

# 建物と地盤の動的相互作用

## —地盤改良による減衰効果の向上—

ZEROシステム研究会

2012年2月16日

東京理科大学  
井口 道雄

# 講演内容目次

1. 動的相互作用とは
2. 動的相互作用研究の歩み
3. 有効（実効）入力動
4. 地盤改良による減衰効果

# 1. 動的相互作用とは

# 通常地震応答計算

## —基礎固定モデル—

自由地震動

地震波

建物-地盤系

基礎固定モデル

自由地震動

基礎固定モデル

基礎固定モデル  
地盤を完全剛と仮定

↓

地盤剛性は無限大ではない

地表での地震動記録をそのまま入力

# 基礎固定モデルの問題点と動的相互作用

建物の固有周期・減衰は基礎固定のものと異なる

地表の地震動は建物への入力動とはならない

↓

## 動的相互作用の影響

(2種類の動的相互作用)

# 慣性の相互作用

上部建物の振動

↓

慣性力の発生

↓

地盤に作用

↓

基礎の付加変位

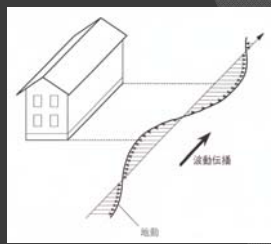
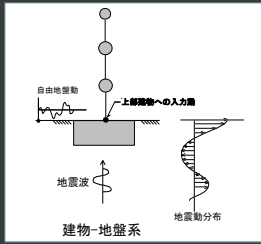
地盤-建物系 自由振動

SR-モデル

地震エネルギー

地盤の効果: { ばね(動的地盤ばね)  
減衰(地下逸散減衰)

### 入力の相互作用



地下階のある構造物  
(水平動+回転動)

平面的に細長い構造物  
(水平動+振れ動)

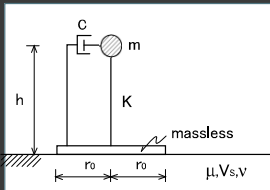
地表での地震動と建物への入力動は異なる

### 動的相互作用(要約)

動的相互作用: { 慣性の相互作用 (Inertial Interaction)  
入力の相互作用 (Kinematic Interaction)

- 慣性の相互作用 . . . . . 動的地盤ばね  
建物周期の増加・減衰の変化  
(建物重量が大で短周期・地盤が軟い場合顕著)
- 入力の相互作用 . . . . . 基礎入力動  
建物への入力の変化  
(大きい基礎・根入れ基礎・短周期成分が卓越する地震動に対して顕著)

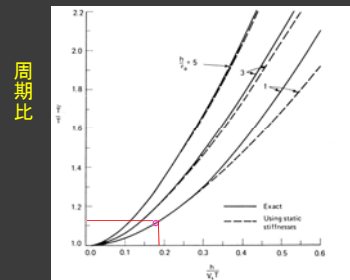
### 建物-地盤系 例題構造物



地盤	S波速度	$V_s = 200 \text{ m/sec}$
	密度	$\gamma = 16.7 \text{ kN/m}^3 (1.7 \text{ t/m}^3)$
	ポアソン比	$\nu = 0.4$
上部構造	基礎半径	$r_0 = 15 \text{ m}$
	質点高さ	$h = 15 \text{ m}$
	周期(基礎面定)	$T = 0.5 \text{ sec}$
	ばね定数	$k = 6,193.6 \text{ kN/cm} (632 \text{ tf/cm})$
	減衰定数	$\zeta = 5\%$
	慣性モーメント	$I_p = 2,753.8 \text{ ton} \cdot \text{m}^2$ ( $2.81 \times 10^4 \text{ tf} \cdot \text{cm} \cdot \text{sec}^2$ )

$$\frac{h}{r_0} = 1 \quad \frac{h}{V_s T} = 0.19$$

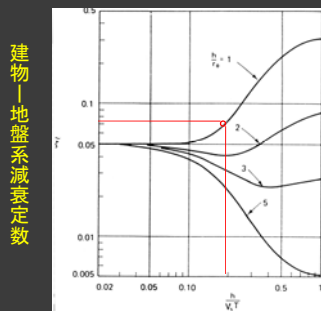
### 固有周期の変化



固有周期が約12%増加

建物と地盤の剛性比  $h/V_s T$  と  $T$  の関係

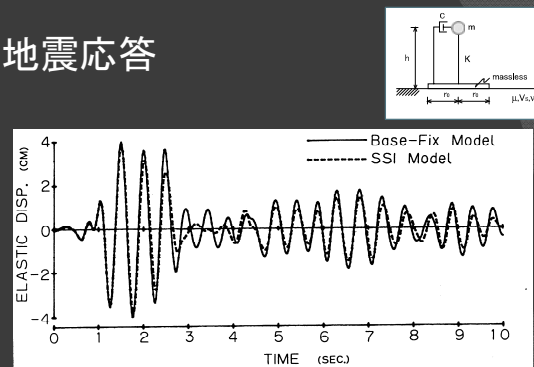
### 減衰定数の変化



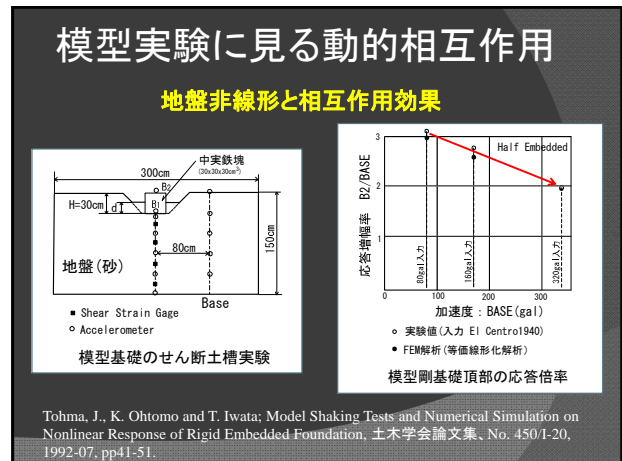
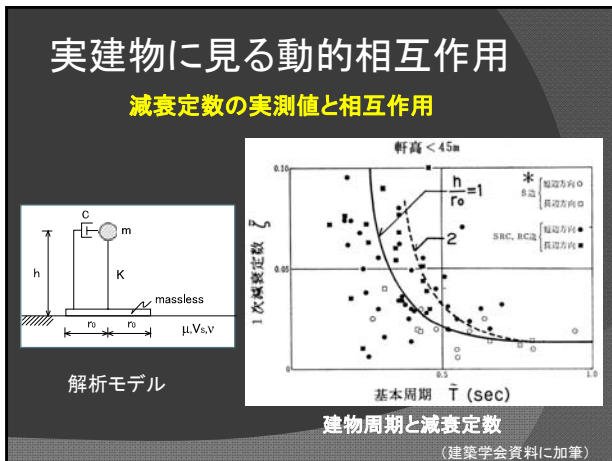
減衰定数は5%から7%に増加

$h/V_s T$  と  $\zeta$  の関係

### 地震応答



入力: El Centro(1940) NS (Max 341.7gal)



### まとめ

#### 耐震設計における動的相互作用の役割

建物の耐震安全性の検討

建物の耐力 > 地震動に対する応答

(耐力: 強度・靱性・エネルギー吸収能)

ポイント:

- 建物の真の耐力を求める
- 建物への地震入力の評価精度向上

## 2. 動的相互作用研究の歩み

### 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.

1936年

#### Reissnerの論文

- E. Reissner: Stationäre, axialsymmetrische, durch eine schüttelnde Masse erregte Schwingungen eines homogenen elastischen Halbraumes, Ingenieur-Archiv, Vol. 7, Part 6, 1936, pp381-396.

妹沢克惟(1895-1944)      金井 清 (1907-2008)

## 動的相互作用の発展・年代区分

- 1935, 1936年
  - 第1期 (探監期)
    - ・「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一相互作用効果の導入 (研究成果を耐震設計へ)
- 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)

## 動的相互作用の学会刊行物

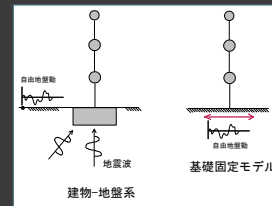


平成8年

平成18年

## 3. 有効 (実効) 入力動

## 建物への入力動を如何に与えるか



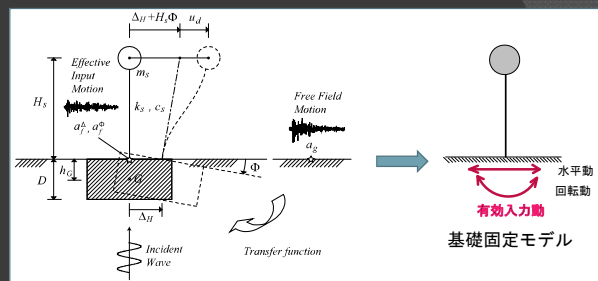
### 基礎固定モデルの問題点

- 建物の地震観測結果が説明できない
- 建物の地震被害が説明できない  
(1993年釧路沖地震, 1995年兵庫県南部地震被害)  
(920gal) (818gal)

## 有効 (実効) 入力動研究

- 兵庫県南部地震記録の分析  
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, 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?



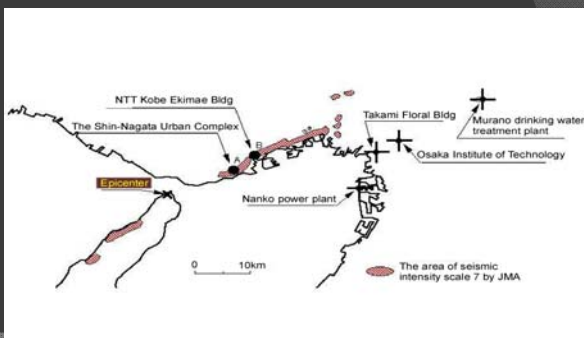
上部構造の運動方程式:

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

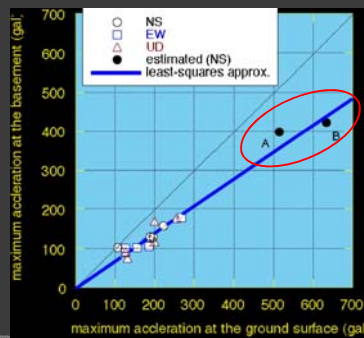
(有効入力動)



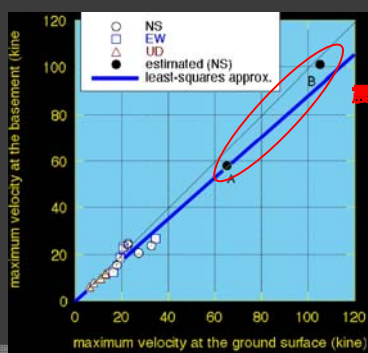
### 建物の設置場所



### 地表と建物基礎の最大加速度

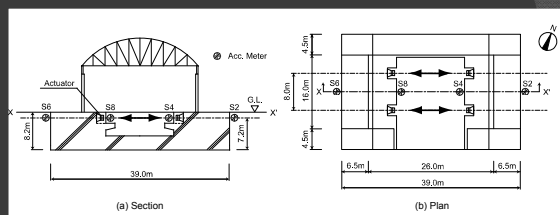


### 地表と建物基礎の最大速度



### 大型振動台基礎

- National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention -



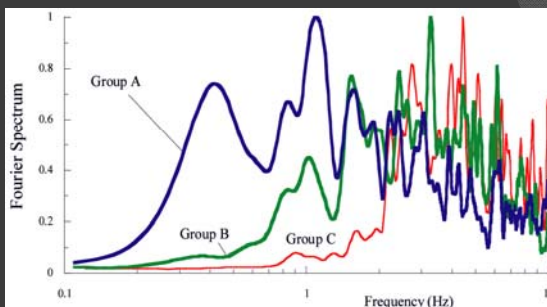
振動台基礎と地震計の配置

(約100m離れた地点で自由地盤動観測)

### 観測地震動記録一覧

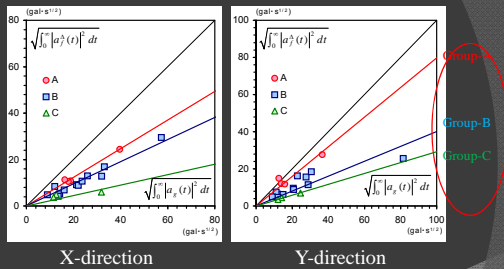
Eq No.	Date Y M D	Hypocenter N.L. E.L.	Depth (km)	Mag. (M)	Max. of Acc. X(gal) Y(gal)	Group	
1	91 8 6	35.87 141.15	26	5.8	18.10	9.80	A
2	10 19 36.08	133.92	59	4.3	44.00	37.89	C
3	11 19 35.60	140.02	81	4.9	11.03	15.44	C
4	12 12 36.46	140.66	48	4.6	15.95	13.55	B
5	92 2 2 35.23	139.79	92	5.9	22.39	24.12	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	23	5.5	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	96 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	9.97	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



基準化フーリエスペクトル

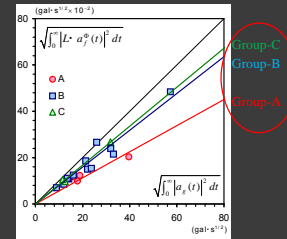
### 地表と基礎地震動の関係



SRISM=Square Root of Integrated Squared Motion

水平成分の有効入力係数はGroup-Cが最も小さい。

### 地表の水平動と基礎回転動の関係



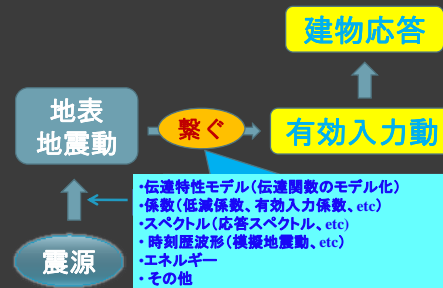
回転成分の有効入力係数はGroup-Aが最も小さい。

### 有効入力動のまとめ

- 有効入力動は地震動の振動数成分に強く影響される
- 有効入力動の評価指標として、波形の2乗積分値の平方根(SRISM)が適切な指標となる
- 水平成分の有効入力動は地表の地震動により小さくなる。高振動数成分を含む地震動では、入力低減は30%以下になる。
- 建物には水平成分に加え、回転動成分も入力動として作用する

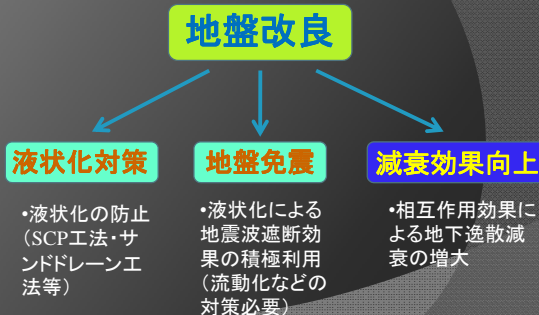
### 有効入力動研究の今後の課題

震源から建物応答までを繋ぐ

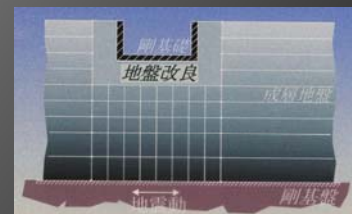


### 4. 地盤改良による減衰効果

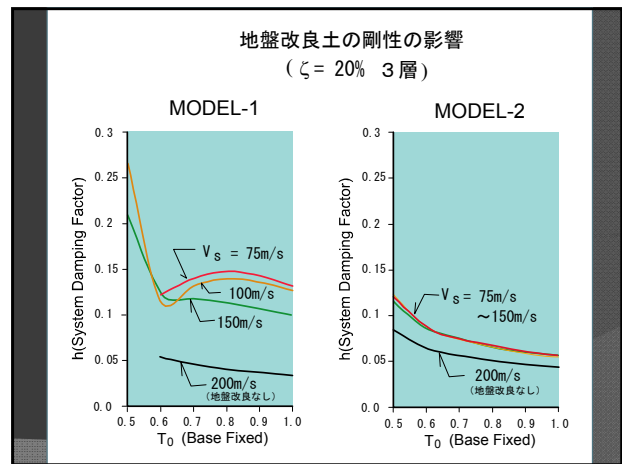
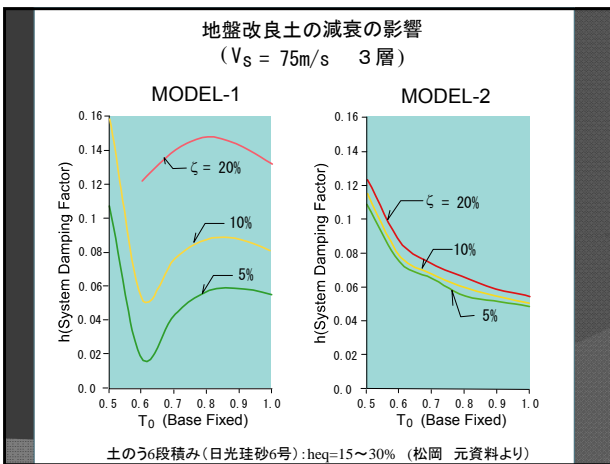
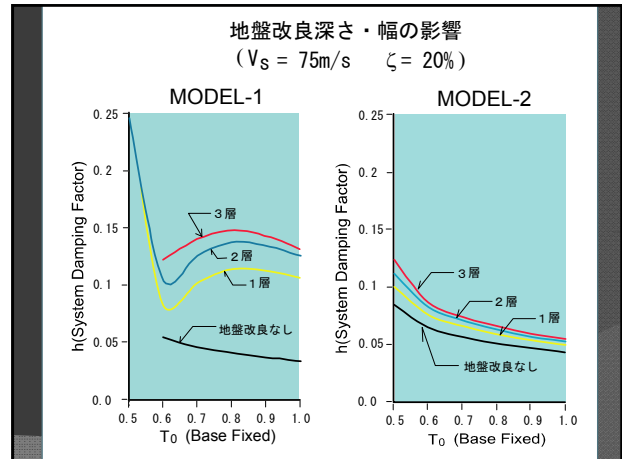
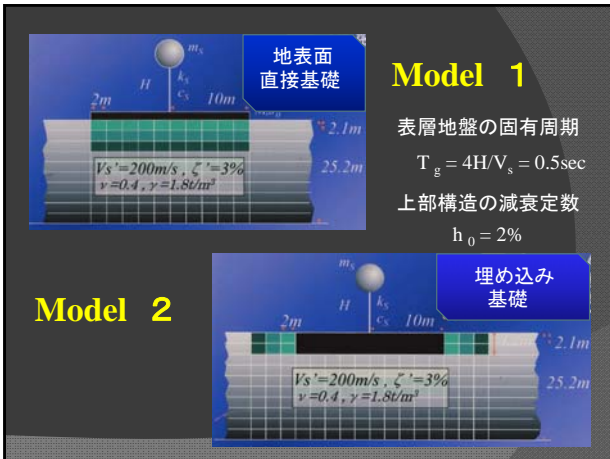
地盤改良のメニュー



### 基礎周辺の地盤改良による減衰性向上



地盤:2次元平面歪



- ### 地盤改良のまとめ
- 基礎底面の地盤の材料減衰を増大させることにより、建物の地下逸散減衰を増大させることが期待できる
  - 基礎底面地盤の剛性を小さくすることにより、建物—地盤系の減衰を増大させることができる
  - 基礎側面の地盤改良は、基礎底面の改良に比して効果が小さい

