

## リアルタイムオンライン応答試験システムの構築

### -その 1. システムの概要と制御方法-

#### DEVELOPMENT OF REAL-TIME ON-LINE TEST

#### -Part1. Outline of test system and its control method-

秦 一平<sup>1</sup>, ○阿久戸 信宏<sup>2</sup>, 和氣 大輔<sup>3</sup>, 秋山 英士<sup>3</sup>  
 Ippei Hata<sup>1</sup>, \*Nobuhiro Akuto<sup>2</sup>, Daisuke Wake<sup>3</sup>, Eiji Akiyama<sup>3</sup>

Abstract: This paper describes the outline of real-time on-line test system for SDOF elastic model. The test system is constructed by programming language (C#). This paper also shows noise processing method and stiffness evaluation method.

#### 1-1. はじめに

近年, 免震構造を採用した建築物は増加傾向にあり, 中低層建築物から, 超高層建築物など様々ある. それに伴い, 使用される免震部材の開発および研究が盛んに行われている. 免震構造に使用される積層ゴムに着目すると, 履歴特性を有する高減衰ゴム系積層ゴム(HDB)や鉛プラグ挿入型積層ゴム(LRB)は動的载荷時に, 様々な動的特性の影響により非線形性の強い履歴特性を描くことが多くの実験結果により報告されている. また, 時刻歴応答解析に積層ゴムの動的特性を考慮可能な解析モデルも様々報告されているが, 複雑な履歴特性を解析に反映させる影響からモデル条件が複雑化し, 適した解析モデルを選定することは非常に困難である.

本研究では, 時刻歴応答解析による評価が難しい免震部材を有した構造物の動的挙動を再現するため, 高速载荷アクチュエータシステムと汎用プログラム言語(C#)を用いて構築した時刻歴応答解析を連動させて試験を行うリアルタイムオンライン応答試験システム(Real-Time On-Line Test 以下 RTOL 試験)の制御プログラムの構築を目的とする. 本研究は, その基礎研究として 1 質点系弾性モデルを対象としたプログラムの構築を行った. 本報では, RTOL 試験システムの概要と制御方法について報告する.

#### 1-2. 試験システムの概要

RTOL 試験とは, Figure 1 に示すように演算用コンピュータ内で行う時刻歴応答解析によって算出した応答変位を指令変位として油圧アクチュエータに送信し, 試験体に動的载荷する. そして送信した指令変位に到達した時の復元力を計測し, その値を演算用コンピュータ内に取り込み, 次のステップの時刻歴応答解析に用いる. この手順を逐次繰返し行い, 入力地震波が終了するまでリアルタイムに行う試験システムである.

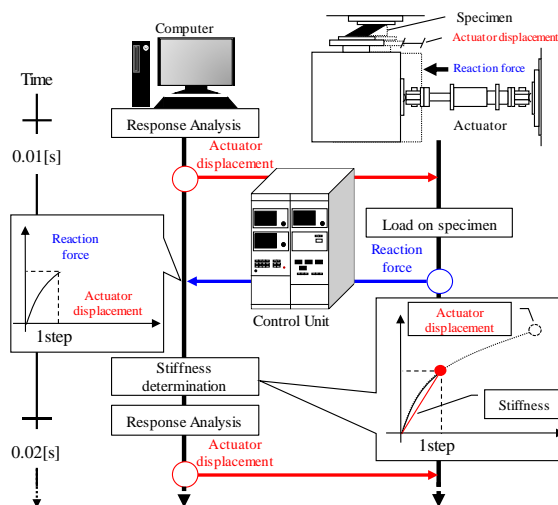


Figure 1. Outline of RTOL system

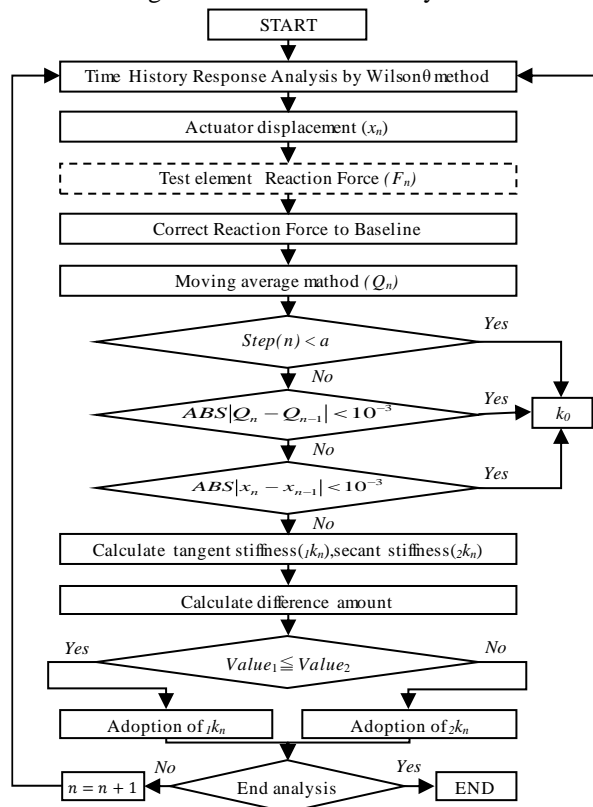


Figure 2. System algorithm

1: 日大理工・教員・建築 2: 日大理工・院・建築 3: 日大理工・建築

### 1-3. システムの制御プログラム

#### 1-3-1. 制御プログラムフロー

本報で構築した時刻歴応答解析および計測データ処理方法のアルゴリズムを Figure 2 に示す。

#### 1-3-2. 数値積分法

演算用コンピュータ内で行う時刻歴応答解析は Wilson  $\theta$  法を用いた直接積分法を採用した。応答解析の無条件安定性のため  $\theta=1.4$  とした。モデルの応答変位  $x_{t+\theta\Delta t}$ 、応答速度  $\dot{x}_{t+\theta\Delta t}$ 、応答加速度  $\ddot{x}_{t+\theta\Delta t}$  の算出式を(1)式から(3)式に示す。また、 $m$  は質量、 $c$  は減衰係数、 $k_0$  は初期剛性、 $\Delta t$  は刻み時間を表す。

$$x_{t+\theta\Delta t} = x_t + \dot{x}_t(\theta\Delta t) + (\ddot{x}_{t+\theta\Delta t} + 2\ddot{x}_t) \frac{(\theta\Delta t)^2}{6} \quad (1)$$

$$\dot{x}_{t+\theta\Delta t} = \dot{x}_t + (\ddot{x}_{t+\theta\Delta t} + \ddot{x}_t) \frac{\theta\Delta t}{2} \quad (2)$$

$$\ddot{x}_{t+\theta\Delta t} = -\frac{c}{m}\dot{x}_{t+\theta\Delta t} - \frac{k_0}{m}x_{t+\theta\Delta t} - \ddot{y}_{t+\theta\Delta t} \quad (3)$$

#### 1-3-3. 計測復元力の基線補正

計測される復元力は、試験体の設置状態および計測機器等の影響から、基線(0.0[kN])からずれた状態で計測される。よって、1 ステップ目に計測される復元力を 0.0[kN]として、以降に計測される復元力を逐次補正する。

#### 1-3-4. 移動平均法による計測データの平滑化

RTOL 試験においては試験体を載荷した時に得られる復元力を用いて時刻歴応答解析を行うため、計測される復元力の精度が次のステップの応答解析に大きな影響を与える。RTOL 試験では、高速載荷アクチュエータをリアルタイムに制御しなければならないことから計測される復元力には制御誤差が生じる。そこで、本研究では計測される復元力の制御誤差補正方法として計測される復元力を逐次補正可能な移動平均法を採用した。

移動平均法とは、取得された時系列データ  $F_n$  に対して、ある一定区間内で平均値を求め、時系列データの取得に応じてその平均区間を順次移動させながら、全時系列データ対して、平均値を算出する方法である。本制御プログラムでは、時刻歴応答解析を行っているステップを含める計測された任意の復元力データ数  $a$  点の平均値を算出し、その値をモデルの復元力  $Q_n$  とする。算出式は(4)式に示す。また、 $(a-1)$ ステップまでは設定した初期剛性を用いて、応答変位を算出し、復元力は数値解析結果による値とする。

$$Q_n = \frac{1}{a} \sum_{i=(n-(a-1))}^n F_i \quad (n \geq a) \quad (4)$$

$$Q_n : \text{移動平均値 [kN]} \quad F_i : \text{計測復元力 [kN]}$$

$$n : \text{ステップ} \quad a : \text{移動平均区間}$$

#### 1-3-5. 剛性評価方法

本システムでは時刻歴応答解析によって算出された応答変位  $x_n$  と試験体にその変位を与えた時に得られるデータに移動平均法を適応させた復元力  $Q_n$  の関係から剛性値を算出し、次のステップの時刻歴応答解析に用いる。複雑な復元力特性を応答解析に反映させるためには、接線剛性による判定が有効であるが、動的載荷による制御の影響から安定した復元力を得ることが難しい。そのため、接線剛性による判定のみでは応答が発散し、試験終了まで安定して行うことができない。

そこで、剛性評価の補正方法として、接線剛性  ${}_1k_n$  と割線剛性  ${}_2k_n$  を用いることとした。これは、1 質点系弾性系モデルであれば両者の関係は等しいためである。算出式は(5)式と(6)式に示す。そして、各ステップで算出された 2 つの剛性値を、(7)式と(8)式より設定した初期剛性  $k_0$  との差分をそれぞれ算出する。弾性モデルであり、剛性値が大きく変化しないという仮定から、(7)式と(8)式より算出した差分を比較し、小さい差分を算出した時に用いた剛性値を採用して、次のステップの時刻歴応答解析を進める。また、移動平均法を適応した復元力  $Q_n$  [kN] と応答変位  $x_n$  [mm] の応答増分のいずれかが  $1.0 \times 10^{-3}$  未満であるときは剛性値の変化が無いと判断し、初期剛性を用いることとする。

$${}_1K_n = ABS \left| \frac{Q_n - Q_{n-1}}{x_n - x_{n-1}} \right| \quad (5)$$

$${}_2K_n = ABS \left| \frac{Q_n}{x_n} \right| \quad (6)$$

$$Value_1 = ABS |k_0 - {}_1k_n| \quad (7)$$

$$Value_2 = ABS |k_0 - {}_2k_n| \quad (8)$$

#### 1-4. まとめ

本報では、RTOL 試験システムの概要と、構築した制御プログラムによる制御方法について示した。

次報その 2 では、正弦波および地震波を入力した RTOL 試験を行い、その試験結果から理論値との整合性、システムの適応範囲について検討する。

#### 1-5. 参考文献

- [1]大崎順彦：「建築振動理論」, 彰国社, 1996 年 11 月  
 [2]中島正愛, 政岡暢昭：「リアルタイムオンライン応答実験システムの開発と免震建物地震応答への適用(その 1, その 2)」, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1998