

# 地盤と構造物の相互作用が地震記録に及ぼす影響

中央大学 正会員 片山恒雄

## 1. まえがき

これまでに行なわれた多くの構造物の地震応答解析は、構造物が剛な地盤上にあると仮定し、他の構造物内に設置された強震計で得られた地震記録を、構造物の底部に作用させて求められている。このような方法では、構造物と地盤との相互作用が無視されており、さらに、入力地震動が記録のとらえた地盤や構造物の振動性状の影響を受けていることが考慮されていない。構造物の地震応答を求める最良の方法は、ある地点の地震基盤（地表層と支持層の境界面）での入力動をあたえて、地盤と構造物を一体の振動系として解析することであろう。

本論文は、波動伝播の単純化された理論を用いて、地表面で記録された地震動と構造物底部で記録された地震動とがどのように異なるかを調べようとするものである。このことで、自由表面で得られた地震動が入力波形として適当であることを意味しようとするのではなく、ただ、構造物底部で得られた記録を用いて応答計算を行なった場合に、解析結果に及ぼされる影響に関して、何らかの示唆を得ようとするものである。

上述の解析には、地表層を質点系として扱う方法もあり、地表層の性質をより明確に規定できようであろう点からは、地盤を半無限弾性体と仮定した波動伝播の考えよりもすぐれているかもしれない。この方法による検討は今後行なうつもりである。

## 2. 波動伝播の考えによる理論

まず地盤は一樣な弾性的性質を有する半無限体と仮定する。さらに、実際の構造物底面と地盤との複雑な結合状態を無視して、構造物を等価な地盤でおきかえ、その振動現象が波動の単純な重複反射で説明できるものとする。金井らは、構造物内における実地震観測例から、この考えがかなり妥当なものであることを確かめている<sup>(1)</sup>。

いま、半無限な完全弾性体内を上向きに伝播してくる地震波動を  $x_0(t)$  とすれば、自由表面における動き  $f(t)$  は

$$f(t) = 2 \cdot x_0(t) \quad \dots \quad (1)$$

であたえられる。ここで、この地表面に基本固有周期が  $T_1$  秒である構造物があり、波動が地盤から構造物へ進入するときの反射率を  $r$  とすれば、ある瞬間  $t$  における地盤と構造物の境界面の動き  $x_0(t)$  は

$$x_0(t) = (1+r) \left\{ x_0(t) + (1-r) \sum_{j=1}^k (-r)^{j-1} x_0\left(t - j \frac{T_1}{2}\right) \right\} \quad \dots \quad (2)$$

であたえられる。上式において

$$\frac{(k-1)T_1}{2} < t < \frac{kT_1}{2}, \quad k = 1, 2, 3, \dots$$

である。かりに、地盤中を伝播してくる波動が、周期 $T$ 秒の正弦波であるとすれば、 $x_g(t)$  は0に収束し、地盤と構造物の境界面は振動の節となることから、簡単な計算から示される。したがって、構造物の存在は、地震波動中で、その構造物の基本固有周期に等しい周期を有する成分の影響を小さくするような作用を示すであろうことが想像される。

### 3. 数値計算例

地盤中を伝播してくる地震動としては、Housnerらの方法によつて作成した3つの擬似地震動を用いた。<sup>(2,3)</sup> 擬似地震動 $x_g(t)$ は継続時間25秒で0.05gの最大加速度を有する。すなわち自由表面で記録され

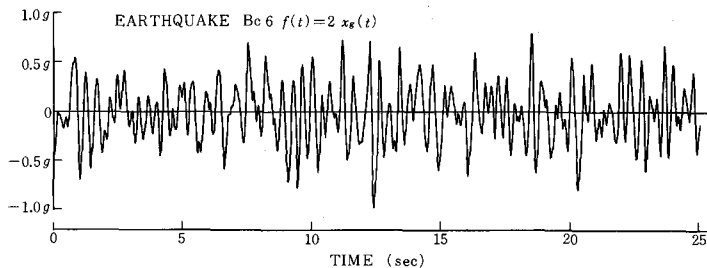


図-1 擬似地震動記録の一例

たときに0.1gの最大加速度を有するものであり、その一例を図-1に示した。数値計算例に使用した3つの擬似地震動Aa1, Bc6, Cc12が自由表面で記録されたときに得られる $f(t) = 2x_g(t)$ の加速度応答スペクトル(減衰2%)、速度応答スペクトル(減衰2%)、および周期-頻度曲線を図-2, 3, 4に示した。これらの図から、3つの擬似地震動が大きく性質を異としていることがわかる。

このような3つの地震動が、基本固有周期0.4秒の構造物の底部で記録されたとき、どのような影響を受けるかを図-5に示した。地盤から構造物へ波が進入する際の反射率としては $R = 0.534$ を用いた。いくつかの予備計算の結果から、 $R$ の値が小さいほど、地盤-

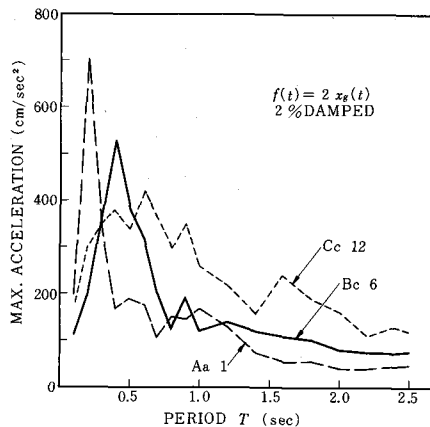


図-2 地震動の加速度応答スペクトル

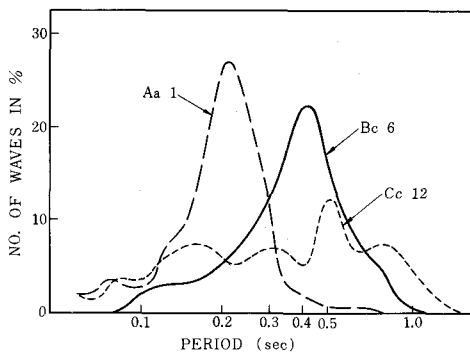


図-4 地震動の周期-頻度曲線

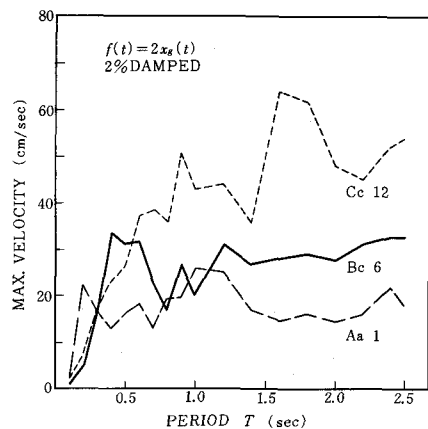


図-3 地震動の速度応答スペクトル

構造物の相互作用の影響が大きいことが判明したので、その最大の影響を調べてみるという意味で  $R = 0.534$  を用いたのである。<sup>\*</sup> 図-5, 6, 7 においては、比較を容易にするために、 $x_0(t)$  および  $f(t)$  の速度応答スペクトルの比が示されている（減衰は共に2%）。  
 図-5 から、どの地震動の場合においても、周期0.4秒の構造物の底部で記録された地震動の速度応答スペクトルが、構造物の周期に等しいところで、自由表面で得られる地震動のスペクトルよりもずっと小さな値を示していることがわかる。構造物の周期に等しい周期におけるスペクトルは、自由表面記録のスペクトルのほぼ40%程度である。

同一の地震動 Cc12 を、基本固有周期の異なる3つの構造物の底面で記録した場合に現われる構造物の影響を図-6 に示した。ここでは、構造物の周期は  $T_1 = 0.2, 0.4, 1.0$  秒の場合が考えられている。図-6 から明らかなように、構造物底面で得られた記録の速度応答スペクトルは、構造物の基本周期に等しいところで、自由表面で得られる記録のスペクトルよりも相対的に小さな値を示している。この場合にも、構造物の周期に等しい周期におけるスペクトル値は、自由表面記録のスペクトル値の約40%である。さらに図-6 は、構造物の固有周期が長いほど、その影響はスペクトル図の周期の広い範囲にわたっていることを示している。構造物の基本固有周期が1秒の場合については、図-6 のスペクトル比の谷が、2次および3次の固有周期の付近でも生じていることがわかる。

前述のように、地盤と構造物の相互作用の影響は、反射率  $R$  の値が小さいほど大きいのであるが、地震動

<sup>\*</sup> 構造物下面での構造物内の波の反射の際に生ずるエネルギー逸散を、断続的に作用する粘性減衰と考えると、1次振動の減衰常数は

$$\zeta = \frac{100}{\pi} \ln \frac{1}{|R|} \quad (\%) \quad \dots (3)$$

となる。<sup>(4)</sup>  $R = 0.534$  の値は(3)式によれば、減衰常数20%にあたる。

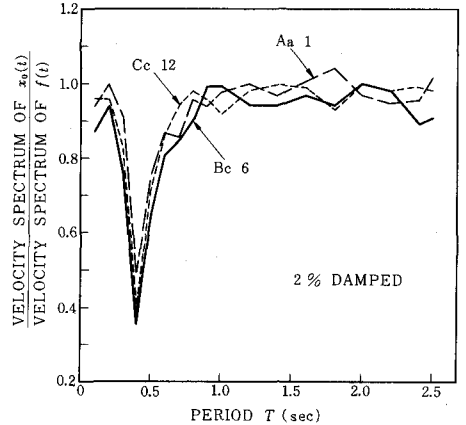


図-5 同一構造物で3つの地震動を記録した場合

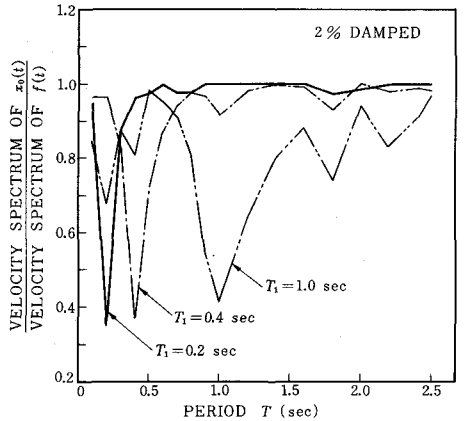


図-6 同一地震動を3つの構造物で記録した場合

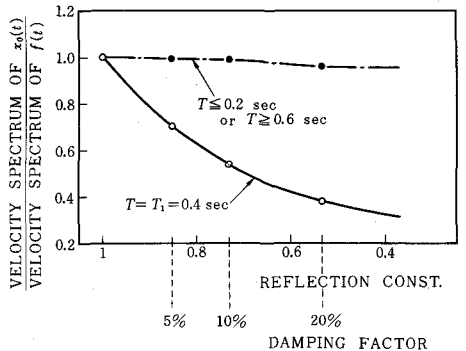


図-7 反射率  $R$  の影響 (地震動 Cc12, 構造物の周期 0.4秒)

Cc12を基本固有周期が0.4秒の構造物の底面で記録した場合について、 $\beta$ の値による影響の変化を示したのが図-7である。図-7より、構造物の減衰常数が5%程度の場合(式(3)によれば $\beta \approx 0.06$ となる)に、構造物の周期に等しい周期におけるスペクトル値が自由地表面記録のスペクトル値の約70%であることがわかる。さらに、構造物の周期から十分に離れた周期においては、両者の速度応答スペクトルはほとんど同じ値を示すこともわらう。

#### 4. むすび

きわめて単純化された波動伝播の理論にもとづいて、構造物の底部で記録された地震動が、構造物の存在によって、どのような影響もとの程度に受けているかを推定した。その結果をまとめれば、以下の通りである。

- (1) 構造物の存在は、地震波の中で、その構造物の周期に等しい周期の成分の影響を減少させる傾向がある。
- (2) 構造物の減衰常数がきわめて大きい場合(20%程度)には、構造物底部で記録された地震動の2%減衰速度応答スペクトルは、その構造物の基本固有周期に等しい周期では、自由地表面記録のスペクトル値の40%程度である。構造物の減衰が5%程度のとき、上記の値は70%程度であろうと推測される。
- (3) 構造物の固有周期が長い場合には、その固有周期を中心とした相当地に広い範囲にわたって、速度応答スペクトル値が減少する傾向がある。

上述の結果から、建物の固有周期近くで、応答スペクトルに谷が生じているようないくつかの実測記録<sup>(5)</sup>については、地盤を半無限弾性体と考えることで、ある程度の説明を行なうことができる。しかしながら、地震時に、構造物が地表層の一部と一体になって共振に近い現象を生じさせているような実測記録<sup>(6)</sup>は、上記の考えでは説明することができない。後者の場合については、地表層を多質点系などで、より明確にモデル化した考えによらなければならないであろう。

#### 参考文献

- (1) Kanai, K. : Some New Problems of Seismic Vibrations of a Structure, Proc. 3<sup>rd</sup> WCEE, 1965
- (2) Housner, G.W., and Jennings, P.C. : Generation of Artificial Earthquakes, Proc. ASCE, No. EM1, 1964
- (3) 片山恒雄: 擬似地震動の特性に関する研究, 土木学会論文報告集, No. 162, 1969
- (4) Jacobsen, L.S. : Vibrational Transfer from Shear Building to Ground, Proc. ASCE, No. EM3, 1964
- (5) 久田俊彦, 中川恭次, 和泉正哲: 強震計記録による規準加速度スペクトルと地盤基礎条件, 建築研究報告, No. 46, 1965
- (6) Housner, G.W. : Discussion on "Effect of Structure and Foundation Interaction," Proc. ASCE, No. EM1, 1962