

# I-7

## 一本柱モデルとの比較による $\pi$ 型ラーメン橋の動的エネルギー収支の検討

北見工業大学 学生員 〇内田 忍 八千代エゾエンジニアリング 正会員 小倉 裕介  
(株)開発工営社 正会員 青地 知也 北見工業大学 フェロー 大島 俊之  
北見工業大学 正会員 三上 修一 北見工業大学 学生員 椎橋 亜由美

### 1. はじめに

ラーメン橋は不静定次数が多く、大地震時の弾塑性挙動において、塑性ヒンジの発生挙動などの複雑な動的非線形応答特性を有している。従って、このラーメン橋を多質点系にモデル化し、動的解析を実施するためには解の信頼性・安定性等に充分配慮し、実際の応答に近づける工夫が必要となる。

本研究では著者らがこれまで実施してきた1本柱橋脚モデルによる計算の経験に基づいて、ラーメン橋の動的非線形解析を簡略化して計算する方法の検討や、構造系全体のエネルギー収支および入力エネルギーに対する塑性ひずみエネルギーの比較・検討を行ったので報告する。

### 2. RC橋脚のモデル化

本論文で対象としたRC橋脚は山形自動車道笹谷 I.C〜一般有料道笹谷 T.N間にある阿古耶橋で、1990年に完成したものである。ラーメン橋脚モデルでは、P-5 橋脚および、P-6 橋脚を対象とした。上部工を 20 分割、橋脚部をそれぞれ 16 分割している。一本柱モデルでは P-5 橋脚を基本とし、質点 10 にはラーメン橋モデルで静的解析を行い、P-6 橋脚の最大水平変位および、P-5 における上部工の最大たわみ角からバネ係数を求め水平バネ、回転バネを付けたモデルとした。静的解析方法としては、左側ヒンジ部分に単位荷重を水平方向にかけ、その時の変位を用いてバネ係数を作成した。各橋脚モデルを図-1、2 に橋脚断面図を図-3 に示す。

図-1、2 に示すようにそれ

ぞれの節点に質量を配分し、離散質点系は要素にモデル化した。また、両モデルには、杭基礎による地盤反力を考慮する地盤バネを配置した。図-1、2 の簡略的な解析モデルには、各橋脚の段落としての位置と断



図-1 ラーメン橋モデル

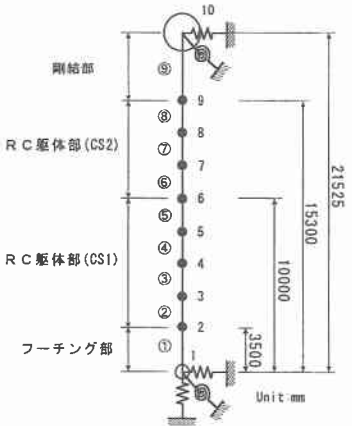


図-2 一本柱モデル

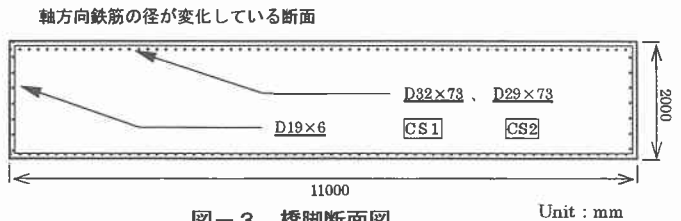


図-3 橋脚断面図

Investigation of Dynamic Energy Balance on  $\pi$ -type Rahmen Bridge compared with One-column model

by Shinobu UCHIDA, Yusuke OGURA, Tomoya AOCHI, Toshiyuki OSHIMA, Shuichi MIKAMI and Ayumi SHIIBASHI

面記号で表した。断面は矩形断面で鉄筋径の低減によって段落としが実施されている。

### 3. M-φ 曲線のモデル化

材料特性に関して、鉄筋は弾塑性硬化型のバイリニアモデルを使用し、塑性時の弾性係数は弾性時の弾性係数の  $1/10^4$  とした。次にコンクリートは道路橋示方書同解説Ⅴ耐震設計編（平成8年）<sup>3)</sup>を参考に帯鉄筋による横拘束効果を評価し、図-4に示すようにモデル化した。この材料モデルでは圧縮側の最大圧縮応力時ひずみ（図-4の  $c_{max}$  点）を越えてから残留ひずみが生じ、引張側は  $c$  点を越えると応力が零となる。この2つの材料特性を用いて曲げモーメント-曲率曲線を描き、その曲線を図-5に示すように2本の直線で近似した。この図の4点はそれぞれ断面の弾性限界： $c$ 、引張側鉄筋の降伏： $y_0$ 、圧縮側コンクリートの最大圧縮応力に達した点： $c_{max}$ 、圧縮側コンクリートの終局ひずみに達する点： $u$  である。本解析で用いた履歴特性を図-6に示し、その経路は鉄筋降伏（ $y_0$ 点）前は原点指向で、それ以上の曲率を経験したときは原点と  $y_0$  点を結ぶ直線の傾きで履歴をたどるものとした。

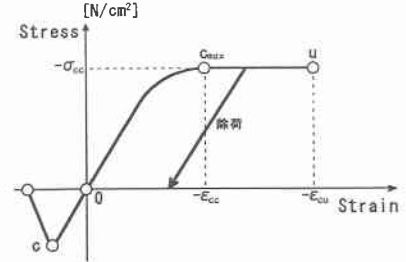


図-4 コンクリート材料モデル

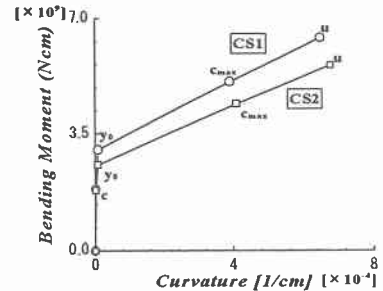


図-5 M-φモデル

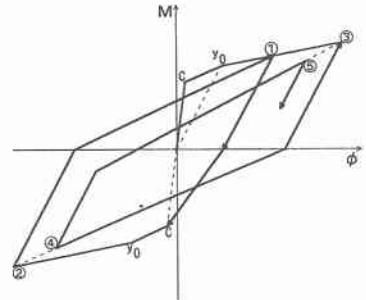


図-6 復元力履歴特性

表-1 M-φモデルの各点の値

| 断面名 | c     |        | y <sub>0</sub> |        | c <sub>max</sub> |        | u     |        |
|-----|-------|--------|----------------|--------|------------------|--------|-------|--------|
|     | φ     | M      | φ              | M      | φ                | M      | φ     | M      |
| CS1 | 0.009 | 18.463 | 0.079          | 30.301 | 3.898            | 50.735 | 6.477 | 63.925 |
| CS2 | 0.009 | 18.130 | 0.077          | 25.784 | 4.081            | 44.090 | 6.774 | 55.791 |

Unit:  $\phi \times 10^{-4} (1/cm)$ ,  $M \times 10^3 (Ncm)$

### 4. 数値解析

一般に構造物の地震応答計算を行うとき、増分形の運動方程式は次式ようになる。

$$[M]\Delta\{\ddot{u}\} + [C]\Delta\{\dot{u}\} + [K_t]\Delta\{u\} = \Delta\{P\} \quad \dots (1)$$

式(1)中の  $\Delta\{u\}$  は増分形の相対変位ベクトル、 $[M]$  は質量マトリックス、 $[K_t]$  は微小な時間間隔に対して有効な剛性マトリックス、 $[C]$  は減衰マトリックス、 $\Delta\{P\}$  は増分形の外力ベクトルである。式(1)を Wilson の  $\theta$  法 ( $\theta=1.4$ ) を用いた逐次積分から応答を計算した。

エネルギー応答に関する式として、次式のエネルギーのつり合い式を用いた。

$$W_K + W_D + W_t = E \quad \dots (2)$$

ここで、各項は左辺から運動エネルギー  $W_K$ 、減衰エネルギー  $W_D$ 、全内部ひずみエネルギー  $W_t$ 、右辺は外力によるエネルギー  $E$  (全エネルギー) をそれぞれ表す。その中で全内部ひずみエネルギー  $W_t$  は構造物の振動が継続している間では、弾性ひずみエネルギー成分  $W_e$  と塑性ひずみエネルギー成分  $W_p$  の和で、次式のように表される。

$$W_t = W_e + W_p \quad \dots (3)$$

本解析では弾性ひずみエネルギーを次のように定義した。時々刻々の復元力  $\Delta\{f_t\}$  は剛性マトリックスと増分形の変位ベクトル  $\Delta\{u\}$  で表せる。ここで、求めた時刻  $t$  における復元力  $\{f_t\}$  と弾性限界 (c 点) までの  $M-\phi$  曲線の傾きに相当する曲げ剛性  $EL_e$  を図-7 で参照して弾性時の剛性マトリックス  $[K_e]$  を作成し、弾性の変位ベクトル  $\{u_e\}$  を求める。これを式で表すと式 (4)、(5) となる。

$$\{f_t\} = \int [K_r] \Delta\{u\} d\tau \quad \dots (4)$$

$$\{u_e\} = [K_e]^{-1} \{f_t\} \quad \dots (5)$$

$$W_e = \frac{\{u_e\} [K_r] \{u_e\}}{2} \quad \dots (6)$$

式 (6) を弾性ひずみエネルギーと定義し、全ひずみエネルギーから引くことで塑性ひずみエネルギーを算出した。

ここでは、図-1 および図-2 に示す解析モデルに正弦波を入力波形は振幅 400[gal]、加振周期 0.5[sec] を入力し動的応答解析を行った。解析条件としては解析時間が 5.0[sec]、解析時間間隔は  $\Delta t = 5.0 \times 10^{-5}$  [sec] で行った。これより、両モデルのエネルギー収支について検討し、さらに入力エネルギー量の影響が軽減され、構造特性に依存した値として用いられる、 $Wp/E$  の時刻歴応答に関して、両モデルの検討を行った。

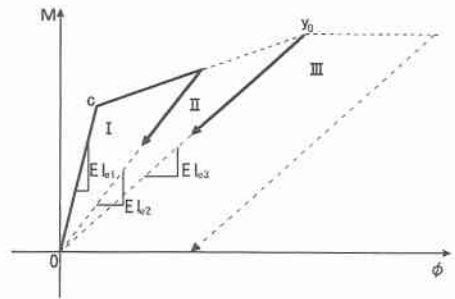


図-7 原点指向時の曲げ剛性変化

## 5. 解析結果

エネルギー収支について考察する。図-8 および図-9 は両モデルの加振周期の影響によるエネルギー収支を示す。両モデルの終了時におけるエネルギーの総和は一本柱モデルの方がやや小さい。塑性ひずみエネルギーを見ると、ラーメン橋モデルの場合 1 秒までに破壊が起き、この時刻から 2 秒付近までは波形が一定に近い状態が続いている。これはコンクリートにひび割れが発生し始めている状態だと考えられる。これ以降の時刻では破壊が進みひずみエネルギーが増大している。この破壊状態は、 $M-\phi$  履歴からも言える。一本柱モデルは総エネルギーがラーメン橋モデルより低い、図-9 より破壊形状はほぼ等しいといえ

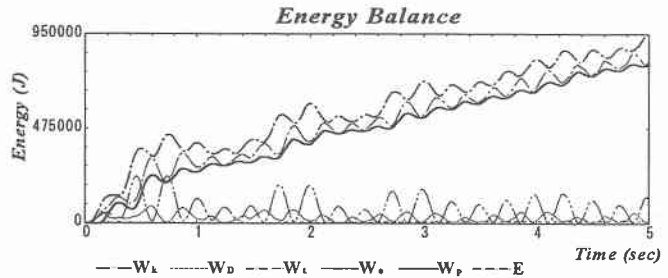


図-8 ラーマン橋モデルのエネルギー収支

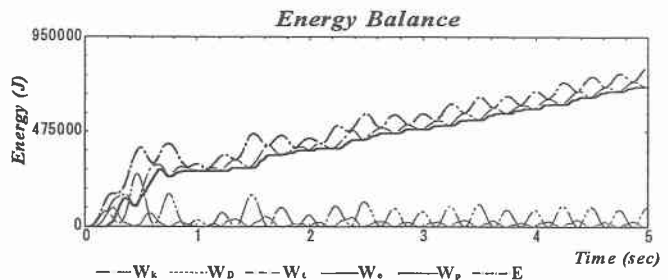


図-9 一本柱モデルのエネルギー収支

る。また、M- $\phi$ 履歴図では履歴面積が小さく現れている。これは、一本柱モデルにP6橋脚のエネルギーが不足し、なおかつ、P6橋脚の破壊形態の影響が含まれていないために起こったものと推測される。

次に、 $W_p/E$ 時刻歴について、図-12、13に示す。これによるとラーメン橋モデルでは0.5秒までは破壊が進みこの時刻から一定にはなるが、1秒過ぎからまた破壊が進み、2秒付近から一定になる。一方、一本柱モデルでは、1.5秒まで破壊が進みこの時刻以降から一定状態になっている。このことから、一本柱モデルでは瞬時に破壊状態に達していることが解る。また、ラーメン橋モデルよりも、一本柱モデルの方が多少大きな値となっている。これにより、塑性ひずみエネルギー比の観点から破壊形態を見ると現時点でのパラメーターでは一本柱モデルの方が塑性化しやすいモデルであると考えられる。

## 6. まとめ

実際の複合ラーメン橋で弾塑性応答解析を行い、それを一本柱モデルに簡略化させて、エネルギー収支の面から比較検討を行った。本解析で得られた結果を以下にまとめる。

- (1) 本研究での一本柱モデルではラーメン橋モデルの静的解析からバネ係数を求め頂上部分にバネを付けて解析を行った。しかし、総エネルギーは小さく現れたことから、P6橋脚の影響によるエネルギーを調べ、似合うようなバネなどをモデル化し解析していく必要がある。
- (2) 総エネルギーで見ると、一本柱モデルの方が早い段階に塑性化が表れている。このことは $W_p/E$ 時刻歴で確認できる。
- (3) 本解析では、 $W_p/E$ 時刻歴では塑性ひずみエネルギーの比がほぼ等しくなったが、これは構造物全体の損傷を現しているため、今後は局部的エネルギーを調べて破壊形態を見ていく必要がある。

## 参考文献

- 1) 宇佐見勉、鄭沂、葛漢彬：Pushover 解析と等価1自由度モデルによる鋼製ラーメン橋脚の耐震照査法、土木学会論文集 No.626/I-48, pp231-240, 1999.7.
- 2) 小倉裕介、大島俊之、三上修一、山崎智之、太田雅仁：RC橋脚の地震時弾塑性応答におけるエネルギー収支の解析、構造工学論文集 vol.45A, pp985-993, 1999.3.
- 3) 日本道路協会：日本道路橋示方書・同解説 V耐震設計編、1998.12.

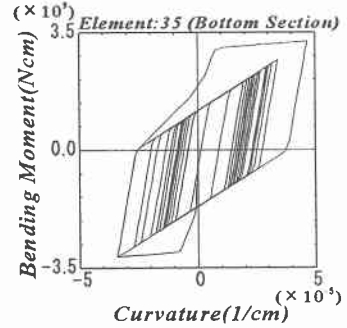


図-10 ラーメン橋モデルのM- $\phi$ 履歴 (P5橋脚)

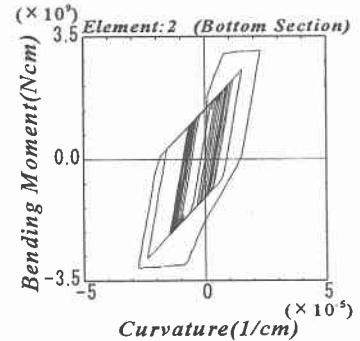


図-11 一本柱モデルのM- $\phi$ 履歴

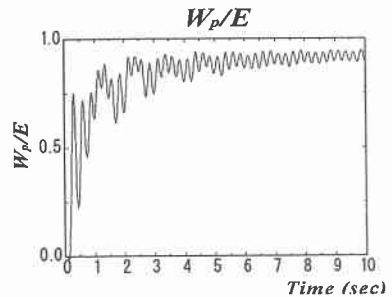


図-12 ラーメン橋モデルの $W_p/E$ 時刻歴

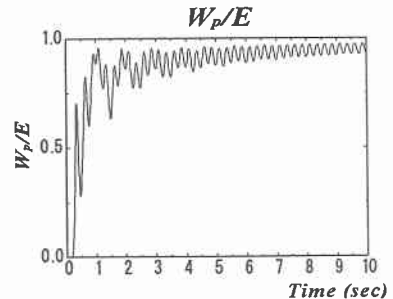


図-13 一本柱モデルの $W_p/E$ 時刻歴