

平成 22 年 6 月 1 日現在

研究種目：若手研究 (A)  
 研究期間：2008 ～ 2009  
 課題番号：20686031  
 研究課題名 (和文) 基盤構造メカニカルインターフェースの創成と構造物の地震時崩壊挙動の実験的評価  
 研究課題名 (英文) Construction of Mechanical Interface Representing Soil-Foundation Systems and Experimental Study on Dynamic Response of Structures during Earthquakes  
 研究代表者  
 齊藤 正人 (SAITOH MASATO)  
 埼玉大学・理工学研究科 准教授  
 研究者番号：40334156

研究成果の概要 (和文)：本研究は、本申請代表者がアメリカ土木学会 (ASCE) で発表した 2007 年の論文「Masato Saitoh: Simple Model of Frequency-Dependent Impedance Functions in Soil-Structure Interaction Using Frequency-Independent Elements, Journal of Engineering Mechanics」に基づき、これまで構築することが極めて困難と言われ続けてきた”基盤構造のメカニカルインターフェース”を世界に先駆けて創成する。本研究成果として、メカニカルインターフェースを実際の機械装置として構築する際に生じる幾多の問題を明らかにするとともに、その解決策を考案するに至った。

研究成果の概要 (英文)：A mechanical interface representing soil-foundation systems is constructed based on the previously-published paper titled “Masato Saitoh, Simple Model of Frequency-Dependent Impedance Functions in Soil-Structure Interaction Using Frequency-Independent Elements, Journal of Engineering Mechanics, ASCE”. The results of this study found a large number of difficulties and their solutions when the mechanical interface is designed and constructed.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008 年度	14,300,000	4,290,000	18,590,000
2009 年度	5,700,000	1,710,000	7,410,000
年度			
年度			
年度			
総計	20,000,000	6,000,000	26,000,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学・構造工学・地震工学・維持管理工学

キーワード：地震工学

## 1. 研究開始当初の背景

日本は明日にでも起きるといわれている東海・東南海・南海地震といった巨大地震や都市直下地震という危険に晒されている。そのため、建築・土木の分野では強震動を受け

る構造物の応答予測手法の確立が極めて重要な課題となっている。特に近年の巨大地震に対する応答予測の難しさは、構造物の動的挙動が弾性域から塑性域に至る非線形領域にまで及ぶことに尽きる。近年では、日本が

誇る世界最大級の実大三次元震動破壊実験施設に見るように、実験を主体とした応答予測手法が脚光を浴びており世界中から注目されている。ところが、こうした実験にも限界がある。それは、構造物を支持する基盤構造（通常多層地盤かつ杭などの基礎構造を有する）を空間的に限られた実験場において再現することが極めて困難なことにある。一般に、基盤構造は3次元的な広がりを持っており、そこに複雑な3次元波動場が形成される。そのため、基盤構造と地上構造物の境界部（インターフェース）では、複雑なエネルギー逸散や復元力機構が生成され、それらは加振振動数の違いによって著しく変化する、いわゆる”振動数依存性”が現れる。エネルギーの散逸は系の応答増幅に、復元力との連成は構造系全体の固有振動数に影響を及ぼす。そのため、このインターフェースでの特性が構造系の応答を大きく左右する可能性は極めて高い。しかしながら、基盤構造の空間的広がりが制約された実験施設では、上記インターフェースの振動数依存性を正確に表現しきれず、地上構造物の崩壊挙動を正確に予測することは困難を極める。

これまで本研究代表者により、基盤構造の動的挙動について、杭基礎からケーソン基礎といった大型基礎まで幅広く研究を行い、特に強震動を受ける基盤構造の様々な現象を解明してきている。杭基礎に関しては、強震動を受けた際の杭基礎の動的ばね特性（インターフェース特性）の研究「滑りと剥離の境界非線形性が杭基礎の動的インピーダンスに及ぼす影響に関する研究、土木学会論文集、766巻、I-68号、pp.263-275、2004.」を始め、複雑な上部構造物と基盤構造の連成挙動を解明した一連の研究（Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, Vol.131, No.10, pp.1243-1251, 2005.、その他、土木学会論文集 787巻、766巻等）が挙げられる。また、大型基礎に関しては、強震時におけるインターフェース特性を理論と実験から評価した一連の研究（Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, Vol.130, No.4, pp.438-445, 2004.、その他、土木学会論文集 759巻、745巻、731巻等）が挙げられる。このように本研究代表者はこれまで数多くのインターフェース特性の研究を遂行してきた。そして、2007年10月、それらの研究過程を経て、「Masato Saitoh : Simple Model of Frequency-Dependent Impedance Functions in Soil-Structure Interaction Using Frequency-Independent Elements , Journal of Engineering Mechanics」を発表した。本論文は、複雑な振動数依存性を持つ基盤構造のレオロジーモデルを、振動数に依存しない定数を持つ要

素、特に質量の代わりに Gyromass 要素を導入することで、少ない要素数、自由度で適切にモデル化することに成功した。そして、このレオロジーモデルを機械装置として構築できれば、前述した本研究の目的を達成することができるのである。

## 2. 研究の目的

本研究では、研究期間において、基盤構造の振動数依存性により地上構造物の崩壊挙動がいかなる影響を受けるのか、またそれは地震工学上、無視し得ない重要な差異となるのかという極めて重要な問題に対して、メカニカルインターフェースを介して模型実験により検証することを目的とする。手順としては、第1にメカニカルインターフェースを実験可能なレベルまで構築する。具体的には、メカニカルインターフェースが振動数依存性を適切に表現できるシステムとして機能させるため、各パーツの問題点を抽出し、改良・改善を行う。第2に具体的な構造模型とインターフェースとの連成挙動を再現させることを目的とする。その際、部材の崩壊過程と時刻歴応答性状を加速度計、変位計を用いて多点同時計測し、その特性をFFTや時間-周波数解析などを行いながら詳細に把握する。その上で、第3として振動数依存性を有しないインターフェース（静的ばねと一定の減衰係数）上に設置した構造模型との比較実験を行い、振動数依存性による崩壊過程の変化や応答性状の差異について把握し、その影響を検証する。

## 3. 研究の方法

本研究では、1年目に（20年度）にメカニカルインターフェースの設計・製作および性能評価を行い、2年目（21年度）に地上構造物との連成実験を実施し、従来実験法との比較をすることで、連成系挙動の予測結果の相違について評価を行う。

本研究で扱う Gyromass 要素は本装置の心臓部であり、原理的には単純な構造から成り立っている。しかし、基盤構造の振動数依存性を正確にシミュレートするためには、回転体の質量が他の要素に対して大きくなり、メカニカルインターフェースの装置に収まらない可能性がある。このことは、事前の解析によって予想されている難問である。この問題を解決する工夫として、回転体とロッドを直接接触させるのではなく、伝達機構として重ねギア、あるいはギヤシフト機構（自転車・自動車等に導入されているものと同様）を設ける予定である。これにより回転運動のためのトルクが増幅されて、回転体の質量は実際よりも数十倍から数百倍まで増加させることができる。この装置の制作可能性については、既に研究協力者とミーティングを行い検証済みである。それでも尚、製作に支障のある問題が生じるならば、スケールの見直

しを図る予定である。特定の縮約上で、例えば摩擦の影響が無視し得ないと判断された場合には、低摩擦材への可能な限りの材料変更と共に、摩擦の影響が緩和される範囲へのスケール変更を行う。スケール変更は、本装置の得意とする解決手法であり、いかなる寸法でも Gyromass 要素を構築できる長所を利用する。

具体的には以下の研究作業を行う。

1) メカニカルインターフェースの製作  
 基盤構造のモデル化を行い、メカニカルパーツの要求性能を求めて忠実に設計・製作する。具体的には、標準的な基盤構造に対して Similarity を満足するようにスケール調整する。調整後、当該インターフェース特性を再現できるメカニカルパーツの設計諸元をレオロジーモデルから算定する。研究の流れとしては、以下のようになる。

- ・対象構造の選定
- ・相似比 (Similarity) の決定/レオロジーモデルによるパーツ諸数値の算定
- ・パーツの機械設計/インターフェース構造設計
- ・実製作

2) インターフェースの性能評価  
 動的載荷試験によりメカニカルインターフェースの性能評価を行う。また問題点を抽出して改善を図る。メカニカルインターフェースの性能評価は、アクチュエータによるインターフェースの天端加振実験によって行う。当実験から装置のインピーダンス特性を把握し、理想特性との整合性を検証するとともに、問題点を把握する。研究の流れとしては、以下のようになる。

- ・アクチュエータの設置/計測装置の設置/装置類の動作確認
- ・調和加振実験/データ整理
- ・問題点の把握/問題の原因となる箇所の改善

3) 地上構造物の地震応答特性の評価  
 動的振動試験によりメカニカルインターフェースによる地上構造物の地震応答特性の評価を行う。具体的には、大型振動台上にメカニカルインターフェースを設置し、その上に地上構造物を搭載した状態での地震応答評価である。計測は複数部材の時刻歴加速度・変位応答、ならびにビデオカメラによる崩壊過程の追跡である。また、振動数依存性による影響を把握するため、依存性のない状態をメカニカルインターフェースで再現させた実験を行う。研究の流れとしては、以下のようになる。

- ・地上建築物の模型設計と製作
- ・メカニカルインターフェースの設置
- ・地上建築物の模型設置
- ・調和加振実験/ランダム加振実験/データ整理/比較実験

#### 4. 研究成果

##### (1) 模型諸元の決定方法

本研究では、軟弱地盤上の 3x5 配列杭基礎構造物をメカニカルインターフェースの構築対象と決定した。Buckingham の  $\pi$  定理に基づく相似則を適用し、幾何学的スケールを相似比 3 として模型諸元の決定を行った。ここで基礎は水平 1 自由度のみに運動すると仮定している。メカニカルインターフェースは、本研究代表者による前述の論文で示す Type-II Model を基本とし、Core System を 3 ユニット設けることで、比較的高い振動数領域での振動数依存性についても再現を試みている。Core System を 3 ユニット用いたことにより、ばね、回転慣性、ダンパーは、並列 2 機構で合計 17 単位の機械ユニットを同時に制御する必要がある。そのため、実験に対する予想解析を実施し、各機械ユニットの応答変位量を把握し、これらの機械ユニットを構成する機械パーツが許容変位内に収まる設計値とした。この点が、設計上多くの時間と労力を費やす結果となった。

Geometric Scaling ( $\lambda$ )		3				
Mass Scaling ( $\gamma$ )		2500.0000				
Items	Quantity	Abbr.	Law of Similitude	Values		
				Prototype	Target	
Superstructure	Mass (tons)	m	$\gamma$	2.50E+03	1600.000	0.640
	Height	H	$\lambda$	3.0000	15.000	5.000
	Natural Frequency (Hz)	fp	$\lambda^{-1/2}$	0.6774	8.121	14.066
	Young's Modulus (kn/m <sup>2</sup> )	E	$\lambda^2 \gamma$	277.7778	2.50E+07	8.06E+04
	Mass density (ton/m <sup>3</sup> )	$\rho$	$\lambda^3 \gamma$	92.9298	2.50E+03	2.70E+02
	Column Stiffness (kN/m)	ks	$\lambda^3 \gamma$	833.3333	6.72E+06	8.06E+03
	Geometrical Inertia (m <sup>4</sup> )	I	$\lambda^4$	81.0000		
	spring(kn/m)	k	$\lambda^3 \gamma$	833.3333	65000.000	7.80E+02
	damp(er)(kn sec/m)	c	$\lambda^{3/2} \gamma$	1443.3757	0.000	0.00E+00
	gyromass(kn sec <sup>2</sup> /m)	m <sub>r</sub>	$\gamma$	2.50E+03	520.000	2.09E+01
Interface	spring1(kn/m)	k	$\lambda^3 \gamma$	833.3333	247000.000	2.98E+02
	damp(er)1(kn sec/m)	c	$\lambda^{3/2} \gamma$	1443.3757	4199.000	2.91E+00
	gyromass1(kn sec <sup>2</sup> /m)	m <sub>r</sub>	$\gamma$	2.50E+03	839.800	3.36E+01
	spring2(kn/m)	k	$\lambda^3 \gamma$	833.3333	975000.000	1.17E+03
	damp(er)2(kn sec/m)	c	$\lambda^{3/2} \gamma$	1443.3757	18525.000	1.28E+01
	gyromass2(kn sec <sup>2</sup> /m)	m <sub>r</sub>	$\gamma$	2.50E+03	1218.750	4.88E+01
	spring3(kn/m)	k	$\lambda^3 \gamma$	833.3333	1365000.000	1.64E+03
	damp(er)3(kn sec/m)	c	$\lambda^{3/2} \gamma$	1443.3757	15015.000	1.04E+01
	gyromass3(kn sec <sup>2</sup> /m)	m <sub>r</sub>	$\gamma$	2.50E+03	245.700	9.83E+02
	Mass moment of inertia (ton m <sup>2</sup> )	J	$\lambda^2 \gamma$	2.25E+04		0.00E+00
Responses	Mass(tons)	m	$\gamma$	2.50E+03	600.000	2.40E+01
	Acceleration(m/s <sup>2</sup> )	a	1	1.00E+00	1.000	1.00E+00
	Displacement(m)	D	$\lambda$	3.00E+00	0.002	6.67E-04
	Velocity(m/s)	v	$\lambda^{1/2}$	1.7321	100.000	5.77E+01
	Stress(kn/m <sup>2</sup> )	$\sigma$	$\lambda^2 \gamma$	277.7778		0.00E+00
	Force (kn)	fp	$\lambda^3 \gamma$	2.50E+03	15696.000	6.29E+00
	Time(sec)	t	$\lambda^{1/2}$	1.732050808	40.000	2.31E+01

表 1 メカニカルインターフェース相似則

##### (2) メカニカルインターフェースの試験結果

各ユニットにおいて、回転慣性ユニット、ダンパーユニット、ばねユニット、ならびに全体ユニットのインピーダンス特性を載荷試験により評価した。本実験では、本研究予算で新規に購入した加振機（油圧加振型、振動数 0.001-30Hz、最大振幅 150mm、加振力 10kN）によりインターフェースユニット上端を水平加振し、そのときの動的荷重と動的変位から自動的にインピーダンス特性を把握できるシステムとなっている。図 1 には、メカニカルインターフェースを組み立てた完成の様子と、図 2 として各ユニットの性能を評価している様子を示す。

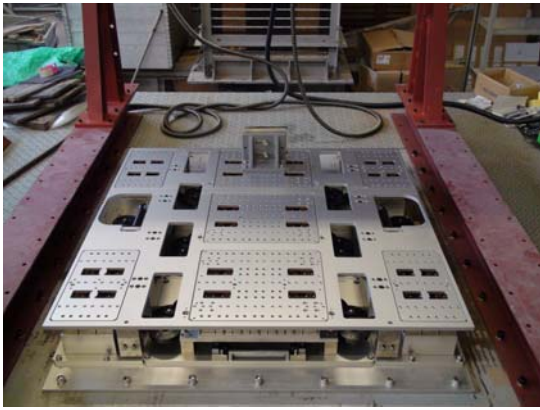


図1 メカニカルインターフェース組立完成

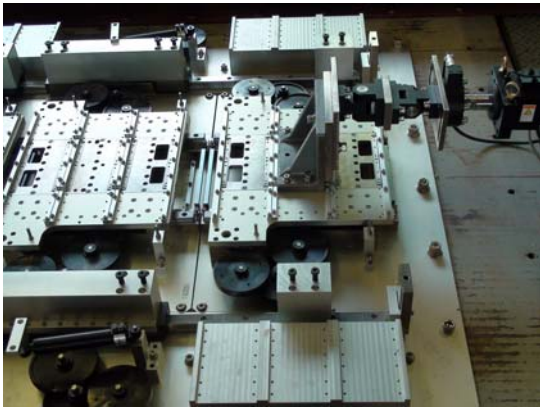


図2 ユニット単体加振実験写真

① 回転慣性機構の特性

当初設計製作した回転慣性機構を図3に示す。回転慣性機構は回転質量と重ねギアユニットから構成されている。研究初年度に完成した回転慣性ユニットを水平荷重したところ、7Hz以下では安定した応答と性能を示していたが、それ以上の振動数領域では、応答が不安定になり、実験を遂行することが困難となった。この理由は複数あることが実験により

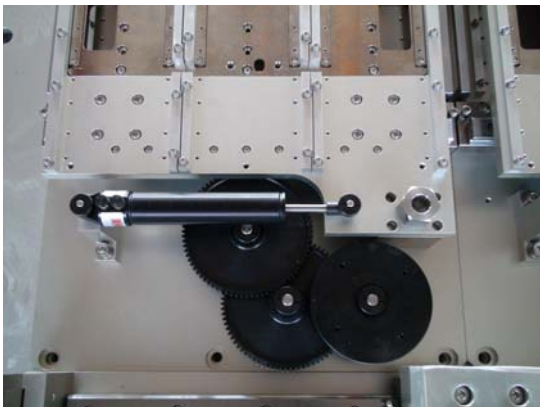


図3 システム改良前のダンパーユニットと回転慣性機構 (Gyromass 要素)

明らかとなった。その主な要因は、回転慣性による水平抵抗が加振振動数の2乗に比例し

て大きくなることにある。これにより、1) 7Hz以上の加振領域では、ギアや質量の回転軸が水平ばね (Cantilever) として挙動し、あらたな振動単位を形成する、2) Core Systemの支持板が回転慣性抵抗の増加に伴い浮き上がる、といった現象が生じ、これらがシステムを不安定にする原因となっていることがわかった。図3には、そのときのCore Systemの構成写真を示す。

これらの対策として、図4に示すようなギアボックスを設けて回転軸を両端水平固定とし、回転軸の剛性をおよそ4倍に増加させた。また、Core Systemの支持板の浮き上がりを抑制するため、固定用ボルトを増加した。これにより、実験は10Hz程度まで荷重が可能となった。図5に改良前後の回転慣性機構のインピーダンス特性を示す。図5に示すように、本改良によって、慣性抵抗が加振振動数の2乗に比例して低減する特性が再現できていることがわかる。

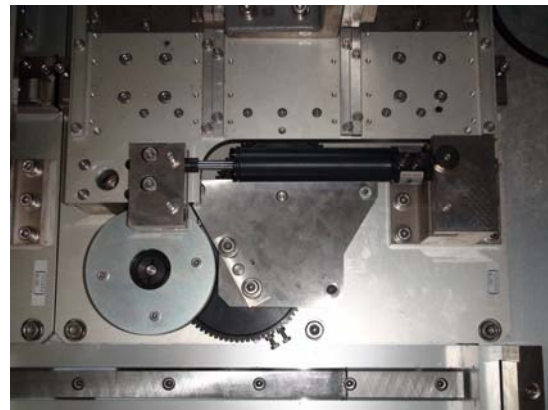


図4 システム改良後のダンパーユニットと回転慣性機構 (Gyromass 要素) : 固定治具の増強とギアボックス化

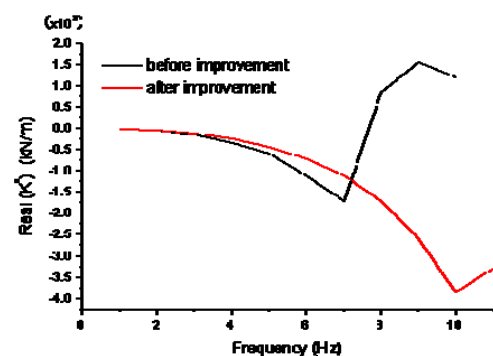


図5 システム改良前後の回転慣性機構 (Gyromass 要素) のインピーダンス特性

② システムのインピーダンス特性

図6と図7にシステムとしてのインピーダンス特性を示す。水色のラインは目標とする性能であり、青と赤のラインは荷重加速度を

50Galと100Galにしたときの実験結果である。図6によれば、4Hzにおける剛性（実部）の局所的な剛性低下が良好に再現できていることが分かる。また、5Hz近傍での極大値についても再現性が高い。一方、減衰特性（虚部）に関しては、4.5Hz近傍の局所的な増加が良好に再現できていることがわかる。システム内の機械ユニット間の伝達特性を計測した結果を図8に示す。目標値を良好に再現していることがわかる。

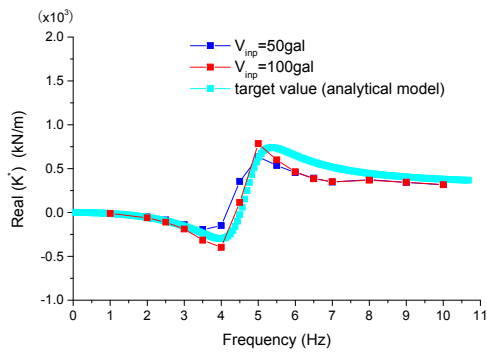


図6 システムのインピーダンス特性（実部）：目標値との比較（50Gal, 100Gal）

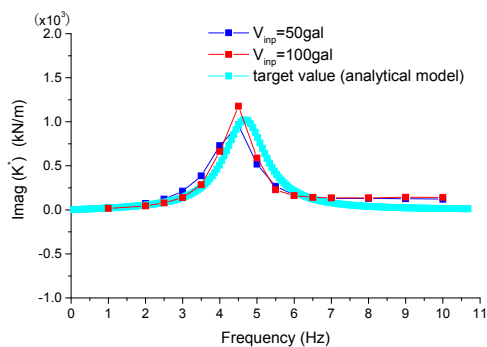


図7 システムのインピーダンス特性（虚部）：目標値との比較（50Gal, 100Gal）

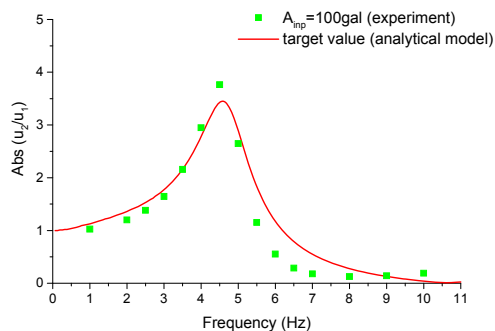


図8 加振位置とシステム内部の伝達関数特性

以上のことから、本装置が目標性能を良好に再現できることが判明した。本研究はメカ

ニカルインターフェースの更なる高精度化を目指して現在も継続中である。

## 5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計4件）

- (1) Masato Saitoh, Nonlinear Response of Superstructures Influenced by Frequency-Dependent Oscillations in Impedance Functions of Pile Groups Embedded in a Layered Soil, Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering, ECOMAS, Vol. 2, pp.1-8, 2009
- (2) Masato Saitoh, Mechanical Representation of Dynamic Stiffness of Soil-Foundation Systems, Seismic Design, Observation, Retrofit of Foundations, Vol.3, pp.296-301, 2009.
- (3) Pongsathon, C. Nakhorn P. Saitoh, M., Soil-Structure Interaction Effects on Elastic Response of Buildings in Bangkok by Frequency-Dependent Impedance Foundation, ISEEE, Vol.1, pp.40-45, 2009.
- (4) Masato Saitoh, An Innovative Method for Evaluating the Dynamic Response of Inelastic Structures with Frequency-Dependent SSI, 14th World Conference on Earthquake Engineering, Beijing, China, Vol.14 (CD), pp.1-8, 2008.

〔学会発表〕（計3件）

- (1) 齊藤正人, 地震動を受ける構造物の高精度な実験シミュレーションのための基礎-地盤系メカニカルインターフェースの構築手法の提案, 土木学会 第64回年次学術講演会講演概要集, 2009. 9. 3
- (2) 齊藤正人, Gyromass Element を利用した基礎-地盤系の動的相互作用問題に関する新手法の提案, 理論応用力学講演会講演論文集, Vol.57, 2008. 6. 10
- (3) 齊藤正人, 非線形解析に使用可能な振動数依存性を有する基礎-地盤系のパラメータモデルの提案, 土木学会 第63回年次学術講演会講演概要集, 2008. 9. 11

〔その他〕

ホームページ等

[http://www.saitama-u.ac.jp/saito/interf ace\\_project.html](http://www.saitama-u.ac.jp/saito/interf ace_project.html)

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

齊藤 マサト (SAITOH MASATO)

埼玉大学・大学院理工学研究科・准教授

研究者番号：40334156

