪み ϵ_c が ϵ_{co} のままである、 ϵ_c は取扱わなかった。以上は、コンクリートは鉄筋に比べ変動が大きく、その応力-歪曲線は人により、国により異なるので、曲げ剛性への影響を若干だけ加えたものである。

— 構造解析 —

解析の対象となる構造物は、図10に示したような端部固定の門形ラーメン構造である。解析するために、図10の斜線のついている部分は梁と柱の結合部で他の部材より高い曲げ剛性を有するところなので、剛域と考え、予め高い剛性を仮定しておき、変化させないものとした。

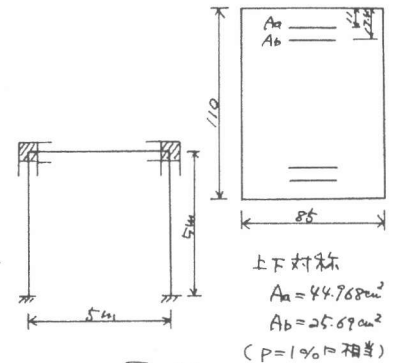


図10

解析は有限要素法を基本として、それ以上記の曲げ剛性決定プログラムを導入したもので、そのフローチャートを図11に示したので参照されたい。なお荷重増分は最終荷重の200分の1程度とした。

— 解析結果 —

図12に鉄筋比 $P=1\%$ の場合の荷重 P と曲げモーメント M の関係を示したが、この図より曲げモーメント分配の状況が良くわかると思う。またこの図より最初コンクリートがびび割れが発生するのがおよそ60t前後、塑性比 η が $\eta < 4$ でまず構造的に不安定になるときの荷重はおよそ170t前後であること

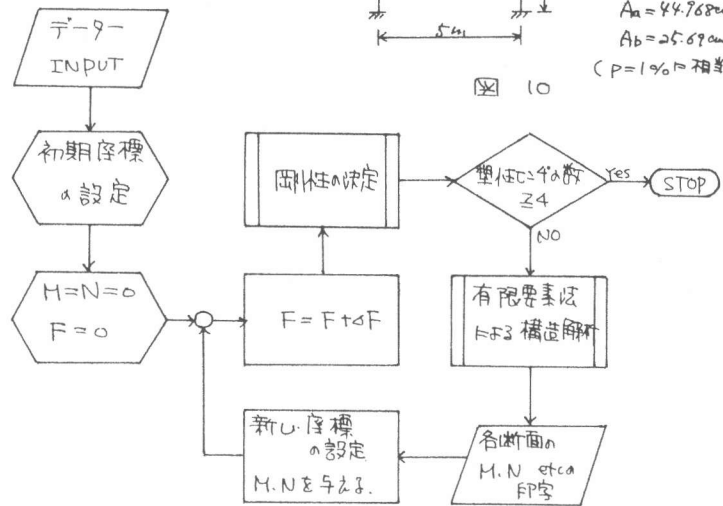


図11. 構造解析のフローチャート

がわかる。

その他、 ρ は図示しなかったが、鉄筋比を $\rho = 2.0, 3.0, 4.0$ と変えて同様の解析を行なってみた。その結果、ひび割れ発生時の荷重、最終荷重はほぼ鉄筋比に比例して増大しており、かつその間の曲げモーメント配分の状況はほぼ相似形を有すとわかった。

— 結果の考察 —

以上の結果より、荷重の荷重作用への変換は、ひび割れ以後上下に変動するが、それは一貫して弾性計算による変換直線を中心として変動している。従って、その破壊確率は、実際に計算して比較して見る必要があるが、弾性計算による直線と十分近似を成すのではないかと予想される。

また、 ρ では取扱わなかったが、ある一つの変換曲線により荷重を荷重作用へに変換し、それにより求めた破壊確率はその要素の破壊確率であり、構造物の破壊確率ではない。(ただし静定構造物は要素の破壊確率は、すなわち構造物の破壊確率である。)したがってすべての要素の破壊確率を求めた上で、それをどのようにして構造物の破壊確率に結びつけるか、すなわち各要素の相関関係を明確にし、それをいかにして確率論的に取扱うかという問題がある。

加えて、ラーメンは軸力が常に働くので、軸力の変化により耐力(曲げモーメントで表わしたものの)の分布がいかに変動するかを研究する必要がある。

なお、このプログラム作成にあたり土屋一郎君から多大な助力を得たことを記し、ここに感謝の意を表す。

— 参考文献 —

- J. Ferry Borges and M. Castanheira ; STRUCTURAL SAFETY
- A. Faria ; Non-LINEAR BEHAVIOUR OF FRAMES AND SLABS

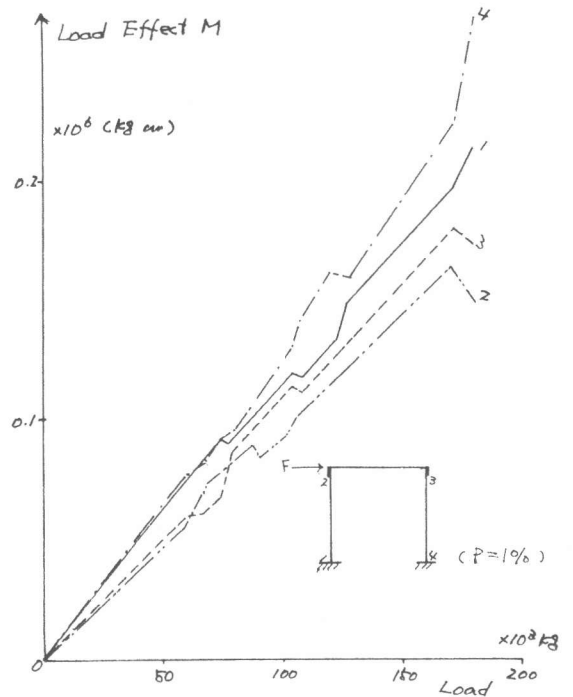


図 12