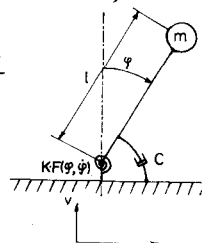


京都大学 工学部 正会員 後藤尚男
 京都大学 工学部 正会員 家村浩和
 京都大学 大学院 学生会員 児玉豊

1. まえがき

従来の動的耐震解析においては、重力や上下動などの鉛直荷重が構造物の水平方向の振動に及ぼす影響は微小であるとの仮定の下に無視される傾向にあった。しかし近年における長大かつフレキシブルな構造物あるいは一般の構造物でも塑性領域までもを対象として解析する場合、水平変形量が大きくなる結果、鉛直荷重の影響は無視できなくなるものと考えられる。本研究ではFig.1に示す1自由度ロッキングモデル⁽¹⁾の地震応答計算を実施することにより、鉛直荷重の水平変形量に及ぼす影響を解析・検討した。



2. 運動方程式

重力加速度 g 、水平および上下加速度 $\ddot{u}(t)$ 、 $\ddot{v}(t)$ を考慮したFig.1のロッキングモデルの運動方程式は次式のように表わされる。⁽²⁾

$$\ddot{\phi} + 2h_0\omega_0\dot{\phi} + \omega_0^2 F(\phi, \dot{\phi}) + \gamma\omega_0^2 A_u \sigma_u(t) \cos \phi - \gamma\omega_0^2 \{1 + A_v \sigma_v(t)\} \sin \phi = 0 \quad (1)$$

$$\left. \begin{aligned} \text{ここに、} \omega_0^2 &= \frac{K}{I} = \frac{K}{m l^2}, \quad h_0 = \frac{c}{2 I \omega_0}, \quad \ddot{u}(t) = A_u g \sigma_u(t), \quad \ddot{v}(t) = A_v g \sigma_v(t) \\ A_u &= |\ddot{u}(t)|_{\max} / g, \quad A_v = |\ddot{v}(t)|_{\max} / g, \quad \gamma = g / \omega_0^2 = m g l / K \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

γ は構造物に固有の無次元量で、近似的に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比を示している。また $m A_u g$ すなわち (質量) $\times$ (最大水平加速度) なる水平力が静的に作用したときの回転角 ϕ_{s0} は $\phi_{s0} = \gamma A_u$ と表わされ、 γ は構造物のフレキシビリティを示している。 $\gamma > 1$ となると自重のみで転倒する。ちなみに $l = 10 \text{ m}$ 、 $T_0 = 2\pi / \omega_0 = 2.0 \text{ 秒}$ のとき $\gamma = 0.1$ である。

3. 線形地震応答解析

式(1)において $F(\phi, \dot{\phi}) = \phi$ 、 $h_0 = 0.02$ と線形系を想定し、入力としては Taft 地震加速度記録の S69°E 成分を用いた応答計算結果を静的回転角 ϕ_{s0} で無次元化した値 $\theta (= \phi / \phi_{s0})$ をFig.2に示した。水平動のみによる結果が θ_0 、重力のみを追加した場合が θ_1 である。さらに上下地震動を追加した結果は θ_1 とほとんど変らず、その差は高々1%程度であった。同図より θ_0 と θ_1 との応答性状に大きな差は認められないが、 $\gamma > 0.5$ なる範囲においてピークのずれがみ

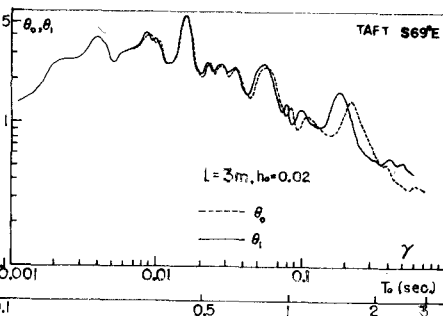


Fig.2 Response of Linear System

られ、この傾向は γ が大きくなるほど大きい。 $\sin \phi \cong \phi$ 、 $\cos \phi \cong 1$ において式(1)を整理すると、式(3)のようになり、さらに鉛直荷重のない場合は周知の線形1自由度の方程式・式(4)となる。

$$\ddot{\theta} + 2h_0\omega_0\dot{\theta} + \omega_0^2 \{1 - \gamma(1 - A_v \sigma_v(t))\} \theta = -\omega_0^2 \sigma_u(t) \quad (3)$$

$$\ddot{\theta} + 2h_0\omega_0\dot{\theta} + \omega_0^2 \theta = -\omega_0^2 \sigma_u(t) \quad (4)$$

式(1)の数値計算の結果、上下地震動の影響はほとんど出なかったため、式(3)において $A_v \sigma_v(t)$ を無視すると、重力のロッキング振動に及ぼす影響は振動系の固有振動数が ω_0 から $\sqrt{1-\gamma}\omega_0$ に減少したこととみかけ上等価である。Fig.2に見られるピークのずれはこの固有振動数減少の結果であると考えられる。この現象をさらに学術的に把握するため、Fig.3(1)にはモーメント復元力 M_r の剛度 K が自重による転倒モーメント $M_g (\cong m g l \phi)$

のためみかけ上減少して $(1-\delta)K$ となる過程と $\sin \varphi \cong \varphi$ と仮定して模式的に示した。

4. 非線形地震応答解析

モーメント復元力の履歴特性 $F(\varphi, \dot{\varphi})$ としては完全弾塑性系 (E.P.M.) と bilinear 系 (B.L.M.) を採用した。弾性域の剛度に対する塑性域のそれの比を剛度比 n とすると、 $n=1$ のとき線形系、 $n=0$ のとき E.P.M. を表わす。Fig. 3 (2), (3) に模式的に示した復元力の減少を参照すると、 $n < \delta$ なる場合、自重による転倒モーメントが復元力モーメントと等しくなって、みかけ上の復元力 $(M_r + M_g)$ がゼロとなる角 φ_c が出て来る。 $\sin \varphi \cong \varphi$ とおくと、 φ_c およびみかけ上の復元力の剛度比 n' は次式となる。
$$\varphi_c = \frac{1-n}{\delta-n} \varphi_y, \quad n' = \frac{n-\delta}{1-\delta} \quad \text{----- (4)}$$

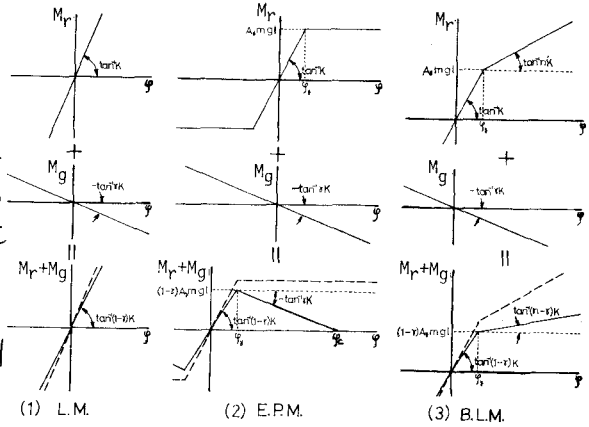


Fig. 3 Decrease of Restoring Moment Due to Gravity

Fig. 4, 5 にはそれぞれ重力を考慮しない場合およびした場合の履歴系の地震応答 ($\mu = \varphi / \varphi_y$; ductility factor) を、剛度比 n をパラメータとして示した。Fig. 4 より重力による転倒モーメントを考慮しない場合、応答 μ は降伏後の剛度にさほど左右されないことがわかる。一方重力を考慮すると、 $n < \delta$ なる場合みかけ上の降伏後の剛度が負となり、剛度比 n の低下に伴う応答量 μ の増大傾向が顕著になっている。つまり降伏後の剛度低下が著しいほど重力の影響も大きいと言える。この現象は履歴系の応答振幅が増大したというよりもむしろ、復元力モーメントの見かけ上の低下により塑性変形が累積された結果であると考えられる。

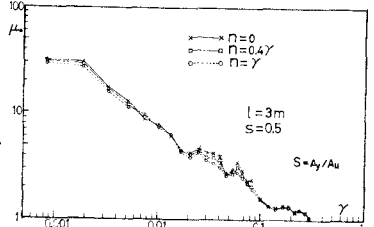


Fig. 4 Response of Bilinear System Without Gravity

Fig. 6, 7 にはそれぞれ $n=0$ なる履歴系の時間応答 μ と、重力による転倒モーメントをも加えたみかけ上の復元力モーメント $(M_r + M_g)$ の履歴ループを示した。Fig. 7 では復元力モーメントの正側の塑性域に及び回数が多く、したがって塑性変形も正側に累積されて行く過程を見い出せる。塑性域の復元力低下はほぼ直線的で、この範囲内では $\sin \varphi \cong \varphi$ なる仮定もほぼ妥当であると言えよう。剛度低下がさるに大きくなると、復元力モーメントが完全に消失して転倒に至る。非線形領域においても上下地震動の影響は少なく、重力のみを考慮した結果と高々 5% の差を示したのみであった。上下地震動の位相特性は複雑であり、ロッキング振動との共振現象はほとんどなく、本研究で用いた振動モデルへの影響は工学的には無視しても差支えないものと考えられる。なお異った入力に対する応答も現在検討中である。

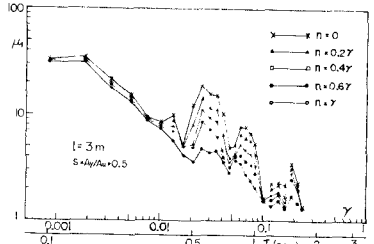


Fig. 5 Response of Bilinear System With Gravity

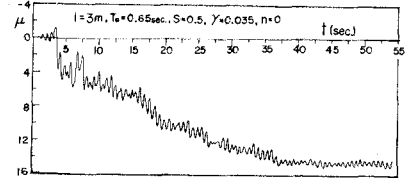


Fig. 6 Time History of E.P.M. With Gravity

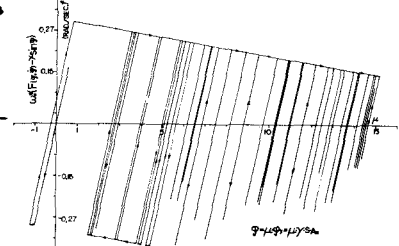


Fig. 7 Hysteresis of Restoring Moment With Gravity

参考文献

- 1) P.C. Jennings · R. Husid, Proc. of ASCE, EM5, Oct. 1968.
- 2) 児五豊 · 家村 浩和, 昭和 49 年度土木学会 関西支部 年次学術講演会 講演概要 I-51.