

## 滑り支承の速度・荷重依存性のモデル化と免震効果に関する研究

京都大学大学院 学生員 田中 寛人  
 京都大学大学院工学研究科 正員 高橋 良和  
 京都大学大学院工学研究科 フェロー 家村 浩和

## 1. 概要

本研究では、滑り支承の数値モデルとして、トライボロジー(摩擦学)理論に着目し、摩擦面に作用する荷重および滑り速度による依存性を同時に考慮した摩擦力変動のモデル化を行った。また、そのモデルを用いて、桁たわみ振動による軸力変動が滑り型免震支承を有する連続桁橋梁の地震時性能に及ぼす影響について検討した。

## 2. 速度・荷重依存型滑り支承のモデル化

従来知られているクーロンの法則に対して、トライボロジーの分野では、Bowden-Taborによって提出された凝着理論が乾燥摩擦の基本原則と考えられている。これは、摩擦力は凝着部をせん断するのに必要な力(凝着項  $F_a$ ) (図-1) と、物体の移動する前方にある物体を押し退けるのに必要な力(掘り起こし項  $F_p$ ) の和によって与えられるとする理論である。ただし、摩擦滑り支承のように摩擦面の表面粗さが小さいときには掘り起こし項は無視でき、次式のように近似できる。

$$F = F_a + F_p \cong F_a \quad (1)$$

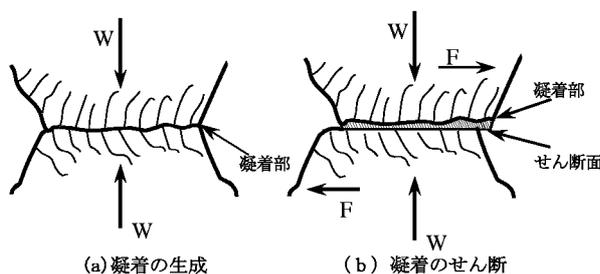


図-1 凝着部の生成とせん断

我々が面接触と呼ぶ接触における実際の接触面積(これを真実接触面積と呼ぶ)は見かけの面積に比べて極めて小さく、弾性または塑性変形をした無数の接触部が分散して存在している。その面積  $A$  は、接触部が弾性変形している場合はヘルツ接触理論より、塑性変形している場合は釣り合い式より、次のように求められる。

$$\text{弾性変形: } A = \pi a^2 = \pi \left( \frac{3R}{2E} \right)^{\frac{2}{3}} \propto W^{\frac{2}{3}}, \quad \text{塑性変形: } A = \frac{W}{p_m} \propto W^1 \quad (2)$$

ここで、 $R$ 、 $E$ 、 $p_m$  はそれぞれ真実接触部における等価(曲率)半径、等価縦弾性係数、平均降伏圧。

(2) 式を一般化すると、荷重  $W$  で接触させたときの真実接触面積  $A$  は次式のように示される。

$$A \propto W^n \quad (3)$$

ここで、 $n$  は接触面が荷重を受けた時に生じる変形の性質で、完全塑性変形の場合は  $n = 1$ 、完全弾性変形の場合は  $n = 2/3$  となり、その間の範囲で変化する。

真実接触部は、高い接触圧力のため降伏して凝着しており、この凝着部分をせん断することが必要となる。このせん断力が摩擦力となり、次式で表される。

$$F = sA \propto sW^n \quad (4)$$

ここで、 $s$  は凝着部のせん断強さ。この式には滑り速度項が入っていないが、従来の研究より、 $s$  や  $p_m$  が変形速度によって変化することが知られている。よって、速度依存については岡本らの研究を参考にして設定し、滑り支承の摩擦力の変動を次のようにモデル化した。

$$F = kf(v)W^n, \quad f(v) = 1 - \exp(-av) \quad (5)$$

ここに、 $v$  は滑り速度、 $W$  は荷重、 $k$ 、 $n$  は荷重依存性を規定する係数、そして  $a$  は速度依存性を規定する係数である。

従来の研究でよく用いられる面圧とは、垂直荷重を見かけの接触面積で除した値であり、上記のような摩擦機構に即していない便宜的なものであるといえる。過去の研究では、滑り支承の摩擦変動モデルとして摩擦係数の面圧依存性が検討されていたが、本研究における(5)式は摩擦力であり、荷重依存性を扱うものとなる。

Key Words: 滑り型免震支承、荷重・速度依存性、トライボロジー理論、軸力変動

〒606-8501 京都市左京区吉田本町 TEL(075)753-5088 FAX(075)753-5926

3. 軸力変動の影響を考慮した依存型モデルによる地震応答解析

提案したモデルを用いて、軸力変動を考慮した連続桁橋の地震応答解析を行う。まず、荷重・速度依存型モデルの近似については、(5)式について、最小自乗法により係数  $k, n, a$  の値を以下のように決定した。

$$F(v, W) = 0.237 [1 - \exp(-0.161v)] W^{0.95} \quad (6)$$

一方、一定型モデルは、滑り速度が高速で軸力が一定の場合を想定し、完全剛塑性モデルとする。この滑り支承に弾性ゴム支承を加えた免震システムを考える。解析対象橋梁は図-2の5径間連続鋼箱桁橋梁であり、P2橋脚を対象に、上部工と橋脚の2自由度2質点系にモデル化する。上部工と橋脚の重量は1124、567.1(tf)である。橋脚の復元力履歴特性としてトリリニア型モデルを用い、入力地震動は神戸海洋気象台記録を用いた。本研究に用いる軸力変動は、上下地震動に起因する橋桁のたわみ振動を用い、P2橋脚の支承部に生じる軸力変動を図-3に示す。

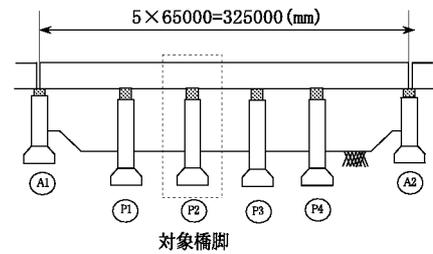


図-2 対象橋梁

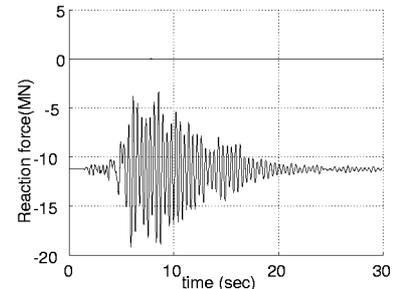


図-3 P2橋脚に生じる軸力変動

図-4に履歴曲線による解析結果の比較を示した。免震支承について、荷重・速度依存型モデルではその履歴形状がバイリニアの原型をとどめない程に変化している。ただし、図-5をみると、履歴形状から予想される程には、免震支承の履歴吸収エネルギーにそれほど違いは見られないことがわかる。この理由としては、軸力変動はするものの初期軸力を中立軸として振幅するため、結果として履歴曲線の面積はそれほど変化しないと考えられる。その結果として、橋脚の履歴についてはほとんど同じ形となった。

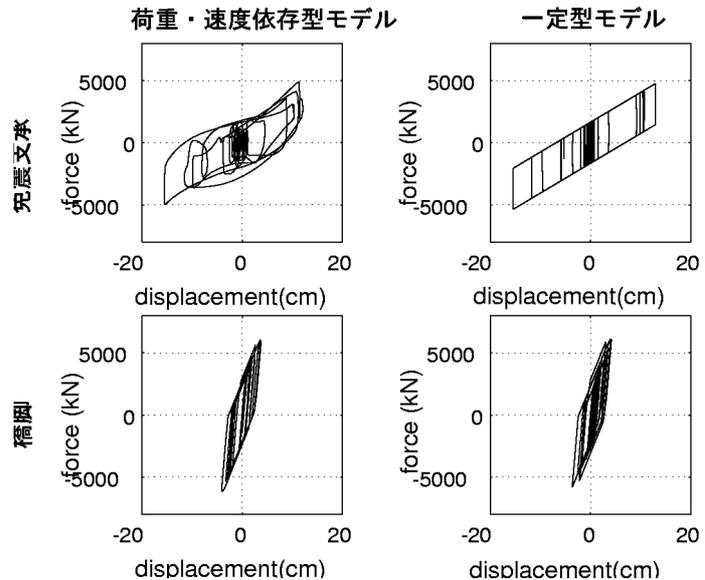


図-4 履歴曲線

4. まとめ

- トライボロジー理論に基づいて、荷重と速度による依存性を考慮した摩擦力の変動のモデル化を行なった。
- 今回の解析のように、軸力変動がそれほど大きくないときには、摩擦力一定(バイリニア)型モデルでも摩擦変動型モデルとほぼ同じ水平地震応答の結果を得た。

参考文献

- 1) 山本雄二：トライボロジー，理工学社，1998年。
- 2) 岡本晋・深沢泰晴・藤井俊二・尾崎大輔：すべり方式免震システムを有する橋梁の地震時挙動特性，土木学会論文集 No.513, I-31, pp191-200, 1995年4月。
- 3) Constantinou, M.C et al :Teflon Bearings in Base Isolation, 1990.
- 4) 高橋良和・家村浩和・平井崇士：滑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, pp1077-1080, 2001年8月。

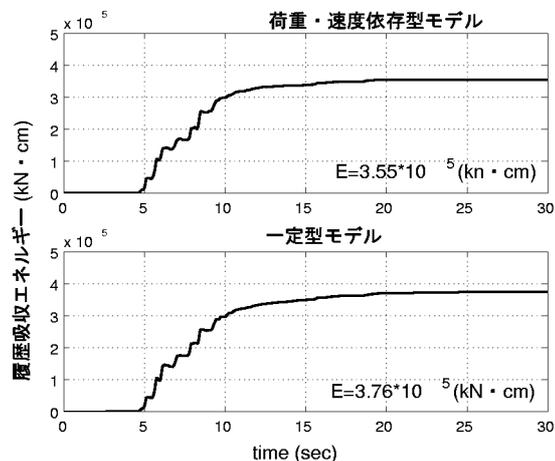


図-5 履歴吸収エネルギー