

表面波に対する表層地盤の不規則応答

京都大学防災研究所 正会員 ○土岐憲三

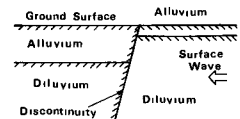
本州四国連絡橋公団 正会員 新田篤志

1. まえがき

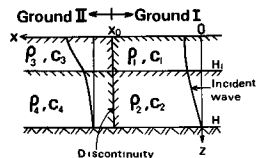
長大橋や都市内の高架道路、あるいは地下鉄、沈埋トンネルや各種の埋設施設のような構造物は建築物や単一の構造物とは違って平面的な広がりを持つから、このような構造物の各部は地震時にはそれぞれ位相差を持って運動すると考えられる。このような位相差は構造物の耐震性に関しては不利に作用する場合もあり、特に地中に埋設されている延長の長い構造物ではその中心線を含む面内での任意の2点間の相対変位の大きさが、その耐震性については支配的な要因であることが知られている。このような問題を調べるためには、まず構造物の耐震性に関係の深い周波数成分の卓越する波動について、地表面に平行な方向への伝播の特性を明らかにする必要がある。一方、震源域で発生した地震動は波動として遠方にまで伝播するが、加速度記録内に卓越するような周波数成分は地表面近くの局所的な地形、地質構造などによって複雑な変形を受け、特に地盤構成の急変する部分での挙動は特異なものがあると考えられる。従来の地盤の地震応答解析では地震波は鉛直下方から入射するものと考えた1次元の解析が生であるが、地表面に沿った伝播性の短周期波動の観測例¹⁾もあり、このような波動に対する応答解析を行なうためには、不規則波形の伝播に関する2次元の解析が必要となる。そこで、この研究では地盤構成の急変部での短周期表面波の挙動に関する基礎的な検討を行なった。

2. 解析モデルとその振動特性

わが国の人口稠密地域は沖積平野に形造られたものが多いが、これらの沖積地帯の現在の堆積状態は必ずしも一様ではなく、その地下には埋没谷や埋没段丘などもあり、複雑な地質構成を示している。地下にある断層や段丘の発達と堆積との時間的、空間的關係は多様であろうが、結果として得られる地形を単純なモデルで表わせば、例えば図・1のようなものが考えられる。このような構成を持つ地盤に対して短周期の表面波が入射した場合の応答解析を目的として、以下においては図・2に示したようなモデル地盤を設定した。図中において、 ρ は密度、 c は横波の伝播速度である。座標軸(x, z)を図のように定め、波動の入射地点を $x=0$ とし、 $x=x_0$ には鉛直な不連続面、地表面からの深さが H_1 のところに水平な不連続面を設定した。また、以下においては波動の入射する側の地盤を地盤Ⅰ、屈折側を地盤Ⅱとする。地盤ⅠとⅡとは鉛直な不連続面から離れた地帯での運動の特性は同一であるから、いずれか一方について考えておけばよい。



図・1



図・2 モデル地盤

図・2 に示したモデル地盤を地表面に平行な方向に伝播する波動を SH 波と仮定する。このとき、地盤の運動は2次元の波動方程式で記述されるが、 μ をせん断弾性定数、 c を横波速度とし、表層および下層地盤内でのこれらの値に添字 1, 2 を付し、波数を k , 円振動数を ω とするとき、固有方程

式は次式で表わされる。

$$\tan \delta_1 H_1 \cdot \tan \delta_2 (H - H_1) = \frac{\mu_2 \gamma_2}{\mu_1 \gamma_1} \quad (1)$$

ただし, $\frac{\omega^2}{C_1^2} = \gamma_1^2 + \rho^2, \quad \frac{\omega^2}{C_2^2} = \gamma_2^2 + \rho^2 \quad (2), (3)$

H_1 および H はそれぞれ地表面からの表層下面ならびに下層下面までの深さである。

これらの式の解がそれぞれの地盤内での波動の伝播を特徴づけるが、式 (1) の解について検討すると、 γ_1 および γ_2 の組み合わせによって、伝播の形態には次の2種類のあることがわかる。

i) γ_1 と γ_2 が実数である場合

この場合の位相速度は下層の横波速度より大きい。また、波数 ρ が虚数となる場合には波動として伝播せず、したがって遮断周波数が存在し、それ以下の振動数の波動が地表面および下層下面の間で反射を繰り返して伝播し、 $z=H_1$ の不連続面ではその都度反射と屈折が生ずる。

ii) γ_1 が実数、 γ_2 が虚数である場合

表層の横波速度が下層のそれより小さい場合には、表層内では全反射を繰り返して伝播する波動となり、伝播の形態は Love 波と同様である。位相速度は表層と下層での横波速度の中間の値を取り、遮断周波数は存在しない。

次に固有モードについて検討する。地盤内の深さ方向に任意の震動分布を持つような波動の伝播を取り扱うためには、地盤 I, II での固有モードの直交性が保証されねばならない。いま、 n 次の固有モードを ϕ_j とすればそれは次式で与えられる。

$$\phi_j(z) = \begin{cases} \cos \gamma_{1j} z, & (0 \leq z \leq H_1) \\ \cos \gamma_{1j} H_1 \cdot \cos \gamma_{2j} (z - H_1) - \frac{\mu_1 \gamma_{1j}}{\mu_2 \gamma_{2j}} \cdot \sin \gamma_{1j} H_1 \cdot \sin \gamma_{2j} (z - H_1), & (H_1 < z \leq H) \end{cases} \quad (4)$$

この関数は $z=H_1$ では不連続であるので、

$$w(z) = \begin{cases} \mu_1, & 0 \leq z \leq H_1 \\ \mu_2, & H_1 < z \leq H \end{cases} \quad (5)$$

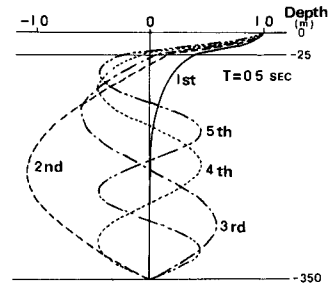
で定義される重み関数 $w(z)$ を用いることにより、

$$\int_0^H w(z) \phi_i(z) \phi_j(z) dz = 0 \quad (i \neq j) \quad (6)$$

となり、直交性が保証され、各振動数ごとに深さ方向に任意の分布形を持つ波動を表現できることになる。固有モードは振動数ごとに変化するが、その1例を図・3に示した。

鉛直な不連続面から x_0 だけ離れた地表に振幅が1である調和波が入射するとき、不連続面では反射と屈折が生じるが、その結果地盤 I と地盤 II 内で生じる振幅を U^I, U^{II} とし、波数を ρ 、円振動数を ω 、標準化した固有モードを $\phi(z; \omega)$ と表わし、モードに関して降下付き、地盤区分については肩付きの添字を用いれば次式が得られる。

$$U^I(x, z; \omega) = \phi_m^I(z; \omega) e^{i[\omega t - \rho_m^I(\omega) \cdot x]} + \sum_{j=1}^{\infty} A_j(\omega) \phi_j^I(\omega) e^{i[\omega t + \rho_j^I(\omega) \cdot x - \{\rho_j^I(\omega) + \rho_m^I(\omega)\} x_0]} \quad (7)$$



図・3 固有モードの例

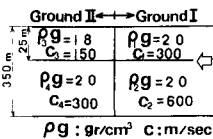
$$U^{\text{II}}(x, z; \omega) = \sum_{j=1}^{\infty} B_j(\omega) \phi_j^{\text{II}}(\omega) \cdot e^{i[\omega t - \phi_j^{\text{II}}(\omega) x + \{\phi_j^{\text{II}}(\omega) - \phi_m^{\text{I}}(\omega)\} z_0]} \quad (8)$$

上の式(7)の右辺第1項は入射波であり、地盤Ⅰの第m次の固有モードで入射した場合を表わしている。第2項は反射波であり、 $A_j(\omega)$ が第j次の反射係数である。また、式(8)の B_j は地盤Ⅱへの屈折係数である。不連続面で満足されるべき境界条件により上の A_j 、 B_j を定めれば解が求まるが、地盤Ⅰと地盤Ⅱとの連成の影響により、この解は数密には求められないが、不連続面での U^{I} と U^{II} の差の2乗が最小となるような規範²⁾を用いて A_j と B_j とを定めた。 $x=x_0$ における入射波のフーリエスペクトルが与えられれば、これを上の式(7)、(8)に束じた後、すべての振動数についての積分結果が入射波に対する時間応答を与える。したがって、 $t=0$ まで系が静止していた場合には不規則波形に対してもフーリエ変換の手法を用いて任意の場所での応答を求めることができる。

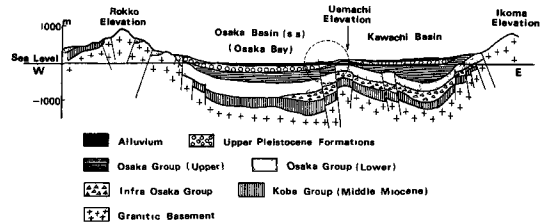
下層の下面には剛な基盤を設定したが、これは基盤が半無限の弾性体である場合には固有モードは有限個のLove波形のものになり、振動数や震動分布によつてこの系全体での震動エネルギーに過不足が生じ、したがって深さ方向に任意の震動分布をもする波形の伝播の問題を取り扱えなくなる場合が生じるからである。

3. 適用例

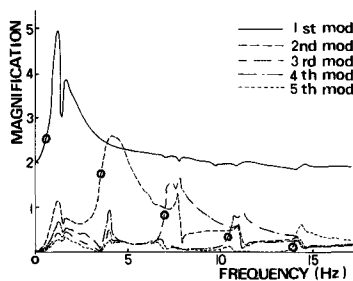
大阪平野は生駒山麓の西方に拡がっているが、大阪市内には図・4に示すように上町台地と呼ばれる中位段丘が縦貫しており、その地質は洪積層に相当し、台地の両側、特に西方にある沖積層に向つては急激に地質や地盤構成が変化する。この図中の実線で囲まれた部分を図・5のモデルに置換し、これを対象として数値計算を行った。こ



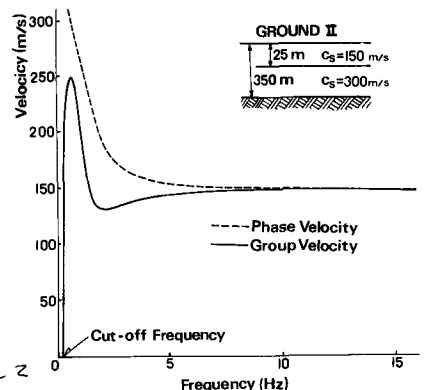
図・5 解析モデル



図・4 大阪地盤モデル³⁾



図・6 地盤Ⅱへの屈折係数



図・7 位相速度と群速度

このモデルにおいて、地盤Ⅰへの入射波をすべての振動数に対して地盤Ⅰの第1次の固有モードだけで表示した場合の、地盤Ⅱへの屈折係数 B_j を示したのが図・6である。したがって入射波はその振動数組成ごとと同図のような増幅を受けることを意味している。各モードごとに明瞭なピークが認められるが、これらはいずれも地盤Ⅱの表層の固有振動数に近い値である。また、各モードとも図中の○印より高振動数域はLove波形の伝播をすることが式(1)の根についての検討からわかる。

このモデルの地盤Ⅱ内における位相速度と群速度とを第1次のモードについて示したのが図・7で

ある。この例では遮断周波数があるため、群速度は極大値と極小値の両方を持ち、それぞれに対応する振動数は 0.61 Hz と 1.99 Hz である。

以上のような特性を有するモデル地盤に対する入射波としては、1968年に和歌山で記録された加速度波形⁴⁾を近距離地震の例として用いた。図・8はこの記録のEW成分を用いた場合の応答計算例を示したものである。数値計算に際しては解の同周期性の影響を除去するために40.94秒間を対象としたが最初の25秒間だけを示した。鉛直の不連続面から500m離れた地盤I内に上述の波形を入射し、ここから地盤IIの方向への距離を図中のXで表わしてある。また、図中のZは地表面からの深さであり、Z=25mは表層と下層の境界面である。

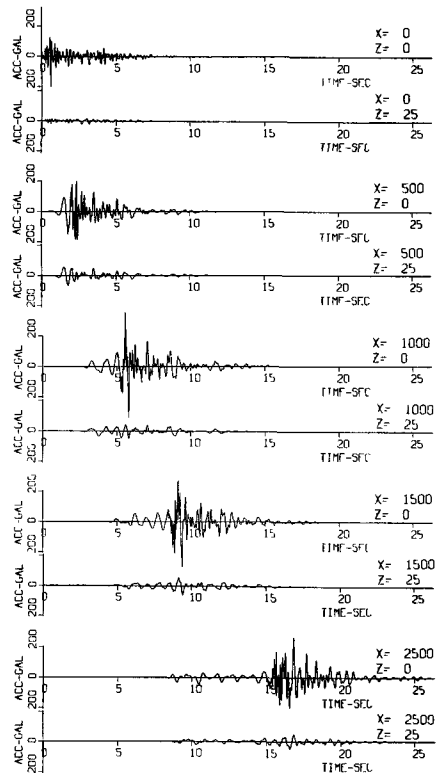
X=0での波形の約4秒程度から後には地盤IとIIとの不連続面からの反射波が重なっており、X=500mである不連続面上ではやや振幅が増大している。不連続面から500m (X=1000) 離れた地盤IIではその振幅が大きく増幅されており、最大加速度に関してはX=0での最大値に対する増幅率は1.86に達している。しかし、不連続面から2000m (X=2500) 離れた地盤では振幅がやや減少しており、このように地盤条件の急変する場合には特に軟かい地盤側では特異な挙動をし、大きな増幅作用を受けることがわかる。また、地表面(Z=0)と表層下面(Z=25m)での波形を比較することにより、このような増幅作用はほとんど表層内で生じており、波動は表層内で全反射を繰り返しながら表層の横波速度よりやや速い速度で伝播していることがわかる。また、表層下面に対する地表面での振幅の比はX=1000mでは最大加速度に関しては7.0に達しており、1次元解析によるものより大きな増幅率を示している。

4. あとがき

ここで取り扱ったような問題を実際の地震記録により検討するためには、相互の時間的な関係が対比できるような複数の地震記録が必要であるが、特別な例外を除いてはこのような記録はほとんど得られていない。強震記録の持つ情報をより詳細に、かつ立体的に引き出すためにも、記録相互の時間的な関係を定めるためのシステムの確立されることが望まれる。

参考文献

- 1) 桧垣彰雄, 高橋忠, 栗原千鶴子, 矢島浩: 第3回日本地震工学シンポジウム論文集, 1970, pp 429~436
- 2) Alsop, L.E.: Journal of Geophysical Research, Vol. 71, No. 16, 1966, pp. 3969~3984
- 3) Ikebe, N. and Takenaka, J.: Journal of Geosciences, Osaka City Univ., Vol. 13, Art. 4, 1970, p. 81.
- 4) 土田 肇, 倉田栄一, 須藤克子: 港湾技術研資料 NO. 98, 1970.



図・8 応答計算例(図・5のモデル)