I-110　連続合成げたの弾塑性変形について

琉球大学　正員　浜田 純夫

1. まえがき

連続げたの弾塑性変形は破壊までにどの程度の変形が得られるかという変形容量の点で重要になってくる。今日，米国や英国では，合成げたの極限耐力設計が適用されつつあるにもかかわらず，変形そのものについては余り論じられていないようである。また，合成げたが現在多く使用されているスタッドジベルで合成される限り，完全合成は期待できない。合成げたの弾塑性変形の解析においては，鋼材およびコンクリートの応力－ひずみ関係をできるだけ現実のものに近づける必要がある。そのため，応力－ひずみ関係は非線形となり，曲げ－曲率関係を求めるには数値計算が必要となる。実験用のけたのように短スパンであればせん断変形も無視できない。とくに合成げたは腹板のみでせん断力に抵抗するため，曲げ剛性が大きいだけにそれだけ大きいせん断力を受けることになる。ここでは，これらを含めて，リーハイ大学，アルバータ大学で行われた実験値と比較した。

2. 弾塑性変形解析

曲げ変形で最も重要なのはコンクリートおよび鋼の応力－ひずみ関係の仮定と考えられる。合成げたの鋼のひずみは，降伏ひずみ ε_y は当然のこと，ひずみ硬化域にまで達する。しかも，このひずみは相当大きくなり，ひずみ硬化域の応力－ひずみ関係式を直線と仮定すると，計算値が大きくなる。したがって，ここでは2次曲線を用いることにした。この2次曲線はひずみ硬化域の始点 $(\varepsilon_{st}, \sigma_y)$ の座標と勾配，および最大応力の座標から求めることができる。結局，図－1(a) に示すような応力－ひずみ関係になり，式になおすと，

$$\sigma = E\cdot\varepsilon \quad \text{for} \quad \varepsilon \le \varepsilon_y, \qquad \sigma = \sigma_y \quad \text{for} \quad \varepsilon_y < \varepsilon \le \varepsilon_{st}, \qquad \sigma = a + \sqrt{b + c\varepsilon} \quad \text{for} \quad \varepsilon_{st} < \varepsilon \tag{1}$$

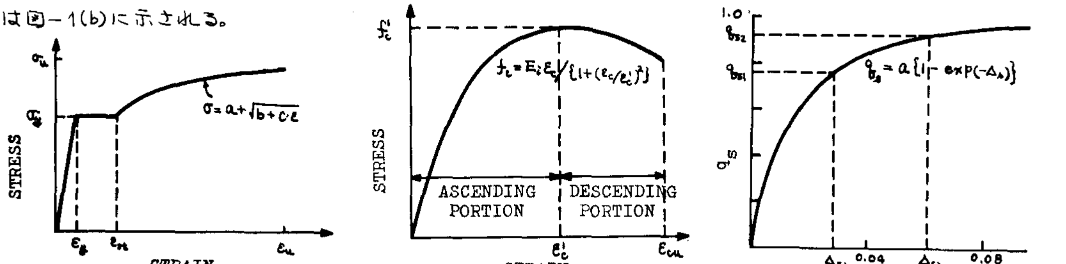
ここで，$a = \dfrac{\sigma_u^2 - \sigma_y^2 - 2E_{st}\sigma_y(\varepsilon_u - \varepsilon_{st})}{2\{\sigma_u - \sigma_y - E_{st}(\varepsilon_u - \varepsilon_{st})\}}$，　$b = (\sigma_y - a)(\sigma_y - a - 2E_{st}\varepsilon_{st})$，　$c = 2E_{st}(\sigma_y - a)$

たとえば，アルバータ大の実験用げたの鋼材G40.12 ($\sigma_y = 44$ ksi, $\sigma_u = 68$ ksi, $E_{st} = 7500$ ksi, $\varepsilon_{st} = 0.0146$, および $\varepsilon_u = 0.20$) に対しては，ひずみ硬化域の応力－ひずみ関係式は　$\sigma = 41.5 + \sqrt{-48.5 + 3720\varepsilon}$　となる。

コンクリートの応力－ひずみ関係は，鉄筋コンクリートばりの極限耐力を知るために過去よく研究された。Hognestad らは応力の上昇域と下降域とを分けて考えた。Desayi らは上昇域，下降域ともによく合う式をつぎの形で提案している。

$$f_c = E_i\varepsilon_c / \{1 + (\varepsilon_c/\varepsilon_c')^2\} \tag{2}$$

ここで，E_i は初期接線弾性係数であり，$E_i = 2f_c'/\varepsilon_c'$ で与えられる。また ε_c' はコンクリートの強度にほとんど関係せず $2000\times(10^{-6})$ 程度のようである。また引張強度はないものと仮定できる。結局コンクリートの応力－ひずみ関係は図－1(b)に示される。



(a)　FOR STEEL　　(b)　FOR CONCRETE　　(c)　FOR SHEAR CONNECTORS

FIG.1　STRESS-STRAIN AND LOAD-SLIP RELATIONSHIPS

鋼およびコンクリートの応力－ひずみ関係に基づいて，曲げ－曲率関係を求めることになる。この曲げ－曲率関係は上述のような応力に対しては数値計算によるのが最も現実的な方法と考えられる。図-2に示す分割に対して，要素内の直線変化の応力のもとでは厳密になるようにつぎの計算式を用いた。

$$N=\int\sigma dA=\sum_j S_j, \qquad M=\int\sigma\cdot y\, dA=\sum S_j y_j \tag{3}$$

ここで，$S_j=\frac{1}{6}\{\sigma_{j-1}\cdot dA_{j-1}+2\sigma_j(dA_{j-1}+dA_j)+\sigma_{j+1}dA_j\}$

また等断面積dAの場合は，$S_j=\frac{dA}{6}(\sigma_{j-1}+4\sigma_j+\sigma_{j+1})$となる。

上式のように曲げ－曲率の関係式は直線ではないので，変形を求める場合，どの方法を用いるにせよくり返し計算が必要となる。ここでは階差法を用いて，変形および部材力を求めた。連続合成げたにおいて大きな問題となるのは，弾性変形においても正と負の曲げモーメント域における剛性が異なるので，直接解を求めることができず，繰り返し法を適用しなければならないことである。当然，塑性域ではさらに複雑になる。

曲げの解析と同時にずれ留めのずれの影響を入れなければならない。一般にずれ留めの力学的性質は押し抜き試験により力と変位（ずれ）の関係で示され，Yamらはつぎの式で与えた。（図-1.(c)参照）。

$$q_s=a\{1-\exp(-\Delta_b)\} \tag{4}$$

ここで，q_sはずれ留めに作用する力とずれ留めの強さとの比，Δ_sは変位，aおよびbは定数である。負の曲げモーメント域におけるずれ留めの挙動についてはあまり知られていないが，Van Dalenによれば，正の曲げモーメント域と差はあまりないようである。一方，この性質を用いてずれ留めの曲げへの影響を入れねばならないが，厳密に導入することは極めて困難である。Yamは Predictor-Corrector法を用いて計算したが，1 load stepに数分の計算量であった。とくに連続げたの場合は曲げモーメント未知数となるため，計算はさらに複雑になる。このため，「ずれの微分であるずれひずみがせん断スパン中一定である。」という仮定を設けた。この仮定を用いると，極めて簡単にずれ留めの変形の影響も含めることができる。そして，この仮定は，Newmarkの方法によるものと比較しても余り差が生じず，かなり妥当なものと考えられる。

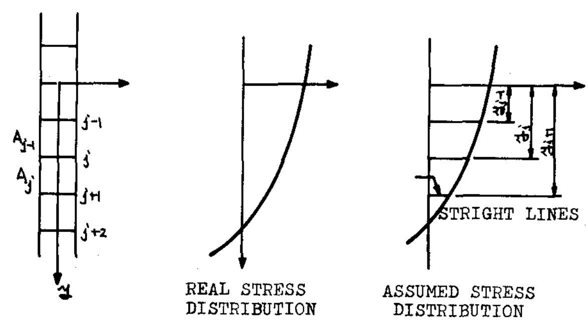


FIG.2 CO-ORDINATE SYSTEM FOR NUMERICAL INTEGRATION PROCEDURE

せん断変形は，一般に曲げ変形と比較するとかなり小さい。しかし，スパンの小さいはり，とくにせん断抵抗に弱い合成げたは，かなりこの影響が大きい。また，連続ばり，固定ばりのように曲げに対して境界条件が大きく作用するが，せん断力に対しては，全く影響がなくなる。連続合成げたの試験ばりにはこの3つがともに重なっている。

3. 実験結果との比較

Culverらにより行われた実験と著者がアルバータ大で行った実験の結果を前述の理論と比較した。詳しくは当日発表したい。連続げたの実験において，曲げ－曲率関係を得た例は，アルバータ大の実験以外，あまり見当たらないようである。比較の結果，結論を述べると，(1) 実験値と理論値はよく一致している。(2) せん断変形の影響は無視できない。(3) 曲げモーメントの再分配も行われるが，これは降伏後の剛性が大きく影響する。(4) 破壊までの最大変形は，実験によると，コンクリートの破壊または垂直支柱の局部挫屈で決るが，これは，鋼材の断面寸法，垂直支柱の鉄筋量が大きく影響する。