計算負荷がリアルタイムハイブリッド実験精度に与える影響に関する考察

京都大学　学生会員　○津田葉　涼太
京都大学　正会員　植村　佳大
京都大学　正会員　高橋　良和

1．研究背景・目的

大型構造物を対象とした実大実験による性能評価は，実験施設の制約などの観点から困難である．また，数値解析においても，構造部材が持つ複雑な材料非線形特性などを高精度に再現することは困難であると言える．その中で，載荷実験と数値解析を同期させて同時に行うリアルタイムハイブリッド実験(以下，RTHS と呼ぶ)が性能評価手法として有効であると言える．しかし，RTHS においても，実時間性の観点から計算時間の制約が存在し，数値解析規模の大規模化によって試験精度が著しく低下することが懸念される．そこで本研究では，数値解析の計算負荷が，RTHS の試験精度の評価に与える影響について理論的に考察する．

2．検討概要

(1)RTHS システム

RTHS は，解析部分，リアルタイムシミュレータ，実験部分から構成される(**図-1**)．解析部分では，数値解析ソフトウェアには OpenSees を用い，解析部分とリアルタイムシミュレータを連動させるミドルウェアとして OpenFresco[1)]を用いた．実験部分では，実験による計測誤差などの影響を排除するため，実験部分は目標変位に定数を乗じて復元力となるよう，理想的な線形部材を仮定した．またリアルタイムシミュレータでは，動的な試験機制御を行うための変位指令値計算を行っている(**図-2**)．変位指令値計算には，2 次ラグランジュ多項式，3 次ラグランジュ多項式，速度を加味した多項式近似 (以下それぞれ，D2，D3，DV と呼ぶ)を用いた．

(2)変位指令値計算

外挿関数 $dsp_p(x)$および内挿関数 $dsp_c(x)$は，以下のように表される．

$$dsp_p(x) = \sum_{k=-n}^{0} f_k P_{n,k}(x) \quad (1)$$

$$dsp_c(x) = \sum_{k=-n+1,k\neq 0}^{1} f_k C_{n,k}(x,x_p) + f_{x_0} C_{n,x_p}(x,x_p) \quad (2)$$

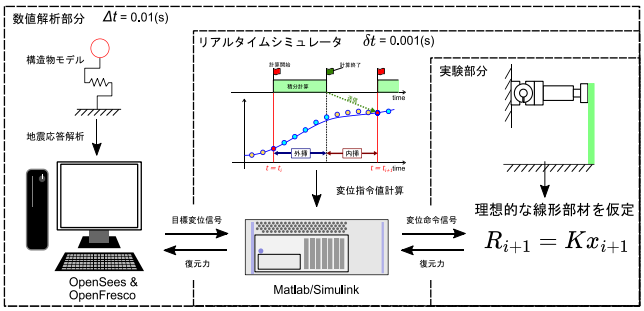

図-1　RTHS の概略図

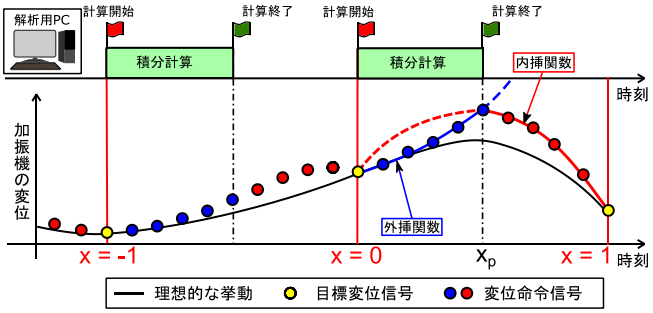

図-2 変位指令値計算

ここで，x は数値積分時間刻みに対する経過時間の割合 (図-2) であり，f_k は直前 k ステップの数値積分計算によって得られた変位である．D2(n=2)の場合，式(1)中の P および式(2)中の C は以下のように表される．

$$P_{2,0} = \frac{1}{2}(x+1)(x+2), P_{2,-1} = -x(x+2), P_{2,-2} = \frac{1}{2}x(x+1) \quad (3)$$

$$C_{2,1} = \frac{1}{2}x(x+1), C_{2,x_p} = -(x-1)(x+1), C_{2,-1} = \frac{1}{2}x(x-1) \quad (4)$$

(3)速度の誤差評価

過去の著者らの検討 [2)]では，計算負荷を時間遅延(スリープ時間(**図-3**))で模擬することで RTHS を行い，計算負荷が大きい場合，速度の精度に影響を及ぼすこと示した．この影響は，速度依存性を有する部材を用いた場合に，その応答性状に影響すると考えられる．特に，目標変位信号に到達した時点(以下，計算点と呼ぶ)での応答値は，次の目標値の計算に使用されるため，より詳細な検討が必要であると言える．そこで本研究では，正弦波応答を仮定し，計算点での速度について理論的に精

キーワード　リアルタイムハイブリッド実験，計算負荷，誤差評価，振幅誤差
連絡先　〒615-8540 京都府京都市西京区京都大学桂 C1-2-139 TEL 075-383-3246

© Japan Society of Civil Engineers

度評価を行った．f_kについて，振幅 A および固有振動数 ω として以下のように表す．

$$f_k = Asin(\omega t - \omega \Delta t(x-k)) \quad (5)$$

この時，計算点での速度は，以下のように表される．

$$v = \frac{dsp_c(1,x_p) - dsp_c(x,x_p)}{\delta t} = \frac{AR_d}{\delta t} sin(\omega t + \phi) \quad (6)$$

ここで，振幅誤差 R_d および位相ずれ ϕ は，以下のように表される．

$$R_d = \sqrt{C_s^2 + C_c^2} \quad , \quad \phi = tan^{-1}\left(\frac{C_c}{C_s}\right) \quad (7)$$

$$C_s = C_{cs} sin\omega\delta t - C_{cc} cos\omega\delta t \quad (8)$$

$$C_c = C_{cs} cos\omega\delta t + C_{cc} sin\omega\delta t - 1 \quad (9)$$

$$C_{cs} = \sum_{\substack{k=-n+1 \\ k\neq 0}}^{1} cos(\omega\Delta t(x-k)) C_{n,k}(x,x_p) + C_{n,x_p}(x,x_p) \sum_{k=-m}^{0} cos\left(\omega\Delta t(x_p-k)\right) P_{m,k}(x_p) \quad (10)$$

$$C_{cc} = -\sum_{\substack{k=-n+1 \\ k\neq 0}}^{1} sin(\omega\Delta t(x-k)) C_{n,k}(x,x_p) - C_{n,x_p}(x,x_p) \sum_{k=-m}^{0} sin\left(\omega\Delta t(x_p-k)\right) P_{m,k}(x_p) \quad (11)$$

(4)RTHS の試験条件

試験状況を単純化するため，解析手法は弾性一自由度系のばねマスモデルに自由振動を与える手法とした．数値積分の時間刻み Δt は 0.01(s)とし，変位命令信号の生成間隔 δt は 0.001(s)とした．解析の初期条件は，変位 1(mm), 速度 0(mm/s)とした．スリープ時間(**図-3**)は 0(ms), 4(ms)，7(ms)の 3 ケースとした．また，時間刻みと固有周期の比 Δt/T をパラメータとして RTHS を実施した．

3．誤差評価および考察

図-5 に，計算点における速度の振幅誤差について示す．なお，式(6)中の R_d を実線(理論値)，RTHS を行った時の速度の振幅誤差(実験値)を点で示している．図より，スリープ時間 7(ms)の時，D2 の $\Delta t/T$=0.05 および D3 の $\Delta t/T$=0.05 の場合において，速度の振幅誤差が 1 を大きく下回る値を示した．DV を用いた場合では $\Delta t/T$=0.10 の場合でも振幅誤差が 1.01 であった．しかし，$\Delta t/T$>0.15 では振幅誤差が 1 から大きく離れた値を示しているため，速度の精度が保証されないと言える．

以上より，計算点における速度の観点から，速度を加味した多項式近似による変位指令値計算が最も優れていることが示された．

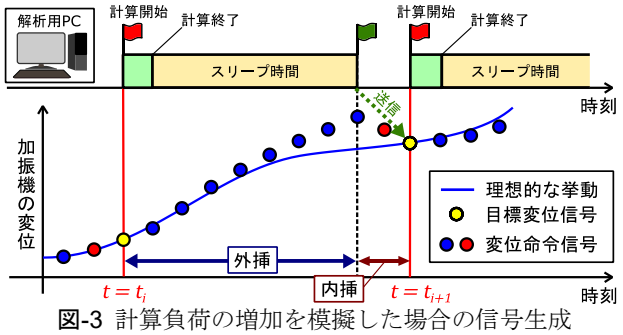

図-3 計算負荷の増加を模擬した場合の信号生成

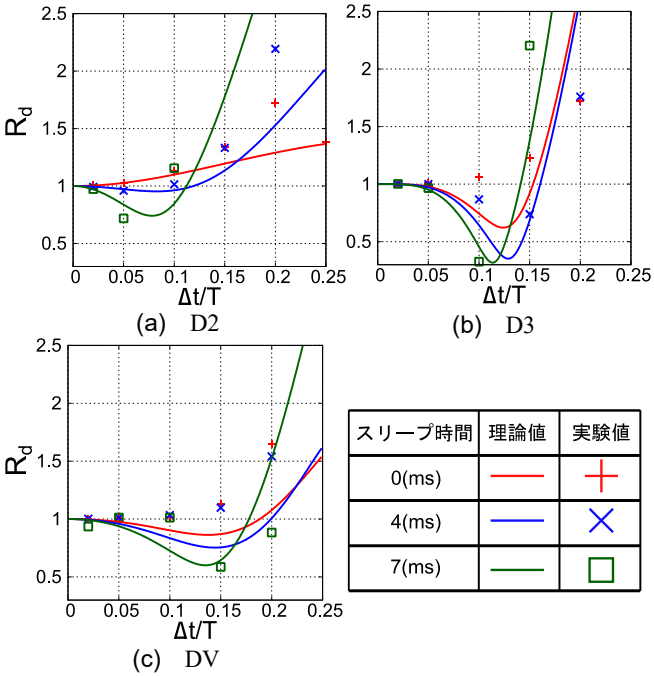

図-4 計算点における速度の誤差評価

4．まとめ

本研究では，理論式を用いる手法と RTHS の結果を比較することにより，計算点における速度の精度を評価した．これにより，速度を加味した多項式近似を使用することで，RTHS における速度の精度は向上することが示された．

謝辞：本研究は，戦略的創造イノベーションプログラム(SIP)「IX．実大部材地震挙動解析システム開発」の助成を受けて実施した．謝意を表します．

参考文献

1) Yoshikazu Takahashi, Gregory L.Fenves: Software framework for distributed experimental-computational simulation of structural systems, *Earthquake Engineering Structural Dynamics*, Vol.35, No.3, 2005.

2) 津田葉涼太，上田知弥，植村佳大，高橋良和：リアルタイムハイブリッドシミュレーションにおける解析負荷の増加が試験精度に及ぼす影響，日本地震工学会，TS_20220277，2022.

© Japan Society of Civil Engineers