

## 弧長増分法による鉄筋コンクリート橋脚の地震時水平耐荷力解析

九州大学 学生員 大城宏治 九州大学 正員 彦坂 熙  
第一復建(株) 正員 石橋 治 九州大学 訪問研究員 楊 国平

### 1. 序論

コンクリート構造物の耐震設計および補強において、ポストピークを含む全領域にわたる応答を得ることは非常に重要である。しかし現在構造解析において最もよく使われている有限要素法解析においては、最大荷重近傍で高い非線形性が現れるなどの原因により、ポストピーク領域を取り扱うことは非常に困難である。本研究では、ポストピーク領域の非線形解析に対していくつかの成果をあげている弧長増分法を用いて、鉄筋コンクリート橋脚の地震時水平耐荷力解析を行い、実験結果と比較し、全領域にわたる応答を検討した。

### 2. 解析方法

#### (1) 材料モデル

圧縮応力下のコンクリートは初期降伏まで線形弾性材料と仮定し、その後は二次元弾塑性理論を用いる。降伏条件と破壊基準には、Kupferら<sup>1)</sup>の実験に基づく二軸応力場の限界曲面を用いる。引張応力下のコンクリートは、応力が引張強度に達するとひび割れを生じる。ここでは、ひび割れ発生後のコンクリートを連続体として扱う分布ひび割れモデルを使用する。鉄筋の応力-ひずみ関係はひずみ硬化係数0.01とし、圧縮鉄筋の座屈を考慮して軟化させるトリリニア型モデルを用いた。

#### (2) 積層モデル

本研究では柱式橋脚を対象とするが、今後壁式橋脚の三次元解析に拡張応用していくことを考慮して、8節点長方形アイソパラメトリック厚肉シェル要素を用い、この要素を積層モデルとし、非線形有限要素法解析を行った。<sup>2)</sup> 積層モデルとは、要素を板厚方向に適当な数の層に分割するものであり、各層の応力成分は層の中央の応力成分で代表され、層毎に一定であると仮定する。要素毎に層の数を変えることができ、一要素内で層厚を層毎に変えることもできる。これにより、圧縮コンクリート、ひび割れコンクリート、鉄筋の材料特性をそれぞれ考慮することが可能になり、鉄筋コンクリートシェルの非線形挙動をシュミレートすることができる。

#### (3) 弧長増分法<sup>3)</sup> [図-1参照]

通常の解析手法と異なって、増分長 $\Delta L$ を規定して、次のような制限条件が与えられる。

$$\Delta p_{i+1}^T \Delta p_{i+1} + b \Delta \lambda_{i+1}^2 q^T q = \Delta L^2 \quad (1)$$

ここで、 $\Delta p_i$ は $i-1$ 回繰り返し計算後の変位増分、 $q$ は全荷重増分、 $\lambda$ は荷重レベル、 $\Delta \lambda_i$ は繰り返し後の荷重増分である。スカラー $b$ はスケールパラメーターといわれる。本研究では、CrisfieldとRammの手法に準じて $b=0$ としている。荷重レベル増分、変位増分の繰り返し手順は図-1に示す通りである。反復変位の関係は下式ようになる。

$$\Delta p_{i+1} = \Delta p_i + \eta_i \delta_i = \Delta p_i + \eta_i (\delta_i + \lambda_{i+1} \delta_T) \quad (2)$$

ただし、 $\delta_i = -K_a^{-1} f_i(p_i)$ 、 $\delta_T = K_a^{-1} q$  である。

$\eta_i$ は線探索(line-search)を行う場合に用いる加速パラメータであり線探索を行わない場合は、図-1に示す通り $\eta=1$ である。式(2)を式(1)に代入して整理すると $\lambda_{i+1}$ を求める式を得

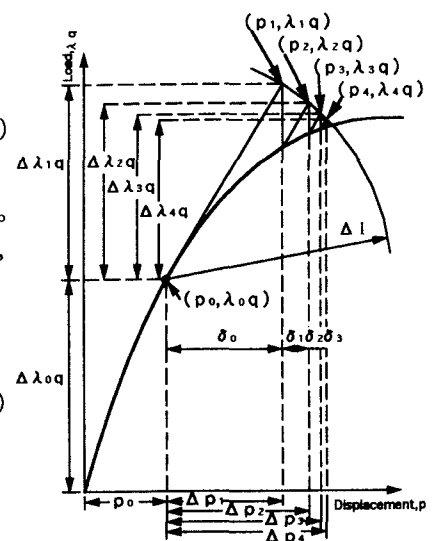


図-1 弧長増分法

ることができる。

$$a_1 \lambda_{i+1}^2 + a_2 \lambda_{i+1} + a_3 = 0$$

(3)

$$\begin{aligned} \text{ただし, } a_1 &= \eta_i \delta_i^T \delta_i = \eta_i c_i & a_2 &= 2\delta_i^T \Delta p_i + \eta_i \delta_i^T \delta_i = 2d_i + 2\eta_i d_2 & a_3 &= \eta_i \delta_i^T \delta_i + 2\delta_i^T \Delta p_i + [\Delta p_i^T \Delta p_i - \Delta l^2] \\ & & & & & = \eta_i d_3 + 2d_4 + [\Delta p_i^T \Delta p_i - \Delta l^2] \end{aligned}$$

また、本研究では、線探索手法を用いて収束を加速している。

#### (4) 解析対象構造物の概要

今回解析対象に選んだ柱断面600×600mmのRC橋脚模型(N o. 1)の諸元及び配筋概要を図-2に示す。荷重は、軸力を55tf一定にし、水平加力はフーチングから3000mmの位置の橋軸方向に単調漸増载荷した。また、図-3に解析に用いた有限要素メッシュを示す。8層のコンクリート層と15層の鉄筋の層から構成される2つの異なった積層パターンを用いている。比較のために、フーチングから2535mmの位置まで厚さ1.6mmの鋼板巻き補強しさらにそれをアンカー筋でフーチングに定着したもの(4H)の解析も行い、また、既設の実構造物である段差フーチングを有するRC壁式橋脚の解析も行った。

### 3. 解析結果及び考察

図-4にN o. 1, 4Hの解析結果および実験値の载荷点での荷重-変位曲線を示す。最大荷重は、N o. 1, 4Hの解析値とも実験値とほぼ一致しているが、全体的にみても、N o. 1, 4Hとも実験値に比べ変位が大きめになっている。これは、弧長増分 $\Delta l$ の選択による影響であると思われる。ポストピーク領域においては、両方の解析結果とも耐力低下を示し、特にN o. 1は耐力低下の傾きが実験値とほぼ一致しており、ある程度の応答なら把握することができる。また、N o. 1と4Hを比較してみると、N o. 1にくらべ4Hの耐力は大幅に向上しており、鋼板巻きおよびアンカー筋による定着は、耐力についてはかなりの補強効果が得られることが分かる。なお、RC壁式橋脚の解析結果については、当日発表の予定である。

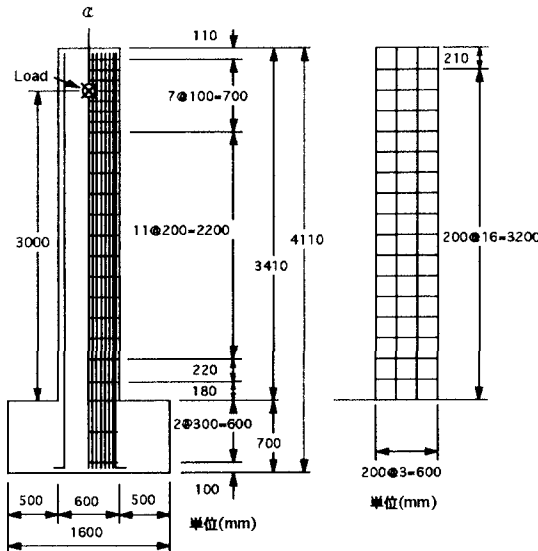


図-2 RC橋脚諸元(N o. 1)

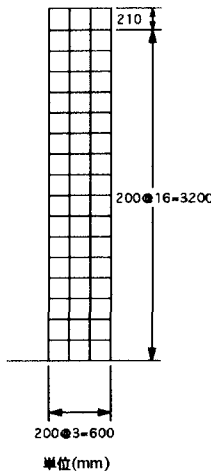


図-3 有限要素メッシュ

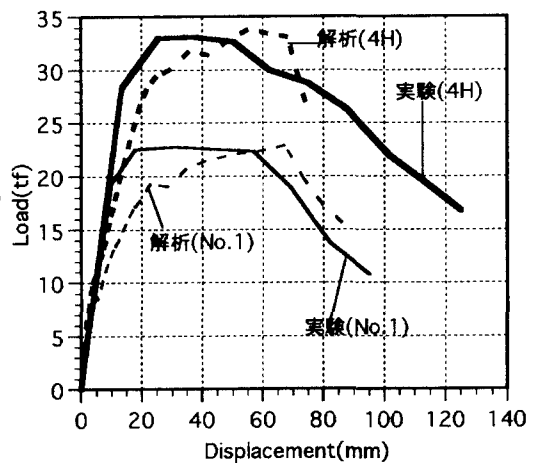


図-4 荷重-変位曲線

#### [参考文献]

- 1) H. Kupfer et al: Behavior of Concrete under Biaxial Stresses, ACI Journal, Vol. 66, No. 8, Aug. 1969.
- 2) E. Hinton et al: Finite Element Software for Plates and Shells, Pineridge Press, 1984.
- 3) M. A. Crisfield: An arc-length method including line searches and accelerations, Int. J. Numer. Meth. Engng., 19, 1269-1289, 1983.