

京都大学工学研究科 学生員 ○ 仲谷 俊昭
 京都大学工学研究科 正会員 五十嵐 晃
 京都大学工学研究科 フェロー 家村 浩和

1 概要 本研究は、構造要素の載荷実験または振動台実験及びコンピュータによる構造全体系の数値応答解析を実時間で連動して実行する実時間ハイブリッド実験手法に基づく実験システムの構築を行うことを目的として、従来よりも要求計算量の大きな非線形多自由度モデルの応答解析の実時間処理を可能にする制御ソフトウェア及び制御プログラムを構築したものである。また、DSP 上で構築したシステムにおいて、応答計算部分の構造物モデルに適用が可能なモデルの複雑度及び自由度数の限界について調査した。さらに、構築したシステムに非線形多自由度モデルとして構造物-杭基礎-地盤系を適用した実時間地震応答シミュレータの開発を行い、非線形杭基礎構造物を適用したサブストラクチャーハイブリッド振動台実験が可能であることを示した。

2 実時間ハイブリッド実験手法と応答シミュレータ
 実時間ハイブリッド実験手法は構造物の一部を取り出した供試体を用いて、アクチュエーターによる載荷実験または振動台による加振実験を行い、同時に残りの部分の応答計算を実験部分の計測データを取り込んでコンピュータで行うことにより、実時間で構造物全体の応答を求める実験手法である。本研究で開発する実時間応答シミュレータの役割を図1に示す。実時間ハイブリッド実験において必要となる計算部分の応答計算を、種々の非線形多自由度モデルに対して行い、制御信号を実時間で送る機能を担うシステムと位置付けられる。実時間応答シミュレータの開発は、PC と DSP とを組み合わせたシステムを用いて行った。DSP の高速演算とリアルタイムスケジューリングの機能を利用して、実時間シミュレーションを実現する。

3 動作プログラミングの考え方 本システムのコーディングにあたっては、DSP 上で実行される載荷実験装置の制御プログラムと、ホストコンピュータで実行される DSP 制御プログラムの2つの異なる

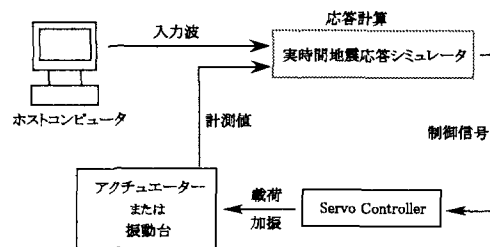


図1 実時間地震応答シミュレータ

プログラムが必要となる。本研究では、ホスト側アプリケーションを Visual Basic、DSP 側プログラムを C 言語により作成することで、複雑な非線形多自由度モデルの実時間処理を可能にする汎用的なシステムの構築を行った。DSP 側プログラムにおいて、関数 main() は割り込みの設定や使用するハードウェアの初期化を請け負い、応答計算プログラムは割り込み関数の中に記述する。割り込み関数は設定された周期ごとにより呼び出されるが、ここで応答計算は設定した割り込み間隔内に処理されなければならない、DSP の計算処理能力の問題が生じてくる。

```
#include <stdlib.h>
#include "haron.h"
#include "io_ad.h"

/* DSPライブラリヘッダファイル */
/* I/O AD-DA用ヘッダファイル */

IOAD *io_ad;
IOAD *io_da;
volatile int data;
volatile int ad;
float volt;

/* convert from offset binary representation to voltage one V */
float convert_io_volt(volatile int ad)
{
    return ((float)ad*3.051804379e-4);
}

void c_int02()
{
    int i;

    for(i = 0; i < 4; i++)
    {
        data = adGet(io_ad, CONV_0);
        volt = convert_io_volt(data);
        daPut(io_da, i, data);
    }
}

void main()
{
    MODULE *md;

    if NULL == (md = init_board())
        exit(ERROR);

    if NULL == (io_ad = ad128Set(md, 1, INT_2, c_int02))
        exit(ERROR);
    if NULL == (io_da = da164Set(md, 1))
        exit(ERROR);

    if OK != check_set(1000.0, TIMER_0)
        exit(ERROR);

    trg_enable(TRG0, T_TCLK0);

    while(1);
}
```

図2 DSP 側プログラム例

4 実時間シミュレータの実現と性能限界 開発したシステムにおいて、Operator Splitting 法に基づくハイブリッド実験アルゴリズムに従い、計算部分の応答を用いて実験部分の応答を計算し、求めた実験部分の絶対加速度を計算部分の応答計算にフィードバックした。図3のように、計算部分に非線形多自由度モデルを適用し、DSPを用いた実時間シミュレーションと、構築したシステムの妥当性の検証計算を行った。計算部分の運動方程式は次のようになる。 $[M]_c[C]$ はそれぞれ質量・減衰マトリクス、 $\{Q^t\}$ は復元力ベクトル、 $\{F_e^t\}$ は実験部分からの反力ベクトルである。

$$[M]_c\{\ddot{x}\} + [C]_c\{\dot{x}\} + \{Q^t\} = -[M]_c\{1\}\ddot{x}_g - \{F_e^t\} \quad (1)$$

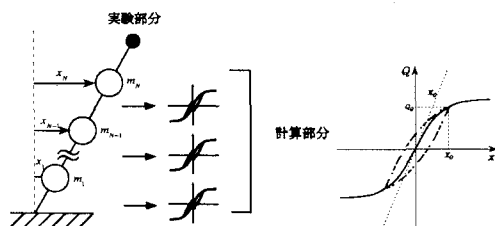


図3 非線形多自由度モデルと双曲線モデル

次に、実時間シミュレーションにおいて応答計算部分の構造物モデルに適用が可能なモデルの自由度数の限界について調査したところ、応答計算及び制御の速度を1kHzで行った場合、線形・非線形モデルともに11自由度、また100Hzでは、20自由度以上の計算処理が可能であった。

5 杭基礎構造物モデルの地震応答シミュレータの開発

実験対象として杭基礎構造物を選定し、計算部分に下部構造—杭基礎—地盤系を、実験部分に免震支承と上部構造を適用した実時間地震応答シミュレータの開発を行った。解析モデルの全体系を構造物—杭基礎系と地盤系に分離し、まず自由地盤の地震応答解析を行い、次にこの応答波形を構造物と杭基礎の一体モデルに入力して最終的な地震応答を求める二段階解法の手続きをとった。自由地盤の地震応答解析は質点間隔1mの多質点系せん断ばねモデルとし、地盤の動的変形特性には修正 Ramberg-Osgood モデルを適用し、TDAP IIIを用いて行った。復元力特性としては地盤と杭体の相互作用を表す相互作用ばねに双曲線モデル、免震支承にバイリニアモデルを適用した。杭基礎構造物を多質点系モデルでモデル化し、複数の杭を1本の杭に集約した。またDSPの計算処理能

力限界を考慮して質点数を8とした。MATLABによる応答計算と実時間での実験シミュレーションを比較したところほぼ一致しており、杭基礎構造物を適用したサブストラクチャーハイブリッド振動台実験を行うことが可能なシステムを構築することができたと言える。

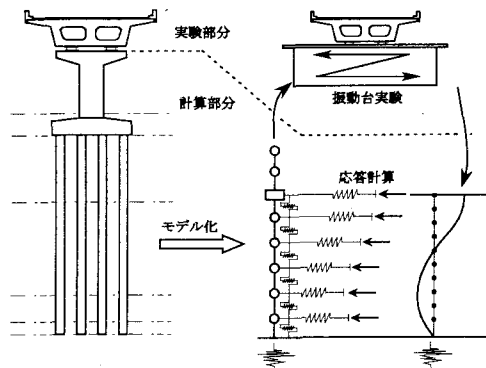


図4 シミュレーション対象

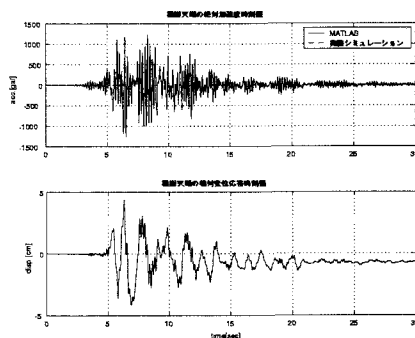


図5 シミュレーション結果

6 結論 本研究では、従来よりも要求計算量の大きく、複雑な非線形多自由度モデルを適用した実時間ハイブリッド実験を可能にする、汎用性のあるシステムの構築を行い、応答計算及び制御信号出力を1kHzで行う場合、11自由度までの実時間処理が可能であることを明らかにした。また、非線形多自由度モデルとして構造物—杭基礎—地盤系を適用したサブストラクチャーハイブリッド振動台実験シミュレーションを行った結果から、非線形杭基礎構造物について実時間での振動台実験が可能であることがわかった。

参考文献

- [1] 五十嵐晃・家村浩和・田中創、サブストラクチャーハイブリッド振動台実験システムの開発と振動制御デバイスの性能検証実験への適用、構造工学論文集 Vol.1.49A, pp.281-288, 2003