

宇都宮大学 学生員 福田 淳
 宇都宮大学 正会員 中島 章典
 宇都宮大学 正会員 斉木 功

1. 研究背景・目的

構造物を設計する際には、微小変形理論を用いるのが一般的である。しかし、上部構造重量の大きな都市高速道路の橋脚などの大地震時挙動には、幾何学的非線形の影響が大きいと考えられる。また、橋脚など細長比の大きな構造物では、降伏に及ぼすせん断応力の影響は小さいとして考慮されないことが多い。

そこで本研究では、剛体ばねモデル解析を用いて、定式化の際の近似を行わずに、幾何学的非線形を考慮した橋脚の弾塑性地震応答解析を行う。さらに、材料の降伏に及ぼすせん断応力の影響を明らかにするため、降伏の判定は相当応力を用いて行い、大地震時の橋脚の挙動に及ぼす幾何学的非線形の影響およびせん断応力の降伏への影響を明らかにする。

2. 解析モデル

本研究では、図-1に示すような、鋼製単柱式橋脚の柱部材を剛体とそれぞれを結合する、長さや質量を無視できるばね要素からなる剛体ばねモデルにモデル化した。各剛体要素の自由度は、その重心位置における x, y 方向変位、および回転の3自由度とした。ばねの取り付け位置は、要素断面を分割し、各分割断面の重心位置にそれぞれ軸ばね、せん断ばねを設置した。複数の軸ばねで回転と軸方向の挙動を追跡し、せん断ばねにより水平方向の挙動を追跡した。また橋脚基部と地盤は剛結とした。

解析モデルの各諸元は、図-1に示す通りで、橋脚頂部には、上部構造分の集中質量 300t およびこれによる軸力を考慮した。弾性係数を 206GN/m^2 、ポアソン比を 0.3 とした。また、この時の固有周期は 0.937 秒であった。あらかじめ行った静的解析により、軸方向要素分割数が 25 以上、断面分割数 24 以上において計算結果が理論値にほぼ収束したため要素数を 25、断面分割数を 24 とした。

また、一般に鋼製橋脚は柱長の $1/2000 \sim 1/20000$ の初期たわみを有していると考えられるので、初期たわみを考慮した場合も検討する。初期たわみを与える場合その形状は次式で与えることとする。

$$y^0(x) = \alpha(1 - \cos \frac{\pi x}{2\ell}) \quad (1)$$

ここで、 y^0 は x 点での初期たわみ、 ℓ は柱長、 α は橋脚頂部の初期たわみの値である。

3. 解析方法

幾何学的非線形および材料の降伏へのせん断応力の影響を明らかにするため、幾何学的非線形およびせん断応力の影響をともに考慮しない場合（以下ケース 1）、幾何学的非

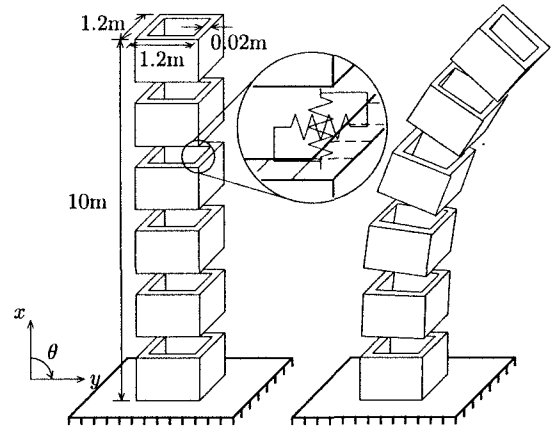


図-1 解析モデル

表-1 上部構造質量 300t 時の軸力比と設計レベル

降伏応力 (MN/m^2)	軸力比 (%)	設計レベル
235	13.2	0.931
274	11.3	0.798
314	9.9	0.698
354	8.8	0.621

線形のみ考慮する場合（以下ケース 2）、両者ともに考慮する場合（以下ケース 3）について比較する。また、幾何学的非線形の影響は軸力比に関係すると思われるので、それぞれのケースで断面諸元、上部構造質量、固有周期をすべて一定にして軸力比を変化させるために、鋼材の降伏応力を 235, 274, 314, 354 MN/m^2 と変化させ比較する。表-1に各降伏応力における降伏軸力と上部構造重量との軸力比および I 種地盤での設計レベルを示す。ここで、設計レベルとは断面に作用する軸力 N および曲げモーメント M の降伏値に対する比によって次式で与えられる。

$$\frac{\nu N}{N_y} + \frac{\nu M}{M_y} \leq 1.0 \quad (2)$$

ここに、 N_y 、 M_y はそれぞれ橋脚断面の降伏軸力、降伏曲げモーメントであり、 ν は安全率 ($=1.14$) である。また、ケース 1, 2 では降伏判定にせん断応力の影響を考慮せずに垂直応力のみで判定し、垂直応力を表す軸ばねの復元力特性は完全弾塑性型とした。ケース 3 ではせん断応力を考慮するため、垂直応力とせん断応力を合成した相当応力を用いて次式の Mises の降伏条件により判定した。

$$\sqrt{\sigma^2 + 3\tau} = \sigma_y \quad (3)$$

Key Words: 橋脚、幾何学的非線形、材料非線形、地震応答解析、剛体ばねモデル

〒 321-8585 宇都宮市陽東 7-1-2 宇都宮大学工学部建設学科 Tel.028-689-6208 Fax.028-689-6230

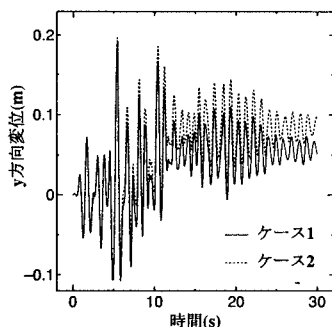


図-2 水平変位の時刻歴応答 (軸力比 11.3%)

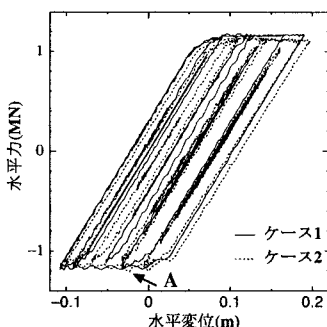


図-3 水平力-水平変位関係 (軸力比 11.3%)

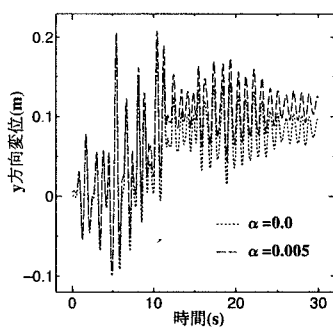


図-4 初期不整と水平変位の時刻歴応答の関係 (軸力比 11.3%)

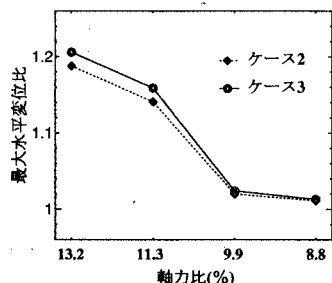


図-5 各軸力比における最大水平変位関係

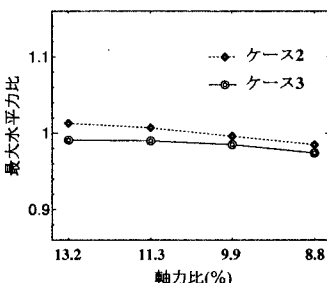


図-6 各軸力比における最大水平力関係

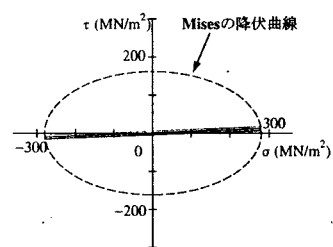


図-7 Mises の降伏曲線

ここで、 σ は垂直応力、 τ はせん断応力、 σ_y は降伏応力を表す。相当応力を表す軸ばねとせん断ばねの合成応力の復元力特性もケース 1, 2 のときと同様に完全弾塑性型とした。

弾塑性地震応答解析には、ニューマークの β 法 ($\beta = 1/4$) を適用して、各時間増分段階で剛性マトリックスを弾性剛性マトリックスと同じであると仮定し、降伏条件とつり合い式が満足されるように、修正 Newton Raphson 法を用いて収束計算を行った。また粘性減衰は弾性状態の 1 次固有振動モードに対して減衰定数 1% の質量比例型とした。

4. 動的弾塑性応答解析の結果と考察

入力地震波には I 種地盤レベル 2 タイプ I の標準地震波 3 波を用いた。例として、軸力比 11.3% の場合に神戸海洋気象台の NS 方向記録の地震波を入力した際のケース 1, 2 の橋脚頂部の水平変位の時刻歴応答を図-2 に、水平力-水平変位関係を図-3 に示した。図-2、図-3 より幾何学的非線形を考慮すると最大変位および残留変位が大きな値となり、履歴ループにも差があることがわかる。

以上のような時刻歴応答に基づき、各軸力比についてその 3 波を用いた場合の最大水平変位、最大水平力の絶対値を平均し、ケース 1 の平均値で無次元化した結果を図-5、図-6 に示す。図-5 より軸力比が大きくなるにつれ幾何学的非線形の影響が大きくなり最大水平変位が大きくなるが、軸力比が 10% 程度以下になるとその影響は小さいことがわかる。図-6 をみると軸力比が増すと最大水平力比も増す傾向がみられるが、これは図-3 において矢印で示した A 点付近のような高次モードによる影響と考えられる。しかし、図-6 をみるとその値の違いは数% であり、ケース 1 とケース 2 の違いは極めて小さいと考えられる。また、ケース 2

とケース 3 を比べると降伏条件にせん断応力を考慮しているためケース 3 の方が小さな値となっているが、ケース 3 での橋脚最下端部の要素の垂直応力、せん断応力の関係を示した図-7 からわかるように、本解析モデルでは降伏時のせん断応力が垂直応力に比べ小さいので、せん断応力の降伏への影響は小さいと言える。

また、ケース 2 において橋脚頂部の初期たわみ α を不利な側に $0.005m(\ell/2000)$ 与えたときと初期たわみがない場合の橋脚頂部の水平変位の時刻歴応答を図-4 に示した。ここで不利な側とは、本解析のような地震波を与える動的解析ではその水平変位が正負どちらで最大になるかわからないため、同じ初期たわみを正負両方で与えた場合の結果を比較し、最大水平変位の絶対値が大きい方のことである。また、図-4 より、初期たわみがあるとその分幾何学的非線形の影響が大きくなるため、さらに水平変位に影響することがわかる。

5. 結論

本研究の範囲では、軸力比が 10% 程度以上になると水平変位が幾何学的非線形を考慮しない場合に比べ大きくなり、幾何学的非線形の影響が無視できなくなることがわかった。また、本解析モデルにおいては材料の降伏へのせん断応力の影響は小さいと言える。しかし、細長比が極めて小さな構造などでは、せん断応力の降伏に及ぼす影響が大きくなると思われるので検討する必要がある。

参考文献

- 1) J.C. Simo, T.J.R. Hughes: Computational Inelasticity, Springer, 1998.
- 2) 川井忠彦・野上邦榮: コンピュータによる極限解析シリーズ 7, 鋼構造部材と骨組の離散化極限解析, 培風館, 1991.