

Bouc-Wen モデルを用いたラーメン橋脚の非線形応答解析

広島大学大学院 フェロー会員 中村 秀治  
 広島大学 中川 寧子  
 広島大学大学院 正会員 藤井 堅  
 広島大学大学院 学生会員 小澤 武範

1. 目的

構造物の動的解析を行うことで地震時の被災状況を再現し、それに備えることが重要である。本研究では多自由度系の動的非線形解析の簡易化を図ることを目的として、Bouc-Wen モデルのラーメン橋脚への適用方法を検討する。同時に吸収エネルギーの算定も行い、ラーメン橋脚構造の動的耐荷力特性を考察する。

2. Bouc-Wen モデル概要

$$\begin{cases} \ddot{u} + 2\zeta\omega\dot{u} + \alpha\omega^2u + (1-\alpha)\omega^2z = \frac{P(t)}{m} \\ \dot{z} = -\gamma|\dot{u}|z - \beta\dot{u}|z| + \delta\dot{u} \end{cases}$$

動的非線形解析における Bouc-Wen モデルの有用性は、パラメータ  $\alpha, \beta, \gamma, \delta$  を適切に定めることにより、各ステップにおける繰り返し計算を省くことができる点にある。

3. 塑性ヒンジへの Bouc-Wen モデルの適用方法とパラメータの検討

本研究では、新しい試みとして、Bouc-Wen モデルの鋼製ラーメン橋脚塑性ヒンジ部への適用方法を検討する。この際、Bouc-Wen モデルの変位は相対回転変位をとり、補助変数  $z$  は Bouc-Wen モデル1つに対し1つとればよいことがわかった。以上より、塑性ヒンジ部に適用する Bouc-Wen モデルは以下のようにマトリクス表示でき、これを全体構造系の運動方程式に組み込む。

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ \beta|z_2| - \delta & 1 & -\beta|z_2| + \delta \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{\theta}_2 \\ \dot{z}_2 \\ \dot{\theta}_2' \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \alpha k & (1-\alpha)k & -\alpha k \\ 0 & \gamma|\dot{\theta}_2 - \dot{\theta}_2'| & 0 \\ -\alpha k & -(1-\alpha)k & \alpha k \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \theta_2 \\ z_2 \\ \theta_2' \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} M_2 \\ 0 \\ M_2' \end{Bmatrix}$$

さらに、Bouc-Wen モデルのパラメータ及び第1剛性に

ついては以下のように定めることができる。

$$\alpha = \frac{K}{K} = 0.1 \quad \beta = \gamma = \frac{1}{2\theta_y} = \frac{Eh}{4\sigma_y L} \quad \delta = 1.0$$

$K$  : 第1剛性,  $K$  : 第2剛性,  $\theta_y$  : 降伏相対回転変位,  $h$  : 橋脚幅,  $\sigma_y$  : 降伏応力,  $L$  : 塑性ヒンジ長  
 よって、パラメータを決定する際には、塑性ヒンジ長及び塑性ヒンジ区間の要素の剛性を実際の何倍にするかを検討しなくてはならない。解析の結果、本研究で解析モデルとして用いた橋脚においては、塑性ヒンジ長  $L$  は 50cm 程度、塑性ヒンジ区間の要素の剛性は実際の 100 倍程度とするのが妥当であると判断し、パラメータは  $\alpha = 0.1$ ,  $\beta = \gamma = 1.093 \times 10^3$ ,  $\delta = 1.0$  とした。

4. 解析結果と考察

3. の結果を踏まえた上で、実際の鋼製ラーメン橋脚をもとにした Fig.2 に示す左右対称な解析モデル 1、および片持ち梁付きの解析モデル 2 について解析を行った。入力地震波としては兵庫県南部地震の際の神戸海洋気象台 NS 波を用いた。

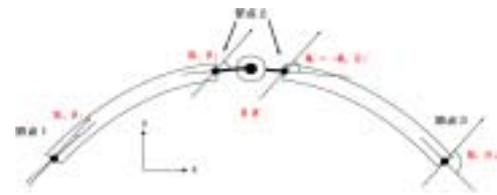


Fig.1 塑性ヒンジ部モデル図

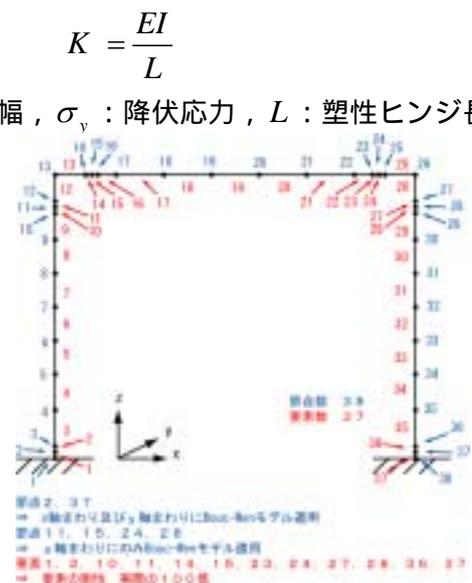


Fig.2 解析モデル

キーワード：動的非線形解析，ラーメン橋脚，塑性ヒンジ，エネルギー吸収

連絡先：〒739-8527 東広島市鏡山 1 - 4 - 1 広島大学大学院工学研究科

**Bouc-Wen モデルの妥当性の検証**

地震波を y 軸方向にのみ作用させた場合には基部にのみ塑性ヒンジが生じる．そこで，Bouc-Wen モデルを基部に適用した場合と線形挙動を示す場合の解析結果を比較し，Bouc-Wen モデルの妥当性を検証する．

□解析モデル1 節点2 ■解析モデル2 節点2 ▨解析モデル2 節点4:

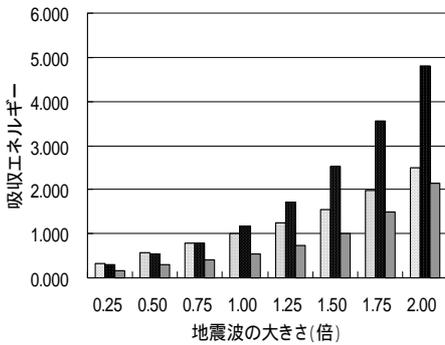


Fig.3 地震波の大きさと吸収エネルギー

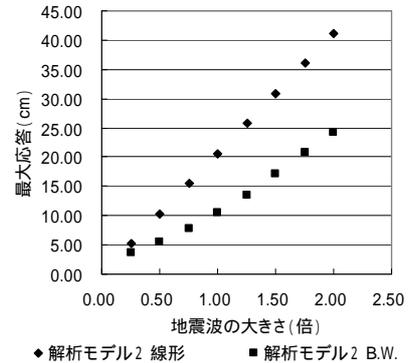
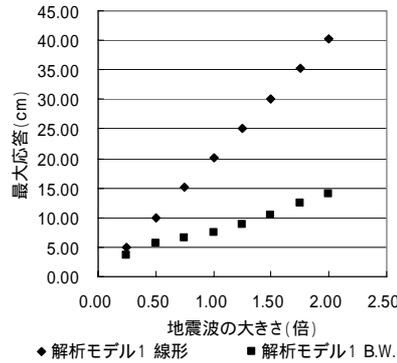


Fig.4 地震波の大きさと節点 1 3 の最大応答

Fig.3 より，塑性ヒンジ部においては，地震波が大きくなるにつれて吸収エネルギーが指数関数的に増加している．また，Fig.4 より，最大応答は線形の場合に比べて明らかに減少している．これらは，塑性ヒンジ部の非線形挙動をよく表しているといえる．しかし，実挙動とより符合するためには入力地震波がNS波の0.5倍よりも小さくなると，吸収エネルギーは0となり最大応答は線形の場合と一致するのが望ましい．このようにならない原因として，モーメントと相対回転変位の関係が，本来直線を描くはずの第1剛の範囲で，わずかにループを描いてしまっていることが挙げられる．

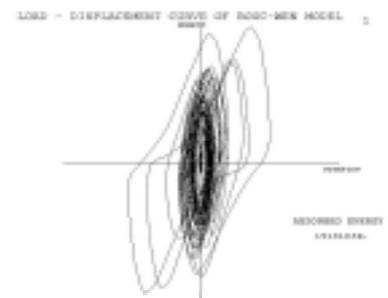


Fig.5 ヒステリシスループ

**損傷分布特性の把握と耐震的に有利なラーメン橋脚構造**

地震波を x 軸方向にのみ作用させた場合には，塑性ヒンジを生じる可能性のある基部及び隅角部の6箇所全てに Bouc-Wen モデルを適用し，各塑性ヒンジ部での吸収エネルギーを算定する．Fig.6 の上図は解析モデル1の各塑性ヒンジ部の吸収エネルギー，下図は基部の剛性を1.4倍，隅角部の剛性を0.7倍したモデルの吸収エネルギーを示したものである．損傷が一箇所に集中しないためには，エネルギーの分散している後の方が，有利であるといえる．また最大応答は両者でほぼ等しいこともわかった．実際には補修・補強・設計上の問題などがあり，一概には言えないが，損傷を分散させるという視点から見れば，基部の剛性を大きくし，逆に隅角部の剛性を小さくすることで，エネルギー吸収効率を高めた構造が有利であるといえる．

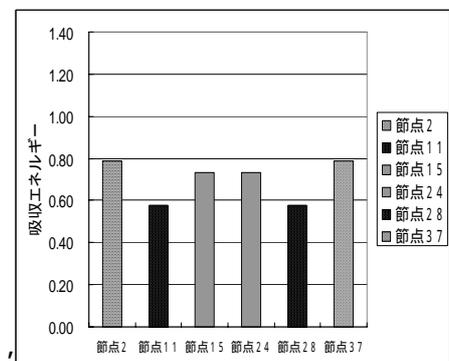
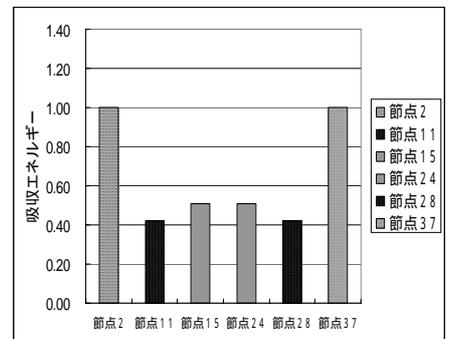


Fig.6 各塑性ヒンジ部の吸収エネルギー

**5. 結論**

本研究では，Bouc-Wen モデルの鋼製ラーメン橋脚塑性ヒンジ部への適用方法を示し，またその妥当性をある程度確認することができた．さらに吸収エネルギーを算定することで，損傷を分散させるという面から見て有利なラーメン橋脚構造が明らかとなった．今後の課題としては実挙動とより正確に符合するよう，パラメータの設定方法を詳細に検討し，解析の精度を高めていくことが挙げられる．

参考文献 1)Ray W Clough：構造物の動的解析，1978  
2)Yi-Kwei Wen：Journal of the Engineering Mechanics Division，1976