

長周期構造物の応答を再現するロングストローク簡易振動台の開発

DEVELOPMENT OF LONG-STROKE AND COMPACT VIBRATION TESTING SYSTEM FOR TRACING EARTHQUAKE RESPONSE IN LONG-PERIOD BUILDINGS

福和伸夫 —— *1 佐武直紀 —— *2 原 徹夫 —— *3
太田賢治 —— *4 飯沼博幸 —— *4 鶴田庸介 —— *5
飛田 潤 —— *6

Nobuo FUKUWA —— *1 Naoki SATAKE —— *2 Tetsuo HARA —— *3
Kenji OHTA —— *4 Hiroyuki IINUMA —— *4 Yosuke TSURUTA —— *5
Jun TOBITA —— *6

キーワード

超高層建物, 長周期地震動, 大振幅応答, サーボモータ, パルス制御, 振動体験

Keywords

Super high-rise Building, Long-period earthquake motion, Large-amplitude response, Servo motor, Pulse Control, Experience of earthquake excitation

This paper presents the development of a long-stroke vibration testing system for tracing earthquake response in long-period buildings. Comparing with ordinary shaking tables, this system doesn't require large space and any special power supplies. In the process of development, various types of shaking tests for checking performances of this system are operated. Finally, it is confirmed that this system can precisely trace and any kind of waves within the range of $\pm 3\text{m}$ displacement, 500cm/s velocity and 2000cm/s^2 acceleration. For building users, owners and engineers, it is expected to have proper understanding earthquake response in long-period buildings by using this system.

1. はじめに

今世紀前半に発生が懸念される東海・東南海・南海地震などのマグニチュード8クラスの巨大地震では、我が国の三大都市圏が立地する関東・大阪・濃尾などの堆積平野で、長周期成分が卓越した地震動が長時間生起することが懸念されている。これらの平野には、超高層建築物をはじめ長大橋、石油タンクなど、長周期地震動に対する検討が必要とされる構造物が多数建設されている。堆積平野は、その深部地盤構造に伴うやや長周期の卓越周期を有しており、堆積平野の卓越周期と構造物の固有周期とが近接した場合、構造物の共振に伴う想定外の応答が懸念される。このため現在、日本建築学会と土木学会では、長周期地震動に関する構造物の耐震安全性に関する検討が精力的に進められてきた^{1), 2)}。

長周期地震動に対する長周期低減衰構造物の応答は、固有周期が長い故に応答が数mにも及ぶ大変位となる。例えば、層間変形角 Δ を設計クライテリアとして耐震設計をした場合、固有周期 $T(\text{s})$ と建物高さ $H(\text{m})$ は線形関係 $T = \alpha H$ があるので、頂部の応答変位を $\delta(\text{m})$ とすれば、応答速度 $V(\text{m/s})$ の概算値は $V = 2\pi \delta / T = 2\pi \Delta H / \alpha H = 2\pi \Delta / \alpha$ となる。例えば、 $\alpha = 0.03$, $\Delta = 1/100$ とすれば $V = 2\text{m/s}$ 程度、変位応答 ΔH は、高さ 250m 級の建物の場合 2.5m 程度が想定されることになる。

このような大振幅の応答を、アクチュエータを利用した従来型の振動台で再現することは、一般には困難である。昨年建設された世界最大の振動台 E-Defense ですら、最大変位振幅は 1m である。このため、構造設計者や研究者の間でさえ、長周期の応答性状を解析で得られた数字としてしか見ておらず、体感的にイメージできていないように感じられる。まして、意匠設計者や高層ビルの発注者にとって、長周期

の応答性状を理解することは、非常に困難な状況と思われる。

筆者らはこの数年に渡り、このような長周期地震動による構造物の大振幅の応答を再現できるだけでなく、従来の大規模な振動台とは異なるコンパクトな装置で、AC 電源で動作し一般的な室内にも設置可能なロングストローク簡易振動台の開発を進めてきた。当初は、低減衰構造物における共振時の想定外応答も考慮し、一軸加振最大で変位 $\pm 5\text{m}$ 、速度 500cm/s の揺れの再現を目標としていた。最終的には、設置場所の関係もあって最大変位は $\pm 3\text{m}$ としたが、速度 500cm/s 、加速度 2000cm/s^2 を実現し、この範囲で長周期応答のほか任意の波形を高い精度で再現する振動台を実現できた。尚、長周期ロングストローク振動台開発の試みは、建築研究所などのグループで行われている動滑車を用いた例があるが³⁾、筆者らの開発した簡易振動台は、コンパクトさと高出力性能とを併せ持ち、所期の開発目標を満たしたと考える。

本論文では、今回開発した長周期ロングストローク簡易振動台の開発経緯と振動台の概要、および性能検証試験結果について述べる。

2. 振動台の概要

2.1 開発経緯

開発は大きく 3 段階で行った。2.2 節以降では主に第 3 段階の開発成果を示すので、2.1 節では第 1, 第 2 段階の開発経緯について記す。

まず第 1 段階では、大振幅の実現を目標に、自走式で制御可能な台車振動台を開発した。電動式の貨物台車を基に、駆動用モータを DC サーボモータに変更し、波形生成・制御・電源の各装置を台車に搭載した。サーボモータは、DC 駆動方式としては最大級の 250W の定格出力を有するパルス幅変調方式モータで、最大トルク 180Nm、最大回

*1 名古屋大学大学院環境学研究科 教授・工博
(〒464-8603 名古屋市千種区不老町 1)

*2 応用地震計測(株) 地震防災部・工博

*3 応用地震計測(株) 顧問

*4 応用地震計測(株) 開発部

*5 名古屋大学大学院環境学研究科 大学院生

*6 名古屋大学大学院環境学研究科 助教授・工博

*1 Professor, Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University, Dr.Eng.

*2 Oyo Seismic Instrumentation Corp., Dr.Eng.

*3 Adviser, Oyo Seismic Instrumentation Corp.

*4 Oyo Seismic Instrumentation Corp.

*5 Graduate Student, Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University

*6 Associate Professor, Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University, Dr.Eng.

(本論文の内容は、2006 年度日本建築学会関東支部研究発表会にて発表した)

転数 2650rpm である。性能検証試験の結果、周期 5 秒以上では片振幅 $\pm 1\text{m}$ 以上の揺れを再現できたが、モータの能力限界やタイヤと床面との間のスリップなどにより、最大速度 100cm/s、最大加速度 200cm/s² 程度が限界であった^{4), 5)}。しかし、電源バッテリーも含めて全て本体に装備しているので、設置・利用場所を選ばず、装置を移動することが可能となった。また、与えた地震波形の通りに自走する台車を実現でき、その後の開発の基礎となった。

第 2 段階では、駆動力の向上を目指して、四輪駆動で自走式の台車振動台を開発した。機構上、複数台モータの同期制御が必要なため、サーボモータに代えて、パルス信号に対して正確な同期ができるステッピングモータを選定した。最大トルク 60Nm、最大回転数 60rpm であり、モータ 4 台分の加振能力を同一回転数における最大トルクで比較すると、第 1 段階での DC サーボモータと同程度である。制御・電源装置を台車に搭載せず軽量化を図ったことなどで、最大速度 200cm/s、最大加速度 400cm/s² を実現したが、目標とした周期 3 ~ 5 秒時の最大変位 $\pm 3\text{m}$ には届かなかった。しかし、4 台のモータを同期して駆動する機能を実現し、最大速度・加速度を改善できた。また、ガイドレールを設けることで、正確な波形再現性を実現した。これらによって、大出力のモータを複数使用すれば、目標とする長周期ロングストローク振動台が実現できる見通しを得た。

2.2 機器構成・仕様

振動台の全景(稼働状況)を写真 1 に示す。写真に示すように、大人 1 名が任意の地震波形による揺れを体験することを主目的として製

作されている。主な諸元は表 1 の通りである。振動台は、四輪付の台車が、長さ 7 m 強のレール上を、両端の AC サーボモータ(写真 2)2 台でチェーンにより引っ張られる構造とし、モータ 1 台では不可能なトルク・速度性能を実現している。概略図を図 1 に示す。

2 台の AC サーボアンプは、ノート型 PC に USB 接続されたコントローラからのパルス信号で制御されている。高層建物での長周期応答を再現すべく 500cm/s の高速で稼働するため、人身事故を防ぐ目的で、レール両端にリミッターを設置し、台車が可動範囲から逸脱するのを防いでいる。併せて、緊急停止ボタンを制御盤上および移動式スイッチとして設置し、安全対策を図った。システム構成図を図 2 に示す。

2.3 動作原理と制御ソフト

AC サーボモータは、パルスモータと同等のパルス信号により制御される。任意波形をモータ入力として与える場合には、分解能の高いパルス信号を多数与えることで滑らかな動きを実現している。本振動台装置の分解能は理論的には 0.0013cm/pulse であるが、機械的遊びや変形などのため、実際にはそこまでの分解能はない。また、一般にモータの駆動トルクは、回転数が上がるに伴い小さくなる。今回採用したサーボモータの性能曲線(トルク一回転数関係)を図 3 に示す。最終的に入力波形を忠実に再現するには、台車に加速度計を載せて測定し、十分滑らかな動きができるようハード・ソフト両面から調整することとなる。サーボアンプ制御のためのパルス発生には、USB 制御の市販のパルスモータコントローラを採用した。パルスモータコントローラ制御ソフトは Visual C で書かれており、コントローラーメーカーの



表 1 振動台諸元	
最大変位振幅	$\pm 3\text{m}$
最大速度振幅	500cm/s
最大加速度振幅	2000cm/s ²
加振周波数範囲	0.1 ~ 10Hz
加振波形	正弦波, sweep 波, 任意波
台車重量	約 100kg
台車寸法	1200mm × 1600mm × 1100mm
積載総重量	150kg (本体含まず)
乗車定員	大人 1 名
駆動電源	三相 AC200V
駆動モータ	3kW AC サーボモータ 2 機
理論変位分解能	0.0013cm/pulse

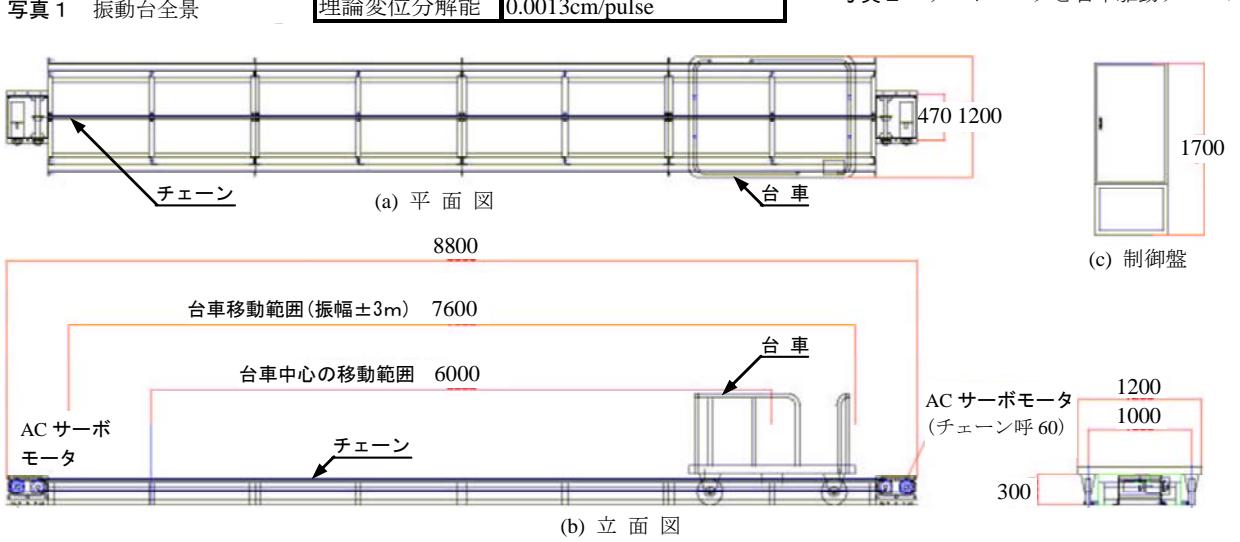
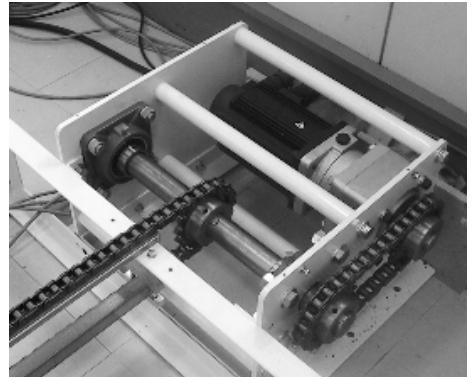


図 1 振動台概略図

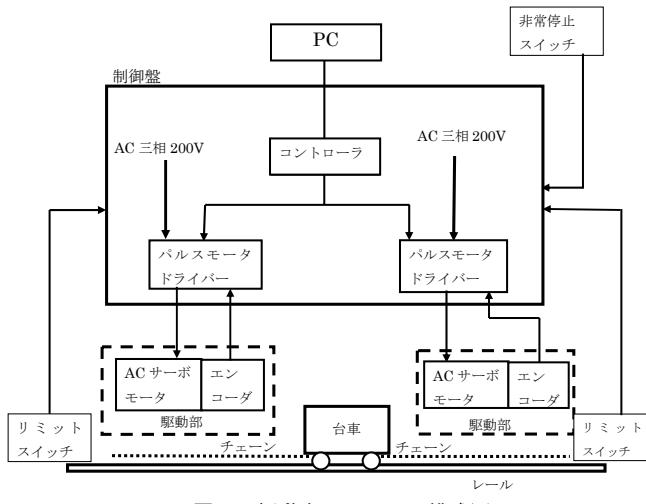


図2 振動台のシステム構成図

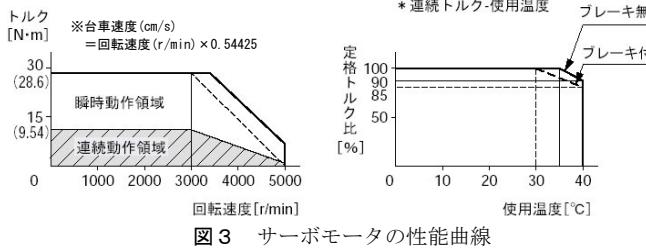


図3 サーボモータの性能曲線

Visual C ライブラリーをコールすることでモータ制御が可能となる。

本振動台の制御ソフトには、通常使用が想定される、①正弦波加振、②Sweep 加振、③任意波形加振の3機能を組み込んでいる。原理的には、③の任意波形加振機能により、モータ性能の範囲内であらゆる波形が再現可能である。

3. 振動台の性能検証試験

3.1 試験および計測の概要

振動台の性能検証試験は、大別すると、目標性能曲線作成のための正弦波加振、および地震波再現加振、長周期応答再現加振である。

加振内容を表2～表4に示す。このうち表2の正弦波加振については、図4に示す目標性能曲線上の加振のみ示している。実際の性能検証の過程では、表2に示した以外の振動数や小振幅の加振、さらにsweep 加振なども行ったが、ここでは割愛する。尚、ここでいう目標性能曲線のうち、変位(3m)はレール長、速度(500cm/s)はコントローラの性能上の制約によるが、加速度(2000cm/s²)については、サーボモータのトルクと搭載重量などを考慮し、今回の開発目的と照らし合わせて予め想定した性能であって、必ずしも加振限界ではない。

計測にはキネメトリクス社製の地震計「ETNA」(3成分対応、最大記録加速度4G)を使用した。振動台の台車上に、地震計のX方向が加振方向と一致するよう固定の上、X方向のみを使用して行った。

3.2 正弦波加振結果

正弦波加振で計測された加速度波形を、0.26Hz(3m, 500cm/s), 0.63Hz(500cm/s, 2000 cm/s²), 1Hz, 2Hz(各 2000cm/s²)について図5に示す。図示した振動数域の加速度波形については、概ね正常に動作している様子が伺える。1Hz以上については、正弦波のピークがややつぶれてくるが、長周期ロングストローク振動台の動作としては、正常範囲とみなして良いと考える。

表2 加振内容一覧(正弦波加振) ※目標性能曲線上の加振のみ示す。

振動数(Hz)	0.1	0.2	0.26	0.54	0.63	1	2	3	5	10
入力変位(cm)	300		147	126	50	12	5.6	2	0.5	
繰返し回数	5					10	20	30	50	100

表3 加振内容一覧(地震波再現加振)

加振地震波	入力倍率
El Centro1940 NS	0.05, 0.1, 1, 2, 3, 4, 5
JMA 神戸 1995 NS	0.05, 0.1, 1, 2, 3
鷹取 1995 EW	

表4 加振内容一覧(長周期応答再現加振)

対象地震動	対象地点	対象建物の固有周期(s)
想定三の丸波	三の丸(名古屋市中区)	0.5, 1, 3*, 5
	三の丸(名古屋市中区)	
	富田(名古屋市中川区)	
	守山(名古屋市守山区)	0.5, 1, 3, 5
紀伊半島沖地震 2004	名古屋大学(名古屋市千種区)	

* 振動台の加振限界以内とするため、加振倍率を90%とした。

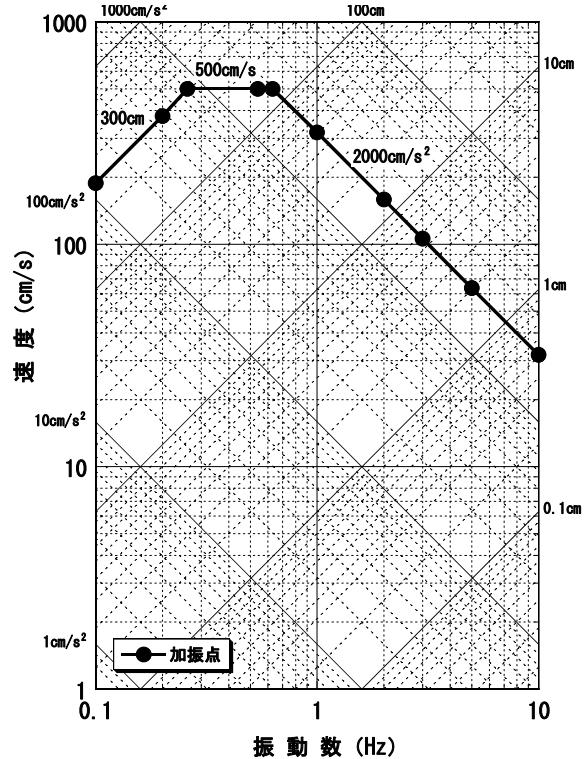


図4 正弦波加振で確認した本振動台の性能曲線

3.3 地震波形再現加振結果

本振動台の主目的は長周期応答波形の再現にあるが、振動台の基本性能を確認するため、地震波形再現加振を行った。

表3に示した加振内容のうち、エルセントロおよびJMA 神戸の波形(1倍)について、振動台への入力波形と計測された加速度波形との比較を図6に示す。入出力波形はほぼ重なっており、波形の再現性は良好である。

3.4 長周期応答再現加振結果

今回の長周期応答再現加振では、表4に示した通り、対象地点として名古屋市内各所を想定した。このように、任意の地震・場所に対する応答を随意に再現できることは、本振動台の大きな特徴の一つであり、いわば「My振動台」としての機能を果たすことが期待される。

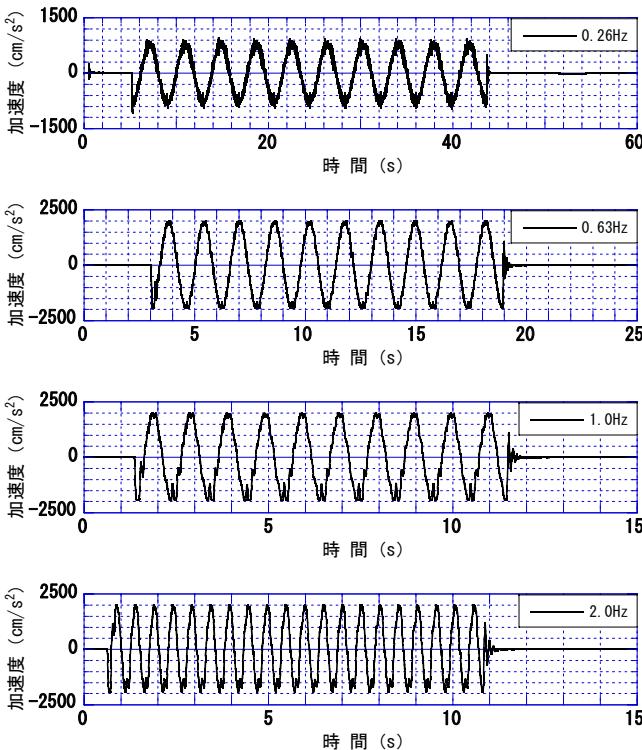


図5 正弦波加振の計測波形例(加速度波形)

※上から順に0.26Hz, 0.63Hz, 1Hz, 2Hzでの加振波形

表4に示した加振内容のうち、東海・東南海地震が連動した際の想定三の丸波^⑨の名古屋市三の丸に建つ周期3秒の建物での長周期応答について、振動台への入力波形と計測された加速度波形(最大値1174cm/s²)を積分して得られた変位波形(最大値231cm)との比較を図7に示す。応答解析時の減衰は、他の加振も含め1%とした。既往の長周期地震動の検討結果^{1),2)}より、想定三の丸波は周期3秒付近でのエネルギーが大きいことが明らかにされている。そのため今回の実験でも、周期3秒の建物では、最大変位振幅が2mを越えており、後揺れも2分余りに渡り長く続いていることがわかる。尚、入力波形と出力波形はほぼ重なっており、波形再現性は良好である。また、計測波形の最大速度は487cm/sで、今回開発した振動台の能力がフルに生かされている状況が伺える。

4.まとめ

本論文では、長周期地震動による長周期構造物の応答再現を目的として開発したロングストローク簡易振動台について、開発経緯と振動台の概要、および性能検証試験結果を述べた。

性能検証試験の結果、今回開発した振動台は、10Hz以下の周波数で最大変位±3m、最大速度500cm/s、最大加速度2000cm/s²の性能を満たし、この範囲で任意の波形を高い精度で再現できることを確認した。

本振動台は以上の様な性能を有するので、様々な地震に対し任意の場所・建物・階などを指定して建物内の揺れを再現できる。即ち、来るべき巨大地震の際に自分の家や職場がどの様に揺れるかを、いわば「My振動台」の感覚で実体験することができる。これにより、建物の所有者・居住者には地震対策の大切さを、また構造技術者には自ら設計した建物の正しい状況を、強い印象とともに伝え得るので、防災教育・啓発や技術開発に極めて有効と思われる。本振動台の特徴である、

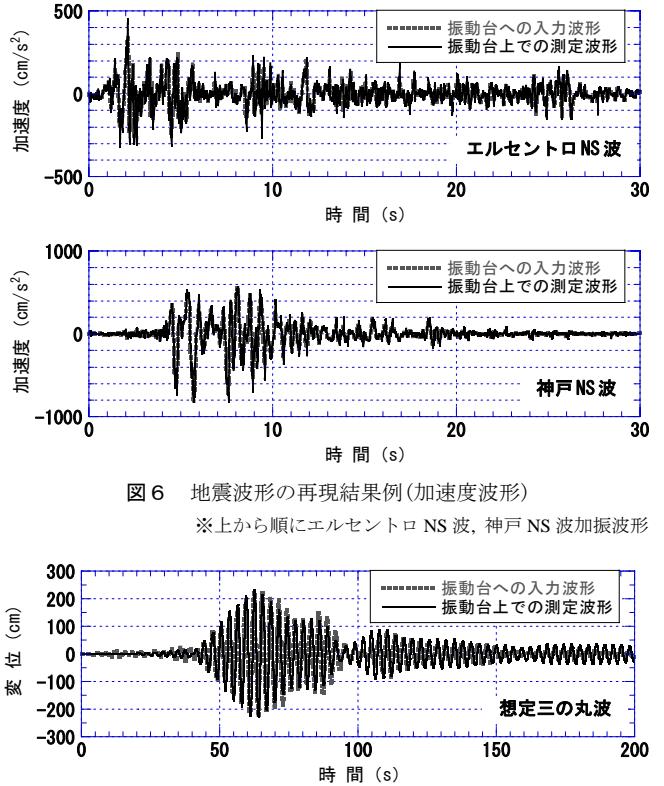


図6 地震波形の再現結果例(加速度波形)

※上から順にエルセントロ NS 波、神戸 NS 波加振波形

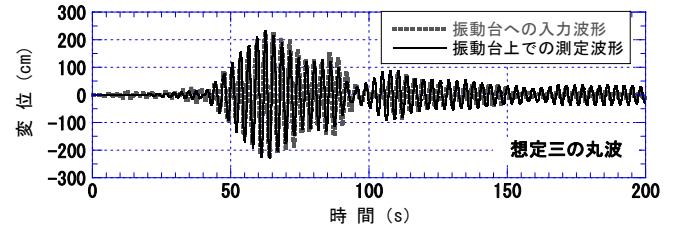


図7 長周期応答波形の再現結果例(変位波形)

広い実験室や特殊な駆動源が不要でかつコンパクトといった利点を生かし、今後様々な場面で活用を計りたいと考えている。

将来は、家具など重量物を載せた場合の検討に加え、実地震時の体感に近づけるべく水平2方向加振の可能性について探っていきたい。

謝辞

本開発の基礎となる2.1節で述べた自走式振動台は、小倉公雄氏の卓抜なアイデアによる。また性能検証試験に際し、名古屋大学工学部の平墳義正氏、卒論生の富田裕幸氏に多大な御協力を頂いた。尚、本研究の一部は、科学研究費補助金基盤研究(B)「建設時強震観測による超高層建物の振動性状解明と長周期床応答体感用自走式台車の開発」(課題番号:17360269、代表:福和伸夫)によった。以上謝意を表する。

参考文献

- 日本建築学会:巨大地震時に予想される長周期地震動とその耐震問題、日本建築学会大会(近畿)特別調査部門研究協議会資料、2005.9
- 日本建築学会:巨大地震による長周期地震動の予測と既存建築物の耐震性と今後の課題、日本建築学会大会(関東)特別調査部門研究協議会資料、2006.9
- 斎藤大樹、高橋徹、小豆畑達哉、野口和也、箕輪親宏:大振幅の揺れを再現可能とする大ストローク振動台の開発とその性能検証実験、日本建築学会大会(関東)学術講演梗概集、B-2分冊、pp.473-474、2006.9
- 鶴田廣介、倉田和己、福和伸夫、太田賢治、原徹夫:振動模型実験教材による耐震教育・防災意識啓発の試み(その2)長周期地震動の体感教材とペーパークラフト教材、日本建築学会大会(近畿)学術講演梗概集、B-2分冊、pp.549-550、2005.9
- 福和伸夫、原徹夫、小出栄治、倉田和己、鶴田庸介:建物耐震化促進のための振動実験教材の開発、地域安全学会論文集 No.7, pp.23-34, 2005.11
- 宮腰淳一、中田猛、福和伸夫、柴田昭彦、白瀬陽一、斎藤賢二:名古屋市三の丸地区における耐震改修用の基盤地震動の作成、日本地震工学会年次大会、2005.1