

東京工業大学 正員 ○依知川哲治

東京工業大学 正員 吉田 裕

三菱重工業 正員 横田 享敬

1. はじめに

コンクリート等で周囲を拘束される埋設鋼管の、浸透圧力等の外圧に対する座屈耐力は管の外方への変形が拘束されるため、拘束のない鋼管の座屈耐力よりはるかに大きなものとなる。外周を拘束された鋼管の座屈耐力については Amstutz の理論等で評価することが可能であるが、崩壊に至るまでの過程の詳細についてはなお不明な点も多い。近年薄肉大口径の埋設鋼管が多く用いられるようになってきているが、本研究では平面骨組構造の大変形・弾塑性解析により、外周を拘束された鋼管に対する鋼管の崩壊に至る挙動を数値的にシミュレートする解析過程を構成したのでここに報告する。

2. 解析法の概要

本研究で基礎とした解析法は次式の部材増分つりあい方程式を基礎とする大変形解析法である。

$$\Delta \mathbf{f} = \mathbf{T}_{(n+1)}^T \mathbf{k}^* \mathbf{T}_{(n+1)} \mathbf{G} \left(\Delta \mathbf{u} + \begin{Bmatrix} 0 \\ -\Delta \alpha \end{Bmatrix} \right) + \mathbf{T}_{(n+1)}^T \mathbf{k}^* \Delta \mathbf{T}(\mathbf{u}_{(n)}) + \begin{Bmatrix} \mathbf{x}_{1(n)} \\ -\alpha_{(n)} \\ \mathbf{x}_{2(n)} \\ -\alpha_{(n)} \end{Bmatrix} + \Delta \mathbf{T}^T \mathbf{f}_{(n)}^* \quad (1)$$

$\mathbf{T}$: 座標変換行列, $\mathbf{k}^*$: 部材剛性マトリックス, $\mathbf{f}$: 外力, $\mathbf{x}_{(n)}$: 初期座標, $\mathbf{u}$: 変位, α : 剛体回転量

ここで、添字(n+1)は変形後の第(n+1)つりあい段階における値である事を表している。(1)式は一部材の変形は微小であるという仮定のほかは高次項の省略等の近似を行わずに誘導したものである。その結果、(1)式は高次の非線形方程式となっているが、線形化による2段階近似と反復修正過程により解法を構成している。紙面のスペースの都合上、解法の詳細については文献2)を参照していただきたい。

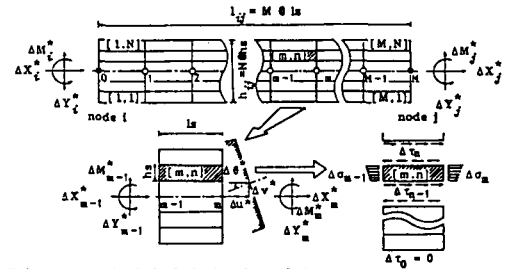
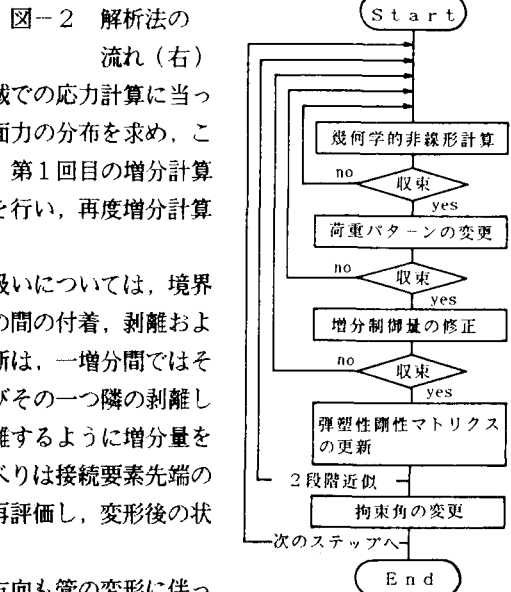


図-1 局所応力評価法(上)

材料非線形性については一部材を図-1に示すような小領域に分割し、それぞれの各小領域において降伏判定を行い、部材剛性マトリックスを構成している。各小領域での応力計算に当っては応力が部材力とのつりあいを保つように部材内の断面力の分布を求め、これとつりあう応力として評価している。また降伏判定は、第1回目の増分計算により得られた部材力増分の1/2の値をもとに降伏判定を行い、再度増分計算を行なう2段階過程をとっている。

変形を拘束されることによる耐力の増加の過程の取り扱いについては、境界に仮想的な接続要素を導入し、変形に伴う鋼管と周囲との間の付着、剥離およびすべりの評価を行っている。まず付着および剥離の判断は、一増分間ではその変形挙動は線形的であるとして、接触している点およびその一つ隣の剥離している点の動きに着目し、一組の境界が付着あるいは剥離するように増分量を調節して解析をすすめている。また、鋼管の周囲とのすべりは接続要素先端の周方向変位を許すだけでなく、拘束角の方向についても再評価し、変形後の状態で周方向の変位が自由になるようにしている。

座屈を伴うような変形の大きい領域では外水圧の作用方向も管の変形に伴っ



て変化するが、これに対しては一定の荷重パターンを等倍するのではなく、荷重増分として変形後の $n+1$ 段階の荷重パターンと n 段階の荷重パターンとの差を与え、変形後においても作用荷重の総和が鋼管に垂直となるように収束計算をおこなうアルゴリズムとした。

解析法の流れをフローチャートにして表すと図-2のようになる。

3. 崩壊過程の数値シミュレーション結果

解析対象として設定したのは半径と板厚の比 $r/t=150.5$ の大口径鋼管に対して一様な水圧が周囲より作用するという問題である。対称性を考慮し、図-3に示すような右半分の領域に対して解析を行い、鋼管の下端の一点のみが外部と接触している状態を初期状態とした。鋼管と外部との間の隙間 k_0 については $k_0/r=0.0, 0.0005, 0.001$ の3ケースを設定した(図-3参照)。図-4は $r/t=150.5$ における荷重変位曲線であるが、隙間のあるケースでは拘束のない場合の座屈荷重近傍でいったん変形が進んだ後、鋼管が外部に接触し、荷重はさらに上昇している。図-5(a)-(e)は隙間のないケースにおける鋼管の変形の推移を示したものである。拘束のない場合の座屈荷重レベルにおいて外周と鋼管との付着域が(a)に示すように鋼管の下方に広がり、その後荷重の上昇に伴い(b)-(e)に示すように付着域が上方に拡大し、剥離部の中央と両端において塑性ヒンジを形成し崩壊に至っている。(d), (e)に対応する塑性域の分布状況を示したものが図-6である。外水圧と剥離角との関係を Amstutzの理論解¹⁾と比較して図-7に示した。

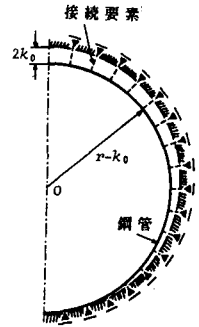


図-3 解析対象

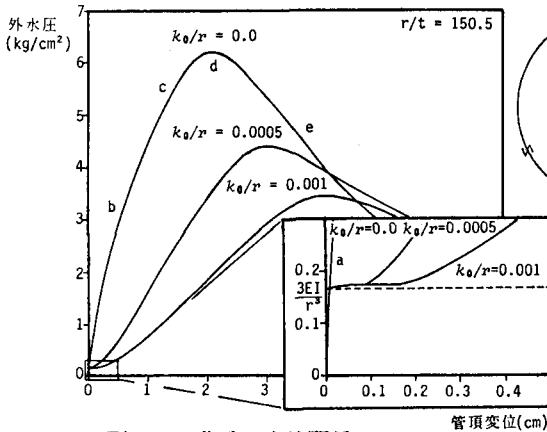


図-4 荷重～変位関係

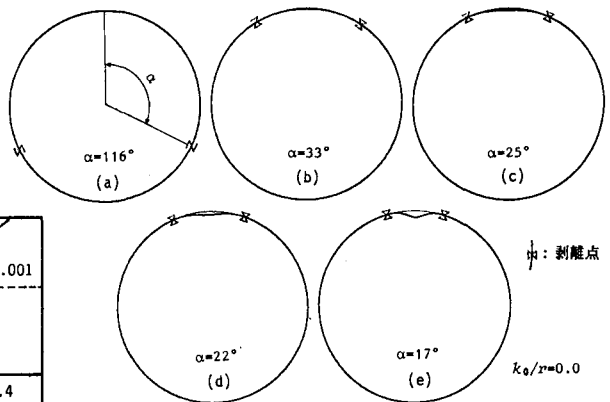


図-5 鋼管の変形状態の推移

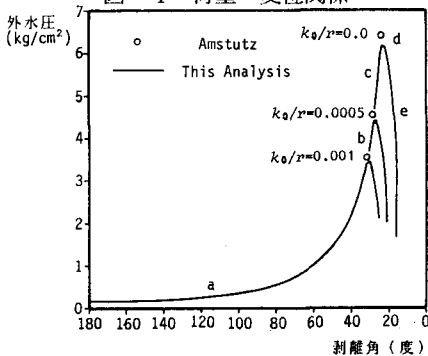


図-5 剥離角と外水圧の関係

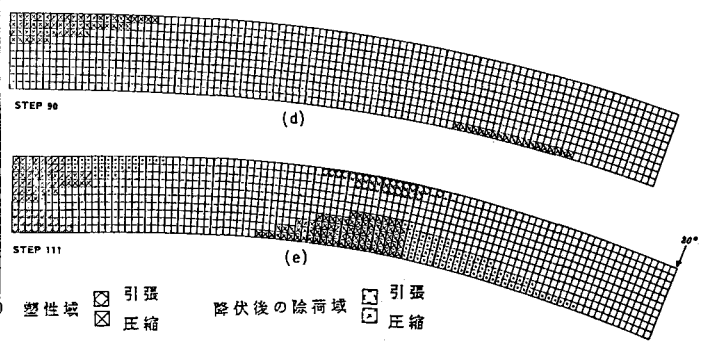


図-6 塑性域の分布状況

参考文献 1)E.Amstutz:Schweizerische Bauzeitung,10. Juli,1969 2)吉田, 増田, 森本, 広沢:土木学会論文報告集 第300号,1980年 8月 2)吉田, 野村, 望月:第34回応用力学連合論文集,1984 3)阿部, 吉田, 野村:第40回年次学術講演会I-32