第1部門 動的緩和法を適用した弾塑性有限要素解析の並列計算手法

JIP テクノサイエンス	正会員	竹原 和夫
関西大学工学部	フェロー	三上 市藏
関西大学大学院	学生員	宮辻 和宏
関西大学工学部	非会員	二宮 淳

1. まえがき

近年の計算機と有限要素法に基づく構造解析ソフトウェアの著しい進歩により部材のみならず,構造物の終 局挙動はかなりの部分が数値計算により直接評価が可能になってきている¹⁾.構造物の終局挙動はその非線形 挙動に起因しており,幾何学的非線形解析や材料非線形解析,複合非線形解析や耐荷力解析などがこれに相当 する.最近では非線形解析を実務設計に導入する傾向もみられるが,モデル化,要素分割,増分量,収束計算 の許容誤差に影響を受けるため,妥当な解析ソフトウェアであっても正確な解を得ることはできない.特に適 切な荷重増分量を設定することは容易ではなく,小さくすると解は得られるものの多大な解析時間を要したり, 逆に大きくすると収束性が悪くなり解が得られない場合もある.これは非線形問題の塑性域においてつりあい を満足する応力やひずみの調整のために,各荷重増分で剛性行列の更新を行っていることによる.

動的緩和法はひずみや応力の調整を時間による繰返しに代用させることから,非線形解析に関して種々の研究が行われてきた²⁾.本研究では場に関する離散化に有限要素法を用いた動的緩和法³⁾に,コンクリートの破壊基準としてよく用いられる Drucker-Prager の構成則⁴⁾を導入することで弾塑性解析を試みる.さらにこのプログラムを PC クラスタ型並列計算機⁵⁾に実装し,実構造物への非線形解析の適用例とその台数効果を示す.

2. 数値計算手法

(1) 並列計算を考慮した動的緩和法

要素は8節点6面体要素とし,解析対象を図-1に示すように添字 mを用いて Ω_m と Ω_{m+1} に分割すると仮定する.ある分割領域 Ω_i の節点nにおけるx, y, z方向の変位を $\{\delta\}_{\Omega_{i,n}} = \{\delta_x, \delta_y, \delta_z\}_{\Omega_{i,n}},$ 作用外力を $\{f_{m+1}\}_{\Omega_{i,m}} = \{f_{n+1}, f_{n+1}\}_{\Omega_{i,m}}$ とする、時間は間隔 Δt で分割す

作用外力を $\{f_{g,ext}\}_{\Omega i,n} = \{f_x, f_y, f_z\}_{\Omega i,n}$ とする.時間は間隔 Δt で分割する.はじめに要素剛性マトリクス $[K_e]$ を求めるが,ここでは領域分割されていることを意識する必要はない.

 $[K_e] = \int \int \int [B]^T [D] [B] dV$ (1) ここで [D] は弾性応力-ひずみマトリクスである、次に時刻 $(p-1/2)\Delta t$ において $[K_e]$ に $\{\delta\}$ を乗じ各要素毎

次に,節点 nのつりあいに慣性項と減衰項を付加し,さらに変形すると次式が得られる.

ここにmは質量 , Cは減衰係数である.次に変位速度 $\left\{\delta
ight\}_n$ を時刻pにおいて中央差分表示し,変形すると次式が求まる.

Kazuo TAKEHARA, Ichizou MIKAMI , Kazuhiro MIYATSUJI and Atsushi NINOMIYA



図-1 領域分割

並列性を考えない場合は式 (2) ~ (5) を繰り返すだけでよいが,並列計算を行う場合は境界上の $\left\{f_{g,int}
ight\}$ に各分 割領域の $\left\{f_{e,int}
ight\}$ を集計する必要があるため,単にこの節点に式 $\left(3
ight)$ ~ $\left(5
ight)$ を適用することはできない.そこ で並列計算を行う前処理として図-1に示すように, Ω_{i+1} の境界上に仮想節点を生成し,式(3)~(5)の繰返計 算のために用いる.このとき通信は境界上の節点変位のみとする.すなわち領域 Ω_i の境界面上の節点の変位, Ω_{i+1} における仮想節点の変位をそれぞれ $\{\delta\}_{bou,\Omega i}, \{\delta\}_{double,\Omega i+1}$ とすると,変位の更新は次式で表される.

(2) 弾塑性の適用

弾塑性問題の場合は式 $(2) \sim (6)$ を増分形式にする.さらに弾塑性応力-ひずみ関係 $[D_{ep}]$ が必要となるため, 式 (1) を繰返計算に含める.ここで Drucker-Prager の降伏関数⁴⁾ は以下の式で表される.

 $f = \alpha I_1 + \sqrt{J_2} - \kappa - k = 0 \qquad (7)$

ここに I_1, J_2 は応力の不変量, α, k は Drucker-Prager のパラメータ, κ は硬化パラメータである. 関連流れ則 を考えると [D_{ep}] マトリクスは以下のようになる.

式(8)の第2項は塑性流れによる剛性低下を示す.また h は初期降伏曲面およ び後続する載荷曲面の勾配の関数から求められる硬化パラメータである、今 回はひび割れを考慮していない.

(3) 結果の検証

文献⁴⁾に示す1要素モデルを用いて,導入した構成則の検証を行った.応 .力-ひずみ関係は文献⁶⁾のものを用いた.本解法のパラメータとして m は 1, Δt は 1.0e-4, Cは 1000 を用い, 数値積分は 2×2×2の gauss 積分とした.1 軸および2軸状態について本解法と汎用ソフトウェア DIANA⁷⁾ との比較を 図-2に示す.これより両者はほぼ同一の結果を与えることがわかる.

3. 数值計算結果

次に実構造物への適用例を示す.図-3に示す解析モデルの節点数は1760, 要素数は 790 で,モデル左の荷重を漸増載荷させる.並列計算のための領域 分割は長手方向に分割する方法とした.ハードウェアには PC クラスタ型並 列計算機⁵⁾を用いた.システムソフトウェアにSCore 5.6.1を搭載し,ネット ワークは Ethernet とした.非線形解析 10 ステップの場合の解析時間とクラ イアント台数の関係および並列化効率を図-4に示す.これより台数の増加に 伴い解析時間が短縮されていることがわかる.

4. あとがき

詳細は講演当日に譲る.

参考文献

- 1) 宇佐美勉編:座屈設計ガイドライン 改訂第2版 [2005年版],土木学会,2005.9.
- 2) 三上市藏,田中克弘:ベクトル計算機を用いた円筒パネルの弾塑性有限変位解析。 構造工学論文集, 土木学会, Vol.33A, 1987.3. 1日にユナロマスキ、エハチム、100.00A、1901.0. 3) 三上市藏,竹原和夫,石上洋二郎:有限要素法を適用した動的緩和法:梁-柱への a
- 適用,平成6年度土木学会関西支部年次学術講演会概要集,土木学会,1994.5.
- 4) W.F.Chen: Plasticity in Reinforced Concrete, McGraw-Hill, 1982.
- 5) 三上市藏, 竹原和夫, 濱谷秀一: 有限要素法を適用した動的緩和法による PC クラ スタ型並列計算手法における計算時間と通信時間,平成16年度土木学会関西支 部年次学術講演会概要集,土木学会,2004.5. 6) コンクリート標準示方書[構造性能照査編],土木学会,2002.
- 7) 川口和広, 竹原和夫: 汎用構造解析ソフトウェア DIANA の概要と利用例, 第26 回材料講習会,日本材料学会,pp.95-100,2003.9.



図-2 解の妥当性



図-3 解析モデル

