

PTFEと鋼の摩擦を利用する免震装置の動的特性

Dynamic characteristics of seismic isolation device which uses friction of PTFE and steel

北海道開発局 開発土木研究所 構造研究室	正 員	三田村 浩
北海道開発局 開発土木研究所 構造研究室	正 員	池田 憲二
パシフィックコンサルタンツ(株)	〇フェロー	林 亜紀夫
パシフィックコンサルタンツ(株)	正 員	日榮 民雄
パシフィックコンサルタンツ(株)	正 員	小杉 貴之

1. まえがき

著者らはPTFE (polytetrafluoroethylene) と鋼の摩擦を利用する免震支承の特性を調べ、免震装置としての有効性を検証して来た¹⁾。これまでは、式(1)～式(4)に示す構成方程式を提案した。

$$H = V \cdot \tan(\alpha \pm \rho) \quad (1)$$

$$\alpha = \sin^{-1} \frac{U}{R(2-C)} \quad (2)$$

$$C = \frac{t}{R} \quad (3)$$

$$\rho = \sin^{-1} \frac{2\mu}{(2-C)\sqrt{1+\mu^2}} \quad (4)$$

ここに、 H は免震装置の水平方向反力、 V は鉛直力、 α は回転子の角度、 U は免震装置の変位、 C は式(3)による形状係数で回転子の厚さ t と回転子の曲率半径 R の比、 μ はPTFE と鋼の摩擦係数である。

これまでに $C = 6.0$ の供試体を用いた振動実験を行った

が、免震設計上の必要から、この形状係数を $C = 6.0$ 以外の値に設定する場合が想定される。そこで、形状係数 C の値が変化してもこれまでに提案して来た構成方程式が適用可能かを確認することが必要と考えた。

本論文では $C = 0.1$ として、これまでの供試体よりも大きい曲率半径 R を有する供試体による载荷実験を行って、その動的復元力特性を調べた結果を報告する。

2. 実験方法

実験に用いた供試体を図-1に、加振状況を図-2に示す。免震装置に大変形を与えるために、アクチュエーターによって上部構造を直接駆動している。免震装置基部から加振した場合の上部構造の応答変位時刻歴予測値を動的解析によって求めたものを制御信号としてアクチュエーターに与えた。

波形のケースは、正弦波、0.1 Hz～10 Hzの範囲で均等な成分を持つホワイトノイズ、地震時保有水平耐力法の照査に用いる標準波、を用意した。

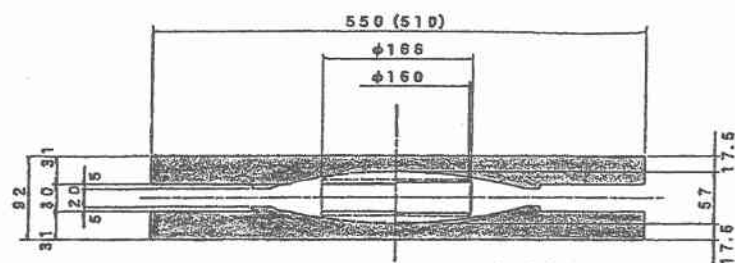


図-1 免震装置

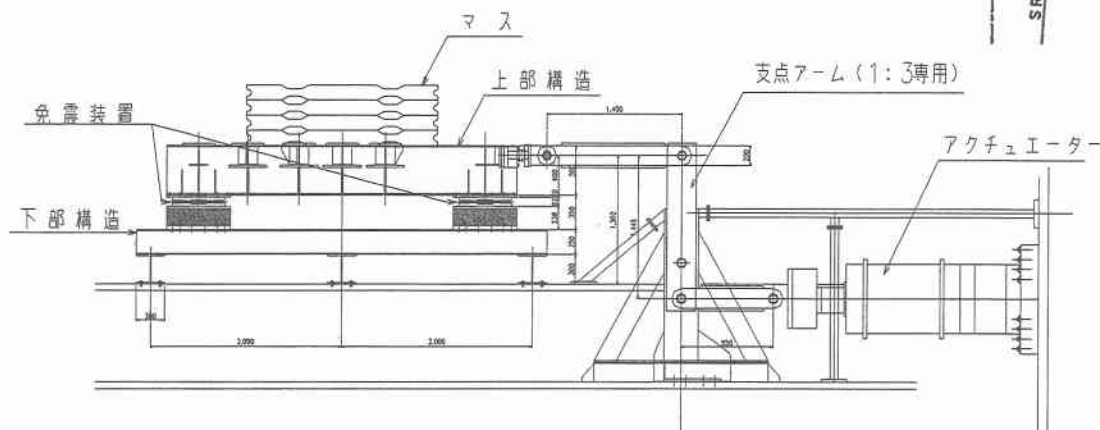
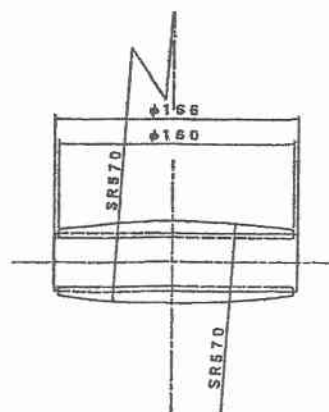


図-2 载荷状況

3. 実験結果と解析

水平力時刻歴 F_I で上部構造を直接に加振した場合の運動方程式は、式 (5) のように表現される。

$$M \cdot \frac{d^2 x}{dt^2} + F_B = F_I \quad (5)$$

ここに、 M は上部構造の質量、 x は上部構造の変位、 F_B は免震装置の水平反力であり、式 (1)～式 (4) に示した構成方程式を基に誘導したバイリニアモデルを用いることにすると、式 (6)～式 (8) によって与えられる。

$$F_B = C_V \cdot \frac{dx}{dt} + K_2 x + Q_D \quad (6)$$

$$K_2 = \frac{V \cdot (1 + \tan(\alpha + \rho))^2}{(2 - C) \cdot R \cdot \cos \alpha} \quad (7)$$

$$Q_D = V \cdot \tan \rho \quad (8)$$

ここに、 K_2 は図-3 に示すバイリニアモデルの第2勾配、 Q_D は縦軸の切片、 C_V は摩擦係数の速度依存性を反映するために与えた粘性係数である。

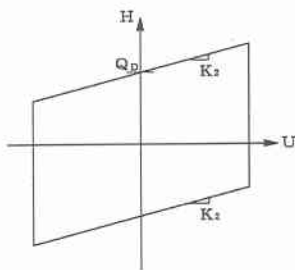


図-3 バイリニアモデル

振動台から加速度時刻歴 $\alpha_S(t)$ を加振したとした場合の運動方程式は、式 (9) のように表現され、式 (10) が成立する時には、式 (5) と式 (9) は等価である。

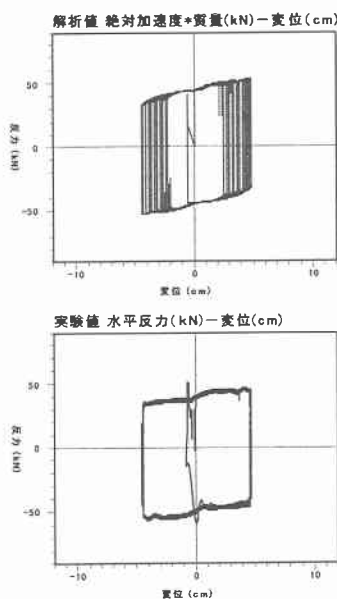


図-4 実験値と解析値の比較 (入力：正弦波 0.4775Hz)

$$M \cdot \left(\frac{d^2 x}{dt^2} + \alpha_S(t) \right) + F_B = 0 \quad (9)$$

$$\alpha_S(t) = -\frac{F_I}{M} \quad (10)$$

したがって、上部構造を直接に加振した実験は、アクチュエータ側からの水平力（ロードセル測定値） F_I を式 (10) に代入して得られる $\alpha_S(t)$ をモデルの基部から入力したのと同じことになる。

実験で使用した供試体の上部構造はほぼ剛体と考え、式 (6)～式 (8) に示した復元力特性を有する 1 質点 1 自由度のモデルを想定して動的解析を行った。

実験を行った载荷ケースの各々について、摩擦係数 μ を変化させながら解析を行い、実験値を最も良く再現する摩擦係数 μ の値を求めた。動的解析によって求めた上部構造挙動と免震装置の復元力ー変位関係を実験値と比較しながら図-4～図-7に示す。

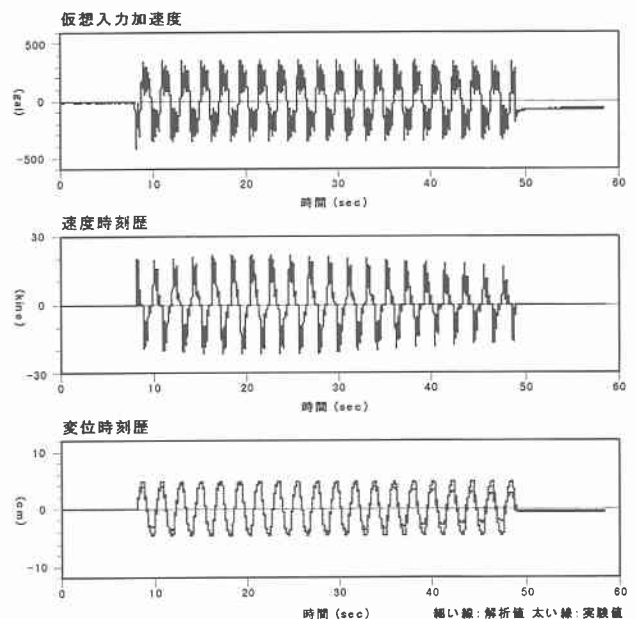
解析結果で、免震装置の復元力ー変位関係履歴曲線の縦軸は、式 (6) に示した構成則による免震装置の水平反力 F_B である。

実験結果で、免震装置の復元力ー変位関係履歴曲線の縦軸は、ロードセルによって測定したアクチュエータ側からの水平力 F_I と、上部構造加速度時刻歴（加速度計測定値） $\alpha_U(t)$ を式 (11) に代入して求めた免震装置の水平反力実験値 F_B である。

$$F_B = F_I - M \cdot \alpha_U(t) \quad (11)$$

仮想入力加速度として示したのは、アクチュエータ側からの水平力（ロードセル測定値） F_I を式 (10) に代入して求めた $\alpha_S(t)$ の時刻歴である。

応答変位時刻歴は、実験値を太線、解析値を細線で重ねて示している。



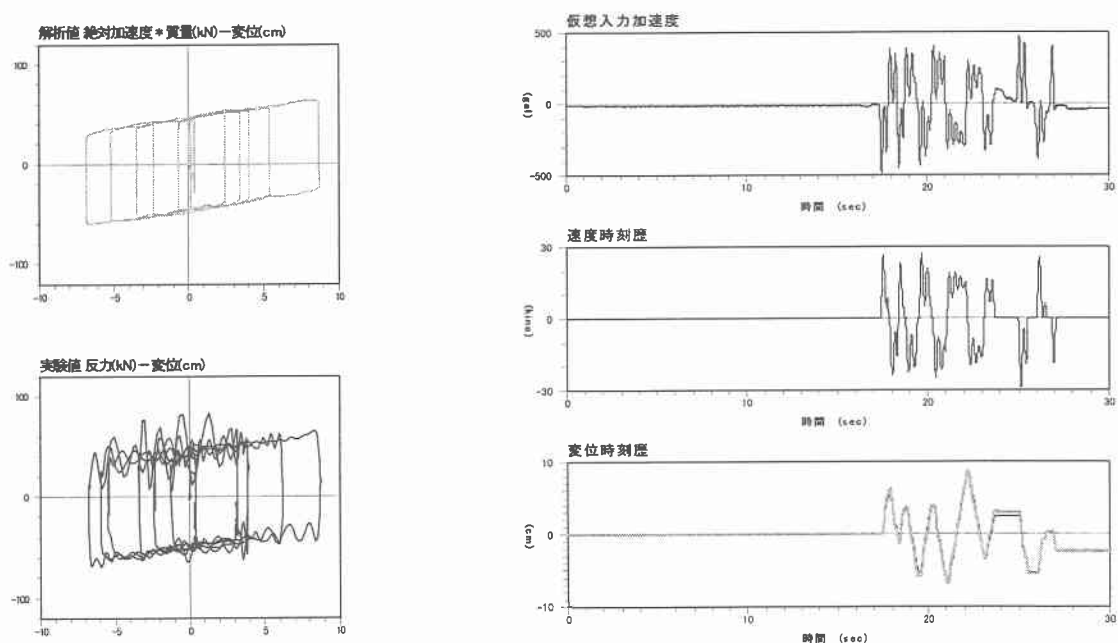
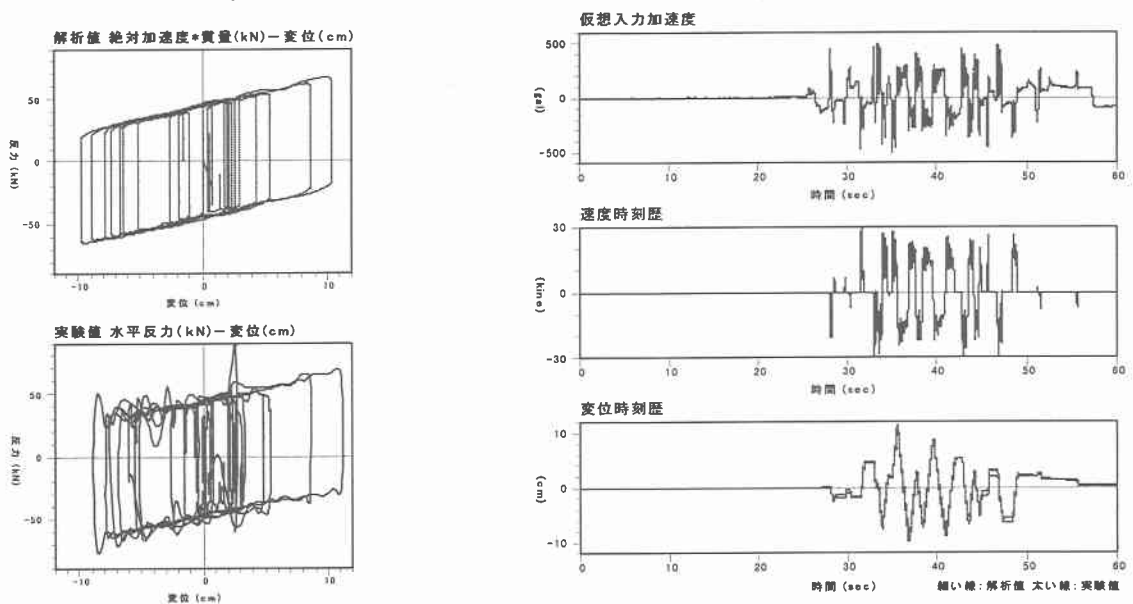
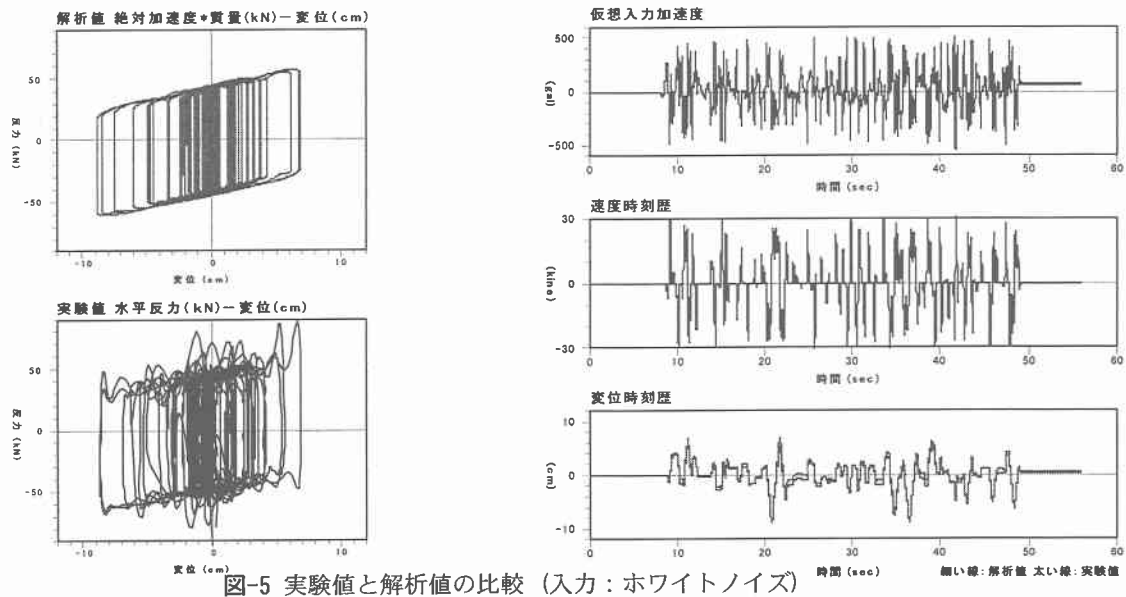


図-4～図-7 に示すどのケースにおいても、免震装置の変位時刻歴および免震装置の復元力-変位関係履歴曲線は、実験値に良く一致させることができた。このことから、これまでに提案して来た構成方程式を適用できると考えた。

構成方程式に適用する摩擦係数 μ を変化させながら行った解析の各ケースにおいて、最終的に収束した μ の値を表-1 に示す。

表-1 実験ケースの解析で収束した摩擦係数

	載荷パターン		入力波形	上部構造 最大振幅	摩擦 係数
1	比較的小さい 振幅時	定常振動 載荷 0.4775 Hz	正弦波 変位制御	50mm	0.1768
					0.1780
					0.1782
2		ホワイト ノイズ波	ホワイトノイズ波 変位制御	50mm	0.1722
					0.1741
					0.1752
3	比較的大きい 振幅時	定常振動 載荷 0.15915 Hz	正弦波 変位制御	150mm	0.1560
					0.1553
					0.1584
4		ホワイト ノイズ波	ホワイトノイズ波 変位制御	150mm	0.1714
					0.1650
					0.1665
5		TYPEⅠ 地震動	温根沼大橋 波形	動的応答値 (180.9mm)	0.1696
					0.1717
					0.1737
6			温根沼大橋 波形	動的応答値 (28.0mm)	0.1649
					0.1652
					0.1663
7			JR鷹取駅 波形	動的応答値 (150.0mm)	0.1798
					0.1820
					0.1820
8			JR鷹取駅 波形	動的応答値 (40.9mm)	0.1783
					0.1789
					0.1801
9		TYPEⅡ 地震動	神戸海洋 気象台波形	動的応答値 (150.0mm)	0.1796
					0.1789
					0.1793
10			神戸海洋 気象台波形	動的応答値 (20.9mm)	0.1681
					0.1735
					0.1743
					0.1803

どのケースについても摩擦係数 μ は約0.17 を示している。今回の実験用供試体として用いた免震装置のPTFE面圧は2.9MPa程度であって、やや低い設定となっている。

PTFEの摩擦係数は面圧の影響を受け、面圧が低い場合には摩擦係数が高くなる傾向を持つことが知られている。文献2)などの面圧-摩擦係数関係では、面圧が20MPa程度の時に摩擦係数 μ は0.1、1.0MPa程度の時に μ は0.14となることが報告されている。今回の実験による摩擦係数 $\mu=0.17$ の結果は、これら既報の結果とも整合する。

また、文献2)などに報告されている面圧-摩擦係数関係を参考に、面圧が15～20MPa程度となる実橋梁の免震支承の摩擦係数は約0.1になると考えられる。

4. まとめ

PTFE と鋼の摩擦を利用する免震装置を開発し、形状係数 $C=0.6$ の供試体を用いた载荷実験によって、その復元力特性を調べてきた。

設計上の必要があって上下杓と回転子の曲率半径 R をこれまでより大きくする必要がある場合が想定される。

そこで本論文では、形状係数 $C=0.1$ (回転子の曲率半径 $R=57.0\text{cm}$, 回転子の厚さ $t=5.7\text{cm}$) の場合について実験を行い、シミュレーション解析によって構成方程式の適用性を調べた。

その結果わかったことは次の通りである。

- ① C が非常に小さい場合であってもこれまでに提案して来た構成方程式によって復元力特性を予測することができる。
- ② 構成方程式に適用すべき摩擦係数 μ を、今回の実験から推定すると約0.17である。
- ③ PTFE の摩擦係数が面圧の影響を受けることを考慮すると、実橋の免震装置が受ける面圧 15～20Mpa のもとでは摩擦係数は約0.1になると考えられる。

参考文献

1) 三田村 浩, 池田 憲二, 林 亜紀夫, 別所 俊彦: PTFE と鋼の摩擦を利用する免震装置の開発, 土木学会第2回免震・制震コロキウム講演論文集, pp.165～172, 2000.11.
2) 玉木, 小川, 河, 鶴野, 比志島, 「摩擦減衰型免震装置の摩擦特性に関する実験的検討」, 鋼構造年次論文報告集, pp.89-94, Vol.7,1999.11