

1 まえがき 従来、構造物の地震応答を解析する場合には、その水平変形量は微小であるという仮定のもとに行なわれてきたため、重力や上下地動の鉛直荷重の影響は無視される傾向にあった。しかし、超大つり橋タワーのように非常にたわみやすい構造物や、一般の構造物でもその挙動が塑性領域にまで及ぶような場合を対象として解析するときには、その水平変形量が大きくなるため、当然鉛直荷重の影響は無視できないものと予期される<sup>1)</sup>。本研究では、図-1に示される1自由度ロッキングモデルを用いたシュミレーションによって、鉛直荷重の水平変形量に対する影響度を解析したものである。

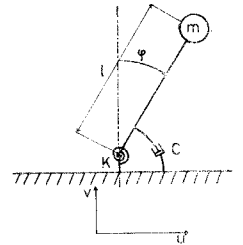


図-1 解析モデル

2 重力の影響度を示すパラメーター 図-1のモデルについて、水平・上下動および重力を考慮したロッキングの運動方程式を立てると

$$\ddot{\varphi} + 2\beta_0\omega_0\dot{\varphi} + \omega_0^2 F(\varphi, \dot{\varphi}) + \gamma\omega_0^2 A_u \cos(\alpha)\cos\varphi - \gamma\omega_0^2 \{1 + A_v \cos(\alpha)\} \sin\varphi = 0$$

となる。ここに $\omega_0$ は固有円振動数、 $\beta_0$ は減衰定数、 $F(\varphi, \dot{\varphi})$ は復元力特性、 $A_u$ 、 $A_v$ はそれぞれ震度法で表わされた水平および上下加速度の最大値で、 $u(t)$ 、 $v(t)$ はその時間波形である。また $\gamma$ は

$$\gamma = g/l\omega_0^2 = mg l/k$$

なる無次元量であり、構造物の復元力モーメントに対する自重による転倒モーメントの割合を示す値で、重力の影響度を示す値であるといえる。また、 $A_u mg$ なる水平力が静的に作用したときの回転角 $\varphi_{s0}$ は

$$\varphi_{s0} = \gamma A_u \quad \text{と表わされ、}\gamma\text{は構造物のたわみやす}$$

さを示す値でもある。試算的に求めてみると一般の構造物で $0.001 < \gamma < 0.01$ 、超高層構造物で $0.01 < \gamma < 0.1$ であった。また、 $\gamma > 1$ なる構造物は何れの外力が作用しなくても自重のみで転倒し、静的にも不安定であるといえる。

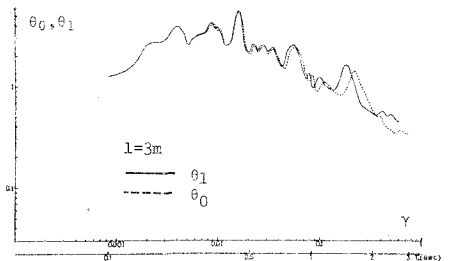


図-2 線形応答スペクトル

3 線形解析 タフト地震記録のS69E成分と上下成分を入力とし、 $\beta_0=0.02$ として計算した結果を静的変形角 $\varphi_{s0}$ に対する動的な応答倍率の形にし、 $\gamma$ を横軸にとり示したものが図-2である。鉛直荷重の影響を考慮しない場合が $\theta_0$ 、重力の影響のみを考慮した場合が $\theta_1$ である。図より、 $\theta_1$ のピークが $\theta_0$ のピークより $\gamma$ の小さな方向にずれており、このずれも $\gamma$ が大きくなるにつれて大きくなっている。これは、 $\sin\varphi \approx \varphi$ なる近似を用いると、重力による転倒モーメントは負の等価線形復元力と考えることができ、このとき式の上での復元力項の係数を $\omega_0^2$ とすると $\omega_1 = \omega_0 \sqrt{1-\gamma}$ となり、重力により、固有周期が大きくなることによるものである。上下地動をも加えた結果、ほぼ一致し、その差の最大のもので1%を越すことはなかった。そこで上下地動の影響を調べるため、 $l=10m$ 、 $\omega_1=6.2 \text{ rad/sec}$ とし、水平入力としては $\ddot{u}(t)=500 \sin \omega_1 t (\text{gal})$ 、鉛直入力としては $\ddot{v}(t)=1000 \sin(\omega_1 t + \alpha) (\text{gal})$

$\ddot{u}_g(t) = 1000 \sin(2\omega_0 t + \alpha) \text{ (gal)}$  なる二種類の入力をそれぞれ作用させた結果が図-3である。構造物の固有周期と上下動の周期が一致していると、上下動の影響はほとんどなく、固有周期が上下動の周期の2倍の場合は、位相差により、応答は拡大もされまた逆に縮小もされる。しかし、実地震記録を用いた解析では、図-3の例と比べると上下動の強度も小さく、卓越周期や位相差も複雑に作用し合っており、結局大きな影響が出なかったものと考えられる。

**4 非線形解析** 水平力  $A_y m g$  が作用したとき降伏角  $\varphi_y$  にいたるとすると  $\varphi_y = \gamma A_y$  となる。復元力特性が *bi-linear model* で表わされる構造物では、剛性比  $\eta$  が  $\eta < \gamma$  の場合は、自重による転倒モーメントが復元力モーメントを上まわるような角度が存在する。この角を  $\varphi_0$  とすると  $\varphi_0 = \frac{1-\eta}{\gamma} \varphi_y$  となる。この角  $\varphi_0$  を越すと構造物は自重のみで転倒する。 $\delta = A_y / A_u$  なる  $\delta$  を構造物の降伏強度を示すパラメータとして調べた結果を *ductility factor* で示したものが図-4である。鉛直荷重を考慮しない場合が  $\mu_0$ 、重力をいれた場合が  $\mu_1$  で、 $\mu_2 = 1/\delta$  は転倒に到る限界を示す。降伏強度が小さい場合  $\delta > 0.01$  の部分で重力によって変形が急激に増大して転倒に到っている。これは、重力の影響を近似的に負の等価線形復元力と考えると、等価的な剛性比は  $\eta = \frac{\eta - \gamma}{1 - \gamma}$  となり、 $\eta < \gamma$  のときは  $\eta$  は負となるために、一度傾くとつぎつぎと同一方向にのみ傾いてゆくという過程をくり返すからである。当然、この現象は  $\gamma$  が大きいほど顕著に現われる。したがって、同一の降伏レベルと固有周期を持った構造物では、背の低いものほど  $\gamma$  が大きく応答角も大きくなり、降伏後重力の影響も大きく受けて危険である。この現象は等価的な剛性比  $\eta$  が負であることによるものである。そこで、 $\eta$  をパラメータとして調べたものが図-5である。これより、わずかにでも  $\eta$  を正にすると変形は小さくなることがわかり、 $\eta \geq \gamma$  とすると  $\eta \geq 0$  となりもはやこの不安定な現象は起こらなくなる。この結果より、大地震により、仮りに一部が破壊したとしても、その後の水平変形量の増加と共に、構造物全体としての復元力が大きく減少しないような構造形式にすることが、自重による転倒を防ぐ最も重要な方法の一つであると考えられる。なお、非線形解析においても、上下動の影響をも考慮した結果は  $\mu_1$  とほぼ一致し、その差の最も大きかったものでも5%を越えなかったことをここに報告しておく。

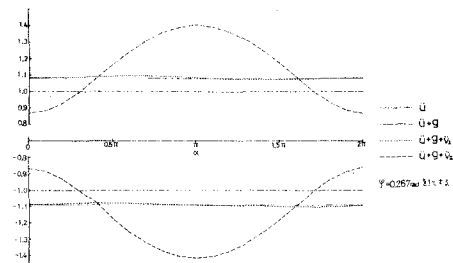


図-3 上下地震の影響

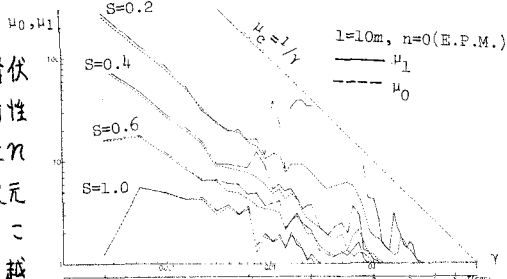


図-4 非線形応答スペクトル

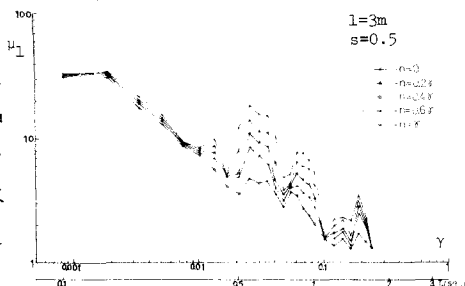


図-5 剛性比  $\eta$  の影響

ある。当然、この現象は  $\gamma$  が大きいほど顕著に現われる。したがって、同一の降伏レベルと固有周期を持った構造物では、背の低いものほど  $\gamma$  が大きく応答角も大きくなり、降伏後重力の影響も大きく受けて危険である。この現象は等価的な剛性比  $\eta$  が負であることによるものである。そこで、 $\eta$  をパラメータとして調べたものが図-5である。これより、わずかにでも  $\eta$  を正にすると変形は小さくなることがわかり、 $\eta \geq \gamma$  とすると  $\eta \geq 0$  となりもはやこの不安定な現象は起こらなくなる。この結果より、大地震により、仮りに一部が破壊したとしても、その後の水平変形量の増加と共に、構造物全体としての復元力が大きく減少しないような構造形式にすることが、自重による転倒を防ぐ最も重要な方法の一つであると考えられる。なお、非線形解析においても、上下動の影響をも考慮した結果は  $\mu_1$  とほぼ一致し、その差の最も大きかったものでも5%を越えなかったことをここに報告しておく。

文献 1) P.C. Jennings, R. Husid: "Collapse of yielding structures during earthquakes" Proc. of A.S.C.E. EMS (1968, 10)