

高摩擦沓による橋梁の耐震性能向上効果に関する基礎的研究

広島工業大学大学院	学生会員	○大谷 芳範	(株)エス・エフエンジニアリング	フェロー会員	大倉 幸三
広島工業大学工学部	フェロー会員	中山 隆弘	川口金属工業(株)	正会員	鶴野 禎史
			川口金属工業(株)	正会員	炭村 透

1. 緒言

近年、大地震時における構造物の損傷・被害軽減を目的とした種々の免震支承が開発され、実用化されている。そのひとつに、桁と支承表面との摩擦現象によるエネルギー吸収能力を有した滑り支承があり、これまでもその摩擦特性に対する実験的あるいは解析的研究が数多く行われている。また、材料開発という点からも、より大きいエネルギー吸収を図ることを目的とした高摩擦係数を有する滑り材が開発されている¹⁾。

そこで本研究では、高摩擦滑り支承を有する小型模型を対象に振動実験を行い、滑り支承を用いた場合の橋梁の耐震性能向上効果について検討すると共に、数値解析との比較も併せて行った。

2. 実験概要

2.1 加振装置

本実験では、本学の耐震防災研究棟に設置している油圧サーボ式水平垂直同時 2 軸振動試験機（島津製作所 EHV-5x/4z 形）を使用した。振動台は加速度制御によってコントロールした。

2.2 モデル及び計測項目

実験モデル及び加速度計等の計測位置を図-1 に示す。実験モデルは図-1 に示す通り、橋梁の上部工を想定した鋼板+H 形鋼（総質量 524.4kg, 860.7kg, 1197.0kg の 3 ケース）を四隅の小型滑り支承で支えたものである。川口金属(株)で製作された滑り支承は滑り材と桁に貼付した相手材のみで構成される剛滑り支承であるため、桁の中間に 1 本あたり 24040N/m のバネ定数を有するバネを 2 本、4 本、6 本の組合せて設置した。

また計測項目は振動台と桁の各加速度と両者の相対変位であり、計測器は前者が小型加速度計(共和産業、AS-1GA)、後者が高感度変位計(東京測器、CDP-100)である。

2.3 滑り支承

滑り支承は滑り材として、充填材入り PTFE（グラスファイバー15%、二硫化モリブデン5%混入）が用いられ、相手材としてはステンレス（SUS316）が用いられている。

2.4 実験ケース

実験ケースを表-1に示す。本実験では、桁の上部に搭載した鋼板の質量（計3ケース）とバネの本数（計3ケース）を変えて計9ケースの実験モデルに対して行った。

2.5 入力地震波

入力地震波は、水平方向のみとし、次に示す2波の N-S 成分を選定した.

- ・1978年宮城県沖地震(ﾀｲﾌﾟⅠ)－開北橋周辺地盤上記録
- ・1995年兵庫県南部地震(ﾀｲﾌﾟⅡ)－神戸海洋気象台地盤上記録

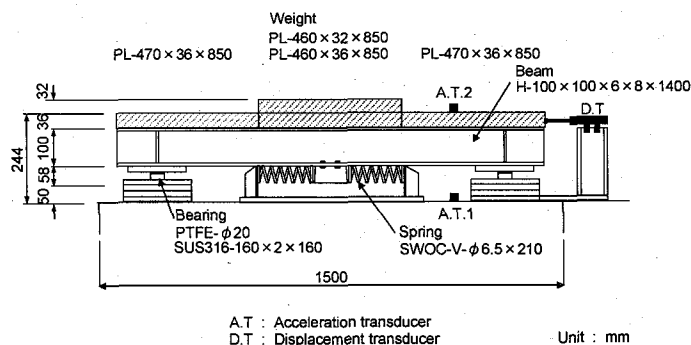


図-1 実験モデル及び計測位置

表-1 実験ケース

ケース名	質量 m kg	バネ定数 k N/m	固有振動数 fs Hz	面圧 p MPa
a-a	1197.0	48080	1.01	9.34
a-b	860.7		1.19	6.72
a-c	524.4		1.52	4.09
b-a	1197.0	96160	1.43	9.34
b-b	860.7		1.68	6.72
b-c	524.4		2.16	4.09
c-a	1197.0	144240	1.75	9.34
c-b	860.7		2.06	6.72
c-c	524.4		2.64	4.09

また、観測波の加速度振幅についてはそれぞれ、150gal, 250gal, 350gal, 450gal を目標に調整した。

3. 数值解析法

本研究では摩擦振動特有のすべり・止まり特性や摩擦力の不連続性を合理的に処理する数値解析法²⁾により解析を行った。

摩擦力を含む，時刻 t_{i+1} における 1 自由度振動系の振動方程式は式(1)で与えられる。

$$m\ddot{y}_{i+1} + c\dot{y}_{i+1} + ky_{i+1} + f_{i+1} = -m\ddot{\phi}_{i+1} \quad (1)$$

式中,

m, c, k : 質量, 減衰係数, バネ定数

 $\ddot{\phi}, \ddot{y}, \dot{y}, y$: 地動加速度, 質点の加速度, 速度, 変位 f : 摩擦力

式(1)にニューマークの β 法における加速度, 速度, 変位の関係式を代入して式(2)が得られる. 誘導過程の詳細については参考文献2)を参照されたい.

$$a\dot{y}_{i+1} + f_{i+1} = -m\ddot{\phi}_{i+1} - b\ddot{y}_i - d\dot{y}_i - ky_i \quad (2)$$

$$a = 2m / \Delta t + c + 2\beta k \Delta t$$

$$b = (1/2 - 2\beta)k\Delta t^2 - m$$

$$d = (1 - 2\beta)k\Delta t - 2m / \Delta t$$

式(2)は i ステップの加速度，速度，変位を与えて $i+1$ ステップの速度と摩擦力を求める式となっている．この式を，摩擦力を含む振動現象特有の「とまり条件」と「すべり条件」の下で解けば，各時刻の応答量が計算できるが，紙面の都合で詳細については発表当日述べる．

4. 実験結果 - 耐震性能向上効果 -

表-1 に示したモデル a-a ($m=1197.0\text{kg}$, $k=48080\text{N/m}$) で、入力波を兵庫県南部地震波 (加速度振幅 350gal) とした時の振動台加速度(a), 桁加速度(b), 相対加速度(c), 相対変位(d)を、それぞれ図-2 に示す。また、摩擦力と相対変位の関係を図-3 に示す。ここに、図-3 に示す摩擦力は粘性減衰項を0として式(1)より算出した結果である。

図-2(c), (d) より経過時間約 3~6 秒間において、桁と振動台とに相対変位、相対加速度が生じている。つまり滑り現象が生じていることがわかる。その時の桁と振動台の加速度に着目すると、図-2(a), (b) より分るように、桁加速度が振動台加速度よりかなり下回っている。具体的には振動台の加速度が 350.8gal であるのに対し、桁の加速度は 278.3gal であり、約 20% 下回っている。

ただ、今回の実験では桁加速度が振動台加速度を上回る結果を示すケースがいくつかあった。この原因については、現時点では、鋼板と鋼板を結合するボルトの締付け不足が及ぼす鋼板間の衝突によるものと考えている。

5. 数値解析結果

本解析では、実験の結果と比較を行うため、減衰定数を0と仮定した。また、摩擦係数については0.2とした。これはすべり材メーカーが行った滑り支承の面圧依存性試験の結果を参考にした値である。

図-2, 3 に実験で得られた結果と共に解析結果を示している。図-2(b), (c) より桁加速度、相対加速度とともに、振動波形の傾向は両者ではほぼ一致しているものの、最大値は若干異なっていることが分かる。また、同じく図-2(d) および図-3 より、相対変位については両者にかなりの差異が認められる。特徴的な点は、解析では「止まり現象」が顕著に現れていることである。これは、仮定した摩擦係数が過大であるためではないかと考えられる。すなわち、摩擦係数は、速度や面圧に依存し、振動中必ずしも一定ではないにも関わらず、解析ではそこまで考慮していないためではないかと考えられる。

6. まとめ

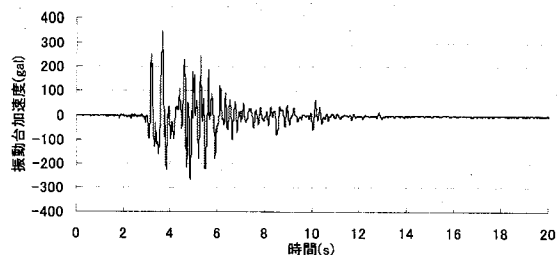
本研究では、高摩擦係数を有する剛滑り支承の免震効果を確認するための模型振動実験と数値解析を行った。

得られた知見は次のように要約できる。

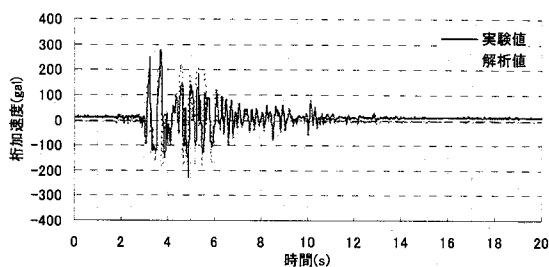
- 1) 滑り支承上の桁を滑らすことにより桁の応答加速度を振動台加速度より低減することができる。このことは、桁から橋脚への慣性力の減少を意味しており、滑り支承による一定の免震効果が期待できることを意味している。ただし、今回はそのような結果が得られないケースもあった。この原因については今後の検討課題である。
- 2) 数値解析上の問題点としては、摩擦係数の面圧や速度依存性がある。

7. 謝辞

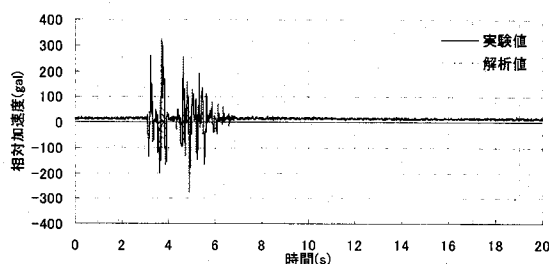
(株)リョーセンエンジニアズ技術計算センタ次長山本利弘工学博士には数値解析法についていろいろと教示いただきました。ここに深く感謝いたします。また、本実験において精力的に協力してくれた本学4年生(当時)の藤本哲也君、山口拓人君に深く感謝いたします。



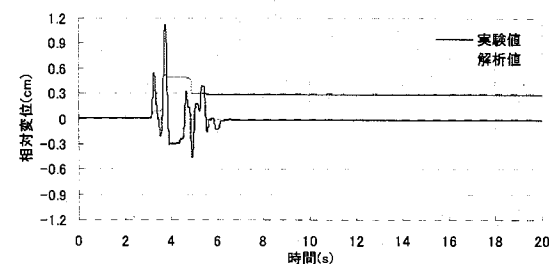
(a) 振動台加速度



(b) 桁加速度



(c) 相対加速度



(d) 相対変位

図-2 応答波形

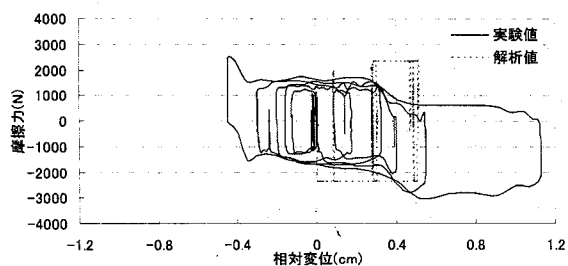


図-3 摩擦力-相対変位関係

参考文献

- 1) 炭村透, 鵜野禎史, 中山隆弘, 大倉幸三, 山本利弘: 高摩擦係数を有する焼結金属系すべり材の基礎的研究, 第8回地震時保有耐力法に基づく橋梁等構造耐震設計に関するシンポジウム講演論文集, pp.97-102, 2005.2
- 2) 山本利弘, 藤谷義信: 摩擦要素を含む構造物の非線形振動解析手法について(1, 2 自由度系への適用), 広島大学工学部研究報告, pp.183-192, 1995.2