

大学院教育におけるRC部材の地震応答ハイブリッド実験の試み

武蔵工大工学部 皆川 勝
 武蔵工大工学部 小玉克己
 武蔵工大工学部 仲宗根茂
 武蔵工大工学部 佐藤安雄

1. 序論

大学院においては各専攻学科目に別れるため、ややもすると専攻学科目以外の講義に対して無関心となりがちである。また、コンピュータを用いたシミュレーションの世界を大学院に進学することによって体験すると、コンピュータを用いることが高等であるかのような錯覚に陥りやすく、実験を軽んじる傾向が否定できない。ハイブリッド実験は、まさに実験的手法と解析的手法をハイブリッドした地震応答解析手法として耐震の分野では定着した手法である。これの一連のプロセスを体験することによって、実験と数値解析との関連性、実験を実施するときに検討すべき事柄、数値解析を実施する場合に留意すべき事柄など、多くのことを学ぶことができる。また、地震応答解析法の基礎、計算機による試験機の制御技術、計算機によるデータ採取の自動化などの基礎的な技術を習得することができる。さらに、単なる部材試験を実施する場合とは異なり、学部教育で学んだ構造力学、鉄筋コンクリート工学、振動工学、耐震工学などの基礎的事項を復習することができる。

本論文では、計算機及び実験装置を有効に活用する大学院におけるコンクリート教育の試みとして、RC部材の地震応答ハイブリッド実験を実施した結果を報告する。第1著者は構造工学を専門としており、科目担当教員である。第2著者は、大学におけるコンクリート教育に長年携わってきた経験から、主として実験実施における種々の助言等を通じてこの教育に参画している。第3著者は、本大学構造実験棟において主として研究利用における学生指導に携わっており、その経験を生かして、円滑に実験を実施するための学生の指導補助を担当している。第4著者は、技術職員として科目担当教員を補っている。

2. ハイブリッド実験の概要

ハイブリッド実験システム概念を図-1に示す。システムは、解析部と実験部を持ち、これらはオンラインで結ばれている。

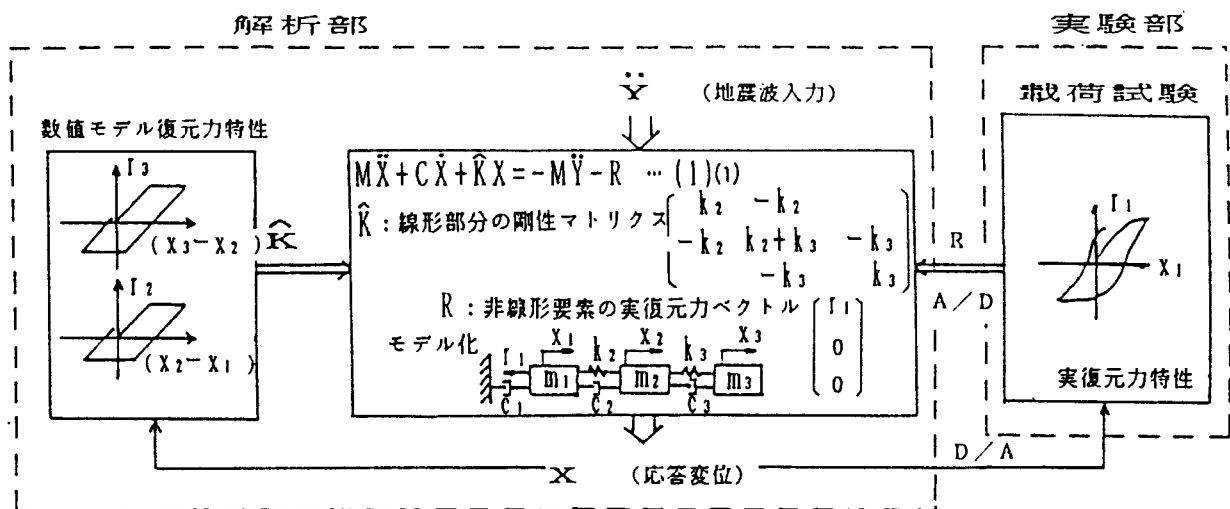


図-1 ハイブリッド実験の概念

例えば、3層ラーメンのような場合には3自由度系のバネ質点系にモデル化することが可能である。第1層の復元力特性が強い非線形性を示し、数値モデルによって表現し得ない場合、応答変位 X_1 に対応する実復元力 r_1 が載荷試験により直接測定され、これが計算機内にオンラインで取り込まれて実復元力ベクトル R が構成される。一方、残る部分構造の復元力と変位の関係は数値モデルで表現し、剛性行列 K が作成される。これらを用いて、図-1内の式(1)を解くことにより、次ステップの応答を求めることができる。なお、本研究では簡単のために、数値モデルにより表される部分構造系の復元力-変位関係は線形であると仮定している。

システム構成を図-2に示す。実験手順としては、はじめに、載荷試験から部材の初期剛性を測定する。これを用いて第1ステップの応答をパソコンを用いた数値計算により求める。求められた応答変位値をD/Aコンバータによりアナログ値に変換して試験機制御回路に出力し、応答変位に対応した変位を試験体に生じさせる。この変位に応じて試験体に発生する復元力をロードセルによって検出し、アンプ・A/Dコンバータを介して、計算機に取り込む。また、その他に各部のひずみ、変位など測定がある場合にはパソコンによりこれを自動計測する。実復元力を用いて次のステップの応答を計算する。これを1回のループとして解析・載荷・測定が繰り返される。本システムでは、ハイブリッド実験における標準的な時間積分である中央

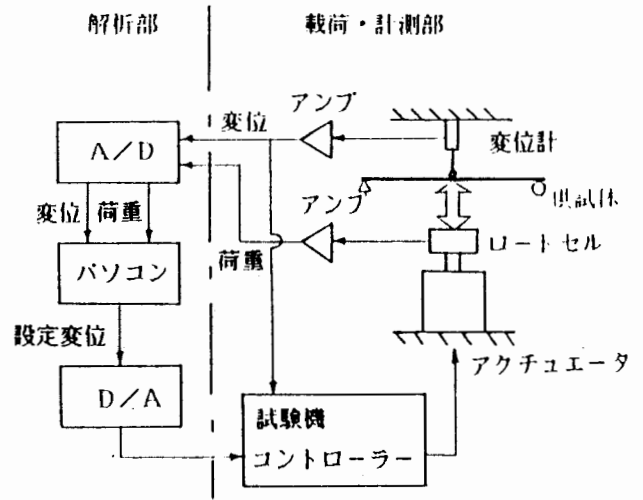


図-2 システムの構成

差分法と、通常の動的応答解析において精度がよく多用されているNewmarkの β 法 ($\beta=1/4$; 定加速度法)のどちらかを選択して用いることとした。図-3に、中央差分法及びNewmarkの β 法をサブストラクチャー・ハイブリッド実験における時間積分法に用いる場合の基礎式を示す。

| | |
|---|---|
| $\left(\frac{1}{\beta(\Delta t)^2} M + \frac{1}{2\beta \cdot \Delta t} C + K \right) X_{1+1} = -M \ddot{Y}_{1+1} + M a_1 + C b_1 - R_{1+1}$ $a_1 = \left(\frac{1}{2\beta} - 1 \right) \ddot{X}_1 + \frac{1}{\beta \cdot \Delta t} \dot{X}_1 + \frac{1}{\beta(\Delta t)^2} X_1$ $b_1 = \Delta t \left(\frac{1}{4\beta} - 1 \right) \ddot{X}_1 + \left(\frac{1}{2\beta} - 1 \right) \dot{X}_1 + \frac{1}{2\beta \cdot \Delta t} X_1$ $\ddot{X}_{1+1} = \frac{1}{\beta(\Delta t)^2} (X_{1+1} - X_1) - \frac{1}{\beta \cdot \Delta t} \dot{X}_1 - \left(\frac{1}{2\beta} - 1 \right) \ddot{X}_1$ $\dot{X}_{1+1} = \frac{1}{2\beta \cdot \Delta t} (X_{1+1} - X_1) + \left(1 - \frac{1}{2\beta} \right) \dot{X}_1 + \Delta t \left(1 - \frac{1}{4\beta} \right) \ddot{X}_1$ <p>(a) Newmarkのβ法 . . . 式(2)</p> | $\left(\frac{1}{(\Delta t)^2} M + \frac{1}{2 \cdot \Delta t} C \right) X_{1+1} = -M \ddot{Y}_1 - (K - \frac{2}{(\Delta t)^2} M) X_1 - \left(\frac{1}{(\Delta t)^2} M - \frac{1}{2 \cdot \Delta t} C \right) X_{1-1} - R_1$ <p>ただし $\Delta t \leq 2 / \omega_{max}$</p> $\ddot{X}_1 = \frac{X_{1+1} - 2X_1 + X_{1-1}}{(\Delta t)^2}$ $\dot{X}_1 = \frac{X_{1+1} - X_{1-1}}{2 \cdot \Delta t}$ <p>(b) 中央差分法 . . . 式(3)</p> |
|---|---|

図-3 時間積分

3. 実施した授業の概要

本実験は、武蔵工業大学大学院において、構造システム実験特別演習として開講されている科目の一環として実施された。

対象とした構造物は、図-4に示す2層1スパンの鉄筋コンクリートラーメン構造である。このような構造物は図-5に示すように、2自由度バネ質点系にモデル化することができる。

この構造物の一層部の柱が曲げ破壊する問題を対象とする。したがって、この部分の破壊に至る強度変形特性(いわゆる復元力特性)はラーメン構造の挙動全体に影響を与える。逆に、全体構造の形式が柱の崩壊様式に影響を与える。そこで、この柱部材の地震時の変形モードを実験室において再現し、そのときの復元力

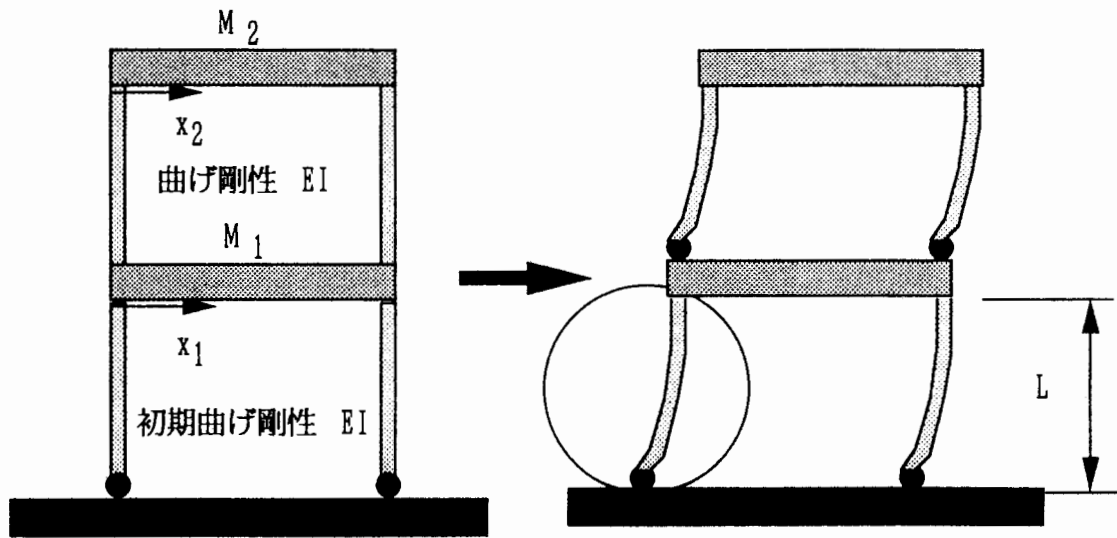


図-4 解析対象

をオンラインで応答解析に取り込む。ここで、軸力による復元力特性への影響を無視すれば、図-6に示すような単純梁試験体を用いてこの復元力を求めることができる。ただし、2層部の柱、梁、並びに梁と柱の接合部は線形弾性的な挙動をすると仮定する。このように仮定すると、このラーメンの地震時の応答は、図-3に示した式により解析的に求めることができる。

図-7及び図-8に大学院学生によって行なわれた実験結果の一例を示す。図-7は、地震波の最大加速度を徐々に大きくした場合の、1層部の復元力と変位応答の関係を示している。また、図-8は、図-7(3)の実験における入力加速度、一層部の応答加速度、応答速度、応答変位、実際に生じた変位、復元力の時刻歴である。変位及び復元力はすべてオンラインでA/D変換器を用いて自動採取される。実験実施中は、ここで示したような実験解析結果は計算機のディスプレイに表示されるため、学生は試験体が劣化する様子を観察しながら同時に復元力特性の変化する様子をモニターすることができる。

この実験を通じて、学生は試験機、試験体、測定器などのセットアップ、応答計算のためのコンピュータシミュレーションプログラムの各種設定及び実行、データの自動取り込み、結果の図化及び保管、などの種々の操作を、教職員の指導のもとに実施する。実験終了後は、採取したデータを並びに応答値などの解析値をフロッピーディスクを媒体として各自持ち帰り、レポートの課題に取り組むことになる。レポートの内容は、非線形復元力特性を何らかの形でモデル化して数値解析により非線形応答を求め、図-7あるいは図-8に示したような応答時刻歴が、実験結果とどの程度異なるかを調べるものである。

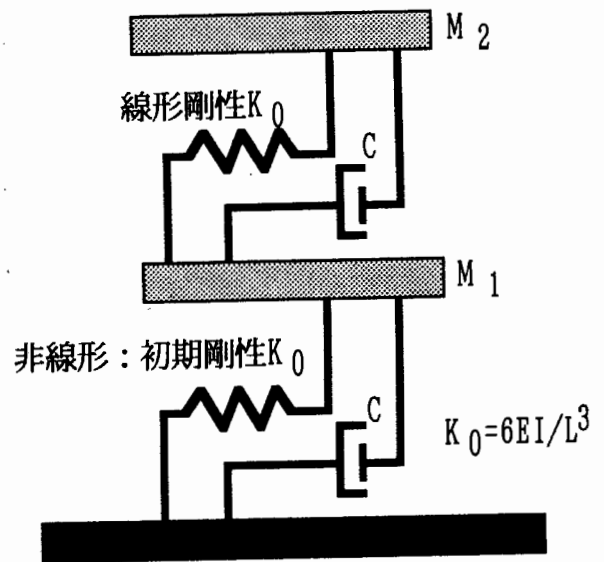


図-5 バネ質点系

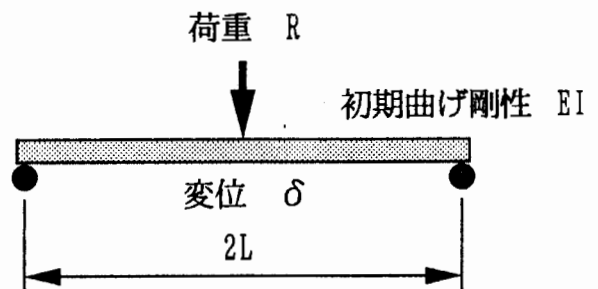


図-6 試験体

4. 授業の意義

本実験解析を実施する意義としては以下のような項目を挙げる事ができる。

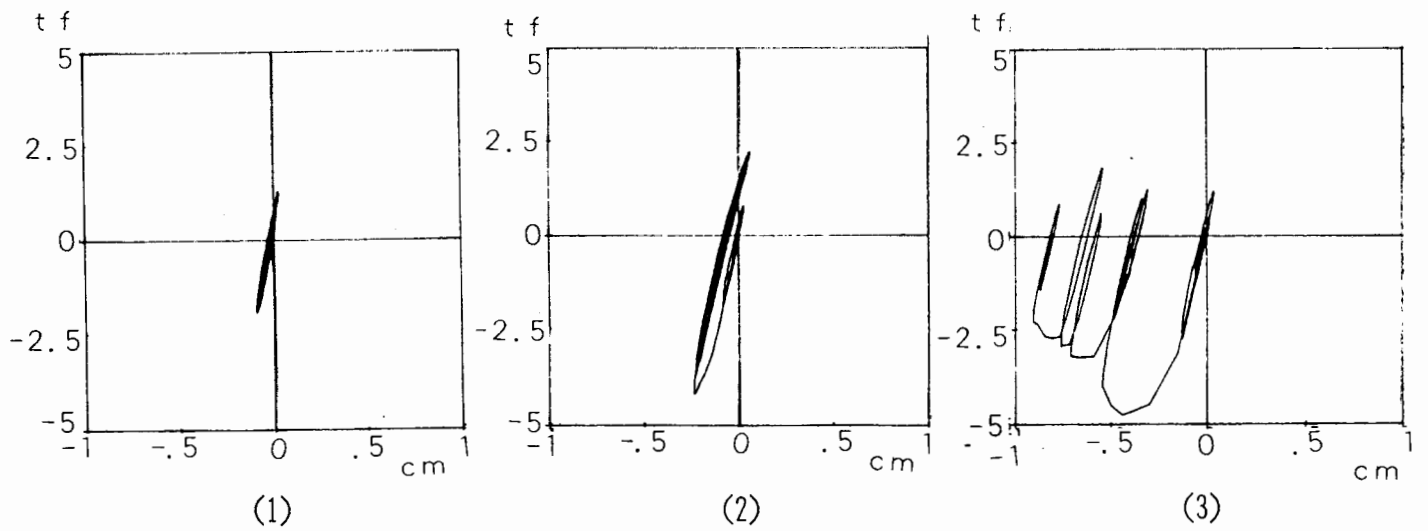


図-7 復元力特性の例

まずはじめに、構造物の挙動を予測するための手法として、実験的手法と数値解析的手法があること、それらがが補間関係にあることを学ぶ意義は大きい。近年、実験的な研究を嫌う傾向が見られ、また、コンクリートといえば現場においては、"3K"のひとつであり、必ずしも洗練されたとは言えないようなイメージを持っている学生が多い。大学院の場合その傾向はさらに顕著に見られる。そのような学生を相手に、このような実験を実施することにより、実験ならびに数値解析を一連の流れとして体験させることは、意識変革のためにも有効な手段であろう。また、ハイブリッド実験特有の計算機の使い方、オンラインデータ採取などを体験し、計算機を用いることの便利さを実感できることも有意義である。

また、対象をRC部材としていることから、RC部材の破壊に至る基本的性状を観察したり、それが構造物全体に与える影響も併せて学ぶことができる他、構造力学、鉄筋コンクリート工学、振動工学、耐震工学、などの基礎科目を広範にわたって学ぶことができることも大きな意義であろう。

5. おわりに

本試みは、ようやく2年目を終えたところであり、いまだ多くの改良の余地があり、今後さらに方法論を煮つめてゆくことが必要であろう。しかし、専門を異にする教職員の共同作業により、このような教育を実施することは、ややもすると独善に陥りやすい大学あるいは大学院教育のひとつの在り方としても、このような教育の意義は大きいと考える。魅力あるコンクリート教育のひとつとして、計算機を必要不可欠な道具として含み、更に実験を伴うハイブリッド実験手法を用いた教育を、今後も進めてゆきたいと考えている。

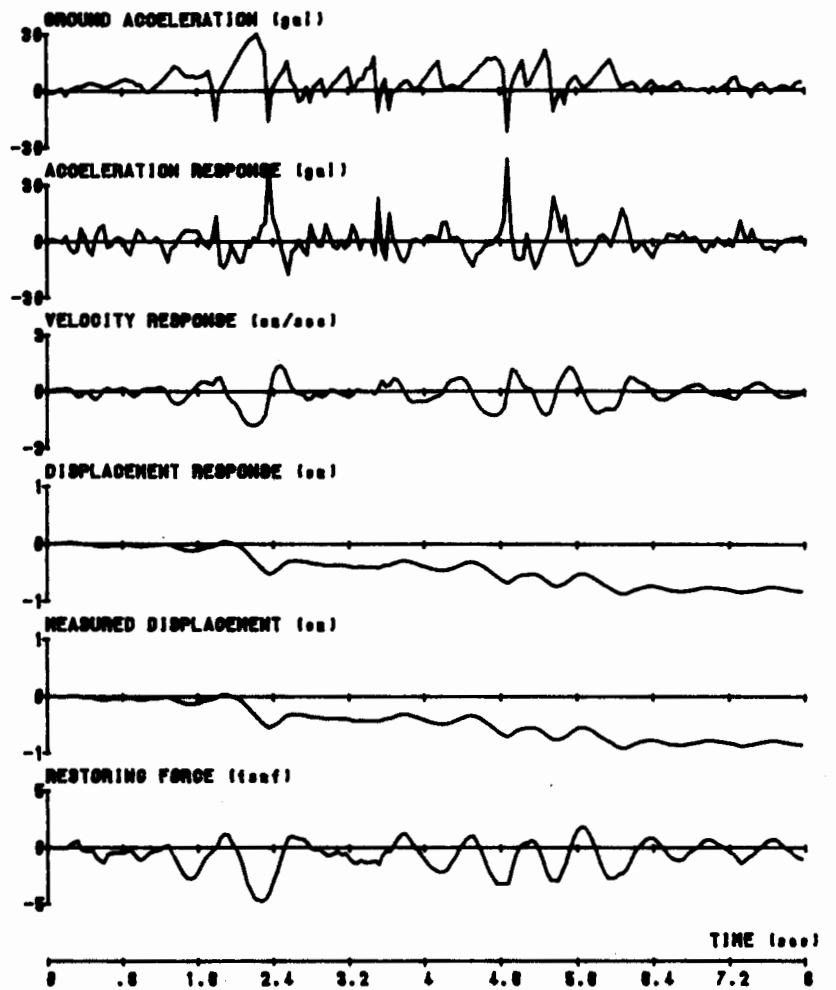


図-8 応答時刻歴の例