

## 論文

## [2140] 卓上準動的地震応答載荷装置の開発

正会員 池田尚治 (横浜国立大学建設学科)

正会員 山口隆裕 (横浜国立大学建設学科)

正会員 〇林 秀彦 (横浜国立大学大学院)

滝澤 晶 (横浜国立大学大学院)

## 1. はじめに

準動的載荷実験はオンラインハイブリッド実験、仮動的載荷実験などとも呼ばれ、構造物の地震時の応答挙動を時間スケールを伸ばした状態で生起させようとするものである[1]。現在使用されている載荷システムは、高価な電気油圧サーボ式アクチュエーターを用いたものが主であり、システム全体としても大規模なものとなっている。また、高速載荷や高サイクル疲労載荷を対象としない場合には、安価な電動サーボ式モーターを用いたシステムを用いることができる[2]。

本研究は、これまでの載荷システムに比べてはるかに安価で取り扱い易くシステム構成も単純な、小型模型部材を対象とした卓上型の準動的地震応答載荷装置の開発を目的としたものである。この装置を開発することにより、大規模な実験を行う前の予備実験や振動台実験との比較実験などを合理的に行うことができるとともに、準動的載荷実験の普及にも寄与するものと思われる。

## 2. 載荷装置の特徴

## 2. 1 ハードウェア上の特徴

本載荷装置を開発するにあたって、まず最初に載荷容量を20kgf とすることにした。これは、実験の対象とする部材を人が手軽に持ち運びできることや本研究室で自作した小型振動台との比較実験を考慮したためである。装置を小型化できれば、実験を安価に容易に数多く行うことができる反面、大きな部材を用いての実験では全く考えなくてもよかった要因、例えば、変位計の反力等が実験に大きな影響を及ぼすようになる。これらの点を踏まえて製作した載荷装置を写真-1に示す。外形のおよその寸法は高さ35cm、幅25cm、奥行き40cmであり、載荷可能ストロークは±10cmである。本載荷装置に採用した駆動方法は電動機式で、ラックピニオン機構のリニアヘッドを持つスピードコントロールモーターを持つものである。このモーターの主な特徴を示すと以下のようなになる。(1)小型・軽量で安価である。(2)サーボモーターやステッピングモーターのようにパルス信号で作動するのではなくアナログ信号で作動するのでシステムの機構はシンプルで、システム制御においても特別な電気の知識を必要としない。(3)サーボモーターやステッピングモーター

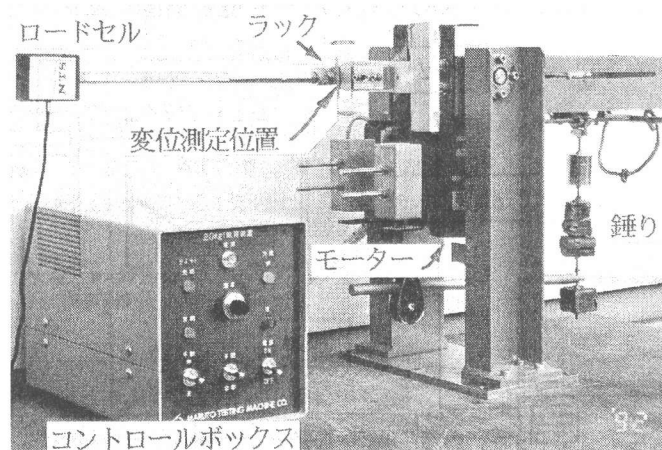


写真-1 載荷装置

を用いたシステムのようなそれ自体でモーターの回転量（変位置）を制御する機能がついていないので、プログラム上で制御する必要がある。（4）高速荷重は行えない。ここで、（3）に関しては、準動的荷重を行う場合、その制御を外部取り付けの変位計で行うことが多いので、システム制御のプログラムを構築する上においては全く問題とならない。逆に、機能が付いていない分、煩雑でないという利点もある。

治具の特徴としては、写真に示すようにラックの重さが供試体に作用しないように、ラックの支持点で釣合をとるために錘りがラックと逆方向に動くようにしたこと、また、供試体が変形し傾くにともないラックも傾き、ロードセル等に測定誤差が生じる恐れがあるのでラックの支持点と供試体との距離をできるだけ長くしたことである。変位計の取り付け位置は、変位計の反力の影響を除くためにロードセルとラックとの間とした。

## 2.2 ソフトウェア上の特徴

図-1 にシステムの構成を示す。モーターはアナログ信号で作動するので、システムはかなり簡単なものとなっている。制御プログラムを構築する上においても、特別な知識は必要でなく、ADコンバーターとDAコンバーターのサンプルプログラムを使用することにより、BASICにより組むことができる。コントロールボックスは、モーターと対となって市販されているものを少し改良したもので、モーターの回転の速さと方向を制御している。速さはコントロールボックスのダイヤルで、方向はプログラム上の電圧信号の+で設定できる。制御方法の特徴としては、前述したように、スピードコントロールモーターはそれ自身でモーターの回転量（変位置）を制御する機能が付いていないので、変位置の制御はモーターの回転始動の命令後、プログラム上で変位計の値を高サイクルで取り込み確認することにより行っている。この方法は、これまでの電気油圧サーボ式アクチュエーターや電動サーボ式モーターを使用したときの目標変位置に相当するパルスや電圧を送る方法とは異なっており、荷重速度があまり速くないこととモーターがプログラムからの信号により反応よく停止することが必要となる。ただし、プログラムの構築のし易さや単純さにおいては、本システムの方式がはるかに優れている。図-2 にシステム制御のフローチャートを示す。

準動的荷重実験を行う場合、実験の精度や実験に費やす時間は、計算により求められた応答変位と実際に荷重する変位

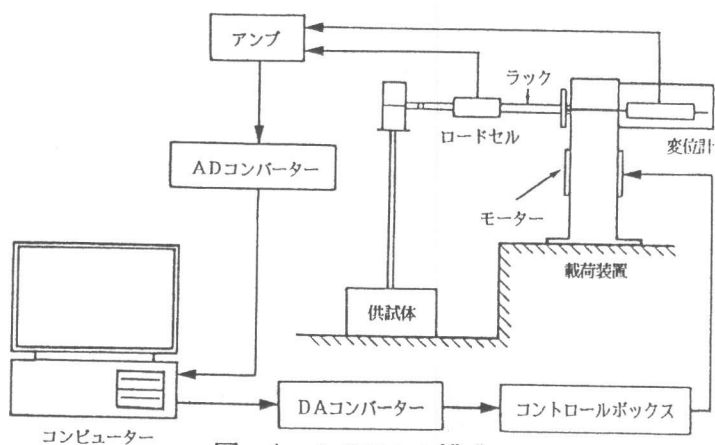


図-1 システムの構成

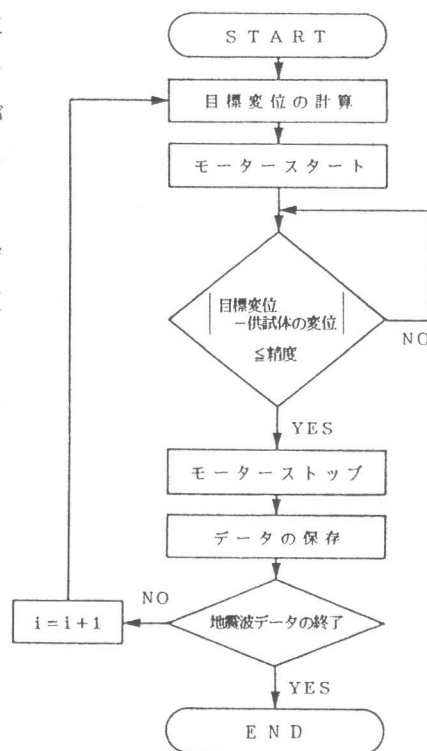


図-2 システム制御のフローチャート

の差をどの程度許容するかによっても大きく影響を受ける。本載荷システムにおいては、この許容差を変位計の精度と載荷速度とを考慮して収束が可能な範囲でできるだけ小さい値に決めることが必要である。

### 3. 載荷システムの性能と精度

#### 3. 1 静的正負載荷

開発した載荷システムの性能と精度を確認するために、図-3に示すような鋼板製の柱の上端部に錘りを載せた供試体を用いて載荷実験を行った。錘りの重さは4.57 kgf、自由振動させたときの固有周期は0.261秒であった。図-4に弾性範囲内の静的正負載荷実験より得られた荷重-変位曲線の一例を示す。6回の実験より得られた剛性の平均値は2.82 kgf/cmであった。ここで、供試体を鋼柱の質量を無視した一自由度系の部材と考えると、得られた剛性と載せている錘りの重さから固有周期を計算してみると0.256秒となり実験値とほぼ同じ値となったので、鋼板の質量の影響はほとんどないものと考えられた。図-4の拡大図に示されているように、載荷曲線と除荷曲線は重なり合っており面積を持っている。面積の幅は約20 gfであり、載荷方向が正負（押し引き）逆転するときのみに変形量がそのまま荷重のみが変化している。この原因は、ラックと供試体との接合部のヒンジの遊び、又はラックとピニオンとのバックラッシュによるものと考えられるが、程度の差こそあれ避けることのできない誤差である。一方、負側の荷重-変位曲線を見てみると、変位が12mm以上となると剛性が変化しており、精度良く載荷できる限界変位が示されている。これに対して正側は20mmの変位においてもまだ直線性が保たれている。この理由としては図-5に示されていることで説明できる。すなわち、本載荷装置では治具を供試体に抱き、その片側にヒンジを介してラックを取り付け、片側より押し引き載荷を行う方法をとっている。し

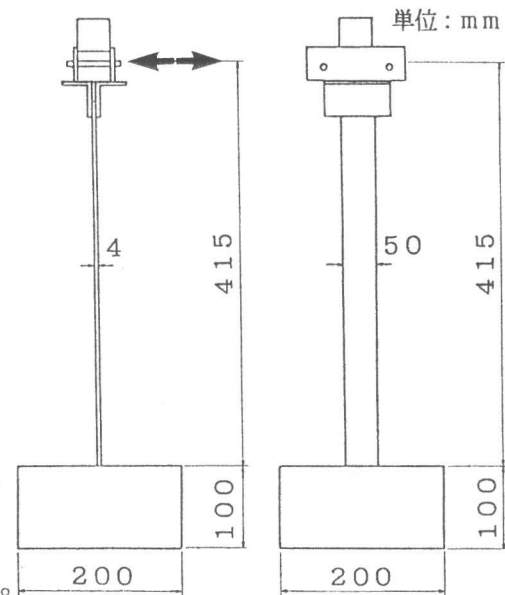


図-3 鋼柱供試体図

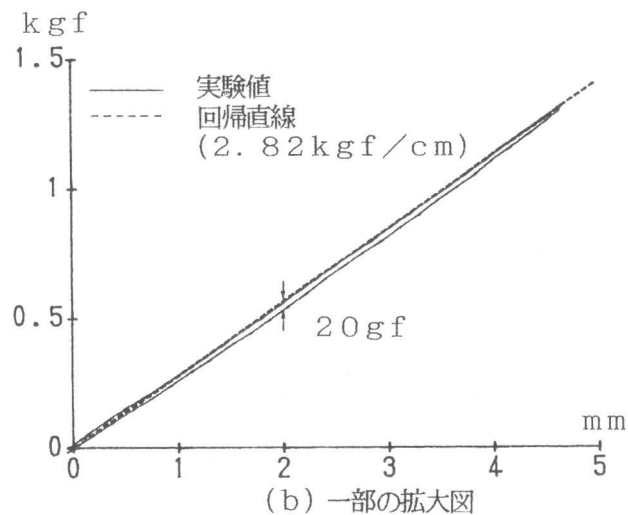
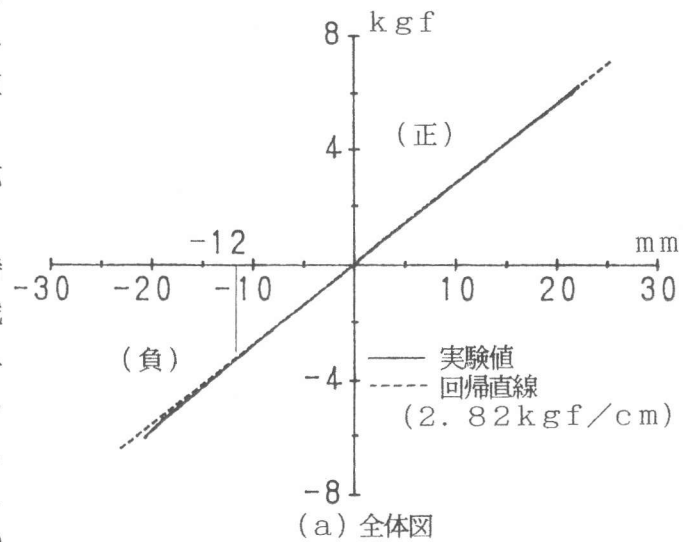


図-4 荷重-変位曲線（静的正負載荷実験）

たがって、ヒンジ部の軌跡は図に示すようなものとなり、供試体が押引で同じ量の変形をしたとしても、供試体の傾きによる影響は引張側が大きく受け、ロードセルに力の伝達がスムーズに行われなくなるからである。精度良く実験を行える範囲を正負で等しくするには、ヒンジ部を供試体の中心線に持ってくるのがこの荷方式の治具として好ましいことだと思われた。

### 3. 2 準動的荷

静的正負荷実験に用いた供試体と同じ供試体によって準動的荷実験を行った。部材の固有周期は 0.261秒、使用した地震波は供試体が弾性範囲内で応答する大きさの  $\sin$  波とし、その周期を0.30秒とした。準動的荷における時刻 ( $\Delta t=0.02$ 秒) 毎の着目点の目標変位は系の振動方程式を中央差分法によって計算し求めた。予備実験の結果より、荷速度は0.7mm/秒とし目標変位と実験変位の許容差は $\pm 0.015$ mmとした。地震波が8秒(400ステップ)の実験に要した時間は約30分であり、各時刻毎の供試体の変位と目標変位との差は正側、または負側に片寄ることなく許容差内にランダムに入った。図-6に実験より得られた復元力-応答変位曲線を示す。静的荷実験と同様、荷時と除荷時の線は重なっておらず幅を持っている。

図-7に応答変位の時刻歴曲線の実験値と計算値の比較を示す。実験が誤差なく行われた場合、計算値と等しくなるはずであるが、今回、応答周期、応答変位とも時間とともに差が大きくなっている。応答周期の差の原因は計算に用いた剛性が静的荷より得られたものであるのに対して、図-6の拡大図に示されるように準動的荷実験で得られる1ステップごとの剛性の値は一定でなく、また、それぞれの値は計算に用いた剛性とわずかであるが異なるからと考えられる。ちなみに、得られた各ステップの剛性の平均値を求めると2.92kgf/cmで、計算に用いた剛性との差は3.5%であった。得られる剛性が異なる理由は、準動的荷システム特有の実験誤差、あるいは図-4の拡大図に示されているように正負荷が1本の完全な直線で行えないことなどが考えられるが、この程度の実験誤差は避けられないと思われる。

応答変位が時間経過にともなって小さくなり計算値と大きく異なっているのは、バックラッシュ

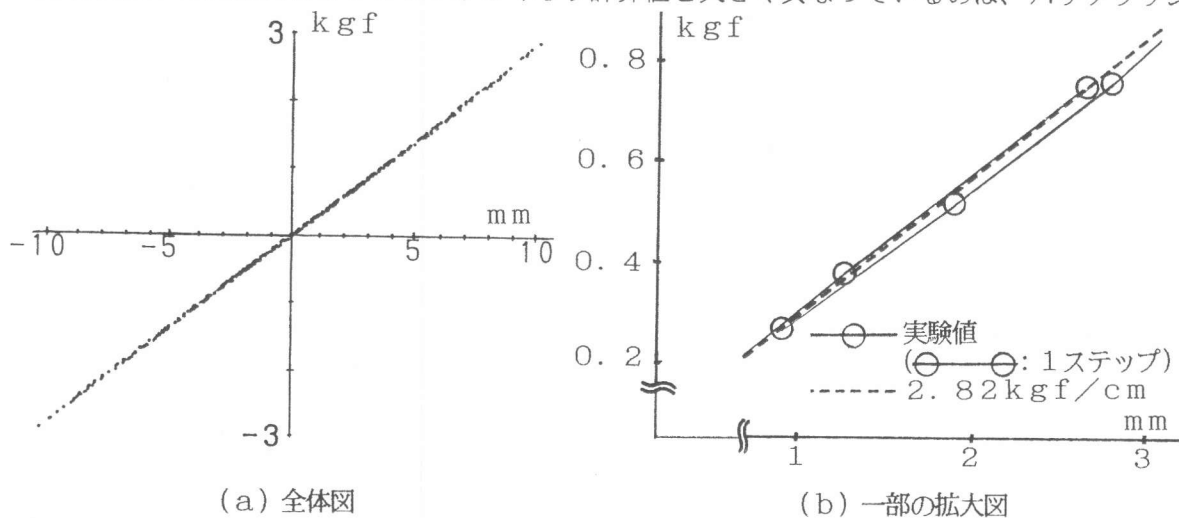


図-6 復元力-応答変位曲線

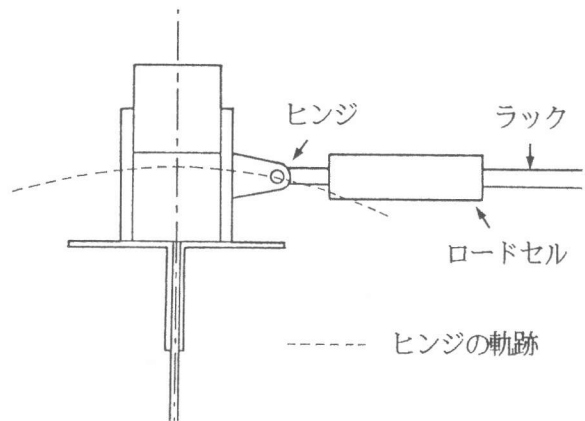


図-5 荷時のヒンジの軌跡

ュ等により復元力-応答変位曲線が面積を持つことにより、あたかも供試体が減衰しているようになるからである。以上のように、それぞれの測定誤差は小さくても、準動的載荷システムにより応答変位を求める場合には誤差が累積するので、結果として大きな誤差となつて現れている。剛性を準動的載荷実験より得られた平均値とし、載荷が正負逆転するときの復元力の変動を考慮して計算した応答変位の値と実験値の比較を図-8に示す。実験値と計算値はよく一致しており、準動的載荷システムのプログラム内でこれらの点を考慮した補正を行えば、精度良く実験を行えると思われる。以上の様に準動的載荷実験を行う場合には、載荷装置や測定機器等に生じる誤差を把握しておくことが重要である[3]。

#### 4. モルタル供試体を用いた載荷実験

引張材にアルミ棒を使用したモルタル柱供試体を用いて、実地震波による準動的載荷実験を行った。使用した地震波はEl Centro 1940(NS)であった。部材の剛性を静的載荷実験から得られた履歴曲線の原点と降伏点を結ぶ割線剛性と仮定し、部材の固有周期が0.5秒となるように1自由度系換算仮想重量を設定した。作用地震波の最大加速度の大きさは、計算上の応答変位が降伏変位の3~4倍となる50galとした。図-9に実験より得られた時刻歴応答変位曲線の一例と計算値の比較を示す。計算値(a)と(b)は、静的載荷実験より得られた荷重-変位曲線を基に履歴復元力特性をモデル化して求めたものである。計算

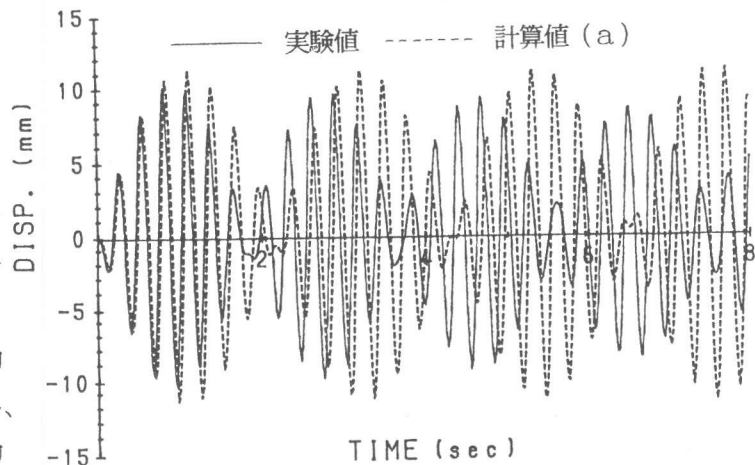


図-7 時刻歴応答変位曲線の実験値と計算値(a)の比較

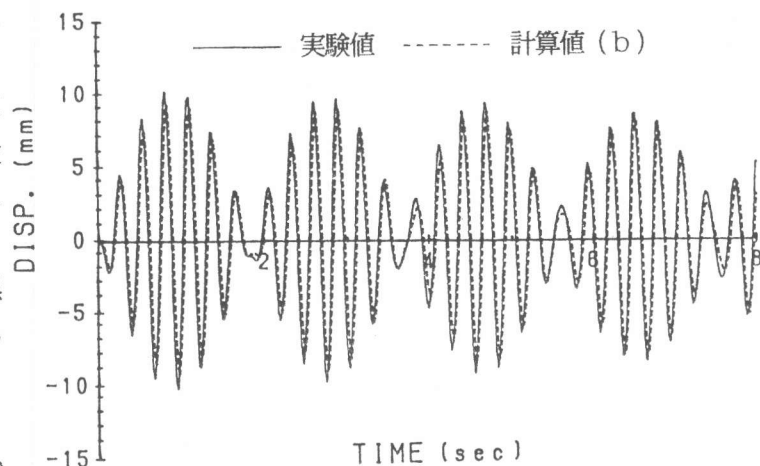


図-8 時刻歴応答変位曲線の実験値と計算値(b)の比較

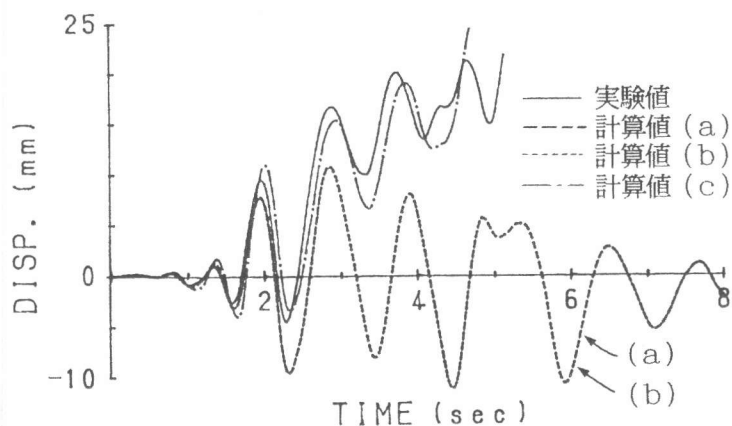


図-9 時刻歴応答変位曲線の実験結果の一例と計算値

値 (b) は 3. 2 で述べたように載荷が正負逆転するときの復元力の変化を考慮した値であるが考慮していない (a) の値と重なっており見分けがつかない。このことは、前述した載荷システム上の誤差は、剛性の変化の大きい部材を対象として実地震波を用いて実験を行った場合、実験結果にあまり影響を及ぼさないことを示している。準動的載荷実験に使用した供試体の降伏荷重値が、静的載荷実験に使用した供試体のそれより小さかったので、実験値は予想と異なり応答変位は早期に負側に片寄り変位が増加しつづけ破壊に至った。計算値 (c) は降伏荷重値などの復元力特性を準動的載荷実験の結果を基にモデル化しなおしたもので、実験値とよく対応している。以上の結果から、ここで開発した卓上準動的地震応答載荷システムは、鉄筋コンクリート柱をモデル化した供試体の実験に対しては満足する精度を持っていることが示されたものと思われる。

## 5. まとめ

本研究の結果をまとめると次の通りとなる。

1. 載荷容量20kgf の安価でシステム構成の単純な卓上型の準動的載荷装置を開発することができた。これにより、小型の模型供試体を用いて容易に準動的載荷実験が行えることとなった。
2. 鋼柱を用いた静的正負載荷実験の結果、本装置の精度とその特性とが確認された。即ち、載荷が正負逆転するときに載荷容量の約1/1000の荷重のみの変動が認められた。
3. 鋼柱を用いた実験において、静的載荷で得られた鋼柱の剛性と準動的載荷時に得られる1ステップごとの剛性には、わずかであるが差がみられた。鋼柱の弾性域のような剛性の変化がほとんどなく、地震入力を sin波のように同一周期の繰り返しで行った準動的載荷実験の時刻歴応答変位にこの影響が現れ、時間の経過と共に実験値と計算値との周期がずれてくることが認められた。
4. 前項の場合で剛性を準動的載荷実験より得られた値とし、載荷が正負逆転するときの復元力の変動を考慮して計算した応答変位の時刻歴応答変位曲線の値は応答の最終段階まで実験値とよく一致した。
5. モルタル柱のような剛性の変化の大きい部材の場合、載荷が正負逆転するときの復元力の変動を考慮して計算した応答変位の値と考慮していない値とではほとんど差が生じなかった。したがって、剛性の変化の大きい部材を対象とした実地震波による準動的載荷実験においては、本載荷システムに含まれる誤差が結果に及ぼす影響はほとんどないものと考えられる。

## 謝辞

本研究を実施するに当たり、卒論生の武村浩志君および宮武岳君に参加協力を得た。また、本研究の開始に当っては、日本大学の山崎淳教授に御助言を賜った。ここに、感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) 伯野元彦、他：ハイブリッド実験の応用マニュアル、平成元年度文部省科学研究費（総合研究（A））研究成果報告書、1990.3
- 2) 渡部丹ほか：電動機式アクチュエータを用いたオンライン載荷システム、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.13、No.2、pp.595~600、1991
- 3) 石丸辰治ほか：オンラインシステムによる擬似動的実験の誤差評価に関する研究—その1～その5—、日本建築学会大会学術講演梗概集（東海）、pp.189~198、1985