

## 4. 簡易振動台「ぶるる」による企業生産設備の振動実験

岡田 久志・曾我部博之

### 1. 序

大地震によって人命に危険をもたらす被害は建物の倒壊が第一に挙げられるが、負傷者の4割近く（宮城県北部地震では49.5%、新潟県中越地震では41.3%）が、家具、什器類の移動・転倒・落下が原因になっている。このようなことから、生産活動を行っている企業において就業時間帯に大地震が発生することを想定し、建屋が倒壊や破損しないようにしておくことは勿論のことであるが、生産設備の移動や転倒などを原因とした負傷者を出さないように、また、生産設備の移動や転倒によって設備が破損して地震発生後の生産活動に支障が生じることのないような対策をしておくことが必要であろう。

本実験は、地震時における作業者の安全対策として、セル生産方式<sup>注1)</sup>における作業台の設置方法を検討するための基本性状を把握することが目的である。

今回の実験は次のような手順で、作業台単体に対して行われる。

1. 床の上の移動や転倒に関わってくる作業台の形状や重心位置、床に対する摩擦係数などの特性値を把握する。
2. 水平振動する床面上に置かれた作業台の挙動を測定し、基本性状を把握する。
3. 実地震波により水平振動させた床面上に置かれた作業台の挙動を把握する。

なお、床面の振動は簡易振動台「ぶるる」を用いる。

### 2. 実験概要

#### 2.1 供試体

ここでは、セルを構成する4タイプの生産設備（以下作業台と称する）を対象とする（写真2.1）。これらは、あるセルの構成要素として使用されていた作業台で、いずれもφ26mmのスチール製のパイプとジョイントで作製されている。そのうち中、2タイプの脚はフランジ付きの脚（写真2.2左）で、残り2タイプの脚は、キャスター（写真2.2右）が付いている。作業台には、加工機器等が固定されているだけでなく、部品ケースが置かれていたり、工具が吊り下げられていたり、作業台ごとに異なっている。ここで対象とした4タイプの緒元を表2.1

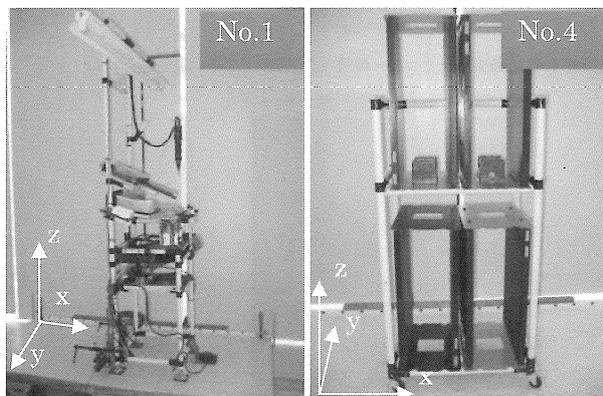
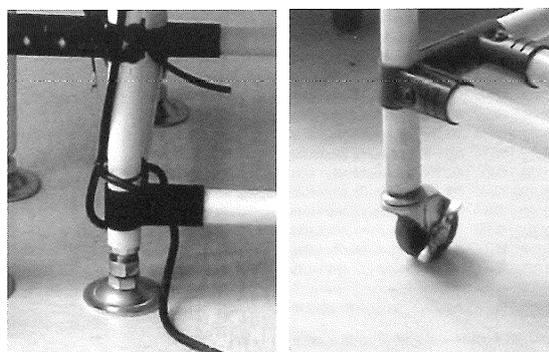


写真 2.1 供試体 No.1, No.4



フランジ付き脚      キャスター付き脚  
写真 2.2 供試体の脚の様子

に示す。

## 2.2 供試体の摩擦係数

振動する床面に置かれた作業台の動的挙動実験に先立って、図 2.1 に示す方法によって各供試体の静摩擦係数、動摩擦係数の計測を行っている。なお、実況にあわせるため振動台の上面には木製ボード (12mm) が固定され、作業台が置かれている床面の仕上げ材と同一の合成樹脂タイル (600mm 角) が貼り付けられている。また、振動台の移動速度は、5cm/sec、10cm/sec、20cm/sec の 3 種類としている。その計測結果を表 2.2 と表 2.3 に示す。

No.1 供試体と No.2 供試体では、床面の移動速度の影響を受けているようでもあるが摩擦力に関するクーロンの法則に従い、5cm/sec ~ 20cm/sec の平均値をそれぞれの摩擦係数とする。また、キャスター付き脚の供試体の No.3 についても同様に扱う。

## 2.3 振動する床面に置かれた作業台の動的挙動実験方法

作業台の動的挙動実験として 2 つの実験を行っている。実験 I では、振動周期の影響など作業台の基本的な振動性状を把握することを目的として行う実験で、簡易振動台の入力振動波形を正弦波波形 (振動周期 0.5 秒、1.0 秒、加速度振幅 20 ~ 400gal) を用いる。実験 II は、実地震動下での動的挙動を把握するための実験である。使用した実地震動波形は 1996 年兵庫県南部地震 (海洋気象台 NS 方向) と Imperial Valley 地震 (El Centro NS 方向) の 2 波形で、加速度記録に係数を乗じて最大加速度をそれぞれ 800gal, 400gal の 2 種類に基準化している。

表 2.1 作業台の諸元

供試体番号		No.1	No.2	No.3	No.4	
脚の状態		フランジ付き		キャスター付き		
重量		(kg)	41.5	17.1	40.9	24.7
形状寸法	高さ(Z)	(mm)	1758	717	884	1070
	幅(Y)	(mm)	391	199	570	393
	奥行き(X)	(mm)	374	233	370	508
重心位置	Z <sub>G</sub>	(mm)	785	550	814	545
	Y <sub>G</sub>	(mm)	178	93	284	196
	X <sub>G</sub>	(mm)	168	71	158	249

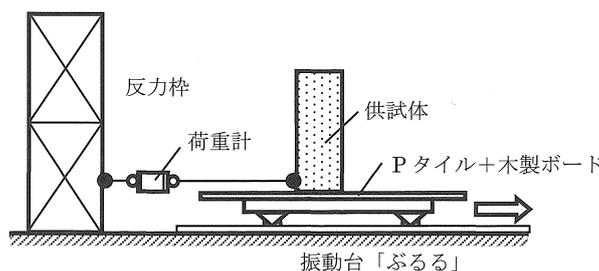


図 2.1 摩擦係数の測定方法

表 2.2 フランジ付き脚を有する供試体 No.1、No.2 の摩擦係数

速度		5cm/sec		10cm/sec		20cm/sec		全平均値	
作業台		静摩擦係数	動摩擦係数	静摩擦係数	動摩擦係数	静摩擦係数	動摩擦係数	静摩擦係数	動摩擦係数
		No.1	No.1	0.334	(0.086)	0.275	0.149	0.178	0.128
No.2	0.268		0.094	(0.339)	0.122	0.152	0.114		
No.3	0.349		0.123	0.223	0.127	0.264	(0.162)		
平均	0.317		0.019	0.249	0.133	0.165	0.121	0.254	0.096
STD	0.043		0.113	0.340	0.014	0.059	0.010	0.075	0.075
No.2	No.1	0.217	0.084	0.187	0.107	(0.471)	0.128		
	No.2	0.165	0.081	(0.333)	0.114	0.239	0.111		
	No.3	0.174	0.079	0.275	0.108	0.227	0.115		
	平均	0.185	0.082	0.231	0.110	0.233	0.118	0.212	0.103
	STD	0.028	0.003	0.062	0.004	0.008	0.009	0.039	0.017

注)・括弧内数値は、飛び値として除外・全平均値は飛び値を除く全データで平均

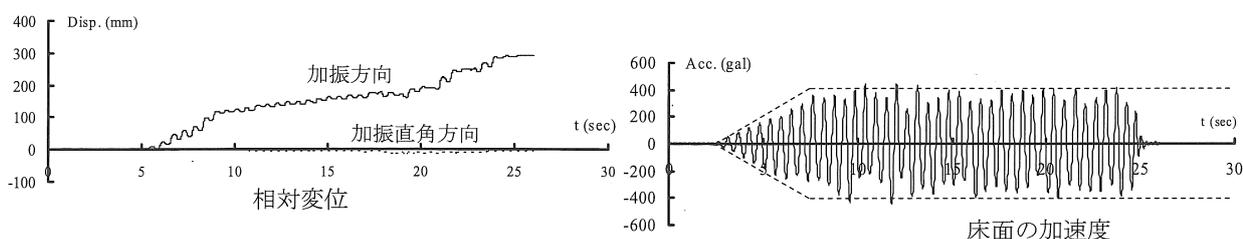
表 2.3 キャスター付き試験体 No.3 の摩擦係数

速度		5cm/sec		20cm/sec		平均値	
作業台		静摩擦係数	動摩擦係数	静摩擦係数	動摩擦係数	静摩擦係数	動摩擦係数
		順方向	No.1	(0.098)	0.040	0.052	0.035
No.2	0.049		0.028	0.061	0.038		
No.3	0.061		0.043	0.053	0.036		
平均	0.055		0.037	0.055	0.036	0.055	0.037
STD	0.009		0.008	0.005	0.002	0.006	0.005
直角方向	No.1	0.328	0.205	0.385	0.259		
	No.2	0.266	0.195	0.345	0.255		
	No.3	0.268	0.201	0.475	0.251		
	平均	0.287	0.200	0.402	0.255	0.345	0.228
	STD	0.035	0.005	0.066	0.004	0.079	0.030
フリー	No.1	0.036	0.014	0.039	0.018		
	No.2	0.040	0.013	0.048	0.020		
	No.3	0.047	0.013	0.047	0.023		
	平均	0.041	0.013	0.045	0.020	0.043	0.017
	STD	0.005	0.001	0.005	0.003	0.005	0.004

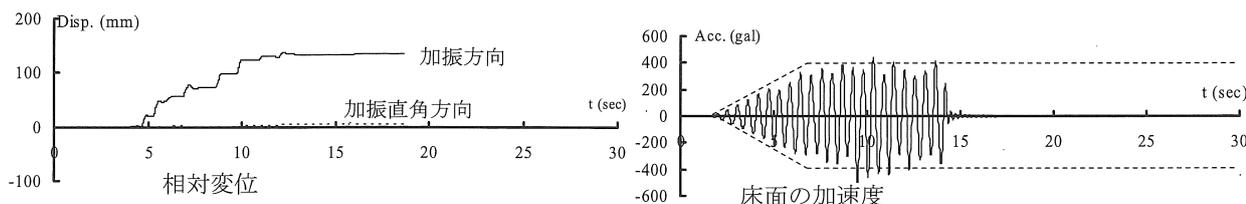
### 3. 実験結果と考察

#### 3.1 正弦波振動する床に置かれた供試体の挙動 (実験 I)

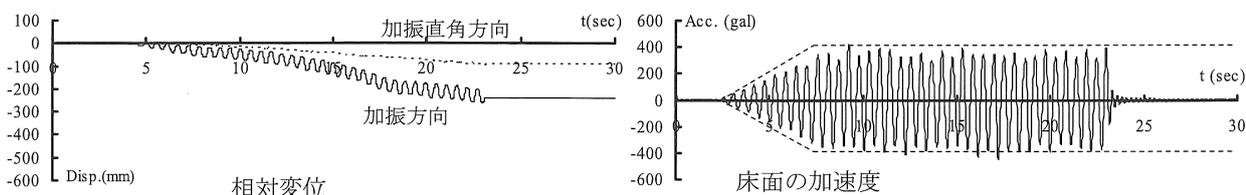
図 3.1 に床の定常時の加速度振幅が 400gal のケースについて、供試体 No.1、No.2、No.4 の床面に対する相対変位量の時刻歴とその時の床面加速度 (実測値) の時刻歴を示す。計測された床面加速度は、ローパスフィルターを用いて加振振動数の 2 倍以上の振動数をカットしている。なお、図中に示す床面加速度の破線は、加振加速度振幅の目標を表わしている。図示したケースでは、どの供試体も床面上を移動しているが、供試体 No.1、No.4 の床面移動量は床の振動周期と同期しているのに対して、転倒した供試体 No.2 は床の振動周期に同期した動きをしていないのが特徴でロッキングに伴って生じる床移動<sup>注2)</sup>が含まれていると考えられる。



(a) 供試体 No.1 (加振周期 0.5sec、加速度振幅 400gal)



(b) 供試体 No.2 (加振周期 0.5sec、加速度振幅 400gal)



(c) 供試体 No. 4 (加振周期 0.5sec、加速度振幅 400gal)

図 3.1 供試体の床面相対変位と床面の実測加速度の時刻歴

#### 3.2 すべり開始加速度、ロッキング開始加速度

水平振動する床面上に置かれた剛体に対して、運動力学に基づいて導かれるスリップにより移動開始する条件やロッキングを開始する条件は以下のようなものである<sup>文献1)</sup>。

$$\frac{\alpha_f}{g} > \mu_s \quad \text{あるいは} \quad \left( \frac{\alpha_f}{g} \right) / \mu_s > 1 \quad (3-1)$$

(a) スリップにより移動開始する条件：

ここに、 $\alpha_f$ ：ある時刻での床の加速度、 $g$ ：重力加速度、 $\mu_s$ ：静止摩擦係数

$$\left(\frac{\alpha_f}{g}\right)/\mu_s > \left(\frac{z_G}{x_G}\right)/\mu_s \quad \text{かつ} \quad 1 > \left(\frac{z_G}{x_G}\right)/\mu_s \quad (3-2a), (3-2b)$$

ここに  $z_G, x_G$  : 重心位置 (表 2.1 参照)

(b) ロッキングを開始する条件:

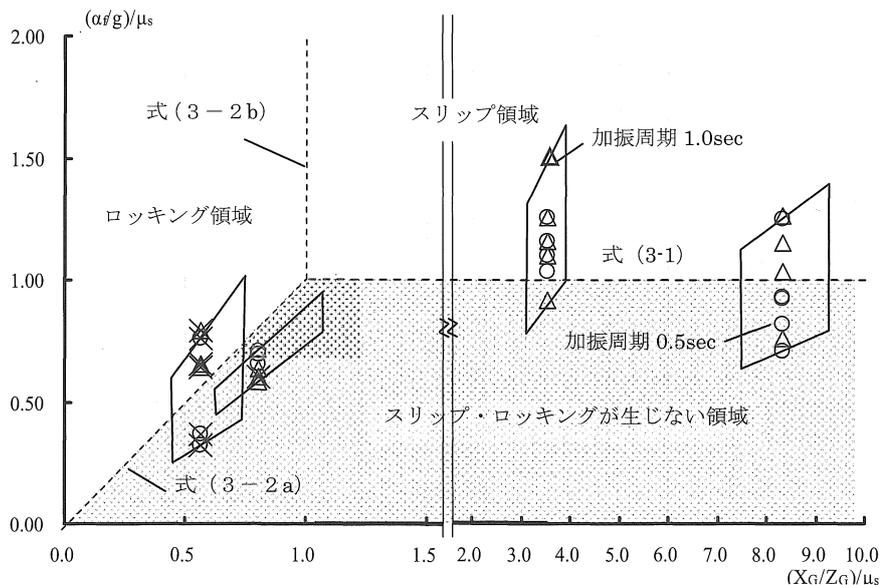


図 3.2 ロッキング、スリップ現象と加速度、重心高さ比の関係

図 3. 2 は、縦軸に静止摩擦係数で無次元加速度  $(\alpha_f / g)$  を除した値、横軸に重心高さ比を静止摩擦係数で除した値をとって各供試体が床面を移動し始めたときの床面加速度と重心位置の関係をグラフ化した図である。

図中の×は、転倒した供試体である。また、枠は、摩擦係数のばらつきを考慮した場合のとり得る値の範囲である。ばらつきを考慮しても、この図からスリップ開始およびロッキング開始の判別式 (3-1)、(3-2) 式は危険

$$\eta \left(\frac{\alpha_f}{g}\right)/\mu_s > 1 \quad (3-1)'$$

側の評価を与える可能性がある。したがって、補正係数  $\eta$  を導入し、次式で評価することを提案する。

$$\left(\frac{\alpha_f}{g}\right)/\mu_s > \eta \left(\frac{z_G}{x_G}\right)/\mu_s \quad \text{かつ} \quad 1 > \left(\frac{z_G}{x_G}\right)/\mu_s \quad (3-2a)', (3-2b)'$$

ロッキングを開始する条件:

今回の実験結果に基づくと安全側の評価を与える  $\eta$  の値として  $\eta = 0.7$  が妥当と思われる。

### 3.3 実地震波形で振動する床に置かれた供試体の挙動 (実験Ⅱ)

図 3.3 ~ 図 3.5 は、最大加速度を 800gal (図 3.3) あるいは 400gal (図 3.5) に基準化した 1995 年兵庫県南部地震波 (NS 方向) とエルセントロ地震波 (NS 方向) で加振された各試験体の相対変位の時刻歴 (30 秒間) を示したものである。供試体 No.2 (図 3.4) では、ロッキングの後転倒を起こしており、転倒した時点で加振を中止している。

また、フランジ付き脚を有する No.1 供試体について防振粘着マットならびにねじで床に固定した実験も行っている。No.1 供試体には工具が吊り下げられており、作業台は移動しないものの吊り下げられている工具の激しい揺れを観測している (写真 3.1 参照)。現実このような現象が生じると作業者に当たる恐れがあり、床に固定することが必ずしも最善策とならないこと示している。

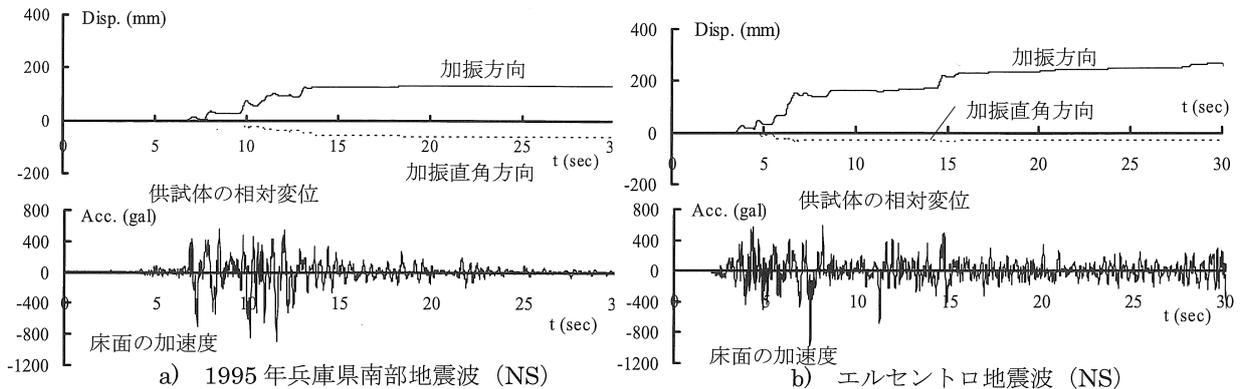


図 3.3 供試体 No.1 (フランジ付脚、 $\mu s=0.265$ )

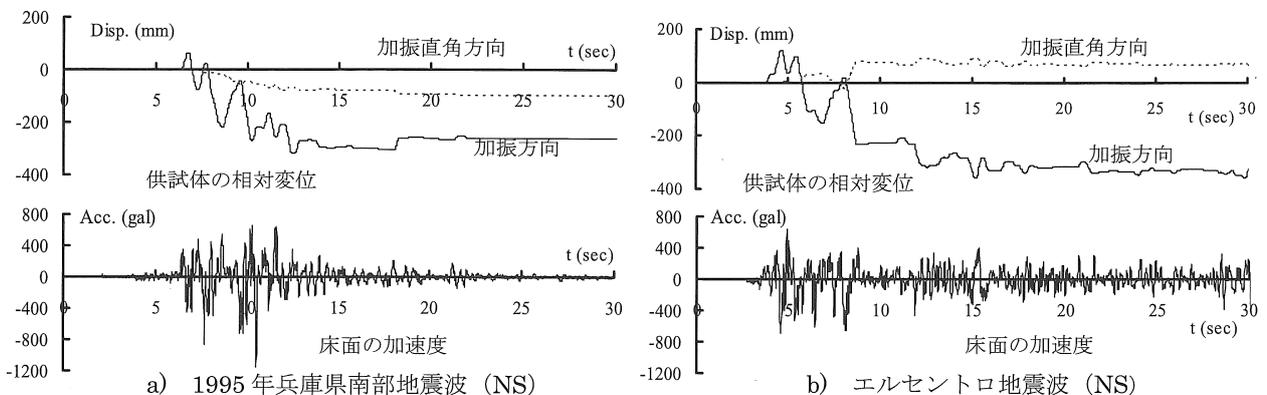


図 3.4 供試体 No.4 (キャスター付き脚、 $\mu s=0.055$ )

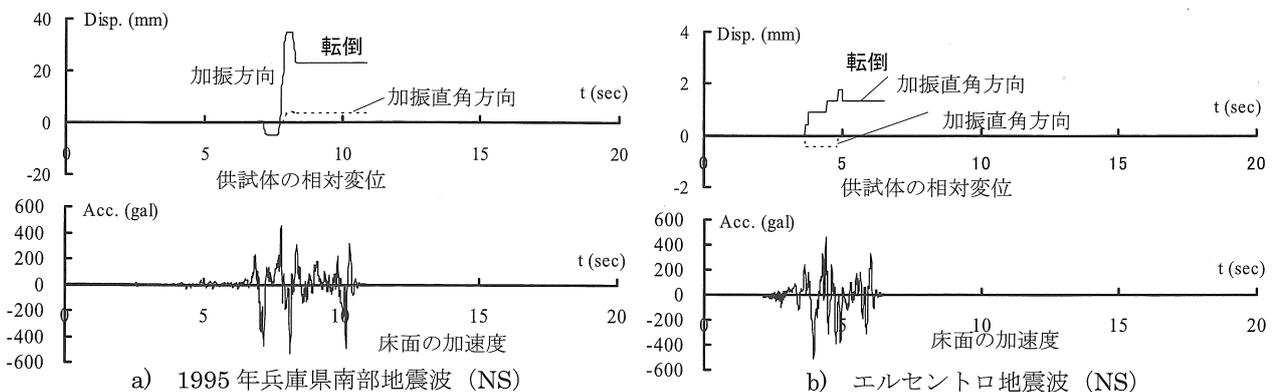


図 3.5 供試体 No.2 (フランジ付き脚、 $\mu s=0.227$ )

#### 4. すべり挙動を生じる試験体のシミュレーション

##### 4.1 シミュレーション上の仮定

水平振動する床面上の置かれた供試体の挙動に関して運動力学に基づいた簡単なシミュレーションを行い、実験結果と比較する。シミュレーションにおける仮定は、以下のとおりである。

- 1 供試体を剛体として扱う。
- 2 ロッキング、転倒は生じない。
- 3 床面は、水平振動のみで上下振動は無いものとする。
- 4 静止摩擦係数、動摩擦係数は、速度依存は無いものとして表 2.2、表 2.3 の平均値を用いる。
- 5 静止状態の供試体は、静止摩擦力を超える慣性力により滑り始め、床面を移動中は動摩擦力が働く。
- 6 慣性力が動摩擦力以下になると床面に対して移動しなくなる。

##### 4.2 シミュレーション

図 4.1 は、正弦波振動する床に置かれた場合について、また図 4.2 は、実地震波形による場合のシミュレーションを行った結果と実験結果と比較した 1 例を示している。なお、床面の加速度波形は振動台の実測加速度波形を用いている。いずれも加振方向の移動量の時刻歴で、太線は、シミュレーション結果、細線は実測結果である。また、図 4.3 は、振動周期 1.0sec 加速度振幅 400gal で振動台を振動させる正弦波の原波形を用いてシミュレーションした結果（図中細線）と振動台の実測波形を用いたシミュレーション結果（図中太線）とを比較した図である。これから床の実測波形と原波形との僅かな振動波形の違いによって供試体の相対変位や振動性状に大きな違いが生じることが判る。しかし、振動台床上で計測した加速度記録を用いてシミュレーションした結果では、おおむね全体的な挙動の特徴は再現されていると思われる。相対変位量については、シミュレーション結果よりも実測結果のほうが大きく移動（スリップ）しており、シミュレーションによる評価のほうが過小評価となっている。



写真 3.1 吊り下げられた工具の挙動の様子

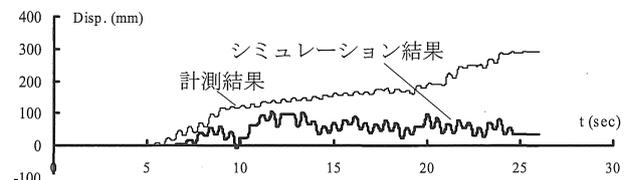


図 4.1 供試体 No.1 のシミュレーション結果  
(加振周期 0.5sec、加速度振幅 400gal)

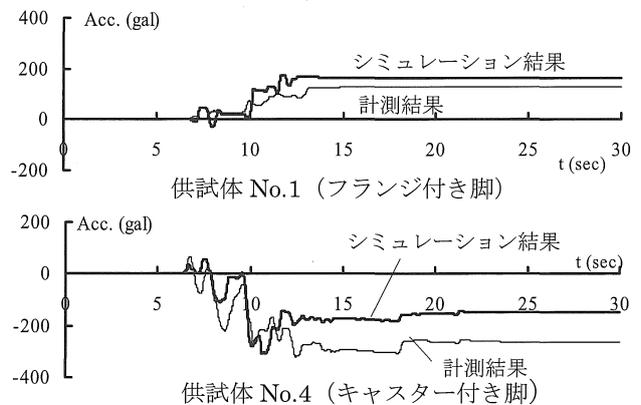


図 4.2 兵庫県南部地震波(NS)に対する実験結果とシミュレーションとの比較

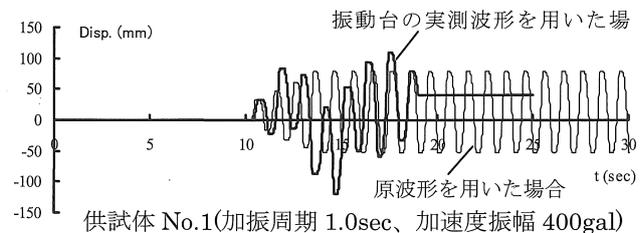


図 4.3 原波形と振動台の実測波形とを用いたシミュレーション結果の比較

### 4.3 実地震波による移動量の推定

神戸地震波、エルセントロ地震波の原加速度波形を用い、最大加速度の大きさを変えながら静止摩擦係数と最大相対変位  $X_{max}$  と総移動量(床面を滑った経路の長さ) $S$  の関係をシミュレーションによって求めた図が、図 4.6 である。図中の  $K$  の値は、入力地震波形の最大加速度を重力加速度で無次元化した値である。実験を行ったケースは、 $k=0.8$  および  $k=0.4$  に対応する。図中の◆は、供試体 No.4 の測定結果で  $k=0.8$ 、 $\mu s=0.055$  のシミュレーション結果に対応する。最大相対変位は、シミュレーション結果と大きな違いがあるが総移動量では概ね一致している。新潟中越地震(小谷 EW) の加速度記録を用いて静止摩擦係数と最大相対変位  $X_{max}$  と総移動量(床面を滑った経路の長さ)  $S$  の関係をシミュレーションによって求めた図が (c) である。(a) ~ (c) を比較すると、最大相対変位と静止摩擦係数の関係は、地震波によって大きく異なっているが、総移動量と静止摩擦係数の関係は、地震波による違いが少ないことが判る。新潟中越地震は、兵庫県南部地震と比べ短周期が卓越しており、最大相対変位と静止摩擦係数の関係はこのような地震動特性の影響を受けやすいが、総移動量は地震動特性の影響を受けにくいと推察される。したがって、地震動による移動量予測には総移動量と静止摩擦係数の関係が有効であると思われる。

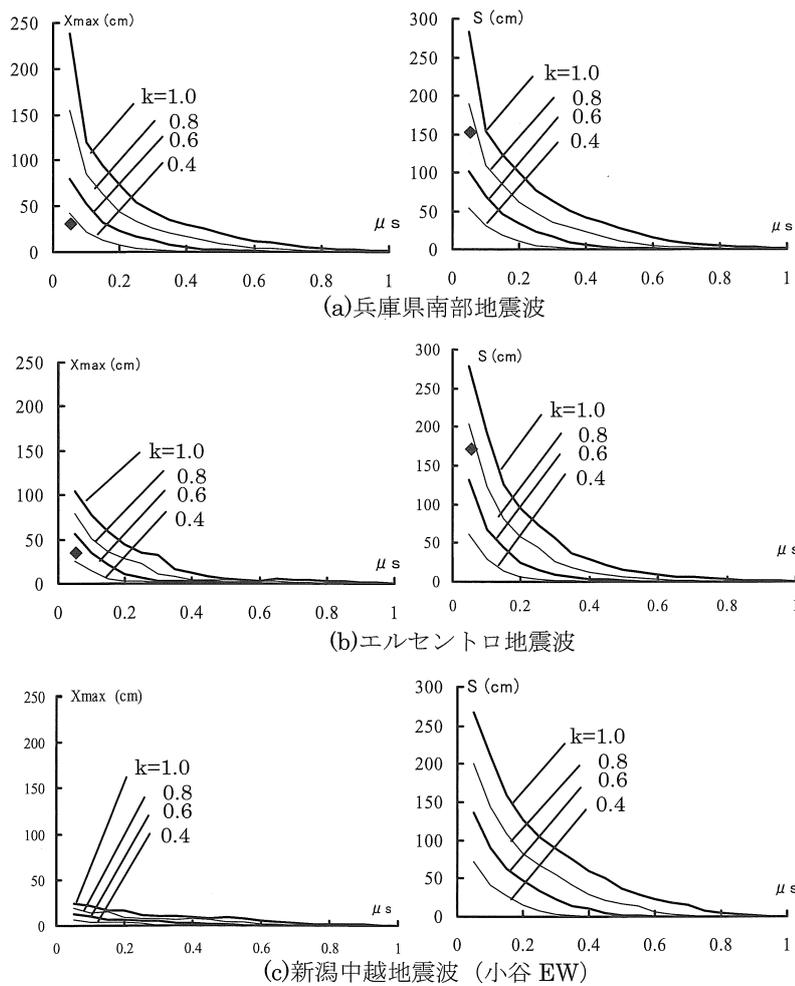


図 4.6 静止摩擦係数と最大相対変位、総移動量との関係

## 5. 結び

本実験は、地震時における作業者の安全対策として、セル生産方式における作業台の設置方法を検討するための基本性状を把握することが目的で行われた。

その結果、以下のような結果が得られた。

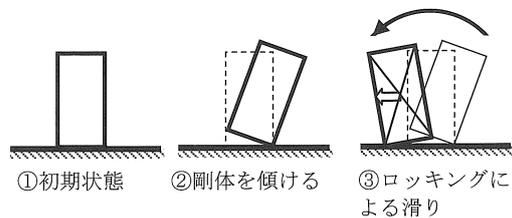
- (1) 現実には、床面の状態は一様でなく作業台と床との摩擦係数のばらつきも大きい。
- (2) 剛体運動から理論的に導かれる移動に対する判定式 (3-1) 式およびロッキング開始に対する判定式 (3-2) 式は、危険側の判定を与えることがある。
- (3) 作業台を剛体として扱った移動に関するシミュレーションによる初期状態からの移動量については実験結果とあまり一致しなかった。しかし、総移動量についてはほぼ一致した。
- (4) 最大加速度が等しい地震波による床面総移動量（床面を移動した加振方向の軌跡の長さ）は、地震波の種類に依らずほぼ等しくなる。

これらは、限られた実験結果とシミュレーションによる結果であるのでさらに今後実験等を行っていく必要がある。また、今回の実験では、セルを構成する作業台単体に対する実験であったが、作業台を連結した状態での実験を行い、連結方法の違いによる影響などを明らかにする必要がある。

### 注釈

注1) セル生産方式とは、組み立て製造業において、1人～数人の作業員が部品の取り付けから組み立て、加工、検査までの全工程を担当する生産方式で、部品や工具を備え付けた作業台をU字型などに配置したセルと呼ばれるラインを構成して作業を行う。

注2) 静止している床面に置かれた剛体①を②のように傾斜させた後、開放するとロッキング現象を起こすが、②の状態から復原するとき、慣性モーメントによって矢印方向に加速度が働き、スリップ現象を起こす。その結果、③のような位置に移動しながらロッキングを継続する。



### 参考文献

- 1) 望月利夫、小林計代：単体の運動から地震加速度を推定するための研究—単体の動的挙動の解析—、日本建築学会論文報告集、第248号、1976年11月
- 2) Y. Ishiyama：Motions of Rigid Bodies in Response to Earthquake Excitations, Trans. of A.I.J., No.314, April 1982
- 3) 矢崎雅彦、麻里哲広、石井祐二：剛体のロッキング振動と転倒条件—物体の非対称性及び壁の影響を考慮した解析—、日本建築学会大会学術講演梗概集（関東）、1997年9月