

I-B 313

非弾性応答変位スペクトルを用いた鋼製橋脚の大地震時応答変位推定法

宇都宮大学 正員 中島 章典 首都高速道路公団 正員 深山 大介
建設省土木研究所 正員 大塚 久哲 東北大学 正員 鈴木 基行
建設省土木研究所 正員 佐藤 貴志

1. はじめに

大地震に対する鋼製橋脚の弾塑性挙動に関する実験および解析的研究が数多く行われ、道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編（以下、道示 V）²⁾に示される鉄筋コンクリート橋脚の保有水平耐力照査法を参考にした耐震設計法が提案されている¹⁾。その中では、エネルギー一定則を用いて、鋼製橋脚の大地震時における弾塑性域までの最大応答変位を予測する必要がある。

本研究では、弾塑性有限変位解析法を用いて、鋼製橋脚の大地震時挙動のパラメトリック解析を実施し、エネルギー一定則による応答変位推定法の結果と、非弾性応答変位スペクトルを用いた応答変位推定法の結果を比較検討した。

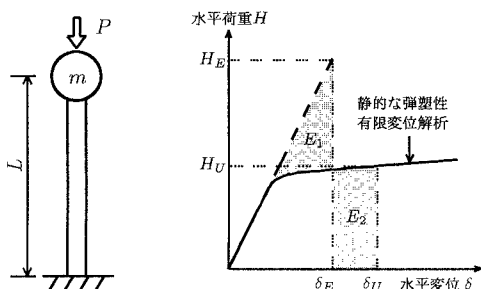


図-1 鋼製橋脚モデル 図-2 エネルギー一定則の概念

2. 解析方法の概要および解析モデル

ここで採用した解析方法は、材料非線形性および幾何学的非線形性を考慮した、有限要素法に基づくはり柱要素の静的および動的弾塑性有限変位解析法である。鋼材の繰返し応力-ひずみ関係はバイリニヤ型とし、降伏応力度 $\sigma_Y = 2400 \text{ kgf/cm}^2$ 、弾性係数 $E = 2.1 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$ および塑性域のひずみ勾配 $E_T/E = 0.01$ とした。

ここでは、図-1に示す上部構造の重量に起因する圧縮軸力 P と頂部に集中質量 m を有する片持ち柱の鋼製橋脚モデルを対象とした。その断面諸元は、実績調査の文献⁵⁾を参考にして、道示 II, V に基づき、地盤種別に対応させて許容応力度法による試設計を行った。なお、鋼製橋脚断面は幅 2.4m の箱形断面で、フランジおよびウェブ鋼板には 3～5 本の縦補剛材により構成されるものとし、幅厚比パラメータが 0.2～0.5 程度の等断面柱としている。さらに、道示 II²⁾に規定される軸力と曲げモーメントを同時に受ける場合の安定性の照査式の値（以下、設計レベルと呼ぶ）を約 0.80 および 0.98 になるようにしている。有限要素解析における橋脚の高さ方向の要素分割数は 10、断面

は縦補剛材を含めて 20 程度に分割している。

時刻歴応答解析を行う際に入力した地震動は、道示 V に示される、I～III 種地盤用鉄筋コンクリート橋脚の地震時保有水平耐力照査用加速度応答スペクトルに対応するレベル 2 地震とした。

その他、解析方法の詳細および解析結果と実験結果の比較検討については文献 3), 4) を参照されたい。

3. エネルギー一定則による応答変位推定法

ここでは、鋼製橋脚モデルの弾塑性地震応答解析による最大応答変位 δ_{max} と、エネルギー一定則により推定された最大応答変位 δ_U の比較を以下に示した手順により行う。

1. 図-2において、頂部の集中質量 m と弾性加速度応答スペクトル値 S_A から、弾性応答作用力 $H_E (= mS_A)$ と対応する δ_E を求める。

2. 静的な弾塑性有限変位解析による水平荷重 H と水平変位 δ の関係を求め、図-2において陰影部の E_1 と E_2 が等しくなるような δ_U を求める。

以上の手順により得られた最大応答変位の比較を図-3に示す。図では、 δ_U/δ_{max} を縦軸に、1 次固有周期 T を横軸に表している。図に白丸と黒丸で示した I 種地盤の場合には、 δ_{max} と δ_U は比較的良く一致するが、II 種と III 種地盤の場合では、両者はあまり一致しないことが認められる。

弾塑性地震応答解析結果の一例として、図-4に最大応答変位までの頂部の水平荷重-水平変位関係を示す。これは、 $T = 0.587 \text{ sec}$ であり、圧縮軸力 P と降伏軸力 P_Y の比 $P/P_Y = 0.148$ の鋼製橋脚モデルの結果である。ここで、川島らの研究⁶⁾を参考にして、最大応答変位に達する直前に水平荷重の値がゼロとなった際の柱頂部水平変位の値 δ_R （以下、残留変位と呼ぶ）を最大応答変位から差し引いた応答変位と δ_U の比較を示したのが図-5である。この図は、設計レベルを 0.80 として、II 種地盤用に試設計された鋼製橋脚モデルを対象としている。同じ T （横軸）の値に対して、白丸から黒丸に移動したのが、残留変位の影響を表している。この図から、 δ_U と δ_{max} が異なる理由は残留変位のみでは説明できない場合が多く、エネルギー一定則による最大応答変位推定法には疑問が残る結果となっている。

4. 1 自由度弾塑性系を用いた応答変位推定法

まず、図-6に点線で示すような静的な弾塑性有限変位解析により求めた鋼製橋脚モデルの水平荷重-水平変位関係を参考にして、そのモデルを以下に示した手順により、バイリニヤ型の復元力特性を有する 1 自由

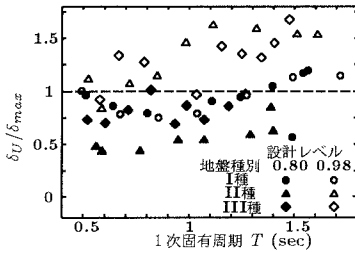


図-3 最大応答変位の比較（エネルギー一定則）

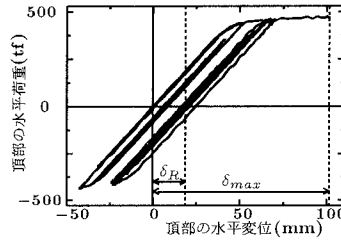


図-4 最大応答変位までの水平復元力－水平変位関係

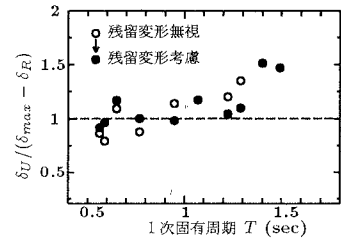


図-5 残留変位を考慮した応答変位の比較

度弾塑性系に置換する。

1. 弾塑性有限変位解析により求めた水平荷重－水平変位関係の初期剛性 K_1 とその 1 次固有周期 T から以下の式を用いて、1 自由度系モデルの等価質量 m_0 を求める。

$$m_0 = K_1 \left(\frac{T}{2\pi} \right)^2 \quad \dots\dots\dots (1)$$

2. 鋼製橋脚モデルの基部断面の軸力を考慮した全塑性モーメント M_P と橋脚の高さ L より、図-4に示す降伏水平荷重 $H_Y (= M_P/L)$ と降伏水平変位 $X_Y (= H_Y/K_1)$ を求める。
3. 弾塑性有限変位解析による水平荷重－水平変位関係において水平変位が $3X_Y$ に達した点の座標 $(3X_Y, H'_Y)$ を求め、この点と座標 (X_Y, H_Y) とを結ぶ直線の勾配により、復元力特性の 2 次剛性 K_2 を定める。

このように設定された復元力特性を有する 1 自由度弾塑性系に対して地震応答解析を行い、得られた最大応答変位 δ_S と、先に求めた動的弾塑性有限変位解析による δ_{max} の比較を図-7に示す。縦軸は δ_S/δ_{max} を、横軸は鋼製橋脚モデルの 1 次固有周期である。この図から、鋼製橋脚モデルの 1 次固有周期や入力した地震動の種類によらず、 δ_S/δ_{max} の値はほぼ 1 になり、図-3に示した結果と比較して、最大応答変位はよく一致していることがわかる。

5. 非弾性応答変位スペクトルの適用

バイリニア型の復元力特性を有する 1 自由度弾塑性系の最大応答変位 δ_S は、一つの地震動に対して、1 次固有周期 T 、減衰定数 h 、降伏復元力 H_Y および弾性 1 次剛性と 2 次剛性の比 K_2/K_1 によって決定されるといえる。つまり、

$$\delta_S = f(T, h, H_Y, K_2/K_1) \quad \dots\dots (2)$$

と表される。また、震度法における水平地震力 H_0 は、 $H_0 = M_0 \cdot g \cdot k_h$ となる（ g ：重力加速度、 k_h は震度法における設計水平震度）。そこで、図-6を参考にして、水平地震力 H_0 の降伏水平荷重 H_Y に対する比を、 $\eta = H_0/H_Y$ と定義する。つまり、耐震設計で使用する地震動に対して、バイリニア型復元力特性をもつ 1 自由度系の

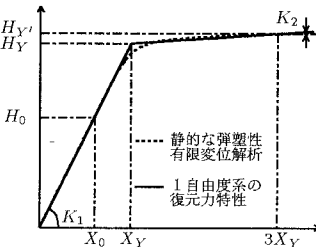


図-6 1 自由度系の復元力特性

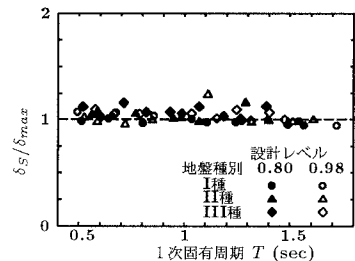


図-7 最大応答変位の比較（1 自由度弾塑性系）

降伏水平荷重と震度法レベルの地震力との比 η および T 、 h 、 K_2/K_1 をパラメーターとした非弾性応答変位スペクトルを作成しておけば、これを用いて、任意のパラメータをもつ鋼製橋脚モデルの最大応答変位を推定することができると思われる。

6. まとめ

本研究では、弾塑性有限変位解析法を用いて鋼製橋脚モデルの大地震時挙動のパラメトリック解析を実施し、弾塑性域までの最大応答変位を、エネルギー一定則を用いた最大応答変位の推定結果および置換した 1 自由度弾塑性系の地震応答解析により得られた最大応答変位と比較検討した。

その結果、後者の方法を応用した非弾性応答変位スペクトルを用いることにより、エネルギー一定則を用いた場合に比して精度よく弾塑性最大応答変位を推定できる可能性を示した。

なお、本研究の一部は土木学会鋼構造委員会新技術小委員会の補助を受けたことを付記し、関係各位に謝意を表する。

参考文献

- 1) 宇佐美勉・鈴木森晶他：コンクリートを部分的に....., 土木学会論文集, No.525/I-33, pp.69-82, 1995.10.
- 2) 日本道路協会：道路橋示方書 II, V, 丸善, 1993.5.
- 3) 中島章典・倉西茂：レベル 2 地震に対する鋼製橋脚の....., 構造工学論文集, Vol.40A, pp.227-234, 1994.3.
- 4) 深山大介・中島章典・大塚久哲他：鋼製橋脚の弾塑性挙動の実験と解析....., 土木学会第 50 回年次学術講演概要集第 1 部 (A), I-24, pp.48-49, 1995.3.
- 5) 中井博他：鋼製ラーメン橋脚の実績調査 (上) (下), 橋梁と基礎, Vol.16, 1982.6,7.
- 6) 川島一彦・長谷川金二：鉄筋コンクリート橋脚の....., 土木学会論文集, No.483/I-26, pp.137-146, 1994.1.