

## I -26

## 連続ラーメン橋の減衰に関する基礎的研究

(株) 開発工営社 正 員 青地 知也  
(株) 開発工営社 正 員 松井 義孝  
(株) 開発工営社 正 員 鷺尾 昭夫  
北見工業大学 フェロー 大島 俊之  
北海道大学 フェロー 林川 俊郎

## 1. はじめに

現在、橋梁の耐震設計は地震時保有水平耐力法をはじめ、構造部材の非線形領域での特性を考慮した、弾塑性（非線形）解析に移行してきている。これは、構造部材が非線形領域に入っても適切なねばり（じん性）を持たせ、エネルギー吸収性能を高めることにより損傷を限定した範囲内にとどめ、同時に構造系全体としての崩壊を防ぐことを目的とした設計法である。

ここで、構造系全体のエネルギー吸収性能が重要となる。このエネルギー吸収性能の評価は、動的応答解析を行う場合には減衰として取り扱うのが一般的である。減衰には構造系によって決まる粘性減衰、部材が非線形領域に入ることによって生じる履歴減衰の2つがあり、これらの和がエネルギー吸収性能となる。

よって、本研究では、構造系全体の解析から非線形領域における減衰定数の変化をとらえると共に、減衰理論の違いが与える影響などについて検討している。

## 2. 解析条件

## 2. 1 解析モデル

本研究で用いたモデルは図-1のような3径間連続ラーメン橋であり、支間は両端部が45m、中央部は85m、橋脚高は30mとなっている。橋脚部は非線形要素としトリリニア型（武田式）のM- $\phi$ 履歴曲線を用いている。その他の上部工およびフーチング部については線形要素とした。また橋脚下端部を基盤固定とし、それ以外はローラー支承とした。これを53節点、52要素の2次元フレームモデルに分割しモデル化をおこなった。

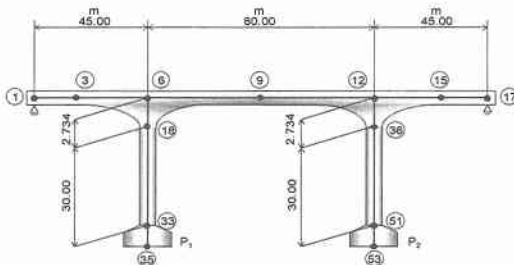


図-1 解析モデル図

表-1 解析諸元

|       |                         |    |                    |
|-------|-------------------------|----|--------------------|
| ヤング係数 | $E$ (N/m <sup>2</sup> ) | 上部 | $3.10 \times 10^9$ |
|       |                         | 下部 | $2.50 \times 10^9$ |
| 断面積   | $A$ (m <sup>2</sup> )   | 上部 | 8.62~15.69         |
|       |                         | 下部 | 19.98              |
| 剛度    | $I$ (m <sup>4</sup> )   | 上部 | 7.63~49.14         |
|       |                         | 下部 | 39.55              |

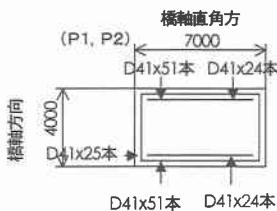


図-2 橋脚断面図

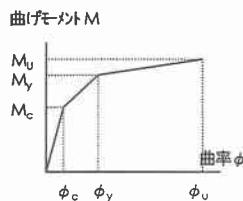


図-3 履歴曲線

表-2 橋脚非線形特性

|      |                     |                      |                        |
|------|---------------------|----------------------|------------------------|
|      | C力か点                | Y降伏点                 | U終局点                   |
| 曲率   | $7.835 \times 10^5$ | $58.562 \times 10^5$ | $2353.791 \times 10^5$ |
| 曲率/φ | 7747.46             | 18396.54             | 21143.84               |

Basic Study on Damping of Continuous Rigid-Frame Bridge.

by Yoshitaka Matsui Tomoya Aochi Akio Washio Toshiyuki Ohshima Toshiro Hayashikawa

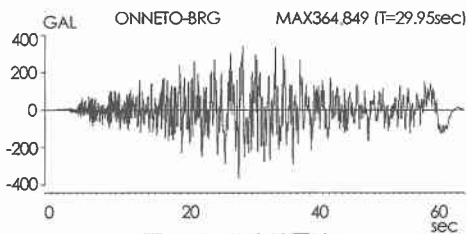


図-4 入力地震波

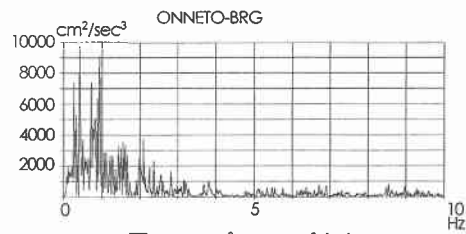


図-5 パワースペクトル

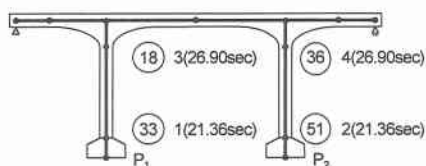


図-6 塑性ヒンジの発生順序

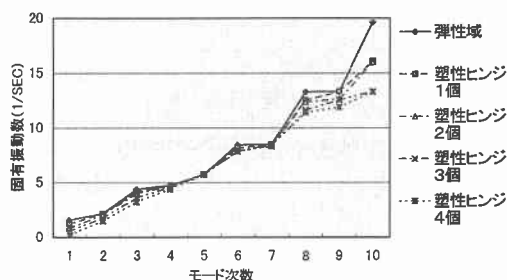


図-7 塑性ヒンジによる固有振動数の変化

解析に用いた入力地震波は図-2に示すように社会法人 日本道路協会発行の温根沼大橋の振幅調整波であり、最大振幅 364.849GAL、継続時間 60 秒を基盤面より入力した。

## 2. 2 解析方法

本解析は、大別すると次の2つの方法を用いて解析をおこなった。これは、部材の塑性化が構造全体の減衰に与える影響を検討すると共に、減衰理論の違いが計算結果に与える影響について検討を行っている。

モード解析は比較的、容易に解析を行うことができ、塑性ヒンジを用いることによって減衰定数の塑性化による影響を簡便に解析することができる。よって、塑性ヒンジの増加に伴う固有振動数、減衰定数の変化をとらえると共に減衰理論の違いが与える影響についても検討している。

動的応答解析は解析に複雑さが伴うものの時刻歴応答データが算出される。この時刻歴データの内、加速度、エネルギーを用いて減衰理論の違いによる減衰定数の変化や各消費エネルギーの比率について検討する。

- 1) モード解析
  - 塑性ヒンジを用いて塑性後の固有振動数の変化をとらえる。
  - 減衰理論の違いによる減衰定数の変化を同様にとらえる。
- 2) 動的応答解析
  - 部材が塑性後、自由振動をさせ応答加速度の結果から塑性後の減衰定数を求める。
  - 応答解析より求めたエネルギーの関係からエネルギー吸収性能について検討する。

以上の解析を行い、塑性領域での減衰（エネルギー吸収）について検討する。

## 3. モード解析による検討

### 3. 1 塑性ヒンジと固有振動数の変化

ラーメン橋の場合、強い地震動を受けると橋脚の上下端に塑性ヒンジが発生することが知られている。これを動的解析を用いて、橋脚の鉄筋が降伏した状態を塑性ヒンジとし、その発生順序を求めた。その結果、図-6のようになる。この結果を利用し、塑性ヒンジの発生した箇所の部材剛性を塑性後の剛性（トリリニアの3次剛性）を用い、等価減衰定数を20%として塑性ヒンジ0～4個までのモデルに対しモード解析を行った。なお線形要素の等価減衰定数は、上部工3%、下部工5%としている。

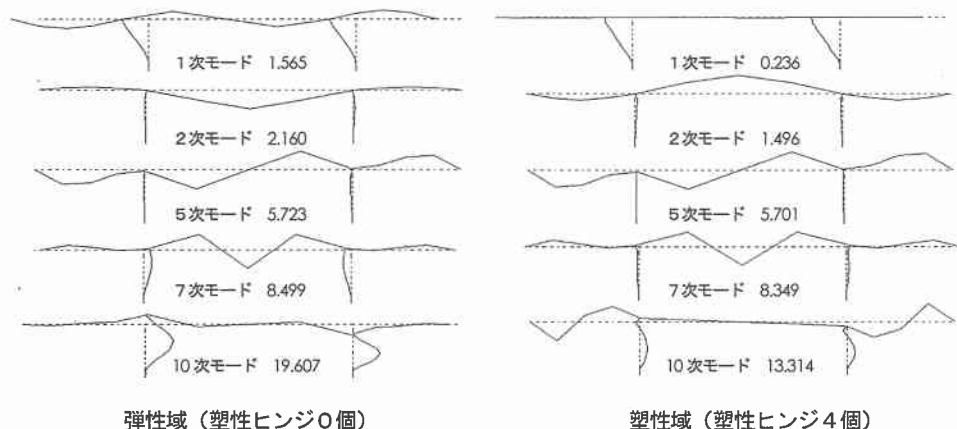


図-8 モードベクトル図

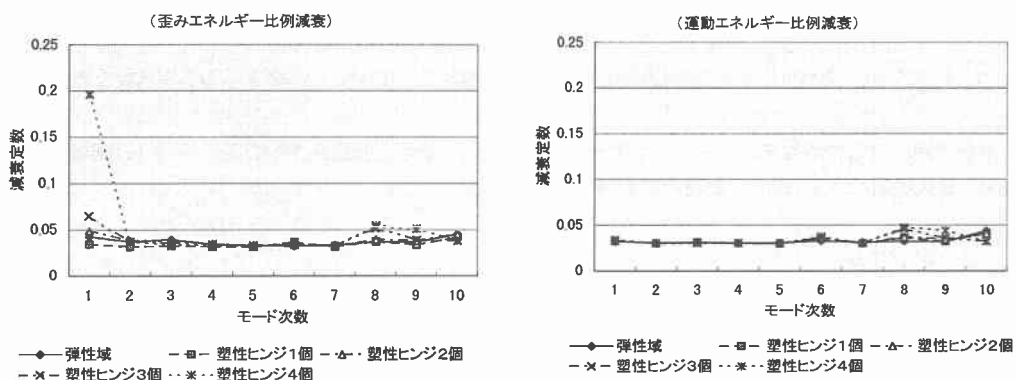


図-9 塑性ヒンジによる減衰定数の変化

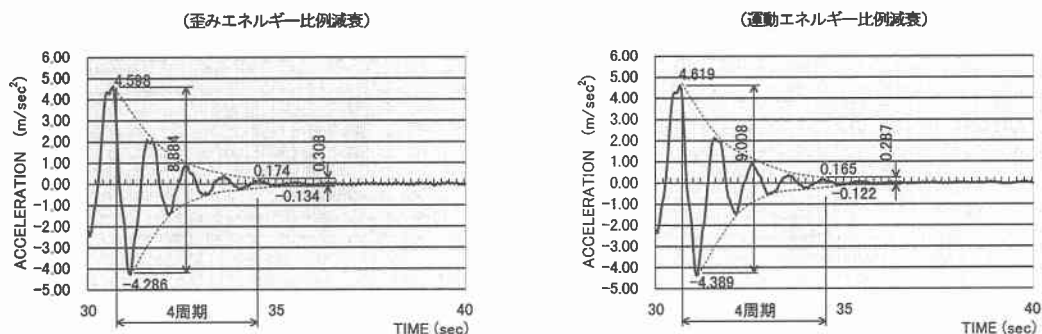
図-7に解析結果を示す。塑性ヒンジが生じるにつれ各次数ともに固有振動数は小さくなる。これは、塑性化した部材の剛性が小さくなったために、構造全体が長周期化したためであるが、5次、7次の固有周期では、ほとんど変化がない。これは、図-8に示すモードベクトル図において、弾性域（塑性ヒンジ0）と塑性域（塑性ヒンジ4）で、変化が他のモードに比べ非常に小さくなっている次数であり、塑性ヒンジの影響が構造物の変形性状に影響しづらくなっており固有周期への影響が小さいためである。

### 3. 2 塑性ヒンジ、減衰理論の違いによる減衰定数の変化

減衰理論には一般に、歪みエネルギー比例減衰、運動エネルギー比例減衰、レーリー減衰の3種類がある。

道路橋示方書V(P=74)には、歪みエネルギー比例減衰を用いることとしている。

図-9に示すように歪みエネルギー比例減衰を用いた場合、塑性ヒンジが増加すると1次モードの減衰定数が大きくなっているが、運動エネルギー比例減衰の場合、塑性ヒンジが増加しても1次モードの減衰定数はほとんど変化しない。これは下部工の歪みによる変形に比例する歪みエネルギー比例減衰では、塑性ヒンジの影響が反映されやすいが、上部工の質量による慣性力に比例する運動エネルギー比例減衰では塑性ヒンジの影響を受けにくいと考えられる。図-8のモードベクトル図を見ても、橋脚上下端に変形の大きいモードは、減衰定数の変化が大きな差となって現れている。よって、これらのことから等価線形化法を用いた線形解析を行う場合、歪みエネルギー比例減衰を用いることが妥当であるといえる。



図－１１ 節点 18（橋脚上端部）の自由振動加速度

#### 4. 動的応答解析による検討

##### 4. 1 自由振動時の応答加速度による減衰定数

動的応答解析を行い、各節点での応答加速度の波形を用いて、減衰定数を求めようと試みた。

まず、履歴減衰効果が十分得られるように、塑性ヒンジ発生直後ではなく、塑性ヒンジに最大応答が発生する時間 ( $T=30.71\text{sec}$ ) まで地震波を入力し十分非線形要素の履歴ループが回るようにしている。、その後は入力地震動を 0 にし、自由振動をさせる。この時得られた応答加速度波形の振幅と周期数との関係から対数減衰率  $\delta$  を求めるものである。ただし、各要素の減衰定数は橋脚の非線形性を考慮して道路橋示方書 V (P74, 75) にない、上部工を 3%、下部工を 2%としている。

結果を図－１１に示す。この図から一波ごとに読みとり、全体波数の平らな値として対数減衰率  $\delta$ 、及び減衰定数  $h$  を求めるには次式を用いた。ここで、 $X$  は振幅をす。

$$\delta = \log_e \left( \frac{x_{i-1}}{x_i} \right) \quad h \doteq \frac{\delta}{2\pi}$$

$$\text{故に、歪みエネルギー比例減衰} \quad \delta = \frac{1}{4} \ln \frac{8.884}{0.308} = 0.840 \quad h = \frac{0.840}{2\pi} = 0.134$$

$$\text{運動エネルギー比例減衰} \quad \delta = \frac{1}{4} \ln \frac{9.008}{0.287} = 0.862 \quad h = \frac{0.862}{2\pi} = 0.137$$

以上の解析から、各々 13.4%、13.7% の減衰定数を得た。これは、道路橋示方書 V (P75) の非線形域に示されているコンクリート構造の等価減衰定数の参考値 12~20% の範囲に適合した。

また、比較すると歪みエネルギー比例減衰よりも運動エネルギー比例減衰の方が減衰定数が大きくなっている。これは、全体の粘性減衰係数が歪みエネルギー比例減衰の場合は下部工の変形にひれいするため、2%に近い値となり、運動エネルギー比例減衰の場合は上部工の慣性力に比例するため 3%に近い値となるので、その分の差が減衰定数に現れたものと考えられる。ただし、この差は非常に小さく全体へ与える影響は小さいと考えられる。これは、構造による粘性減衰の違いよりも、部材の非線形性による履歴減衰による影響が大きいためと考えられる。このように非線形の動的解析を行う場合は、減衰理論を歪みエネルギー比例減衰、運動エネルギー比例減衰では余り変化がない。より安全側の値を選択する場合は、減衰定数の小さい歪みエネルギー比例減衰がよい。ただし、必ずしも歪みエネルギー比例減衰を用いることが適切であるとは限らず、むしろ、履歴減衰の評価法に留意すべきである。

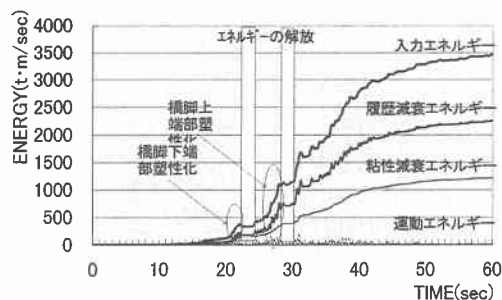


図-1 2 各エネルギー量（累積）

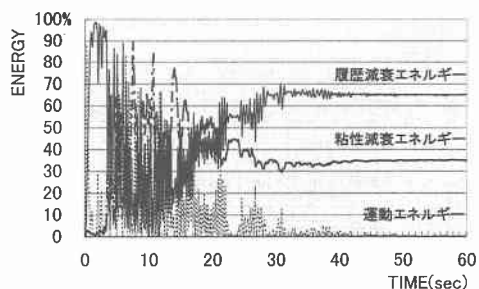


図-1 3 各エネルギーの入力エネルギーに対する比率

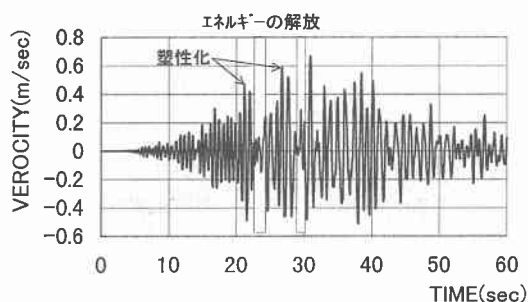


図-1 4 橋脚上端部の応答加速度

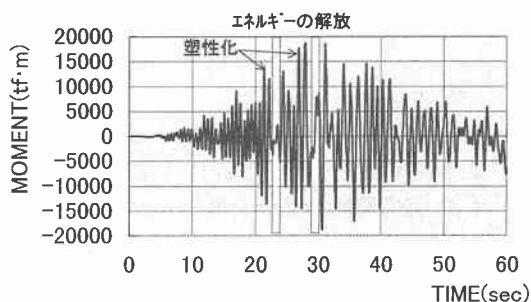


図-1 5 橋脚上端部の発生モーメント

#### 4. 2 応答エネルギーによる評価

地震動による入力エネルギーは、運動エネルギーと粘性減衰エネルギーと履歴減衰エネルギーの和で表すことができる。これらのエネルギーは部材要素の塑性化に伴い、随時変化している。この内、履歴減衰エネルギーは部材の塑性化に伴い増加する事から、塑性化によるエネルギー吸収増加は、履歴減衰エネルギー分と言える。ただし、同レベルの地震動でも構造の塑性化の程度によって入力エネルギーが変化するので履歴減衰エネルギーの量を単純に判断することは難しい。

図-1 2に、入力エネルギー、運動エネルギー、粘性減衰エネルギー、履歴減衰エネルギーの時刻歴図を示す。この図に示すように、橋脚に塑性ヒンジが発生した時間（橋脚下端部 21.36sec、橋脚上端部 26.90sec）付近において各エネルギー共に、急激に増加している。これは橋脚部材が塑性化し、変位が大きく生じたことにより、図-1 4に示すように構造系の応答速度が大きく変化し、入力エネルギーを増加させたためである。その後は塑性化によってエネルギーが解放されたため、各エネルギーの値は一定の値に成っている。（グラフが平らになっている。）また、図-1 5に示すように橋脚上端部に発生するモーメントを見ても同様のことがいえる。これらことから構造の塑性化の影響をエネルギー変化によって確認できた。

図-1 3は各エネルギーの入力エネルギーに対する割合を100分率で表した時刻歴応答図である。

運動エネルギーによって消費される割合は全体的に小さく、最終的にはほとんどなくなる。

粘性減衰エネルギーと履歴減衰エネルギーは対照的な変化を示す。粘性減衰エネルギーによって消費される割合は振動が加わってから数秒間は小さいものの、弾性領域では、エネルギー消費（減衰）のほとんどを占めるが、塑性領域に入る 21.36sec 以降小さくなり、歪みエネルギーによる消費と逆転する。これとは反対に履歴減衰エネルギーによって消費される割合は振動が加わってから数秒間は大いものの、弾性領域では、エネルギー消費が小さく、塑性領域に入る 21.36sec 以降大きくなり、最終的には粘性減衰エネルギーによる消費率は 35%、履歴減衰エネルギーによる消費率は 65%となる。このことから、履歴減衰によるエネルギー消費が大きいことがわかる。

## 5. まとめ

構造部材の非線形領域における構造系全体の減衰（エネルギー吸収性能）の変化をとらえるため、構造系全体の解析し、減衰定数の変化や、減衰理論の違いが与える影響などについて検討した結果を述べる。

- （１）塑性ヒンジを用いて等価線形化法で線形計算を行う場合、等価減衰定数は、歪みエネルギー比例減衰を用いるのが適当であり、その値は、塑性化した部材の減衰定数に近い値となる。
- （２）非線形の動的解析を行う場合、粘性減衰が与える影響は小さく、必ずしも歪みエネルギー比例減衰を用いることが適切であるとは限らず、むしろ履歴減衰の評価法に留意すべきである。
- （３）応答エネルギーを算出することにより各消費エネルギーの分担率から、歪みエネルギー（履歴減衰）の影響が65%程度と、もっとも大きいことが解った。
- （４）構造減衰（粘性減衰）による消費分担率は、塑性領域においては小さいものの 35%程度となることから、履歴減衰の半分程度の影響力があると判断できる。

## 参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅴ（平成8年）
- 2) 橋梁振動研究会：橋梁振動の計測と解析 技報堂出版
- 3) 星隅・運上：鉄筋コンクリート橋脚の地震時非線形応答の繰返し特性, 第24回地震工学研究発表会 D6-6 pp. 993～pp. 996
- 4) 矢部・川島：地震時保有水平耐力法を用いる RC 橋脚の履歴特性を非線形梁要素まで表現するためのモデル化の提案, 第52回年次学術講演会 I-B145 pp. 290～pp. 291
- 5) 石川・大島：断面の部分軟化を考慮したRC橋脚の非線形応答とエネルギー分布, 第53回年次学術講演会 I-A62 pp. 290～pp. 293
- 6) 日本道路協会：道路橋の耐震設計に関する資料 平成9年3月
- 7) Ray W. Clough/Joseph Penzien：構造物の動的解析 科学技術出版社