地震観測に基づく基礎有効入力動の抽出とその評価指標に関する研究

EXTRACTION OF EFFECTIVE INPUT MOTIONS TO STRUCTURES BASED ON EARTHQUAKE OBSERVATIONS AND A MEASURE FOR THE INPUT MOTIONS

川島 学^{*1}, 井口道雄^{*2}, 箕輪親宏^{*3}

Manabu KAWASHIMA, Michio IGUCHI and Chikahiro MINOWA

The response of foundation during earthquakes is referred to as an effective input motion (EIM). It expresses total interaction effects during earthquakes. This paper discusses what will be an appropriate measure to evaluate the EIM based on observed earthquake motions. The main conclusions obtained in this study can be summarized as follows. (1) A measure for the EIM, which is defined as a ratio of square root of the integrated squared-motions, has shown close relation to a transfer function of the system. (2) The measure for EIM corresponding to equivalent predominant frequencies of the ground motions fits well to the transfer function estimated from observed records. (3) The component of kinematic interaction is predominant in lower frequencies and the effect of inertial interaction becomes comparable in magnitude to kinematic interaction with increase of frequency.

Keywords: Earthquake engineering, Soil-structure interaction, Effective input motion, Earthquake observation

地震工学, 建物と地盤との動的相互作用, 基礎有効入力動, 地震観測

1. はじめに

地震時に建物の上部構造に入力となって作用する地震動を、基礎有効入力動、有効入力動あるいは実効入力などと呼ぶ^{1)~4)}。この基礎有効入力動を地震観測を通して実証的に把握することは、動的相互作用効果が建物への地震入力に及ぼす影響を明らかにする上で、ひいては建物に対する設計用入力地震動を決定する上で極めて重要となる。基礎有効入力動は、地盤と建物基礎の同時地震観測を基に抽出することが出来るが、地震観測記録を基礎有効入力動の視点から分析した研究は少ない^{1), 2), 5)~8)}。

安井らは¹⁾、1995年兵庫県南部地震の強震観測記録を分析し、上部建物に入力となって有効に作用する地震動の最大値は、地表での地震動に対して、水平加速度で約30%、水平速度で約10%の入力低減があることを示した。井口らは²⁾、大型振動台基礎と周辺地盤での同時地震観測記録を分析し、地表での地震動に対する基礎有効入力動の低減は、地震動に含まれる周波数特性の影響を顕著に受けること、基礎有効入力動は基礎に入射する地震波をもとに数値計算によって精度良く推定できることを示した。Sarmaらは³⁾、多くの基礎-地盤系の地震観測記録をもとに基礎有効入力動に相当する基礎

の最大水平加速度応答の推定式を提案している。Stewartらは^{6), 7)}、57地点で採録された地表と基礎レベルの地震観測記録を基に、両者の最大値間の関係、さらには観測記録の応答スペクトルの比を用いて基礎有効入力動を評価した。その結果、埋め込みのない直接基礎では入力の低減は殆ど認められないこと、埋め込み基礎を有する構造物では、応答スペクトル比で約20%の入力低減があることを示した。小島らは⁸⁾、地表の地震動に対する基礎有効入力動の低減を入力損失と捉え、基礎の大きさ、基礎の埋め込み深さ、建物高さが異なる9棟の中低層建物の地震観測記録を入力損失の観点から詳細に分析している。

地表での地震動に対して、上部構造に入力となって作用する地震動の割合は、(基礎応答/地表地震動)の比によって表現でき、この比は基礎有効入力動の評価指標としての意味を持つ。既往の研究では、この基礎有効入力動の評価指標として地表と基礎の水平加速度及び速度波形のピーク値の比を用いて評価したものが多い^{1), 2), 5)~8)}。一方、基礎応答と地表地震動の関係を周波数領域で表したものは基礎-地盤系の伝達関数を意味し、地震動に含まれる周波数成分に影響されない安定したものとなる。小島らは⁸⁾、地表での最大加速

^{*1} 三井住友建設(株) 修士(工学)
(元 東京理科大学理工学研究科 大学院生)

^{*2} 東京理科大学理工学部建築学科 教授・工博

^{*3} 独立行政法人防災科学技術研究所 博士(工学)

Sumitomo Mitsui Construction Co. Ltd., M. Eng.
(Former Graduate Student, Dept. of Science and Engineering, Tokyo Univ. of Science)
Prof., Dept. of Arch., Faculty of Science and Engineering, Tokyo Univ. of Science,
Dr. Eng.
National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, Dr. Eng.

度(PGA)及び最大速度(PGV)から定まる地震動の等価卓越振動数に対応する地盤-基礎系の伝達関数の値は、地表と基礎での地震動のピーク加速度比と極めて良く対応することを示し、ピーク加速度比が基礎有効入力動の簡易な指標となることを示したが、その根拠については言及していない。また、後述するように基礎有効入力動は水平入力動と回転入力動の2つの成分から構成されるが、回転入力動について観測記録を基に系統的に論じた研究は殆どない²⁾。

以上を踏まえ本論文では、地表での地震動に対する基礎有効入力動の割合を表す新たな評価指標として、両波形の2乗積分値の比を提案し、この比が基礎有効入力動の周波数伝達関数と関連する理論的根拠を示すと共に、つくば市にある(独)防災科学技術研究所の大型振動台基礎とその周辺地盤で観測された中小地震記録を用いて、2乗積分値を用いた評価指標の有効性を検証する。さらに、振動台基礎の観測記録から回転成分の基礎有効入力動を抽出し、その特性を明らかにする。

2. 基礎有効入力動の評価指標

2.1 基礎有効入力動の式表現

図1には上部構造を1質点とする地盤-基礎-上部構造のモデルが示してある。この系に地震波が入射した時の上部質点の振動方程式は、座標を図1のように定めれば以下のように表せる。

$$m_s \ddot{u}_d + c_s \dot{u}_d + k_s u_d = -m_s (\ddot{\Delta}_H + H_s \ddot{\Phi}) \quad (1)$$

ここで、 m_s 、 c_s 、 k_s 、 H_s は上部質点の質量、減衰係数、ばね定数、質点高さを、また u_d は上部質点の弾性変位、 $\ddot{\Delta}_H$ と $\ddot{\Phi}$ は基礎上面の水平加速度と回転の角加速度を表す。式(1)の右辺が上部質点に対して入力となって作用する基礎有効入力動であり、これは図2(a)に示すように、基礎固定モデルの基部に入力として加えるべき水平動と回転動を意味する。

図2(b)には、地震時に基礎が受ける入射波と上部質点からの加振力が示してある。この図の基礎上面の応答は上部質点に対する基礎有効入力動となるが、基礎の応答は基礎を剛とすると次のように表現できる。

$$\begin{Bmatrix} \Delta_H \\ \Phi \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \Delta_H^* \\ \Phi^* \end{Bmatrix} - \begin{bmatrix} K_{HH} & K_{HR} \\ K_{RH} & K_{RR} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} M_0 & -h_G M_0 \\ -h_G M_0 & J_0 + h_G^2 M_0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{\Delta}_H \\ \ddot{\Phi} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{HH} & K_{HR} \\ K_{RH} & K_{RR} \end{bmatrix}^{-1} \begin{Bmatrix} P_H \\ M_R \end{Bmatrix} \quad (2)$$

ここで、 $\{\Delta_H^*, \Phi^*\}^T$ は基礎入力動の水平と回転成分、 M_0 、 J_0 は基礎の質量と重心に関する慣性モーメント、 h_G は基礎重心から基礎上面までの高さ、 $\{P_H, M_R\}^T$ は上部質点からの加振力を表す。また、 $\begin{bmatrix} K_{HH} & K_{HR} \\ K_{RH} & K_{RR} \end{bmatrix}$ は基礎上面に関する地盤のインピーダンス関数を表す。

式(2)から観察されるように、基礎有効入力動は基礎入力動、基礎自身の慣性力による応答、上部質点からの加振力による応答の3つの成分が合成されたものとなる。式(2)の右辺第1項が入力の相互作用、第2項と第3項が慣性の相互作用の成分となる。当然の事なが

図1 地盤-基礎-上部構造系モデル

(a) 水平動と回転動を受ける (b) 基礎に作用する入射波と上部質点の加振力

図2 基礎有効入力動の概念

ら上部構造がない基礎-地盤系では、式(2)の右辺第3項は消える。この場合には、これらの各成分のうち基礎自身の慣性力による成分と基礎入力動の成分は、基礎に対する地盤のインピーダンス関数が求まっていれば基礎有効入力動の観測記録を基に以下のように分離して評価できる。すなわち、

$$\begin{Bmatrix} \Delta_H^C \\ \Phi^C \end{Bmatrix} = \omega^2 \begin{bmatrix} K_{HH} & K_{HR} \\ K_{RH} & K_{RR} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} M_0 & -h_G M_0 \\ -h_G M_0 & J_0 + h_G^2 M_0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta_H \\ \Phi \end{Bmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{Bmatrix} \Delta_H^* \\ \Phi^* \end{Bmatrix} = \left([E] - \omega^2 \begin{bmatrix} K_{HH} & K_{HR} \\ K_{RH} & K_{RR} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} M_0 & -h_G M_0 \\ -h_G M_0 & J_0 + h_G^2 M_0 \end{bmatrix} \right) \begin{Bmatrix} \Delta_H \\ \Phi \end{Bmatrix} \quad (4)$$

ここに、 $[E]$ は単位行列であり、 $\{\Delta_H^C, \Phi^C\}^T$ は基礎自身の慣性力による基礎応答を表す。

2.2 基礎有効入力動の評価指標の提案

図1に示すように、自由地盤の地動加速度を $a_g(t)$ 、基礎の水平加速度応答を改めて $a_f^A(t)$ と表し、それぞれのFourier変換を $A_g(\omega)$ 、 $A_f^A(\omega)$ と記す。地動に対する基礎水平動の伝達関数を $H_g^A(\omega)$ と表せば、次の関係が成り立つ。

$$\int_{-\infty}^{\infty} |A_f^A(\omega)|^2 d\omega = \int_{-\infty}^{\infty} |H_g^A(\omega)|^2 |A_g(\omega)|^2 d\omega \quad (5)$$

式(5)の左辺の積分は、Parsevalの定理により次式のように表せる。

$$\int_{-\infty}^{\infty} |A_f^A(\omega)|^2 d\omega = 2\pi \int_0^{\infty} |a_f^A(t)|^2 dt \quad (6)$$

また、式(5)の右辺の積分に対して、伝達関数の最大値を $|H_g^A(\omega)|_{\max}$ 、最小値を $|H_g^A(\omega)|_{\min}$ とおけば、次式が成り立つ。

$$\begin{aligned} |H_g^A(\omega)|_{\min}^2 \int_{-\infty}^{\infty} |A_g(\omega)|^2 d\omega &< \int_{-\infty}^{\infty} |H_g^A(\omega)|^2 |A_g(\omega)|^2 d\omega \\ &< |H_g^A(\omega)|_{\max}^2 \int_{-\infty}^{\infty} |A_g(\omega)|^2 d\omega \end{aligned} \quad (7)$$

従って、 $|H_g^A(\omega)|_{\min} < \alpha_a^A < |H_g^A(\omega)|_{\max}$ を満足する適当な α_a^A に対して、式(5)の右辺の積分は次式のように表せる。

$$\int_{-\infty}^{\infty} |H_g^A(\omega)|^2 |A_g(\omega)|^2 d\omega = 2\pi (\alpha_a^A)^2 \int_0^{\infty} |a_g(t)|^2 dt \quad (8)$$

式(6)、(8)を式(5)の両辺に代入すれば、 α_a^A は次式のように表わせる。

$$\alpha_a^A = \sqrt{\int_0^{\infty} |a_f^A(t)|^2 dt} / \sqrt{\int_0^{\infty} |a_g(t)|^2 dt} \quad (9)$$

前述のように $|H_g^A(\omega)|_{\min} < \alpha_a^A < |H_g^A(\omega)|_{\max}$ であるから、 α_a^A は地動に対する基礎応答の伝達関数に関連する係数で、この係数は基礎と地動の水平加速度応答の2乗積分値（全パワー）の平方根の比としての意味を持つ。本論文ではこの係数を水平の加速度有効入力係数と呼ぶことにする。

同様に速度波形についても、地動速度を $v_g(t)$ 、基礎の速度応答を $v_f(t)$ として水平の速度有効入力係数を

$$\alpha_v^A = \sqrt{\int_0^{\infty} |v_f^A(t)|^2 dt} / \sqrt{\int_0^{\infty} |v_g(t)|^2 dt} \quad (10)$$

と定義する。

同様にして、基礎の角加速度応答を $a_g^{\phi}(t)$ として角加速度有効入力係数を次式で定義する。

$$\alpha_a^{\phi} = \sqrt{\int_0^{\infty} |L \cdot a_f^{\phi}(t)|^2 dt} / \sqrt{\int_0^{\infty} |a_g(t)|^2 dt} \quad (11)$$

ここで、 L は α_a^{ϕ} を無次元化するために導入した基準長さで、本論文では $L=1\text{m}$ とする。

3. 振動台基礎の概要と観測地震動

式(9)～(11)で定義した水平の加速度有効入力係数、水平の速度有効入力係数、回転の角加速度有効入力係数を地震観測記録に適用して求めた結果について以下に示す。観測記録は文献2)で用いたものと同じで、(独)防災科学技術研究所の大型振動台基礎と周辺地盤で採録された19地震を分析対象とする。

3.1 振動台基礎と地震観測の概要

大型振動台基礎の概要を図3に示す。この基礎の平面形は長辺方向39m×短辺方向25mであり、深さ8.2mの埋め込みを有し、締まった砂層に直接支持されている。本論文では基礎の長辺方向を「X方向」、短辺方向を「Y方向」と呼ぶ。この地点では、地中-40mまでの地盤構成と物性値が調査されているが、詳細は他に譲る^{2),9)}。

自由地盤の地震観測は、基礎中心から約100m離れた地点において、地中-1m、-40mの深さに埋設された加速度計により行われた。以下、地中-1mの観測記録を地表記録と呼ぶ。一方、振動台基礎の地震観測は、図3に示すように、基礎の各所に配置された加速度計を用いて行われた。基礎の応答は、水平動については地表観測点（GL-1m）と同じレベルにあるS4の波形で代表させ、回転動（Y軸に関する回転）はS2とS6の上下動記録から算定する。なお、この

図3 大型振動台基礎の概要と地震計配置

表1 地震記録の諸元

Eq No.	発生日 年 月 日	発生場所 北緯 東経	深さ (km)	規模 (M)	地表最大加速度 X(gal) Y(gal)	グループ
1	91 8 6	35.87 141.15	26	5.8	18.10 9.80	A
2	10 19	36.08 139.92	59	4.3	44.00 37.89	C
3	11 19	35.60 140.02	81	4.9	11.03 15.44	C
4	12 12	36.46 140.66	48	4.6	15.95 13.55	B
5	92 2 2	35.23 139.79	92	5.9	22.39 24.12	B
6	5 11	36.53 140.54	56	5.6	26.02 26.82	B
7	6 1	36.67 141.27	44	5.7	22.36 20.90	B
8	8 30	33.20 138.34	325	6.6	21.01 19.37	B
9	93 6 7	36.02 141.76	28	5.9	7.31 8.12	B
10	9 18	36.18 140.88	35	5.0	15.97 15.14	B
11	10 12	32.02 138.24	390	7.0	24.59 30.93	B
12	95 1 7	40.18 142.32	30	6.9	9.72 8.02	A
13	1 7	36.17 139.59	70	5.4	68.83 123.57	B
14	1 8	36.19 139.58	72	4.6	13.77 15.67	C
15	1 10	35.56 141.26	45	6.2	10.39 9.87	A
16	4 12	36.27 140.37	52	4.6	16.19 15.85	B
17	7 3	35.06 139.30	120	5.6	6.37 5.83	B
18	7 30	35.54 140.36	50	5.0	21.57 24.84	B
19	96 9 11	35.07 141.03	30	6.6	25.58 26.90	A

（地表の最大加速度は、基礎のX、Y方向に変換したものを示す）

基礎は加振実験の結果より、10Hz以下でほぼ剛体挙動することが確認されている²⁾。

3.2 解析対象地震記録

本論文で解析対象とする地震動は、1991～1996年の6年間の地震観測で採取された記録から不完全な記録を除いた19地震動である。表1に19地震記録の諸元を示す。文献2)に倣い、本論文でも地震記録をその周波数特性に基づきA、B、Cの3種類のグループに分類する。分類の基準は、Aグループは1Hz以下の低振動数成分を比較的多く含むもの、Cグループは高振動数成分が卓越するもの、Bグループはそれらの中間的な性質を示すものであり、分類結果は表1に示してある。なお、表中に網掛けにしている地震動をそれぞれのグループの代表地震と呼ぶ。

3.3 観測波形の2乗積分値の時刻歴

図4は、代表地震の地表記録と基礎X方向の水平動の加速度波形

図4 代表地震に対する地表及び基礎上の加速度波形（上）と2乗積分値の時刻歴（下）

と、加速度2乗積分値の時刻歴を示したものである。これらの図には、 $\int_0^t a_g^2(t) dt \cdot (\int_0^\infty a_f^2(t) dt / \int_0^\infty a_g^2(t) dt)$ の時刻歴、すなわち地表での地動の2乗積分値の時刻歴に、地動と基礎応答それぞれの最終累積値の比を乗じたものを破線で示してある。この最終累積値の比が、2.2節で定義した有効入力係数 α_f^A の2乗値に相当する。図4を観察すれば、各グループ共通に点線が基礎水平動の2乗積分値の時刻歴波形と重なっていることが分かる。これは、地震動の全継続時間において、一定の割合の地動が基礎に有効な入力となって作用していることを示唆している。

4. 地表地震動と基礎応答の関係

4.1 地表水平動と基礎水平動

図5には、地表（横軸）と基礎（縦軸）で観測された水平加速度波形の2乗積分値の値がプロットしてある。図中にはグループ毎に原点を通る直線で最小2乗近似した結果が示してあるが、これらの直線の傾きは各々のグループにおける平均の加速度有効入力係数となる。回帰した直線の傾きの値と相関係数を表2(a)に示す。加速度と同様に、速度について比較した結果が図6と表2(b)である。なお、参考のため、表2には地動と基礎応答の最大値間の関係から基礎有効入力動を評価した結果も示してある。

これらの結果より、加速度、速度ともに2乗積分値の平方根を地動と基礎応答で比較した場合の近似直線の傾きはグループA, B, Cの順に小さくなり、地表での水平動の高振動数成分の割合が増加するに従い、水平の基礎有効入力動が小さくなる事が分かる。さらに、全てのグループにおいて速度有効入力係数は加速度有効入力係数よりも大きな値となっている。これらの傾向は、基礎有効入力動を波形の最大値に基づいて評価した既往の研究^{1), 2), 8)}の知見と調和的である。つまり、本論文において提案している2乗積分値に基づく有効入力係数は、波形の最大値に基づいて評価した結果と概ね同じ傾向を示し、水平加速度に関する基礎有効入力動の低減割合もほぼ同一となっている事が分かる。

しかし、表2の結果を子細に観察すると、たとえば表2(a)のY方向の最大加速度に関する傾きは、グループA, C, Bの順に小さくなり、地動に含まれる周波数成分と水平動の入力低減を表す傾きが対応しない。このような地動の周波数成分との不整合性はX方向の

図5 水平加速度波形の2乗積分値の平方根の関係

図6 水平速度波形の2乗積分値の平方根の関係

表2 水平動基礎有効入力動とピーク値の比

(a) 加速度

グループ	X方向				Y方向			
	二乗積分値の平方根		最大加速度		二乗積分値の平方根		最大加速度	
	傾き	相関係数	傾き	相関係数	傾き	相関係数	傾き	相関係数
A	0.62	0.99	0.56	0.88	0.80	0.95	0.74	0.98
B	0.48	0.97	0.53	0.96	0.40	0.89	0.31	0.96
C	0.22	0.86	0.20	0.99	0.29	0.99	0.37	1.00
全体	0.48	0.89	0.47	0.87	0.45	0.76	0.34	0.91

(b) 速度

グループ	X方向				Y方向			
	二乗積分値の平方根		最大速度		二乗積分値の平方根		最大速度	
	傾き	相関係数	傾き	相関係数	傾き	相関係数	傾き	相関係数
A	0.70	0.83	0.66	0.96	1.07	0.88	1.30	0.92
B	0.62	0.93	0.69	0.99	0.79	0.85	0.52	0.94
C	0.48	*	0.55	*	0.48	*	0.37	*
全体	0.67	0.92	0.68	0.98	0.97	0.90	0.77	0.75

* 速度波形が発散しサンプル数が2地震となったため相関係数は不記載

図7 回転動の二乗積分値の平方根(左)と最大値(右)の関係

表3 回転動有効入力係数とピーク値の比

グループ	角加速度				角速度			
	二乗積分値の平方根 傾き($\times 10^{-2}$)	相関係数	最大加速度 傾き($\times 10^{-2}$)	相関係数	二乗積分値の平方根 傾き($\times 10^{-2}$)	相関係数	最大速度 傾き($\times 10^{-2}$)	相関係数
A	0.56	0.97	0.54	0.97	0.31	0.88	0.23	0.90
B	0.79	0.97	0.78	0.96	0.58	0.73	0.50	0.93
C	0.84	1.00	1.46	1.00	0.78	*	0.82	*
全体	0.75	0.93	0.88	0.87	0.41	0.73	0.39	0.80

* 速度波形が発散しサンプル数が2地震となったため相関係数は不記載

速度最大値にも見られる。これに対して、2乗積分値に基づく傾きは、加速度及び速度共に地動の周波数成分と対応が良く、2乗積分値に基づく評価指標は地動の周波数成分と対応する安定した指標であるといえる。

4.2 地表水平動と基礎回転動

図7(a)には、地表での水平加速度波形と基礎上での回転の角加速度波形の2乗積分値の平方根との関係が左に、同図の右には両者の最大値間の関係が並べて示してある。この右図の縦軸 PFA_{rot} は、基礎回転動の最大角加速度 $|a_f(t)|_{\max}$ に基準長さ L を乗じたもので [gal] の単位を持つ。これらの図に示す直線は、グループ毎に原点を通る直線で最小2乗近似した結果である。同様に、図7(b)は地表および基礎上での速度波形に対する結果で、 $PFV_{rot} = L \cdot |v_f(t)|_{\max}$ を表す。さらに表3には、グループ毎に回帰した直線の傾きと相関係数が示してある。

これらの結果から、地表の水平動に対する回転動の基礎有効入力動はグループ A, B, C の順に大きくなり、地表の水平動に含まれる高振動数成分の割合が増加するのに伴って回転動の有効入力係数が大きくなることが分かる。この傾向は、4.1節で示した地表の水平動に対する水平動の基礎有効入力動の傾向と異なる。また、角加速度と角速度の有効入力係数を比較すると、角速度の有効入力係数の方が角加速度の有効入力係数と比較して小さくなっているのが注目

図8 有効入力係数と最大値比との比較

される。これは、埋め込み基礎の回転応答は、主に基礎側面に作用する地震動が深さ方向に様でない事によって励起される現象であるが、地動の速度は地表近くでの増幅が小さくその分布は深さ方向にほぼ一様である²⁾ためと考えられる。

4.3 有効入力係数と最大値比との比較

4.1節では、水平の加速度有効入力係数の傾向は地表と基礎応答の最大加速度間の傾向と極めて類似していることを述べた。このことを一層明確にするために、波形の2乗積分値に基づく加速度有効入力係数と、基礎水平動と地表の最大加速度の比 (PFA_{rot}/PGA) を比較した結果を図8(a), (b)に示す。図中の破線は原点を通る直線によって最小2乗近似した結果である。両者の対応に若干のばらつきは認められるが回帰直線はほぼ傾き1の直線であり、本論文で提案している加速度有効入力係数は、波形の最大加速度に基づいて評価した基礎有効入力動の結果と概ね等しい値となることが分かる。また、図8(c)には、回転の角加速度有効入力係数と、基礎回転動の最大角加速度と地表の最大加速度の比の関係が、図8(d)にはX方向の水平の速度有効入力係数と、基礎水平動と地表の最大速度の比 (PFV_{rot}/PGV) の関係が示してある。これらの結果は水平の加速度の結果に比して両者のばらつきが大きく、相関性は低い。

4.4 地震動のスペクトル強度 SI と加速度有効入力係数

地震動強度と加速度有効入力係数との関係を検討するために、図9には、Housnerにより提唱されたスペクトル強度¹⁰⁾ (SI値)と加速度有効入力係数の関係が示してある。SI値は地表での地震記録に対する速度応答スペクトルを $S_v(T, h)$ として、次式で定義される。

$$SI = \int_{0.1}^{2.5} S_v(T, h=0.2) dT \quad (12)$$

図9より、SI値と加速度有効入力係数との関係はばらつきが大きく、両者に強い相関が認められない。これは、採録された地震動の最大

加速度は小さいものが多く、地盤が弾性範囲にあるためと考えられる。強震動を含めた地震の強度と有効入力係数の関係の検討は今後の重要課題となる。

5. 加速度有効入力係数と伝達関数との対応

2.2 節に示したように、本論文で提案した有効入力係数は地盤-基礎系の伝達関数と理論的に関係づけられる。そこで本章においては、観測より得られる加速度有効入力係数と系の伝達関数との対応関係に着目して考察する。

基礎-地盤系の伝達関数は、地表の水平動と基礎応答のフーリエスペクトル比によって推定できる。図 10 に、地表面水平動に対する基礎水平動、基礎回転動のフーリエスペクトル比を示す。図中には全記録の平均が太線で、平均±標準偏差 (σ) が細線で示されている。なお、スペクトルは 0.2Hz の Parzen window によって平滑化したものを用いている。

図 11 は、図 10 に示した伝達関数の推定値と加速度有効入力係数との対応を検討した結果である。加速度有効入力係数をプロットした振動数は、地表面水平動の最大加速度 (PGA) 及び最大速度 (PGV) をもとに $\frac{1}{2\pi} \frac{PGA}{PGV}$ として定まる地震動の等価卓越振動数⁸⁾である。この図より加速度有効入力係数と系の伝達関数とは非常に高い相関を示していることが分かる。また、水平動の伝達関数は X 方向では 2~3Hz に、また Y 方向では 0.5Hz 附近にそれぞれピークを持ち、

図 9 地震動強度 SI と加速度有効入力係数の関係

振動数が高くなるにつれて値が小さくなる。この傾向は、地表の水平動の高振動数成分の割合が増加するに従い水平動の基礎有効入力動が小さくなる傾向と整合する。一方、回転動の伝達関数は振動数が高くなるにつれて値が大きくなり 5~6Hz でピークを持つが、この傾向は表 3 に示した地動の振動数成分と回転動の有効入力係数との関係と対応している。図 12 は、小島らと同様に⁸⁾等価卓越振動数

図 10 地表の地震動に対する基礎水平動及び回転動のフーリエスペクトル比

図 11 加速度有効入力係数と伝達関数との対応

図 12 最大加速度比と伝達関数との対応

に対応する系の伝達関数の値と地表と基礎応答の最大加速度比との関係を検討した結果である。図 11 に示した加速度有効入力係数の場合と比べると相関はやや低い、最大加速度比は系の伝達関数と対応している。地表と基礎応答の最大加速度比と伝達関数との対応についての理論的根拠は見い出せないが、結果として両者が対応しているのは、図 8(a), (b) に示したように、最大加速度比と有効入力係数とが高い相関を持つためである。このことから、最大加速度比は地表に対する基礎有効入力動の割合を評価する簡易な指標として有効であると言える。

6. 水平の基礎有効入力動と回転の基礎有効入力動との相関

先に述べたように、基礎有効入力動は水平動と回転動の 2 つの成分を持つ。これらの成分が互いにどのような相関性を持つかは建物応答を予測する上で極めて重要である。本章では両入力動の相関係数に着目して基礎有効入力動の分析を試みる。

基礎応答の水平動 $a_f^h(t)$ と回転動 $a_f^r(t)$ の Fourier 変換を $A_f^h(\omega)$, $A_f^r(\omega)$ としてそれぞれの全パワーを次のように定義する。

$$R_f^{\Delta\Delta} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} A_f^h(\omega) \tilde{A}_f^h(\omega) d\omega \quad (13)$$

$$R_f^{\Phi\Phi} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} L^2 A_f^r(\omega) \tilde{A}_f^r(\omega) d\omega \quad (14)$$

ここで $(\sim)$ は共役を意味する。また $A_f^h(\omega)$ と $A_f^r(\omega)$ の相互パワースペクトルの積分値を次のように定義する。

$$R_f^{\Delta\Phi} = R_f^{\Phi\Delta} = \frac{1}{2\pi} \operatorname{Re} \left[\int_{-\infty}^{\infty} L A_f^h(\omega) \tilde{A}_f^r(\omega) d\omega \right] \quad (15)$$

式(1)の右辺の基礎有効入力動の全パワーを R_{ef} とすれば、

$$R_{ef} = R_f^{\Delta\Delta} + 2\rho_f^{\Delta\Phi} \frac{H_s}{L} \sqrt{R_f^{\Delta\Delta} \cdot R_f^{\Phi\Phi}} + \left(\frac{H_s}{L} \right)^2 R_f^{\Phi\Phi} \quad (16)$$

ここで、 $\rho_f^{\Delta\Phi}$ は水平動と回転動の相関係数であり次式で定義される。

$$\rho_f^{\Delta\Phi} = \frac{R_f^{\Delta\Phi}}{\sqrt{R_f^{\Delta\Delta} \cdot R_f^{\Phi\Phi}}} \quad (17)$$

式(13), (14)を式(16)に代入し、Parseval の定理を利用すれば、式(16)は最終的に次のように表せる。

$$R_{ef} = \int_0^\infty |a_g(t)|^2 dt \left[(\alpha_a^\Delta)^2 + 2 \frac{H_s}{L} \alpha_a^\Delta \alpha_a^\Phi \rho_f^{\Delta\Phi} + \left(\frac{H_s}{L} \right)^2 (\alpha_a^\Phi)^2 \right] \quad (18)$$

上式の [] 内が地動の全パワーに対する基礎有効入力動のパワーの割合を表していて、これが本論文で定義した水平及び回転の有効入力係数によって表されるのが分かる。

図 13 は、式(17)で与えられる水平動と回転動の相関係数 $\rho_f^{\Delta\Phi}$ について、地震動の等価卓越振動数及び地表の水平動の最大加速度との関係をプロットした図である。相関係数はおよそ $-0.25 < \rho_f^{\Delta\Phi} < 0.15$ の範囲にあり水平動と回転動の相関は低い。この事は、水平動と回転動の基礎有効入力動を合成する場合、2乗和平方根法が利用できることを示唆している。また、相関係数とそれぞれのパラメータとの有意な関係は見いだせない。解析対象とした 19 地震の中で地表の最大加速度が最も大きい Eq-13 の $\rho_f^{\Delta\Phi}$ が正の値でやや大きな相関係

図 13 水平動と回転動の相関係数

(a) グループ A (Eq-19)

(b) グループ C (Eq-2)

図 14 基礎有効入力動に対する入力相互作用と慣性の相互作用の効果

数となっていることが注目されるが、強震動に対する水平動と回転動の相関性については今後の検討課題となる。

7. 基礎有効入力動に及ぼす入力相互作用と慣性の相互作用

基礎の地震観測から抽出される基礎有効入力動は、入力相互作用と慣性の相互作用の 2 つの相互作用の影響が複合されたものである。2.1 節に示したように、基礎に対する地盤のインピーダンス関数が求まっていれば、式(3), (4)をもとに基礎有効入力動を入力相互作用と慣性の相互作用の成分に分離して評価することができる。ここでは、基礎有効入力動を 2 つの成分に分離しそれぞれの相互作用の影響について考察する。

大型振動台基礎のインピーダンス関数は 3 次元薄層要素法を用い

て計算された結果が利用できる^{2), 11)}。この結果を用いて、グループ A とグループ C の代表地震 (X 方向) について、水平及び回転の基礎有効入力動を分離した結果を図 14 に示す。図 14 には主要動の部分拡大した波形が示してあり、この図の回転動は基準長さ $L=1\text{m}$ を乗じてある。グループ A では基礎水平動に占める入力の影響が圧倒的に強い。回転動についても入力の影響が強いが、慣性の相互作用の成分が入力の相互作用の成分と逆位相となっているのが認められる。グループ C では、水平動においては慣性の相互作用に比して入力の影響がやや大きい。さらに回転動においては、慣性の相互作用の成分が入力の相互作用の成分を打ち消す働きをしている。つまり、入力の影響と慣性の相互作用の成分を加えて評価しようとする場合には、両者の位相を考慮することが必要となる。

図 15 は、基礎有効入力動に占める、入力の影響及び慣性の相互作用の成分の割合を、各グループの代表地震 (X 方向) についてフーリエスペクトル比として表現したものである。この結果より、いずれの成分の割合も地震動の周波数特性に拘らずほぼ同一の傾向を示していることが分かる。また、特に高振動数域において入力の影響と慣性の相互作用の成分の和は 1 となっていないが、これは前述のように両成分間に位相差が存在するためである。

8. 結論

本論文では、大型振動台基礎とその周辺地盤で観測された中小 19 地震記録に対して、上部構造に入力となって作用する基礎有効入力動に焦点を当てて分析し、地表での地震動に対する基礎有効入力動の割合を適切に評価する指標について検討した。本論文で得られた成果をまとめると以下ようになる。

- (1) 基礎有効入力動の評価指標として、地表と基礎の加速度波形の 2 乗積分値の平方根比 (これを加速度有効入力係数と呼ぶ) を提案し、この係数が地盤-基礎系の伝達関数と関連する理論的根拠を示した。さらに、観測記録に対して、加速度有効入力係数と伝達関数が良好に対応することを実証した。
- (2) 加速度有効入力係数及び地表と基礎の速度波形に対して定義される速度有効入力係数は、地表と基礎の観測波形の最大値比と良い対応を示すことを示し、従来広く用いられている最大値比は基礎有効入力動の簡易な評価指標として適切であることを確認した。
- (3) 基礎有効入力動は水平動と回転動の 2 つの成分を含み、それぞれの加速度有効入力係数は地表の地震動に含まれる振動数成分に対して異なる性状を示すことを明らかにした。すなわち、水平動の有効入力係数は地動に含まれる高振動数成分が多くなるに従って小さくなるのに対し、回転動の有効入力係数は、地動に含まれる高振動数成分の増加に伴って大きくなる傾向を示す。また、水平動と回転動の相関性は低く、基礎有効入力動の最大値の推定には 2 乗和平方根法が利用できることを示唆した。
- (4) 基礎有効入力動に含まれる入力と慣性のそれぞれの相互作用

図 15 基礎有効入力動に含まれる入力の影響と慣性の相互作用の成分比

の効果を分離抽出し、水平動と回転動共に、低振動数域では入力の影響が強く、振動数が増加するに従って慣性の相互作用の影響は入力の影響と同程度に強くなることを明らかにした。

謝辞

本論文で用いた地震観測記録は (独) 防災科学技術研究所の提供による。また、(独) 建築研究所の大川出博士には、本研究を進めるにあたって貴重なご助言をいただきました。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 安井 謙, 井口道雄, 赤木久真, 林 康裕, 中村 充: 1995 年兵庫県南部地震における基礎有効入力動に関する考察, 日本建築学会構造系論文集, 第 512 号, pp.111-118, 1998, 10.
- 2) 井口道雄, 宇波桃子, 安井 謙, 箕輪親宏: 大型振動台基礎と周辺地盤の同時地震観測記録に基づく基礎有効入力動, 日本建築学会構造系論文集, 第 537 号, pp.61-68, 2000, 11.
- 3) 日本建築学会編: 入門・建物と地盤との動的相互作用, 日本建築学会, 1996, 4.
- 4) 日本建築学会編: 動的外乱に対する設計—現状と展望—, 日本建築学会, 1999, 5.
- 5) Sarma, S. K. and M. Sribulov: A simplified method for prediction of kinematic soil-foundation interaction effects on peak horizontal acceleration of a rigid foundation, Earthq. Eng. Struct. Dyn., 25 (8), pp.815-836, 1996, 8.
- 6) Stewart, J., R. Seed, G. Fenves: Empirical Evaluation of Inertial Soil-Structure Interaction Effects, Report No. PEER-98/07, Pacific Earthquake Engineering Research Center, Univ. of California, Berkeley, 1998.
- 7) Stewart, J.P.: Variations between foundation-level and free-field earthquake ground motions, Earthquake Spectra, 16 (2), pp.511-532, 2000.
- 8) 小島宏章, 福和伸夫, 飛田潤: 強震観測・常時微動計測に基づく中低層建物の入力損失効果に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 第 587 号, pp.77-84, 2005, 1.
- 9) 箕輪親宏, 大八木規夫, 小川信行, 大谷圭一: 大型耐震実験装置基礎補強工事 (補強工事の概要と基礎振動応答測定), 防災科学研究所研究資料, 第 151 号, 1991, 3.
- 10) Housner, G. W.: Behavior of structures during Earthquakes, J. Engng. Mech., Proc. ASCE, EM4, pp.109-129, Oct. 1959.
- 11) 小林宏典: 埋め込みを有する基礎-地盤系の動的相互作用効果に関する実証的研究—大型振動台基礎加振実験のシミュレーション—, 東京理科大学理工学研究科 修士論文, 1992.

(2006 年 9 月 5 日原稿受理, 2007 年 1 月 5 日採用決定)