超高層免震建築物を対象とした

サブストラクチャ・リアルタイム・オンライン応答実験システムの開発

日大生産工(学部) 〇横田健次 (株) ブリヂストン 竹内貞光 日大生産工 神田亮

1. 序論

1990 年代に相次いだ大地震において免震構 造の有効性が実証された。これを機に、免震建 築物の建設数は飛躍的に増加しつつある。免震 構造は、構造物とそれが立地する地盤とをアイ ソレータにより力学的に絶縁し、上部構造にか かる地震力を低減しようとするものである。こ のような構造形式は、構造物に生じる地震外力 を低減するには有効であるが、構造物に直接吹 き付ける風外力には、その性能を考えるとむし ろ逆効果となる。建築物の重量が十分重く、高 さもさほど高くなければ, 免震構造において風 外力の影響は無視できるものの, 建築物が軽量 でありその高さが高くなれば、風外力は増大す る。近年、免震建築物の高層化により風外力に 対する検討が必要になりつつある今、風外力に 対し、免震装置の復元力特性上考慮しなければ ならない特性があることがわかってきた。風外 力は地震力とは異なり継続時間が長く、平均成 分を有している。そのため、免震部材に地震時 とは異なる挙動が生じる可能性がある。具体的 には,長時間の繰り返し変形に伴う疲労,免震 部材の温度上昇による力学特性の変化や、平均 成分によりゴム支承などにクリープひずみが生 じることが挙げられる 1),2)。すなわち,風外力 と地震外力に対して,免震部材の復元力特性が 異なるため,最大応答値や疲労損傷量などの重 要な評価の信頼性をより向上させる必要がある。

前項を踏まえて、本研究では、超高層免震建 築物に設置された積層ゴム系支承の地震、風荷 重に対する、より現実的な挙動を調べるための 手法として、免震装置に実際の積層ゴム試験体 を用いた、リアルタイムのサブストラクチャ・ オンライン応答実験(以下, Sub-Structure Real Time On-Line Testing または SROLT)のシス テム開発および、その検証実験を実施し、シス テムの妥当性を評価する。

2. 実験の原理およびシステムの概要

2.1 SROLT の概念

SROLT は、実験部分となる積層ゴム試験体 に外力を加え、積層ゴムの復元力を計測し、コ ンピュータ内で逐次積分法による応答解析を行 う。この操作をリアルタイムで素早く繰り返す ことで、積層ゴム系支承の地震、風荷重に対す るより現実的な挙動を調べることができ Fig.1 に SROLT の概要を示す。



Fig.1 Modeling and Concept of SROLT

$$[m]\{\ddot{x}\} + [c]\{\dot{x}\} + \{r\}^a + \{r\}^e = \{f\}$$
(1)

- [m] : Mass matrix
- [c] : Damping matrix
- $\{\ddot{x}\}$: Acceleration vector
- $\{\dot{x}\}$: Velocity vector
- $\{r\}^a$: Restoring force at upper structure in analytical sub-assemblage
- $\{r\}^e$: Restoring force at base-isolation story
- in experimental sub-assemblage
- $\{f\}$: Wind external force vector

2.2 数值積分法

SROLT では、制御全体をリアルタイムで実施するため、システムに適用される積分法に制約が課される。ここでは、陽な Newmark 法³⁰に、モーダルアナリシスを組み込んだ

Development of a Sub-Structure Real-Time On-Line Testing System for Super-High Rise Isolated Building Kenji YOKOTA, Sadamitsu TAKEUCHI and Makoto KANDA Modal-Explicit Integration Technique⁴(以下, M.E.T)を適用する。この考え方により,積分時 間刻みを定める際の負荷条件が大幅に緩和され, 実験の制御をリアルタイムで行うことができる。 以下に M.E.T の詳細を述べる。

コンピュータ内で行う応答計算の支配方程式 は、式(1)のように定義できる。

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + r = f \tag{2}$$

ここに,*m*, *c*は,質量,減衰マトリクス, *x*, *x*は, 加速度,速度ベクトル,*r*は,復元カベクトル,*f* は,外カベクトルを表す。

外力が地震外乱による場合は,

$$f = -m\{1\}\ddot{x}_B \tag{3}$$

ここに、 $\{1\}$ はすべての要素が1であるベクトル、 \ddot{x}_B は、地動加速度を示す。また、外力が風外乱の 場合は、

$$f = f_w \tag{4}$$

ここに, *f*wは各質点に作用する風外力のベクト ルである。

非線形な挙動を示す復元力rは、仮想剛性 k^{1} と不 釣合力 r^{u} によって次のように表されるものと する。

$$r = k^I x - r^u \tag{5}$$

ここに、xは、変位ベクトルを表す。式(5)を式(2) の左辺の第三項に代入して r^u の項を右辺に移項 すると、次式を得る。

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + k^{I}x = f + r^{u} \tag{6}$$

式(6)は、一定な剛性 k^{l} を有する振動系が、外力 $f + r^{u}$ を受ける場合の運動方程式と見なせる。こ の仮想剛性 k^{l} を有する振動系に対し、次式を解く ことにより固有値と固有ベクトルを求める。

$$[k^{I} - \lambda^{I}m]\{\phi^{I}\} = \{0\}$$
(7)

ここに、 λ は固有値、 ϕ は固有ベクトルを表す。 上付き添え字Iは、仮想剛性 k^{I} に対する値を表す。 一般化座標系上の変位応答をXとすると、それは、 xと以下のような関係にある。

$$x = \sum_{k=1}^{m} \phi_k^{\ I} X_k^{\ I} \tag{8}$$

ここに、下付き添え字kはモード次数を表す。また、添え字mは最高次のモード次数を表す。モード応答X_kはxから次式によって求められる。

$$X_k = \frac{\phi_k^{I,T} m x}{\phi_k^{I,T} m \phi_k^{I}} \tag{9}$$

ここに、上付き添え字Tは転置を表す。さらに、 加速度と速度についても式(8)、(9)と同様な関係 が成り立つ。以下、一般化座標系に対し \ddot{x} 、 \dot{x} 、xの定義される座標系を、実座標系と称す。式(6) の両辺に $\phi_k^{I,T}$ を乗じ、さらに式(8)を代入すると 以下のようになる。

$$\phi_{k}{}^{I,T} m \phi_{k}{}^{I} \ddot{X}_{k}{}^{I} + \phi_{k}{}^{I,T} c \phi_{k}{}^{I} \dot{X}_{k}{}^{I} + \phi_{k}{}^{I,T} k^{I} \phi_{k}{}^{I} X_{k}{}^{I}$$

$$= \phi_{k}{}^{I,T} f + \phi_{k}{}^{I,T} r^{u}$$

$$(10)$$

cもm, kと同様に, ϕ ^Iに対して直交性を有すると すれば,式(5)は,m個の独立した方程式になる。

$$M_{k}^{I} \ddot{X}_{k}^{I} + C_{k}^{I} \dot{X}_{k}^{I} + K_{k}^{I} X_{k}^{I} = F_{k}^{I} + R_{k}^{u,I}$$
(11)

但し,

$$M_{k}^{I} = \phi_{k}^{I,T} m \phi_{k}^{I}, C_{k}^{I} = \phi_{k}^{I,T} c \phi_{k}^{I}, K_{k}^{I}$$
$$= \phi_{k}^{I,T} k^{I} \phi_{k}^{I}, \qquad (12)$$

$$F_k^{\ I} = \phi_k^{\ I,T} f, R_k^{\ u,I} = \phi_k^{\ I,T} r^u$$

式(5)に対しても同様な操作を行うと、下式のようになる。

$$R_k^{\ I} = K_k^{\ I} X_k^{\ I} - R_k^{\ u,I}$$
(13.a)

但し,

$$R_k^{\ I} = \phi_k^{\ I,T} r \tag{13.b}$$

式(13.a)を式(11)に代入して整理すると、以下の ようになる。

$$M^{I}\ddot{X}^{I} + C^{I}\dot{X}^{I} + R^{I} = F^{I}$$
(14)

式(11)は、仮想剛性k¹に対する一般化座標系上の 振動方程式である。実座標系では、便宜的にrを 式(5)に示したように、仮想剛性に寄与する部分 と不釣合い力の部分に分離した。式(6)を一般化 座標系上に変換した式(11)は、最終的に、式(14) のようにR¹が仮想剛性に寄与する部分と不釣合 い力の部分に区別されていない形式で表現でき る。よって、Newton-Rapson法等により収束計 算を行わずとも、陽な方法を適用すれば解が求め られる。離散化された時刻上で陽なNew mark法 を適用すると、それらの解は次式のようになる。

$$X^{I}_{i+1} = X^{I}_{i} + \dot{X}^{I}_{i}\Delta t + 1/2\ddot{X}^{I}_{i}\Delta t^{2}$$
(15.a)

$$\dot{X}^{I}_{i+1} = \dot{X}^{I}_{i} + 1/2 \left(\ddot{X}^{I}_{i} + \ddot{X}^{I}_{i+1} \right) \Delta t^{2}$$
(15.b)

$$\ddot{X}^{I}{}_{i+1} = -M^{I,-1}C^{I}\dot{X}^{I}{}_{i+1} - M^{I,-1}R^{I}{}_{i+1}$$
(15 c)

$$-M^{I,-1}F^{I}_{i+1}$$

ここで,下付添え字*i*は離散化された時刻歴上の ステップ数を表す。各モード応答は独立であり, 特定のモードのみ,すなわち応答値に対して支配 的なモードのみを応答計算することが可能である。よって、支配的なモードの最高次数をm'とすれば、式(8)に対して以下の近似が成り立つ。

$$x \cong \sum_{k=1}^{m'} \phi_k^{\ l} X_k^{\ l} \tag{16}$$

さらに、加速度・速度も同様な関係が成り立つ。 計算手順は、外力と復元力の算定の前後にそれ ぞれ一般化座標系から実座標系、また、実座標系 から一般化座標系へ応答値を変換することを除 いては、陽なNewmark法を適用した場合と同様 である。また、応答値の計算はすべて一般化座標 系上で行われる。しかし、非線形な挙動を示す復 元力は、容易に値を求められる実座標系上で算定 するのが合理的である。Fig.2にM.E.T.を適用し たSROLTのフローチャートを示す。



Fig.2 Flowchart of Applying M.E.T. to SROLT

3. 検証実験

3.1 実験概要

免震層に天然ゴム系積層ゴムを用いて,5質 点モデルのオンライン試験を実施する。オンラ イン試験で得られた実験値と解析結果を比べる ことで、本システムにおいても、良好な精度を 得られるかを検証する。ここで用いる振動系モ デルを、各質量、剛性、固有円振動数とともに Fig.3 に示す。モデルの最上部の剛性を極めて 高くし、5次の固有円振動数が4次の固有円振 動数の10倍以上になるように設定した。モデ ルの1層目には天然ゴム系積層ゴムを設定し、 試験に用いた積層ゴムの詳細をFig.4、Table.1 に示す。M.E.T.による、積分時間刻み Δ tを定め る際の負荷条件の大幅な緩和を確認するため、 実験による時間刻みは Δ t = 0.02s、解析による 時間刻みは Δ t = 0.0001sで実施した。モードに おける減衰定数は0.01とした。外力はFig.5 に 示すような正弦波とした。



Natural Circular Frequency		
1st	2.02 rad/sec	
2nd	30.0 rad/sec	
3rd	60.4 rad/sec	
4th	82.9rad/sec	
5th	1458.6 rad/sec	

Fig.3 Analytical Models



Fig.4 Test laminate rubber Section

-265-

Item	Specifications
Laminated rubber	φ225mm
Rubber thickness	1.6_{t} mm × 28 layer
Shear modulus	0.392N/mm ²
Internal steel sheet thickness	1.0_{t} mm × 27 layer
Primary shape coefficient	$S_1 = 35.2$
Secondary shape coefficient	$S_2 = 5.0$

Table.1 Test laminated rubber



Fig.5 grand acceleration

3.2 実験結果

Fig.6 に免震層の応答変位時刻歴を, Fig.7 に 免震層のせん断力時刻歴, Fig.8 に免震層の荷 重 - 変形を示す。実験による値と解析による値 は概ね近い値となった。今回の結果で SROLT に適用される積分法に課された制約は, M.E.T. によって, 大幅な緩和が確認され, 精度, 安定 とともに良好な結果が得られたといえる。



Fig.7 Shear Force in Time



4. まとめ

本論文では,超高層免震建築物に設置された 積層ゴム系支承の地震,風荷重に対するより現 実的な挙動を調べるための手法として SROLT のシステム開発とその検証実験を行った。

SROLT による実験値と解析結果を比較した 結果,概ね同等の値を示した。これによりシス テムの有効性が実証された。今後はこのシステ ムを用いて,実免震建築物を想定した地震・風 荷重の実験を行うことで,積層ゴムの水平特性 や耐久性について評価・把握を行っていく。

「参考文献」

 竹中康雄,飯塚真巨,鈴木雅靖,吉川和秀,山田 和彦:鉛プラグ型積層ゴムを考慮した高層免震建築 物の風応答簡易評価法,日本建築学会構造系論文集, 第561号,pp.89-94,2002,11
 安井八紀,大熊武司,丸山比佐夫:クリープ変形 た体を免票は第第の風店気が地域に開まる研究。日本

を伴う免震建築物の風応答性状に関する研究,日本 建築学会構造系論文集,

第619号, pp.41-48, 2007, 9

3) Shing, P.B. and Mahin, S.A.: Experimental Error Propagation in Pseudodynamic Testing, EERC Report No, UCB/EERC-83/12, 1983.
4) 扇谷匠己,神田亮,河上祐之,丸田栄蔵:確率論 に基づいた構想免震建築物の構造パラメータ推定に 関する研究 地震外乱および風直交方向外乱に対す る検討,日本建築学会構造系論文集,第658号, pp2105-2113, 2010.12