

## ASI 法を用いた有限要素解析手法による RC 骨組構造のセミアクティブ制振解析

正会員 磯部大吾郎\* 同 金久保利之\*  
同 古田 智基\*\* 同 松岡 宏\*\*\*

順応型 Shifted Integration 法 (ASI 法) 有限要素法 RC 骨組構造  
セミアクティブ制振 MR ダンパー

### 1. はじめに

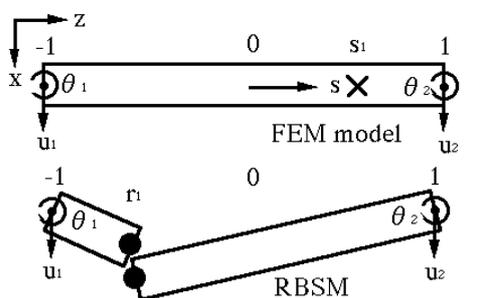
骨組構造物の耐震設計を行う際には、従来から様々な解析ツールが用いられる。中でも有限要素法による解析手法は、その汎用性・簡便性という点から利用者が多いが、動的荷重下でかつ非線形性の強い問題では計算コストが高くなり、適用例が少ないのが現状である。そこで筆者の一人は、解析する上での計算コストを低く抑え、多種多様なパラメータ計算に対応可能とする有限要素解析手法を構築することを目的とし、順応型 Shifted Integration 法 (ASI 法) を用いた解析ツールを開発してきた<sup>1)2)</sup>。

本研究では、骨組構造の単調荷重・繰り返し荷重問題<sup>1)</sup>、部材破断を含む動的崩壊問題<sup>2)</sup>などの有限要素解析において有効であることが立証されている ASI 法を、可変剛性・粘性ダンパーを使用したセミアクティブ制振解析に適用し、その制振効果について検証した。

### 2. 順応型 Shifted Integration 法 (ASI 法)

ASI 法とは、弾性要素における数値積分点は線形解析に対する最適位置 (線形チモシェンコはり要素の場合は中央点) に置き、全塑性断面の発生直後に、その点に正確に塑性ヒンジが形成されるように数値積分点をシフトする手法で、通常の有限要素法に比べ格段に少ない要素数 (1 部材当り 2 つの線形チモシェンコはり要素) で高精度な解が得られることが確認されている。図 1 に示すように、線形チモシェンコはり要素における数値積分点位置と塑性ヒンジ発生点との関係は、物理的な意味が明確な剛体ばねモデル (RBSM) とのひずみエネルギー近似式の等価性を考慮することにより

$$S_1 = r_1 \quad 0 \Gamma \quad r_1 = S_1 \quad (1)$$



- × Numerical integration point
- Rotational and shear spring connecting rigid bars (plastic hinge)

図 1 線形チモシェンコはり要素の物理的等価性

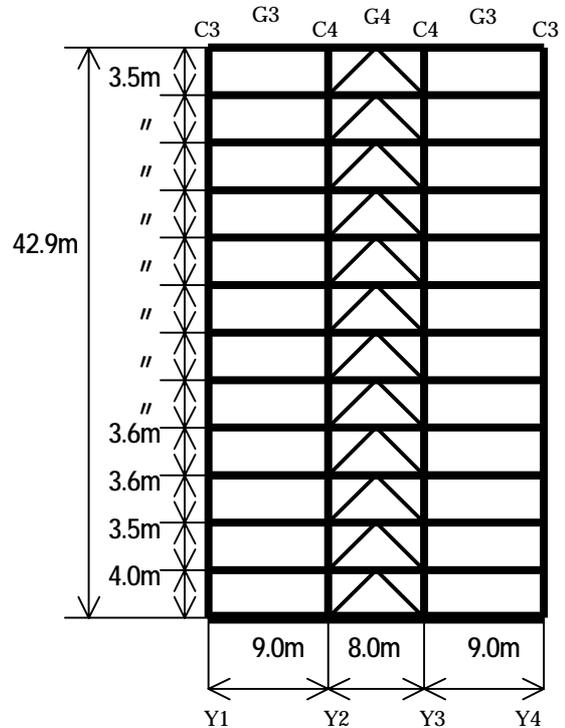


図 2 解析対象モデル

と導出されている<sup>3)</sup>。ここに、 $s_1$  および  $r_1$  はそれぞれ、数値積分点位置および塑性ヒンジ・破断の位置である。例えば要素の左端が塑性化した場合には、その判定直後の増分ステップにおいて要素内の数値積分点を (1) 式に従ってシフトし、塑性化モデルを正確に表現する。この操作を要素の性状に合わせて順応的に行うことにより、弾塑性解が精度良く求められる。

### 3. 可変剛性ダンパーによる制御モデルの設定

本研究では、動的応答解析において有効な ASI 法を制振解析に適用し、可変剛性・粘性ダンパーである MR ダンパーを使用したセミアクティブ制振の効果について検証した。セミアクティブ型の制振は、ダンパーの特性を変化させるための外部エネルギーを必要としないものの、外乱に対し積極的に制御を行うため、パッシブ型のシステムと比較して制振効果が高いと期待されている。制御則としては、瞬間的に剛性を変化させることが可能な MR ダンパーを各階に配置し、構造物の鉛直方向の剛性分布を変形に応じて瞬間的に再配置するという手法を採用した。(2) 式に示すように、各層の層間変形角を時々刻々算出し、最も変形している層を判定し、その最大変形角と各層の変形角との比を取ったものを各層の最大剛性に乗じる係数とした。

$$K_i(t) = \left( \alpha_i(t) \frac{|R_i(t)|}{R_{\max}(t)} \right) K_i \max \quad (2)$$

$K_i(t)$ : 各層のダンパーの瞬間剛性  
 $K_i \max$ : 各層のダンパーの最大剛性  
 $\alpha_i(t)$ : 各層の重み係数  
 $R_i(t)$ : 各層の瞬間層間変形角  
 $R_{\max}(t)$ : 最大瞬間層間変形角

ただし本研究では、簡単のため各層の重み係数  $\alpha_i$  を 1.0 とした。上式によって表現される瞬間剛性値により、変形が大きい層では剛性を高くし、変形が小さい層では剛性を低くする操作を時々刻々行い、構造物内の過度の変形集中を避ける。

#### 4. 制振解析結果

解析モデルとしては12層3スパンのRC平面フレーム構造を設定し、図2に示すように中央部のブレースにMRダンパーを配置したもの(control)に対して、鋼材のブレースを配置したもの(original)および粘弾性ダンパーを配置したもの(damper)と比較した。部材モデルは軸力変動も考慮したD-triモデルとし、接合部は剛とした。また、減衰は瞬間剛性比例型で5%とした。地震波としては阪神淡路大震災の神戸波(NS成分)を50kineに正規化したものを使用し、構造物の支持点に20秒間入力した。

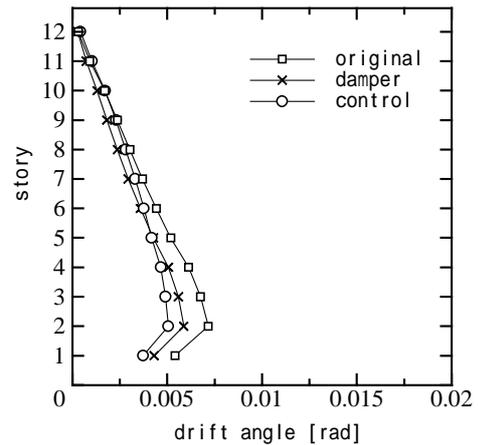
図3(a)に最大層間変形角の分布、図3(b)に第2層の層間変形の時刻歴、図3(c)に9階床位置の絶対加速度の時刻歴、図3(d)に第9層におけるMRダンパーの剛性係数の時刻歴を示す。図より、絶対加速度については鋼材ブレースの場合とほとんど差がないが、各階のブレースに配置してあるMRダンパーの剛性が時々刻々変化することによって、最大層間変形角および層間変形量が減少していることが分かる。

#### 5. まとめ

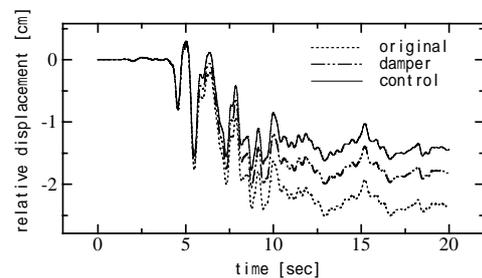
要素端の塑性ヒンジを正確に表現することによって総要素数を削減し、計算コストを低く抑えたASI法を有限要素解析コードに移植し、その数値例としてRC骨組構造のブレースにMRダンパーを配置したセミアクティブ制振手法の検討を行った。本研究で用いた制御則は、特定の層に変形を集中させず全体に分散させるという瞬間剛性再配置の概念に基づく簡単なものであるが、特定の層に集中していた変形が構造物全体に分散され、その制振効果が認められた。

#### <参考文献>

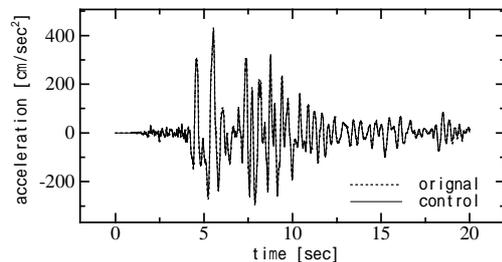
- 1) Y.Toi and D.Isobe: Finite Element Analysis of Quasi-Static and Dynamic Collapse Behaviors of Framed Structures by the Adaptively Shifted Integration Technique, Computers and Structures, Vol.58, No.5, 947-955, 1996
- 2) D.Isobe and Y.Toi: Analysis of Structurally Discontinuous Reinforced Concrete Building Frames Using the ASI Technique, Computers and Structures, Vol.76, No.4, (2000), pp.471-481.
- 3) 都井 裕: 骨組構造および回転対称シェル構造の有限要素解析におけるShifted Integration法について, 日本造船学会論文集, 第168号, (1990), pp.357-369.



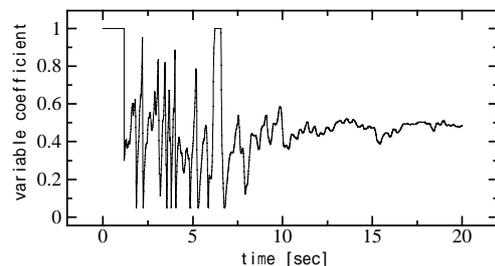
(a) 最大層間変形角



(b) 層間変形時刻歴 (第2層)



(c) 絶対加速度時刻歴 (第9層)



(d) MRダンパーの剛性係数時刻歴 (第9層)

図3 ASI法によるセミアクティブ制振解析  
(Kobe NS 50kine)

\* 筑波大学講師 機能工学系 工博

\*\* バンドー化学(株) 技術部免制振開発ユニット 工博

\*\*\* バンドー化学(株) 新事業推進室

Inst. of Eng. Mech. and Systems, Univ. of Tsukuba, Dr. Eng.  
 BANDO Chemical Industries, Ltd., Dr. Eng.  
 BANDO Chemical Industries, Ltd.