

地震時における低層建造物の基礎と地盤の相互作用について

信州大学工学部 正会員 島 坦

1. まえがき

構造物内の振動記録と地表面における振動記録と比較する場合、後者を標準にして考えると構造物の振動特性とともに地盤特性の影響についてしらべることができる。松代地震の際、信州大学工学部構内で得られた地震記録を解析した結果については、すでに一部述べたがそれらの結果をまとめ、それに加えて理論的考察をおこなうものである。

解析の対照となつてゐる構造物は、巾43m、奥行14m、高さ15mの普通の4階建て鉄筋コンクリートの建物であり、長手方向はE-Wの向きである。場所は長野市南方、犀川付近で、比較的柔かい地盤上にある。このような構造物は階数も小さく、巾の割合に高さが低いので低層構造物と考え、かつ柔かい地盤上にあるので、その振動には地盤とのcouplingが重大な影響をおよぼすとみられる。

2. 観測結果

測定は建物の4階、1階、地表面の3箇所、N-S、E-W成分の変位記録について波形のスペクトル解析をおこなつた。それらの結果、周期0.5sec以下の範囲では周期0.25~0.30secのところを最大のスペクトル振中をもつており、この卓越周期については、しらべた10回の地震資料では距離は10~20kmの範囲であるが、震源の方向およびマグニチュードには関係してゐないようである。したがつて周期0.5sec以下の波動が構造物および地盤の振動に参与してゐると考えることができる。さらに卓越周期0.25~0.30secが3箇所共通してゐることは、その卓越周期を建物の固有周期とみることもできるが、そのように一致する偶然性も疑う必要がある。

構造物の振動解析には必ずその固有周期を知る必要があるが、ここでは常時微動による建物の振動について結果をのべる。地震時の場合と同じように建物内と地表で常時微動を記録すると、スペクトルの振中は別として、振中最大の周期は0.25~0.28secとなつて3箇所とも同じである。そこで観測の方を工夫して建物の4階における振動と1階における振動の差を記録するように測器を結線してみた。記録から、

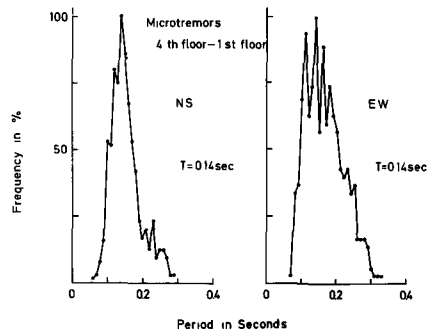


図 1

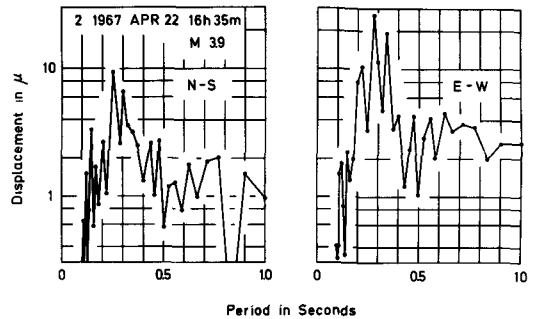
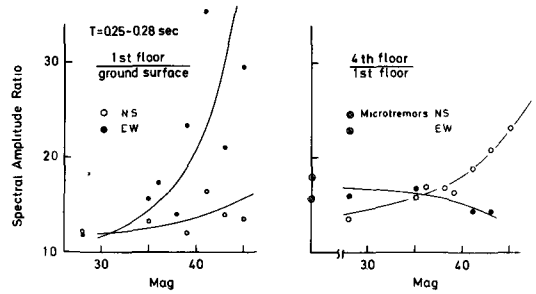


図 2

各周期について読みとった回数が多い図に示してある。雑振動から建物の固有周期の振動を拾い出すには1階の地震計を基準にしてみる、すなわち1階を0変位とみなしてやれば、測定可能な場合があるはずである。やゝ凡のある日さえ入るので、むしろ凡によって生じた振動とみた方がよいかも知れない。この図から分るように建物の短手、長手方向で傾度分布曲線の形はやゝ異なるが、卓越周期は0.14 secとなる。この周期について地震時の4階におけるスペクトルをみると、こゝには図示していないが0.5~0.16 secあたりにあまり顕著ではないが一つの山がみられた。両者の周期成分が対応するとすれば、この建物の固有周期は0.14~0.15 secとみてよいと思われる。

つぎに構造物の基礎の振動と地表面の振動と比較するため、1階と地表面のスペクトル振中の比を各周期について求めてもよいが、こゝでは1階と地表における波形の引き算をして新しい振動波形を求め、そのスペクトルを画いてみた。周期0.5 sec以上の振動成分では、構造物内も地表の場合も変りはないので、その波形は構造物と地盤のcouplingによる波形とみることができるとする。才2図に1967, Apr 22, 16:35 M:3.9の地震を1例として示す。NS, EW成分はそれぞれ短手、長手方向の振動スペクトルをあらわす。この図よりスペクトルの振中は長手方向が短手方向よりも大きく、卓越周期は0.25~0.28 secで両者ほぼ等しいとみられる。この卓越周期は前述の固有周期と考えた0.14~0.15 secの2倍にあたるが、構造物と地盤とcoupleしたときの周期とみてよいのではなからうか。

地表、1階、4階におけるスペクトルの周期0.5 sec以下の範囲における卓越周期について述べたが、つぎにその周期におけるスペクトルの振中について議論する。地表における振動波形より構造物内では周期0.5以下では拡大されており、したがって振中比として才3図にそれぞれ1階と地表の比、4階と1階の比を左右に示す。横軸にMag=マグニチュード、縦軸に振中比をとっている。左図から長手方向(EW)では短手方向(NS)より大きく、かつ地震のMag=マグニチュードによる影響がきわめて敏感である。この振中比は1階と地表の比であるから、構造物の水平移動が大きくきいていいると考えることができる。一方右図では4階と1階の比であり、この場合短手方向が長手方向よりMag=マグニチュードの大きいところで大きく、かつMag=マグニチュードの変化に敏感である。この振動の主体はロッキング運動と考えることができる。なお右図には、建物内での常時微動の測定からの結果を付記しておいたが、Mag=マグニチュードの小さい場合、すなわち地震時の場合と比較して一つの極限を示すものとみれば、それぞれ曲線にのっているようである。



才3図

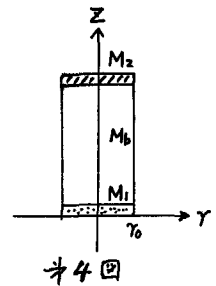
3. 理論的考察

構造物と地盤の相互作用については数多くの理論的解法がなされていいるが、鳥海²⁾、Luco³⁾らの波動論的理論、およびLysmer, Richart⁴⁾らの振動論的理論がある。こゝでは両者を取り入れて考察

を簡単の場合についておこなってみた。構造物のモデルとして第4図のよ
うな円筒形の弾性体を考え、その上下にうすい剛板がついている、すなわ
ち屋根と基礎の部分が剛体とし、基礎がばね-ダツシポット系で地盤に連
結されていると考える。

半径 r_0 、高さ H なる弾性体では微分方程式はつぎのとおりである。

$$\frac{\partial^2 u_r}{\partial t^2} = v_{sb} \frac{\partial^2 u_r}{\partial z^2} \quad (1)$$



ここで u_r は半径方向の変位、 v_{sb} は円筒のS波速度、 t は時間、 z 方向は上向きにとつてある。
(1)式の解をつぎのようにおく。

$$u_r = (A \cos k_b z + B \sin k_b z) e^{i\omega t} \quad (2)$$

ここで k_b は波数、 ω は角振動数である。また A, B は振中をあらわす係数である。

$z=H$ における stress は

$$\sigma_{zr} = \mu_b \left(\frac{\partial u_r}{\partial z} \right)_{z=H} \quad (3)$$

であるが、 $z=H$ において M_2 なるうすい剛板があるとすると、剛板と円筒との力の釣合いから

$$f_b = \pi r_0^2 \mu_b \left(\frac{\partial u_r}{\partial z} \right)_{z=H} = -M_2 \left(\frac{\partial^2 u_r}{\partial t^2} \right)_{z=H} \quad (4)$$

となる。ここで μ_b は円筒の剛性率、

(4)式に(2)式を代入すると

$$\pi r_0^2 \mu_b k_b (-A \sin k_b H + B \cos k_b H) = M_2 \omega^2 (A \cos k_b H + B \sin k_b H)$$

これから係数 B を求めて(2)式に代入すると

$$u_r = A \left\{ \cos k_b z + \frac{\pi r_0^2 \mu_b k_b \sin k_b H + M_2 \omega^2 \cos k_b H}{\pi r_0^2 \mu_b k_b \cos k_b H - M_2 \omega^2 \sin k_b H} \sin k_b z \right\} e^{i\omega t} \quad (5)$$

ここで 円筒の密度を ρ_b 、質量を M_b とすると

$$\rho_b \pi r_0^2 H = M_b \quad (6)$$

となるから

$$\pi r_0^2 \mu_b k_b = M_b \frac{\omega^2}{k_b H} \quad (7)$$

となり u_r はつぎのように書き変えることができる。

$$u_r = A \left\{ \cos k_b z + \frac{\sin k_b H + \frac{M_2}{M_b} k_b H \cdot \cos k_b H}{\cos k_b H - \frac{M_2}{M_b} k_b H \cdot \sin k_b H} \sin k_b z \right\} e^{i\omega t} \quad (8)$$

一方、円筒の基礎に働く力、すなわち $z=0$ における力は

$$f_b^0 = \pi r_0^2 (\sigma_{zr})_{z=0} = \pi r_0^2 \mu_b \left(\frac{\partial u_r}{\partial z} \right)_{z=0} \quad (9)$$

(8)式を(9)式に代入すると

$$f_b^0 = A M_b \frac{\omega^2}{k_b H} \left(\frac{\sin k_b H + \frac{M_2}{M_b} k_b H \cdot \cos k_b H}{\cos k_b H - \frac{M_2}{M_b} k_b H \cdot \sin k_b H} \right) e^{i\omega t} \quad (10)$$

となる。

円筒の下端に質量 M_1 なる剛板がついておるとし、その M_1 の運動が下方から作用する水平外力 $P = P_0 e^{i\omega t}$ と円筒下部の力 $(f_b)_{z=0}$ により釣合っているとすると、運動の方程式は

$$M_1 \ddot{\delta} = -\{(f_b)_{z=0} + P\} \quad (11)$$

M_1 の運動には地盤との結合に対して、ばね係数および減衰係数を導入すると、Lysmer and Richart⁴⁾ の式にしたがって (11) 式のかかりに

$$M_1 \ddot{\delta} + C_1 \frac{k\gamma_0}{V_{ss}} \dot{\delta} + k_1 k \delta = -\{(f_b)_{z=0} + P\} \quad (12)$$

となる。ここで δ は質量 M_1 の剛板の変位、 V_{ss} は地盤の S 波速度、 C_1 は無次元の減衰係数、 k_1 は無次元のばね係数、 k はばね係数

いま、(9)式において $\delta = A e^{i\omega t}$ とおいて (12)式に入れ、かつ

$$\delta = \frac{P_0}{k} F e^{i\omega t} \quad (13)$$

とおいて、倍率 F を求めると

$$|F| = \frac{1}{\sqrt{\left\{ k_1 \left[1 + \frac{a_1^2 B_1}{a_0 n b} \left(\frac{\sin naob + \frac{M_2}{M_1} naob \cdot \cos naob}{\cos naob - \frac{M_2}{M_1} naob \sin naob} \right) - B_0 a_0^2 \right]^2 + (C_1 a_0)^2 \right\}}} \quad (14)$$

ここで $a_0 = \frac{\omega \gamma_0}{V_{ss}}$

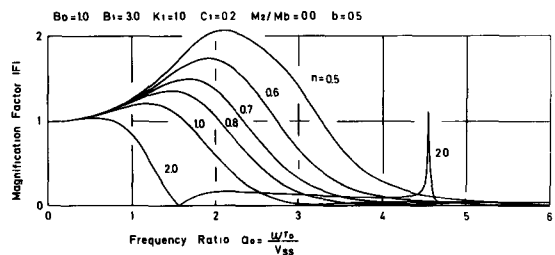
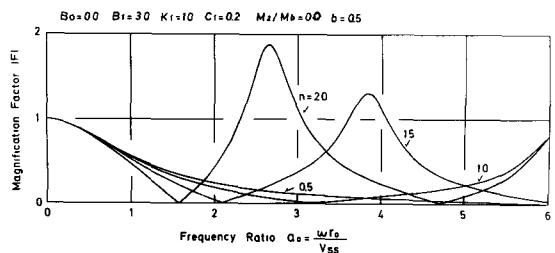
$a_1 = \frac{\omega \gamma_0}{V_{sb}} = b a_0$, $b = \frac{V_{ss}}{V_{sb}}$

$B_0 = \frac{M_1 V_{ss}^2}{k \gamma_0^2}$, $B_1 = \frac{M_b V_{sb}^2}{k k_1 \gamma_0^2}$

$n = H/\gamma_0$

である。

第5図に2つの計算例を示したが、図中のパラメータは円筒の高さと半径の比で、本文の建物の場合は $n=0.7$ である。建物の固有周期にあたりところは $a_0=4.5$ であり、第5図の下部では倍率最大のところは $a_0=1.7$ であるから、その比は約 2.6 倍である。第5図の理論曲線で



第5図

パラメータを現実のものとは完全にあわせてはいないが、定性的には第2図と第5図(下)の傾向は説明されるように思われる。ただし横軸は前者は周期、後者は振動数である。

References: (1) 島 坦:地震時の建物の振動における地表面の影響, 第3回地震工学シンポジウム(1970) 1.97-102, (2) 島海敷: Vibrations in Foundations of Machines, Tech. Rep. Osaka Univ. 5, 102-126, 1955. (3) J.E. Luco: Dynamic Interaction of Shear Wall with the Soil, in Press. (4) J. Lysmer, & F.E. Richart: Dynamic Response of Footings to Vertical Loading, J. S.M.F.D., ASCE, 65-91, 1966.