

有効入力動のこれまでの歩みと 今後の課題

筑波建築研究機関協議会

2010年10月22日

東京理科大学理工学部

井口 道雄

講演内容目次

1. 動的相互作用のあゆみ
2. 動的相互作用の概要
3. 基礎入力動研究のあゆみ
4. 限界耐力計算における入力低減係数
5. 有効（実効）入力動の実証研究
6. 相互作用関連の各国耐震規定
7. 入力動に関するトピックスから
8. 今後の課題

1. 動的相互作用のあゆみ

学会相互作用シンポ資料(2001/3)より

動的相互作用研究の源泉

1935年、1936年

妹沢・金井の論文

・ 妹沢克惟, 金井 清 : Decay in the Seismic Vibration of a Simple or Tall Structure by Dissipation of Their Energy into the Ground, (勢力の地下逸散のために生ずる高層構造物の震動減衰) 地震研究所彙報,第13号,第3冊,1935,pp681-697

・ 妹沢克惟, 金井 清 : Improved Theory of Energy Dissipation in Seismic Vibrations on a Structure, (構造物に於ける震動逸散理論の吟味) 地震研究所彙報,第14号,第2冊, 1936,pp164-168



妹沢克惟(1895-1944)



金井 清 (1907-2008)

動的相互作用の発展と変遷

- | | |
|------------|---|
| 1935,1936年 | 相互作用研究誕生。Sezawa & Kanai; Reissnerの論文。 |
| 1944-1957年 | 地表面基礎に対する加振力応答の理論解析。Reissner; Toriumi; et al. |
| 1956年 | 第1回世界地震工学会議開催（Berkeley）。 |
| 1957年 | 用語「相互作用」誕生。Housner, 論文、建物と地盤の同時地震記録分析。 |
| 1959年 | 田治見のアドミッタンス理論。 |
| 1960年 | 第2回世界地震工学会議開催（東京・京都）。相互作用関係論文多数発表 |
| 1962年 | 第1回日本地震工学シンポジウム開催。
小堀らの長方形基礎に関するDGC理論。 |
| 1963年 | 原子力発電所試験炉完成（日本原子力研究所）。 |
| 1965年 | 我が国初の商業炉原子力発電所完成（日本原電東海1号機）。 |
| 1967年～ | 相互作用を考慮した多層構造物の地震応答解析開始。S-Rモデル開発。 |

動的相互作用の発展と変遷(つづき)

- 1969年 山原の入力損失論文発表。
Newmarkの捩れ動入力に関する論文発表。
FEMによる相互作用解析(Lysmer, et al.)。
等価線形化法の研究開発(Seed & Idriss)。
- 1970年 第3回日本地震工学シンポジウム開催。相互作用のSessionが設けられる。
- 1971年 第1回SMiRT(Structural Mechanics in Reactor Technology)会議開催(Berlin)。
- 1973年 第5回世界地震工学会議開催 (Rome)。WCEEに初めて動的相互作用のSessionが設けられる。
サブストラクチャー法の定式化発表(Whitman)。2-Step法提示。
- 1976年 動的相互作用効果の評価式提示(Bielak; Veletsos)。
- 1977年～ 非線形相互作用(基礎浮き上がり)研究開始(Wolf, et al.)。
- 1979年 スリーマイル島原発事故。
- 1980年 (財)原子力工学試験センターの相互作用実証試験プロジェクト開始(1987年まで)。
学会に「基礎構造系振動小委員会」発足。

動的相互作用の発展と変遷(つづき)

- 1980,1981年 薄層要素法の開発(田治見; Waas; Kausel)。
- 1982年 原子力工学試験センターの「基礎浮き上がりに関する試験」開始。
- 1985年～ 時間領域サブストラクチャー法開発(Wolf et al.)。
- 1985年 構造物と地盤の動的相互作用シンポジウム開催(基礎構造系振動小委)。
- 1986年 チェルノブイリ原発放射能汚染事故。
原子力工学試験センターの「原子炉建屋の埋め込み震動効果試験」開始(1995年まで)。
- 1993年 釧路沖地震発生。高加速度下(最大加速度922gal)で被害が小さかったことが注目。
- 1994年 Northridge地震発生。
- 1995年 兵庫県南部地震発生。
- 1995年～ 強震動記録から非線形相互作用効果の抽出法開発。大ひずみ時の非線形相互作用効果の解明に向けた本格的な研究開始。
- 1996年 建築学会より「入門・建物と地盤との動的相互作用」刊行。
原子力発電技術機構の「原子炉建屋の隣接効果試験」開始(2001年まで)。
- 1998年 動的相互作用に関する日米Workshop開催(Menlo Park)。
建築基準法改正。性能規定に移行。

動的相互作用の発展と変遷(つづき)

- 2000年 建築基準法施行令施行。動的相互作用効果導入。
- 2001年 The 2nd US-JAPAN Workshop on Soil-Structure Interaction(つくば)開催。
- 2001年 「第6回構造物と地盤の動的相互作用シンポジウム」開催。
基礎構造系振動小委員会発足20周年記念特別講演(小堀, 井口)。
- 2003年 「第7回構造物と地盤の動的相互作用シンポジウム」開催。
- 2004年 The 3rd US-JAPAN Workshop on Soil-Structure Interaction(Menlo Park)開催。
- 2006年 「第8回構造物と地盤の動的相互作用シンポジウム」開催。
- 2006年 「建物と地盤の動的相互作用を考慮した応答解析と耐震設計」学会より刊行。
- 2007年 The 4th US-JAPAN Workshop on Soil-Structure Interaction(つくば)開催。
- 2007年 「新潟県中越沖地震」発生。
- 2008年 「ワークショップ 非線形相互作用と耐震設計」開催(建築学会)。
- 2009年 International Workshop on Soil-Foundation-Structure-Interaction, Auckland(New Zealand)で開催。

動的相互作用の時代区分

1935,1936年

第1期（揺籃期）

- ・「相互作用」誕生
- ・動的地盤ばねの理論研究

1960年

第2期（成長期）

- ・電子計算機の発達
- ・原子力発電所の建設

1970年

第3期（成熟期）

- ・国際会議で「相互作用研究」が認知
- ・「入力相互作用」が新たに加わる
- ・解析手法の開発
- ・「基礎構造系振動小委員会」設立 etc.

1985年

第4期（転換期）

- ・「線形相互作用」→「非線形相互作用」への転換
- ・大地震時の相互作用効果（釧路、Northridge、兵庫県南部、etc.）
- ・限界耐力計算法に移行—相互作用効果の導入（研究を耐震設計へ）

2001年

第5期（実践期）

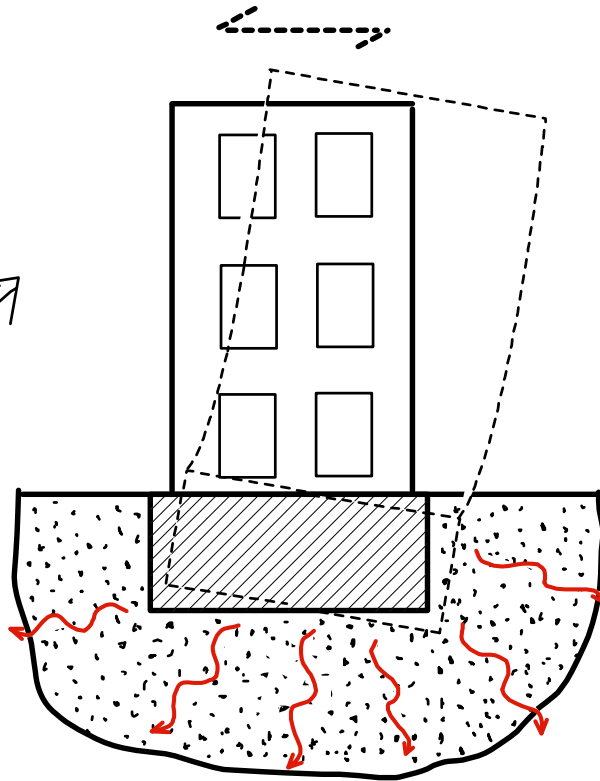
- ・「非線形（大地震時）相互作用効果」の解明に向けての研究が本格化
- ・SimulationからPredictionへ

2. 動的相互作用の概要

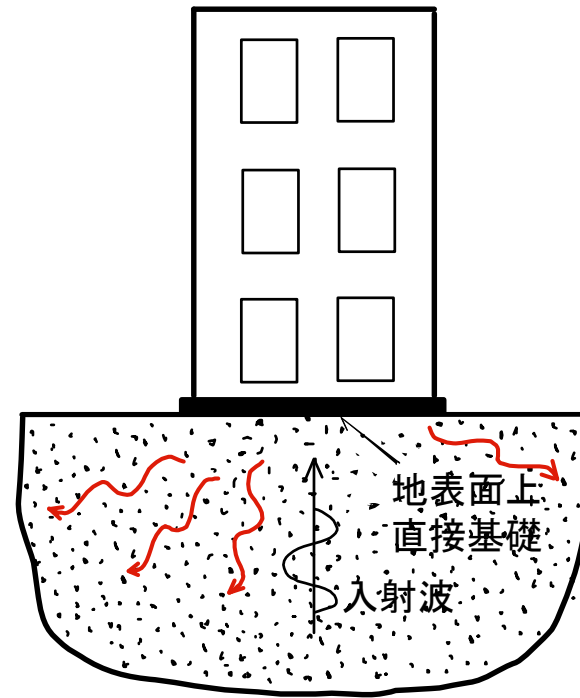
学会相互作用シンポ(1985/5)資料より

慣性の相互作用

相互に影響



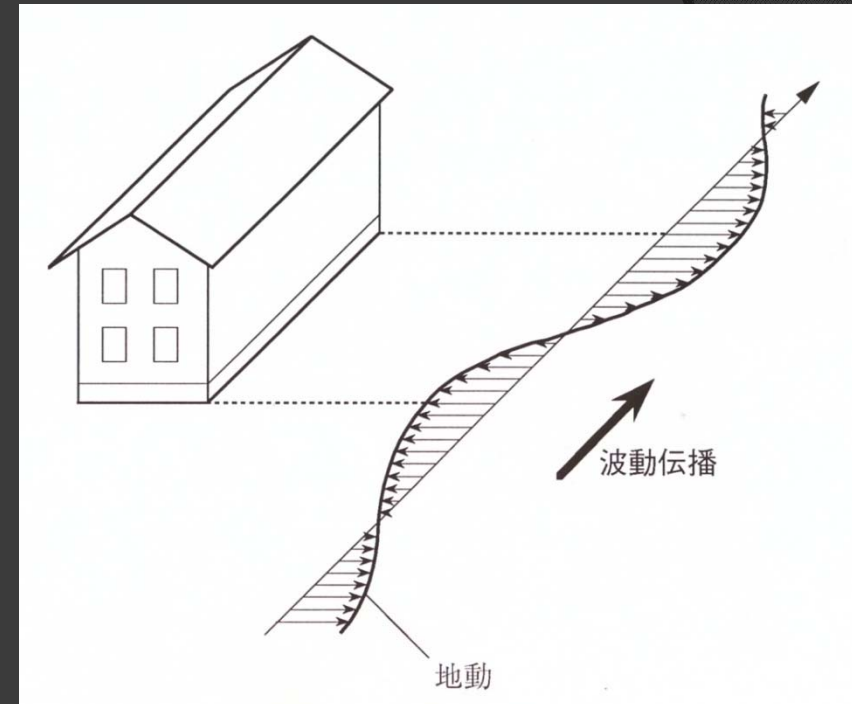
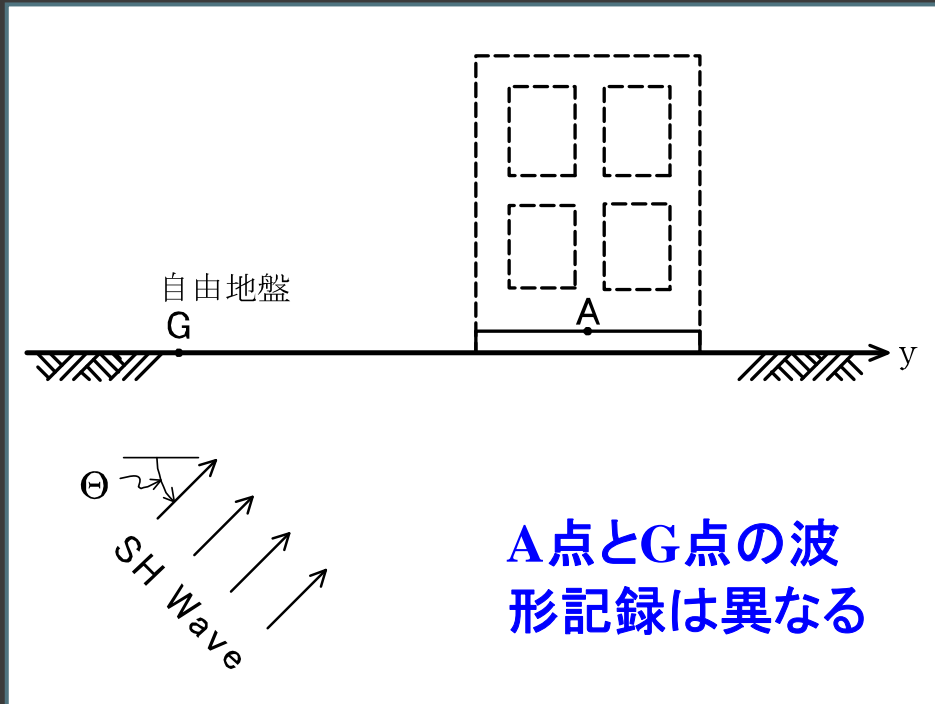
地盤—建物系自由振動



鉛直入射の地震動を受ける建物

地盤の動的効果(ばね+減衰)

入力の相互作用



斜め入射の地震波(位相差入力)を受ける構造物

動的相互作用(要約)

動的相互作用:

慣性の相互作用(Inertial Interaction)

—地盤の動的抵抗効果—

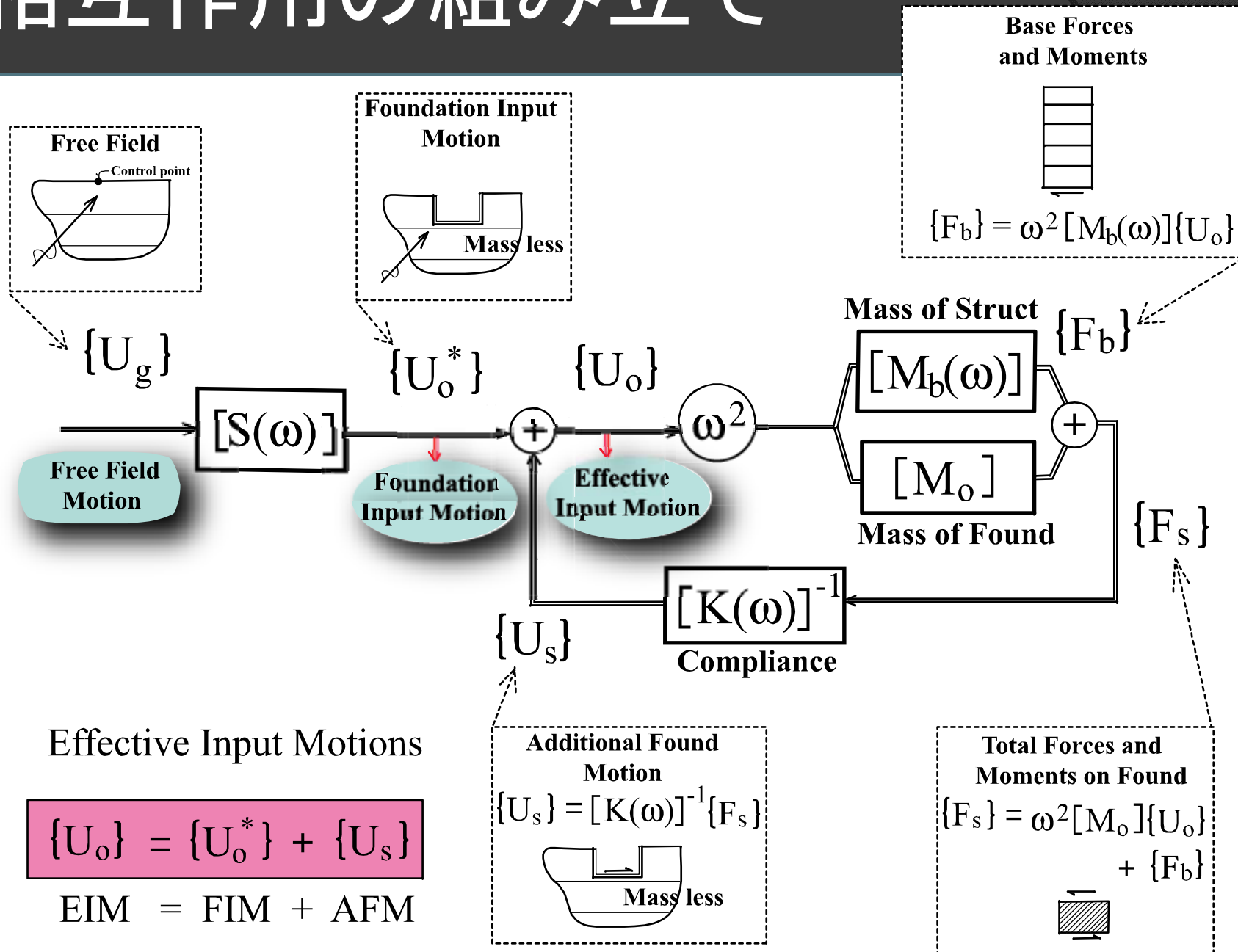
建物周期の増加・減衰の変化

入力の相互作用(Kinematic Interaction)

—基礎による地動の拘束効果—

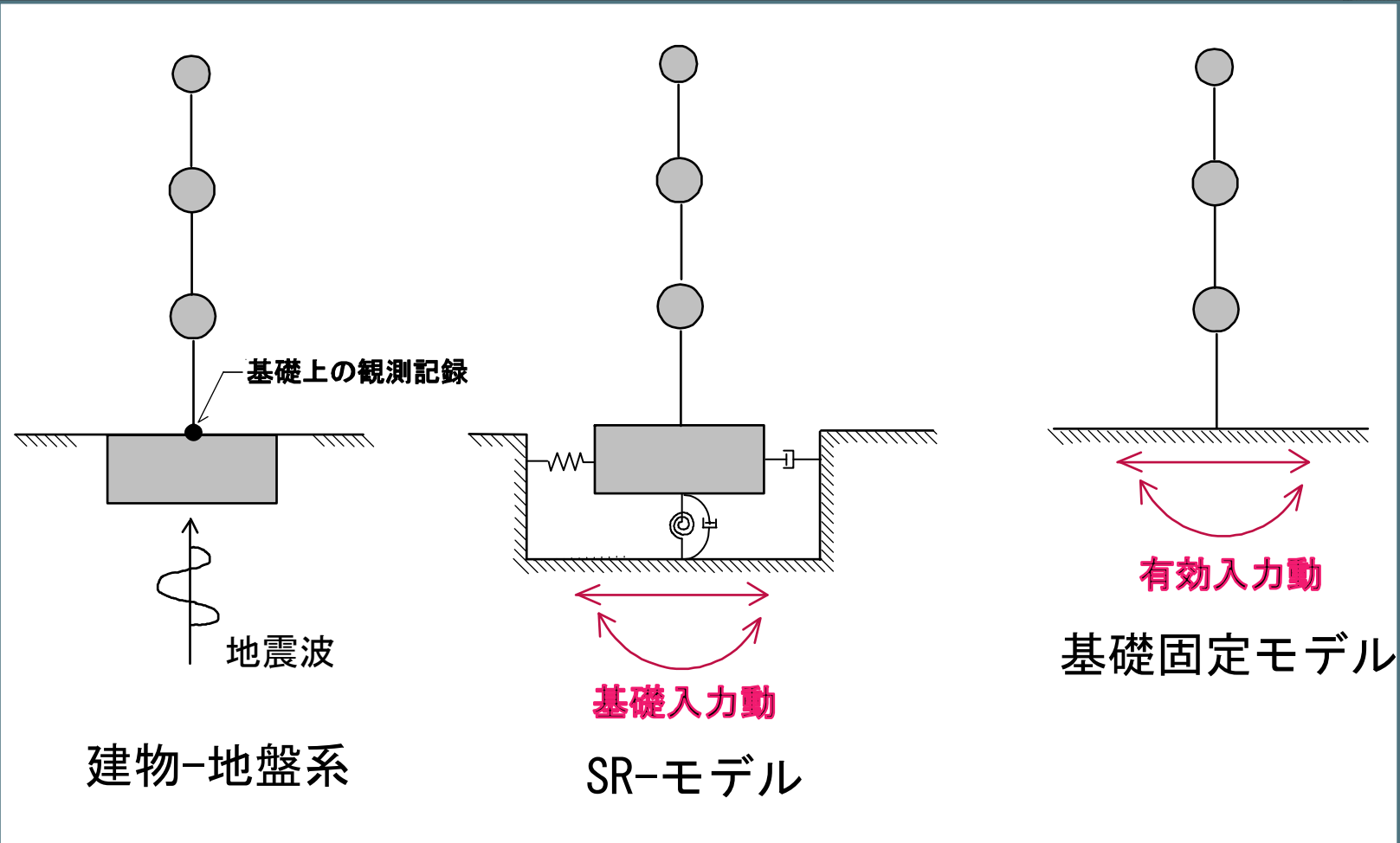
建物への入力の変化

相互作用の組み立て



基礎入力動と有効入力動

— 入力動の与え方 —



3. 基礎入力動研究のあゆみ

入力動研究の原泉

- ◎ 山原の入力損失研究

山原 浩；地震時の地動と地震波の入力損失（第1報），（第2報），建築学会論文報告集，No. 165, pp61-66, 1969年；No. 167, pp25-30, 1970年.

- ◎ Newmarkの捩れ動入力

Newmark, M.N. : Torsion in Symmetrical Buildings, Proc. 4th WCEE (Santiago, Chile), Vol.2, pp19-32, 1969.

3. 基礎入力動研究のあゆみ(つづき)

- ◎ 直接基礎に対する基礎入力動近似解法

井口道雄：地震動の位相差及地盤—構造物の相互作用を考慮した地震応答, JEES, 1973, pp211-218.

Scanlan (1976), Bycroft (1980), etc.

Iguchi, M: Comments on the paper: Seismic Response due to Travelling Shear wave Including Soil-Structure Interaction with Base-Mat Uplift, EESD, Vol. 6, 1981, pp585-591.

- ◎ 埋め込み基礎に対する基礎入力動近似解法

M. Iguchi; An Approximate Analysis of Input Motions for Rigid Embedded Foundations, 建築学会構造系論文集, No. 315, pp61-75, 1982年5月.

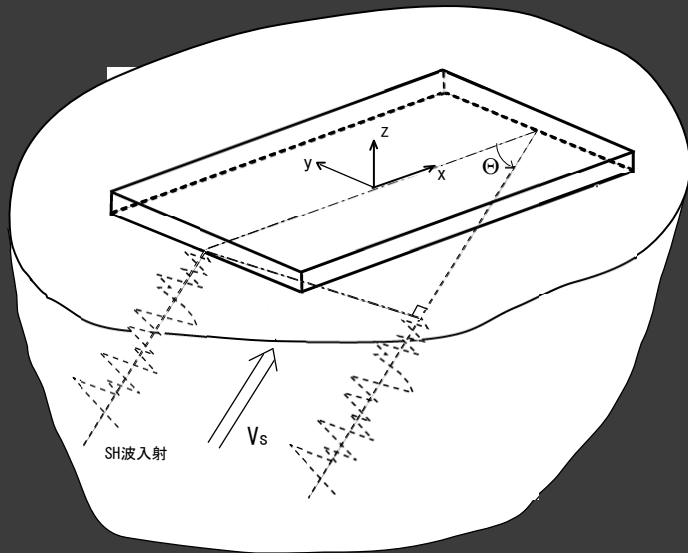
- ◎ 地震観測に基づく基礎入力動の評価

栗本 修, 井口道雄；実地震記録に基づく基礎入力動評価, 建築学会構造系論文集, No. 472, pp67-74, 1995年6月.

Kurimoto, O. and M. Iguchi : Evaluation of Foundation Input Motions Based on Observed Seismic Motions, 11th World Conf. on Earthq. Engng, Paper No. 317, 1996.

直接基礎に対する基礎入力動研究

平均化法 (Averaging Method)



自由地表面の地動

$$u_x(x, y, t), u_y(x, y, t), u_z(x, y, t)$$

基礎の応答

$$\Delta_x^*(t), \Delta_y^*(t), \Delta_z^*(t),$$

$$\Phi_x^*(t), \Phi_y^*(t), \Phi_z^*(t)$$

地動と基礎応答の差の二乗積分値

$$W = \int_S \left\{ u_x - (\Delta_x^* - y\Phi_z^*) \right\}^2 ds + \int_S \left\{ u_y - (\Delta_y^* + x\Phi_z^*) \right\}^2 ds$$

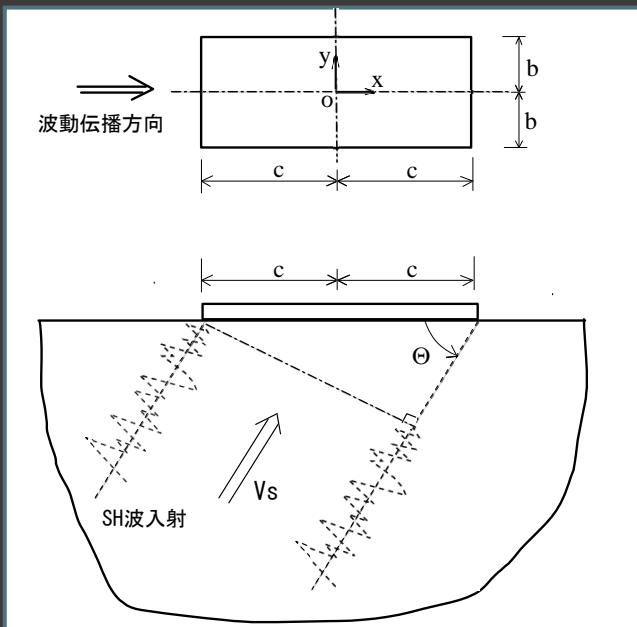
$$+ \int_S \left\{ u_z - (\Delta_z^* + y\Phi_x^* - x\Phi_y^*) \right\}^2 ds$$

(Iguchi 1970,1973)

最小二乗法による基礎入力動

$$\frac{\partial W}{\partial \Delta_y^*} = 0 \quad \Delta_y^*(t) = \frac{1}{S} \int_S u_y(x, y, t) ds \quad S : \text{基礎面積}$$

$$\frac{\partial W}{\partial \Phi_z^*} = 0 \quad \Phi_z^*(t) = \frac{1}{\int_S (x^2 + y^2) ds} \int_S \{xu_y(x, y, t) - yu_x(x, y, t)\} ds$$



基礎入力動伝達関数(長方形基礎)

$$u_y(x, y, t) = \vartheta_{y0}(\omega) e^{i\omega(t-x/V_a)}$$

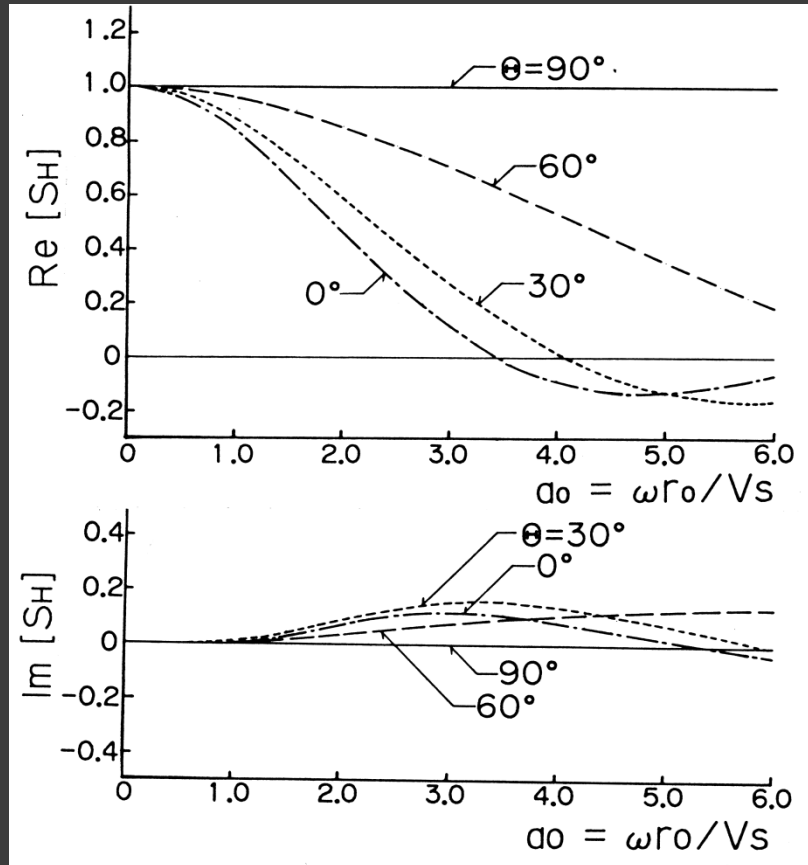
$$V_a = V_s / \cos \Theta \quad \text{見掛けの表面波速度}$$

$$\text{Trans} \quad \Delta_y^*(\omega) = \frac{\sin(\omega c / V_a)}{(\omega c / V_a)} \vartheta_{y0}(\omega)$$

Torsional

$$c \Phi_z^*(\omega) = i \frac{S c^2}{I_p} \left[\frac{\cos(\omega c / V_a)}{(\omega c / V_a)} - \frac{\sin(\omega c / V_a)}{(\omega c / V_a)^2} \right] \vartheta_{y0}(\omega)$$

基礎入力動の周波数特性 (地表面上の円形直接基礎)

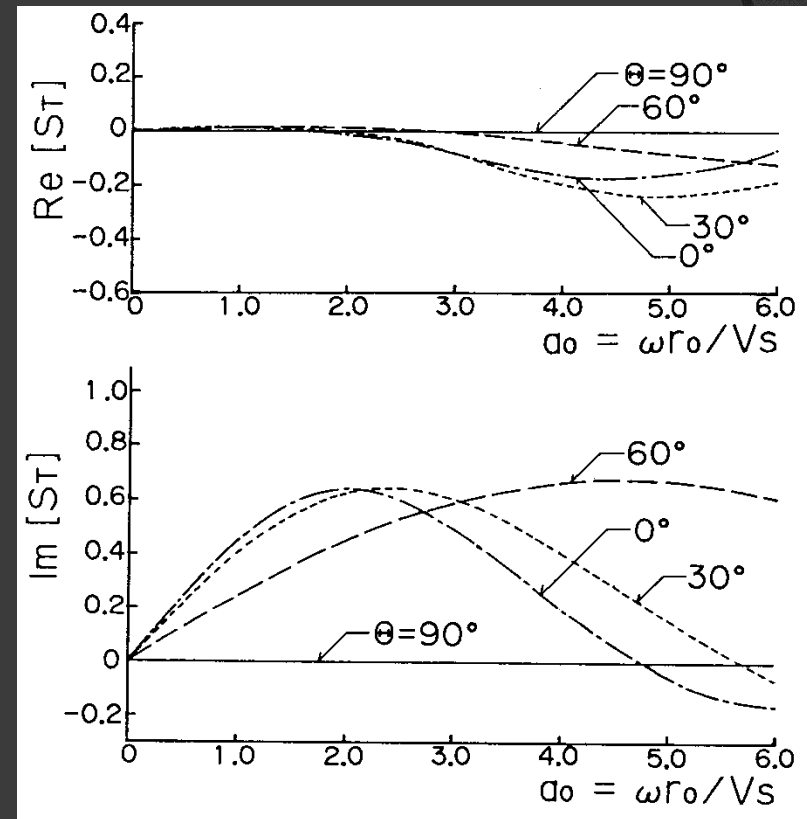


水平動成分

振動数の増加に伴い入力低減



入力損失

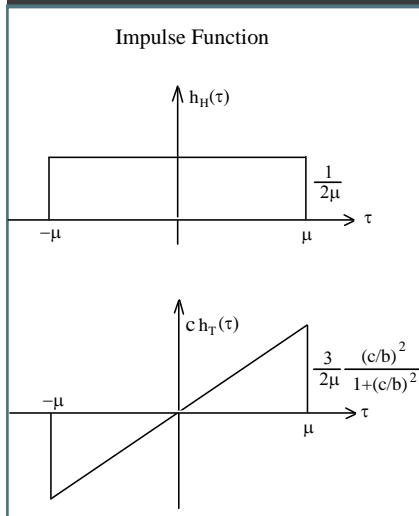


振れ動成分

振れ動の励起

(井口, 1985)

基礎入力動の計算波形



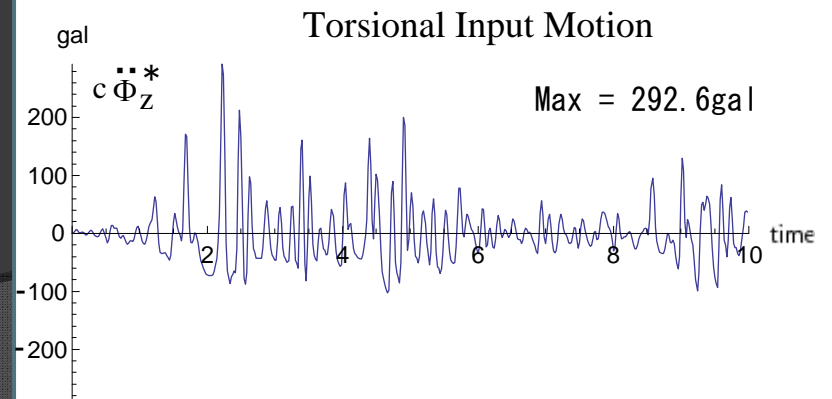
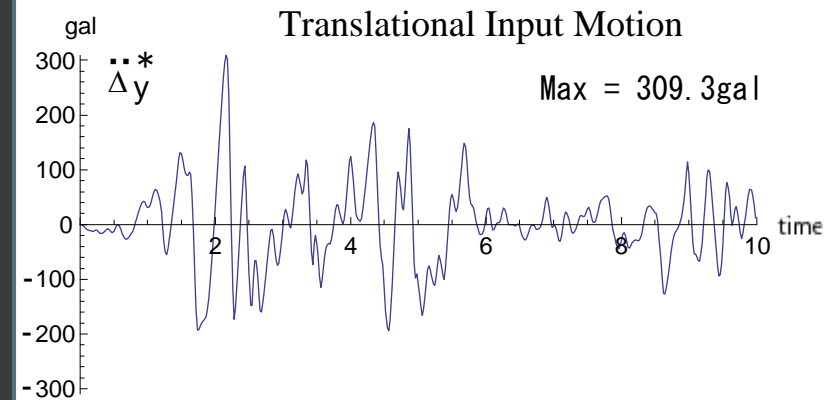
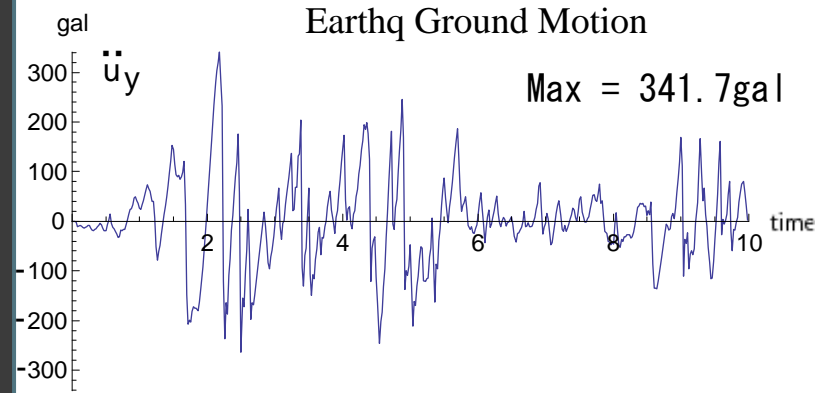
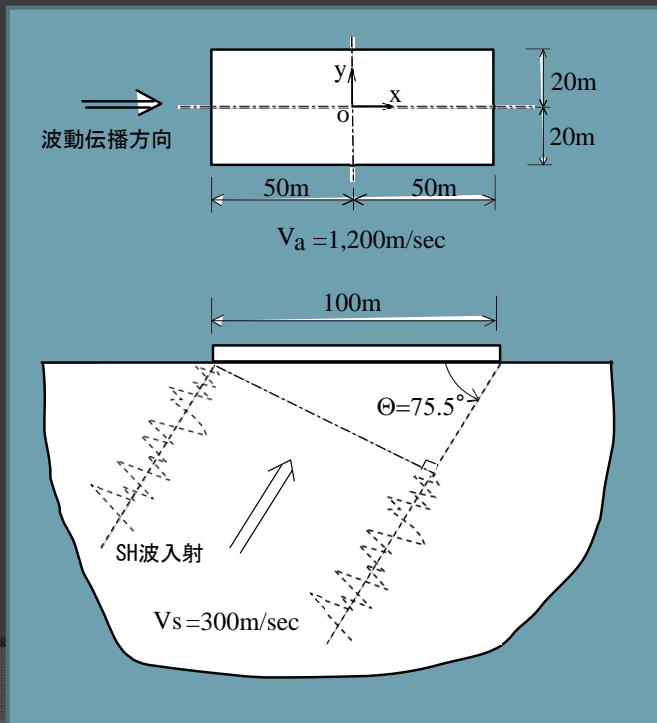
水平動

$$\ddot{\Phi}_y^*(t) = \int_{-\mu}^{\mu} \ddot{\Phi}_y(t+\tau) h_H(\tau) d\tau$$

捩れ動

$$c \ddot{\Phi}_z^*(t) = \int_{-\mu}^{\mu} \ddot{\Phi}_y(t+\tau) h_T(\tau) d\tau$$

$$(\mu = c/V_a)$$



埋め込み基礎に対する基礎入力動研究

厳密評価式 (Luco 1980, 1986)

$$\begin{aligned} \{U^*\} &= [K(\omega)]^{-1} \int_S [A(\bar{X})]^T [\overset{\vee}{T}(\bar{X})] \{u^f(\bar{X})\} ds \\ &\quad - [K(\omega)]^{-1} \int_S [A(\bar{X})]^T \{\tau_n^f(\bar{X})\} ds, \quad \bar{X} \in S \end{aligned}$$

ここで、

$$\{U^*\} = \{\Delta_x^*, \Delta_y^*, \Delta_z^*, \Phi_x^*, \Phi_y^*, \Phi_z^*\}^T \quad \text{基礎入力動}$$

$$[K(\omega)] = \int_S [A(\bar{X})]^T [\overset{\vee}{T}(\bar{X})] [A(\bar{X})] ds \quad \text{Impedance Matrix}$$

$$[A(\bar{X})] = \begin{bmatrix} 1 & & z_s & -y_s \\ & 1 & -z_s & x_s \\ & & 1 & y_s \\ & & & -x_s \end{bmatrix} \quad \begin{array}{l} \text{基準点と仮想境界面S上} \\ \text{の点との関係Matrix} \end{array}$$

$[\overset{\vee}{T}(\bar{X})]$ 応力Matrix: 計算が難しい

埋め込み基礎に対する基礎入力動研究

近似評価法(Iguchi 1982)

$$\begin{aligned} \{U^*\} \approx & [H]^{-1} \int_S [A(\bar{X})]^T \{u^f(\bar{X})\} ds \\ & - [K(\omega)]^{-1} \int_S [A(\bar{X})]^T \{\tau_n^f(\bar{X})\} ds, \quad \bar{X} \in S \end{aligned}$$

ここで、

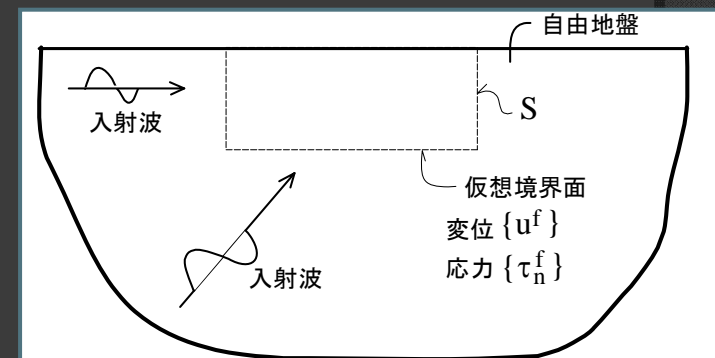
$$\{U^*\} = \{\Delta_x^*, \Delta_y^*, \Delta_z^*, \Phi_x^*, \Phi_y^*, \Phi_z^*\}^T$$

$$[H] = \int_S [A(\bar{X})]^T [A(\bar{X})] ds$$

基礎形状Matrix

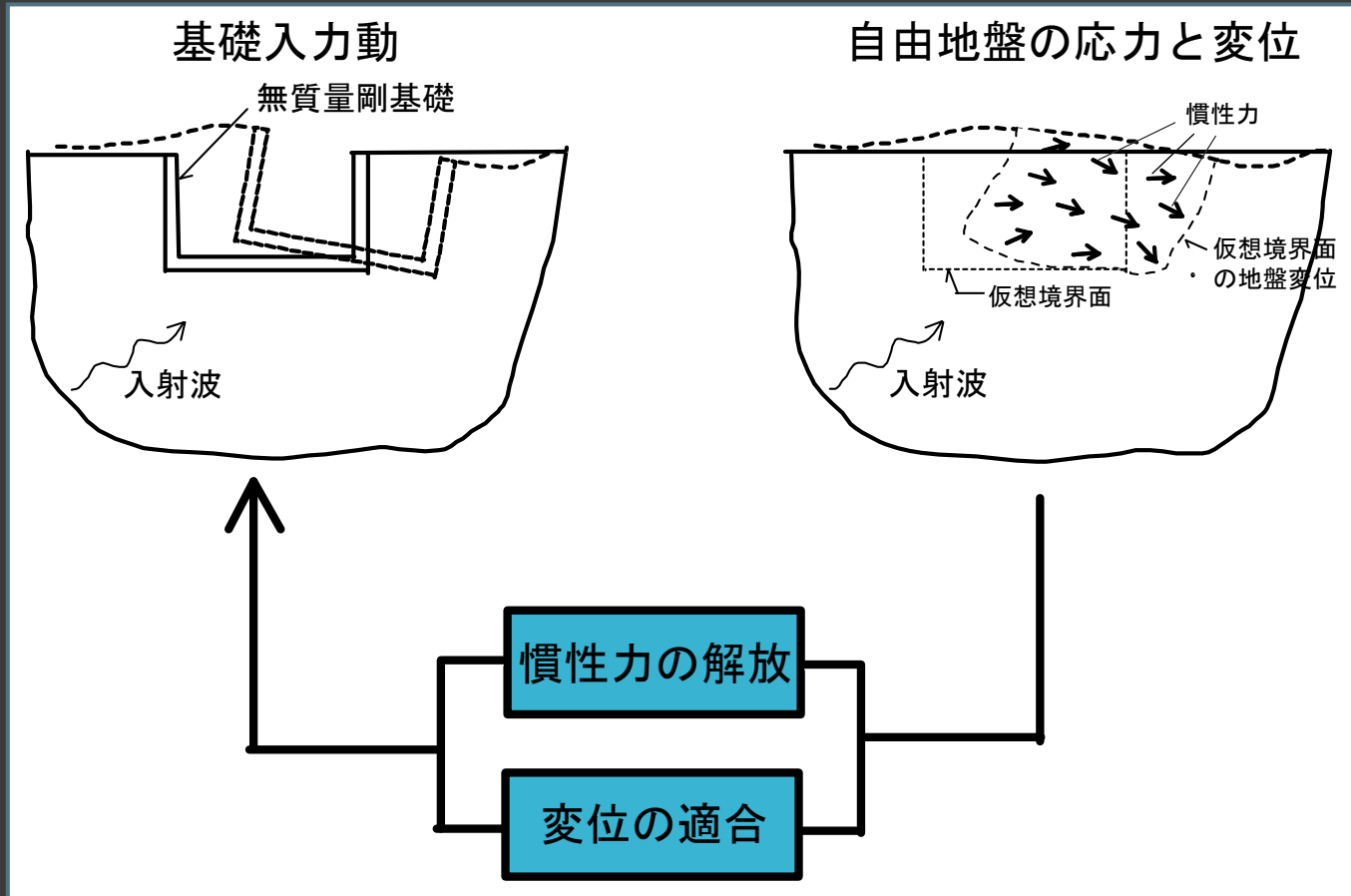
$[K(\omega)]$ Impedance Matrix
(既存の結果を利用)

必要とする情報



入射波に対する地盤変位と応力

基礎入力動近似式の図式解説



$$\{U^*\} \approx [H]^{-1} \int_S [A(\bar{X})]^T \{u^f(\bar{X})\} ds$$

$$- [K(\omega)]^{-1} \int_S [A(\bar{X})]^T \{\tau_n^f(\bar{X})\} ds, \quad \bar{X} \in S$$

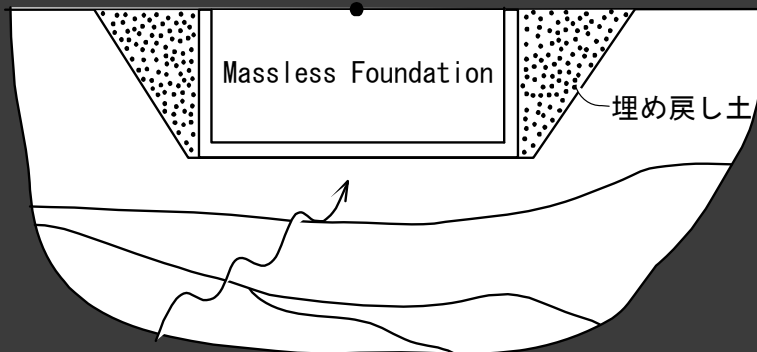
地震観測に基づく基礎入力動の推定評価

栗本・井口(1995)

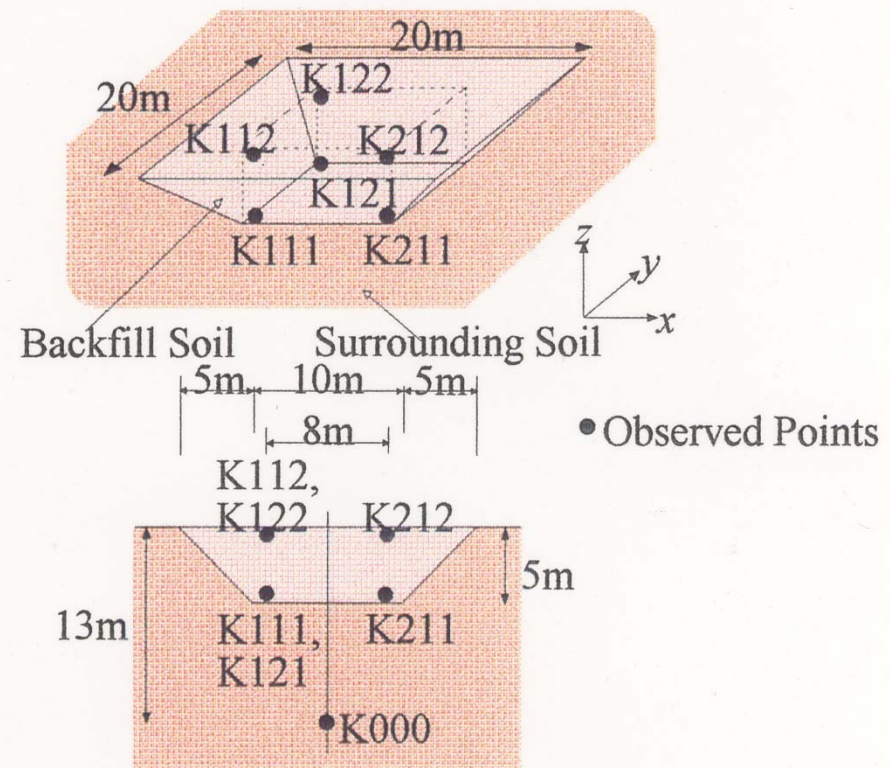
問題の設定

建設予定地での実地震動記録から、基礎入力動を如何に推定するか。

想定地盤と基礎



Location of Seismometers



地震観測に基づく基礎入力動の評価



埋め戻し土のS波速度

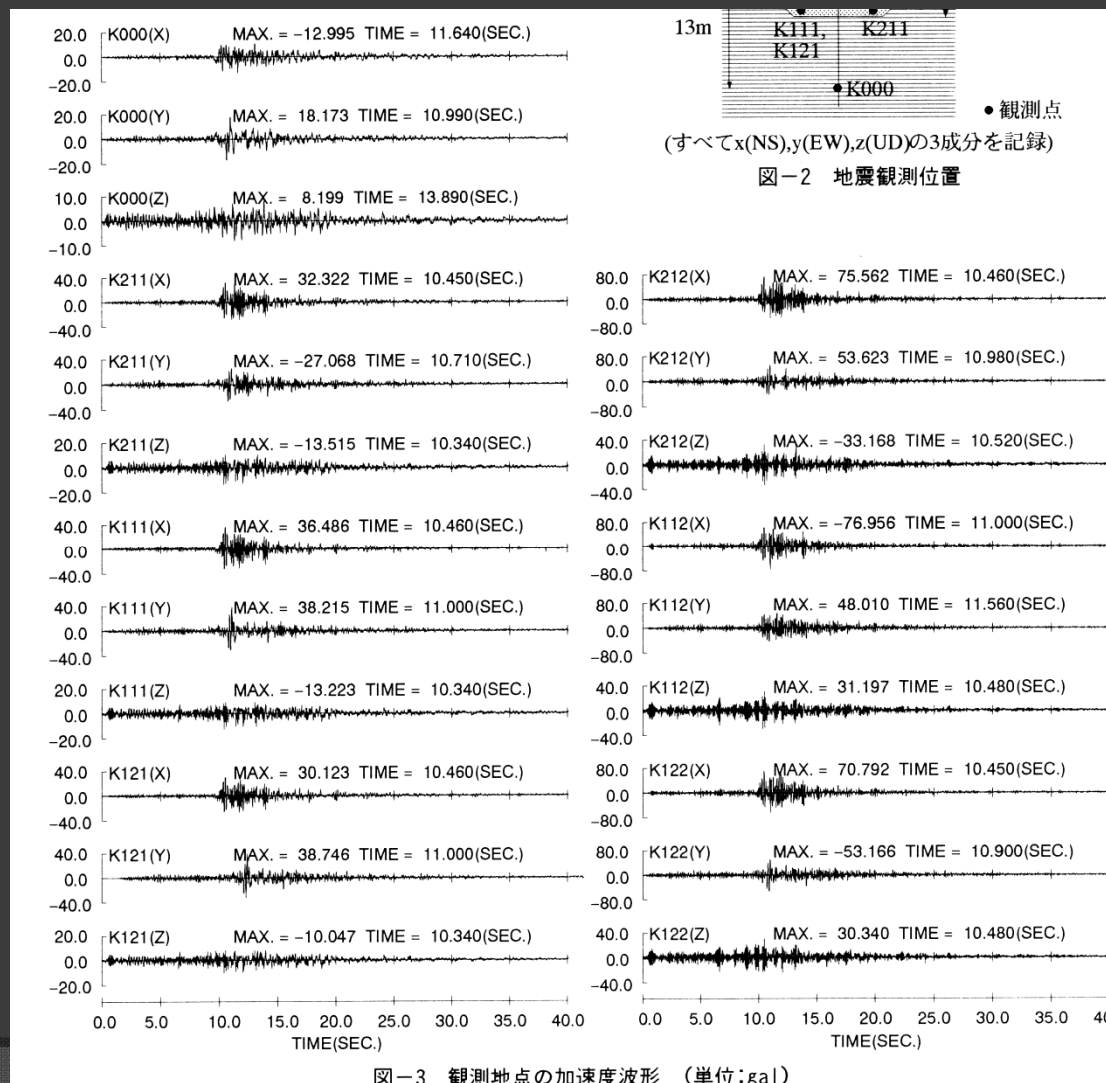
$$V_s = 130m/sec$$

埋め込み基礎設置前

自由地盤地震観測
(青森県東通り)



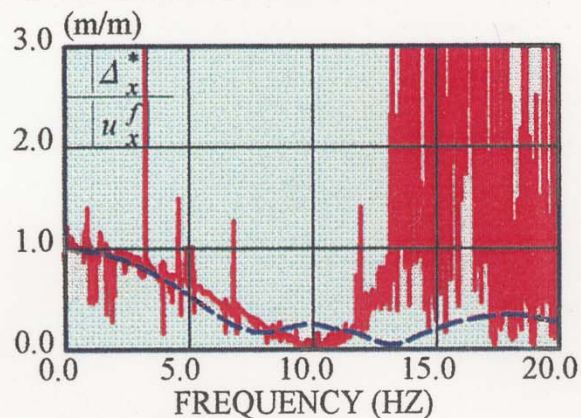
地震観測に基づく基礎入力動の評価



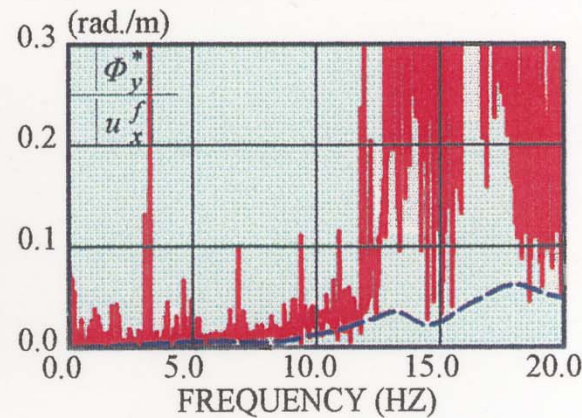
地震規模: M=6.5
 震源深さ: 90Km
 最大加速度(地表)
 水平(x方向); 75gal
 水平(y方向); 50gal
 上下 ; 30gal

地震観測に基づく基礎入力動の評価

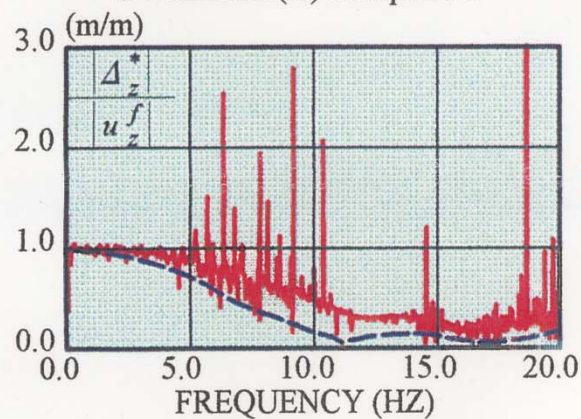
Foundation Input Motions for Embedded Foundation



a. Horizontal(X) Component



b. Rotational(X) Component



c. Vertical Component

— OBSERVED
— Axisymmetric FEM

観測値と計算結果の比較

基礎入力動に占める成分割合

$$\{U^*\} \approx [H]^{-1} \int_S [A(\bar{X})]^T \{u^f(\bar{X})\} ds$$

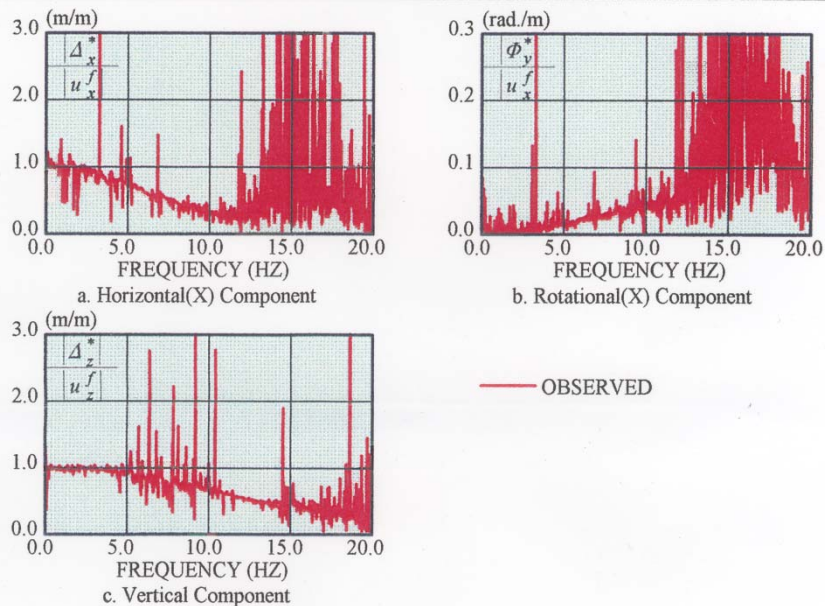
$$- \omega^2 [K(\omega)]^{-1} \int_V \rho(X) [A(X)]^T \{u^f(X)\} dV,$$

$$\bar{X} \in S, X \in V$$

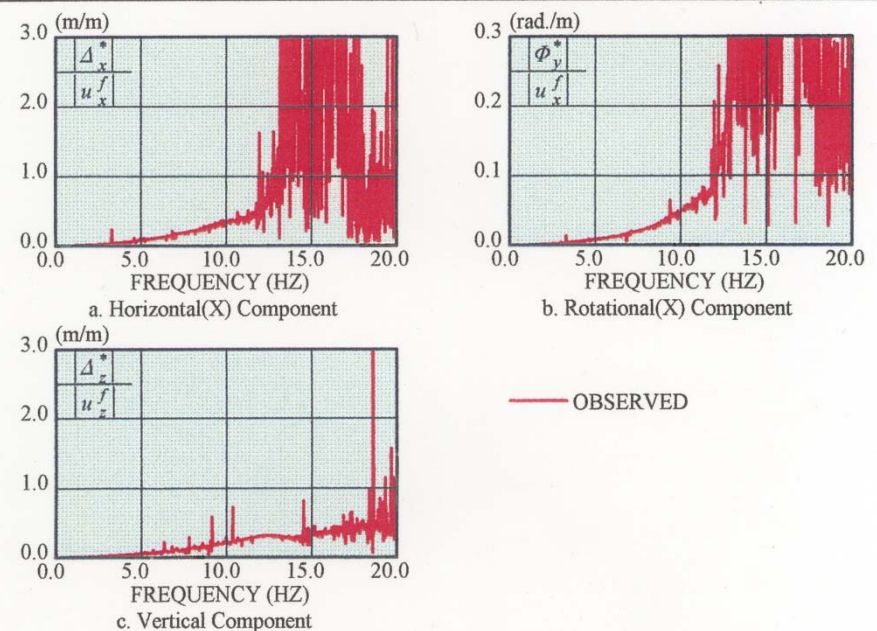
第1項(変位適合)

第2項(地盤慣性力)

Contribution of $([H]^{-1} \int_S [A(\bar{X})]^T \{u^f(\bar{X})\} ds)$



Contribution of $(-\omega^2 [K]^{-1} \int_V \rho(X) [A(X)]^T \{u^f(X)\} dV)$



基礎入力動特性のモデル化

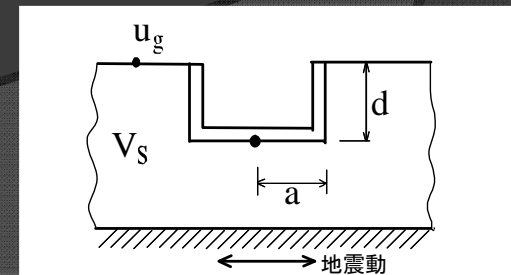
◎ Kauselのモデル

Kausel E., R. V. Whitman, J. P. Morray and F. Elsabee; The Spring Method for Embedded Foundations, Nuclear Engng and Design, Vol 48, pp377-392,1978.

$$\text{水平} \quad |F_H(\omega)| = \left| \frac{\Delta^*(\omega)}{u_g(\omega)} \right| = \begin{cases} \cos(kd)L & kd < 1.1 \\ 0.453L & kd > 1.1 \end{cases}$$

$$\text{回転} \quad |F_R(\omega)| = \left| \frac{a\Phi^*(\omega)}{u_g(\omega)} \right| = \begin{cases} 0.257(1 - \cos(kd))L & kd < \pi/2 \\ 0.257L & kd > \pi/2 \end{cases}$$

$$\text{波数} \quad k = \frac{\omega}{V_s}$$



基礎入力動特性のモデル化

◎ 原田のモデル

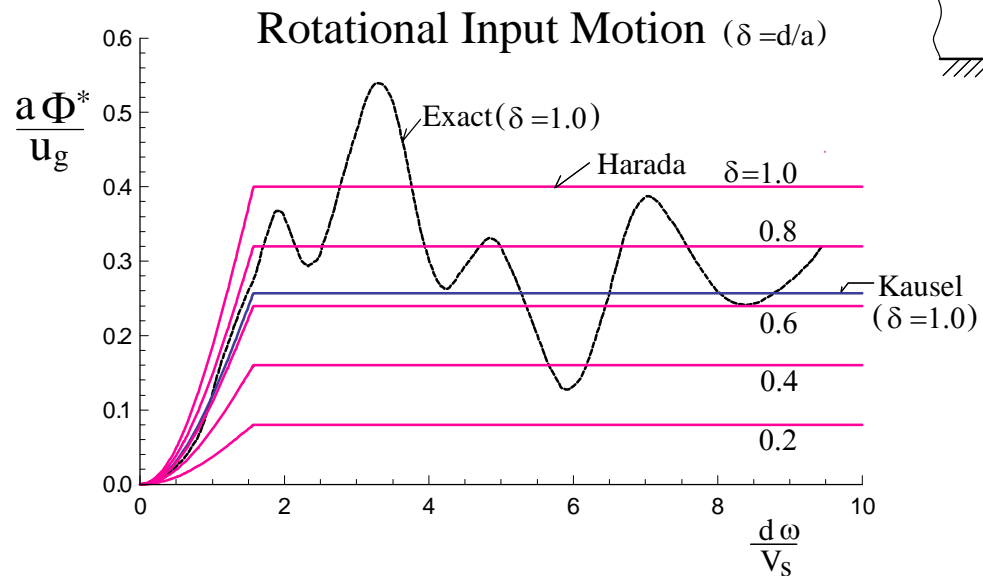
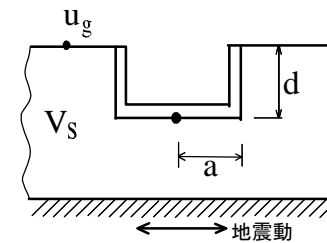
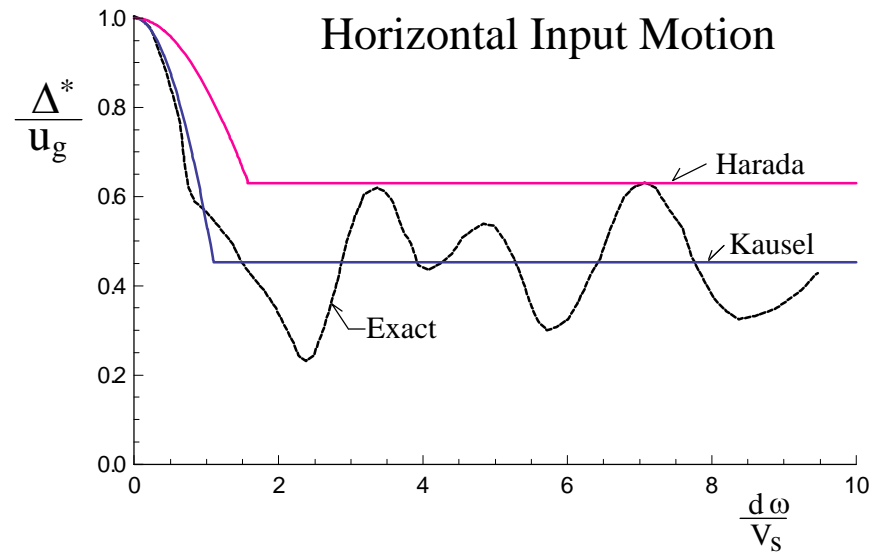
Harada, T. ; Dynamic Soil Structure Interaction Analysis by Continuum Formulation Method, 学位論文 (東京大学), 1979

$$\text{水平} \quad |F_H(\omega)| = \left| \frac{\Delta^*(\omega)}{u_g(\omega)} \right| = \begin{cases} \sin(kd)/(kd)L & kd < \pi/2 \\ 0.63L & kd > \pi/2 \end{cases}$$

$$\text{回転} \quad |F_R(\omega)| = \left| \frac{a\Phi^*(\omega)}{u_g(\omega)} \right| = \begin{cases} 0.4\delta(1-\cos(kd))L & kd < \pi/2 \\ 0.4\delta L & kd > \pi/2 \end{cases}$$

$$k = \frac{\omega}{V_s}, \quad \delta = \frac{d}{a} \quad \text{埋め込み深さ比}$$

基礎入力動特性モデルの比較



基礎入力動の今後の課題

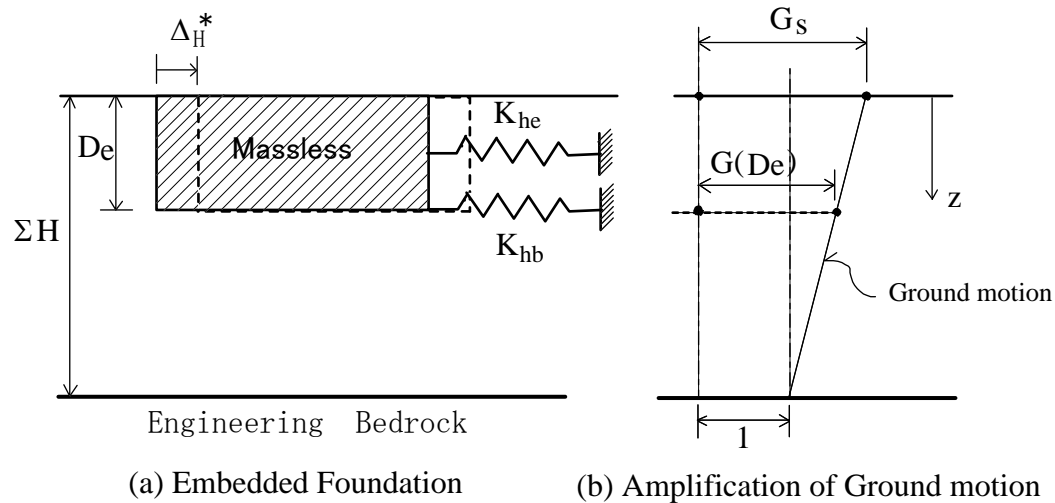
- ◎ 基礎入力動特性のモデル化は水平と回転と捩れの位相関係を含むものでなければならない。
- ◎ 杭基礎に対する基礎入力動特性の検討→モデル化

参考論文

Dezi, F., S. Carbonari and G. Leoni: A Model for the 3D Kinematic Interaction Analysis of Pile Groups in Layered Soil, EESD, Vol. 38, 2009, pp1281-1305.

- ◎ 埋め込み基礎を対象とした地震動の空間変動分布に対する入力動

4. 限界耐力法算における 入力低減係数



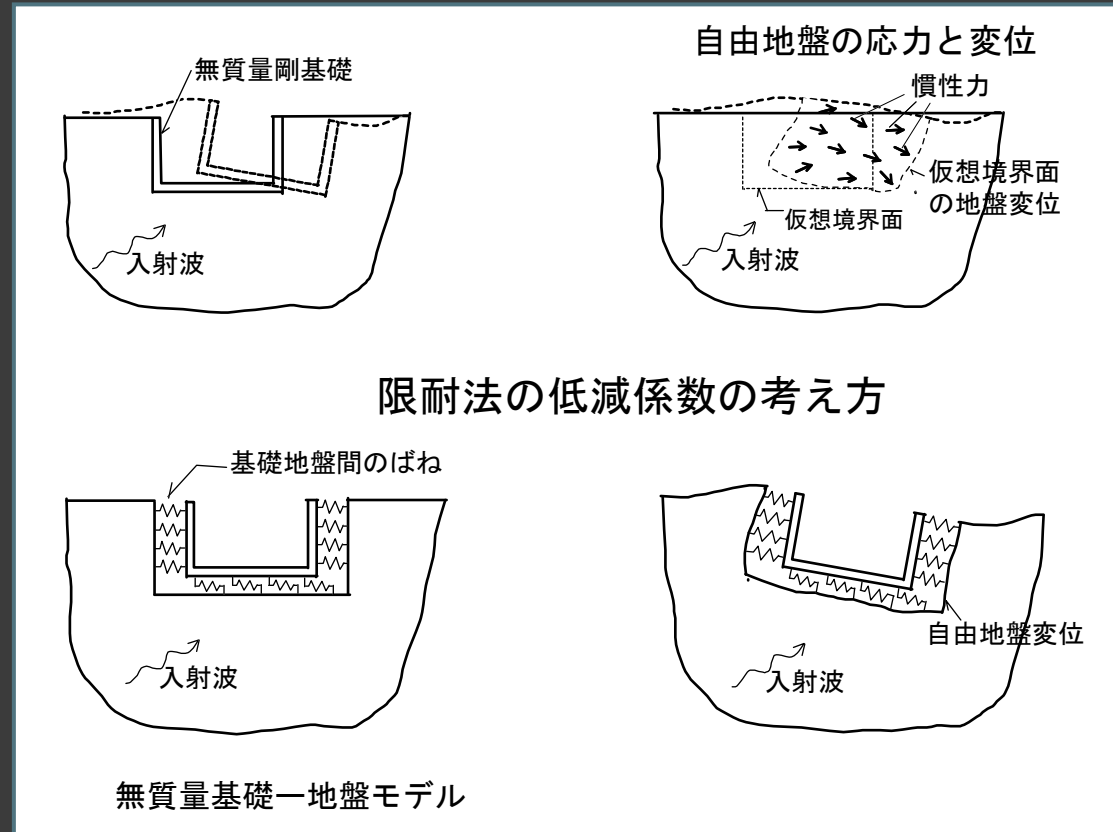
入力低減係数

$$\beta' = \frac{K_{hb} \cdot G(D_e) / G_s + K_{he}}{K_{hb} + K_{he}}$$

$$G(D_e) = G_s \left\{ 1 - \frac{(1 - 1/G_s)}{\Sigma H} D_e \right\}$$

ΣH : 表層地盤の層厚

基礎入力動評価式から見た低減係数



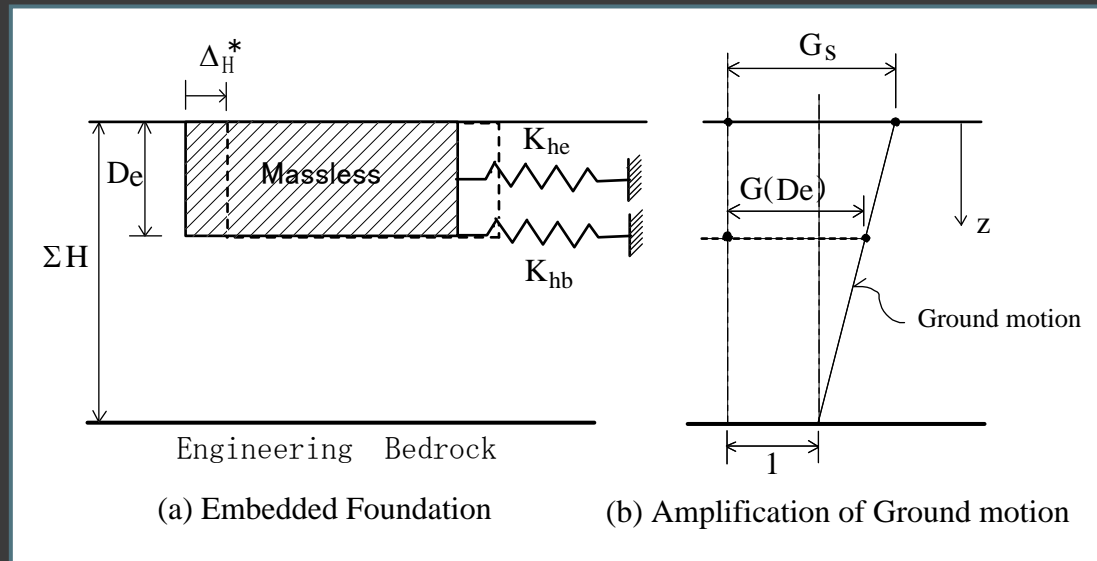
地動と基礎応答の差の重み付き二乗積分値

$$W = \int_S k_x(x, y, z) \left\{ u_x - (\Delta_x^* + z\Phi_y^*) \right\}^2 ds$$

$k_x(x, y, z)$ 基礎と地盤間に分布する地盤ばね

最小二乗法(回転入力動無視)

$$\frac{\partial W}{\partial \Delta_x^*} = 0 \quad \Delta_x^* = \frac{\int_S k(x, y, z) u_x(x, y, z) ds}{\int_S k(x, y, z) ds}$$



地盤ばねが底面と側面に集約されている場合

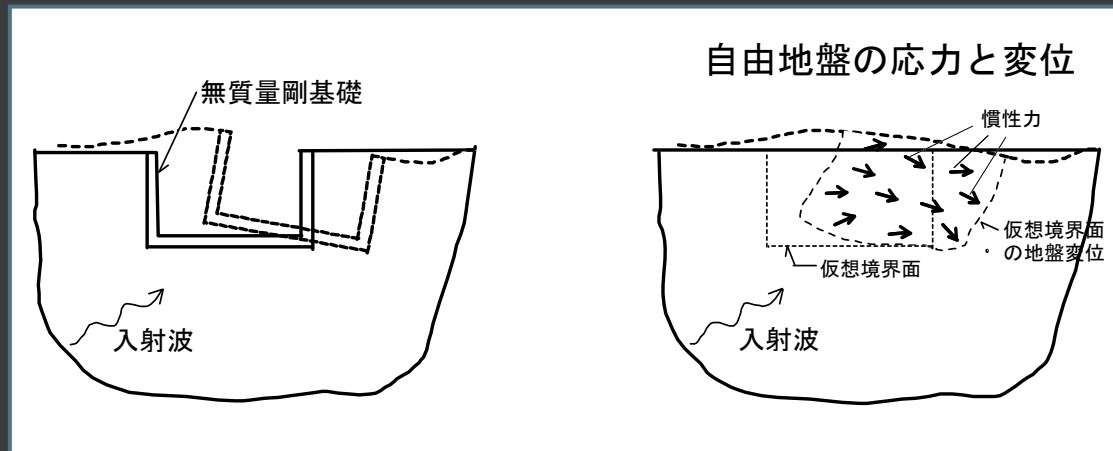
$$\Delta_x^* = \frac{K_{hb} \cdot G(D_e) + K_{he} G_s}{K_{hb} + K_{he}}$$

ただし、 $D_e \ll \Sigma H$

低減係数 $\beta' = \frac{\Delta_x^*}{G_s} = \frac{K_{hb} \cdot G(D_e) / G_s + K_{he}}{K_{hb} + K_{he}}$

限耐の入力低減係数の問題点

- 入射波に対して地盤に生ずる慣性力（排土重量）の影響を無視。



$$\begin{aligned} \{U^*\} &\approx [H]^{-1} \int_S [A(\bar{X})]^T \{u^f(\bar{X})\} ds \\ &\quad - [K(\omega)]^{-1} \int_S [A(\bar{X})]^T \{\tau_n^f(\bar{X})\} ds, \quad \bar{X} \in S \end{aligned}$$

- 回転成分の入力動を考えていない。

5. 有効(実効)入力動の実証研究

◎ 兵庫県南部地震記録の分析

安井 譲, 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, No. 512, pp111-118, 1998年10月.

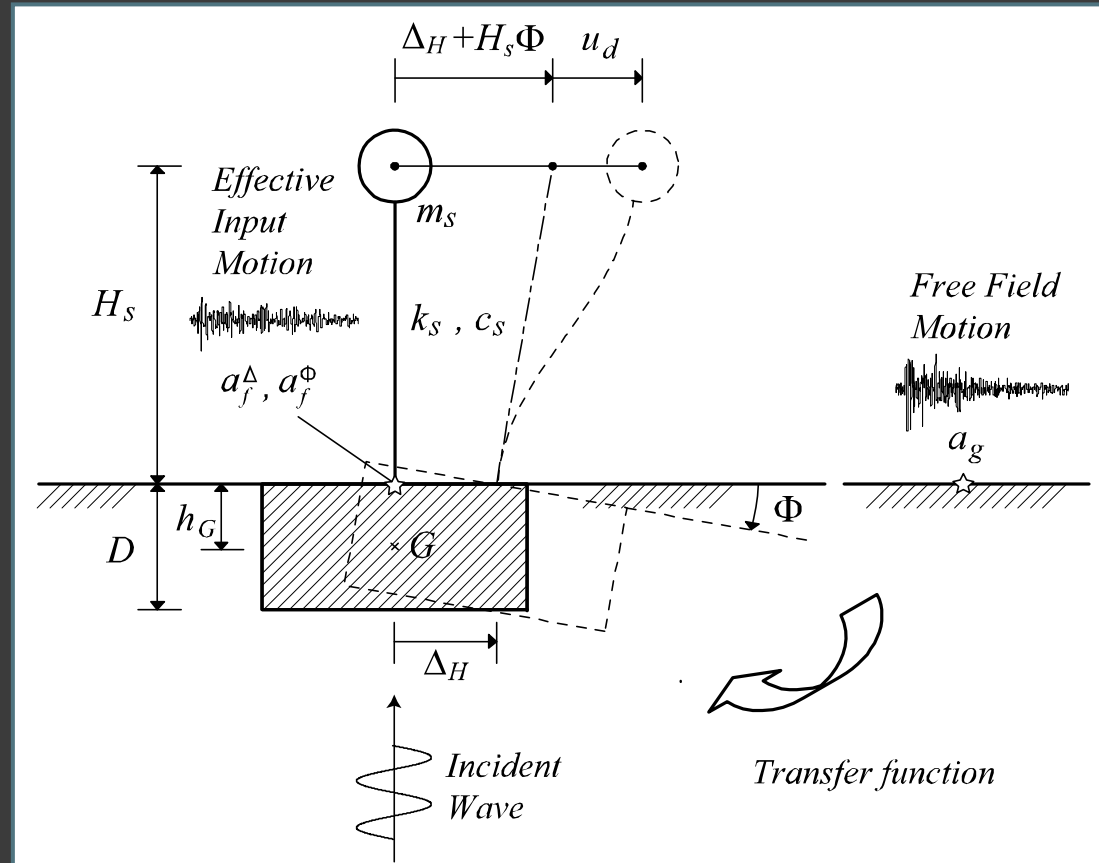
◎ 防災科学技術研究所大型振動台の地震記録

川島 学, 井口道雄, 箕輪親宏; 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, 日本建築学会構造系論文集, No. 615, pp85-92, 2007年5月.

◎ 建築研究所の建物―地盤系地震観測記録

川島 学, 大川 出, 鹿嶋俊英, 井口道雄; 地震観測に基づく建物―地盤系動特性の総合評価に関する研究 (その5) 建築研究所建物における基礎入力動の評価, 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-2分冊, pp139-140, 2007年8月.

有効入力動とは？

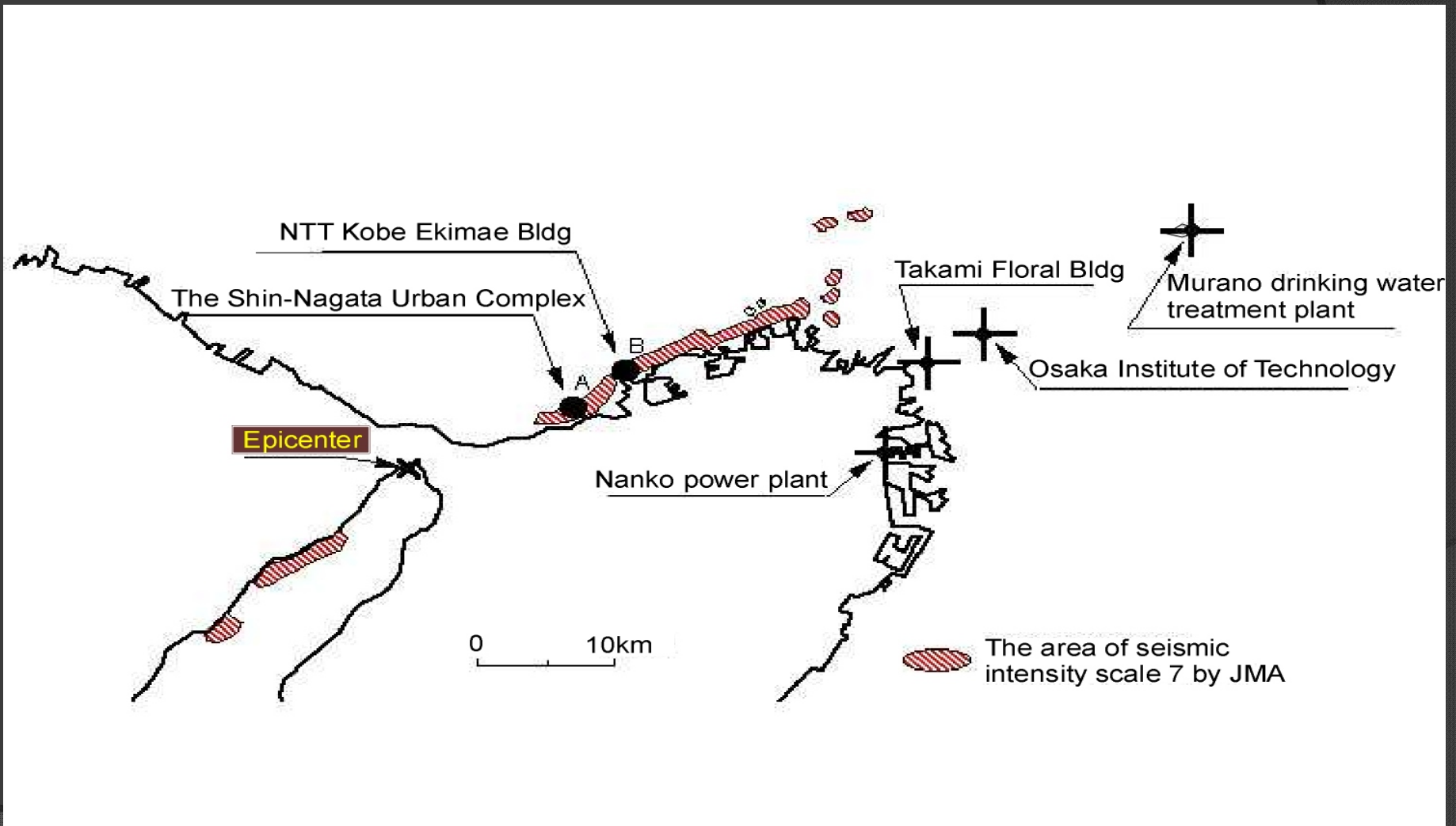


上部構造の運動方程式:

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

(有効入力動)

建物の設置場所

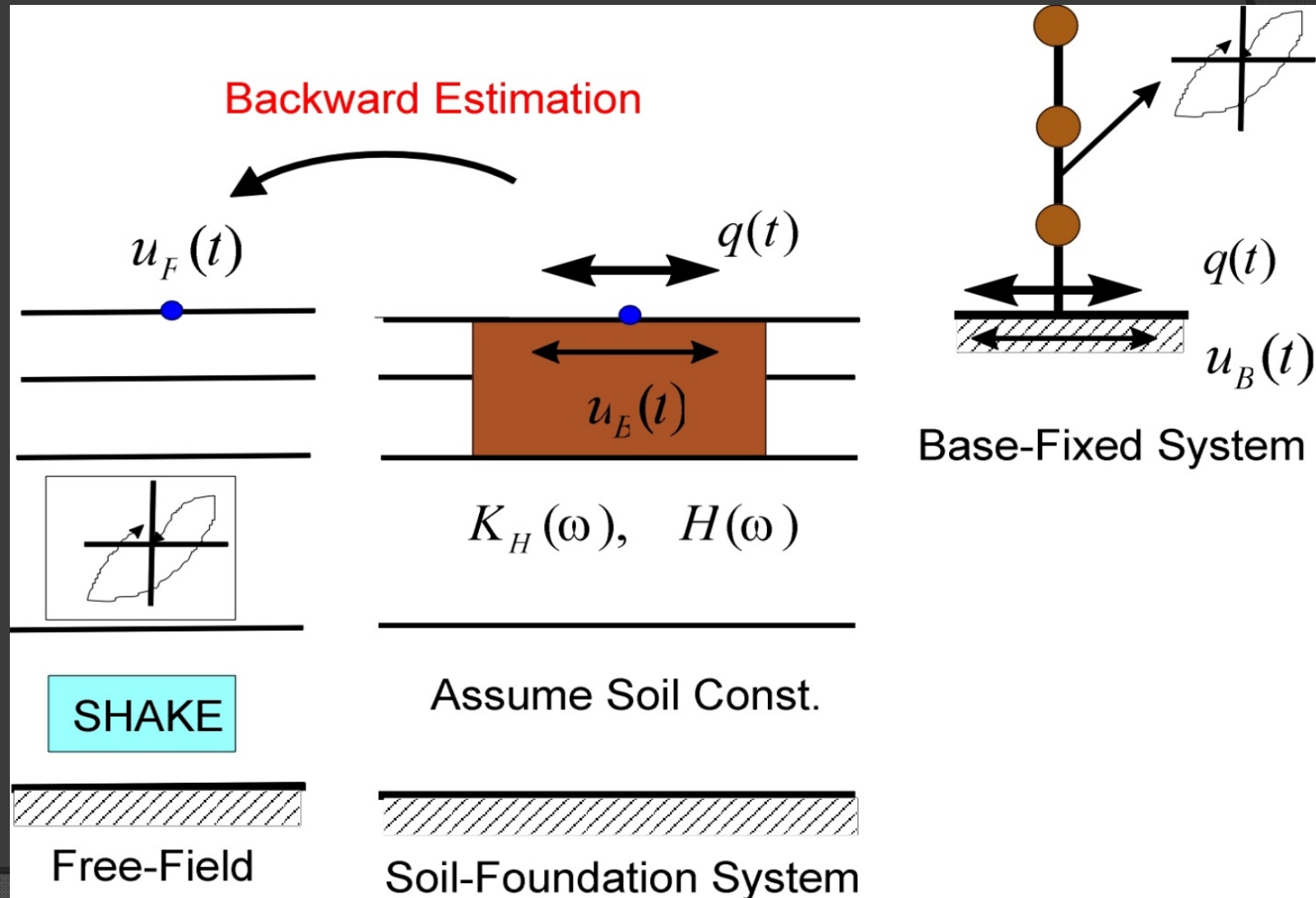


分析した建物リスト

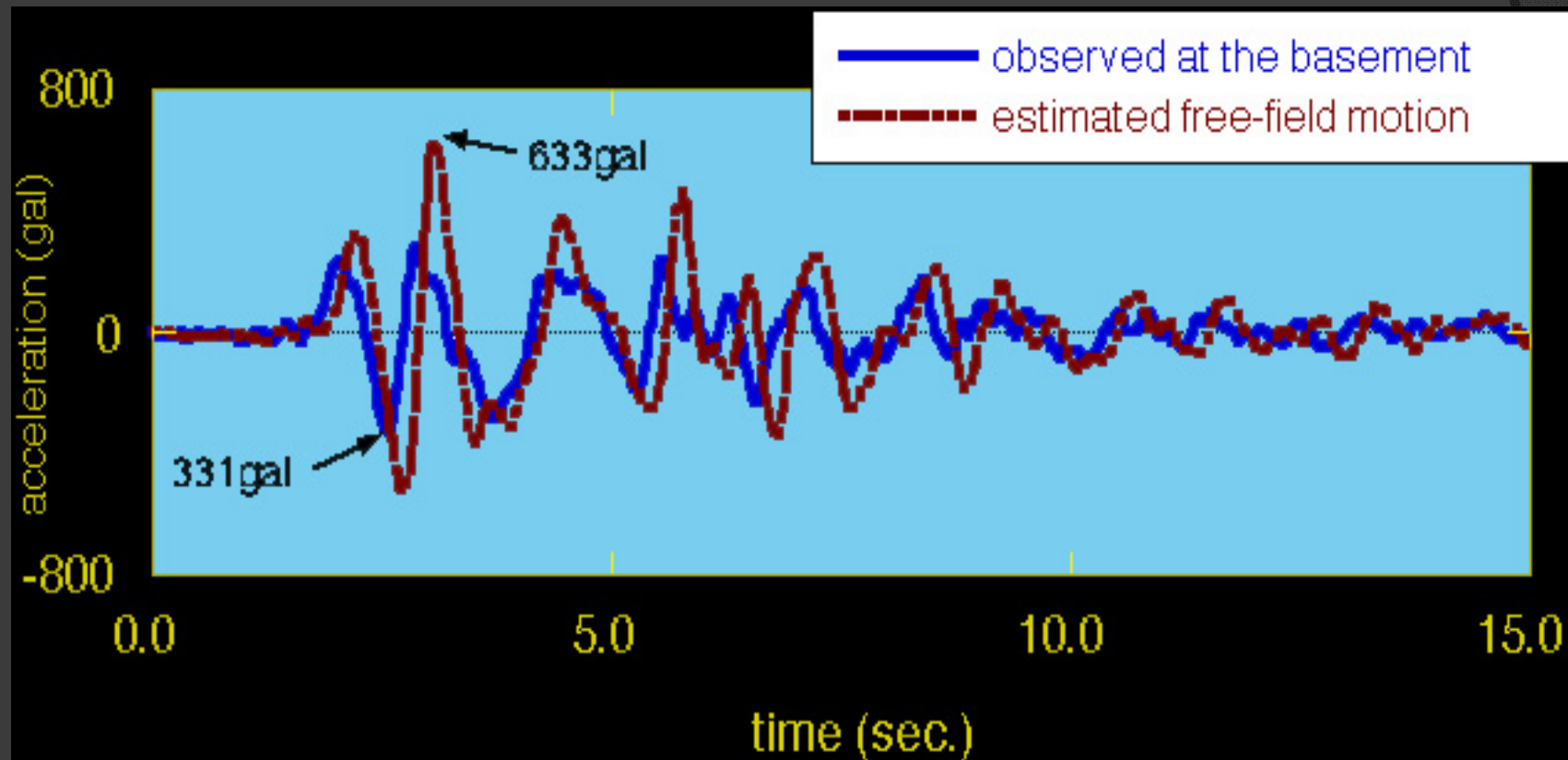
	Takami Floral Bldg.	Nanko power plant Smokestack	Nanko power plant Main bldg.	Osaka Institute of Technology	Murano drinking water plant
structure type	RC frame	RC	Steel	SRC frame	RC frame
foundation type	Cast-in place Concrete piles	Upper:SC piles Lower:PHC piles	upper:SC piles lower:PHC piles	Cast-in place Concrete piles	Cast-in place Concrete piles
construction area	989.5 m ²	271.6	13817.0	788.0	6531.4
height of structure	98.2 m	200	31.0	65.65	37.7
depth of foundation	8.3 m	6.3	4.0~12.3	5.2	14.8
length of piles	22.75 m	64.5	62~70	20.3	12~16
diameter of piles	2.3 m	0.8	0.8	1.8, 2.0	2.0
number of piles	56	273	2449	24	422
Vs : subsurface layers	140~240m/s	160~350	160~350	130~150	-
Vs : bearing stratum	380 m/s	340	340	320	-
natural period NS,EW	1.41, 1.45 sec.	1.87(NS)	0.93(NS)	0.83, 0.92	0.437,0.439
seismometer on the ground surface	GL-1.5 m	GL-0.1 m	GL-0.1 m	GL-1.5 m	GL-1.0 m
seismometer on the foundation	1FL	GL±0 m	1FL	1FL	B2F (GL-10.8m)

逆解析のスキーム

— 基礎応答記録から地表地震動を推定 —

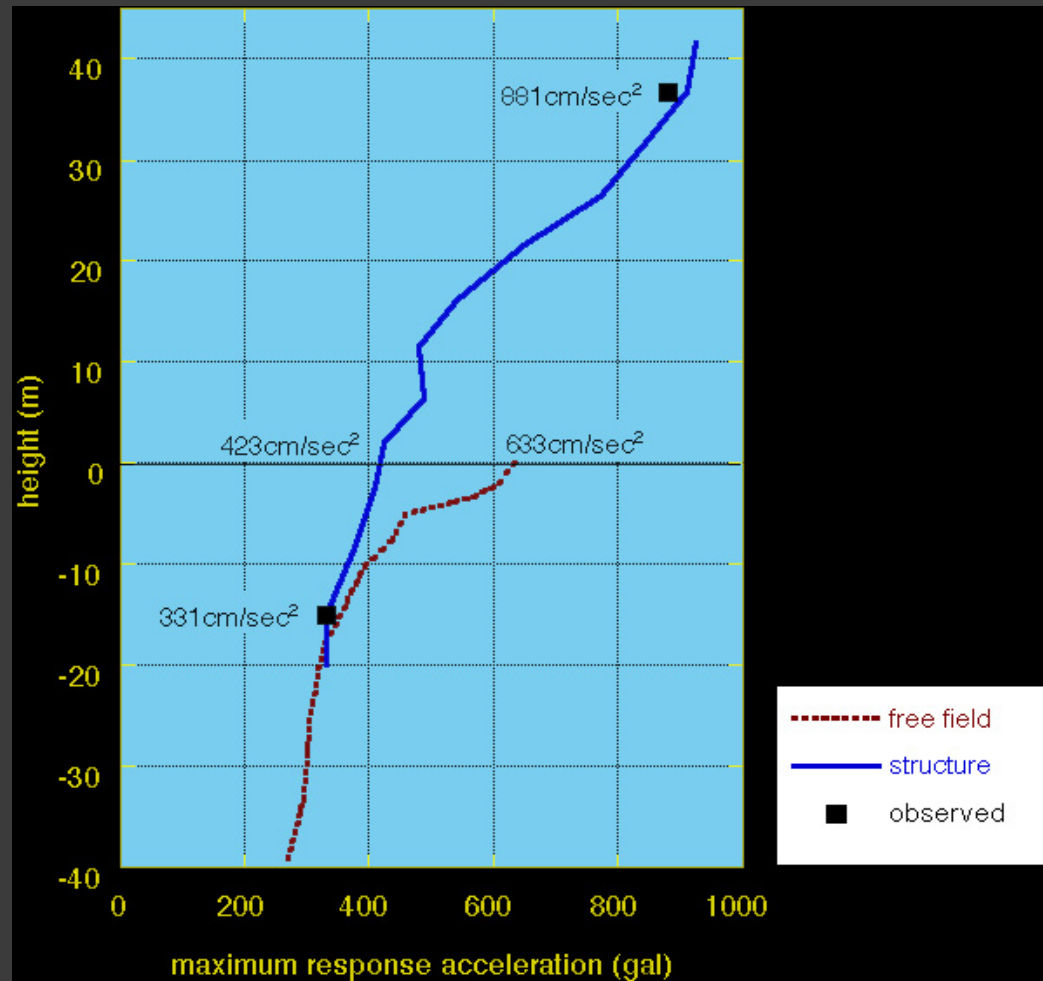


基礎の観測記録と地表の地震動



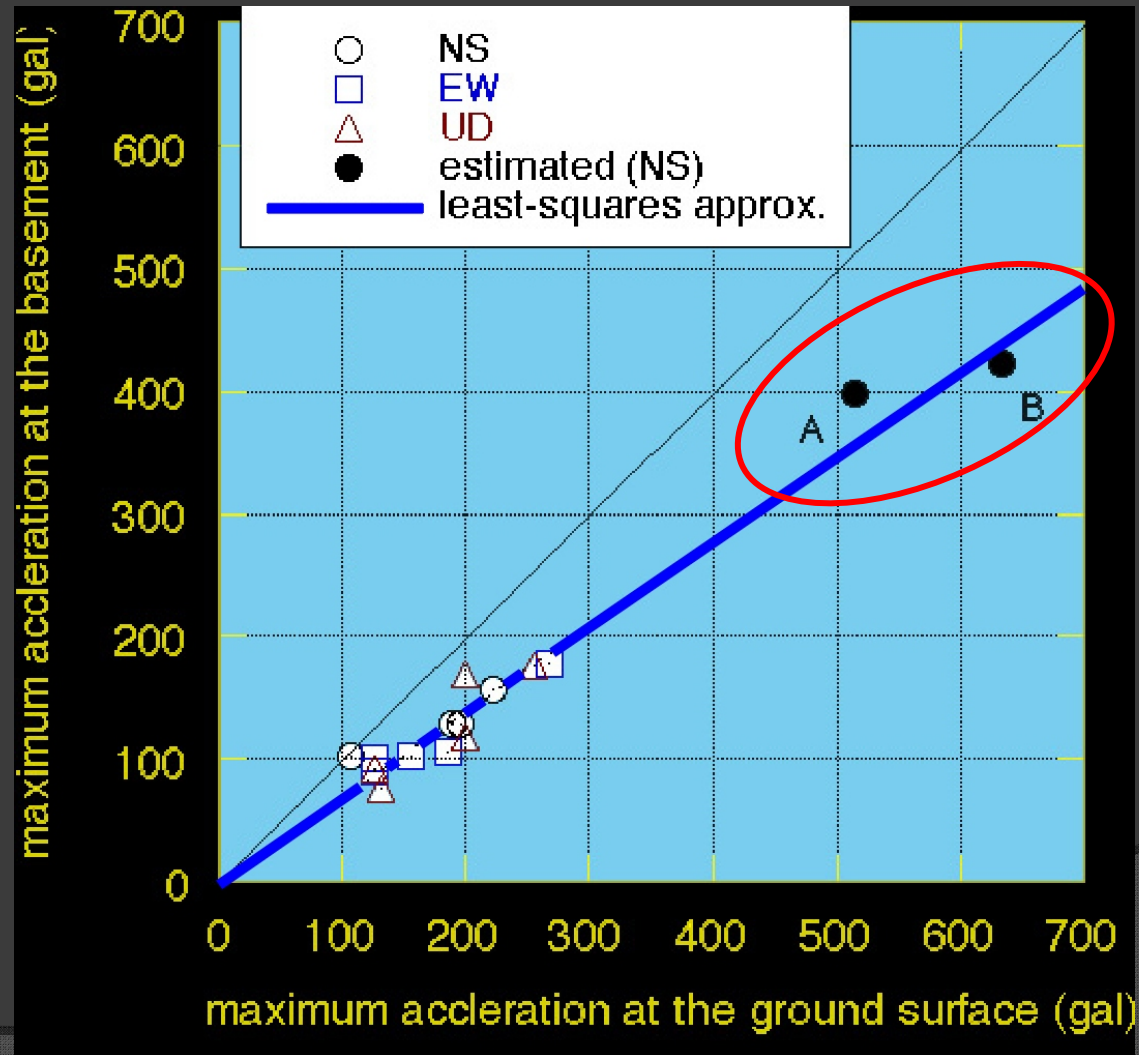
(加速度波形)

建物と地盤の最大加速度分布



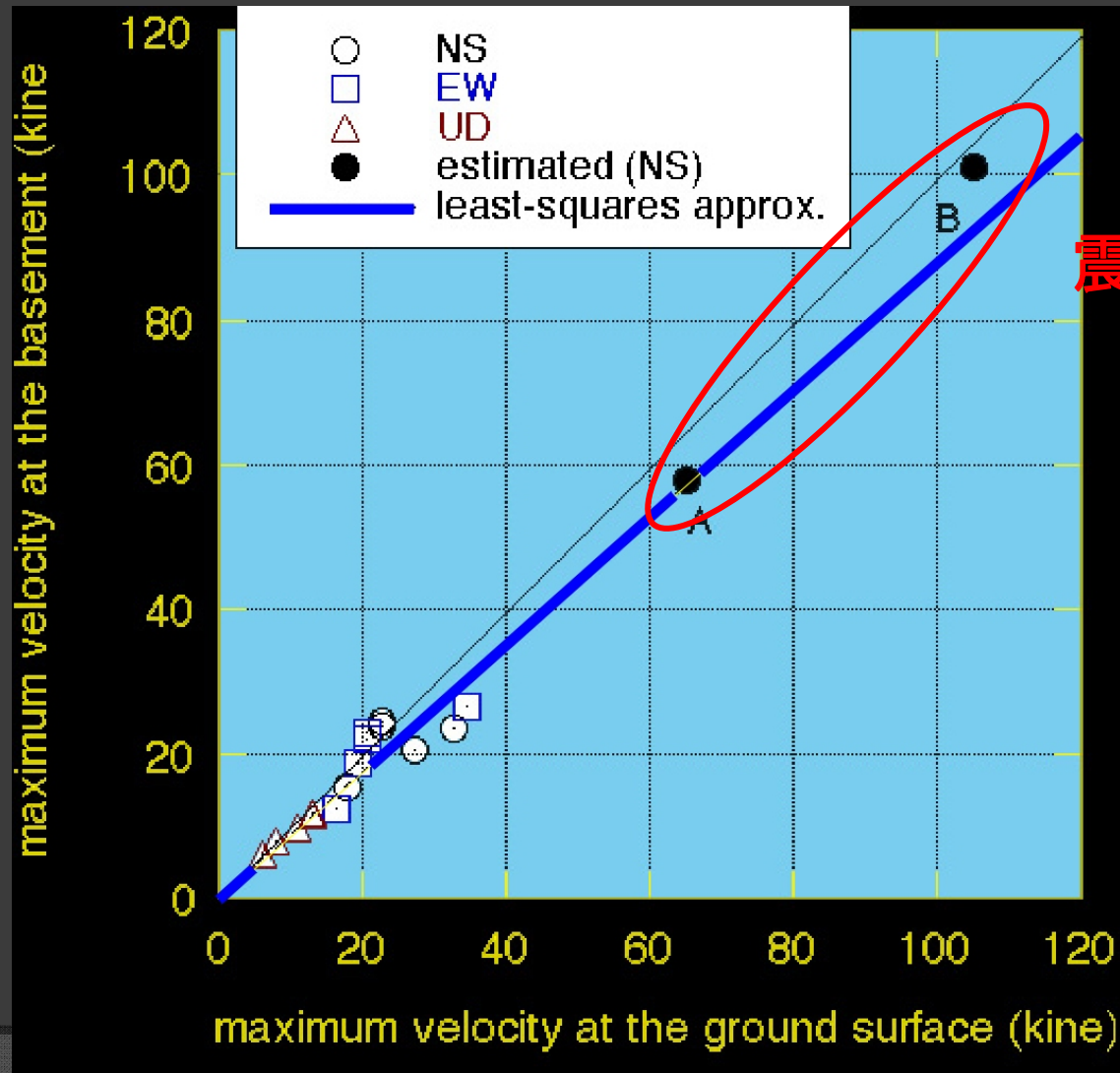
Building B

地表と建物基礎の最大加速度



震災の帯内

地表と建物基礎の最大速度



有効入力動の評価指標

◎ Peak Ratio of Motions

Yasui et al. (1998)	・ ・ ・ ・ ・	<i>Hyogoken Nanbu Earthq.</i>
Celebi(1999)	・ ・ ・ ・ ・	<i>Hospital Bldg (1994 Earthq.)</i>
Iguchi et al. (2000)	・ ・ ・ ・ ・	<i>Shaking Table Foundation</i>
Kojima, Fukuwa et al. (2005)	・ ・ ・	<i>Campus Bldgs of Nagoya Univ.</i>

◎ Response Spectral Ratio

Housner(1957)	・ ・ ・ ・ ・	<i>Hollywood Storage Bldg</i>
Stewart et al.(1999)	・ ・ ・ ・ ・	<i>1994 Northridge</i>
etc.		

◎ Transfer Functions

Yasui et al. (1998)	・ ・ ・ ・ ・	<i>Hyogoken Nanbu Earthq.</i>
Cultrera, Boore et al. (1999)	・ ・ ・ ・ ・	<i>1994 Northridge</i>
Iguchi et al. (2000)	・ ・ ・ ・ ・	<i>Shaking Table Foundation</i>
Kojima, Fukuwa et al. (2005)	・ ・ ・	<i>Campus Bldgs of Nagoya Univ.</i>
etc.		

新たな指標の提案

(川島・井口・箕輪 2007)

水平動の有効入力係数

(加速度)

$$\alpha_a^\Delta = \frac{\sqrt{\int_0^\infty |a_f^\Delta(t)|^2 dt}}{\sqrt{\int_0^\infty |a_g(t)|^2 dt}}$$

回転動の有効入力係数

($L=1\text{m}$)

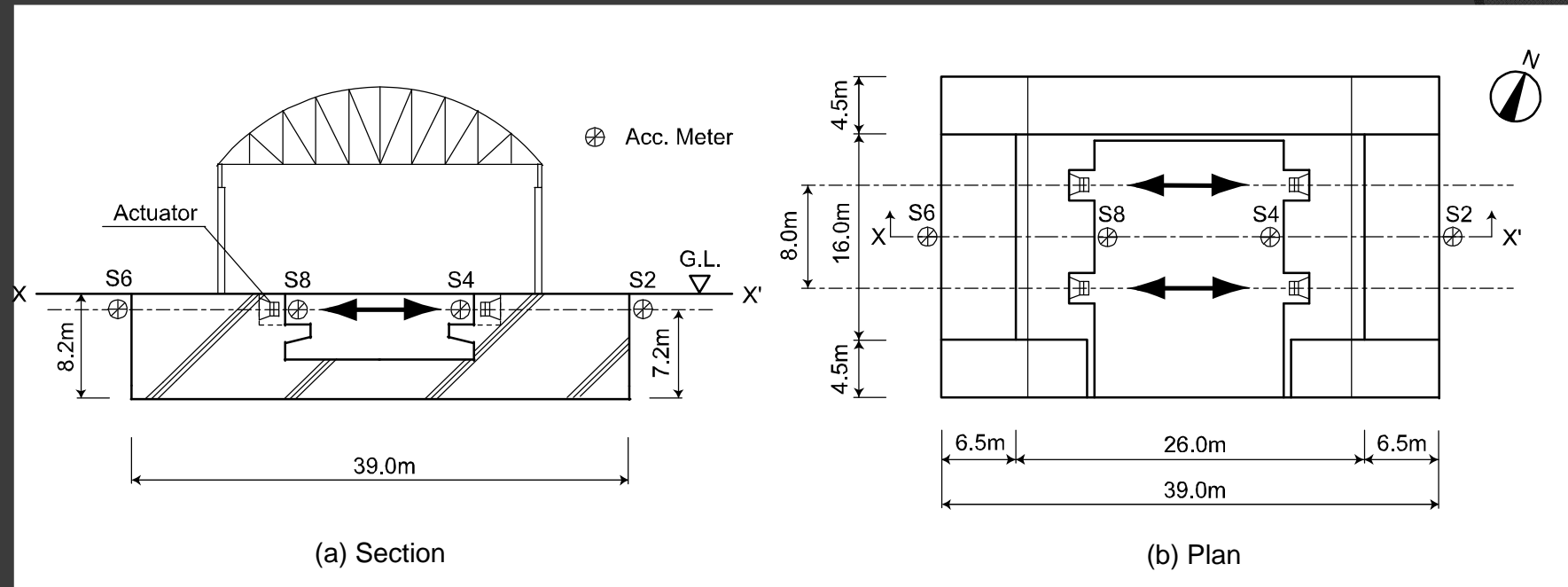
$$\alpha_a^\Phi = \frac{\sqrt{\int_0^\infty |L \cdot a_f^\Phi(t)|^2 dt}}{\sqrt{\int_0^\infty |a_g(t)|^2 dt}}$$

(基礎と地表の地震動の
2乗積分値の平方根比)

SR of integrated-squared motion(SRISM)

大型振動台基礎

- National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention -



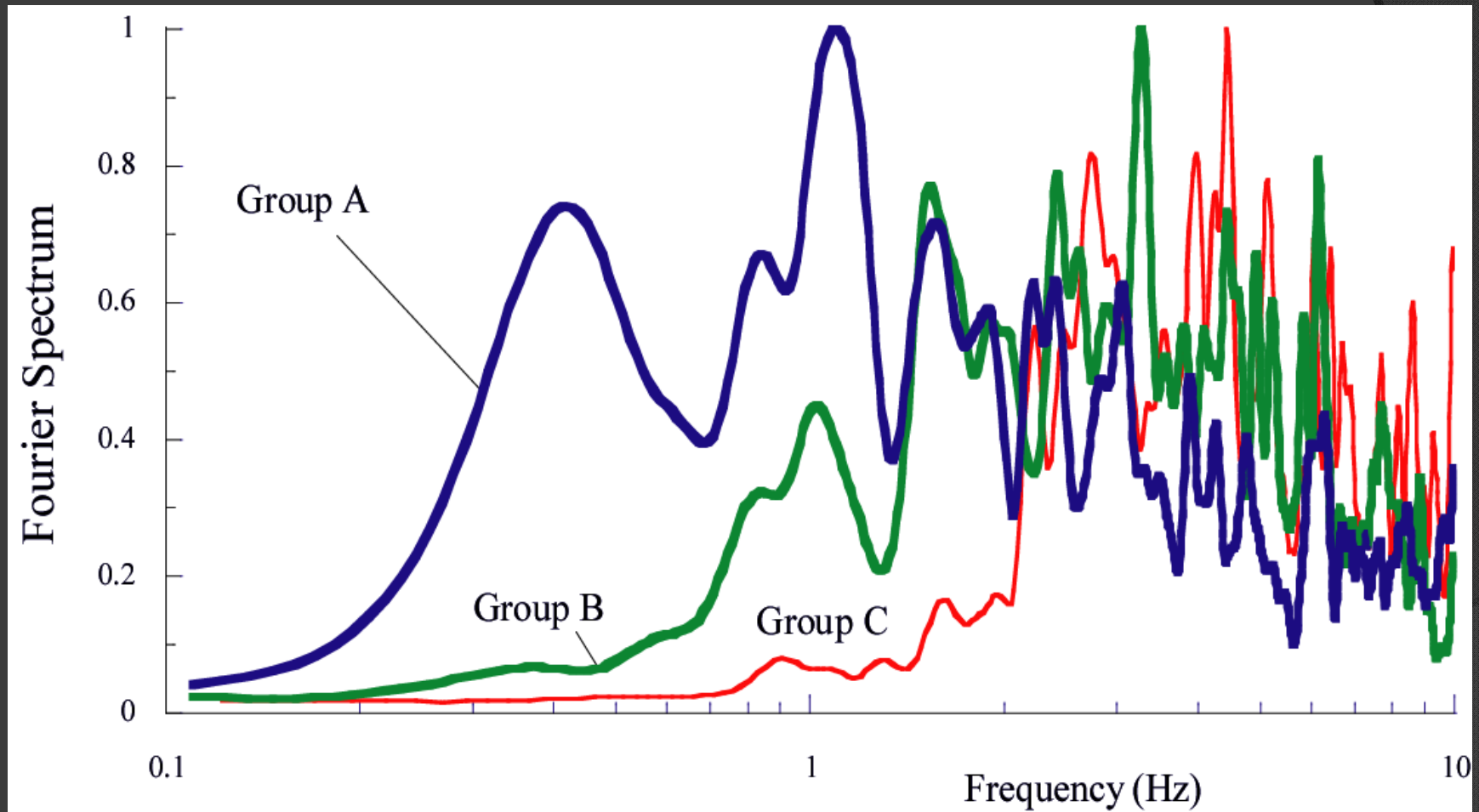
振動台基礎と地震計の配置

(約100m離れた地点で自由地盤動を観測)

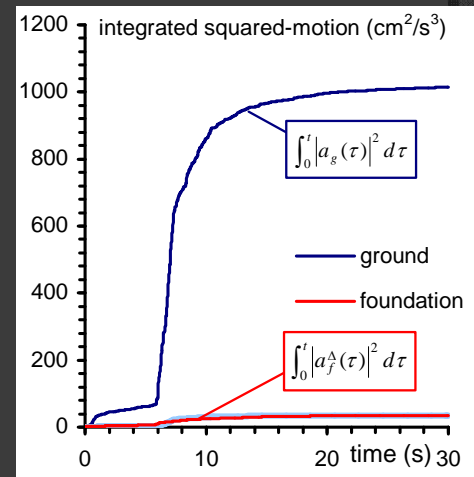
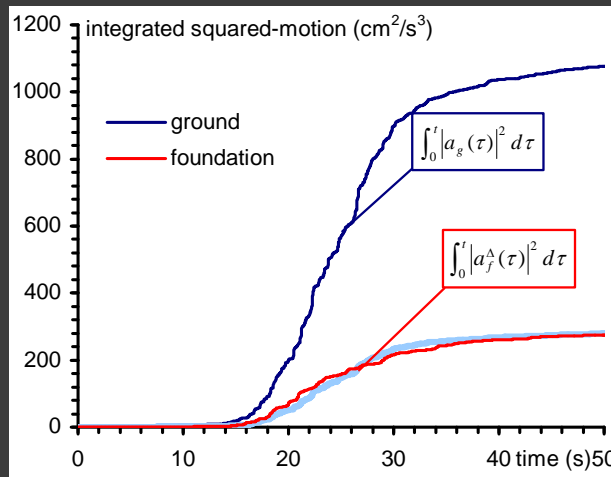
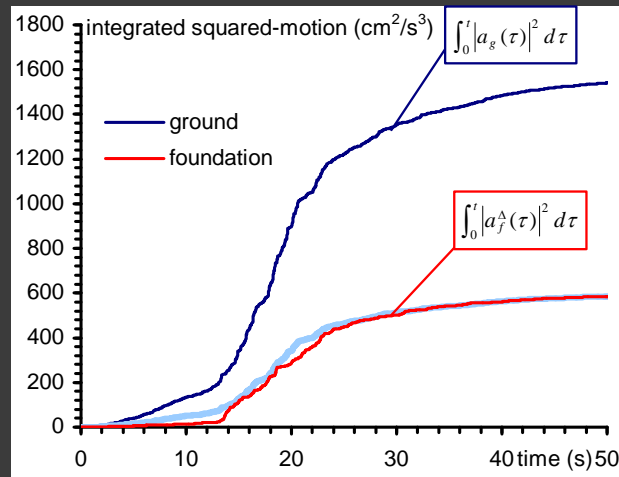
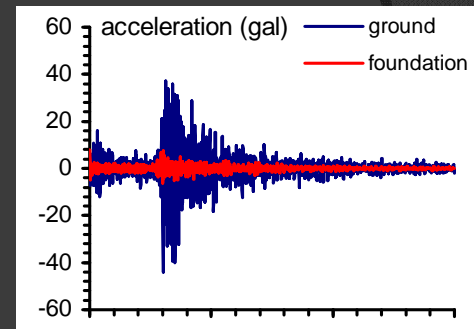
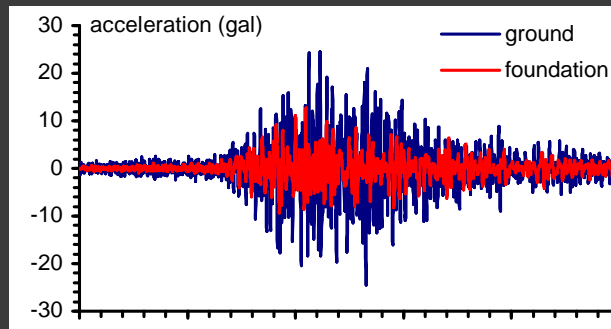
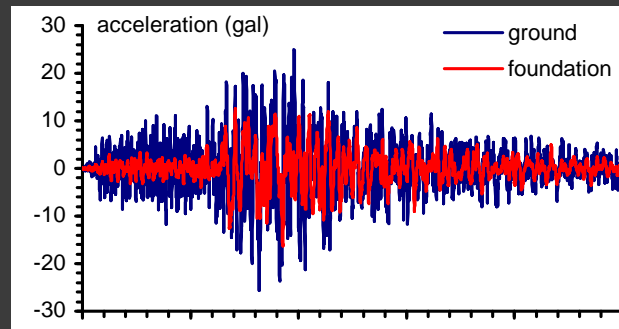
觀測地震動記錄一覽

Eq No.	Date			Hypocenter		Depth (km)	Mag. (M)	Max. of Acc.		Group
	Y	M	D	N.L.	E.L.			X(gal)	Y(gal)	
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

地震動のグループ分け



地動と基礎の加速度波形の2乗積分値



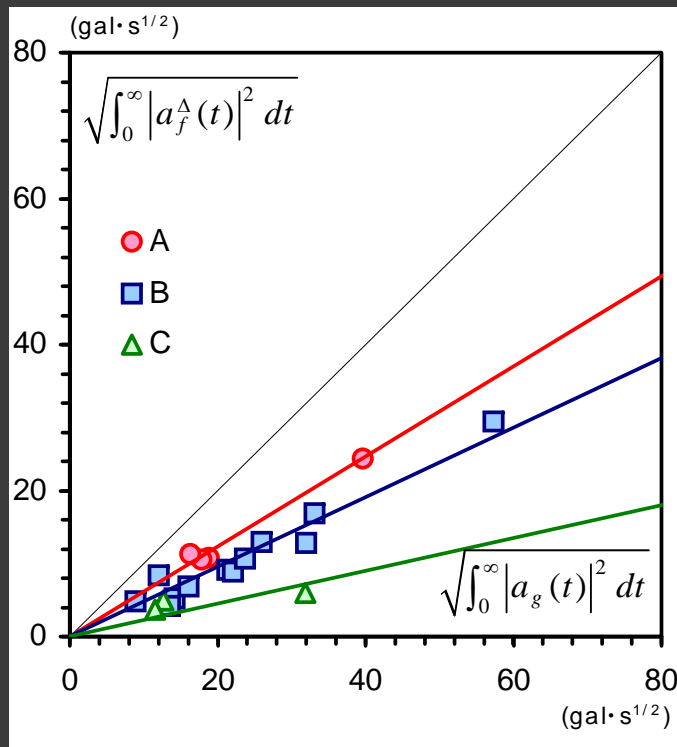
Group-A

Group-B

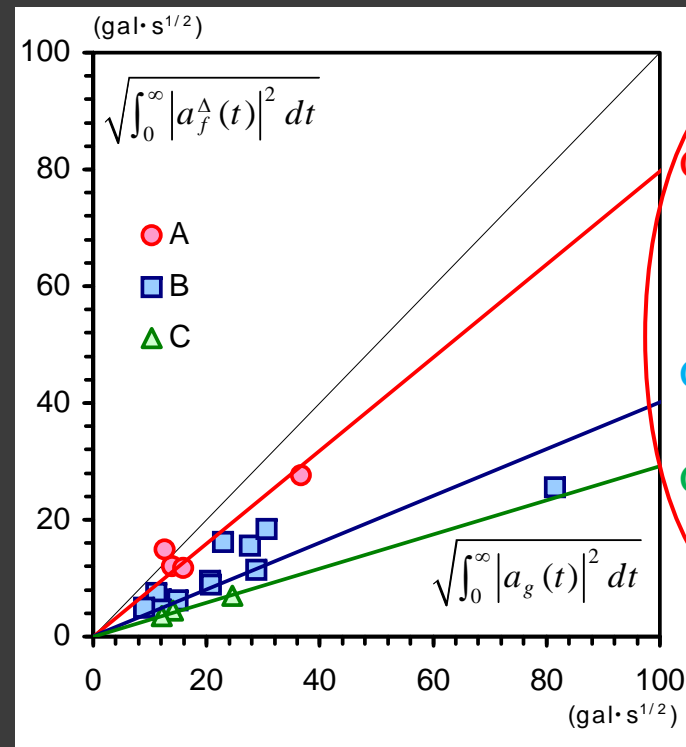
Group-C

時刻歴波形

地表と基礎のSRISMの関係



X-direction



Y-direction

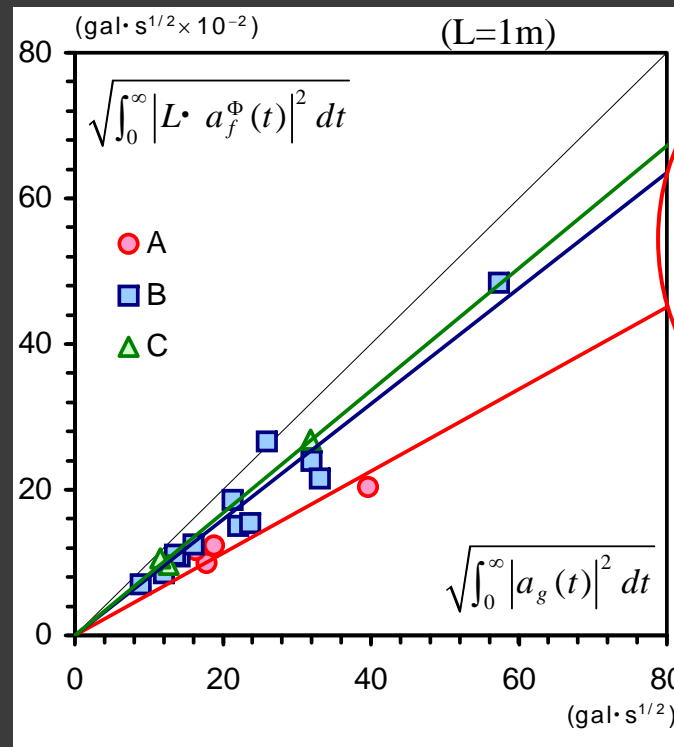
Group-A

Group-B

Group-C

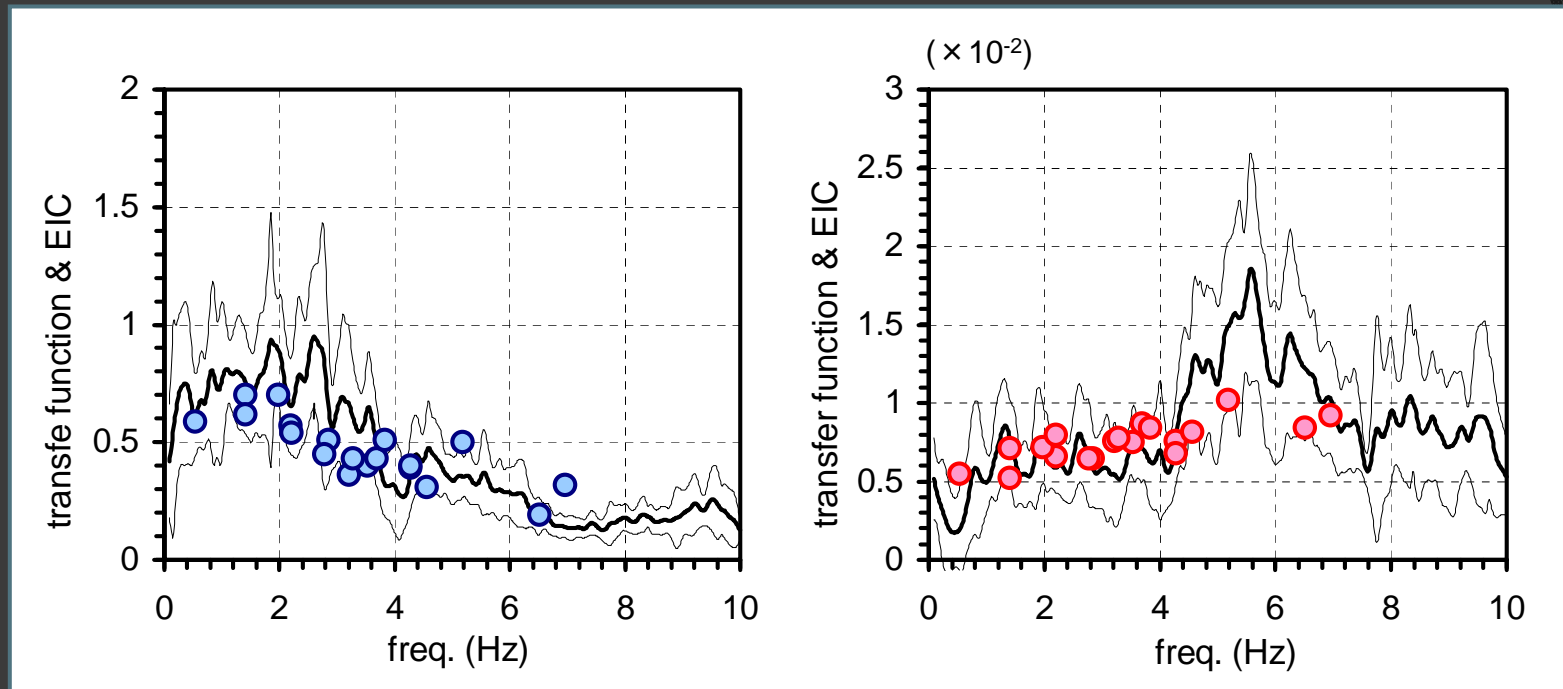
SRISM=Square Root of Integrated Squared Motion

地表の水平動と回転動のSRISMの関係



Group-C
Group-B
Group-A

有効入力係数と伝達関数の比較



Translation

Rotation

水平動の伝達関数の3Hz付近のピークは基礎—地盤系の固有振動数

(基礎—地盤系の上下動の固有振動数は7Hz付近にある)

建築研究所建物と地盤の概要

建物

SRCフレーム構造

直接基礎によりGL-8.2mの粘土層に支持

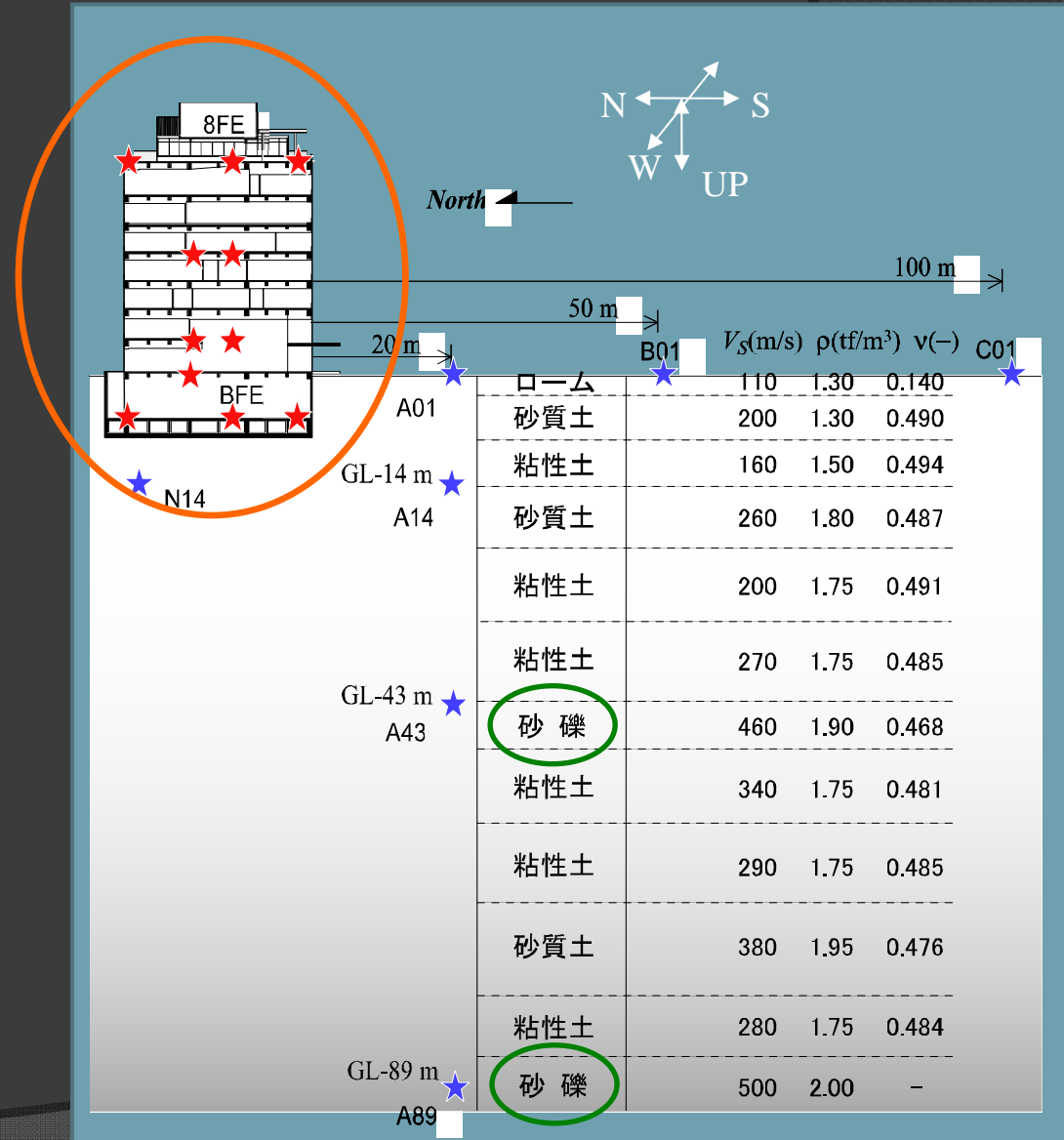
地盤構成

GL-90mまで主に粘土層と細砂、時折砂礫層を挟む

加速度計の配置

新館内11点(33成分)

周辺地盤7点(21成分)

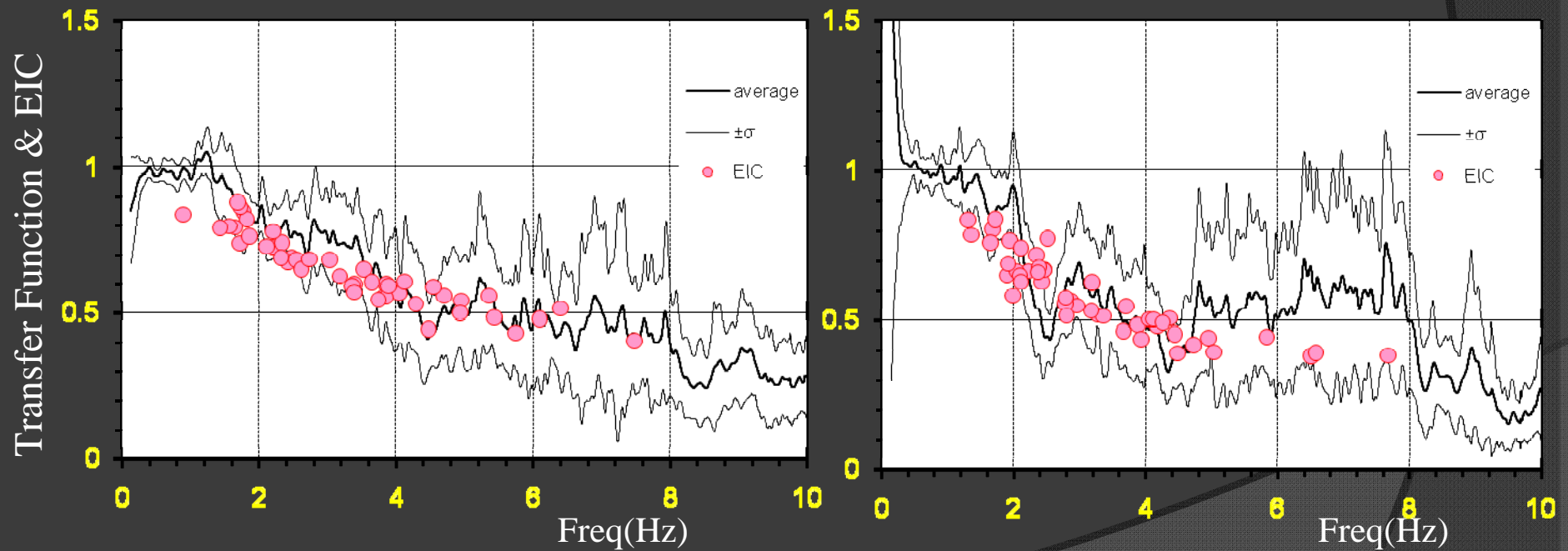


有効入力係数と伝達関数 (水平動)

観測記録(1998/6-2006/2)

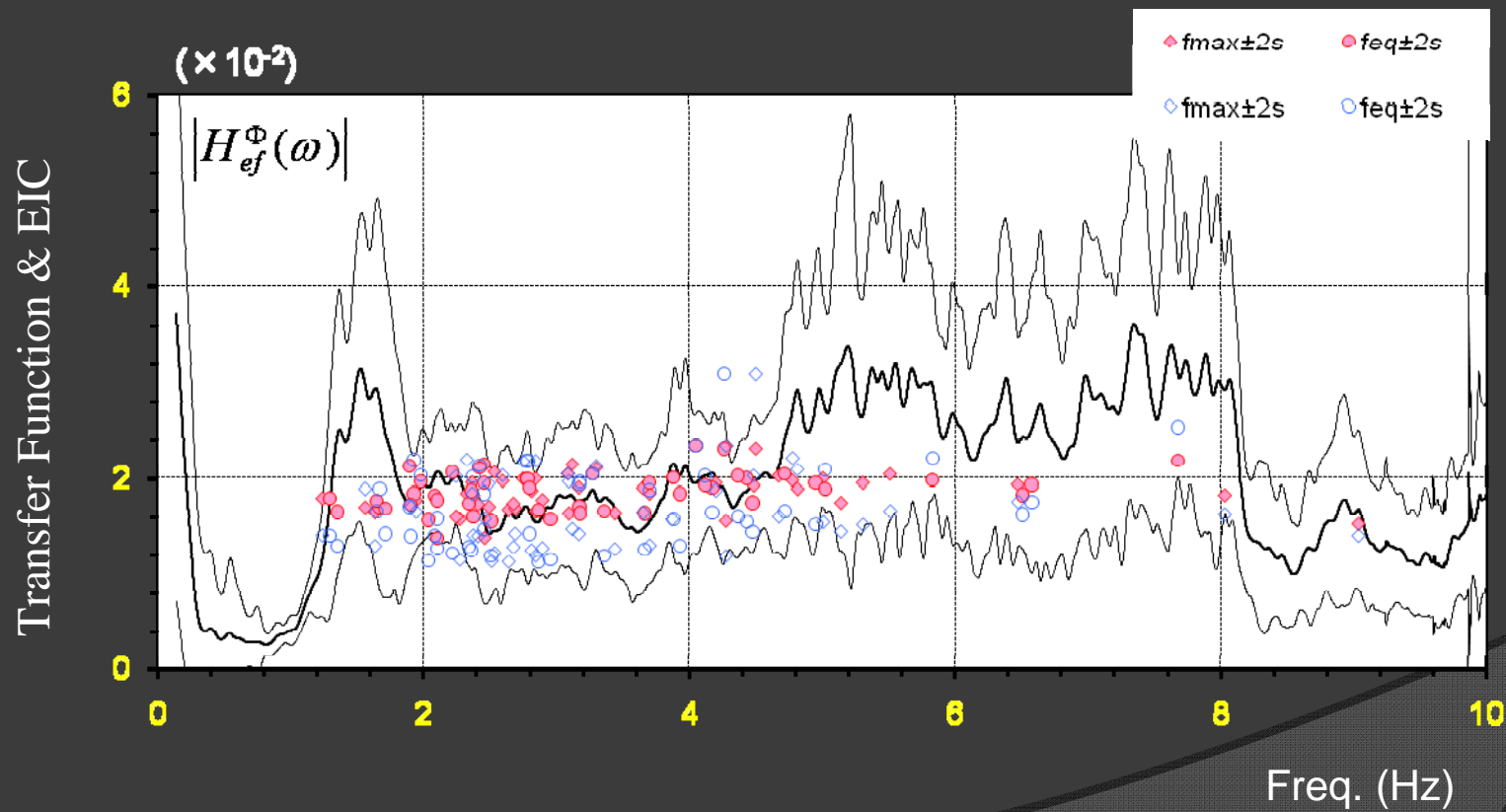
NS方向(短辺方向)

EW方向(長辺方向)



(地震記録は建研提供)

有効入力係数と伝達関数 (回転動)



伝達関数の1.5Hz付近のピークは地盤—建物系の固有振動数

有効入力動のまとめ

- ◎ 有効入力動は地震動に含まれる**振動数成分**に強く影響される
- ◎ 有効入力動の評価尺度として波形の**2乗積分値の平方根**は有効な指標となる
- ◎ 上部建物には**回転動成分**も入力動として作用する
- ◎ 限界耐力計算法の入力低減係数は改良が望まれる

6. 相互作用関連の各国耐震規定

- 1955年 フランスの耐震規定に**基礎の埋め込み効果**導入
- 1959年 SEAOC勧告に**偶発性ねじれ** (Accidental Eccentricity) の影響導入
- 1978年 指針ATC3に相互作用の効果(慣性の相互作用)導入
- 1990年 フランスの耐震規定に**慣性の相互作用と入力**の相互作用の効果導入
- 2000年 改正基準法施行令の限界耐力計算法に**相互作用**の効果(慣性+入力)の相互作用)導入

諸外国の耐震規定

◎ フランス耐震規定（1955年版）

水平震度 $\sigma = \sigma_1 \sigma_2 \sigma_3$

$\sigma_1 = 0.035$ …… A地区（地震活動小）

$= 0.070$ …… B地区（地震活動大）

$\sigma_2 =$ 地盤係数 $= 0.75$ …… 岩盤

$= 1.25$ …… 軟らかい地盤

$\sigma_3 = 1.0$ …… 地下室があるとき

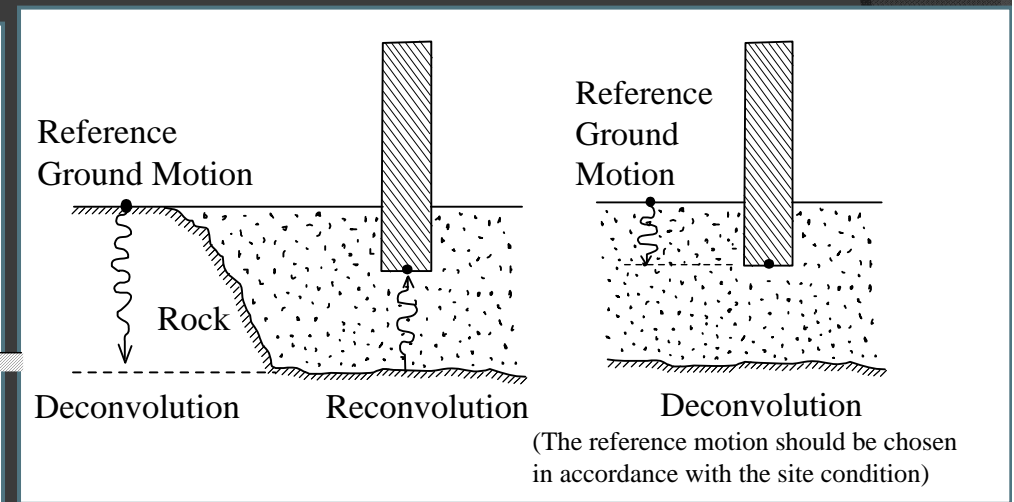
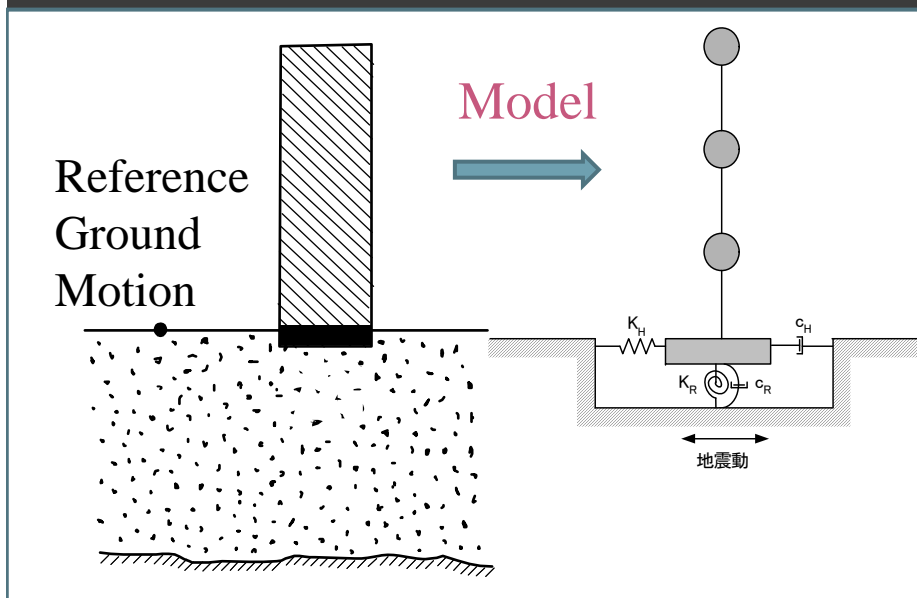
$= 1.25$ …… 地下室がないとき

フランスの耐震規定 (AFPS 90)

地盤情報が十分得られている場合には、地震応答を地盤—基礎—構造物系として計算することができる。

浅い埋め込み基礎の場合：

深い埋め込み基礎の場合：



慣性の相互作用のみ考慮

入力の相互作用のみ考慮

(基礎側方地盤の影響は考慮されていない)

偶発性振れに関する耐震規定

SEAOC(Structural Engineers Association of California)、1959年12月に勧告案提示

地動分布が**一様でないため**(位相差入力)、振れ振動が誘起されることに対する考慮

内 容

その階の**最大寸法の5%**の偏心を考える。

Euro Code 8 (耐震規定) (1998年)

相互作用に関連する規定

1. 動的解析にあたっては、必要に応じて地盤の影響を考慮したモデルを用いること。(指針)
2. 地震動の空間変動による偶発的偏心の影響を考慮しなければならない。

$$e = \pm 0.05L$$

L : 建物平面の辺長

ATC-3の耐震規定(1978年)

- ATC (Applied Technology Council)が、相互作用効果を建物の耐震規定に導入した最初の試み(指針)。

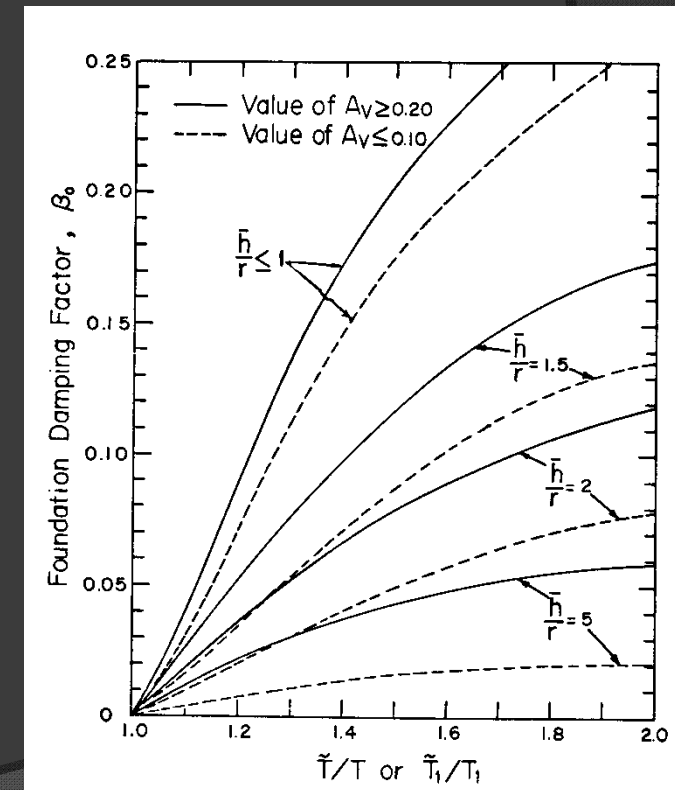
建物-地盤系の等価周期の評価式:

$$\tilde{T} = T \sqrt{1 + \frac{k}{K_H} \left(1 + \frac{K_H \bar{h}^2}{K_R} \right)}$$

建物-地盤系有等価減衰の評価式:

$$\tilde{\beta} = \beta_0 + \frac{0.05}{(\tilde{T}/T)^3}$$

- 入力の相互作用は考慮されていない。
- 限界耐力量の中に導入された相互作用効果はこれらの式を基本とする。



(A_V : 地震動レベル)

相互作用耐震規定まとめ

- ◎ 相互作用効果を耐震規定に導入している例は限定的である。
- ◎ フランスの耐震規定（AFPS90）は、慣性の相互作用と入力の相互作用を考慮した点で特筆に値する。
- ◎ 我が国の限界耐力計算法の中に導入された相互作用効果は、先導的規定として評価される。

7. 入力動に関する トピックスから

- 地震観測に見る基礎側面の動土圧の性状
地震時動土圧と有効入力動

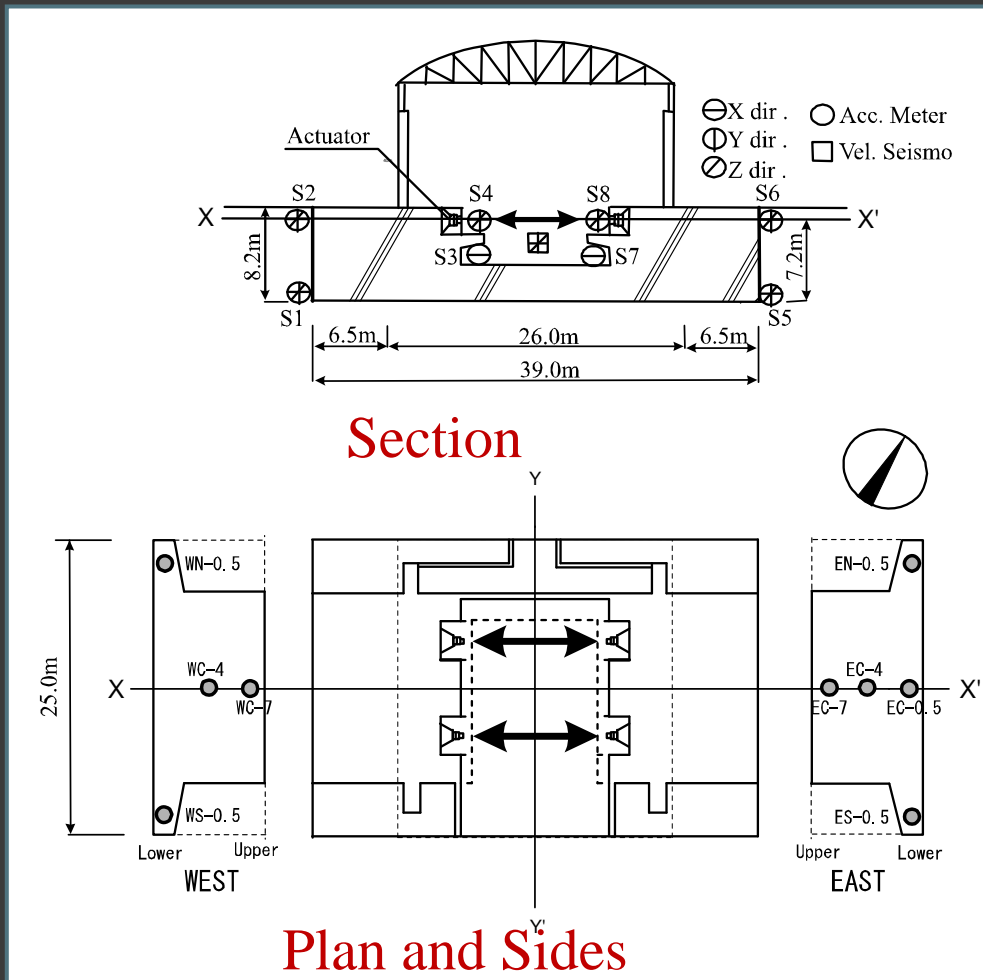
井口道雄、武藤尊彦、箕輪親宏；大型振動台基礎側面に作用する地震時土圧の観測と解析，建築学会構造系論文集，No. 561，pp65-724，2002年11月.

- 建物—地盤系の波動伝播特性の抽出
建築研究所サイトの地震観測記録の分析

Haddadi, H. R. and H. Kawakami: Modeling Wave Propagation by Using Normalized Input-Output Minimization (NIOM) Method for Multiple Linear Systems, Struct. Eng./Earthq. Eng. JSCE, Vol. 15, No. 1, pp29-39, 1998.

竹内聡志；実地震動観測に基づく到達時間曲線による波動伝播特性の解析～建築研究所建物と地盤を対象として～、東京理科大学修士論文、平成17年

振動台基礎側面の土圧計配置



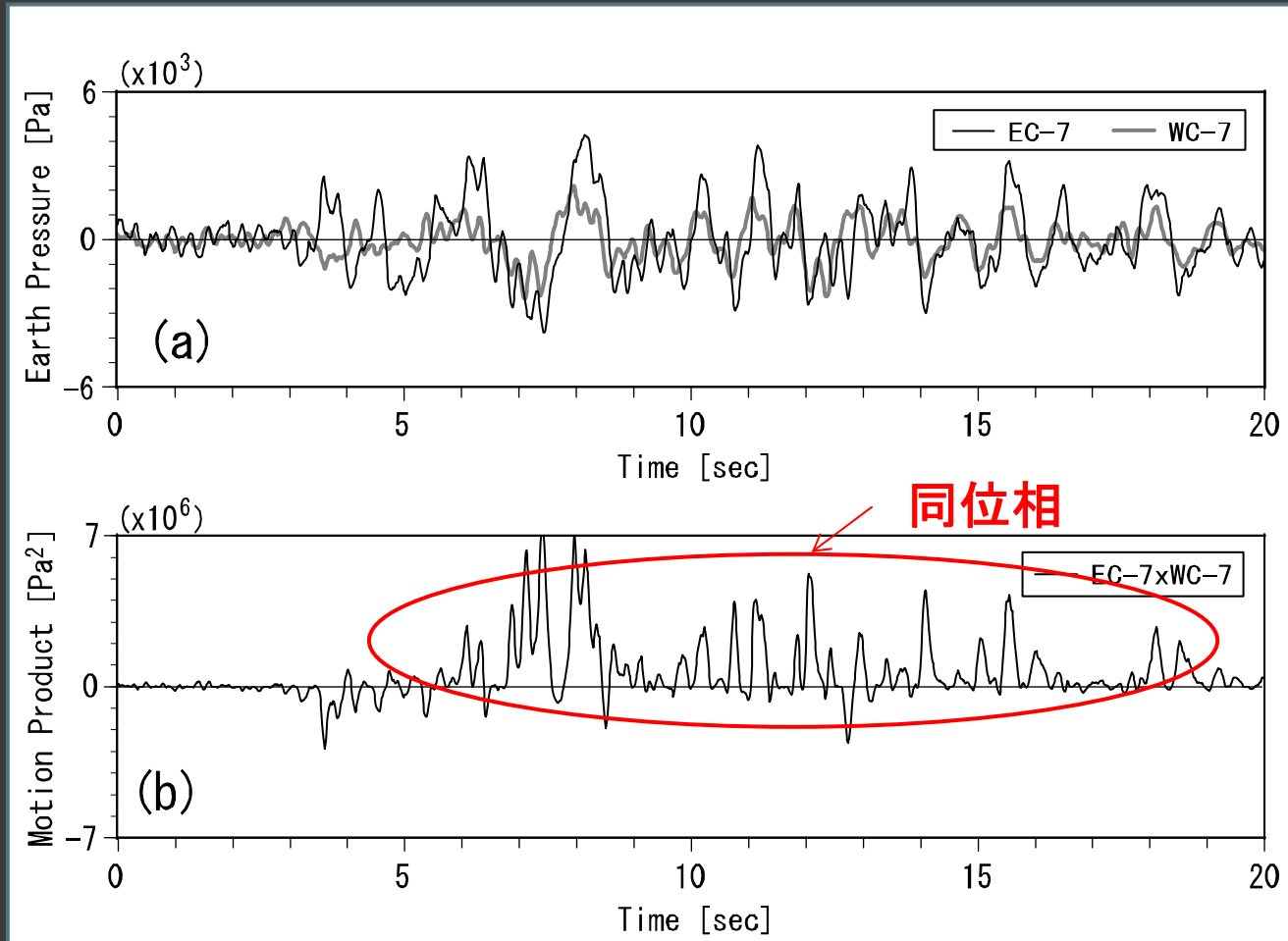
地盤定数

	Shear wave velocity (m/s)	Density (t/m^3)	Poisson's Ratio	
G.L.	82	1.3	0.497	-3m
	145	1.6	0.492	-8m
	230	1.7	0.492	-18m
	400	1.7	0.474	-24m
	480	1.9	0.462	-31m
	320	1.7	0.484	-37m
40m	400	1.9	0.474	

分析対象地震記録

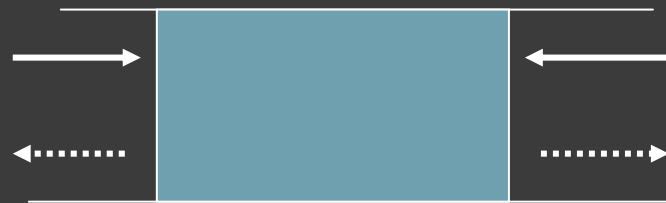
Eq. No	Date	Depth (Km)	Magnitude	PGA (gal)	Group
3	1991 Oct 19	59	4.3	43.73	C
17	1993 Oct 12	390	7.0	27.15	B
30	1996 Sep 11	30	6.6	26.65	A

地震時両側面土圧の時刻歴・ モーションプロダクト



Group A

位相特性の図解



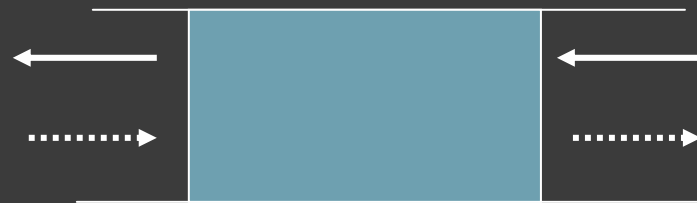
In-phase

Push-and-push

Pull-and-pull

Motion product

正

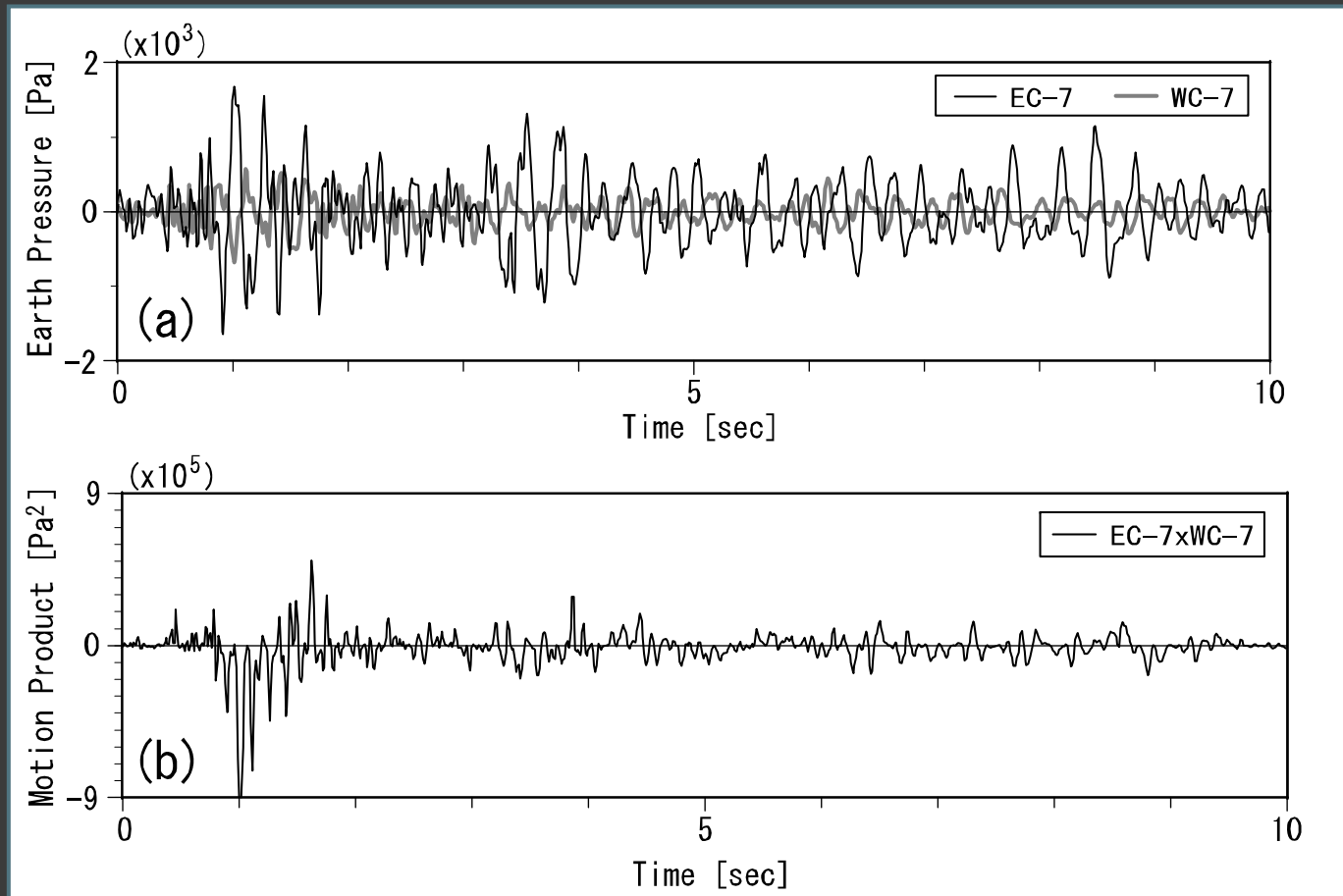


Out-of-phase

Push-and-pull

負

地震時両側面土圧の時刻歴・ モーションプロダクト



Group C

動土圧と入力動のまとめ

- ◎ 地震時に基礎両側面に作用する動土圧は同位相で発生する場合がある。

→ 入力低減

ただし、大型振動台基礎への入力
は基礎底面からが支配的で基礎側面からの
入力は小さく、動土圧特性の結果は
入力動にほとんど影響しない。

地震波の建物への入力と地盤への伝播

地中のS波の鉛直波動伝播

NIOM法の建研サイトへの適用

地震計配置

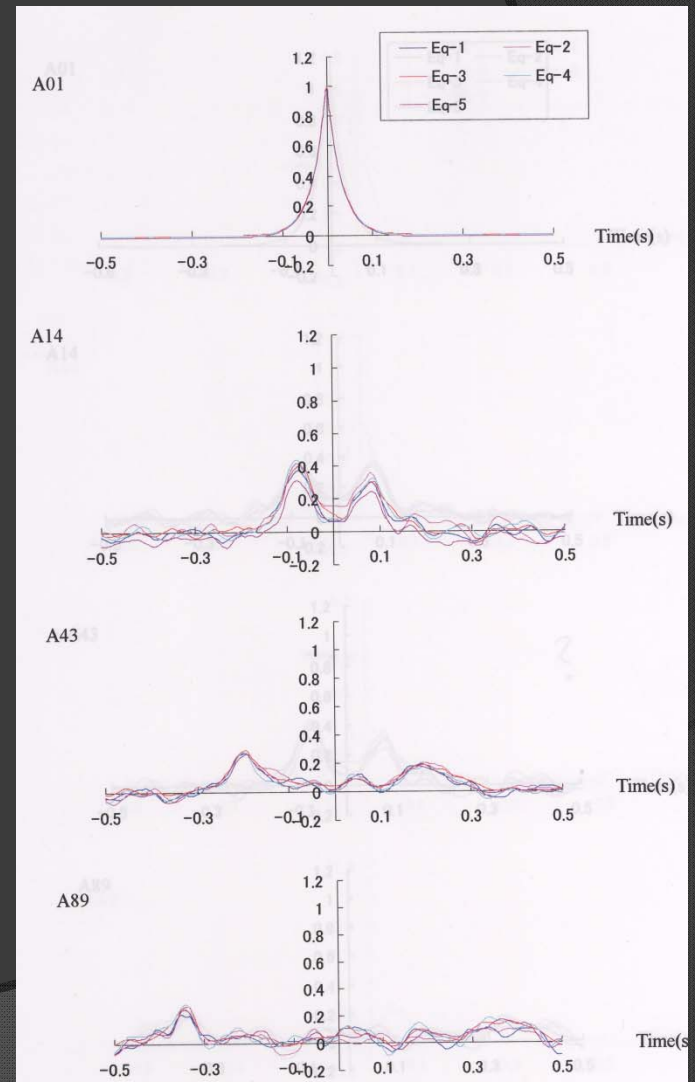
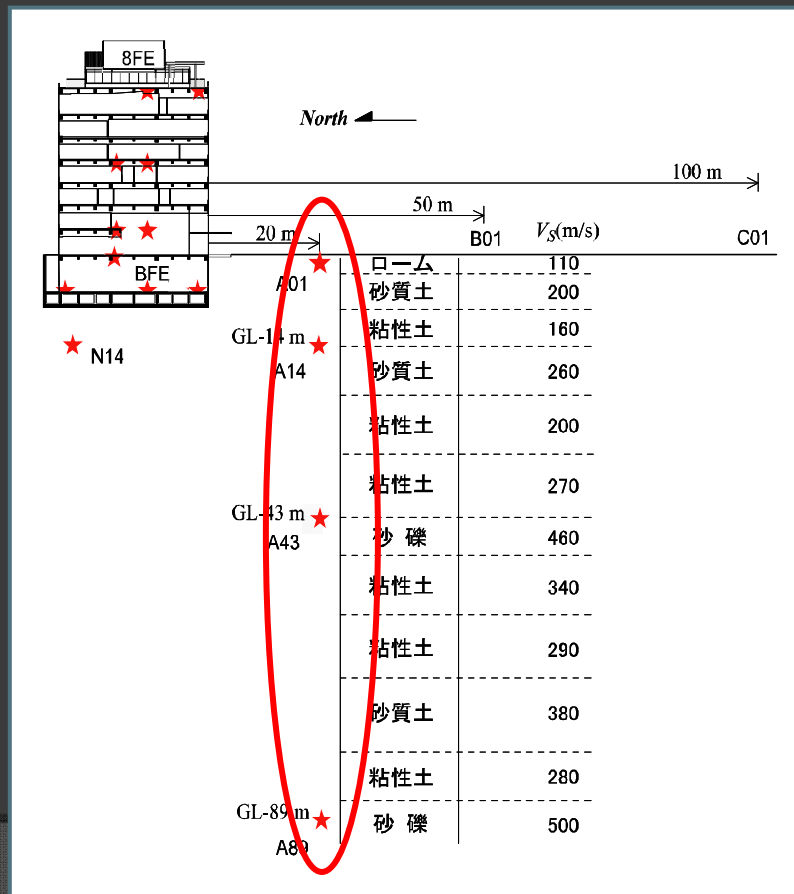
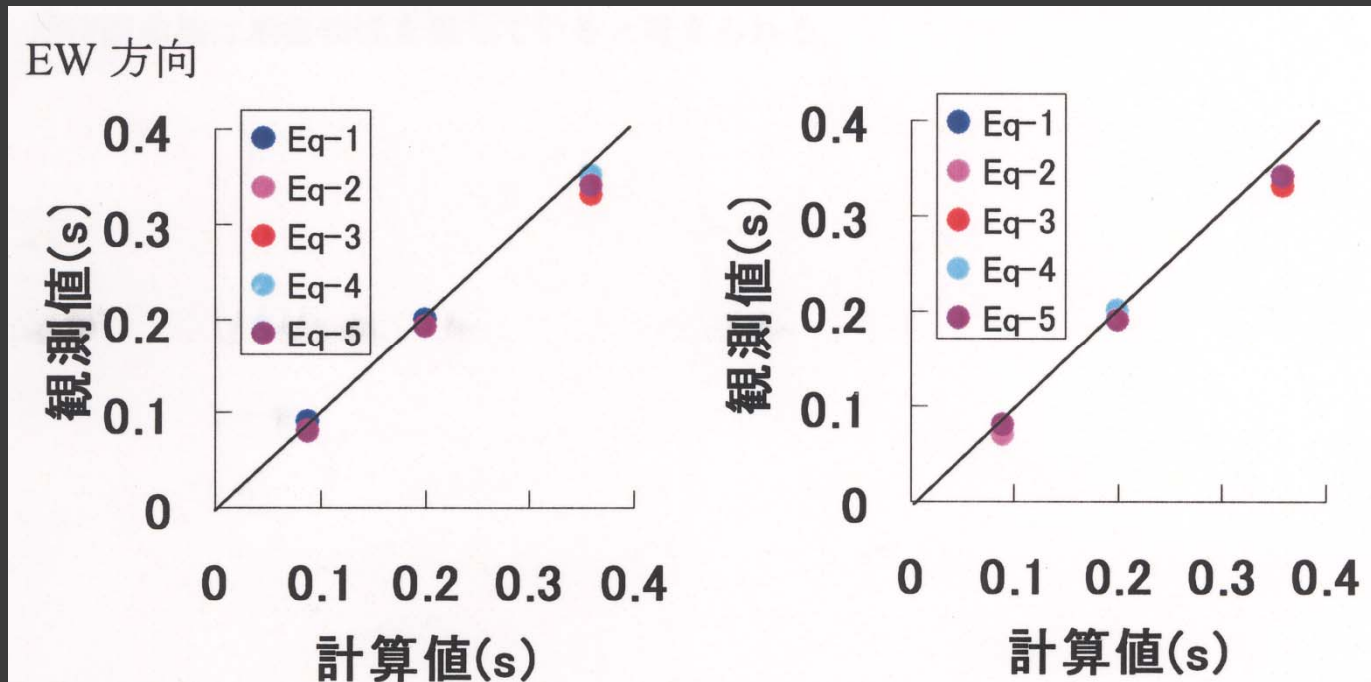


図 4.1.1-2 到達時間曲線(NS 方向)

伝播速度の観測値と計算値の比較

入射波

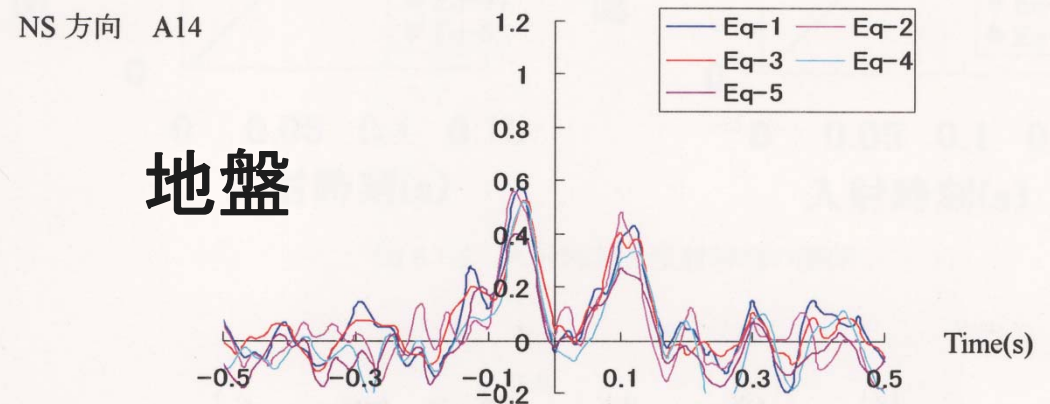
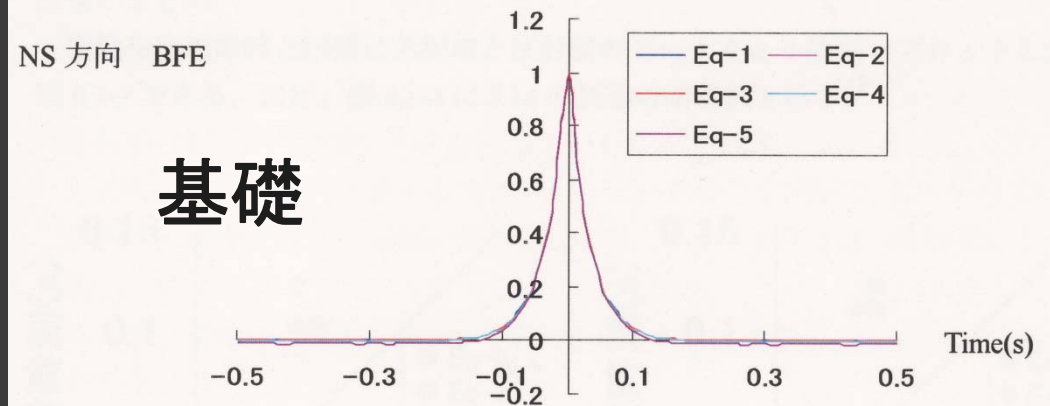
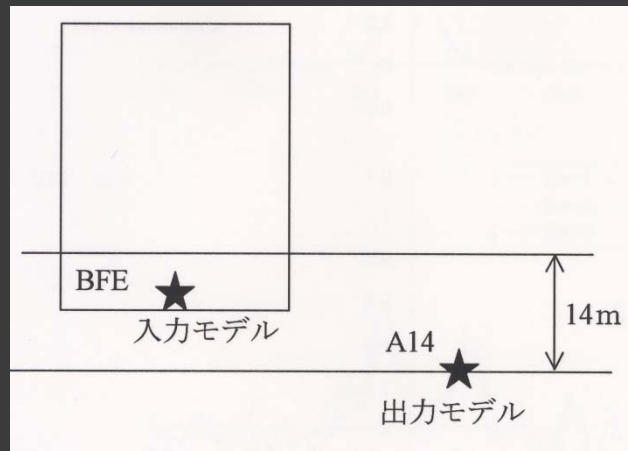
反射波



地盤-基礎-建物-基礎-地盤の 波動伝播

地盤—基礎間の波動伝播

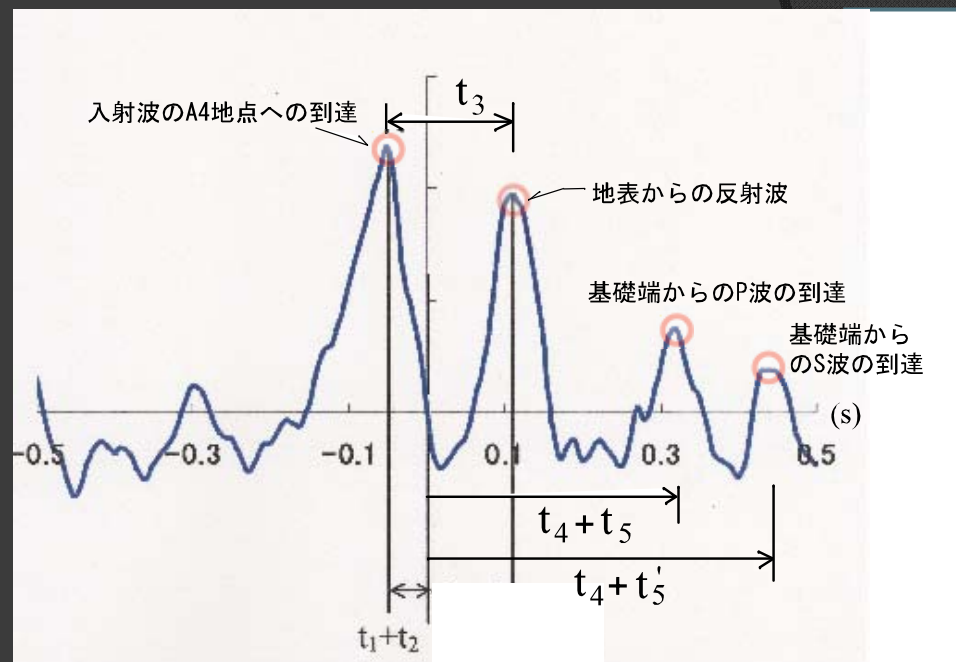
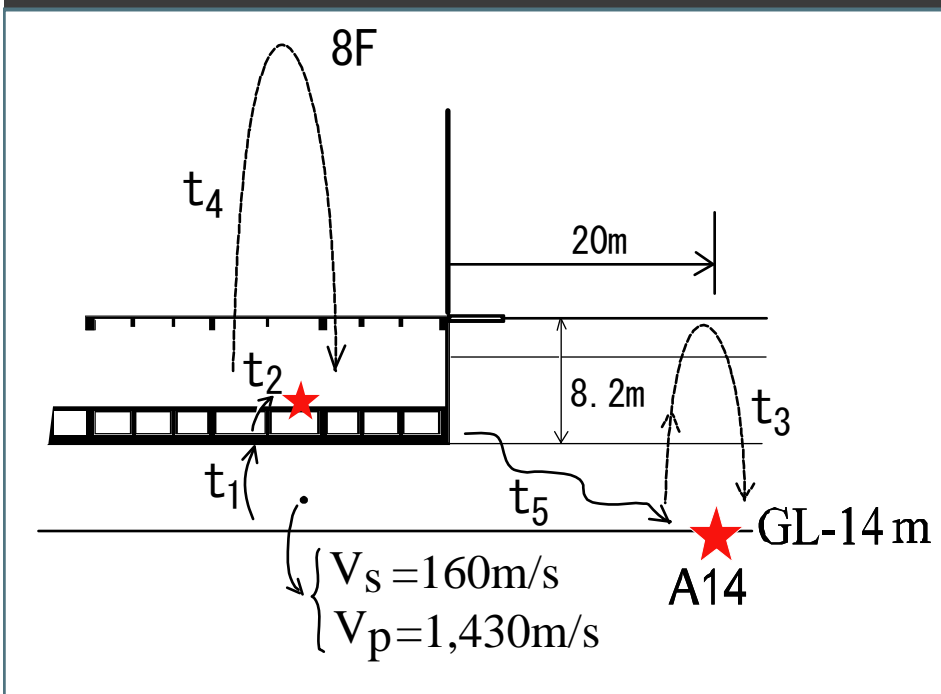
地盤(A14)と基礎の観測点



地盤—建物系の波動伝播の検出

波動伝播の概要

波動到達時間の解釈

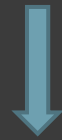


波動到達時間(Eq-1)

	t_1	t_2	t_4	t_4+t_5 (P波)	t_4+t_5' (S波)
観測	0.05s		0.302~0.312s	0.315s	0.441s
計算	0.036s	0.024s	-	0.317~0.327s	0.432~0.442s

建物—地盤系波動伝播のまとめ

- ◎ NIOM法は建物—地盤系の波動伝播特性の抽出に有効な手段となる。
- ◎ 波動が基礎底面に到達し、基礎を動かすのに0.024sec要する。

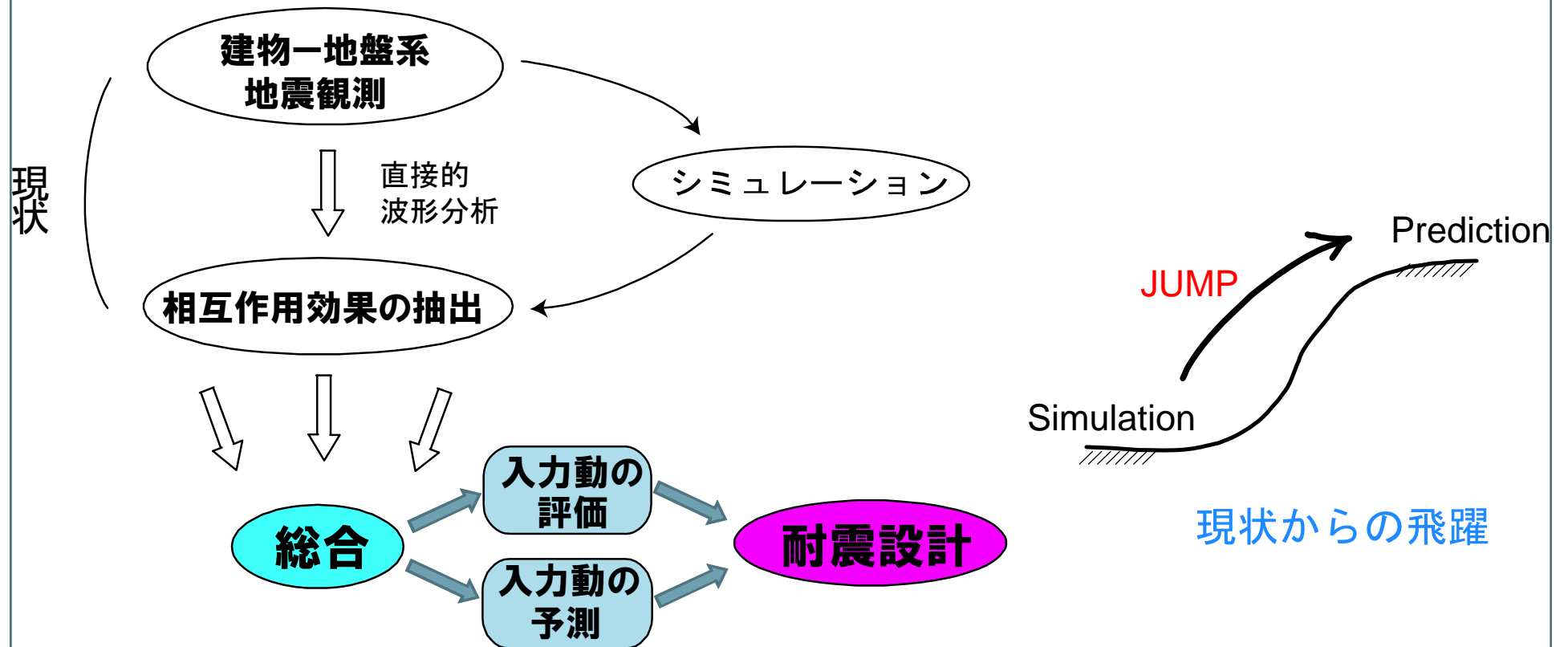


基礎の質量効果？

- ◎ A14地点の観測記録には建物の影響がかなり含まれている。

8. 今後の課題

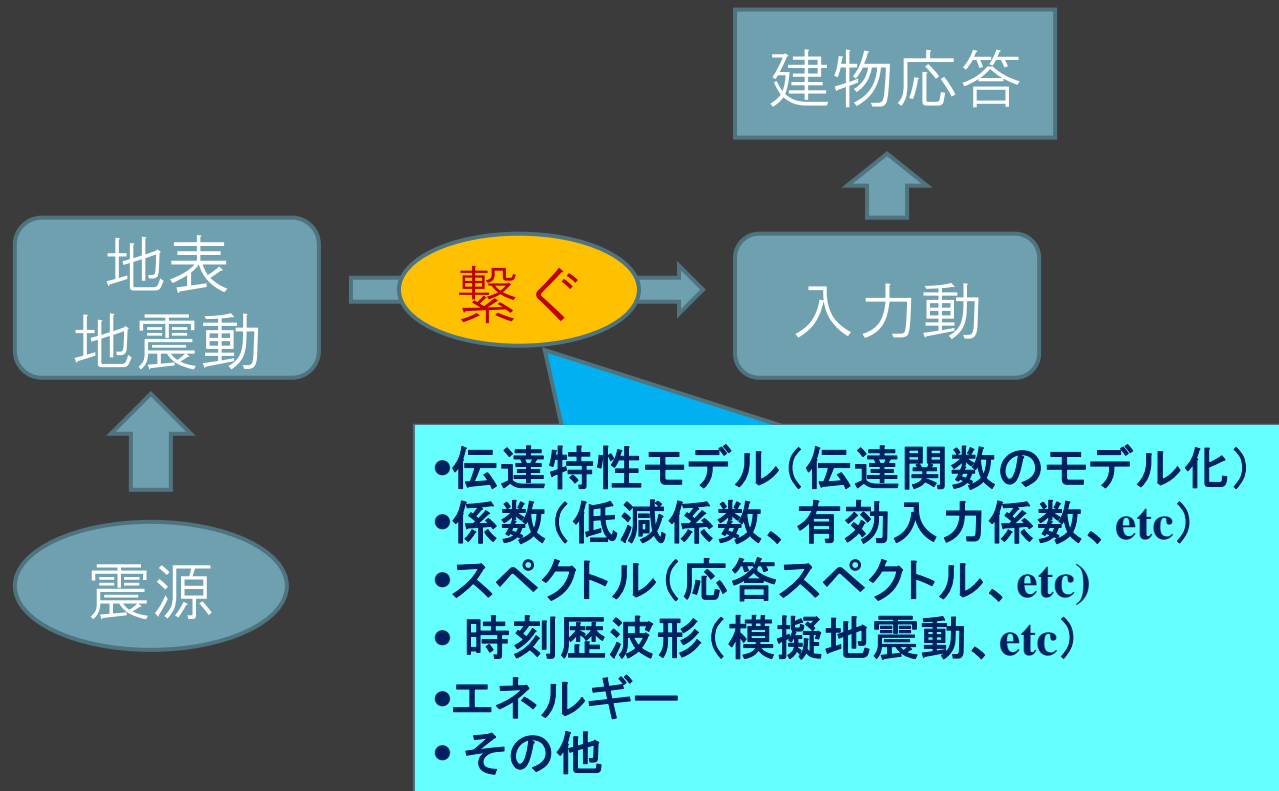
1. SimulationからPredictionへ



観測記録の収集から設計まで

2. 地震動研究（地震動予測研究）と 入力動研究を繋ぐ

震源から建物応答までを繋ぐ



3. 地盤－構造物系の地震観測ネットワークの構築とデータの共有化

建物－地盤系の地震動記録の収集と分析
(誰もが利用できる体制づくり)

4. 本講演で欠落している項目

- 基礎浮き上がり時の入力動
- 地盤非線形時の入力動
- 地盤液状化と入力動
- 杭非線形時の入力動
- その他

ありがとうございました

