

(80) 確率論手法による地震波の入力損失の効果の検討

清水建設(株)研究所 正会員 石井 清

§1 はしがき

地震はもともと波動現象であり、地震時に基礎に接する地盤の動きは必ずしも同位相ではない。特に基礎側面においては、基礎底面と地表面との間で地動は位相のみならず、その振幅や周波数特性を大きく変化させる。そして、そのような地動の位相差や振幅差を比較的に基礎版が拘束することにより、基礎版は入力地震波に対して一種のローパスフィルターの効果を有することになる。このような効果は“地震波の入力損失”と呼ばれ、既往の幾々の実測資料によりそのような効果が存在することが確認されている。

地震波の入力損失の効果は、基礎の平面寸法が大きくなるほど、また、基礎の根入れ深さが深くなるほど顕著になる。特に、著者らによる最近の実測資料による検討結果によると、基礎の根入れ深さによる影響が支配的であると思われる。また、サイト特有の地質構造学的な特性なども影響している。

本研究では、入力損失の効果についての理解を深めることを目的として現象を巨視的に捉えられるような簡単な数学モデルを用いて入力損失の効果を検討する。また本研究の特徴として従来の研究の多くが波動伝播による2地真向の地動の位相ずれのみに着目していたのに対して、地動に本来含まれているであろう不確定な要因による相関自体のばらつきを考慮に入れてみた。そして、この考え方を取入れるために次に述べるような確率モデルを用いている。すなわち異なる2地真向の地動の特性として構造物の真下より鉛直方向に入射するせん断波を模擬し、深さ方向にはせん断波動としての位相ずれをもち、かつ2地真向の距離および振幅数に比例してその相関が小さくなるモデルとした(基礎底面における波動は位相ずれを持たず、その振幅のみが変動する)。具体的には、この特性は振幅数領域において2地真向の相関度を表わす“相互スペクトル”により定義され、解析に導入されている。基礎の動きは、この地動を基礎-地盤の接触面にわたって平均化することによって与える。

ところで、この研究と同じアプローチをとっている既往の研究として、風荷重に対する構造物の動的応答を検討した Davenport の研究がある。同研究では、空カドミッタンスという一種のばねを用いて風速を風圧に直し、微小面積の風圧を受圧面全体で積分平均化することにより、構造物に作用する風圧を求めた。ここで、個々の微小面積に作用する風圧は確率変数であり、かつ相互にある相関を有している。この場合にも相関が小さい高周波成分は相互に相殺し合い、実際に構造物全体に作用する風圧は一種のローパスフィルターを受けたのと同様の効果をもつことになる。この考え方は基礎版による地震波の入力損失の効果と同じものである。また、波浪に対する海洋構造物の応答などにも同様の現象が見られるのではないだろうか。また、地震工学では上記の研究にはまったく言及していないが、松島が地動を確率モデルにおよび次元の基礎の入力損失の効果を検討している。本研究は、松島の研究の拡張として位置づけられるが、基本的には Davenport の考え方をとり入れて、風荷重を地動に変えたところが一つの特徴となっている。

§2. 異なる2地真の地動の特性

§1では異なる2地真の地動には統計的なばらつきがあることを指摘した。この点についてまず考察してみよう。ここで、深さ方向に異なる2地真の地動の特性は鉛直アレーの地中地震観測結果より多くの知見が得られていることから、水平面内の地動の特性について言及する。図-1は、表層10mのせん断波速度が21.5m/sec.という軟弱地盤中GL-5.2mに15mおきにならべられた3地真の地震観測波形の一例である。図からは同相の長い成分はおおむね同位相であるが、短周期成分にははっきりした位相ずれがみられることがわかる。また、波形の最大値も1.7galから2.9galと相当に大きな開きがある。次の事例を図-2に示す。図-2は距離が40mおよび78.5m離れた硬質地盤の地動の観測波形である。この場合、記録を見る限り、短周期成分の

わずかな位相ずれ、振幅差といったものを除けば全体的にはほぼ同位相、同振幅の波動と言えよう。しかしながら、この場合についても周波数領域における統計処理の結果からは、2地真間の地動について明確な差異を見出すことができない。ここでは、距離が40m離れた場合の地動の相関性を示す。相関性は伝達速度関数(コヒーレンス)と位相角により示めされており、個々のデータの結果からは統計的な特性が理解しにくいために9地震、各水平2成分18波の平均値として表示した。なお、2地真間の地動の相関を示す統計量としては他に伝達速度関数(スペクトル比)があるが、地形の大きな変化や大きな不整層がなければ基礎面下でスペクトル自体が大きく変わるということは考えにくいことから、ここでは計算値を示していない。

ここで、伝達速度関数 $\gamma_{x_i x_j}^2(f)$ は次式で定義される関数である。

$$\gamma_{x_i x_j}^2(f) = |G_{x_i x_j}(f)|^2 / \{G_{x_i}(f) G_{x_j}(f)\} \quad (1)$$

$G_{x_i}(f)$ および $G_{x_j}(f)$ はそれぞれ2地真の地動 $x_i(t)$ および $x_j(t)$ のパワースペクトル、 $G_{x_i x_j}(f)$ は $x_i(t)$ 、 $x_j(t)$ の相互スペクトルである。 $\gamma_{x_i x_j}^2(f)$ は直感的には振動数 f ごとに $x_i(t)$ と $x_j(t)$ との相関性を表わしていると考えてよく、2確率変数の場合に定義される相関係数の2乗と類似のものである。

図-3は異なる2地真の地動の相関性を示す一般的な特性を示していると考えられることから以下に簡単な考察を記す。

図-3の特性はその特徴からおおよそ次の3つの領域に分けて考えることができる。すなわち、0~2Hz、2~5Hz、5~10Hzの3つの領域である。0~2Hzの領域では位相角は平均的に見ればほぼ0であるが、伝達速度関数は振動数が低くなるに従って小さくなる。これは地震計に固有振動数5Hzの振子を用いているために0.5Hz以下では地震計自体の感度あるいは相対感度といったものが幾分問題となってくること、また、地動に含まれる成分自体がこの領域になると少くなることと関係しよう。このため、実際

の特性としては次の2~5Hzの特性に近いものと考えられる。2~5Hzの領域では、位相角はほぼほとんどなく、伝達速度関数のみが振動数に逆比例して小さくなる。伝達速度関数の平均は2Hzでほぼ1.0のものが5Hzでは約0.8と小さくなり、その標準偏差も2Hzでほぼ0のものが5Hzでは約0.2になっている。この傾向は、振動数に比例してデータ間の相関が小さくなり、ばらつきが大きくなるという常識的なものである。5~10Hzの領域では伝達速度関数の平均は0.4~0.8までばらついており、その標準偏差も0.3程度になる。位相角は0に近いが、2~5Hzの領域に比べればそのばらつきが大きくなり、標準偏差は45°程度にまでなっている。この領域での特徴は2~5Hzとの比較において、ばらつきが大きくなり相関も小さくなるが、振動数への依存性が小さいことである。また、距離78.5mの結果はここでは示していないが、その特性は相関自体

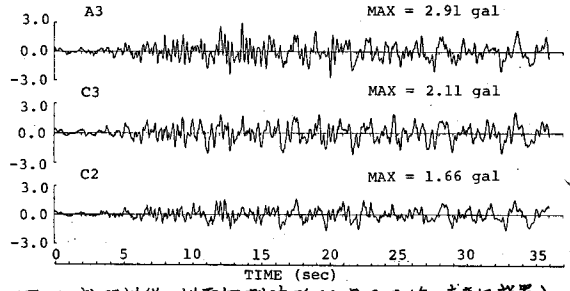


図-1 軟弱地盤の地震観測波形(A,B,Cは15mおきに設置)

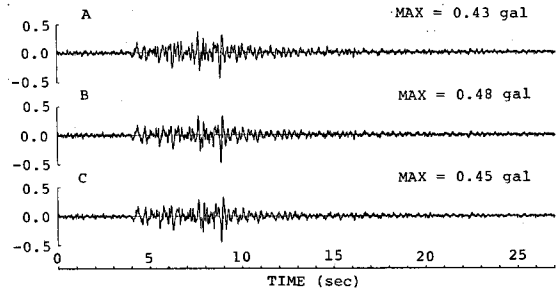


図-2 硬質地盤の地震観測波形(AB間40m, BC間38.5m)

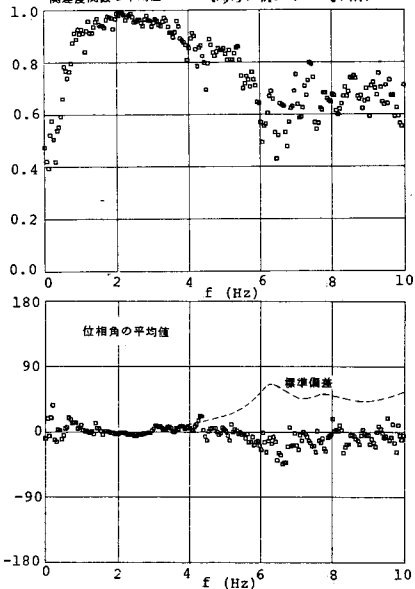


図-3 硬質地盤の観測波形A,B間の伝達速度関数と位相角

が距離40mの場合と比べて幾分小さくなることを除けば上述の特性とほぼ同様である。

上記の特性は相当に複雑であるが、その特性の一部をとり解析にのせることは容易であろう。本研究の解析モデルでは2~5 Hzの特性を2地盤間の地動の一般的性質と考えモデル化する。

§3 確率入力地動に対する入力損失の効果の定式化

基礎の解析モデルとして3次元矩形基礎を考える。座標は直角座標でとり、XYを平面として、深さ方向をZとする。基礎は平面的には(L₁), (L₂)を2辺とする矩形であり、埋込み深さを(L₃)としている。

剛体基礎の動き $\ddot{u}(t)$ は地動 $\ddot{u}_0(x, y, z, t)$ を基礎-地盤の接触面Sにわたって積分、平均化することによって与えられる。すなわち、

$$\ddot{u}(t) = \int_S \ddot{u}_0(x, y, z, t) ds \quad (2)$$

$\ddot{u}(t)$ の自己相関関数 $R\ddot{u}(\tau)$ は

$$R\ddot{u}(\tau) = E\{\ddot{u}(t)\ddot{u}(t+\tau)\} = \frac{1}{S^2} \sum_{i=1}^5 \sum_{j=1}^5 \iint E[\ddot{u}_0(x_i, y_i, z_i, t)\ddot{u}_0(x_j, y_j, z_j, t+\tau)] ds_i ds_j \quad (3)$$

となる。(3)式では地盤-基礎の接触面を側壁、底面の5つの領域に分けている。これをフーリエ変換すれば、

$$G\ddot{u}(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} R\ddot{u}(\tau) e^{-i\omega\tau} d\tau = \frac{1}{S^2} \sum_{i=1}^5 \sum_{j=1}^5 \iint G(x_i, y_i, z_i, x_j, y_j, z_j, \omega) ds_i ds_j \quad (4)$$

が得られる。ここで、 $G(x_i, y_i, z_i, x_j, y_j, z_j, \omega)$ は2点 (x_i, y_i, z_i) と (x_j, y_j, z_j) との地動の相互スペクトルである。また、相互スペクトルをここでは次のように定義する。

$$G(x_i, y_i, z_i, x_j, y_j, z_j, \omega) = e^{-\alpha(|x_i-x_j|+|y_i-y_j|+|z_i-z_j|)} \cos\beta(L_3-z_i)\cos\beta(L_3-z_j) G\ddot{u}_0(\omega) \quad (5)$$

ここで、 $\alpha = (a + b\omega)/V_s$, $\beta = \omega/V_s$ と与えられ、 ω は円振動数、 V_s は基礎周辺の地盤のせん断波速度、 a , b は実測データより推定される定数である。(4)式の相互スペクトルは、地動を構造物の真下より入射するせん断波動としてモデル化したものであるが、2地盤間の距離あるいは振動数に応じて相関は小さくなり、深さ方向では位相ずれをもつ。(5)式を(4)式に代入して区画積分をくり返せば結果は陽形式で示すことができる。結果は参考文献2)にゆずるが、地盤と基礎との伝達関数は結局、 $G\ddot{u}(\omega) = |H(\omega)|^2 G\ddot{u}_0(\omega)$ と与えられ、 $|H(\omega)|$ が入力損失フィルターに相当する。また、パラメータ a , b については、2, 3の地震観測資料の検討より $a=0$ としたとき $b=0.2\sim 0.4$ 程度の値としようことがわかった。また、実在構造物の基礎/地盤の伝達関数に対する上記解析解の一致度は0.05~0.25の中では0.15程度の値が比較的良好いとわかったので、この値を以下の検討では用いている。

§4 大型地下タンクの実測結果との対応

本解析モデルの適用性を検討するために参考文献5)で検討した大型地下タンクの実測資料について検討する。大型地下タンクは直径67.9m、埋込み深さ24.5mの円筒形RC構造物であり、周辺地盤の平均せん断波速度 V_s は側面で163m/sec、底面で380m/secである(以下の計算では $V_s=163$ m/secとしている。) 図-4に基礎/地盤の伝達関数における実測結果と解析解との対応を示す。ここで、実線が実測結果、細線・破線が解析解であり、 b の値をかえてある。また、解析モデルは矩形基礎であることから、底面寸法は等価面積置換により円形を正方形に置換した。図からは解析解が実測解の特徴をおおまかではあるが十分とらえてあることがわかる。また解析解の2 Hzおよび5.2 Hzのノードは地動のモデルとして鉛直方向にせん断波動としての位相ずれを与えたため出現したもので、 b

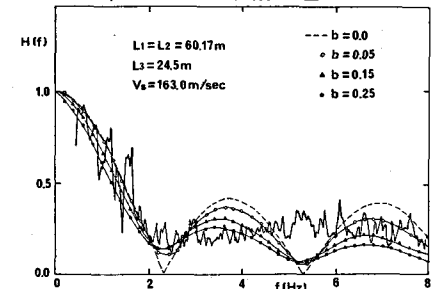


図-4 大型地下タンクの基礎/地盤の伝達関数

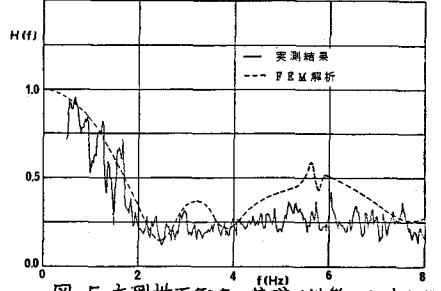


図-5 大型地下タンクの基礎/地盤の伝達関数

= 0.0すなわち地動の統計的ばらつきを見込まないモデルでは地動の完全な相殺によってノードはゲイン0となってしまう。これは実際の現象にも適合する確率論手法の特長の一つである。なお、図-5にはFEM解析による入力損失の効果のシミュレーション解析結果を示すが、このモデルの一致度と比較しても上記の結果はけっして劣っていない。巨視的には現象を正しくとらえていると言えよう。

5. 数値解析例とその考察

以下パラメータスタディにより入力損失の効果について検討する。

(A) 基礎底面と側面の奇奇率について

基礎の埋込み深さ L_3 をパラメータとして入力損失フィルターを計算する。ここで、他のパラメータは図中の値に固定した。結果を図-6に示す。図からは次のことが考察できる。①埋込みがない場合すなわち $L_3=0$ mのときの入力損失の効果は割合に小さいものである。②これに対して基礎が埋込みをもつと入力損失の効果は相当に強くなる。入力損失の効果に対するこの急激な増加は、側面による接地面積の増大にもよるが、側面のせん断波動としての地動の位相ずれが大きく効いているようである。③また、埋込み深さを増すと入力損失の効果は漸次、増えていくが埋込み深さと基礎幅との比(L_3/L_2)が0.5以上になると、埋込み深さによる入力損失フィルターの形状の変化は相対的に小さくなる。

また、図-7には5.4で検討した大型地下タンクについて底面だけによる入力損失の効果と底面と側面の両方を考慮した場合の入力損失の効果を示す。底面のみの場合と比べ側面をも考慮した場合には入力損失の効果が相当に強くなること、また、側面の効果は伝達関数の第1ノード(2 Hz)まででその効果が非常に強く出まいることがわかる。

(B) 基礎底面において生じる入力損失の効果について 基礎の底面を正方形($L_1=L_2$)としてその長さをパラメータとし、 $L_3=0.0$ m、 $V_s=200$ m/secとした。結果を図-8に示す。計算結果からは底面だけによる入力損失の効果が比較的小さいことがわかる。基礎が40mでは10 Hzにおいてもそのゲインは0.6程度にしかならず、80mでやっと0.4程度にまで落ちる。なお、この解析解は実在構造物の入力損失の効果に比べて幾分小さいようである。これにはモデルの相互スペクトルが同一平面では位相ずれを持たないことなどが関係しているよう。

5.6 あとがき 本研究では簡単な数学モデルを用いて入力損失の効果を検討した。モデルは簡単なものであるが、実測結果との対応も比較的良く、地動に対する把握が巨視的には正しいことがわかった。最後に、本研究についてのアイデアをいただき、そのまとめ方についても種々の御指導をいただいた武蔵工業大学 星谷 勝教授に感謝を表したい。また、使用をゆらさ小地震観測資料について関係者のみなさまに感謝する。

参考文献 1) 石井, "実測資料に基づく入力損失フィルターの提案", 清水建設研究所報 Vol. 33 (1980), 2) 石井, "確率論手法による地震波の入力損失の検討", 清水建設研究所報, Vol. 34 (1981), 3) Davenport, A.G. "Gust Loading Factors", ASCE, ST3, (1967), 4) Matsushima, Y., "Spectra of Spatially Variant Ground Motions and Associated Transfer Functions of Soil-Foundation System", 第4回日本地震工学シンポジウム(1975), 5) 石井, 山原, 高木, "大型地下タンクの实測記録による地震波の入力損失の検討", 第35回国土学会年次講演会, (1980)

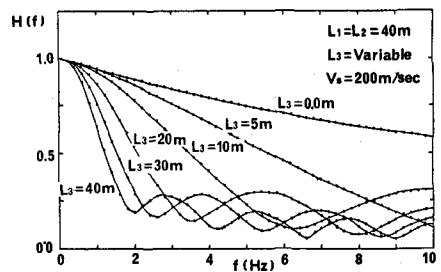


図-6 埋込み深さによる基礎/地盤の伝達関数の変化

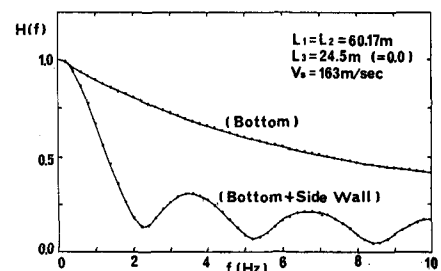


図-7 基礎/地盤の伝達関数(大型地下タンク)

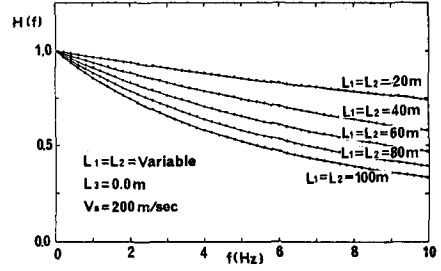


図-8 底面による基礎/地盤の伝達関数