

確率論手法による地震波の入力損失の検討

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。特に基礎の側面土においては、基礎底面と地表面との間で地動は位相差のみならず、その振幅特性や周波数特性をも大きく変化させる。そして、そのような地動の位相差や振幅差を比較的剛な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¹⁾、既往の幾多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²⁾。

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²⁾³⁾、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とも考えられる。

本研究では、簡単な数学モデルにより入力損失の効果をとらえ、そのモデルを用いて以下の項目について検討を加える。すなわち、

①入力損失の効果に対する基礎の底面および側面の寄与率についての検討、および

②埋込みがない場合に、基礎底面において生じるであろう入力損失の効果をつかむこと、
の2点である。

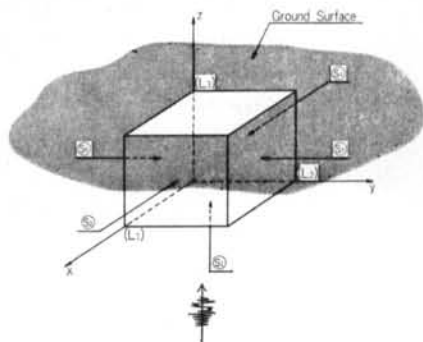
また本研究の特長として、従来の研究の多くが波動伝播による2地点間の地動の位相ずれのみに着目していたのに対して、地動に本来含まれているであろう不確定な要因による相関自体のばらつきをも考慮に入れてみた。そして、この考え方を取入れるために次に述べるような確率モデルを用いた。すなわち、異なる2地点の地動の特性として構造物の真下より鉛直方向に入射するせん断波を模擬し、深さ方向にはせん断波動としての位相ずれをもち、かつ2地点間の距離および振動数に比例してそ

の相関が小さくなるモデルとした(底面における波動は位相ずれはもたず、その振幅のみが変動する)。具体的には、この特性は振動数領域において2地点間の地動の関連度を表わす“相互スペクトル”により定義され、解析に導入されている^{9)~11)}。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られる。このモデルは単純ではあるが、上記の項目を定性的に検討することはできよう。

§ 2. 確率入力地動に対する入力損失の効果の定式化

いま、図—1に示すような3次元の矩形基礎を考える。座標は直角座標でとり、 x 、 y を平面として深さ方向を z としている。基礎は平面的には L_1 、 L_2 を2辺とする矩形であり、埋込み深さを L_3 とする。

ここで、入力損失の効果을正確に算定するためには、地盤と基礎の接触面を自由表面として求めた地動を、この接触面全体にわたって積分、平均化すればよい。しかしながら、波動理論に基づく純解析的なアプローチでは図—1のような鉛直、水平2つの境界条件を満足するような解を得ることは困難である⁹⁾¹⁰⁾。また、FEMなどの数値解析法を取入れた半解析的なアプローチでは解が



図—1 矩形基礎モデル

煩雑となり、本研究のねらいである確率論的な考え方をさらに導入するには無理がある¹¹⁾¹²⁾。このことから、本研究では以下に示すように地動のモデルとして、より単純なモデルを考えて検討を試みることにした。モデル自体は地動の波動モードを考え、基礎底面下でこの波動を積分、平均化するという山原のモデル¹⁾に近いものである。

以下に定式化を示す。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り与えられる。すなわち、

$$\ddot{u}(t) = \frac{1}{S} \int_S \ddot{u}_0(x, y, z, t) ds \quad \dots\dots(1)$$

ここで、基礎—地盤の接触面 S を 図-1 に示すように 5 つの面にわければ、

$$\ddot{u}(t) = \sum_{i=1}^5 \int_{S_i} \ddot{u}_0(x, y, z, t) ds_i \quad \dots\dots(2)$$

$\ddot{u}(t)$ の自己相関関数 $R_{\ddot{u}}(\tau)$ は⁴⁾⁵⁾、

$$R_{\ddot{u}}(\tau) = E[\ddot{u}(t)\ddot{u}(t+\tau)] \quad \dots\dots(3)$$

$$= \frac{1}{S^2} \sum_{i=1}^5 \sum_{j=1}^5 \int_{S_i} \int_{S_j} E[\ddot{u}_0(x_i, y_i, z_i, t) \ddot{u}_0(x_j, y_j, z_j, t+\tau)] ds_i ds_j \quad \dots\dots(4)$$

で与えられる。これをフーリエ変換すれば⁴⁾⁵⁾、

$$G_{\ddot{u}}(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} R_{\ddot{u}}(\tau) e^{-i\omega\tau} d\tau \quad \dots\dots(5)$$

$$= \frac{1}{S^2} \sum_{i=1}^5 \sum_{j=1}^5 \int_{S_i} \int_{S_j} \left\{ \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} E[\ddot{u}_0(x_i, y_i, z_i, t) \ddot{u}_0(x_j, y_j, z_j, t+\tau)] e^{-i\omega\tau} d\tau \right\} ds_i ds_j \quad \dots\dots(6)$$

$$= \frac{1}{S^2} \sum_{i=1}^5 \sum_{j=1}^5 \int_{S_i} \int_{S_j} G(x_i, y_i, z_i, x_j, y_j, z_j, \omega) ds_i ds_j \quad \dots\dots(7)$$

となり、基礎の動き $\ddot{u}(t)$ のパワースペクトルが得られる。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) における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。

$$G(x_i, y_i, z_i, x_j, y_j, z_j, \omega) = e^{-\alpha(|x_i-x_j|+|y_i-y_j|+|z_i-z_j|)} \cos \beta(L_3-z_i) \cos \beta(L_3-z_j) G_{\ddot{u}_0}(\omega) \quad \dots\dots(8)$$

ここで、 $\alpha = (a+b\omega)/V_s$ 、 $\beta = \omega/V_s$ で与えられ、 ω は円振動数 (rad/sec)、 V_s は基礎周辺地盤のせん断波速度 (m/sec)、 a 、 b は実測データより推定される定数、 $G_{\ddot{u}_0}(\omega)$ は地動のパワースペクトルである。

式(8)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点間の距離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ようにした。

式(8)を式(7)に代入して区間積分をくり返せば、以下の結果を得る。

$$G_{\ddot{u}}(\omega) = \frac{1}{S^2} (A_1 A_2 C_3 + 2A_2 A_3 + 2A_1 A_3 + 4B_1 A_2 B_3 + 4A_1 B_2 B_3 + 8B_1 B_2 A_3 + 2C_1 A_2 A_3 + 2A_1 C_2 A_3) G_{\ddot{u}_0}(\omega) \quad \dots\dots(9)$$

ここで、 $S = L_1 L_2 + 2L_2 L_3 + 2L_1 L_3$

$$A_1 = 2(L_1 \alpha + e^{-L_1 \alpha} - 1) / \alpha^2 \quad A_2 = 2(L_2 \alpha + e^{-L_2 \alpha} - 1) / \alpha^2$$

$$B_1 = (1 - e^{-L_1 \alpha}) / \alpha \quad B_2 = (1 - e^{-L_2 \alpha}) / \alpha$$

$$C_1 = e^{-L_1 \alpha} \quad C_2 = e^{-L_2 \alpha}$$

$$A_3 = \frac{\alpha}{\beta(\alpha^2 + \beta^2)} (\sin \beta L_3 \cos \beta L_3 + \beta L_3) - \frac{1}{(\alpha^2 + \beta^2)^2} (\alpha^2 + \alpha^2 \cos^2 \beta L_3 - \beta^2 \sin^2 \beta L_3) + \frac{2\alpha}{(\alpha^2 + \beta^2)^2} e^{-\alpha L_3} (\alpha \cos \beta L_3 - \beta \sin \beta L_3) \quad \dots\dots(10)$$

$$B_3 = \frac{1}{(\alpha^2 + \beta^2)} \cos \beta L_3 (\alpha \cos \beta L_3 + \beta \sin \beta L_3 - \alpha e^{-\alpha L_3})$$

$$C_3 = \cos^2 \beta L_3$$

地盤と基礎との伝達関数は、

$$G_{\ddot{u}}(\omega) = |H(\omega)|^2 G_{\ddot{u}_0}(\omega) \quad \dots\dots(1)$$

より得られ、 $|H(\omega)|$ が入力損失フィルタに相当する。

式(9)は非常に煩雑な式であるが、特別な場合を考えればより簡単な式となる。いくつかの例を以下に示す。

(a)底面が正方形の場合 ($L_1=L_2$)

$$G_{\ddot{u}}(\omega) = \frac{1}{S^2} (A_1^2 C_3 + 4A_1 A_3 + 8A_1 B_1 B_3 + 8B_1^2 A_3 + 4A_1 C_1 A_3) G_{\ddot{u}_0}(\omega) \quad \dots\dots(2)$$

(b)埋込みがない場合 ($L_3=0$)

$$G_{\ddot{u}}(\omega) = \frac{1}{S^2} (A_1 A_2) G_{\ddot{u}_0}(\omega) \quad \dots\dots(3)$$

式(3)は星谷による定式化と一致する¹³⁾。さらに1次元のときは松島の定式化となる⁹⁾。

(c)平面2次元問題 (x, z 平面) とした場合

S_2 と S_4 平面を無視するとともに、相互スペクトルより y_i, y_j の項をおとし、単位の奥行をとれば $A_1=1$ となり次式を得る。

$$G_{\ddot{u}}(\omega) = \frac{1}{L^2} (A_2 C_3 + 2A_3 + 4B_1 B_3 + 2C_2 A_3) G_{\ddot{u}_0}(\omega) \quad \dots\dots(4)$$

ここで、 $L=2L_3+L_1$

§ 3. 実測資料による異なる2地点の地動の特性

式(9)~(11)により3次元剛体基礎モデルに対する入力損失の効果が表わされるが、その結果の妥当性は式(8)に示めされる異なる2地点の地動の相互スペクトルの評価に大きく左右される。ここではモデルをより信頼性の高いものにするために、2地点間の地動の関連度を実測資料より検討してみよう。また、その中で式(8)のパラメータの確定していない $\alpha=(a+b\omega)/V_s$ についても考察してみたい。なお、式(8)において地動の性質として、深さ方向にせん断波動としての位相ずれを与えるということに

ついては問題がないと思われることから、ここでは平面的に離れた2地点の地動の関連度についてのみ考察を行なう。

まず、硬質地盤の観測波形について検討する。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。記録を見るかぎり、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、同振幅の波動といえよう。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みれば、2地点間の地動について明確な差異を見出すことができる。

図-3および図-4に、それぞれ距離が40m および

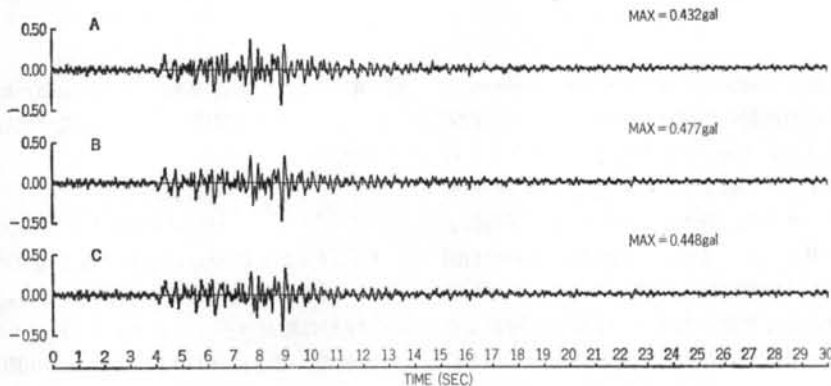


図-2 硬質地盤上の地震観測波形 (A, B, Cは同一平面の直線アレー上にあり、距離はAB間が40m, AC間が78.5mである)

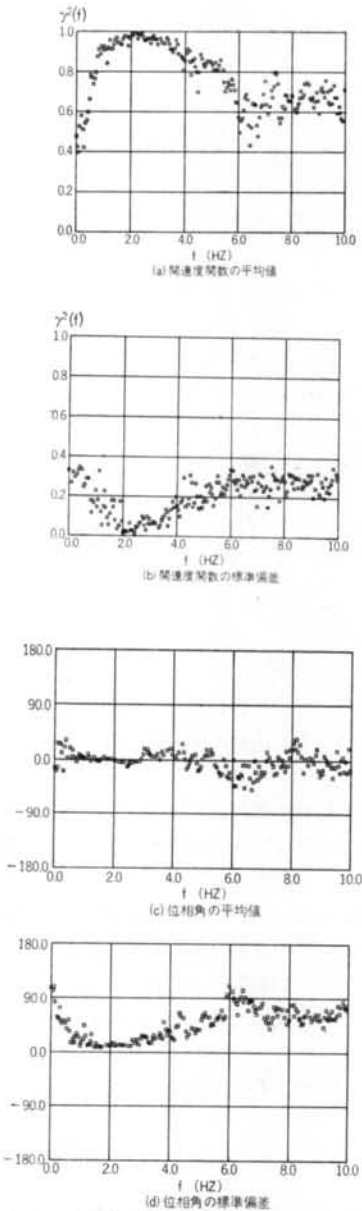


図-3 異なる2地点の地動の相関性(硬質地盤, $L=40\text{m}$)
 78.5m離れた場合の地動の相関度を示す。ここで、相関度は関連関数(コヒーレンス)と位相角により示されており、個々のデータの結果からは統計的な特性が理解しにくいために、9地震、各水平2成分18波の平均値と標準偏差として表示した。なお、2地点間の地動の相関を示す統計量としては他に伝達関数(スペクトル比)があるが、地形の大きな変化や大きく不整層な地層がなければ基礎の底面下ではこれが大きく変わるといことは考えにくいことから、ここではこれについては言及しない。

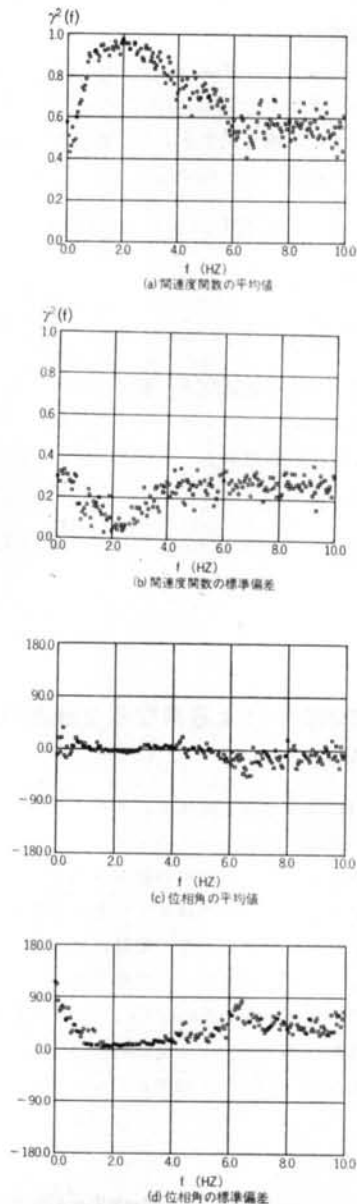


図-4 異なる2地点の地動の相関性(硬質地盤, $L=78.5\text{m}$)
 ここで、関連関数 $\gamma^2(f)$ は次式で定義される関数である³⁾。

$$\gamma_{x_i x_j}^2(f) = \frac{|G_{x_i x_j}(f)|^2}{G_{x_i}(f)G_{x_j}(f)} \quad \dots\dots(19)$$

$G_{x_i}(f)$ および G_{x_j} はそれぞれ2地点の地動 $x_i(t)$ および $x_j(t)$ のパワースペクトルであり、 $G_{x_i x_j}(f)$ は $x_i(t)$ と $x_j(t)$ 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 $x_j(t)$ との相関度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。またその値は1入力、

1 出力をもつ理想的な定係数線形系の場合に1, 完全に無相関では0となり, 通常は0から1の間の値をとる。

図-3からは, 距離 $L=40\text{m}$ の場合について以下の考察ができる。

①各グラフの特徴から振動数領域は, 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, ㉔ $0\sim 2\text{Hz}$, ㉕ $2\sim 5\text{Hz}$, ㉖ $5\sim 10\text{Hz}$ の3つの領域である。

② $0.0\sim 2.0\text{Hz}$ の領域㉔では振動数 $f=2\pi\omega$ が低くなるに従い関連度関数は小さくなり, その標準偏差も0.3程度になっている。また, 位相角は平均的にはほぼ0であるが, その標準偏差は1Hz以下で急に大きくなっている。これは地震計の固有振動数に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, あるいは地震計相互の相対感度, 相対位相といったものが幾分問題となってくるためと考えられる。また, 地動に含まれる成分自体がこの領域になると少なくなることも理由になろう。このため, 実際の地震の特性としては次の㉖の特性に近いものと考えられる。

③ $2.0\sim 5.0\text{Hz}$ の領域㉕では, 位相ずれはほとんどなく, 関連度関数のみが振動数に逆比例して小さくなっている。関連度関数の平均は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, ばらつきが小さくなるという常識的なものである。

④ $5.0\sim 10\text{Hz}$ の領域㉖では関連度関数の平均は0.4~0.8までにばらついており, その標準偏差も0.3程度になる。位相角は平均的には0に近いが, 領域㉕に比べればそのばらつきは大きくなり, 標準偏差は 45° 程度になっている。この領域での特徴は, 領域㉕に比べ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。

さらに, 図-3と図-4の比較により距離による影響について以下のことが考察できる。

①図-4(距離 $L=78.3\text{m}$)の場合の全体の傾向は $L=40\text{m}$ の場合と良く似ている。しかし, 相関度自体は $L=40\text{m}$ と比べ小さくなっていく。例えば領域㉕は $L=40\text{m}$ では $2.0\sim 5.0\text{Hz}$ であったものが $2.0\sim 4.0\text{Hz}$ と狭くなっており, 関連度関数の平均値も $L=40\text{m}$ では約0.8であったものが $L=78.5\text{m}$ では0.6に下がっている。また, 位相角のばらつきもふえ, その標準偏差は4Hz以上で約 60° にまでなっている。

次に, 表層の地盤厚10mがせん断波速度 21.5m/sec という, 軟弱地盤の地震観測資料について検討してみたい⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾(図-7参照)。

図-5は, 地盤GL-5.3mに15mおきに並べられた3地点の地震観測波形の1例である。図-5からは, 周期の長い成分波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分かる。また, 波形の最大値も1.7galから2.9galと大きな開きがある。図-6は, 15m離れた地動の相関度を図-3および図-4と同様の方法で示したものである(標準偏差については省略している)。

結果は硬質地盤の結果と比べて振動数が低いところからばらつきが大きくなるといった傾向がみられるが, その特徴が大きく3つの振動数領域に分けられることは硬質地盤と同様である。すなわち, 振動数はその特性から $0.0\sim 0.5\text{Hz}$ の領域㉔, $0.5\sim 1.0\text{Hz}$ の領域㉕, また $1.0\sim 5.0\text{Hz}$ の領域㉖の3つに分けられ, それぞれの特性は硬質地盤のそれと変りない。

上記の2つの事例より, 地盤において異なる2地点で観測される地震動の相関性について定性的な傾向をおお

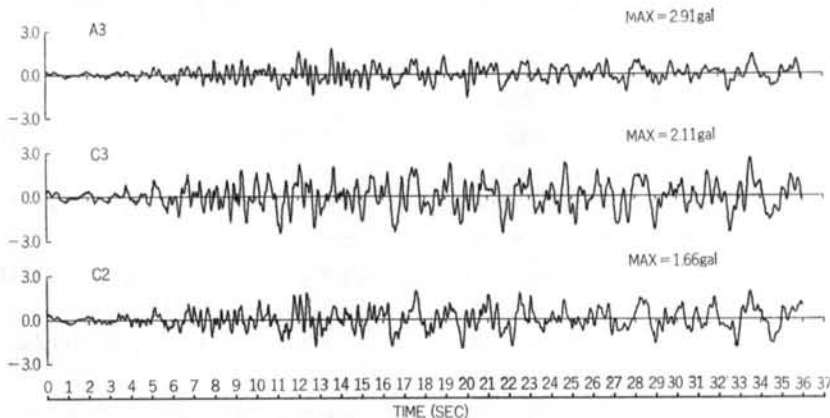
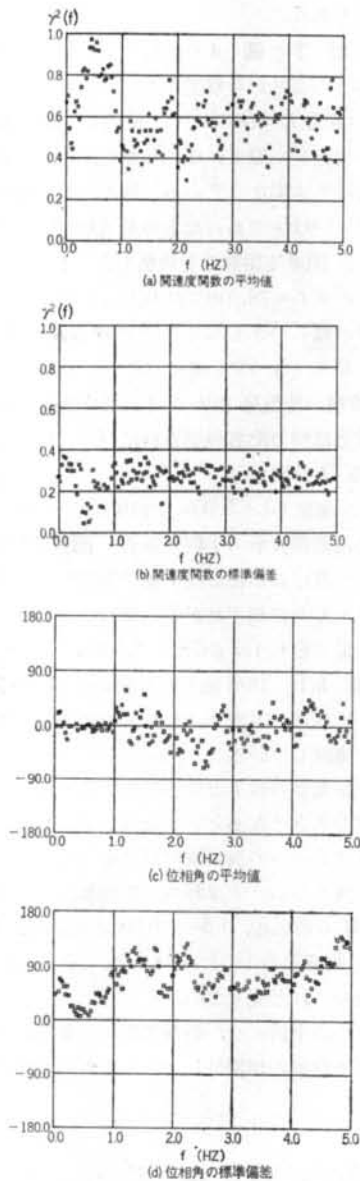


図-5 軟弱地盤上の地震観測波形(15mずつ離れた同一平面の直線アレーによる)



図一6 異なる2地点の地動の相関性(軟弱地盤, $L=15$ m)
 よそつかむことができる。しかし、これらの実測資料より得られた2地点間の地動の統計的な性質は、それ自体大変複雑であり、モデル化は容易ではない。たとえば、その特性には上述の例に示されるように地盤、2地点間の距離といった大きなファクターが入るし、その他にも地震の規模(マグニチュード)、震央距離、途中の伝播経路などによる地震の波動特性の相異、また地形、地質、隣接構造物の有無などの多くの要因が関係している。また、その特性は振動数の関数でもあり、特に領域④ではばらつきが大きいことから位相ずれなどは確率変

数として取扱う必要があるのかも知れない。

ここでは資料を示していないが、2地点のパワースペクトルは同一の形をしているわけではなく、この点も問題となる。

ところで本研究の目的からは、上に述べたような高度で複雑なモデルを解析に用いる必要はない。むしろ、実際の傾向にある程度則すれば、単純でより直感的に理解しやすいモデルの方が望ましいと思われる。この考えから§2.で仮定した地動の相互スペクトルは実測結果のうち、特に振動数領域④の特性に着目して作成したものである。すなわち、モデルでは2地点間の地動の相関は地盤の同一平面では位相ずれをもたず、関連度のみが2地点間の距離あるいは振動数 $f=\omega/2\pi$ に比例して小さくなるとしている。実は、これは実測結果の振動数領域④の特性とはほぼ一致するものである。また、このモデルの振動数領域④への適用は別に問題にはならないであろう。振動数領域⑤は実際の地動では位相ずれが大きく見られるところである。したがって、この点をモデルでは忠実に反映しているとはいえない。モデルでは位相の情報はなく、関連度を小さくすることによってその効果を表わすのにとどまることになる。この部分に対してはモデルは簡略すぎるといえるかもしれない。

次に、式(8)のモデルについてのパラメータの推定方法を説明する。

式(4)と式(8)の関係を以下に示す。式(4)をまず次のように書き換える。ここで、振動数 f は円振動数 ω と表記をかえている。

$$|G_{x_i x_j}(\omega)|^2 = \gamma^2 x_i x_j G_{x_i}(\omega) G_{x_j}(\omega) \quad \dots\dots(16)$$

ここで、2地点間の距離 L が十分小さいとし、

$$G_{x_i}(\omega) \cong G_{x_j}(\omega) \triangleq G_{\bar{u}_0}(\omega) \quad \dots\dots(17)$$

と仮定すれば、

$$|G_{x_i x_j}(\omega)|^2 = \gamma^2 x_i x_j G_{\bar{u}_0}^2(\omega) \quad \dots\dots(18)$$

が得られる。さらに両辺の平方根をとれば、

$$G_{x_i x_j}(\omega) = \gamma x_i x_j G_{\bar{u}_0}(\omega) \quad \dots\dots(19)$$

となる。

一方、式(8)を x 軸1次元のモデルとすれば、

$$G(x_i, x_j, \omega) = e^{-a|x_i - x_j|} G_{\bar{u}_0}(\omega) \quad \dots\dots(20)$$

ここで式(18)と式(19)の左辺は相等しいとおいて、

$$e^{-a|x_i - x_j|} = \gamma x_i x_j \quad \dots\dots(21)$$

なる関係式を得る。式(20)を a について解けば、

$$a = -\ln\{\gamma x_i x_j(\omega)\} / L \quad \dots\dots(22)$$

となる。ここで、 $L = |x_i - x_j|$ 、 $a = (a + b\omega) / V_s$ 、 a 、 b は定数である。また、 $a = (a + b\omega) / V_s$ のうち $a = 0$ 、すなわち振動数が 0 Hz に近づくとき2地点間の相関は1に収束すると考えれば、 b は次式で与えられる。

	L(m)	V _s (m/sec)	b	振動数領域⑤ (Hz)
硬質地盤の地震 観測	40	500~600 (1300)	0.320 ~0.384	2.0~6.5
	78.5		0.238 ~0.286	
軟弱地盤の地震 観測(手賀沼)	15	21.5	0.405	0.305~1.25
	30		0.242	
八戸高専地盤A, B	36	99.6 (210)	0.300	0.0~3.5

(): PS 検層による地盤表層部の V_s 値

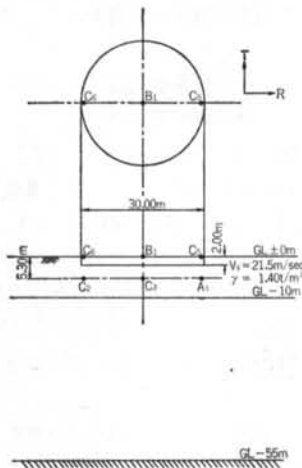
表一 実測資料によるパラメータ b の推定

$$b = -\frac{V_s}{L\omega} \ln\{\gamma_{x_1 x_2}(\omega)\} \quad \dots\dots (2)$$

ここで、a=0 (仮定)

そして、パラメータ b は実測資料の振動数領域⑤の特性、すなわち振動数と関連度関数のデータに最小自乗法を適用して推定することができる。

計算結果を表一に示す。表一には、参考値として八戸高専における1968年十勝沖地震の余震記録から求めた数値もあげている¹⁾。また、せん断波速度 V_s は換震器まわりの V_s 値として必ずしも表層地盤の平均 V_s 値(表の括弧内)は用いていない。表からは、パラメータ b が 0.2~0.4 程度の値をとりうる事がわかる。なお、次章の検討からは実在構造物の基礎/地盤の伝達関数に対する解析解の一致度は b=0.05~0.25 の中では 0.15 が一番良いことがわかったので、パラメータスタディではこの値を用いて計算を行なっている。



図一七 手賀沼B基礎の外形寸法と地震計の配置

§ 4. 数値解析による検討

前章までで解析の準備は一通り終わった。本章では基礎/地盤の伝達関数について実測解と解析解との対応を検討し、解析法の有用性をまず確認する。次に、基礎幅あるいは埋込み深さをパラメータにとって数値計算を行ない、入力損失の効果に対するこれらのパラメータの効き方について検討を行なう。

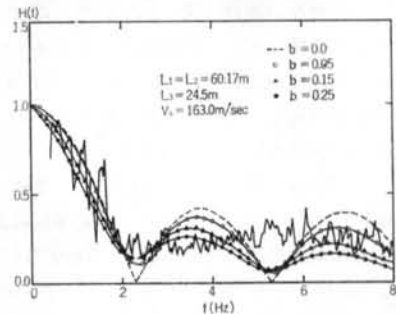
4.1 実測資料との対応

参考文献3)で検討した大型地下タンクの実測資料⁴⁾と、手賀沼におけるB基礎の実測資料¹⁴⁾¹⁵⁾について検討する。

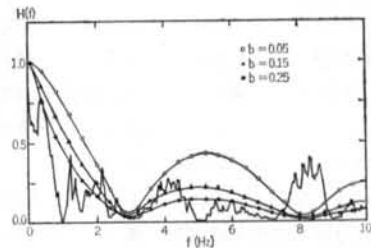
大型地下タンクは直径 67.9m、埋込み深さ 24.5m の円筒形RC構造物であり、周辺地盤の平均せん断波速度 V_s は側面で 163 m/sec、底面で 380 m/sec である(以下の計算では V_s を 163 m/sec としている)。

B基礎は、図一七に示すように直径 30m、埋込み深さ 2mの背の低い円筒形であり、その材質はソイルセメント系改良地盤である。ここで改良地盤のせん断波速度は 220m/sec であるから、周辺地盤のせん断波速度 21.5m/sec と比べれば十分に剛く、改良地盤は基礎として一応みなすことができる。

図一八および図一九に、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、破線が解析結果である。解析解は、パラメータ



図一八 大型地下タンクの基礎/地盤の伝達関数



図一九 手賀沼基礎の基礎/地盤(地表)の伝達関数

b を変数として $b=0.05, 0.15, 0.25$ の3ケースについて示している。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換算し計算を行なった。

図からは次のことがわかる。

①実測解は振動数 0 Hz でゲイン 1.0 で始まり、振動数が高くなるに従ってそのゲインは減少し 0.3 程度にまでなる。

また、B基礎の実測解には $1, 3, 5, 7, 9\text{ Hz}$ に凹部が目立つが、この理由を以下に示しておく。B基礎の実測結果を求める際には次のような計算ステップを入れている。すなわち、地震計の資料としてGL- 5.3 m のデータしかなかったために基礎(B-1)/地盤(GL- 5.3 m , C-3)の伝達関数に重複反射理論より求めた(GL- $5.3\text{ m}/\text{GL}\pm 0\text{ m}$)の伝達関数をかけ、これを基礎/地盤(GL $\pm 0\text{ m}$)の伝達関数とした。このため、GL- 5.3 m 以浅の地盤の卓越振動数(1次 1.03 Hz)において、はっきりした凹部が生じたのである。

②解析解は、実測結果と同様に振動数 0 Hz でゲイン 1.0 で始まり、振動数が高くなるに従いそのゲインは減少する。また、解析解は周期的にノッド(節)を持っている。

これは、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であり、図-10に示すような波動モードがこれに相当する。

また、 $b=0.0$ すなわち2地点間の地動が鉛直方向の位相ずれしか持たない場合(図-8の破線)には、波動が相互に完全に相殺しあいその伝達関数のゲインが 0 となることがある。これに対して確率モデル($b\neq 0.0$)では完全な相殺は起こらない。これは確率モデルの大きな特徴であり、実際の現象にも適合する。

ノッドの振動数は、図-10を見てわかるように側面と底面の面積比により異なる。すなわち、基礎幅に比して埋込み深さが相対的に深い場合には、その振動数は $nV_s/2L_3(n=1, 3, 5, \dots)$ に近づき、反対に埋込みが浅い場合には $nV_s/4L_3(n=1, 3, 5, \dots)$ に近づくことになる。

③次に、パラメータ $b=0.25$ の解析解に着目してみると次のことが分かる。すなわち、仮定した地動の相互スペクトルは振動数に比例してその相関が指数関数的に減少するモデルであることから、解析解は振動数の低いところ(最初のノッドまで)では実測結果に比べゲインが幾分早く小さくなる。また、 $4\sim 5\text{ Hz}$ 以上の振動数でも解析解の入力損失の効果は実測結果と比べ幾分強いようである。

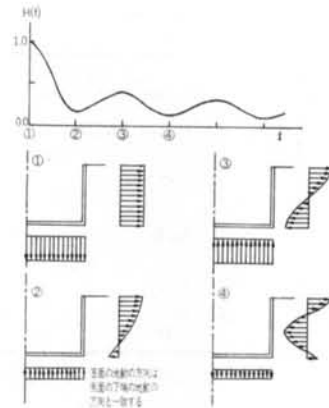


図-10 波動のモードと入力損失の効果

④このことから、パラメータ b を $0.15, 0.05$ と小さくして解析解を求めた。結果として実測解と解析解の一致度は 0.15 程度が良いことが分かる。なお、実測資料による b の値が $0.2\sim 0.4$ 程度であったものが、解析上 $b=0.15$ と小さくした方が実測と解析との一致度がなぜ良くなるかという理由には、上記③で示した理由の他にも式(8)に示すように、2地点間の距離を各座標の差の絶対値の和として与えていることや、 V_s 値の選択の問題などがこれに関係しよう。

4.2 パラメータスタディ

前節の検討より、本解析法の有用性を一応確認することができた。解析解は実測解のすべての振動数領域にわたって良好にシミュレートできているわけではないが、全体的な傾向は十分にとらえていると思われる。

本節では基礎幅あるいは埋込み深さをパラメータとして、以下の2項目について検討を加える。

(1)入力損失の効果に対する基礎の底面と側面の寄与率について。

(2)埋込みがない場合に基礎底面において生じるであろう入力損失の効果の程度について。

4.2.1 基礎底面と側面の寄与率について

いま、地盤のせん断波速度 V_s および基礎の底面寸法 L_1, L_2 を固定しておき、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検討する。ここで、 V_s 値は 200 m/sec 、 L_1, L_2 は 40 m とした。また、 L_3 は $0\sim 40\text{ m}$ の間で変化させる。

結果を図-11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 $L_3=0\text{ m}$ のときには入力損失の効果は割合に小さいものである。たとえば、 10 Hz においても、そのゲインは 0.58 であり、あまり小さ

くない。

②これに対して、基礎が埋込みを持つと入力損失の効果はきわめて強くなっていく。すなわち、 $L_3=5\text{m}$ あるいは 10m と比較的浅い埋込みでも、そのゲインが 0.58 になる振動数はそれぞれ 4.6Hz および 3.1Hz であり、埋込みがない場合の 10Hz と比べればかなり低くなる。また、ゲインは高振動数で包絡的にみて 0.3 以下となるが、最初に 0.3 となる振動数は $L_3=5\text{m}$ のとき 8.9Hz 、 $L_3=10\text{m}$ のとき 4.6Hz となっている。入力損失の効果に対するこの急激な増加には、側面による接地面積の増大にもよるが、側面の地動のせん断波動としての位相ずれが大きく効いている。

③また、埋込み深さをさらに増すと入力損失の効果は漸次増えていく。ゲインが最初に 0.3 となる最初の振動数は、 $L_3=2.0\text{m}$ のとき 2.7Hz 、 $L_3=4.0\text{m}$ のとき 1.6Hz となる。しかし、埋込みが基礎幅との比(L_3/L_2)で 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ようである。

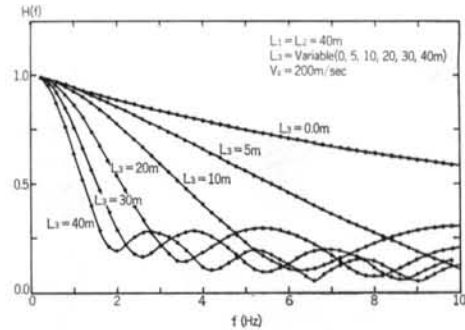
次に、前節で検討した大型地下タンクおよび手賀沼B基礎を例にとり、基礎底面と側面の効果を検討してみよう。

図一12に大型地下タンクの解析結果を、図一13に手賀沼のB基礎の解析結果を示す。図には、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している。図からは以下のことが考察できよう。

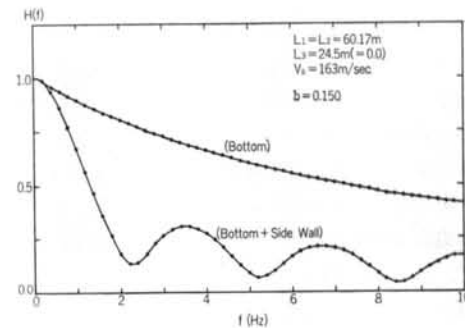
①底面だけの場合と比べ、側面をも考慮した場合には入力損失の効果はかなり大きくなる。特に大型地下タンクの場合にはその差が大きい。これには底面積に対する側面の面積比が関係する。大型地下タンクの場合、底面と側面との面積比は $1.0:1.4$ であるが、手賀沼B基礎の場合には $1.0:0.27$ と側面のしめる割合が小さいことがわかる。

②しかしながら、手賀沼B基礎のように埋込み深さが小さくても、伝達関数の第1ノッド(振動数 2.0Hz)までの差は大きい。また、地動の主要成分がこの振動数領域にあたることから、この効果の実際上の意義はさらに大きくなる。

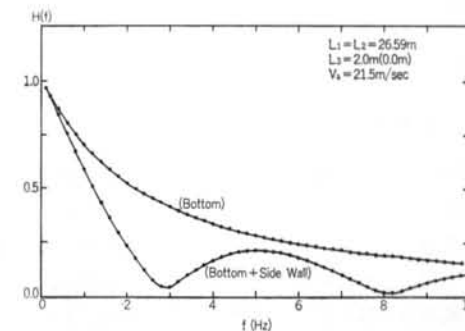
③なお、解析モデルでは底面と側面に接する地盤のせん断波速度を変えていないが、直接基礎は通常、表層地盤の下の硬質地盤(支持地盤)に床付けされることが多い。この場合、底面に接する地盤のせん断波速度は側面と比べて大きくなるはずである。むしろ、せん断波速度が変ることによって地盤-基礎を結ぶパネも剛くなり、地動の基礎への入射量が変わることから、この影響を一概



図一11 基礎の埋込みによる基礎/地盤の伝達関数の変化



図一12 入力損失の効果への基礎底面と側面との寄与率(大型地下タンクの場合)

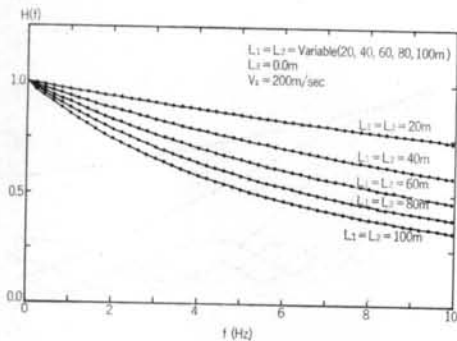


図一13 入力損失の効果への基礎底面と側面との寄与率(手賀沼B基礎の場合)

にいうことはできないが、地動の位相ずれは底面部に比べて側面部の方がより大きくなるということはいえる。したがって、実際の地層構成では側面の寄与率はさらに大きくなることが予想される。

4.2.2 基礎底面において生じる入力損失の効果について

次に、基礎が埋込みをもたない場合について、基礎幅による入力損失の効果の変化を検討してみよう。ここでは、基礎は正方形($L_1=L_2$)としてその長さをパラメータとし、 L_3 を 0.0m 、 V_s を 200m/sec とした。



図一14 基礎底面の大きさによる基礎/地盤(地表)の伝達関数の変化

計算結果を図一14に示す。図からは、底面だけによる入力損失の効果が比較的小さいことが分かる。基礎幅が40m程度では、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、解析解による入力損失の効果は実在建造物のそれと比べて幾分小さいようである。実際の建造物では埋込みがない場合は杭基礎となってしまうが、底面の大きさによらず、ゲイン0.35のポイントで振動数8.5 Hz 程度の入力損失フィルターがかかることが多い²⁾。振動数成分の高い領域で解析解のゲインが落ちない理由としては、解析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モデルであることなどが関係しているよう。

§ 5. まとめ

本研究では、まず異なる2地点の地動に確率統計的なばらつきを持たせ、3次元矩形基礎の入力損失の効果を検討してみた。地動は建造物の真下より入射するせん断波動としてとらえ、鉛直方向には位相ずれを持ち、2点間の距離あるいは振動数に比例してその相関性が小さくなるという確率モデルとした。また、モデルのパラメータは実測資料あるいは実在建造物の実測解と解析解との対応より決定している。結果として、解析解は実測解の全ての振動数成分にわたって十分シミュレートできているわけではないが、全体的な特徴は良くとらえていると思われる(図一12あるいは図一18参照)。また、確定モデルが伝達関数においてゲイン0のノードを持つのに対

して、確率モデルではゲインが0となることはなく、全体として高振動領域における変動が小さくなっている。これは、実際の現象にもよりよく適合する確率モデルの特徴の1つである。

次に、この解析モデルを用いて入力損失の効果に対する基礎の底面と側面の寄与率、あるいは埋込みがない場合に基礎底面において生じる入力損失の効果と基礎幅との関係について検討を行なってみた。結果として次のようなことが分かった(図一11~図一14参照)。

(1)基礎底面すなわち埋込みがない場合の入力損失の効果はあまり大きくない。地盤のせん断波速度 $V_s=200\text{m/sec}$ 、1辺40mの正方形基礎の場合、10 Hz においてもそのゲインは0.6程度と大きく、1辺80mで0.4に落ちる程度である。また、解析モデルは底面における位相ずれを与えていないために、入力損失フィルターは振動数に比例して指数関数的に減少していく。

(2)これに対して、基礎が埋込みを持つと入力損失の効果はきわめて強くなる。地盤のせん断波速度 $V_s=200\text{m/sec}$ 、底面が1辺40mの正方形基礎として、埋込み深さを5mとすればゲインが0.6となる振動数は4.6 Hz となり、7.75 Hz ではゲインは0.3以下となる。また、埋込み深さを10m とすると3.0 Hz でゲイン0.6、4.6 Hz でゲインは0.3となる。

(3)この結果より、基礎の埋込み深さが入力損失の効果に大きく寄与することが分かる。また、この主な理由は地動モデルが鉛直方向にせん断波動としての位相ずれを持つことによる。この位相ずれにより、入力損失フィルターには周期的なノット(節)が表われるが、第1ノットまでの振動数領域において入力損失の効果が底面の場合と比べ、特に大きくなることが分かる。

謝辞 おわりに、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工学部 星谷勝教授に深謝の意を表したい。また、本研究で用いた手賀沼における地震観測資料は、千葉県手賀沼下水道事務所、(財)電力中央研究所土木技術研究所、ならびに社内の多くの関係者の努力により作成されたものであることをこたわり、その使用を許されたことを心より感謝したい。硬質地盤の地震観測資料についても関係者の方々に心より感謝する。

〈参考文献〉

- 1) 山原 浩：“地震時の地動と地震波の入力損失（その1），（その2）”日本建築学会論文報告集165号（1969），167号（1970）
- 2) 石井 清：“実測資料に基づく地震波の入力損失フィルターの提案”清水建設研究所報 Vol. 33（1980）
- 3) 石井 清，山原 浩：“大型地下タンクの実測記録による地震波の入力損失の検討”（日本建築学会論文報告集投稿中）
- 4) 星谷 勝：“確率論手法による構造解析”鹿島出版（1974）
- 5) J. S. ベンダット，A. G. ピアソル（得丸他訳）：“ランダムデータの統計的処理，（5）物理系の入出力関係”培風館（1976）
- 6) A. G. Davenport：“The Buffeting of Structures by Gusts” Wind Effects on Buildings and Structures: Proceedings of Conference, National Physical Laboratory, Middlesex, Vol. 1 (June, 1963)
- 7) A. G. Davenport：“Gust Loading Factors” ASCE, ST 3（1967）
- 8) Y. Matsushima：“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講演集（1975）
- 9) 小堀輝二，南井良一郎，鈴木 有：“成層地盤に根入れされた基礎構造物の振動特性”京都大学防災研究所年報第19号B（1976）
- 10) 田治見宏：“深い基礎を有する構造物の地震応答について”日本地震工学シンポジウム講演集（1966）
- 11) 後藤尚男，土岐憲三，高田至郎：“地中基礎構造物の振動特性について”京都大学防災研究所年報第14号A（1971）
- 12) 井口道雄，古河 司：“地下階を有する構造物の地震応答に関する研究（SH 波入射に対する応答）”日本建築学会第1回電子計算機利用シンポジウム（1979）
- 13) 星谷 勝：“Private Note. 基礎の形状が与える影響”（1980） p. 4
- 14) 上島照幸，岩楯敏広，沢田義博：“ソイルセメント系改良地盤の制震効果に関する考察”土木学会第35回年次学術講演会講演概要集（1980）
- 15) 竹脇尚信，沢田義博，清水勝美：“セメント系材料による改良地盤の制震効果のシミュレーション”土木学会第35回年次学術講演会講演概要集（1980）

