

## 基部にパッシブ・フリクションダンパーを配置した鋼平面骨組の動的性状

## (その 1 解析技術)

正会員 ○小篠幸平<sup>\*1</sup> 準会員 中村亮太<sup>\*2</sup> 正会員 山成實<sup>\*3</sup>

## 2. 構造 - 10. 鉄骨構造 建築構造

## 鋼骨組, 摩擦ダンパー, 地震応答

## 1. はじめに

本研究は, パッシブ摩擦ダンパーを鋼平面骨組の柱脚部に組込んだ場合の免震用エネルギー消散能力について非線形動的応答解析結果から得た知見を報告するものである. ここでは本研究におけるパッシブ摩擦ダンパーのモデル化と解析手法について述べる.

## 1.1 記号一覧

本研究で用いる記号を以下に記す.

$E$	: ヤング係数	$u$	: 変位量 (伸び量)
$E_p$	: 累積消散	$u_d$	: 強制変位
	エネルギー	$u_s$	: すべり量
$E_C$	: 累積ひずみ	$u_{s\max}$	: 最大すべり量
	エネルギー	$u_{s\max}$	: 正の最大すべり量
$F$	: 摩擦力	$u_{s\max}$	: 負の最大すべり量
$F_s$	: すべり耐力	$\nu$	: ポアソン比
$L_R$	: 要素長さ	$r$	: エネルギー分担率
$\mu$	: すべり係数	$W$	: 接触力
$\mu_h$	: ひずみ硬化係数	$M$	: 集中質量
$Q_i$	: 層せん断力	$P$	: 外力
$Q_{i\max}$	: 最大層せん断力	$N$	: 軸方向力
$R_i$	: 層間変位角	$\sigma_y$	: 降伏応力度
$R_{i\max}$	: 最大層間変位角	$P_y$	: 降伏耐力
$t$	: 時間		

## 2. パッシブ摩擦ダンパー

パッシブ摩擦ダンパーは一般に制震装置として用いられる. パッシブ摩擦ダンパーは履歴型や粘性型のダンパーと比べて, メンテナンスが少なくすむ利点がある. これは摩擦エネルギーを熱エネルギーに変換することによりエネルギー消散を行う. そのエネルギー消散のメカニズムの明快さのため, パッシブ摩擦ダンパーはブレースや間柱等のいくつかの装置形態を有し, 研究が進んでいる. しかしながら, 先人達の研究

により個々の装置形態は確立する一方で, それら装置形態の比較による研究は見かけられない. そこで著者らはパッシブ摩擦ダンパーの各装置形態の比較研究を行うための手始めに解析技術を獲得する.

## 2.1 摩擦要素について

骨組中の摩擦要素は式 (1) の Coulomb 摩擦に基づくものとした. 平面骨組中の摩擦要素は 1 自由度のみに対して摩擦の効果を定義し, 他の自由度は関与しないものとした. 静止摩擦係数と動摩擦係数があるが, すべり開始時の摩擦係数をすべり係数  $\mu$  とする. すべる方向の直角方向に作用させる荷重を接触力  $W$  とし, すべり係数  $\mu$  と接触力  $W$  の積から得られる摩擦力  $F$  はすべり耐力  $F_s$  とする. 本報告においては摩擦や軸力変動等によるすべり係数  $\mu$ , 接触力  $W$  およびすべり耐力  $F_s$  一定とし, すべり量  $u_s$  の限度はないとする.

$$F_s = \mu W \quad (1)$$

## 2.2 解析プログラムと

## パッシブ摩擦ダンパーのモデル化

解析には OpenSees<sup>[1]</sup> を用い, 結果検証には Abaqus version 6.9<sup>[2]</sup> を用いた.

解析骨組中に組込む摩擦要素となるパッシブ摩擦ダンパーは, 図 1 のように節点同士に摩擦の主従関係をもたせている. 主となる節点は Master Node, 従属する節点は Slave node の計 2 節点とし, 摩擦要素の要素長さ  $L_R$  は 0mm とするため両節点は同座標位置としている. 摩擦の効果をもたせた自由度方向にすべり耐力  $F_s$  に相当する外力  $P$  を作用させると, Slave Node が Master Node に対して並進移動を始める. 外力がすべり耐力  $F_s$  を満たさなくなると移動をやめ, この節点間距離がすべり量  $u_s$  となる. 図 2 にて摩擦要素の力学的モデルを

図示する。

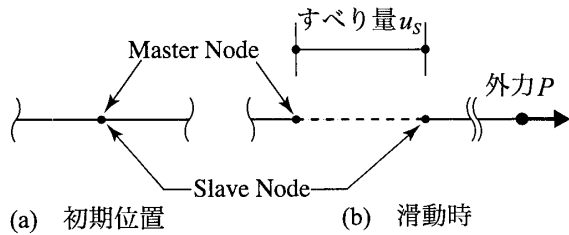


図 1 摩擦要素の節点の主従関係

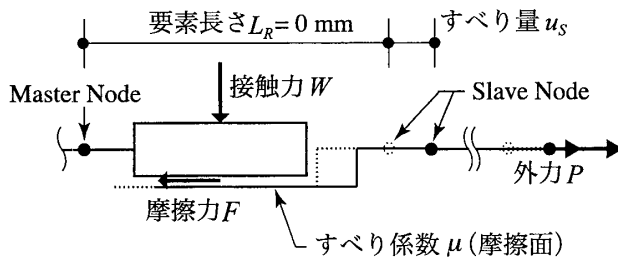


図 2 摩擦要素の力学的モデル

### 3. 解析条件

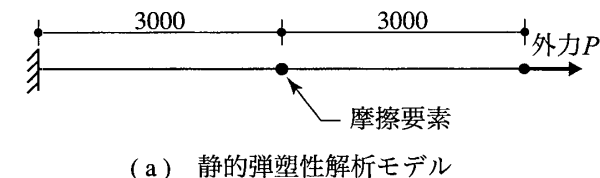
解析骨組の摩擦要素の挙動は Coulomb モデルに従うとした。解析骨組の全ての部材は表 1 に示すように、鋼種は SS400 クラスとし、ヤング係数  $E$  は  $205000\text{N/mm}^2$ 、ポアソン比  $\nu$  は  $0.3$ 、降伏応力度  $\sigma_y$  は  $258.72\text{N/mm}^2$ 、ひずみ硬化係数  $\mu_h$  を  $0.02$  とするバイリニア型の履歴特性をもつものとした。

静的解析では変位制御によった。動的解析における数値積分には Newmark- $\beta$  法 ( $\beta = 1/4$ ) を用いるとし、部材の減衰特性は Rayleigh 型とする。1 次および 2 次の減衰定数を  $2\%$  とした。

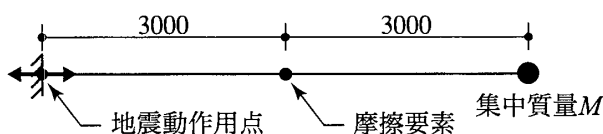
### 4. 片持ち柱モデルによる検証

摩擦要素を片持ち柱モデルに組み込んで解析した。解析プログラムは Abaqus である。

図 3 は片持ち柱モデルの中央部に摩擦要素を組み込んだ解析モデルである。部材は 5. で使用する解析骨組の円形鋼管柱を用い、直径  $318.5\text{mm}$ 、厚さ  $9\text{mm}$  とした。強制変位  $u_d$  はすべり方向と同軸線上とした。応力は軸



(a) 静的弾塑性解析モデル



(b) 動的解析モデル

図 3 片持ち柱モデル (単位: mm)

力のみで座屈および部材の自重は考慮していない。

### 4.1 静的弾塑性解析

摩擦要素を組み込んだ片持ち柱モデルの静的弾塑性性状とすべり挙動を得るために、自由端に材軸方向に沿った強制変位  $u_d$  を部材が降伏した後にすべりが発生するまで与えた。摩擦要素にはすべり耐力  $F_s = 2300\text{kN}$  とするため、すべり係数  $\mu = 0.4$  <sup>[3]</sup>、接触力  $W = 5750\text{kN}$  を与えた。パッシブ摩擦ダンパーのすべり係数  $\mu$  は文献 [3] によった。

解析結果を外力  $P$  - 強制変位  $u_d$  関係を図 4 に示す。  $u_d = 5\text{mm}$  のとき、  $P = 1495\text{kN}$ 、弾性剛性は  $299$  であり、理論値と良く一致している。先に部材降伏が生じてひずみ硬化係数  $\mu_h$  に応じて耐力は上昇する。  $P = F_s$  のとき、剛性は  $0$  となりすべりが発生していることを示している。

弾性剛性、ひずみ硬化係数  $\mu_h$  およびすべり耐力  $F_s$  が理論値と一致していることから、静的弾塑性解析において摩擦要素が機能していることを確認できた。

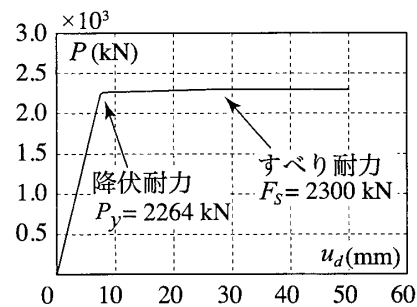


図 4 外力  $P$  - 強制変位  $u_d$  関係

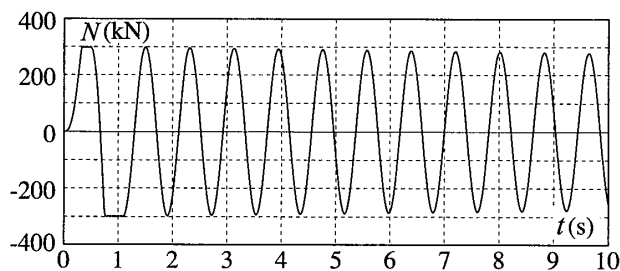
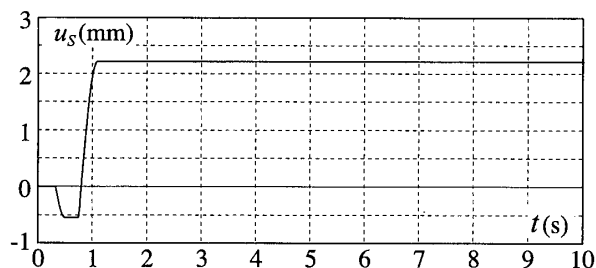
### 4.2 動的解析

動的性状を得るために図 3 の (a) の自由端に集中質量  $m$  を与え、(b) とした。固定端には材軸方向に沿って  $\sin$  波形の加速度  $1$  波を  $1\text{s}$  間作用させた。時間増分は  $0.02\text{s}$  とし、解析時間は  $10\text{s}$  とした。摩擦要素にはすべり耐力  $F_s = 300\text{kN}$  とするため、すべり係数  $\mu = 0.4$  <sup>[3]</sup>、接触力  $W = 750\text{kN}$  を与えた。

解析結果から得られた軸方向力  $N$  およびすべり量  $u_s$  の時刻歴応答、軸方向力  $N$  - すべり量  $u_s$  関係をそれぞれ図 5～7 に示す。

軸方向力  $N$  の時刻歴応答より、  $N$  の最大振幅はすべり耐力  $F_s$  となっており、逆向きすべり方向でも摩擦要素が機能した。  $N$  の時刻歴応答に対応してすべり量  $u_s$  の時刻歴応答では、  $N = F_s$  の時に摩擦挙動を示した。

軸方向力  $N$  とすべり量  $u_s$  の関係より  $N$  がすべり耐力

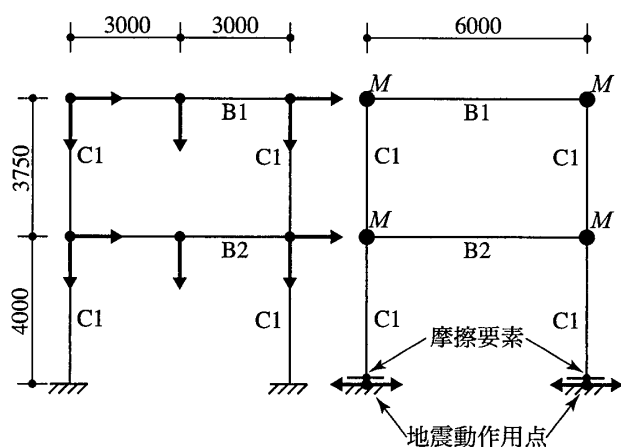
図5 時刻歴応答 (軸方向力 $N$ )図6 時刻歴応答 (すべり量 $u_s$ )

$F_s$ に達するまで $u_s$ は増加しない。 $N = F_s$ になるとすべり量 $u_s$ のみが増加する。この挙動から動的解析においても摩擦要素は機能していることがわかる。

## 5. 鋼平面骨組モデルによる検証

本研究ではあえて骨組の基部に配置した免震装置として用いることとし、動的性状を調べるものである。その骨組の解析の正しさを確認するために、2つの解析プログラム OpenSees および Abaqus を用いて骨組の地震応答性状を検証する。

図8(a)は、現行の耐震規定<sup>[4]</sup>を満たすように設計



(a) 静的解析モデル (b) 地震応答解析モデル

図8 鋼平面骨組解析モデル (単位: mm)

された2層1スパンの鋼平面骨組であり、静的解析に用いる。部材の断面を表1に示す。同図(b)はパッシブ摩擦ダンパーを骨組基部に組込んだ解析モデルであり、地震応答解析に用いる。柱には等方硬化モデル、梁には移動硬化モデルを適用した。2つの柱脚の節点間の距離は一定を保つとする。質量は OpenSees において(b)のように集中質量 $M$ を質点モデルで与えており、Abaqus ではコンシステント・マスで与えた。

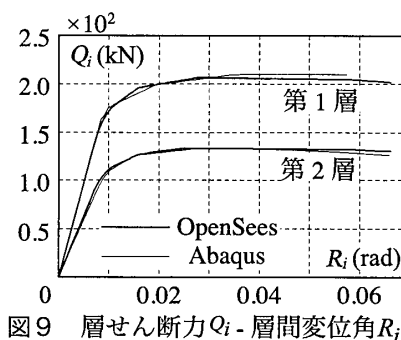
表1 解析骨組条件

部材名	断面寸法 (mm)
C1	○ - 318.5×9
B1	H - 174×346×9×6
B2	H - 199×396×11×7

### 5.1 静的解析

鋼平面骨組の静的弾塑性性状を得るために、プッシュオーバー解析を行った。静的解析におけるすべり挙動は4.1で確認済みのため、解析骨組の力学的特性の検証のみとした。最初に柱部材と梁部材が接合される節点と、梁部材の中央に鉛直荷重を作用させた。現行の耐震規定で定める水平力を各層の柱部材と梁部材が接合される節点に骨組頂部倒角が1/20 rad以上傾くまで各階の床位置に比例载荷した。骨組頂部倒角とは骨組頂部の変位量を骨組高さで除した値である。梁部材には軸方向応力が生じないように作用させた。

2つの解析プログラムによる解析結果を図9に示す。弾性域の層せん断力 $Q_i$ -層間変位角 $R_i$ 関係は一致しており、塑性域においても概ね一致している。このことから解析技術が獲得できたことが確認できた。

図9 層せん断力 $Q_i$ -層間変位角 $R_i$ 

### 5.2 地震応答解析

動的解析では図8(b)の建物基部に地震動を作用させた。入力地震波は El Centro (1940) NS であり、最大加速度を0.5m/s<sup>2</sup>に調整した。地震データ時間増分は0.02 sである。解析の時間刻み値は0.001 sとし、継続時間

は 20 s とした。摩擦要素にはすべり耐力  $F_s = 70\text{kN}$  とするため、すべり係数  $\mu = 0.4$  [3]、接触力  $W = 175\text{kN}$  を与えた。地震応答解析では、長期荷重および P- $\Delta$  効果を考慮していない。

解析で得られた各層における時刻歴応答、層せん断力  $Q_i$  - 層間変位角  $R_i$  関係、および摩擦要素の摩擦力  $F$  - すべり量  $u_s$  関係、累積消散エネルギー量  $E_p$  を得た。これらを 2 つの解析プログラムによる結果を比較して図 10～13 に示す。

図 10 は層間変位角の時刻歴応答であり、解析骨組が塑性化するまでの 2 つの解析プログラムによる応答が概ね一致しており、その後の周期性も一致している。

図 11 は層せん断力  $Q_i$  - 層間変位角  $R_i$  関係で Abaqus においては OpenSees に比べて残留変形が発生しているが、剛性（グラフの傾き）が概ね一致している。

図 12 の摩擦力  $F$  - すべり量  $u_s$  関係は、片持ち柱モデルと同様の挙動を示している。

図 13 は累積消散エネルギー量  $E_p$  を示す。この累積消散エネルギー  $E_p$  は地震動による骨組に加えられたエネルギーを摩擦要素がすべりを発生させることで消散させたエネルギーのことであり、詳細は（その 2）で述べる。累積消散エネルギー量  $E_p$  は概ね一致している。

以上の解析結果より両解析プログラムにおいて正しい解析技術が得られたと言える。

## 6. おわりに

2 つの有限要素解析プログラムを用いて、パッシブ摩擦ダンパーの挙動を表す摩擦要素を組込んだ骨組の解析の結果が得られた。両解析プログラムの静的弾塑性、地震応答および摩擦挙動の結果を検証したところ概ね一致した。パッシブ摩擦ダンパーを鋼平面骨組に組込んだ解析技術を得た。

## 参考文献

- [1] Silvia Mazzoni, Frank McKenna, Michael H. Scott, Gregory L. Fenves, et al, OpenSees Command Language Manual, 2006.7
- [2] Dassault Systèmes, Abaqus 6.9ja オンラインドキュメンテーション, 2009.8

[3] Chi-Lun Ng and You-Lin Xu, Seismic response control of a building complex utilizing passive friction damper: Experimental investigation, Earthquake Engng Struct. Dyn. 2006; 35, pp.657-677, 2006.2

[4] 2007 年度版建築物の構造関係技術基準解説書, 国土交通省他監修, 2007.8

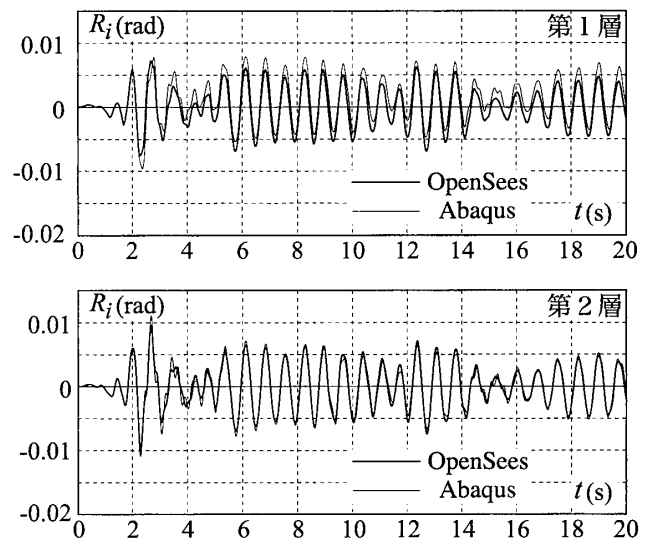


図 10 時刻歴応答

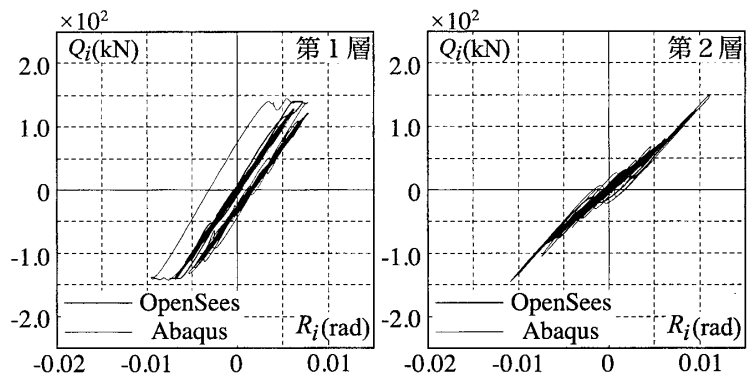


図 11 層せん断力  $Q_i$  - 層間変位角  $R_i$

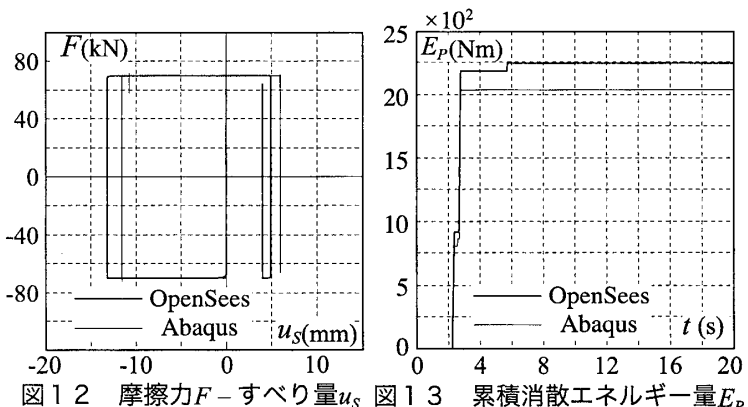


図 12 摩擦力  $F$  - すべり量  $u_s$  図 13 累積消散エネルギー量  $E_p$

\*1 熊本大学大学院 博士前期課程

\*2 熊本大学工学部 学部生

\*3 熊本大学大学院 准教授・工博

Graduate Student, Kumamoto University

Undergraduate, Kumamoto University

Assoc. Prof., Kumamoto University, Dr. of Eng.