

## 実測資料に基づく地震波の入力損失フィルターの提案

石井 清

## § 1. まえがき

構造物の地震応答解析を行なう場合には、その有用性から集中要素系モデル(いわゆるバネ・マス系)が良く用いられている。そして地震とそれによる構造物の応答を純粋な振動現象とみなし、地表または地中のある点で想定される地震加速度波形をそのまま構造物に対する入力として用いている。それは構造物の基礎に対して地震波が全ての周波数成分にわたって同位相、同振幅で入射すると仮定していることになる。しかし、地動はもともと波動現象であることから、基礎の幾何学的寸法に比べてその成分波の波長が十分長い場合には実用上同位相、同振幅とみなせるが、波長がより短い成分波は基礎の各点で位相ずれをもって入射することになる。この場合、この地動の位相ずれを剛な基礎版が拘束することにより、構造物を加振するのに有効な地震入力はある程度相殺され小さくなるはずである。

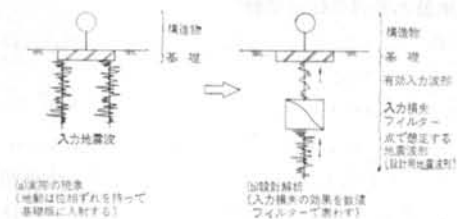
1969年に山原は、上記のような地震入力に対する基礎版の幾何学的な拘束によるローパスフィルターとしての効果を、基礎版による地震波の入力損失の効果と名付け、この効果を実測波形をもとに示した<sup>1)2)</sup>。また、その後、この種の研究はとどえていたが、1977年の Newmark の研究<sup>3)</sup> および1976年に開催された原子力関係の国際会議である第4回 SMIRT (Structural Mechanics in Reactor Technology) 会議<sup>4)~7)</sup> から、にわかには活発化してきた。これは、一般の構造物に比べ原子力発電所のように比較的大きな幾何学的寸法をもち、かつ極端に剛な構造物になると、入力損失の実用的効果がかなり期待できること、また、特に原子力発電所の建屋内に内蔵される各種機器・配管系には固有振動数の高いものが多く、入力損失の効果を考慮することが設計上きわめて有利になるという新たな認識からである。

また、これを契機に数多くの研究が発表され、今日に至っている<sup>8)~14)</sup>。この中において、実在構造物の地震観測資料を用いた幾つかの実証的研究<sup>8)14)</sup>からは、入力損

失の効果という現象がまちがいない実際に存在すること、そしてこの効果を考慮することによりシミュレーション解析がより実際の現象に近づくことなどが確認されている。また、理論的な裏付けとしてはKausel<sup>15)</sup>による振動方程式に基づく定式化、あるいは原田<sup>16)</sup>による波動理論による定式化がある。これらの研究により、基礎—地盤系の動的相互作用問題における入力損失の効果の位置付けはかなりはっきりとしてきており、従来の集中要素系モデルによる地震応答解析に、入力損失の効果をさらに考慮することが理論的にも矛盾ないことが分かってきている。

著者自身も Kausel の定式化にならない、大型地下タンクの地震観測資料を用いて有限要素法(FEM)により入力損失の効果に対する実証的な研究を行っている<sup>15)16)</sup>。その結果として、従来の研究の多くが基礎底面における入力損失の効果を考えていたのに対して、地中基礎の側面における入力損失の効果が意外と大きいということが分かった。そして地下タンクに関する限り、地動を構造物の真下より入射するせん断波として、地動の位相ずれを基礎側壁が拘束するものとして入力損失の効果を考えたよいことが一応確認できた。

本研究では、入力損失の考え方を実用化するための次のステップとして、基礎の埋込みの深さ注)と入力損失



図一 地震波の入力機構

注) 本研究では基礎の埋込み深さ $H$ を  $H/V_s$  ( $V_s$ : 周辺地盤のせん断波速度)として表示している。 $H/V_s$ は基礎の埋込み深さ分の距離をせん断波が伝播するのに要する時間として理解できる。

との関係について、できるだけ数多くの構造物の地震観測資料についてさらに当たってみることにした。

また入力損失の取扱いには、山原の研究<sup>8)9)</sup>にあるようにその効果を簡単な数値フィルターにより表わすことができれば、設計的には大変便利である(図-1参照)。したがって本研究においてもこの考え方に従い、研究の成果がそのまま設計に使えるように、入力損失の効果を表わす数値フィルターを提案し、そのフィルター定数により入力損失の効果の大小をとらえることにした。

なお、入力損失の効果を実測データより検討するときには、地盤と基礎の伝達関数が重要な資料となるが、その伝達関数には“入力損失の効果(Kinematic Interaction)”だけでなく“動的相互作用(Dynamic Interaction)の影響”が入り込んでいることになる<sup>7)</sup>(ここで動的相互作用の影響とはバネ・マス系モデルにおける振動特性と考えてよい)。このため、実測データより入力損失の効果のみを検討しようと思えば、この動的相互作用の影響度をつかんでおく必要がある。次章では、実測データを整理するための予備検討として、この点をまず調べてみることにした。

## § 2. 動的相互作用(Dynamic Interaction)の影響について

実測データより得られる地盤と構造物基礎との伝達関数には、入力損失の効果とともに動的相互作用の影響が入っている。このことから、伝達関数に対する動的相互作用の影響について、まず検討してみよう。また、この検討を通じて実測データの伝達関数より入力損失の効果に関する情報だけをどのように引出したらよいかを見出していきたい。

### 2.1 地盤と基礎の伝達関数<sup>17)</sup>

ある線形系の入出力関係は、周波数領域において以下の式で表示できる。

$$G_y(f) = |H(f)|^2 G_x(f) \quad \dots\dots(1)$$

ただし、 $G_x(f)$ 、 $G_y(f)$  はそれぞれ振動数  $f \geq 0$  で定義される入力および出力のパワースペクトル密度関数であり、 $H(f)$  は系の周波数伝達関数(本文では伝達関数と略して用いる)である。

ここで、入力を地盤(地表)の観測波形とし、出力を基礎上の観測波形とすれば、推定される伝達関数  $H(f)$  には § 1. で述べたように①入力損失と②動的相互作用の2つの効果が入っていることになる。いま、この2つの

効果は弾性応答を仮定すれば、それぞれ独立に取扱え、式(1)は式(2)のように書き換えることができる。

$$G_y(f) = |H_1(f)|^2 |H_2(f)|^2 G_x(f) \quad \dots\dots(2)$$

ただし、 $H_1(f)$  は入力損失の効果を表わす伝達関数であり、地盤→基礎の間で地震波の高周波成分を除去する数値フィルターとしてとらえることができる。また、 $H_2(f)$  は動的相互作用の効果を表わす伝達関数である。

さらに、地下タンクなどのように構造物の見掛けの質量も小さく、構造物—地盤系の動的相互作用の効果もあまりない場合、すなわち、

$$|H_2(f)|^2 \approx 1.0 \quad \dots\dots(3)$$

の構造物の場合には、基礎上の波形は入力損失の効果を表わすフィルター  $H_1(f)$  のみによりほぼ推定することができる。また、参考文献15)、16)で入力損失の効果の実証に地下タンクの地震観測データを用いたこともここにその理由がある。次節では、式(2)が成り立たない場合として Hollywood Storage Bldg. の検討結果を紹介し、3節では入力損失の効果の実用的意義の大きい原子力発電所の原子炉建屋について  $H_2(f)$  を検討する。

### 2.2 Hollywood Storage Bldg. の場合

地盤と基礎の伝達関数に入力損失と動的相互作用の2つの効果ははっきりとでている事例として、Hollywood Storage Bldg. についての検討結果がある。Dukeら<sup>18)</sup>は Kern County 地震の記録を、また山原らは<sup>8)9)</sup> 1971年 San Fernando 地震の記録を用いて同建物について

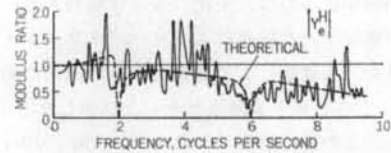


図-2 Hollywood Storage Bldg. の地下室/地表の伝達関数における観測値と解析値の比較 (Duke, 1970)

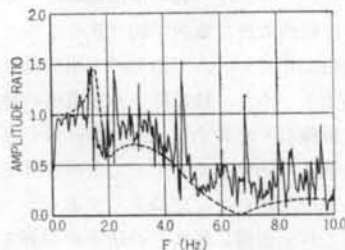
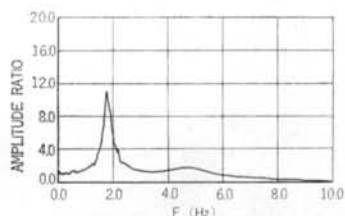
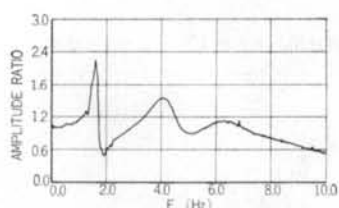


図-3 Hollywood Storage Bldg. の地下室/地表の伝達関数における観測値と解析値の比較 (山原, 1978)



(a) 屋上階/地下室の伝達関数



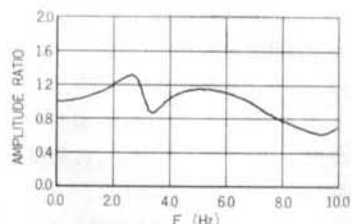
(b) 地下室/地表の伝達関数  
(入力損失の効果は含まれていない)

図一四 Hollywood Storage Bldg. の振動モデルの伝達関数

それぞれ検討を行なっている。このうち明瞭な傾向が出ているのは、同建物の EW 方向、すなわち長手方向の強震記録であり、伝達関数についての実測と解析との対応は図一三および図一四のようになっている。ここで、Duke らによる解析は同建物をせん断壁としてモデル化したもので、純理論的な解である。また、山原らの解析は入力損失の効果を簡単な数値のフィルターにより表わし、動的相互作用の効果は地盤の水平ばねをつけたせん断型モデルの地盤—基礎の伝達関数により表わしている。山原らは結論として、実測データの波形・伝達関数は入力損失の効果を考えることによりおおむね表わすことができるが、動的相互作用の効果を考えれば、さらに細部の特徴までとらえることができるとしている。

ところで、上記の伝達関数に見られる 2.0 Hz (および 6.0 Hz 近辺) の落ち込みは、振動実験の結果あるいは解析モデルの伝達関数 (図一四) から分かるように、上部構造物の固有振動数に対応するものであり、動的相互作用の効果である。ここで、基礎—地盤の伝達関数が固有振動数において落ち込むという現象は重複反射理論による地盤振動の理論解析<sup>19)</sup>の中で説明されており、構造物を伝播する波動をせん断波と考えれば<sup>20)21)</sup>この現象は容易に理解できる。伝達関数の落ち込みの程度、さらに全体の凹凸の程度は上部構造物の質量それ自体の大きさや固有振動数、減衰定数などの振動特性、また構造物が振動することにより構造物から逃げていくエネルギー量 (逸散減衰量) などに関係する<sup>22)</sup>。

なお上記の事例より、一般の建築構造物や土木構造物の基礎—地盤系の伝達関数の中には、動的相互作用の効果を無視できないものがあることが分かる。しかし、こ



図一五 原子炉建屋の振動モデルによる基礎/地表の伝達関数

れらの構造物の伝達関数においても動的相互作用の効果である固有振動数周辺の急激な変化にとらわれず、伝達関数を包絡的にみて入力損失の効果を評価すればよいことがわかる。

## 2.3 原子力発電所原子炉建屋の場合

次に、入力損失の効果を考えることの実用的意義の大きい原子力発電所原子炉建屋について検討してみよう。

図一五は、東海第 2 原子力発電所原子炉建屋の質点系モデル<sup>23)</sup>より計算した伝達関数であり、動的相互作用の効果を示している。このモデルは、起振振動実験あるいは地震観測の結果の検討を通じて、その振動特性が実際のものに近づくようシミュレートされており、その信頼性は高い。図一五からは 0.0~10.0 Hz の間で伝達関数  $H_2(f)$  の絶対値は 0.6~1.3 の中におさまっており、Hollywood Storage Bldg. の例にくらべれば動的相互作用の影響はだいぶ小さいといえる。

§ 4. では、実在構造物の地震観測記録の検討結果を示すが、原子力発電所原子炉建屋に関する限り、その結果からは入力損失の効果のみがはっきりと出たものになっている。

また、本研究の予備検討として、原子力発電所原子炉建屋を単純化したモデルについて FEM 解析により動的相互作用の効果を検討したが、その結果からも上記の傾向が確認できた。

## § 3. 設計用の入力損失フィルター

入力損失の効果を設計あるいは解析に導入することを目的として、いくつかの数値フィルターがすでに提案されている<sup>1)2)7)13)24)</sup>。ここでは、これらの数値フィルターの検討結果として得た設計用の入力損失フィルターが満足すべきいくつかの条件を明らかにした上で、本研究としてのフィルターを提案したい。

解析あるいは設計へと提案されている数値フィルターの関数型、あるいはその値自体には以下に示すような点

が配慮されている。すなわち、

- ①設計が危険側にならないこと、
- ②フィルターの関数型が簡単なこと、
- ③フィルターの関数型に物理的な説明がつくもの（たとえば簡単な解析モデルに対して波動理論により導かれる関数型などがこれに当たる）、
- ④フィルターのパラメータは、そのフィルターの特徴をはっきりととらえているとともに、その数が少ないこと、
- ⑤計算の容易さ、

などである。⑤は原波形の算術移動平均を用いる山原の方法<sup>12)</sup>が最も簡単な計算ルーチンとなるが、高速フーリエ変換 (FFT)<sup>25)</sup>を用いれば任意の関数型について容易に計算できる。

上記の基準を満足する設計用の入力損失フィルターとして、以下の式を提案する。

$$\left. \begin{aligned} |H(f)| &= \left| \frac{f'}{\pi f} \sin \frac{\pi f'}{f} \right| & 0 \leq f \leq 0.710 f' \\ &= 0.35 & 0.710 f' = 1/\tau^* \leq f \end{aligned} \right\} \dots(4)$$

ここで第1式は、以下に示すが、地盤を1次元のせん断棒と仮定し、地動を基礎側面で平均化することによって得られる伝達関数であり、第2式はその値が0.35よりも小さくならないように配慮したものである。式(4)の計算例を図-6に、また図-7には大型地下タンクの実測結果との対応を示す。提案式は十分安全側の値となっている(式(4)の妥当性についてはフィルター定数 $\tau^*$ の設定も含めて§5.で検討する)。

式(4)の第1式の誘導を示しておく<sup>13)</sup>。

地盤を1次元のせん断棒と仮定したときの $(D-Z)$ 点における地盤の変位 $U(D-Z)$ は次式によって与えられる。

$$U(D-Z) = U_0 \cos \left\{ \frac{\omega}{V_s} (D-Z) \right\} e^{i\omega t} \dots(5)$$

ここで、 $U_0$ は自然地盤の地表振幅、 $\omega (=2\pi f)$ は円振動数、 $V_s$ は地盤のせん断波速度、 $t$ は時間である。また、 $D, Z, H$ は図-8に示される諸元である。

基礎の動き $U$ は式(5)を基礎の側面、すなわち $(D-H)$ 点から $D$ 点までを平均すればよい。すなわち、

$$U = \frac{1}{H} \int_{D-H}^D U_0 \cos \left\{ \frac{\omega}{V_s} (D-Z) \right\} e^{i\omega t} dz \dots(6)$$

$$= \frac{U_0 V_s}{\omega H} \sin \frac{\omega H}{V_s} e^{i\omega t} \dots(7)$$

したがって、入力地動と基礎との伝達関数として、

$$|U/(U_0 e^{i\omega t})| = |H(\omega)| = \left| \frac{V_s}{\omega H} \sin \frac{\omega H}{V_s} \right| \dots(8)$$

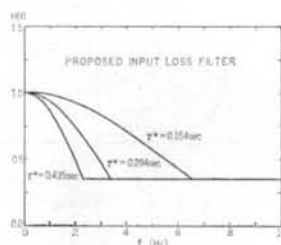


図-6 設計用の入力損失フィルター (提案式)

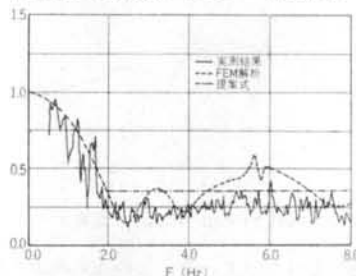


図-7 大型地下タンクの実測結果と提案式との関係 (No.1)

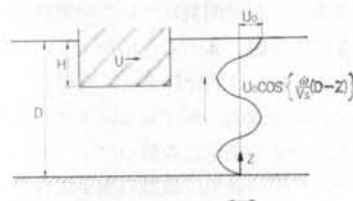


図-8 鉛直方向に伝播する波動のモード

が得られる。ここで、振動数 $f = \omega/2\pi$ 、 $f' = V_s/2H$ とおけば、式(4)の第1式が得られる。

いま、 $1/(0.710 f')$ をフィルター定数 $\tau^*$ として定義すれば、 $\tau^*$ は図-6に示されるように伝達関数の値(ゲイン)が0.35となる周期として理解できる。また、フィルター定数 $\tau^*$ と $H/V_s$ との関係は、地盤を1次元のせん断棒と仮定すれば、

$$\begin{aligned} \tau^* &= 1/(0.710 f') = 1/\{0.710(V_s/2H)\} \\ &= 2.82 H/V_s \text{ (sec)} \end{aligned} \dots(9)$$

となる。ここで、 $H$ は基礎の埋込み深さである。なお、 $\tau^*$ と $H/V_s$ との関係については次章で詳述するが、設計へは式(9)よりは経験的な補正をとり入れた次式の使用が考えられる。

$$\tau^* = 1.92(H/V_s) + 0.120 \text{ (sec)} \dots(10)$$

#### § 4. フィルター定数 $\tau^*$ と基礎の埋込み深さ $(H/V_s)$ との関係

前章では、設計用の入力損失フィルターとして式(4)を

No	名 称	基礎の外形寸法および形式	$\tau^*(\text{sec})$	$H/V_s$ (sec)	備 考	参考文献
1	大型地下タンク	$\phi 67.9\text{m} \times H 24.5\text{m}$	0.522	$24.5/163=0.150$	連続地下壁は計算に入れていない	15), 16)
2	製鉄所高炉基礎	$\phi 35.4\text{m} \times H 19.4\text{m}$ 鋼管矢板井筒	0.400	$19.4/138=0.141$		—
3	東京ガス・袖ヶ浦工場 A-6 LNG地下式タンク	$\phi 68.3\text{m} \times H 26.0\text{m}$	0.404	$26.0/168=0.154$		26)
4	東亜燃料・清水工場 排水処理用地下タンク	$\phi 24.0\text{m} \times H 24.0\text{m}$	0.444	$24.0/136=0.176$		27)
5	A原子力発電所原子炉建屋	$W 67.0\text{m} \times D 67.0\text{m}$ $\times H 17.2\text{m}$	0.263	$23.45/298=0.079$		14)
6	B原子力発電所原子炉建屋	$W 68.25\text{m} \times D 68.25\text{m}$ $\times H 17.0\text{m}$	0.277	$17.0/263=0.065$		—
7	八戸高専校舎	RC, F3 杭基礎あり	0.148	(0.0)		1), 2), 8), 9)
8	Hollywood Storage Bldg.	RC, F14, B1 杭基礎あり	0.133	$2.7/243=0.011$		8), 9)
9	地上式 LNG タンク	$\phi 64.0\text{m}$ 杭基礎あり	0.156	(0.0)		28)
10	市原 LPG 球形タンク	$\phi 21.5\text{m}$ 杭基礎あり	0.141	(0.0)		29), 30)
11	稲毛パイロットハウス	$W 55.79\text{m} \times D 13.59\text{m}$ PC, F7 杭基礎あり	0.143	$1.5/150=0.01$		29), 31)

H; 埋込み深さ,  $\phi$ ; 直径, W, D; 幅, 奥行

表-1 実測データによるフィルター定数 ( $\tau^*$ ) と基礎の埋込み深さ ( $H/V_s$ ) との関係

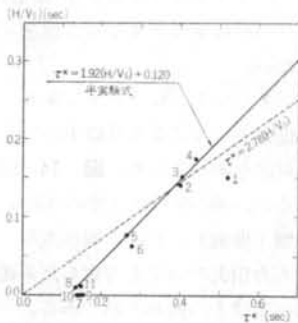


図-9 基礎の埋込み深さ ( $H/V_s$ ) とフィルター定数 ( $\tau^*$ ) との関係

提案した。設計へはこの数値フィルターを使用すればよいが、その関数を確定するためにはさらにフィルター定数  $\tau^* = 1/(0.710 f^2)$  を決定しなければならない。

実際は、計画中の構造物に対してこの定数が正確に評

価できるのは、これと同規模の構造物が同一敷地内にすでに建設され、かつ地震観測も行なわれているというごく限られた場合のみである。したがって、一般の設計ではこの定数を何らかの手段により推定してやる必要が出てくる。本章では実測例よりフィルター定数  $\tau^*$  と基礎の埋込みの深さ ( $H/V_s$ ) との関係を検討し、その推定式を提案する。

ところで、入力損失の効果に影響を与える要素として他にも多くのものが考えられる。たとえば、基礎に関するものとしては基礎の埋込み深さの他にも基礎幅、形状 (円形・矩形)、基礎形式 (直接基礎、杭基礎) などがある。また、不整層な多層地盤、地形、隣接構造物などにより地盤内で複雑に反射、屈折する地動の乱れ方自体、あるいは実体波、表面波といった波形特性もこれに関係しよう。しかし、これら多くの要素を推定式に入られることは実際上不可能である。本研究では、参考文献

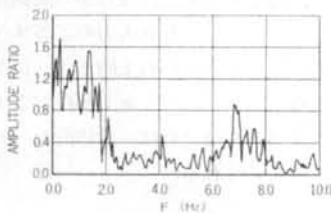


図-10 製鉄所高炉基礎の基礎/地盤の伝達関数 (No 2)

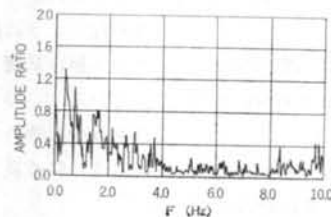


図-11 A原子力発電所原子炉建屋の基礎/地盤の伝達関数 (No 5)

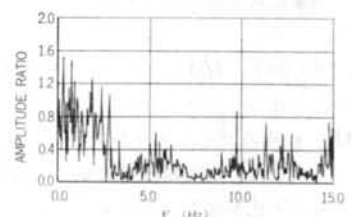
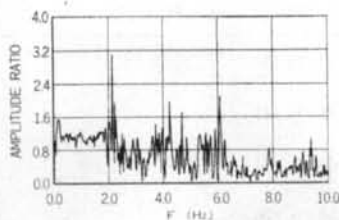


図-12 B原子力発電所原子炉建屋の基礎/地盤の伝達関数 (No 6)



図一13 地上式 LNG タンクの基礎/地盤の伝達関数 (No.9) 16) の考察に従い地動を構造物の真下より入射するせん断波として基礎側面において生ずる入力損失の効果を考え、地動をせん断波速度  $V_s$  で、また基礎の埋込み深さを  $H$  として  $(H/V_s)$  を一つのパラメータとしてみた。

検討結果は、表一1 および図一9 のようにまとめられる。ここで、プロット点数は11であり、No.3 および No.4 のデータは波形記録を直接解析したのではなく、公表されている資料より地盤および基礎におけるパワースペクトルを座標読取り装置 (ディジグラマ) を用いて読取り整理した結果である。また、No.7 の八戸高専校舎の記録は山原らによって観測された1968年十勝沖地震の余震群の1つであるが、波形の読取りは電磁オシログラフによる直書きの原記録を写真拡大したものをディジグラマより読取るといった操作をしているため、他のデータにくらべてデータ処理上の精度が幾分低い<sup>1)2)</sup>。なお参考として、検討資料として用いた地盤と基礎との伝達関数の一部を図一10~図一13に示す (No.1 は図一7 に、また No.8 は 図一2、図一3 に伝達関数が示されている)。多くのケースにおいて、その伝達関数には入力損失の効果がはっきりとでているが、No.9 あるいは No.11 の結果には動的相互作用の効果もかなりでている。動的相互作用の効果が強いものについてはフィルター波形を計算し、その振幅レベル、位相特性などを実波形と比較するなどしてフィルター定数を定めた。

図一9 からは、フィルター定数  $\tau^*$  と  $H/V_s$  とに関し次のが考察できる。

①  $\tau^*$  は  $H/V_s$  に比例して大きくなる傾向を示している。このことは、基礎の埋込み深さが地震波の入力損失の効果に対する大きな要因となっていることを示している。

② しかし、 $H/V_s$  が 0 となる、すなわち基礎の埋込みがなくなっても  $\tau^*$  は 0 とはならず、 $\tau^*=0.120 \text{ sec}$  (8.3 Hz) 程度のフィルターがかかることになる。

これには、地震観測の対象となる構造物は平面的にもかなりの広がりを持つものが多いこと、また埋込みの浅い基礎の多くが杭基礎形式となっていることなどが関係していると思われ、入力損失の効果が基礎の側面だけ

でなく、基礎底面においても当然見込めることを示している (この定量的評価は今後の課題の1つであろう)。

③ 地盤を1次元のせん断棒と仮定し、基礎側面における入力損失の効果を示す近似式、図中の破線は  $H/V_s$  が大きくなると比較的よく合うが、 $H/V_s$  が小さいときにはかえって安全側すぎる推定式となってしまう。

④ なお、本研究では  $\tau^*=(H/V_s)$  の推定式として次式を提案する。すなわち、

$$\tau^*=1.92(H/V_s)+0.120 \text{ (sec)} \quad \dots\dots(1)$$

ここで、式(1)は  $\tau^*$  の推定値が実測データよりも幾分安全側になるように配慮している。式(1)は地盤を1次元のせん断棒としたときの近似式と比べ、 $H/V_s < 0.15$  では経験的な補正として幾分大きめの評価となるが、 $H/V_s > 0.20$  では逆に小さめの値となっている。

## § 5. 提案モデルによる基礎上の有効入力波形と実測波形の対応

前章では、入力損失の効果を表わす数値フィルター  $H(f)$  およびそのフィルター定数  $\tau^*$  の推定式を求めた。ここでは、これらの提案モデルの妥当性を実測例を用いて確認してみたい。

検討には表一1 の No.1, No.2 および No.8 の地震観測データを用い、提案モデルによる基礎上の有効入力波形と実測波形との対応を調べてみた。図一14~図一16がその検討結果であるが、各図の(a)は波形の対応を示しており、上から地盤(地表)における観測波形、§3. の提案モデルにより入力損失の効果を考慮した基礎上の有効入力波形、実際の基礎上の観測波形である。

また、各図の(b)は減衰定数  $h=0.05$  の速度応答スペクトルであり、各波形の周波数特性を示すためのものである。

図からは、入力損失の効果を考えることによって基礎上の有効入力波形と実測波形が良く似てくること、また応答スペクトルにおいてもかなり両者の値が近づいてくることがわかる。また、提案モデルでは設計が危険側にならないように配慮したことから、有効入力応答スペクトル値は基礎上の実測波形をおおむね上回るようになっている。このことから、シミュレーション解析などではもう少し強めのフィルターを用いれば、全体的な一致度はさらに改良できると考えられる。

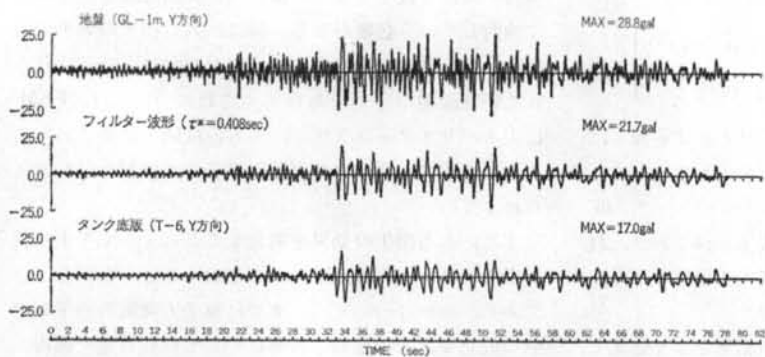


図-14(a) 実測波形と入力損失を考慮した計算波形との比較 (No 1, 大型地下タンク)

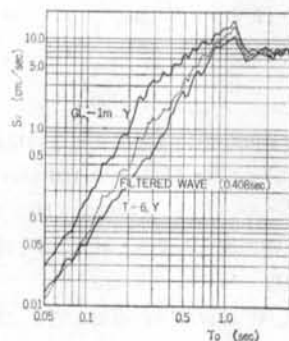


図-14(b) 速度応答スペクトル (減衰定数  $h=0.05$ ) による実測波形と計算波形との比較 (No 1, 大型地下タンク)

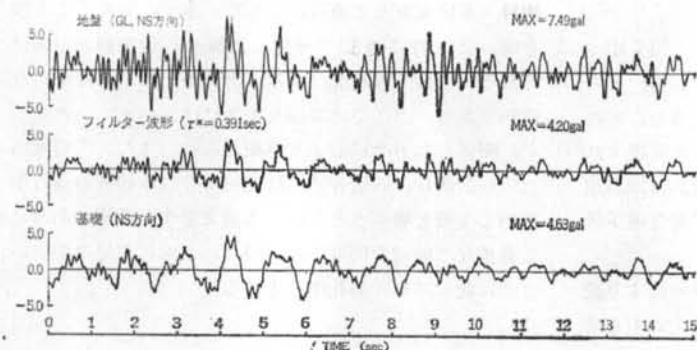


図-15(a) 実測波形と入力損失を考慮した計算波形との比較 (No 3, 製鉄所高炉基礎)

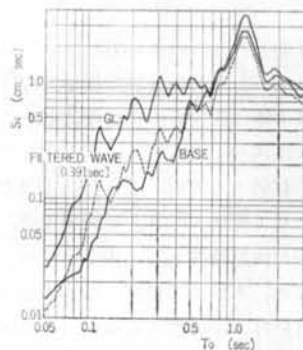


図-15(b) 速度応答スペクトル (減衰定数  $h=0.05$ ) による実測波形と計算波形との比較 (No 3, 製鉄所高炉基礎)

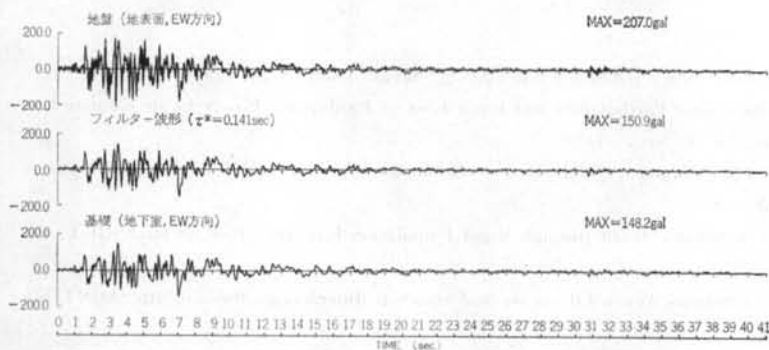


図-16(a) 実測波形と入力損失を考慮し計算波形との比較 (No 8, Hollywood Storage Bldg.)

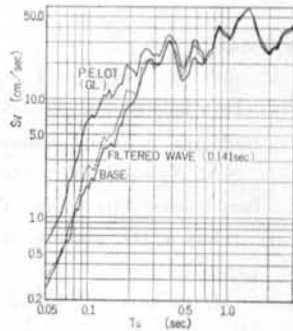


図-16(b) 速度応答スペクトル (減衰定数  $h=0.05$ ) による実測波形と計算波形との比較 (No 8, Hollywood Storage Bldg.)

## § 6. まとめ

本研究では、基礎の埋込み深さと入力損失との関係について検討を行った。結果は、設計解析にそのまま使えるように設計用の入力損失フィルターの提案という形を

とり、そのフィルター定数  $\tau^*$  と基礎の埋込み深さ ( $H/V_s$ ) との関係を実測資料より求めた。

提案式は、次のようにまとめることができる。すなわち、基礎の埋込みによる入力損失の効果を表わす設計用

の入力損失フィルターとして次式が考えられる。

$$|H(f)| = \begin{cases} \frac{f'}{\pi f} \sin\left(\frac{\pi f'}{f}\right) & 0 \leq f \leq 0.710 f' \\ = 0.35 & 0.710 f' \leq f \end{cases} \quad (4)'$$

また、フィルター定数  $\tau^*$  を  $1/(0.710 f')$  で定義し、地震観測記録の検討より以下の推定式を求めた。

$$\tau^* = 1.92(H/V_s) + 0.120 \text{ (sec)} \quad \dots\dots(10)'$$

ここで、 $f, f'$  は振動数 (Hz) で表示されており、 $H$  は基礎の埋込み深さ (m)、 $V_s$  は側壁周辺地盤のせん断波速度 (m/sec) である。

式 (4)' は設計への適用を考えた検討結果として提案したものであるが、式 (10)' と組合わせて使用することにより実際の現象をかなりよくとらえることができるだけでなく、設計が危険側にならないように特に配慮している。

有効入力波形の求め方については、いままで何も述べていないが、この計算は簡単にできる。すなわち、その計算手順は地表面の加速度波形をフーリエ変換し、その結果に式 (4)' の数値フィルターをかけた上で逆変換すれば、有効入力波形が得られる。また、この計算には高速フーリエ変換 (FFT) が使用でき、計算に必要な電子計算機の演算時間もごく少なくて済む。

なお、本研究で提案した入力損失フィルターにより設計解析は一応可能となるが、データの信頼性を向上させ

るためには今後とも多くの構造物の実測記録をたんねんに検討していく必要がある。特に、入力損失の効果に対する底面と側面の寄与率についての検討は、今後に残された研究課題の一つであろう。これについては、FEM によるパラメータスタディ、あるいは同一地盤における複数の (模型) 基礎の地震観測データの検討などが考えられよう。

また、入力損失の効果を考えることによって生ずる設計上のメリットの程度をつかんでおくことも大切なことである。これについては、すでに原子力発電所原子炉建屋の仮想モデルの地震応答解析からその解答を一部得ているが、他の一般的な構造物、たとえば中・高層ビル、ケーソン橋脚、井筒基礎などに対しても計算を実施し、別に報告したいと考えている。

**謝辞** 本研究をまとめるに際して、多くの方々のご支援を賜った。特に §3. で使用した個々の地震観測記録はそれぞれに多くの時間、費用、労力がかけられた貴重な資料である。ここでは詳細な氏名ははぶかせていただくが、関係した方々に心より感謝したい。また、当研究所の山原浩次長、同塩谷清人研究員からは本研究の遂行中終始ご支援を賜るとともに、本論文をまとめるにあたって貴重なご助言を何度となく得た。ともに末尾ながら、ここに記して厚くお礼申し上げる。

## <参考文献>

- 1) 山原 浩：“地震時の地動と地震波の入力損失”日本建築学会論文報告集 No165 (1969), No167 (1970)
- 2) H. Yamahara: “Ground Motions during Earthquakes and Input Loss of Earthquake Power to an Excitation of Buildings” Soils and Foundations Vol.10, No.2 (1970)
- 3) N.M. Newmark, W.J. Hall & J.R. Morgan: “Comparison of Buildings Response and Free Field Motions in Earthquakes” Proc. of 6th WCEE (1977)
- 4) D.Ray & D.P. Jhaveri: “Effective Seismic Input through Rigid Foundation Filtering” Proc. of 4th SMIRT, K2/13 (1977)
- 5) D.L. Bernreuter: “Assessment of Seismic Wave Effects on Soil-Structure Interaction” Proc. of 4th SMIRT, K2/14 (1977)
- 6) J.R. Whitley, et al.: “Base Response Arising from Free-Field Motions” Proc. of 4th SMIRT K2/15 (1977)
- 7) E. Kausel, et al.: “Dynamic Analysis of Embedded Structures” Proc. of 4th SMIRT, K2/6 (1977)
- 8) 山原 浩, 塩谷清人: “実測例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 No270 (1978)
- 9) 山原 浩, 塩谷清人, 平島新一, 秋野金次: “地震波の入力損失を考慮した構造物の地震応答”第5回日本地震工学シンポジウム (1978)
- 10) M. Iguchi: “A Basic Study of the Behaviour of Long Dimensional Size Buildings during Earthquake” Proc. of 6th WCEE (1977)
- 11) 井口道雄, 森下 誠: “模型実験による入力地震動の測定 (その3: 基礎の埋込み深さと入力地震動)”日本建築学会大会学



- 術講演会梗概集（関東）（1979）
- 12) J.P. Wolf & P. Oberhuber: "Travelling Wave Effects in Soil-Structure Interaction" Proc. of 5th SMIRT, K5/1 (1979)
  - 13) 原田隆典, 久保慶三郎, 片山恒雄: "地震波の有効入力のかえ方とその実測例による検討" 土木学会第15回地震工学研究発表会講演集 (1979)
  - 14) S. Hirashima, M. Kato & T. Ueshima: "Earthquake Observations and Analysis of a Nuclear Power Plant" Proc. of 7th WCEE (1980)
  - 15) 石井 清, 山原 浩, 高木真人: "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" 土木学会第35回年次学術講演概要集, I-280 (1980)
  - 16) 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)
  - 17) J.S. ベンダット, A.G. ピアソル (得丸英勝他訳): "ランダムデータの統計的処理" 培風館 (1976) pp. 133~138
  - 18) C.M. Duke, et al.: "Strong Earthquake Motion and Site Conditions: Hollywood" BSSA Vol. 60, No. 4 (1970)
  - 19) 河角 広編: "地震災害" 共立出版 (1973) pp. 175~177
  - 20) K. Kanai & S. Yoshizawa: "Some New Problems of Seismic Vibrations of a Structure, Part 1" Bulletin of Earthquake Research Institute Vol. 41 (1963)
  - 21) K. Kanai: "Transmission Coefficient of Seismic Waves to Structures" Bulletin of Earthquake Research Institute Vol. 41 (1963)
  - 22) 山原 浩: "エネルギーの平衡を考えた構造物の地震応答" 日本建築学会論文報告集 No.187 (1971)
  - 23) 平島新一, 山原 浩, 渡部征男: "東海第2発電所原子炉建屋起振実験 (その3: シミュレーション解析とその結果)" 第5回日本地震工学シンポジウム (1978)
  - 24) 竹脇高信, 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, I-198 (1980)
  - 25) E.O. Brigham: "The Fast Fourier Transform" Prentice-Hall (1974)
  - 26) 日本瓦斯協会, 液化天然ガス用貯槽保安委員会: "液化天然ガス用貯槽の保安調査について (昭和52年度 LNG 地下式貯槽に関する保安調査報告書)" (1978) pp. 247~256
  - 27) 浜田正則: "大型地下タンクの地震時挙動の観測と解析" 土木学会論文報告集 No.273 (1978)
  - 28) K. Dewa, M. Hirose, I. Saito & A. Ohira: "Earthquake Observations and Analysis of LNG Tank on Pile Foundation" Proc. of 7th WCEE (1980)
  - 29) "構造物・地盤地震動観測記録集 (5. 稲毛における地震観測, および 6. LPG タンクにおける地震観測)" 建築研究資料 No. 12 (1976)
  - 30) 南 忠夫, 長田甲斐男, 大沢 胖: "LPG 球形タンクおよび周辺地盤における地震観測結果について" 第4回日本地震工学シンポジウム (1975)
  - 31) 池田昭男, 山田敏夫, 河村荘一, 野口憲一, 萩尾堅治: "埋立軟弱地盤にたつ杭支持建物の地震観測と解析"  
 (その1), (その2), (その3) 日本建築学会大会学術講演会梗概集 (東北) (1973)  
 (その4), (その5), (その6) 日本建築学会大会学術講演会梗概集 (北陸) (1974)

