

RC 4 階校舎の実測資料による地震波の 入力損失の効果の検討

POTENTIAL LOSS OF GROUND MOTION DUE TO KINEMATIC INTERACTION IN A 4-STORY RC BUILDING

星 谷 勝*・石 井 清**

By Masaru HOSHIYA and Kiyoshi ISHII

1. は し が き

構造物の地震応答解析には構造物に作用する慣性力に地表または地中の地震加速度波形をそのまま使用している。この前提は構造物の基礎に対して地震波のすべての周波数成分が同位相、同振幅で入射することを仮定したことになる。この仮定は正しいであろうか。いま、地中基礎を考えると地動の入射波は基礎の存在によって複雑に散乱されるはずである。基礎の動きはこれら地動の動きを基礎-地盤の接触面にわたって平均化したものにならう。その中で、地動の短周期成分は基礎の幾何学的寸法に比べて波長が短いので基礎の各点で当然異なった振幅、位相ずれをもつ。そして、各点で異なる地動は相互に相殺し合い、構造物基礎に実際に入ってくる地震入力には短周期成分が弱められたものとなる。

地動を基礎版が幾何学的に拘束することによるローパスフィルターの効果は、基礎版による地震波の入力損失と名付けられている¹⁾。そして、この効果を受けて構造物基礎に入射してくる地震入力が、構造物を加振するのに実際に有効に働く地震入力である。したがって、この入力損失の効果を定性的、定量的に解明することはある種の構造物にとってはきわめて重要となる。

たとえば、原子力発電所原子炉建屋などの最近の大型構造物ではこの効果が工学的にも経済的にも重要な意味をもつことが指摘されている^{2),3)}。

入力損失の効果を理論的に解明した研究には Kausel による振動方程式に基づく定式化⁴⁾あるいは原田による波動理論による定式化などがある⁵⁾。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が明白にされ、従来の集中要素系モデルによる地震応答解析に、入力損失の効果を考慮することが理論的

に矛盾のないことがわかってきた。

また、入力損失の効果に関してはすでに数多くの研究もあり⁶⁾、实在構造物の地震観測資料を用いたいくつかの実証的研究からは入力損失の現象が実際に存在し、これを考慮したシミュレーション結果がより実際の現象に合致した結果を与えることなどが確認されている^{7),8)-9)}。

しかし、これらの実証的研究の多くは^{2),9)}、入力損失の効果を表わす簡単な数値フィルターを用いて地表面の地震加速度波形から基礎の有効入力波形を求めて、これを入力として集中要素系モデルによる地震応答解析を行うために、入力損失の効果の評価は厳密になされていない。

そこで、本研究は平面が長方形の RC 4 階建学校校舎の実測データをもとに入力損失の効果についてよりきめ細かい検討を行うことにした。解析にはその挙動が把握しやすい建物長手方向の振動に注目した。実測データには常時微動測定波形を主に用いたが、一部には地中および基礎の地震観測記録も用いている。

解析は入力損失フィルターを用いた集中要素系モデルによる地震応答解析⁹⁾と校舎長手方向をせん断壁と考え、Luco による SH 波に対する半無限弾性体中のせん断壁の解析方法¹⁰⁾を併用した。

本研究では入力損失の効果と上部建屋・基礎の質量効果(従来の動的相互作用効果)を分離することにより、前者の効果を定量的かつ定性的に明らかにする。

2. 解 析 方 法

本章では解析方法について説明する。解析方法は表-1 のようにまとめることができる。

表-1(A)は Luco による SH 波に対する半無限弾性体中に根入れされたせん断壁の解析^{10),11)}を示す。この解は純理論的に求められたものであり、上部建屋・基

* 正会員 Ph.D. 武蔵工業大学教授 土木工学科

** 正会員 工修 清水建設(株)大崎研究室, 研究員

表-1 解析方法

解析モデル		(A)	(B)	(C)
(a) 動的相互作用	上部構造	せん断壁 (連続体モデル)	1 質点系	5 質点系 (上部構造 4 質点 基礎 1 質点)
	基礎-地盤系	半無限弾性体中に埋入れ された半円形剛体基礎の 解析解*1		
(b) 入力損失	基礎-地盤系			入力損失フィルター*2
参考文献		Luco (1969)		

- *1. 解析解は動的相互作用の効果と入力損失の効果に分離可能。
- *2. 写定的な地動モデルの他に臨平地動モデルによる入力損失フィルターを使用する。

礎の質量効果と入力損失の効果との完全な分離が可能である。

表-1 (B) はやはり Luco により解が与えられたものであるが、(A) のモデルにおいて上部構造を 1 自由度系に置換したものである¹⁰⁾。

表-1 (C) は入力損失の効果を数値フィルターで表わし、構造物・基礎の質量効果を集中要素系モデルで表わしている。この方法は設計解析において入力損失を考慮するときには大変便利な方法である。3. の解析では集中要素系モデルは 5 自由度系モデルを用いる。また、入力損失の効果を表わす数値フィルターとしては次の 3 つを検討する (表-2 参照)。

- (1) Luco の解析解より求められるフィルター¹⁰⁾
- (2) 単純な 1 次元波動モデルより得られる数値フィルター^{11),12)}
- (3) 2 地点間の地動の相関性のばらつきを考慮した確率統計手法による数値フィルター¹³⁾⁻¹⁶⁾

以下、Luco による解析解および入力損失の効果を表わす数値フィルターについて説明する。

(1) Luco による解析解

Luco による解析解については参考文献 10) にわかりやすく式が誘導されている。

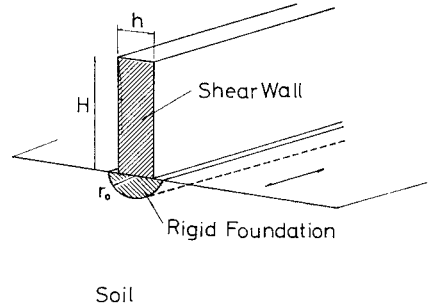


図-1 Luco による解析モデル

Luco は 図-1 に示される解析モデルについて波動論に基づく解析を行っている。解析モデルにおいて、構造物は半円形断面をもつ剛基礎に固定された幅 h 、高さ H の半無限遠方に続く弾性せん断壁に、地盤を等方等質の半無限弾性地盤と仮定している。入力地動はせん断壁に平行な方向に振幅をもち地盤を鉛直方向に波動伝播する SH 波としている。また、地盤と基礎の間は完全密着を仮定している。

解析の結果は、地表と基礎の振幅比が次式で与えられている (表-1 (A) モデル)。

$$\frac{1}{\theta} = i \frac{\pi k^s r_0 H_1^{(1)}(k^s r_0)}{2} \left\{ 1 - \left[M_b \left(\frac{\tan k^b H}{k^s H} \right) + M_0 \right] \frac{k^s r_0 H_0^{(1)}(k^s r_0)}{2 M_s H_1^{(1)}(k^s r_0)} \right\} \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 θ : 基礎から遠く離れた地表の変位と基礎の変位との比。

- $k^s = \omega/v_s$ (ω : 円振動数, $v_s (=V_s)$: 地盤のせん断波速度)
- $k^b = \omega/v_b$ (v_b : せん断壁中のせん断波速度)
- r_0 : 半円形基礎の半径
- H : せん断壁の高さ
- h : せん断壁の厚さ

表-2 入力損失の効果を表わす数値フィルターのモデル

	(1)	(2)	(3)
解析モデル	Massless Foundation 	Massless Foundation 	Massless Foundation
数値フィルター	(2) 式	(5) 式	(6) 式
参考文献	Luco (1969)	山原, Ray	Matsushima, 石井

2 地点間の地動の相関性のばらつきを考慮した確率統計的な入力モデル

$H_{2n}^{(1)}(k^s r_0)$: 引数 $k^s r_0$, オーダー $2n$ の第 1 種 Hankel 関数

M_b : 単位長さ当たりのせん断壁の質量

M_0 : 単位長さ当たりの基礎の質量

M_s : 基礎によって置き換えられた土の単位長さ当たりの質量

式 (1) は連続体モデルによる解析解であることから、入力損失の効果と基礎・せん断壁体の質量効果の両方が式 (1) の中に含まれる。質量効果を除くには式 (1) において $M_b = M_0 = 0$ とすればよく、式 (1) は { } の中が 1 となり次のような簡単な式となる。

$$\frac{1}{\theta_1} = i \frac{\pi k^s r_0 H_1^{(1)}(k^s r_0)}{2} \dots\dots\dots (2)$$

また、式 (2) は地震入射波に対する質量のない半円形剛基礎の振動解であり、入力損失の効果のみを表わす。

また、反対に式 (1) の { } 中は基礎・せん断壁の質量の効果を表わし、[] の中の第 1 項目がせん断壁に、第 2 項目が基礎にそれぞれ関係する。そして、[] にかかる係数が基礎-地盤系の相互作用ばねである。

以上述べたように式 (1) は一見複雑にみえるが、各項の物理的意味から、入力損失の効果、せん断壁・基礎の質量効果とを分けて解析することができる。すなわち、基礎と地盤との伝達関数 θ は入力損失の効果によるもの θ_1 と質量効果による伝達関数 θ_2 として

$$\theta = \theta_1 \cdot \theta_2 \dots\dots\dots (3)$$

と表わせる。

ここで、 θ_1 は式 (2) で、 θ_2 は式 (1) { } の逆数として与えられる。

さらに、Luco は上部構造を 1 自由度系としたときの解を次式で与えている (表-1 (B) モデル)。

$$\frac{1}{\theta} = i \frac{\pi k^s r_0 H_1^{(1)}(k^s r_0)}{2} \cdot \left\{ 1 - \left[\frac{M_b}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2} - 2i\lambda \frac{\omega}{\omega_0} + M_0 \right] \cdot \frac{k^s r_0 H_0^{(1)}(k^s r_0)}{2 M_s H_1^{(1)}(k^s r_0)} \right\} \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 ω_0 はせん断壁の固有円振動数、 λ は減衰定数である。

式 (4) は式 (1) においてせん断壁の質量効果に関する項が 1 自由度系の伝達関数に変わっており、上部構造の減衰効果が考慮できる。

(2) 入力損失の効果を表わす数値フィルター

表-2 に示される数値フィルターのうち、フィルター 1 は式 (2) で与えられている。また、フィルター 2 は山原による 1 次元正弦波動モデルによる解より次式で与えられる。

$$\theta_1 = \left| \frac{L_1}{\pi l_1} \sin \frac{\pi l_1}{L_1} \right| \dots\dots\dots (5)$$

式 (5) は基礎の平面的な広がりを考えているが、奥行方向には同じ波動が伝播すると考えている。ここで、 l_1 は基礎版の長さ、 L_1 は地表面に現われる波動モードの波長である。また、 θ_1 は自由地表面における地動の変位と基礎の変位との比であり、入力損失の効果のみを表わす。

上記のフィルター 1, 2 は地動の波動モードを確定的なものと考えているが、実際の地動は不確定な要因により異なる 2 地点においてばらつきをもつ。

この特性を考慮したフィルターとして次のフィルターを考える。

$$\theta_1 = \frac{2\{(l_1 \alpha + e^{-l_1 \alpha} - 1)(l_2 \alpha + e^{-l_2 \alpha} - 1)\}^{1/2}}{(l_1 \alpha)(l_2 \alpha)} \dots\dots\dots (6)$$

ただし、 α は異なる 2 地点の地動の相関度を示すパラメーターであり、次式で与えられる。

$$\alpha = (a + b\omega) / V_s$$

ここで、 a, b は実測資料あるいは経験的に与えられる定数である¹⁶⁾。

式 (6) は松島による 1 次元波動モデル¹³⁾ を (平面) 2 次元モデルに拡張したものであるが、2 地点間の地動には位相ずれを与えず、振動数成分ごとの振幅レベルの変動のみを考慮している。式 (6) の誘導を Appendix に示す。

3. 常時微動測定結果とその解析

測定の対象とした建物は武蔵工業大学 8 号館である (図-2 参照)。この建物は鉄筋コンクリート 4 階建校舎

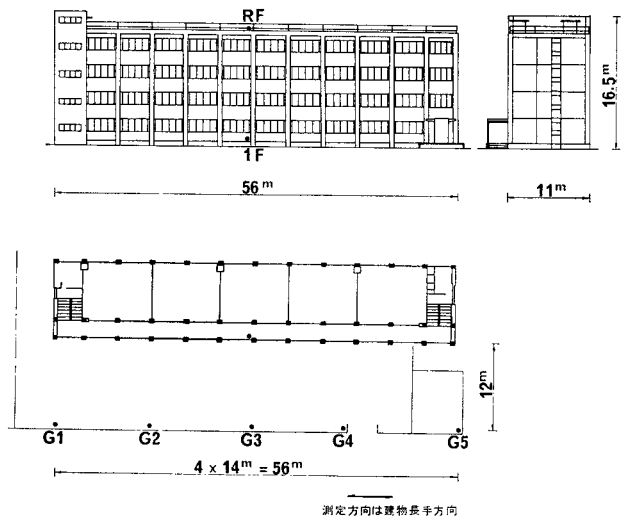


図-2 RC 4 階校舎外観

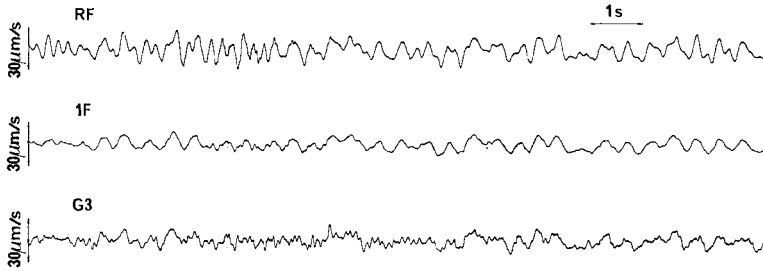


図-3 常時微動波形記録 (RF, 1F, GL)

であり、外形寸法は長辺 56 m, 短辺 11 m, 高さ 16.5 m である。また、基礎は木杭 (φ 16 cm × l 16 m) に支持されたフーチング基礎となっている。解析方向は、その挙動が単純であることから、建物長手方向とする。

図-3 は屋上 (RF), 1階床 (1F), 地盤 (G3) の常時微動波形記録である。波形記録からは1階床では地盤と比べ短周期成分が少ないこと、また、1階と屋上の波形は建物の剛性が高いことから、この周波数領域ではほぼ同位相で振幅のみが屋上でいくぶん大きくなっている。

各点相互の特性は伝達特性を求めることによって、さらにはっきりする。図-4 には地盤と1階床との伝達関数を、そして図-5 には1階と屋上との伝達関数を示す。図-4 からは伝達関数が振動数 0 Hz で1から始まり、高振動数領域でその振幅比が小さくなるという入力

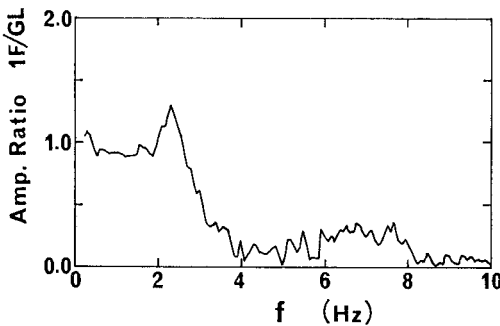


図-4 地盤と1Fとの伝達関数

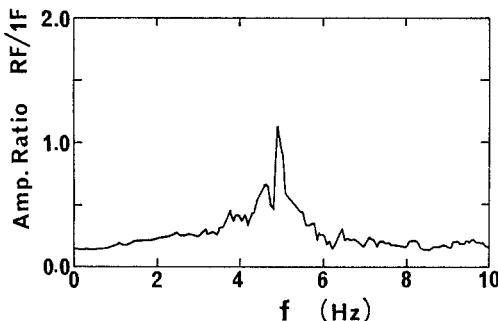


図-5 1FとRFとの伝達関数

損失の効果のほかに、2~4 Hz 周辺には微妙な凹凸があり基礎・上部構造の質量効果が現われている。

また、図-5 からは上部建屋の固有振動数が 4.75 Hz 近辺にあり、その減衰定数が 8~10% であることがわかる。なお、図-4, 5 は常時微動測定による結果であるが、地震時にも同じ結果となるか

は明らかでない。このため、以前より行われていた地中 (GL -16 m) と基礎との地震観測資料から基礎/地盤 (地表) の伝達関数を求めた。使用した地震は 1979 年 10 月 28 日千葉県東方沖で発生した $M=5.5$, 震央距離 $4=113$ km, 震源深さ $D=90$ km の地震である。ここで地表の波形は重複反射理論を用いて、地中の波形から計算して求めている¹⁷⁾。結果を 図-6 に示す。図には 図-4 の結果も合わせて示している。図-6 からは常時微動測定の結果が高振動数において振幅比が小さくなることを除けばその特徴は両者でよく一致している¹⁸⁾。

次に、地盤 G1~G5 における常時微動の同時観測波形を 図-7 に示す。これは入力損失の効果を検討するためのものである。すなわち、一定間隔に並べられた地盤上の観測波形はその振幅、位相がわずかに乱れている。いま、質量のない剛な基礎版がこれらの観測点を覆うように設置されたとすると、この基礎の動きは基礎直下の地盤の動きを平均して与えられる。式で示せば、基礎の動き \bar{u} は地盤の動きを u として

$$\bar{u} = \frac{1}{l} \int_0^l u(x) dx \dots\dots\dots (7)$$

で与えられる。式 (7) を離散化表示すれば

$$\bar{u} = \frac{1}{l} \sum_{i=1}^n u_i dl \dots\dots\dots (8)$$

となる。ここで、 $dl=l/n$, n は整数。そして、この架空の基礎の動き \bar{u} と地盤の代表点の動き u との伝達関数を求めれば、その結果は長さ l の1次元基礎の入力損失の効果を表わしていることになる。

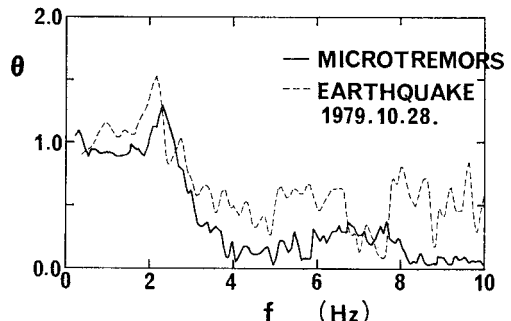


図-6 地盤と1Fとの伝達関数

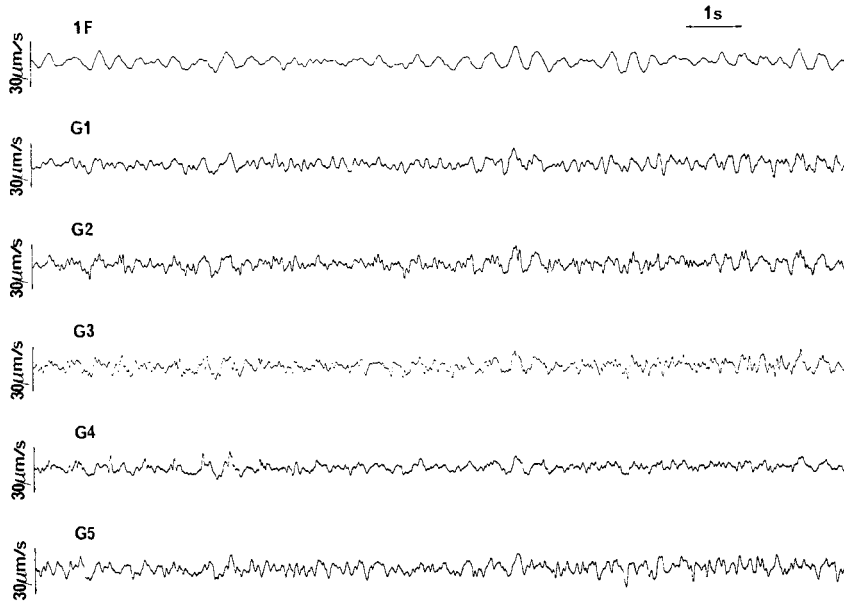


図-7 地盤 G 1~G 5 の常時微動波形記録

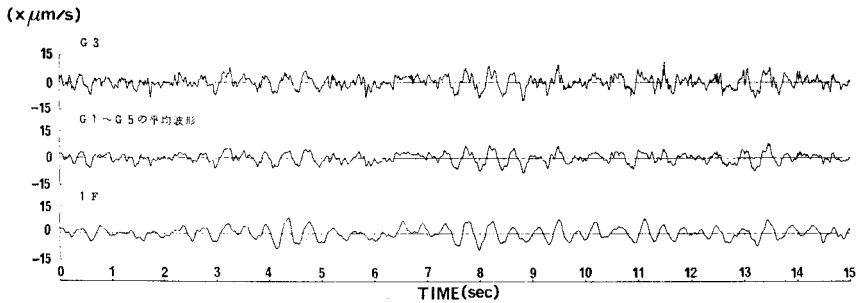
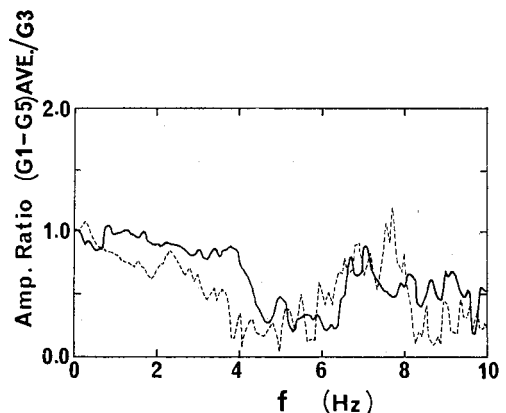


図-8 G 1~G 5 の平均波形

この考え方によって計算した 図-7 の平均波形を 図-8 に示す。図には G 3, G 1~G 5 の平均波形そして 1F 床の波形を示す。平均波形は G 3 と比べ短周期成分が落ち、1F 床の観測波形に近づいている (1F 床の観測波形に一致させるにはさらに動的相互作用が考慮されねばならない)。

また、図-9 には平均波形と G 3 との伝達関数を示す。この結果は入力損失の効果の評価するための資料となる (同図の破線は 図-4 の基礎/地盤 (地表) の伝達関数 $(\theta = \theta_1, \theta_2)$ を後述する解析 (C) より求めた動的相互作用の効果 θ_2 で割り、入力損失の効果 θ_1 を推定したものである。両者は 2~4 Hz の振幅比に差があるが、全体的な傾向は似ている)。

図-10 は 図-9 の結果に対して 表-2 のフィルターを書き入れたものである。ここで、フィルター 1 は SH 波の伝播モデルであることから建物長手方向には入力損失の効果はない (図-1 参照)、ただし、フィルター 1 の場合にも半円形断面に沿っての入力損失の効果はあり、



--- 実測資料より求めた基礎/地盤の伝達関数 $(\theta = \theta_1, \theta_2)$
 図-4) を解析 (C) より求めた動的相互作用の効果 θ_2 で割り入力損失の効果 θ_1 を推定したもの。

図-9 G 1~G 5 の平均波形と G 3 との伝達関数

その効果の程度はあとに示すが他のフィルターとほとんど変わらない。フィルター 2 では見掛けの波動伝播速度

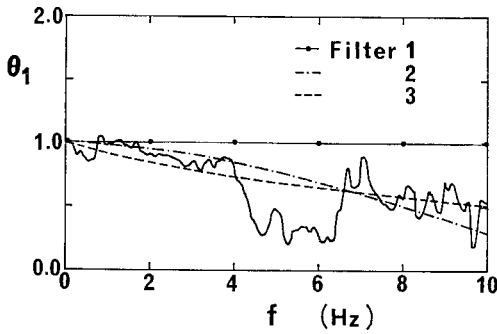


図-10 入力損失フィルター

V を 756 m/s として $L=V/f$ (f : 振動数) としている (フィルター定数 $\tau=l/L$ は 0.074 s (13.5 Hz) となる). また, フィルター 3 では $V_s=120 \text{ m/s}$, a, b を経験的に $a=0.0, b=0.15$ として, l_1 を 56 m ($l_2=0 \text{ m}$) としている^{14)~16)}.

図ではフィルター 3 が実測結果の特徴を包絡的によくとらえている. また, フィルター 2 も特徴をよくとらえているが, 仮定した見掛けの波動伝播速度は計算結果が実測結果に近づくように仮定したものであり, 常時微動波形の相互相関関数には見掛けの時間遅れ (time lag) はなかった. 上記の考察よりモデルおよび使用するパラメーターの妥当性の高いフィルター 3 を表-1 (C) の解析に用いることにした.

表-1 による解析結果を 図-11 に示す.

ここで, Luco による解析モデル (A), (B) のパラメーターを表-3 に, また, 表-4 には解析

(C) のモデルを示す. ここで, モデルのばね定数は上部構造では各柱の曲げ剛性の合計から, また基礎-地盤系のばねは杭による補剛効果は小さいとしてこれを無視して半無限弾性体上の円形剛基礎の振動解で与えた (ここで, 減衰係数は経験から弾性振動解の 5 割を見込んだ)^{19)~21)}.

図-11 の上から第 1 列は入力損失の効果 θ_1 を, 第 2 列は基礎・上部建屋の質量効果 θ_2 を, そして第 3 列は θ_1 と θ_2 の効果を掛け合わせたものであり, この図には実測結果も合わせて書き込んである.

図からは次のことが考察できる.

(1) 解析 (A), (B) の θ_1 は同一のものであるが,

表-3 (A), (B) モデルの解析パラメーター

解析モデル	パラメーター	備 考
(A), (B)	$v_s = 120 \text{ m/sec}$	(地盤資料 N 値より換算)
	$v_b = 314 \text{ m/sec}$	$v_b = 4Hf_0 = 4 \times 16.5^{\text{m}} \times 4.75^{1/4} = 313.5^{1/4}$
	$r_0 = 5.5 \text{ m}$	$r_0 = b/z$
	$H = 16.5 \text{ m}$	
	$h = 11 \text{ m}$	
	$M_b = 4.63 \text{ ts}^2/\text{m}$	単位体積重量 0.25 t/m^3
	$M_0 = 7.76 \text{ ts}^2/\text{m}$	1.6 t/m^3
	$M_s = 7.76 \text{ ts}^2/\text{m}$	1.6 t/m^3
	$\omega_0 = 29.8 \text{ rad/s}$	$f_0 = 4.75 \text{ Hz}$
	$\lambda = 0.08$	

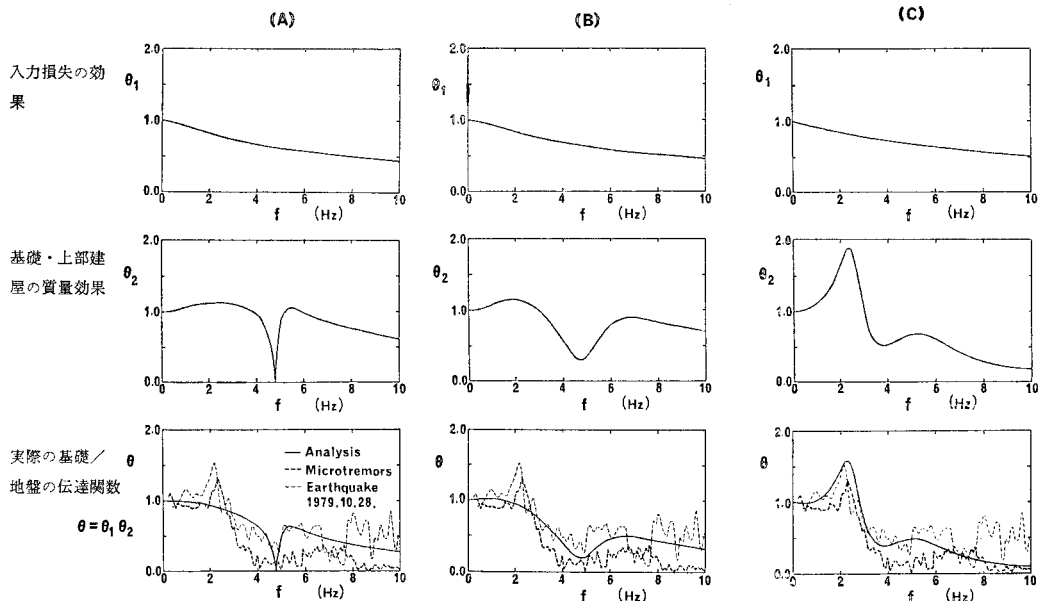
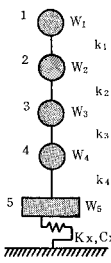


図-11 解析結果

表-4 解析 (C) の解析モデル

解析モデル				
入力損失の効果を表す数値フィルタ θ_1	$\theta_1 = \frac{2 \{ (\delta \alpha + e^{-\delta \alpha} - 1) (\delta \alpha + e^{-\delta \alpha} - 1) \}^{1/2}}{(\delta \alpha) (\delta \alpha)}$ <p>ここで、$\alpha = (a + b\omega) / V_s$, $a = 0.0$, $b = 0.15$ $\delta_1 = 5.6 \text{ m}$, $\delta_2 = 11 \text{ m}$, $V_s = 120 \text{ m/s}$</p>			
基礎・上部構造の質量効果 θ_2	集中要素系モデル	重量	ばね剛性	減衰
		(t) $W_1 = 526.9$ $W_2 = 582.1$ $W_3 = 593.5$ $W_4 = 603.9$ $W_5 = 255.2$	(10^3 t/m) $k_1 = 1.865$ $k_2 = 2.098$ $k_3 = 2.331$ $k_4 = 2.564$	各部粘性減衰 0.536 % 減衰係数 $C_x = 6.434 \times 10^2 \text{ t/s/cm}$

振動数に対して単調減少の関数であり、0 Hz で 1.0 で始まり、10 Hz で約 0.5 になる。また、解析 (C) の θ_1 はフィルタ 3 より求められたものである。(C) と (A), (B) では入力地動の取扱い、モデルは大幅に違うが、傾向、値にほとんど差はない。

(2) θ_2 の傾向は解析法によって相当の違いがある。すなわち、(A) では上部建屋の固有振動数 4.75 Hz における急激な凹部を除けば全体的には滑らかな関数である。(B) では (A) のモデルに上部建屋の減衰効果を加味していることから、4.75 Hz の凹部は (A) と比べ滑らかになっている。また、(B) では 2 Hz に 1 つのピークがあり、全体的には振動数に対して減少傾向がある。(C) の θ_2 は 2.3 Hz に振幅比 1.7 のピークをもち、3.8 Hz に谷をもつ複雑な関数として与えられる。

(3) $\theta (= \theta_1, \theta_2)$ における解析と実測との対応からは、(A) では谷の位置がおおよそ合う程度的一致しか示していないが、(B), (C) では実測の特徴がよくとらえられていることがわかる。すなわち、(B) では谷の部分また、全体に右下がりの傾向がとらえられており、(C) ではさらに実測にある 2 Hz のピークもとらえられている。

(4) (C) では質量効果 θ_2 が入力損失の効果 θ_1 よりも相対的に強く、実測結果は解析による θ_2 のみによってその傾向がほぼとらえられている。しかし、図-10 に示したように入力損失の効果は確かに存在しており、これを無視することも問題があろう。むしろ、集中要素系モデルの減衰の与え方などによって θ_2 を改良すべくかもしれない。(B) の結果では入力損失の効果 θ_1 が解析結果を実測結果に近づける大切な要素となっている(入力損失の効果を解析に新たに考慮しなくとも従来の集中要素系解析で現象は十分に説明できるはずだとい

意見もあるが、それは今回の解析と同じような経験をもとにしていると考えられる。そしてこの考え方も近似的に処理としていく実際の問題解析上は正しいといえるかもしれない。しかしながら、ある種の構造物たとえば原子力発電所原子炉建屋などの大型構造物になるとこの現象は地震応答解析上重要な要素となり、実用上も無視できないことが指摘されている^{3), 8), 9)}。したがって、今後の研究課題として実際上の観点からどのような条件のもとで問題にかかわる現象を解析に取り入れる必要があるのかを明らかにする必要がある。

4. 結論

本研究では RC 4 階校舎の実測データをもとに入力損失の効果を検討した。解析方法は、入力損失フィルタを用いた集中要素系モデルによる地

震応答解析と校舎長手方向をせん断壁と考慮 Luco による SH 波に対する半無限弾性体中のせん断壁の解析方法を用いた。また、入力損失の効果を評価するために地表において 1 次元アレーの常時微動を測定し、その平均波形と原波形との伝達関数を求め入力損失フィルタの適合度を検討した。結果は確率入力地動モデルより得られる入力損失フィルタは実測結果をよく近似することがわかった(図-10 参照)。

基礎/地盤(地表)の伝達関数については Luco の解析モデルにおいて上部建屋を 1 自由度系とした解析結果あるいは入力損失フィルタを用いた集中要素系モデルによる解析結果が実測結果の特徴をよくとらえていた(図-11 参照)。特に後者は 8 Hz 以上において、その振幅比をいくぶん下回るが 0~8 Hz では実測結果の特徴を細部にわたりとらえている。

また、今回の解析対象構造物では入力損失の効果は基礎・上部建屋の質量効果と比較して必ずしも大きくないが、その効果が実際に存在し、これを考慮することによってシミュレーション結果が改善されることが確認された。

謝辞：最後に本研究に際して、武蔵工業大学事務局中山局長ならびに山田学生課長(当時管理課長)をはじめとする武蔵工業大学関係各位から多大の協力と便宜を得たことを記し深謝致します。

Appendix A—確率入力地動モデルによる入力損失フィルタ

本文中式 (6) の誘導を以下に示す^{13)~16)}。

いま、図一A・1 に示すような 2 次元的な広がりをもつ質量のない剛体基礎を考える。

剛体基礎の動きは、その下の地盤の動きを平均化したものになると考えられる。すなわち、

$$\ddot{u}(t) = \frac{1}{A} \iint_A \ddot{u}_0(x, y, t) dx dy \dots\dots\dots (A \cdot 1)$$

$$\ddot{u}(t) \ddot{u}(t+\tau) = \frac{1}{l_1^2 l_2^2} \int_0^{l_1} \int_0^{l_1} \int_0^{l_2} \int_0^{l_2} \ddot{u}_0(x, y, t) \cdot \ddot{u}_0(x', y', t+\tau) dx dy dx' dy' \dots\dots\dots (A \cdot 2)$$

ここで、定常状態を考えると、自己相関関数は

$$R_{\ddot{u}}(\tau) = \frac{1}{l_1^2 l_2^2} \int_0^{l_1} \int_0^{l_1} \int_0^{l_2} \int_0^{l_2} R_{\ddot{u}_0}(x, y, x', y', \tau) \cdot dx dy dx' dy' \dots\dots\dots (A \cdot 3)$$

となる。これをフーリエ変換すると

$$S_{\ddot{u}}(\omega) = \frac{1}{l_1^2 l_2^2} \int_0^{l_1} \int_0^{l_1} \int_0^{l_2} \int_0^{l_2} S_{\ddot{u}_0}(x, y, x', y', \omega) \cdot dx dy dx' dy' \dots\dots\dots (A \cdot 4)$$

ここで、地動の相互スペクトルを次のようにおく。

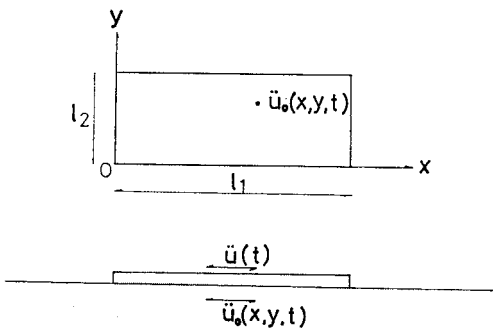
$$S_{\ddot{u}}(x, y, x', y', \omega) = S_{\ddot{u}_0}(\omega) e^{-\alpha(x-x'+|y-y'|)} \cdot e^{i\theta(x, y, x', y', \omega)} \dots\dots\dots (A \cdot 5)$$

位相ずれ $\theta(x, y, x', y', \omega)$ を無視して式 (A・4) に式 (A・5) を代入すると、

$$\begin{aligned} S_{\ddot{u}}(\omega) &= \frac{1}{l_1^2 l_2^2} \int_0^{l_1} \int_0^{l_1} \int_0^{l_2} \int_0^{l_2} S_{\ddot{u}_0}(\omega) e^{-\alpha(x-x'+|y-y'|)} \cdot dx dy dx' dy' \\ &= \frac{S_{\ddot{u}_0}(\omega)}{l_1^2 l_2^2} \int_0^{l_1} \int_0^{l_1} e^{-\alpha x-x'} dx dx' \\ &\quad \cdot \int_0^{l_2} \int_0^{l_2} e^{-\alpha y-y'} dy dy' \\ &= \frac{S_{\ddot{u}_0}(\omega)}{l_1^2 l_2^2} \cdot \frac{2(l_1\alpha + e^{-l_1\alpha} - 1)}{\alpha^2} \\ &\quad \cdot \frac{2(l_2\alpha + e^{-l_2\alpha} - 1)}{\alpha^2} \dots\dots\dots (A \cdot 6) \end{aligned}$$

$S_{\ddot{u}}(\omega) = |H(\omega)|^2 S_{\ddot{u}_0}(\omega)$ とおけば

$$\theta_1 = |H(\omega)| = \frac{2\{(l_1\alpha + e^{-l_1\alpha} - 1)(l_2\alpha + e^{-l_2\alpha} - 1)\}^{1/2}}{(l_1\alpha)(l_2\alpha)} \dots\dots\dots (A \cdot 7)$$



図一A・1 解析モデル

が得られる。ただし、 $\alpha = a + b\omega$ で、 a および b は経験的に定められる定数である。

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，No. 165, 1969 および No. 167, 1970.
- 2) 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，No. 280, 1978.
- 3) 星谷 勝・石井 清・横田佳幸：入力損失の効果を考慮した地震応答解析例，土木学会第 36 回年次学術講演会講演概要集，I-234, 1981.10.
- 4) Kausel, E., R.V. Whitemann, F. Elsasbee and J.P. Morray: Dynamic Analysis of Embedded Structures, Proc. of the 4th SMIRT, K 2/6, 1977.
- 5) 原田隆典・久保慶三郎・片山恒雄：地震波の有効入力への考え方とその実測例による検討，第 15 回土木学会地震工学研究発表会概要集，1979.
- 6) 入力損失関係の文献については次の資料を参照されたい。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.
- 7) 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 回年次学術講演会講演概要集，I-280, 1980.
- 8) 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，No. 312, 1982. 2.
- 9) Hirashima, S., M. Kato and T. Ueshima: Earthquake Observation and Analysis of a Nuclear Power Plant, Proc. of the 7th WCEE, 1980.
- 10) Luco, J.E.: Dynamic Interaction of a Shear Wall with the Soil, ASCE, Vol. 95, No. EM 2, 1969.
- 11) Duke, C.M., J.E. Luco, A.R. Carriveau, P.J. Hradilek, R. Lastrico and D. Ostrom: Strong Earthquake Motion and Site Conditions: Hollywood, BSSA, Vol. 60, No. 4, 1970.
- 12) Ray, D. and D.P. Jhaveri: Effective Seismic Input through Foundation Filtering, Nuclear Engineering and Design, Vol. 45, 1978.
- 13) Matsushima, Y.: Spectra of Spatially Variant Ground Motions and Associated Transfer Functions of Soil-Foundation Systems, 第 4 回日本地震工学シンポジウム講演集，1975.
- 14) Hoshiya, M. and K. Ishii: Evaluation of Kinematic Interaction of Soil-Foundation Systems by a Stochastic Model, Int. Conf. of Soil Dynamics and Earthquake Engineering (England), July, 1982.
- 15) 石井 清：確率論手法による地震波の入力損失の検討，第 16 回土木学会地震工学研究発表会概要集，1981.
- 16) 石井 清：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.
- 17) 横田治彦・渡辺弘之・塩谷清人・石井 清：東京周辺の軟弱地盤における地中地震観測，清水建設研究所報，Vol. 30, 1979.
- 18) 石井 清・赤尾嘉彦・小山和夫：常時微動測定による入力損失の効果の検討，土木学会第 36 回年次学術講演会講演概要集，第 I 部門，1981.
- 19) 石井 清：基礎-地盤系の等価ばね，等価減衰，土木学会論文報告集，ノート，第 289 号，1979.
- 20) 杉山 滋・石井 清：埋込みのある基礎の水平・回転ばねの評価，土木学会第 35 回年次学術講演会講演概要集，第 I 部門，1980.
- 21) 山原 浩：環境保全のための防振設計，4. 地業の効果，彰国社，1974.