

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

1. 目的

地震による被害を最小限に抑えるため、構造物の動的解析を行うことで被災状況を再現し、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明らかにすることを目的とする。

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 α , β , γ , δ を適切に定めることにより、仮定した剛性マトリックスを適切なものにするために行う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取り、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ックス表示でき、これを全体構造系の運動方程式に組み込む。

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

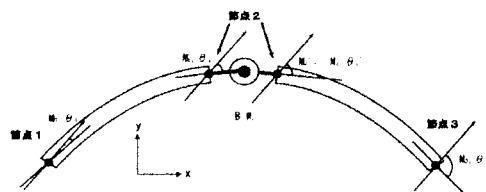


Fig.1 塑性ヒンジ部モデル図

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。

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

$$K_I = \frac{EI}{L}$$

K_I : 第1剛性, K_{II} : 第2剛性, θ_y : 降伏相対回転変位, h : 橋脚幅, σ_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。

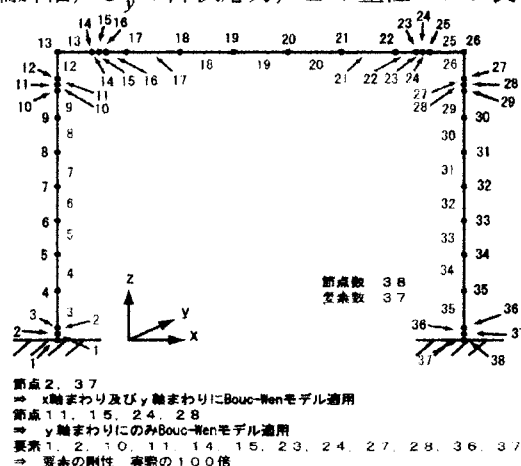


Fig.2 解析モデル1

①Bouc-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43

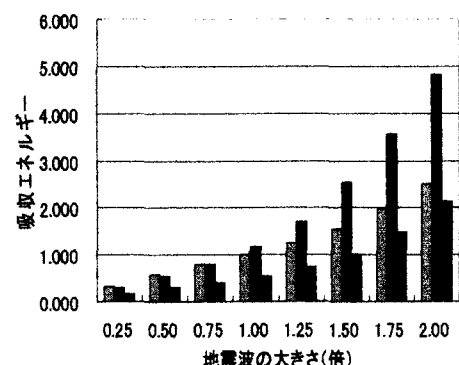


Fig.3 地震波の大きさと吸収エネルギー

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 剛性の範囲で、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。

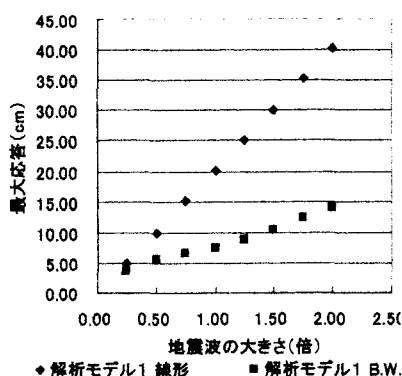


Fig.4 地震波の大きさと節点 13 の最大応答

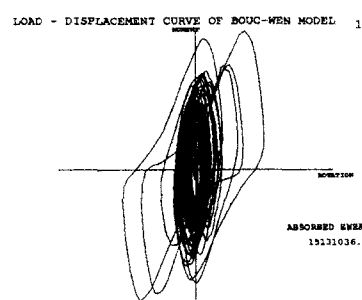
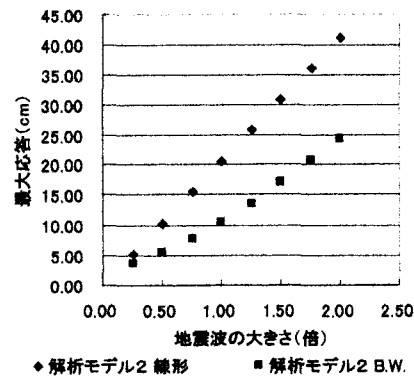


Fig.5 ヒステリシスループ

②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、吸収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、損傷を分布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、エネルギー吸収の等分布化を高めた構造が有利であるといえる。

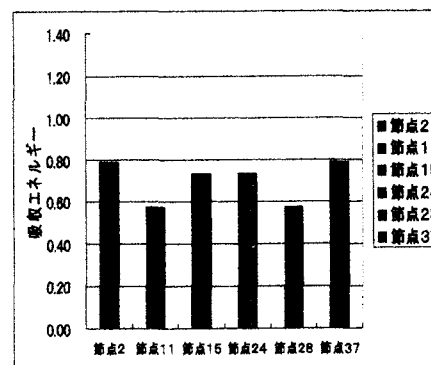
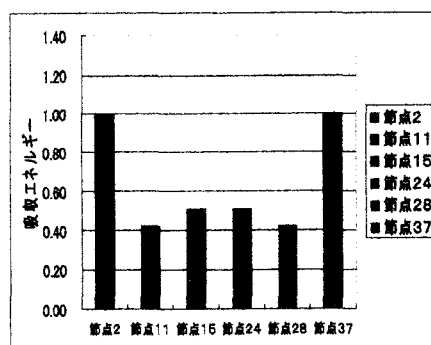


Fig.6 各塑性ヒンジ部の吸収エネルギー

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、損傷を分布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