

Bouc-Wen モデルを用いた動的応答解析の免震支承への適用

広島大学 学生会員 ○金澤 佑樹

広島大学大学院 フェロー会員 中村 秀治

1. はじめに

近年、兵庫県南部地震、鳥取県西部地震や芸予地震などの大地震が発生し、土木構造物の破壊、損傷事例が数多く見られた。地震動の特性を考慮しつつ、十分な耐震性能を有する構造物を建設し、維持管理していく上で、過去の大地震による被害の原因を詳細に検討し、明らかにすることは重要であり、非線形動的応答解析の評価手段としての必要性は極めて高い。通常、非線形動的応答解析においては、各ステップで剛性の変化を考慮しつつ計算を進めるが、多自由度系での各ステップ毎の繰り返し計算に要する計算量は膨大である。本報告では、非線形解析の簡便化を図る一方法として、Bouc-Wen モデルの適用を検討し、1 自由度系および多自由度系モデルに適用して、その有用性を明らかにする。

2. Bouc-Wen モデル

1 自由度系における Bouc-Wen モデルの式を示す。Bouc-Wen モデルにおける運動方程式は、線形運動方程式に補助変数 z を導入することにより次のように定められる^{1), 2)}。

$$\ddot{u} + 2\zeta\omega\dot{u} + \alpha\omega^2 u + (1-\alpha)\omega^2 z = \frac{P(t)}{m} \quad (1)$$

$$\dot{z} = -\gamma|\dot{u}|z - \beta\dot{u}|z| + \delta\dot{u} \quad (2)$$

ここで、 u は変位、 $P(t)$ は荷重、 m は質量である。また、 ω は $\alpha=1$ である時の非減衰角速度（円振動数）、 ζ は減衰定数、 α 、 β 、 γ 、 δ は Bouc-Wen モデルにおいて応答を支配するパラメータである。

3. 1 自由度系の解析結果、および Bouc-Wen モデルで用いられるパラメータに関する考察

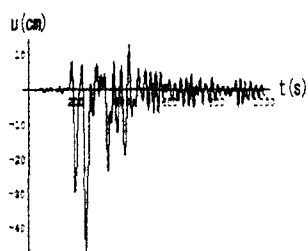
1 自由度系モデルに対してパラメータ α 、 β 、 γ 、 δ を種々変化させて動的応答解析を行い、応答波形およびヒステリシスループの変化から、Bouc-Wen モデルにおけるパラメータ α 、 β 、 γ 、 δ の物理的意味を考察した。地震波としては阪神淡路大震災時の神戸海洋気象台 NS 波を用いた。1 自由度系モデルでの解析結果の一例を Fig.1, Fig.2 に示す。

解析結果より、 α : 第1剛性と第2剛性の比で表され、 $\alpha = k_{II}/k_I$

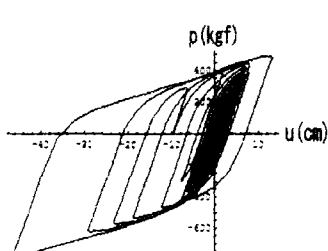
β 、 γ : 降伏変位 u_y により表現すれば、 $\beta = \gamma = 1/2u_y$

δ : 非線形系の周波数特性に影響し、適当な値としては、 $\delta = 1$

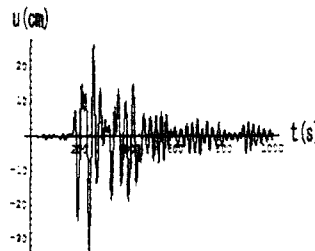
などが明らかとなった。また、 α 、 β 、 γ 、 δ の設定により実構造物の特性を模擬できることが確認されたが、同時に最大荷重の設定が難しいことなども明らかとなった。



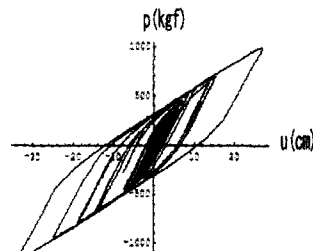
a) 変位応答波形



b) ヒステリシスループ

Fig. 1 $\alpha=0.1$, $\beta=0.1$, $\gamma=0.1$, $\delta=1.0$ の場合

a) 変位応答波形



b) ヒステリシスループ

Fig. 2 $\alpha=0.3$, $\beta=0.1$, $\gamma=0.1$, $\delta=1.0$ の場合

4. 多自由度系の解析結果と考察

1 自由度系モデルにより判明した各パラメータの物理的特性を多自由度系モデルに適用し、動的非線形解析を行った。入力地震波は阪神淡路大震災時の神戸海洋気象台 NS 波を用いた。

多自由度系解析におけるモデルは、橋脚基部に免震支承の設けられた阪神高速 3 号神戸線弁天地区の 19 径間連続立体ラーメン橋であり、13 径間分を取り出してモデル化を行った。モデル図を Fig. 3 に示す。また、免震支承の形状および物性値は Table.1 に示す。

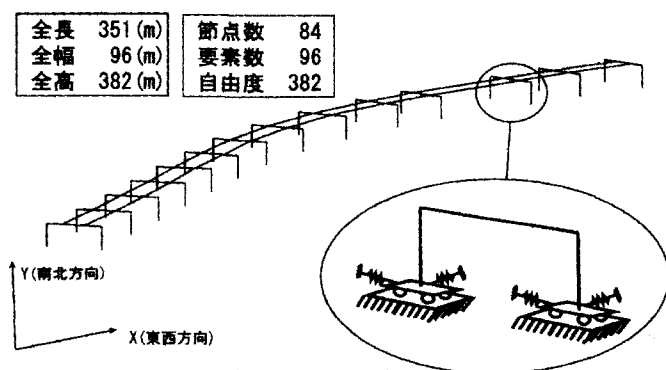


Fig. 3 多自由度モデル

Table.1 免震支承の形状および物性値

積層ゴム:長さ×幅	1070(mm)×1070(mm)
鉛プラグ:本数×直径	4本×140(mm)
支承高さ[ゴム厚さ]	297[168] (mm)
ゴムのせん断弾性係数	8.0(kgf/cm ²)
1次剛性 k_I	5.45×10^3 (kgf/cm)
2次剛性 k_{II}	8.40×10^2 (kgf/cm)
降伏荷重 P_y	1.1×10^4 (kgf)
降伏変位 U_y	2.2(cm)

Table.1 の物性を Bouc-Wen モデルで表した免震支承の影響を検討するため、橋脚下部に免震支承を設けずにしてすべて固定とした場合と比較した。ただし、地震波は y 方向に与えるものとした。

基部固定と基部免震とで変位応答波形(Fig. 4, 5)の違いを比較すると、周期が基部固定では 0.45 sec. であるのに対して、基部免震は 1.25 sec. となっており、長周期化していることが分かる。また、y 軸方向最大変位を比較すると基部固定では 6 cm, 基部免震では 22 cm と大幅に増大しているが、加速度では大幅に低減していることが確認できた。これらの結果より Bouc-Wen モデルは免震支承の特徴を表わすのに有効なことがわかる。また、Fig. 5 において、10 秒経過した頃から明らかに周期が短くなっていることが見て取れる。これは免震支承の剛性が第 2 剛性から第 1 剛性の領域へと遷移したと考えられ、非線形特性が適切に表現できていることがわかる。

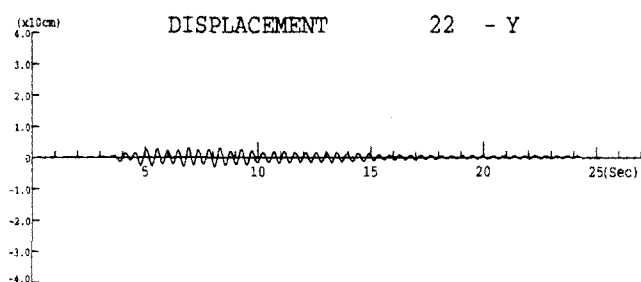


Fig. 4 y 軸方向応答変位(橋脚下部固定)

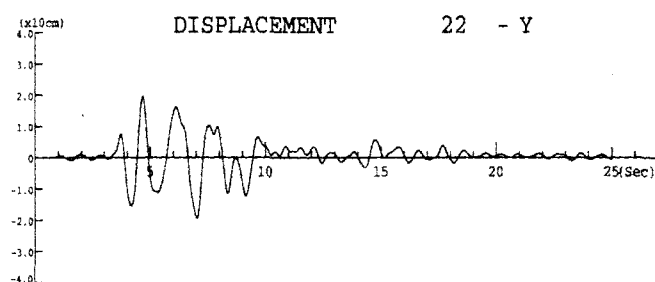


Fig. 5 y 軸方向応答変位(橋脚下部免震)

5. 結 論

本研究によって Bouc-Wen モデルにおけるパラメータ α , β , γ , δ の物理的意味が明らかとなった。本モデルを多自由度構造物に適用し、解析を行った結果、妥当な結果の得られることが明らかになった。また、既往の研究が等価線形化手法を用いているのに対して、本手法では非線形特性をそのまま用いて短時間に解析することができた³⁾。今後の課題としては、Bouc-Wen モデルを種々の構造物に対して適用できるよう、パラメータの設定方法を詳細に検討し、解析の精度を向上させることがあげられる。

参考文献

- 1) Ray W. Clough, Joseph Penzien : 構造物の動的解析, 構造工学シリーズ 7, 1978.
- 2) Yi-Kwei Wen : Journal of the Engineering Mechanics Division, 1976.
- 3) 林 秀侃, 川北 司郎 : 阪神高速 3 号神戸線の復旧事例, 橋梁と基礎, Vol.30, No.8, pp.48-52, 1996.