

## 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2 数値実験)

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

本報告では, (その1) で述べた解析技術に基づいて, パッシブ摩擦ダンパーのすべり係数を解析パラメータとする骨組の動的性状について報告する.

#### 1.1 消散エネルギー

検討要素としてエネルギーに注目している. 解析対象構造物は, 上部の鋼構造と下部の免震層で構成される. 動的運動より, 上部と下部でそれぞれエネルギーの配分が行われる.

上部の鋼構造では部材の塑性化によるエネルギーが起る. 累積ひずみエネルギー $E_C$ は層間変位角 $R_i$ と層せん断力 $Q_i$ より式(1)で求められる.

$$E_C = \int Q_i(R_i) dR_i \quad (1)$$

下部は摩擦要素が作動し, 図1に示すように摩擦力 $F$ とすべり量 $u_s$ を生じることによってエネルギーを消散する. この量を累積エネルギー消散量 $E_P$ と呼び, 式(2)で求められる.

$$E_P = \int F(u_s) du_s \quad (2)$$

#### 2. 解析の概要

解析骨組は(その1)で用いた図1に示す2層1スパンの鋼モーメント骨組である. 解析にはOpenSeesを用いた. モデル化された摩擦要素を柱の基部に配置した骨組の動的特性を述べる. 基部に配置した摩擦要素は水平方向を自由とし, 他方向は拘束している. 摩擦要素は軸方向のみ力を受けるものとし, 回転方向の影

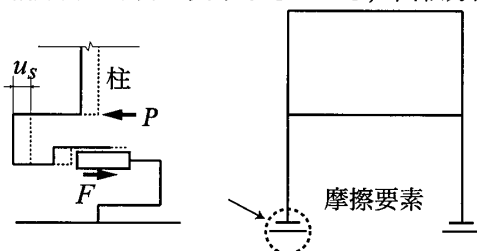
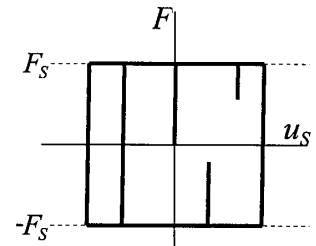


図1 鋼平面骨組

響はないものとする. 骨組に水平力が作用すると基部に水平方向の反力が発生し, それに対して摩擦力が生じる. 反力が一定の大きさに達すると,



摩擦要素がすべりを起こす. すべりを起こす間は, 図2に示すように摩擦力が一定を保ちつつ, 変形が進む. このような履歴挙動を生じる摩擦要素をこの骨組に採用している. すべり量の許容範囲の拘束, 繰返し力に対する摩擦面の摩耗, 軸力変動による初期接触力の変化などは本解析では考慮していない.

#### 3. 設計パラメータ

摩擦要素の挙動に起因するものが, すべり耐力である. (その1)の報告より, これは摩擦要素の接触力と摩擦面のすべり係数により決定する. パッシブ摩擦ダンパーは, 配置する時点ですべり耐力 $F_s$ は固定される. すべり耐力と地震力の大きさの関係から免震効果を得られる今回のモデルは, 適正なすべり耐力を検討する必要がある. 本報告では, すべり係数 $\mu$ を解析パラメータとした.  $\mu$ の範囲は, 0.0から1.0である. 後の解析結果で示すように, 摩擦要素がすべらないときは免震効果を得ることができない. 免震効果を得ることができ範囲で解析を進めている. またすべり係数0.0は挙動の傾向を捉えるために解析に含めた.

表1 入力地震波

入力地震波	最大加速度 m/s <sup>2</sup>	最大速度 m/s	継続時間 s
El Centro NS	5.11	0.5	20.0
NTT Kobe NS	1.90	0.5	20.0
JMA Kobe NS	4.92	0.5	20.0
Taft EW	4.97	0.5	20.0

#### 4. 地震応答解析

骨組の地震応答解析は有限要素法解析プログラム OpenSees を用いた。地震応答解析における数値積分には Newmark- $\beta$  法 ( $\beta=1/4$ ) によるとし、数値解析の時間増分は 0.001 s とした。また、骨組の減衰特性は Rayleigh 型とし、1次および2次の減衰定数は 2% とした。入力地震波のデータは表 1 に示す 4 種類である。地震最大速度を 0.5 m/s に調整して用いた。柱梁部材の弾塑性応答には部材端のみが塑性化する一般化ヒンジ法を用いた。なお、P- $\Delta$  効果を考慮していない。

#### 5. 動的性状

代表的な動的性状として第 1 層の層間変位角  $R_i$  と層せん断力  $Q_i$  について図 3, 4 に示す。入力地震波は El Centro NS で 4 通りのすべり係数で示している。層間変位角は摩擦要素を組込むと通常時と比べて、低減している。すべり係数が小さいほどその低減は大きく、通常時は最大で 1/100 程度の変形を起こしているが、すべり係数が 0.05 のときは 1/500 の変形となっている。層せん断力も同様に通常時と比べ大きく低減している。通常で最大で 210.2kN の層せん断力はすべり係数が 0.05 のときは 37.7kN まで減少している。この結果からすべり係数の小さいすなわち、すべり耐力が小さい摩擦要素を組込むと大きな免震効果を発揮するということが分かる。すべり係数が 0.5 のときは、層間変位角と層せん断力は通常時の完全に一致している。骨組基部の反力が摩擦要素のすべり耐力に達することができず、すべりを生じなかったため、免震効果を発揮できなかったということが確認できる。このことから、すべり耐力のある適正な値とすることでダンパーの有効性を十分に発揮させることができる値があると考えられる。

#### 6. 摩擦要素の評価指標

摩擦要素の評価性能として、各層の層間変位角、層

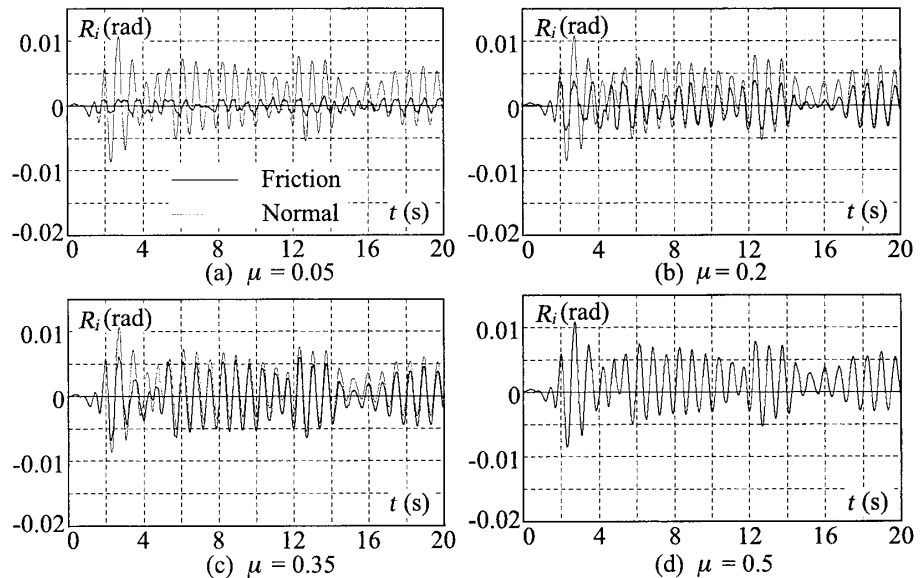


図3 第1層の層間変位角の時刻歴

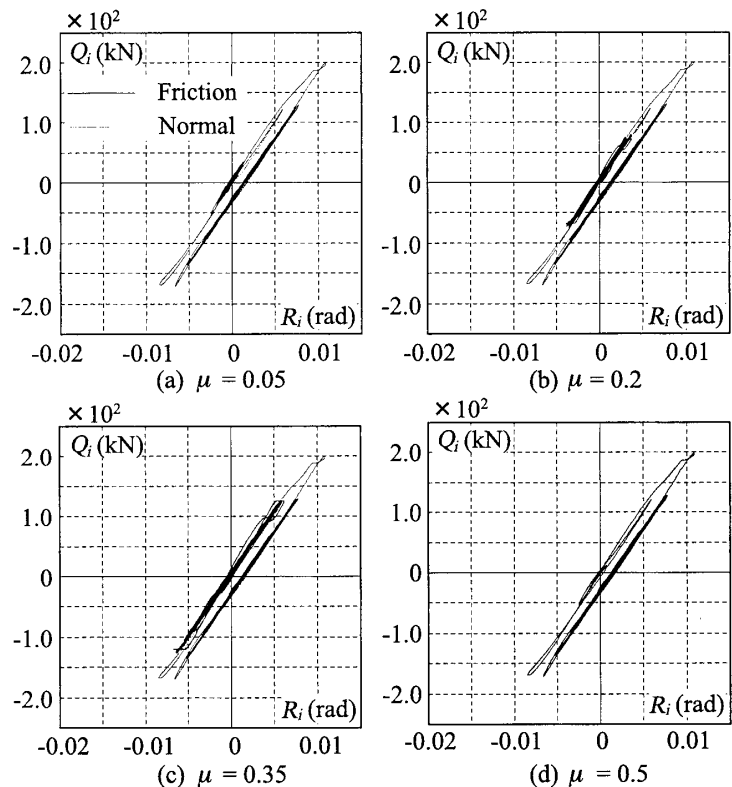


図4 第1層の層せん断力-層間変位角関係

せん断力およびすべり量の最大値について検討する。また他の評価指標として、累積消散エネルギー量および累積ひずみエネルギーの分担率について検討する。

##### 6.1 最大層間変位角 $R_{i\max}$ と最大層せん断力 $Q_{i\max}$

層間変位角と層せん断力の最大値は瞬間的に最大となったものを採用する。

##### 6.2 最大すべり量 $u_{s\max}$

すべり量の最大値を式 (3) のように定義する。

$$u_s \max = |u_s \text{ pmax}| + |u_s \text{ nmax}| \quad (3)$$

$u_s \text{ pmax}$ とは正側のすべり量の最大を示し、 $u_s \text{ nmax}$ とは負側のすべり量の最大を示す。動的解析では、摩擦要素は正負両方向にすべる。地震波の種類やすべり係数次第では、偏りが生じる。それを平均化するためにこのように定義した。最大すべり量の検討は骨組の水平移動を拘束する実際の設計時に考慮する必要がある。

### 6.3 総ひずみエネルギーの分担率

総ひずみエネルギーの分担率は式(4)のように定義する。

$$r = \frac{|E_p|}{|E_p| + |E_c|} \quad (4)$$

総ひずみエネルギーは、上部の骨組の累積ひずみエネルギーと下部の摩擦要素の累積ひずみエネルギーの和となり、分担率 $r$ を求めることができる。

### 7. 骨組の動的性状の検討

すべり係数の変化に伴う4種類の地震波による最大層間変位角 $R_{i \max}$ と最大層せん断力 $Q_{i \max}$ を図5, 6に示す。すべり係数が増加、すなわちすべり耐力の上昇すると、最大層間変位角と最大層せん断力は比例的に増加している。4種類の地震波を比較してみると、最大値は摩擦要素がすべらないときで、どれも異なる値

を示している。しかしすべり係数が0.0に近づくほど、どの地震波でも近い値を示している。これは、摩擦要素がすべり耐力以上の荷重を受けると、摩擦要素と柱は水平移動を起こし、柱にせん断力があまり作用しなくなるためである。すべり係数が小さいほど免震効果が大きいたことが窺える。また、最大層せん断力は、通常時の骨組は、第1層の方が大きい。しかし摩擦要素がすべりを起こすと最大層せん断力は、各層ともに同じ程度の値になっている。これも摩擦要素のすべりによるもので、特定層の層崩壊を防げる手段としての可能性を見いだすことができた。

### 8. 摩擦要素の動的性状の検討

摩擦要素の動的性状を示す最大すべり量を図7に示す。すべり係数が増加すると最大すべり量は反比例的に減少している。すべり係数が0のときは、各地震波ともに最大値を示している。図に記入できなかったものがJMA Kobe NSのすべり係数が0のときで1858 mm, Taft EWのすべり係数が0のときで960 mmであった。すべり係数が小さいほど免震効果は高いが、すべり量は極めて大きくなる。免震層を用いる場合は、基礎のクリアランスは最大で700 mm<sup>[1]</sup>となっている。これを考慮するとすべり係数の小さい0.1以下などは、実際の設計に適用しにくいことが分かる。

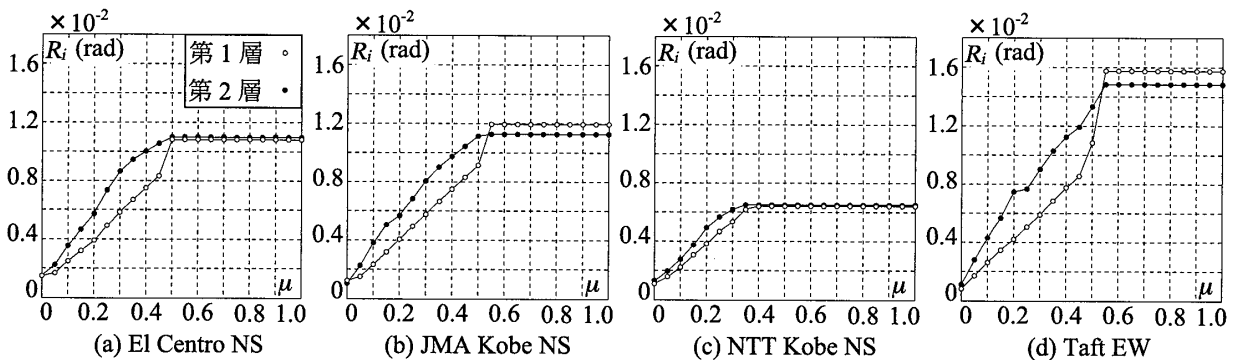


図5 最大層間変位角—すべり係数関係

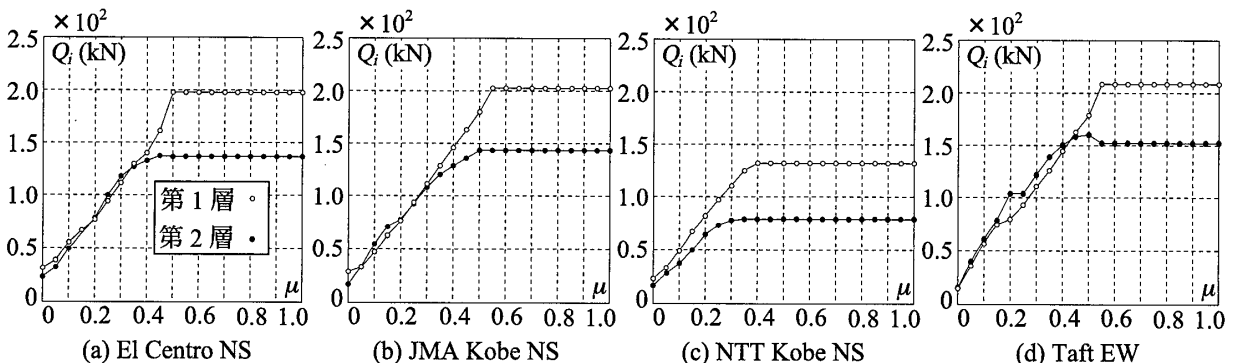


図6 最大層せん断力—すべり係数関係

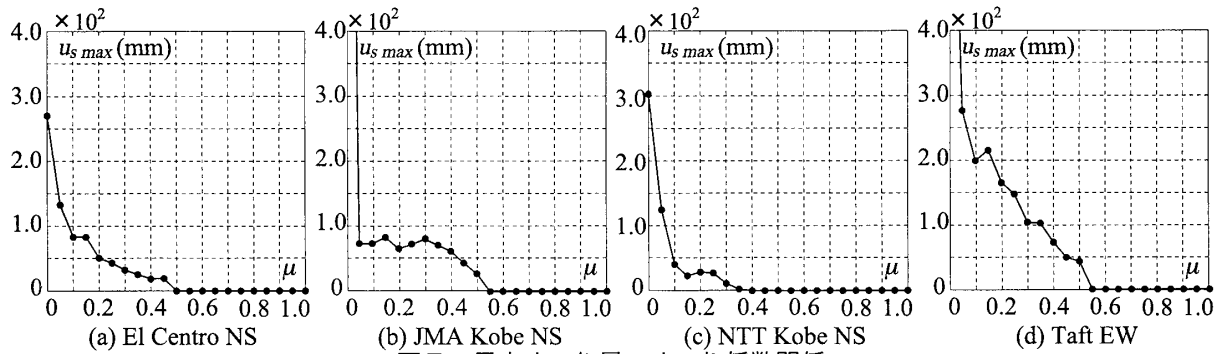


図7 最大すべり量—すべり係数関係

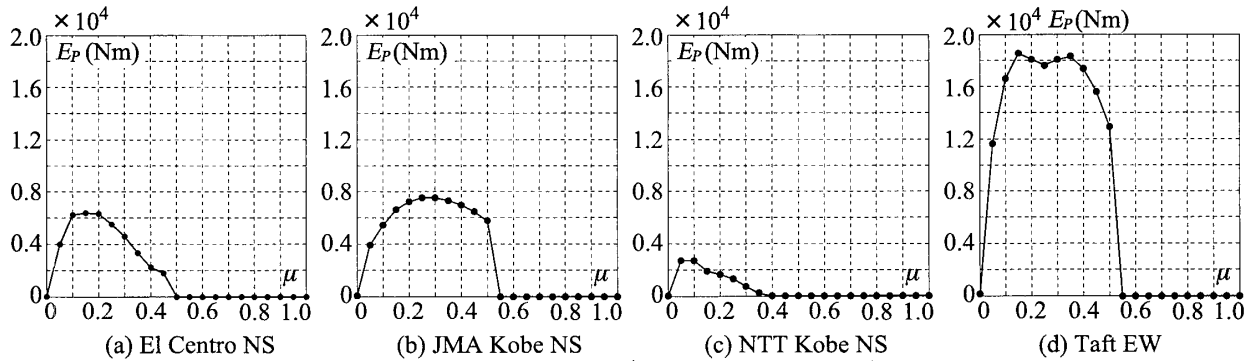


図8 累積消散エネルギー量—すべり係数関係

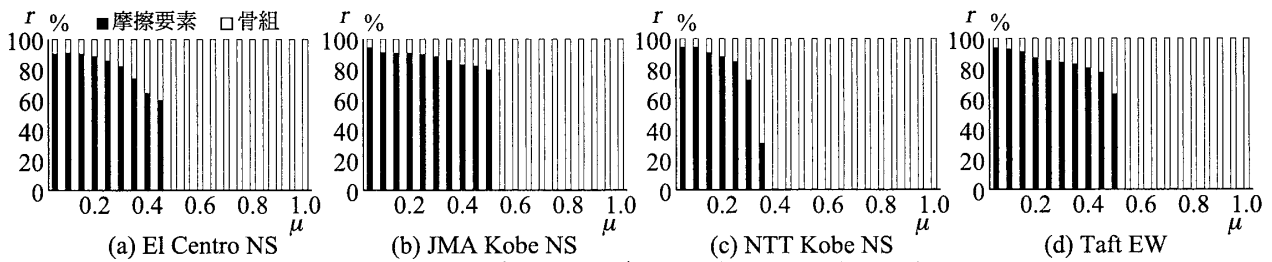


図9 総ひずみエネルギー分担率—すべり係数関係

9. ひずみエネルギーに関する検討

摩擦要素の累積消散エネルギー量 $E_p$ と総ひずみエネルギーの分担率について、図8、9に示す。すべり係数が増加するとともに摩擦要素の消散エネルギー量は増加するが、一定のところで減少に転ずる。それは、すべり量とすべり耐力の関係性によるものである。もっともエネルギーの消費量が多いのは、すべり係数が0.0~0.5の間の中間領域となる。すべり係数が小さいほど、骨組に作用する力を低減するので、消散エネルギーも少ない。<sup>[2]</sup>すべり耐力などを実際の設計で取り入れる際、検討要素として重要であることがわかる。また総ひずみエネルギーの分担率はすべり係数が増加すると、累積消散エネルギーは減少し、骨組のひずみエネルギーは増加している。すべりを起こす間は摩擦要素が大きく負担している。設計において地震時のエネルギーの吸収方法について参考になる結果が得られた。

10. おわりに

基部に摩擦要素を組込んだ鋼骨組の動的性状に関する知見をまとめる。

- 1) すべり係数が小さいほど大きな免震効果を得ることができるが、摩擦要素のすべり量が大きくなるという使用性の欠点が見られた。
- 2) 摩擦要素のエネルギー消費量は、0.0~0.5の中間領域で多く、すべりを生じる場合は、骨組のひずみエネルギーの負担を大きく軽減できることがわかった。

参考文献

[1] 日本免震構造協会, 免震建築物すべり・転がり系支承の諸基本特性に関する調査・検討報告書, p22~23, 2003.8  
 [2] Ercan Serief KAYA, 折り曲がり片持ちせん断構造体の振動特性に関する研究, 鋼構造年次論文報告書, 第19巻, 2011.11

<sup>1</sup> 熊本大学 学部生

<sup>2</sup> 熊本大学大学院 博士前期課程・大学院生

<sup>3</sup> 熊本大学大学院 准教授・工博

Undergraduate, Kumamoto University

Graduate Student, Kumamoto University

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