

摩擦係数のばらつきがすべり摩擦型免震支承を有する橋梁 の地震応答に及ぼす影響

名畑英樹¹・伊津野和行²

¹学生会員 立命館大学大学院理工学研究科（〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1）

²正会員 工博 立命館大学教授 理工学部都市システム工学科（〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1）

1. はじめに

近年、免震支承の1つであるすべり摩擦型免震支承の利用が進められてきている^{1),2)}。すべり摩擦型支承を有する橋梁では、鉛直地震応答によって支承部のすべり面の面圧が変動し、摩擦係数が変動することが予測される^{3),4)}。しかし、1つ1つの支承では摩擦係数が変動するものの、橋梁全体では変動が少ない可能性がある。

そこで本研究では5径間連続橋をモデル化して摩擦係数の変動を考慮した地震応答を計算し、シミュレーションを通してすべり摩擦型免震支承の合理的設計手法の確立を目的とする。

2. すべり摩擦型免震支承

すべり摩擦型免震支承は、すべり面に PTFE とステンレスとを接触させ、その間ですべり摩擦が生じることを利用し、地震のエネルギー吸収をねらったものである。

すべり摩擦免震支承は図-1 に示すように、荷重支持板は薄いゴムからなり、常時の鉛直荷重支持と、桁の回転吸収を行う。水平荷重分散装置は横置きタイプで、天然ゴムの積層ゴムからなり、地震時における慣性力の分散と3方向の変位制限装置として働く。スライド部では、PTFE とステンレスとの間ですべり摩擦による、地震時の揺れの長周期化と摩擦減衰の付加を狙っている。

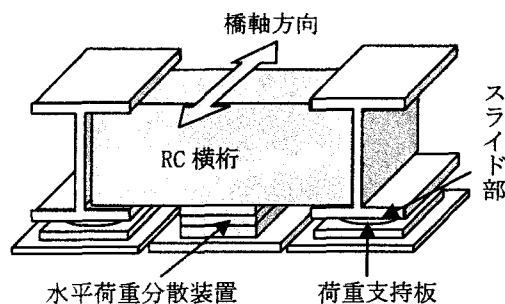


図-1 すべり摩擦型免震支承の概念図

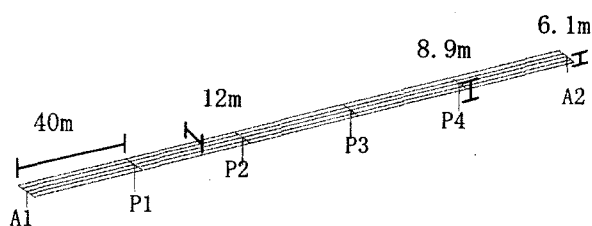


図-2 モデルの概略図

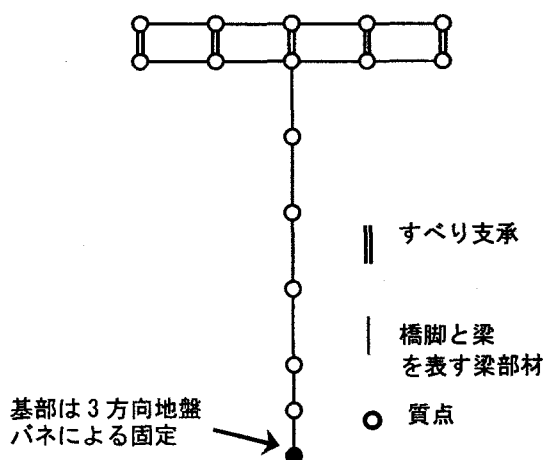


図-3 橋軸方向から見たモデル

3. モデル概要

道路橋の耐震設計に関する資料⁵⁾を参考に、5径間連続橋を図-2 に示すように3次元にモデル化

（図-3 は橋軸方向から見たモデル）し、スパン長 40.0m、幅員 12.0m、橋台 A1、A2 の地盤からの高さ 6.1m、橋脚 P1～P4 の地盤からの高さ 8.9m とした。

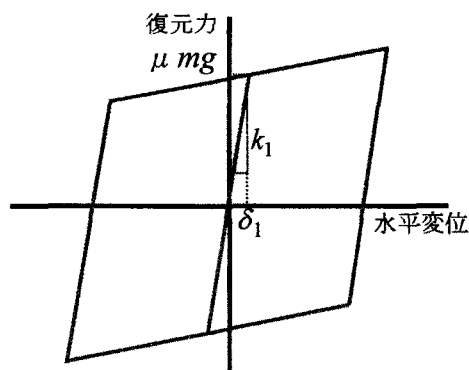


図-4 水平バネの履歴特性

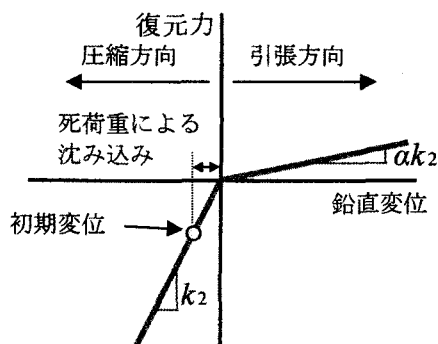


図-5 鉛直バネの履歴特性

2本の橋台4本の橋脚の各柱頭部には、5つのすべり摩擦型免震支承を設置し、計30個の支承を有する橋梁とした。

モデル化にあたって、スライド面と水平荷重分散装置を合わせて水平バネに置き換え、荷重支持板は鉛直バネに置き換えた。水平バネを橋軸・橋軸直角両方向に設置する全方向免震とし、履歴復元力モデルは図-4に示すバイリニアを用いた。初期剛性は一定とし、摩擦係数の違いにより、摩擦力が変動するように設定した。ただし、実際には鉛直力の変動によって摩擦力も変動するが、ここではソフトウェアの制限により、鉛直バネとの連成は考えていない。摩擦係数は後述するように乱数で与えるケースも取り扱ったが、その値と死荷重とから決まる初期摩擦力は、地震応答中一定とした。

鉛直バネは、鉛直力が正（引張方向）になった時に第2剛性に移行するものとし（図-5）、その時の剛性低下率 α は実験値を参考に0.2とした⁴⁾。なお、圧縮方向は常に弾性域とする、マルチリニアである。

橋脚には非線形特性を考慮し、橋脚基部にバイリニアの骨格を持った剛性劣化（Takeda）型回転バネを用いた。地盤バネは線形とした。

表-1に各バネの設定値を記す。

表-1 各バネの設定

位置	バネ要素	バネの種類	バネ定数(kN/m)
橋台A1,A2の外側の支承	水平バネ	バイリニア	14424
橋台A1,A2の内側の支承	水平バネ	バイリニア	16027
橋脚P1~P4の外側の支承	水平バネ	バイリニア	28849
橋脚P1~P4の内側の支承	水平バネ	バイリニア	32054
荷重支持板(橋台A1,A2)	鉛直バネ	マルチリニア	5.00E+05
荷重支持板(橋脚P1~P4)	鉛直バネ	マルチリニア	1.00E+06
橋脚基部(橋軸方向)	回転バネ	剛性劣化型	1.25E+08
橋脚基部(橋軸直角方向)	回転バネ	剛性劣化型	6.00E+08
地盤(水平方向, 橋台A1,A2)	水平バネ	線形	3.68E+06
地盤(水平方向, 橋脚P1~P4)	水平バネ	線形	2.76E+06
地盤(鉛直方向, 橋台A1,A2)	鉛直バネ	線形	5.35E+06
地盤(鉛直方向, 橋脚P1~P4)	鉛直バネ	線形	4.01E+06
地盤(橋軸方向, 橋台A1,A2)	回転バネ	線形	5.22E+07
地盤(橋軸直角方向, 橋台A1,A2)	回転バネ	線形	8.75E+07
地盤(橋軸方向, 橋脚P1~P4)	回転バネ	線形	3.92E+07
地盤(橋軸直角方向, 橋脚P1~P4)	回転バネ	線形	3.92E+07

表-2 ランダム設定時の各支承の摩擦係数

(a) ランダム 1

		A1	P1	P2	P3	P4	A2
主桁	G1	0.148	0.077	0.097	0.139	0.057	0.150
	G2	0.141	0.127	0.067	0.096	0.126	0.117
	G3	0.131	0.055	0.140	0.076	0.060	0.138
	G4	0.117	0.106	0.057	0.057	0.100	0.090
	G5	0.090	0.097	0.070	0.072	0.128	0.118

(b) ランダム 2

		A1	P1	P2	P3	P4	A2
主桁	G1	0.091	0.057	0.120	0.091	0.106	0.129
	G2	0.080	0.097	0.132	0.132	0.125	0.070
	G3	0.104	0.145	0.141	0.137	0.082	0.121
	G4	0.108	0.143	0.144	0.127	0.119	0.101
	G5	0.138	0.052	0.088	0.111	0.147	0.092

(c) ランダム 3

		A1	P1	P2	P3	P4	A2
主桁	G1	0.056	0.087	0.085	0.058	0.081	0.064
	G2	0.052	0.080	0.061	0.055	0.061	0.058
	G3	0.143	0.098	0.058	0.107	0.133	0.064
	G4	0.056	0.128	0.094	0.052	0.098	0.127
	G5	0.078	0.125	0.060	0.112	0.083	0.149

4. 解析方法

解析には、Newmark β 法 ($\beta = 1/4$) を用いた。積分時間刻みは0.01秒とし、減衰にはRayleigh減衰を用いた。

入力地震波には、橋軸方向に道路橋示方書に準拠したレベル2タイプ2のI種地盤標準波形の波形1、最大加速度812cm/sec²を用いた。橋軸直角方向に同じく標準波形2、最大加速度766cm/sec²を用いた。

解析にあたり、以下のケースを検討した。

- ①全支承の摩擦係数を一定値とした場合。摩擦係数としては、0.05、0.10、0.15の3種類を用いた。
- ②全ての支承の摩擦係数を一様乱数を使って、0.05

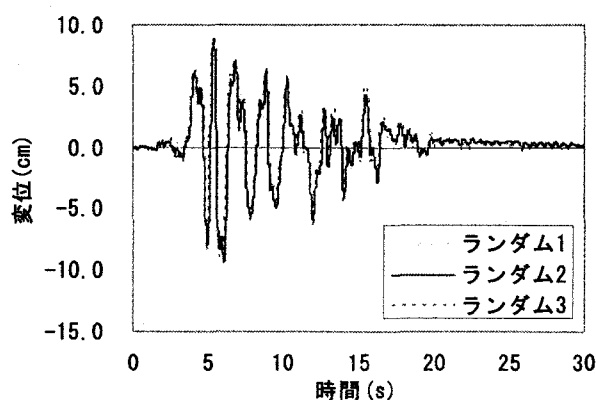


図-6 桁の時刻歴変位応答(橋軸方向)

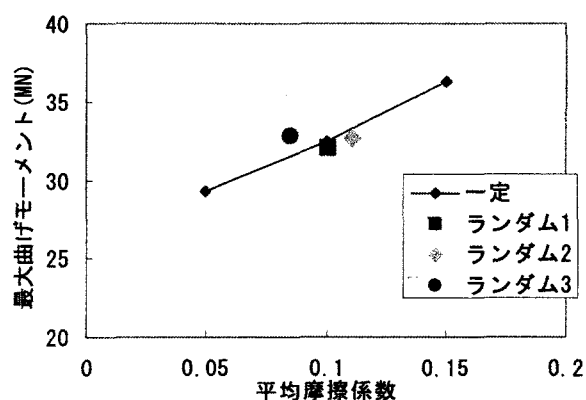


図-8 最大曲げモーメント(橋軸方向)

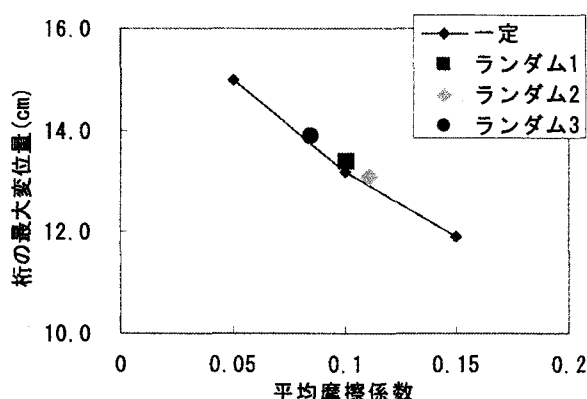


図-7 桁の最大変位(橋軸方向)

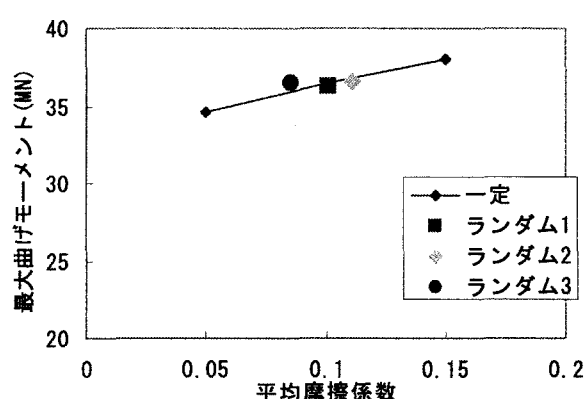


図-9 最大曲げモーメント(橋軸直角方向)

～0.15 の間でランダムにした場合. ここでは, 表-2 に示す 3 ケースについて検討した. 表 2-(a) は平均摩擦係数が中間の 0.10 に近いサンプルを抽出したもので, 平均摩擦係数は 0.101 となった. 表-2(b), (c) はそれぞれ比較的平均摩擦係数が大きいもの, 小さいものを抽出した. それぞれ平均摩擦係数は 0.111, 0.085 となり, 表-2(a), (b), (c)を順に, ランダム 1, ランダム 2, ランダム 3 とする. また, 表内の A1, A2 及び P1～P4 は図-2 のモデル概略図にそれぞれ対応している.

5. 地震応答解析

(1) 桁の応答

ここでは, 桁の変位応答を検討していく.

図-6 は摩擦係数をランダムにした 3 ケースを橋軸方向への時刻歴応答で表したものである. 図-6 から, あまり大きな違いが見られない(最大値の差は 2%, rms 値の差は 4%) ため, 摩擦係数がばらついていても, 桁の変位応答にあまり大きな影響が

ないことがわかる.

図-7 はそれぞれのケースの橋軸方向への桁の最大変位を算出し, それを支承全体の平均摩擦係数でプロットしたものである. 摩擦係数を一定にしたグラフとランダムにしたケースを比較すると, ほぼ一致していることがわかる. また, ランダム 3 ケースの平均摩擦係数は 0.99 で, 平均最大変位量は 13.5cm となり, 0.10 一定の最大変位は 13.3cm となった. これらにより, 桁の最大変位は摩擦係数がばらついたとしても影響はなく, 支承全体が持つ摩擦係数の平均値によって影響されることがわかった.

また, 橋軸直角方向においては, ランダム 3 ケースの平均最大変位 9.4cm となり, 0.10 一定の最大変位は 9.2cm となったことから, 橋軸方向の結果と同様の傾向を持っており, 橋軸直角方向においても橋軸方向と同様のことが言える.

(2) 橋脚の応答

ここでは, 橋脚にかかる曲げモーメントの応答と橋脚基部のねじれについて検討していく. 図-8 は, それぞれのケースにおける橋軸方向の P1 橋脚基部

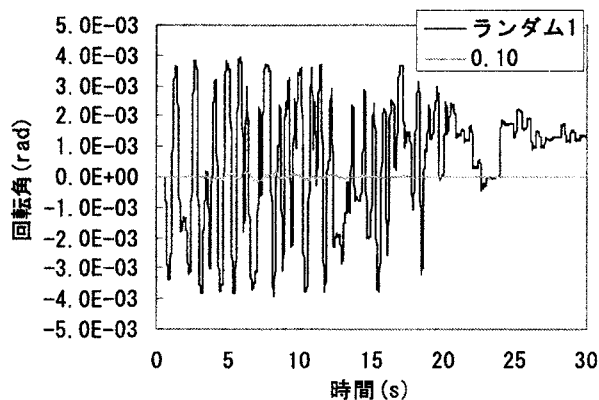


図-10 一定とランダムとのねじれに関する比較

表-3 橋脚基部回転角の比較

回転角 ($\times 10^{-4}$ rad)	ランダム1	ランダム2	ランダム3	一定(0.10)
最大値	39.4	19.2	3.09	4.5

にかかる最大曲げモーメントを算出し、それを支承全体の平均摩擦係数でプロットしたものである。

図-9 は、同じく橋軸直角方向の最大曲げモーメントを算出し、それを支承全体の平均摩擦係数でプロットしたものである。

図-8 及び図-9 を見ると、摩擦係数が一定の場合では、摩擦係数が増加するにつれて最大曲げモーメントも増加している。これは、摩擦係数の増加により支承変位が減少し、摩擦減衰が減少することが要因である。また、等価固有周期が短くなる（4 秒付近の大きな応答を示す部分における 1 周期は、摩擦係数 0.05 で 1.2s、0.10 で 1.12s、0.15 で 1.08s）ことによって地震時慣性力が大きくなる影響もあろう。これに対し、ランダムのケースでは最大曲げモーメントに少しばらつき（最大 4%）があることがわかる。これは、摩擦係数がばらつくことにより、支承変位にもばらつきが生じる。それにより摩擦減衰が変動し、橋脚に与える影響が変わってくると考えられる。

また、同ケース内における P1～P4 各橋脚の最大曲げモーメントは、一定の場合ではほとんど差はなかった（1%以下）。それに対し、ランダムの場合では、支承変位のばらつきにより、P1～P4 橋脚基部の曲げモーメントにばらつきが生じた。両方向共に最大曲げモーメントに最大約 4%の差が生じた。

橋脚基部のねじれに関しては、図-10 はランダム 1 と一定値を比較したもので、ランダム 1 ではねじれが生じていることがわかる。このねじれは、橋脚柱頭部 1 支線上の 5 つの支承の摩擦力の違いにより

励起されたと考えられる。また、表-3 から、ランダムの場合でもランダム 3 ケースでねじりにばらつきが生じた。このことから、ねじれに関しては、支承の摩擦力及び、ばらつきが大きく影響していることがわかる。

6. おわりに

本研究では、すべり摩擦型免震支承の摩擦係数のばらつきが橋脚に与える影響を検討した。今回の研究では、ランダムケースが 3 ケースと少ないサンプル数での検討であったため、ランダムに関する解析結果に偏りが出ている可能性が考えられる。そのため、今後はサンプル数を増やし、信頼性を増していくことが必要である。

本研究で得られた主な結論は以下の通りである。

- 1) 桁の変位に関して、摩擦係数のばらつきにはあまり影響せず、平均摩擦係数の増加に伴い、桁の最大変位は減少する。
- 2) 摩擦係数が一定であると、摩擦係数の増加による支承変位の減少と等価固有周期の減少により摩擦減衰が減少し、最大曲げモーメントは増加する。
- 3) 摩擦係数がばらつくと、最大曲げモーメントにもばらつきが生じた。その最大差は 4%程度であった。
- 4) 摩擦係数のばらつきにより、橋脚基部にねじれを確認した。また、ねじれは、支承の摩擦力及び、ばらつきに影響する。

参考文献

- 1) 岡本晋，藤井俊二，尾崎大輔，Constantinou, M.C., Tsopelas, P.C.: すべり方式免震システムを有する橋梁の動特性に関する実験的研究，土木学会論文集，No.507/I-30, pp. 167-177, 1995.
- 2) 伊津野和行，袴田文雄，中村一平：機能分離型支承装置の動特性と設計手法に関する研究，土木学会論文集，No.654/I-52, pp. 233-244, 2000.
- 3) 高橋良和，家村浩和，平井崇士：すべり型免震支承の軸力変動が連続桁橋の地震応答に及ぼす影響，第 26 回地震工学研究発表会講演論文集，Vol. 2, pp. 1077-1080, 2001.
- 4) 伊津野和行・川原林浩・長沼敏彦・西岡勉：すべり摩擦型免震支承装置の上揚力に対する性能評価，土木学会論文集，No. 780/I-70, pp. 165-179, 2005.
- 5) 日本道路協会：道路橋の耐震設計に関する資料，1997.