

마찰해석모델에 따른 PVDF/MgO 마찰재 적용 면진 장치가 설치된 교량의 성능 비교 분석

박 헤 리¹·김 성 조²·한 동 석^{3†}

¹연세대학교 건설환경공학과 석사과정, ²연세대학교 건설환경공학과 박사과정, ³연세대학교 건설환경공학과 교수

Performance Comparison Analysis of a Bridge Installed with Anti-seismic Devices using PVDF/MgO Friction Material According to Friction Analysis Models

Hye-Ri Park¹, Sung-Jo Kim² and Tong-Seok Han^{3†}

¹Graduate Student, Department of Civil and Environmental Engineering, Yonsei University, Seoul, 03722, Korea

²Graduate Student, Department of Civil and Environmental Engineering, Yonsei University, Seoul, 03722, Korea

³Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Yonsei University, Seoul, 03722, Korea

Abstract

In this study, structural analyses were conducted to analyze the performance of a bridge to which friction pendulum systems (FPSs) were applied using different friction models. A Coulomb friction model and a rate dependent friction model were constructed using the friction coefficient of a PVDF/MgO friction material to analyze the effect of different friction analysis models. The Coulomb friction model uses a single friction coefficient regardless of friction velocity, while the rate dependent friction model can reflect the change in the friction coefficient with friction velocity. Nonlinear time history and seismic fragility analyses were conducted to confirm responses of the bridge. The seismic responses of a deck and a column were used to evaluate the performance of the base isolated bridge, and a friction model that can effectively evaluate the performance of isolated bridges was analyzed.

Keywords : PVDF/MgO friction material, Coulomb friction, Rate dependent friction, Nonlinear time history analysis, Seismic fragility analysis

1. 서론

지진 격리 장치(seismic isolation device)를 이용하는 면진 설계는 구조물의 고유 주기를 인위적으로 변화시켜 지진 발생 시 구조물에 발생하는 공진 현상을 방지하고, 구조물이 받는 지진력을 감소시킬 수 있다(Buckle and Mayes, 1990). 여러 형식의 지진 격리 장치 중 마찰진자시스템(friction pendulum system, FPS)은 교량에 지진하중이 가해지는 동안 시스템 내에서 이뤄지는 마찰 진자 운동으로 안전성을 유지하는 교량 받침이다(Zayas and Mahin, 1987). 본 연구에서는 FPS 면진 장치의 마찰모델링 기법에 따른 교량의 응답 특성에 대해 조사하였다.

FPS의 마찰재로 널리 사용되는 폴리테트라플루오로에틸렌(polytetrafluoroethylene, PTFE)은 마찰 성능이 우수하나 내마모성과 내구성이 다소 낮으므로 유지보수에 많은 비용이 발생할 수 있다(Biswas and Vijayan, 1992). 최근 PTFE와 유사한 마찰 성능을 유지하면서 내마모성을 개선하기 위해 이소불화비닐(polyvinylidene fluoride, PVDF)과 산화마그네슘(magnesium oxide, MgO)을 합성한 마찰재가 개발되었다(Kim *et al.*, 2021). 본 연구에서는 PVDF/MgO 마찰재를 적용한 FPS의 마찰해석 모델을 사용하여 교량의 지진응답을 분석하였다. 마찰재의 마찰거동을 묘사하는 다양한 마찰모델 중 쿨롱 마찰모델(Coulomb friction model)은 모델링이 쉽고 해석에 소요되는 시간이 상대

†Corresponding author:

Tel: +82-2-2123-5801; E-mail: tshan@yonsei.ac.kr

Received March 3 2023; Revised March 30 2023;

Accepted March 31 2023

© 2023 by Computational Structural Engineering Institute of Korea

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

적으로 적으므로 마찰모델로 많이 활용된다. 쿨롱 마찰모델은 쿨롱의 마찰법칙(Coulomb's law of friction)에 근거하여 마찰 속도와 관계없이 단일 마찰계수를 사용하는 것이 특징이며, 마찰재가 가지는 마찰속도에 따라 마찰계수가 변화하는 속도 의존성을 반영하지 못한다(Mokha *et al.*, 1990). 속도 의존 마찰모델(rate dependent friction model)은 모델링이 상대적으로 복잡하고 해석 시간이 더 소요되는 단점이 있으나 쿨롱 마찰모델과 다르게 마찰속도에 따라 다른 마찰계수를 반영할 수 있다(Constantinou *et al.*, 1990).

본 논문에서는 PVDF/MgO 마찰재가 적용된 면진 장치가 활용된 교량을 대상으로 두 마찰모델(쿨롱 및 속도 의존 마찰 모델)에 따른 동적거동 성능을 비교분석했다. 구조 해석 프로그램인 Open System for Earthquake Engineering Simulation (OpenSees, McKenna, 2011)을 활용하였으며, FPS로 면진된 교량을 구축하여 대상 구조물로 사용하였다. 교량의 취약점인 하부구조에 대해서 비선형 시간 이력 해석(nonlinear time history analysis)으로 지진 응답을 확인하였으며, 지진 취약도 분석(seismic fragility analysis)을 수행하였다.

2. 구조 해석 모델링

2.1 교량 모델링

본 연구에서 선정한 대상 구조물은 미국 캘리포니아의 Route 14(R14) 교량으로, Aviram 등(2008)의 연구에서 다양한 지진하중에 대하여 교량의 전체 구조시스템과 각 구조 요소 간의 상호 작용 분석에 사용된 교량 모델이다. 교량의 자세한 수치적 특성 및 기하학적 물성 정보는 Table 1에 나타냈으며, 분석 모델을 Fig. 1에 나타냈다.

교량에 지진하중이 가해졌을 때 교각의 강성, 항복점 등과 같은 실제 거동과 유사한 정밀 해석을 진행하고자, 단면은 파이버 단면(fiber section)으로 구축되었다. Fiber section에 배치되는 철근의 특성은 Caltrans(2004) 가이드라인에 근거하여 결정되었으며, 콘크리트의 응력-변형률 거동은 선행 연구(Mander *et al.*, 1988)에서 사용된 모델을 근거로 구축되었다(Fig. 2). 상부구조의 거동으로 인한 하중이 교대를 통해 전달되는 경로를 모델링하기 위해 교대 구성요소 간의 거동을 적절히 고려할 수 있는 스프링 교대 모델이 사용되었다(Mackie and Stojadinović, 2006).

2.2 마찰진자형 면진 장치

본 연구에서 활용하는 마찰진자시스템(FPS)은 상하부 강재 판 사이에 스테인레스 강판으로 구성된 마찰면과 마찰재로 구

Table 1 Characteristics of R14 (Aviram *et al.*, 2008)

Parameter	Value and description
Total length of the bridge	87m
Number of spans and length of each deck span	2 spans: 44 and 43m
Deck width	16.37m
Deck depth	1.72m
Deck cross-sectional geometry	$A = 8.27\text{m}^2$, $I_y = 3.868\text{m}^4$, $I_z = 163.871\text{m}^4$, $A_{vy} = 2.0\text{m}^2$, $A_{vz} = 5.029\text{m}^2$
Number of columns and clear height of each column	2 columns: 10.58m
Column diameter	1.65m
Deck centroid to column top	0.98m
Length of cab beam	3.645m
Cap beam dimensions	2.3m×1.75m
Expansion joints	Not applicable
Foundation type as boundary conditions	Fixed for all direction
Unit weight of reinforced concrete	23.564 kN/m ³
Reinforcement details of Column	Longitudinal rebar: #14(42ea)

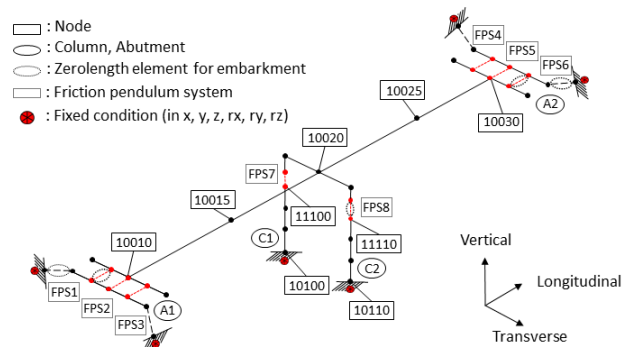


Fig. 1 Analytical model of R14 bridge

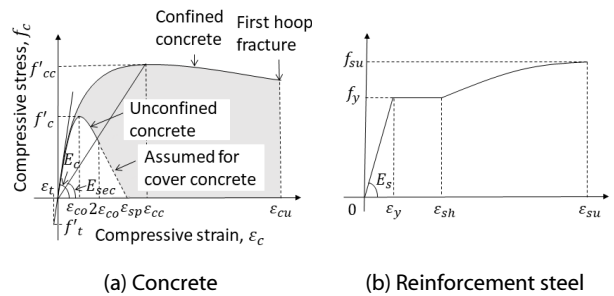


Fig. 2 Stress-strain curves (Caltrans, 2004)

성된 면진 장치이다. FPS의 힘과 변위의 관계는 힘의 평형조건 (Fig. 3)에 근거한 식 (1)을 통해 유도할 수 있다:

$$F = \frac{W}{R \cos \theta} u + \frac{\mu W}{\cos \theta} \approx \frac{W}{R} u + \mu W \sin(\dot{u}) \quad (1)$$

여기서 W 는 상부구조의 하중, F 는 FPS에 가해지는 수평력, \dot{u} 은 마찰재의 마찰속도, R 은 곡률반지름, μ 는 마찰계수를 의미한다. FPS의 거동은 해석의 단순화를 위해 이선형모델 (bilinear model)을 활용했다(Naeim and Kelly, 1999). FPS의 힘-변위 관계를 나타낸 Fig. 4에 1차 강성(K_u)과 2차 강성(K_d)을 제시하였으며, 각각 식 (2)와 (3)으로 계산된다:

$$K_u = \frac{\mu W}{D_y} \tag{2}$$

$$K_d = \frac{W}{R} \tag{3}$$

여기서, D_y 는 항복 변위이다. 1차 강성은 마찰재의 마찰력으로 인한 초기 강성을 의미하며 2차 강성은 마찰면의 곡률(R)과 관련된 강성이다. 1차 강성은 마찰계수 측정 실험에서 확인한 힘-변위 응답을 통해 계산했으며, 곡률은 최대 지반 가속도 (peak grounds acceleration, PGA)의 목표주기가 2초가 되도록 선정된 후 곡률반지름을 1 m로 계산했다.

2.3 마찰모델

해석에 사용된 교량의 거동을 비교분석하고자 마찰모델로 쿨롱 마찰모델과 속도 의존 마찰모델을 활용하였다. 쿨롱 마찰모델은 Fig. 5(a)와 같이 마찰재와 마찰면 사이의 마찰속도

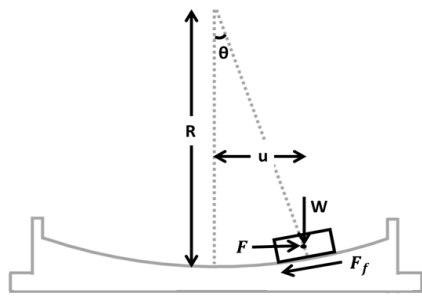


Fig. 3 Free body diagram of friction pendulum system (Fenz and Constantinou, 2008)

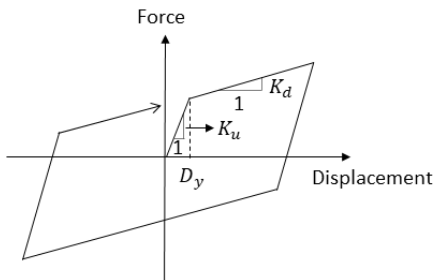


Fig. 4 Force-displacement relationship of FPS(Moon *et al.*, 2017)

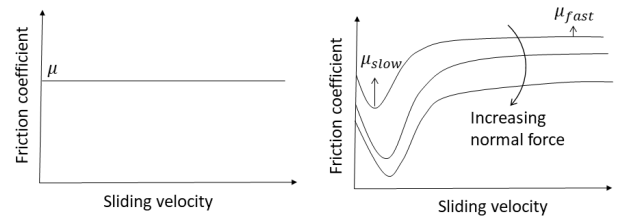
와 관계없이 마찰계수가 일정한 마찰모델로, 단일의 마찰계수 (μ)만 변수로 지닌다. 속도의 의존 마찰모델은 쿨롱 마찰모델과 다르게 마찰속도에 따른 마찰계수의 변화를 나타낼 수 있는 마찰모델로 마찰계수의 속도 의존성을 반영할 수 있다.

선행 연구(Constantinou *et al.*, 1990)에서 마찰속도와 마찰계수 간의 상관관계를 측정하기 위해 마찰 실험을 수행하였으며(Fig. 5(b)) 그 결과를 식 (4)와 같이 나타냈다:

$$\mu = \mu_{fast} - (\mu_{fast} - \mu_{slow}) \exp(-a|\dot{u}|) \tag{4}$$

여기서 μ_{fast} 는 마찰속도가 높을 때의 마찰계수, μ_{slow} 는 마찰속도가 낮을 때의 마찰계수, a 는 속도매개변수, \dot{u} 은 마찰속도를 의미한다. 마찰재의 특성상 마찰속도가 증가함에 따라 마찰계수는 상승하다가 일정한 값으로 수렴하게 되는데, 속도의 의존 마찰모델은 쿨롱 마찰모델로는 나타낼 수 없는 마찰속도에 따른 마찰재의 마찰계수 변화를 반영할 수 있다. 마찰모델에 사용되는 PVDF/MgO 마찰재의 마찰계수는 Kim 등(2021)의 연구에서 수행한 마찰계수 측정 실험 결과를 활용했으며, 이를 Table 2에 나타내었다. 쿨롱 마찰모델에 사용된 마찰계수 μ 는 최대 마찰계수를 나타내는 마찰속도 50 mm/sec에 해당하는 값인 0.07430을 사용했다.

식 (4)에 따라 속도 의존 마찰모델을 구축하기 위해 낮은 마찰속도에서의 마찰계수인 μ_{slow} 는 1 mm/sec일 때의 마찰계수 0.06205를 사용했으며, 높은 마찰속도에서의 마찰계수인 μ_{fast} 는 100 mm/sec일 때의 마찰계수 0.06995를 사용했다. 그리고 속도 매개 변수인 a 는 식 (4)와 Table 2를 기반으로 도출했으며, 이를 Table 3에 나타냈다. PVDF/MgO 마찰재의 마찰 실험



(a) Coulomb friction model (b) Rate dependent friction model (Constantinou *et al.*, 1990)

Fig. 5 Friction coefficient and sliding velocity relationship of each friction model

Table 2 Friction coefficient of PVDF/MgO 20% friction material

Normal Force (MPa)	Velocity (mm/sec)	Friction Coefficient
30	1	0.06205
	50	0.07430
	100	0.06995

Table 3 Parameters for rate dependent friction model in equation

	μ_{slow}	μ_{fast}	a
Parameter	0.06205	0.06995	30.79

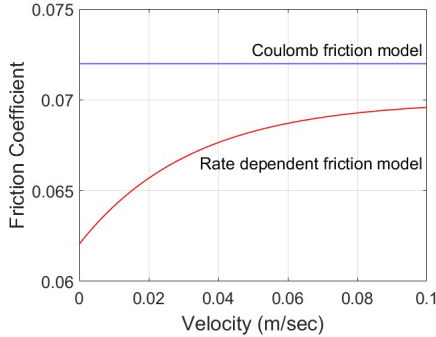


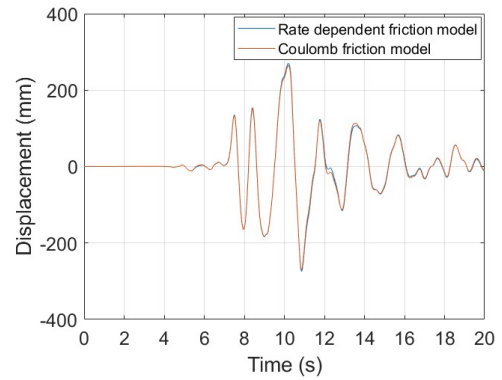
Fig. 6 Friction models for PVDF/MgO friction material

결과를 기반으로 마찰속도와 마찰계수의 관계를 각 모델로 나타냈을 때, 마찰속도가 상승할수록 마찰계수가 증가하다가 일정해진다. 또한 모든 마찰속도 범위에서 쿨롱 마찰모델의 마찰계수가 속도 의존 마찰모델의 마찰계수보다 높은 것으로 확인하였다(Fig. 6).

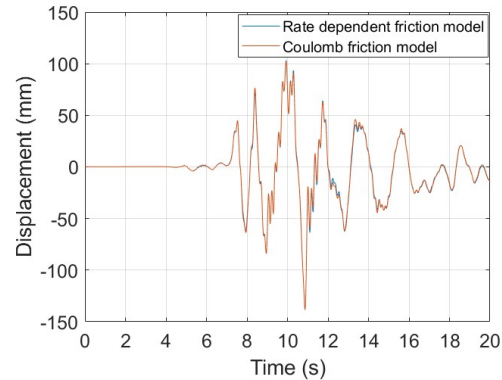
3. 비선형 시간 이력 해석

3.1 마찰모델에 따른 해석 결과

R14 교량을 활용하여 비선형 시간 이력 해석을 수행하였으며, 상부구조와 하부구조의 응답을 분석하였다. 상부구조는 Fig. 1의 10020번 절점의 변위를 분석했으며, 하부구조는 교각 하부와 상부 간의 상대변위를 분석했다. 다양한 지진데이터 중 지진 강도가 높은 PGA 0.86g 지진과 지진 강도가 낮은 PGA 0.14g 지진을 선정하여 시간에 따른 변위 응답을 두 마찰모델 별로 확인하였다. 해석에 사용된 지진데이터는 교축 방향, 교축 직각 방향 그리고 교축 수직방향의 가속도 정보를 포함하며, 교량에 각각의 축 방향으로 작용한다. 그 중 최대 응답이 발생한 교축 직각 방향(transverse, Fig. 1)의 해석 결과를 Fig. 7과 8에 각각 나타냈다. 두 마찰모델의 응답 비교 분석에는 최대 응답 차이를 백분율의 절댓값으로 표기하여 사용하였다. 각 지진하중으로 인한 구조 요소별 최대 응답과 두 마찰모델의 최대 응답 차이를 각각 Table 4와 5에 나타내었다. 비선형 시간 이력 해석 결과, PGA 0.86g의 지진하중에 대한 구성요소 별 최대 응답은 두 마찰모델이 유사한 수준으로 나타났다. 반면 PGA 0.14g의 지진하중에 대한 상부구조의 최대 응답은 속도 의존 마찰모델이 24.98mm로 쿨롱 마찰모델의 최대 응답인 22.51mm보다 9.85% 높았으며, 교각의 경우 속도 의존 마찰모델이

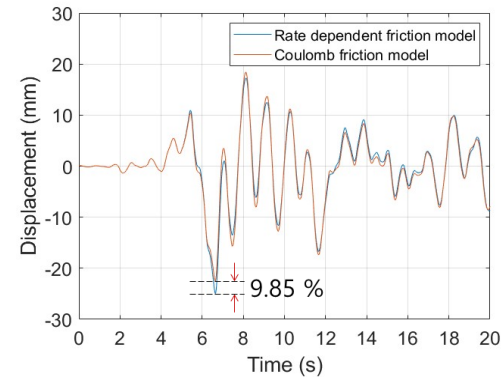


(a) Deck

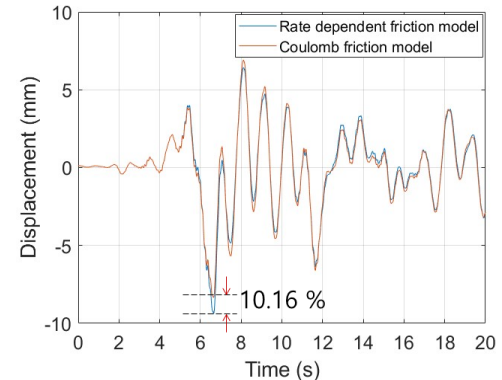


(b) Column

Fig. 7 Displacement of R14 bridge components(PGA 0.86g)



(a) Deck



(b) Column

Fig. 8 Displacement of R14 bridge components(PGA 0.14g)

Table 4 Maximum displacements of R14 bridge components (PGA 0.84g)

	Coulomb friction model	Rate dependent friction model	Difference
Deck	269.49 mm	274.17 mm	1.71%
Column	138.50 mm	138.43 mm	0.05%

Table 5 Maximum displacements of R14 bridge components (PGA 0.14g)

	Coulomb friction model	Rate dependent friction model	Difference
Deck	22.51 mm	24.98 mm	9.85%
Column	8.35 mm	9.30 mm	10.16%

9.30mm로 쿨롱 마찰모델의 최대 응답인 8.35mm보다 10.16% 높았다.

3.2 마찰모델 간의 상대적인 응답 차이

해석에서 각기 다른 마찰모델이 적용된 구조물의 최대 응답은 지진하중에 따라 다르므로, PGA의 크기에 따른 마찰모델 간의 최대 응답의 상대적인 차이를 확인하였다. PGA 0.03~1.06g 범위의 100개의 지진파에 대해 비선형 지진해석을 수행한 후 최대 응답만을 추출했다.

Fig. 9는 상부구조와 교대에서 측정된 100개의 최대 응답과 PGA의 결과를 나타낸 것으로 가로축은 PGA를 의미하며, 세로축은 각 마찰모델 최대 응답의 차이를 백분율의 절댓값으로 나타낸 수치이다. 이 수치가 높을수록 두 마찰모델의 최대 응답의 상대적인 차이가 큰 것을 의미한다. PGA가 높은 구간은 두 마찰모델의 차이가 최대 6% 미만으로 큰 차이가 나타나지 않으나, PGA가 낮은 지진에 대해서는 두 마찰모델의 응답 차이가 0.01%에서 15.59%까지 다양했다.

4. 지진 취약도 분석

4.1 확률론적 지진 요구 모델

임의의 intensity measure (IM)에 대한 로그-노말 확률 밀도 함수(log-normal probability density function)는 해당 공학적 요구 파라미터 (engineering demand parameter, EDP)의 분산도를 뜻하므로 EDP 분포에 대한 중앙값과 분산을 추정할 수 있다. 또한, EDP 와 IM 의 중앙값은 로그 스케일에서 선형관계이므로 회귀분석(regression analysis)이 가능하다. 이러한 과정으로 지진 취약도 곡선(seismic fragility curve)을 유도하는 방법을 확률론적 지진 요구 모델(probabilistic seismic demand

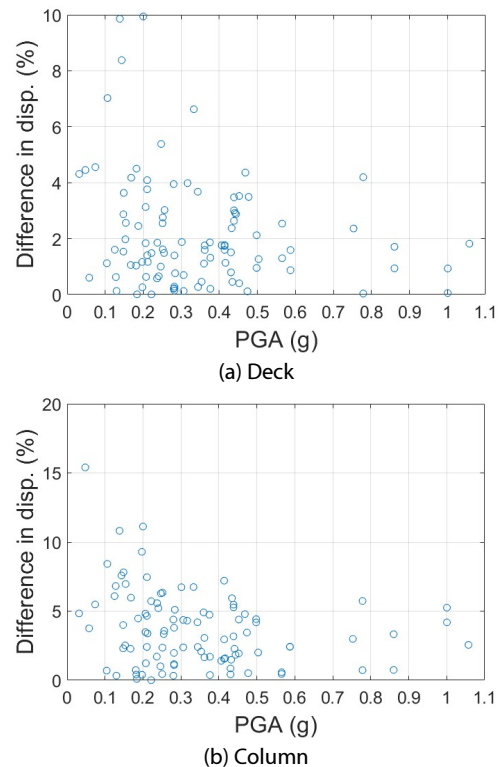


Fig. 9 Difference in maximum displacements of R14 bridge components

model, PSDM)이라고 한다. 이를 정리하면 다음과 같은 식 (5)를 통해 취약도 곡선(P_f)을 만들 수 있다:

$$P_f = 1 - \int_0^{LS} \frac{1}{\sqrt{2\pi} \lambda_{EDP|IM} EDP} \cdot \exp\left(-\frac{(\ln(EDP) - \lambda_{EDP|IM})^2}{2(\lambda_{EDP|IM})^2}\right) d(EDP) \quad (5)$$

여기서 LS 는 한계 상태(limit state, LS), $\lambda_{EDP|IM}$ 는 임의의 IM 에 대한 $\ln(EDP)$ 값들의 평균이다. R14 교량 모델을 이용하여 취약도 분석을 수행하고 그 결과를 취약도 곡선으로 나타내어 마찰모델의 영향을 비교분석했다. 취약도 분석을 위해 선택된 손상 인자(damage index, DI)는 교각의 높이와 변위의 응답비로 정의되는 드리프트(drift)를 항복점(yielding point)의 변위로 정규화해 사용했다.

손상 상태(damage state, DS)는 Hazus earthquake model technical manual(FEMA, 2020)의 7.1 Highway transportation system 항목을 기반으로 4단계로 정의했다. 한계 상태는 언어로 정의되는 손상 상태와 달리 DI 의 상수값으로 나타내며 곡률 연성도 혹은 수평변위한계 등을 활용하는 경우도 있으나, 본 연구에서는 교각의 드리프트를 사용했다. Hwang과 Jaw(1990)의 연구를 기반으로 LS 를 구성했으며, 이를 Table 6에 나타내었다.

Table 6 Damage state criteria for column

Damage index	Damage state			
	Slight	Moderate	Extensive	Collapse
Normalized displacement (D_N)	$D_N > 1$ (First-yield)	$D_N > 1.2$ (Yield)	$D_N > 1.76$ (Degradation)	$D_N > 4.76$ (Max. capacity)

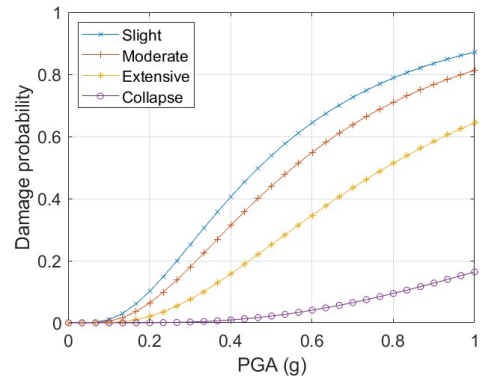
Table 7 Configuration of the ground motion sets

Record bin	Range of magnitude(M_w)	Range of epicentral distance(km)	Range of PGA (g)
I880	5.5-6.9	0.1-10.0	0.21-1.06
VN	6.0-6.7	9.2-20.0	0.14-0.75
LMSR	6.6-6.9	13.0-29.5	0.17-0.48
SMSR	5.8-6.5	14.0-29.4	0.03-0.33
NEAR	6.0-6.9	1.0-12.7	0.18-0.84

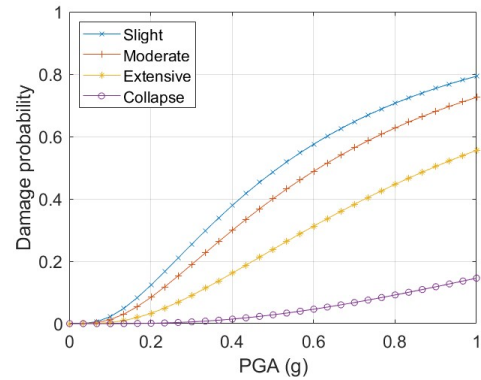
분석에 사용된 지진파는 총 100개로, 20개씩 5개의 세트 구성되어 있으며 각 지진파는 지진 규모, 중심으로부터의 거리, PGA 범위가 다양하게 구성되어 있다. Table 7의 I880과 VN 기록은 선행 연구(Aviram *et al.*, 2008)에서 활용된 지진으로 강한 지진에 대한 구조물의 응답을 분석하기 위해 사용되었다. 지진 규모 및 진앙으로부터의 거리에 따라 구성된 LMSR (large magnitude small range)과 SMSR(small magnitude small range), NEAR 기록은 Medina와 Krawinkler(2003)의 연구에서 캘리포니아의 지진을 조합한 데이터이다.

4.2 지진 취약도 곡선

R14 교량 교각의 드리프트에 대한 마찰모델별 취약도 분석 결과를 Fig. 10에 지진 취약도 곡선으로 나타내었으며, PGA의 구간에 따라 두 마찰모델의 파괴확률이 다른 양상을 나타내는 것으로 확인하였다. 손상 상태(DS)가 slight일 때(Fig. 11(a)) PGA 0.3g보다 높은 PGA의 범위는 쿨롱 마찰 모델의 파괴확률이 높았으며, PGA 0.3g보다 낮은 PGA의 범위는 속도 의존 마찰모델의 파괴확률이 높았다. Moderate 손상 상태(Fig. 11(b))인 경우 PGA 0.35g 보다 낮은 PGA 범위에서는 속도 의존 마찰모델의 파괴확률이 더 높았다. PGA 0.35g 보다 높은 PGA 범위는 쿨롱 마찰모델의 파괴확률이 높아지는 역전 현상이 나타났다. Extensive 손상 상태에 동일한 경향이 나타났으며, 두 마찰모델의 역전 현상이 나타난 PGA 기준점은 moderate 손상 상태보다 다소 높은 약 PGA 0.45g였다(Fig. 11(c)). 취약도 분석 결과 쿨롱 마찰모델과 속도 의존마찰모델의 파괴확률에 차이가 나타났으며, PGA 범위에 따라 두 마찰모델의 파괴확률이 역전되는 현상이 확인되었다. PGA가 높은 범위에서 교각의 drift



(a) Coulomb's friction model



(b) Rate dependent friction model

Fig. 10 Fragility curve of R14 bridge

를 비교했을 때 rate dependent friction model의 최대 drift는 coulomb friction model의 최대 drift보다 상대적으로 작았으며, PGA가 낮은 범위에서는 반대의 경향이 나타났다. 이에 따라, Fig. 11과 같은 취약도 분석의 결과가 나타난 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구는 면진 장치가 설치된 구조물의 성능을 마찰해석 모델별로 분석하기 위해 비선형 시간 이력 해석과 지진 취약도 분석을 수행하였다. 마찰모델은 PVDF/MgO 마찰재의 마찰계수를 활용하여 쿨롱 마찰모델과 속도 의존 마찰모델을 사용했다. 구조해석 프로그램인 OpenSees를 통해 대상 구조물인 R14 교량을 구축하였으며, 교량의 취약점인 하부구조에 대해 분석을 수행하였다.

비선형 시간 이력 해석 결과 PGA가 높은 구간에서 두 마찰모델간의 상대적인 최대 응답이 6% 미만의 차이를 보였으나, PGA가 낮은 구간에서는 최대 15%의 차이가 나타났다. 취약도 분석 결과에서는 PGA가 낮은 구간의 파괴확률은 쿨롱 마찰모델이 높았으나 PGA가 높은 구간의 파괴확률은 반대되는 경향이 나타났다. 마찰해석모델에 따라 대상 교량의 파괴확률이 상대적으로 높게 혹은 낮게 예측될 수 있는 것을 확인하였다.

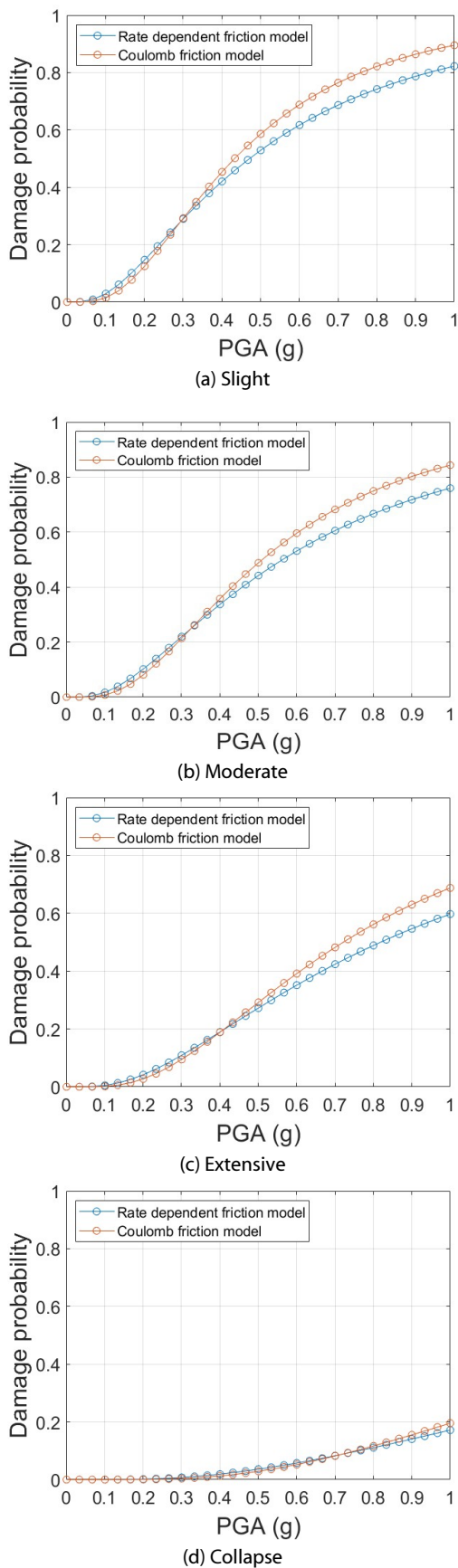


Fig. 11 Fragility curve by damage state for R14 bridge

마찰계수가 마찰속도의 영향을 많이 받는 마찰재의 경우, 단일 마찰계수만 적용되는 쿨롱 마찰모델 사용 시 해석의 정확도가 감소할 수 있다. 따라서 속도 의존성을 갖는 마찰재를 해석 모델에 적용할 경우 속도 의존 마찰모델을 사용하는 것이 비교적 더 정확한 해석 결과를 얻을 수 있는 것으로 확인하였다. 추후에는 PVDF/MgO 마찰재의 장기마찰 실험 및 노화 실험을 진행하여 마찰재의 장기 사용에 따른 구조물의 성능평가를 진행할 계획이다.

감사의 글

이 논문은 행정안전부장관의 방재안전분야 전문인력 양성 사업과 산업부의 제원으로 한국산업기술진흥원(범부처 연계형 기술사업화 이어달리기)의 지원을 받아 수행된 결과임(P00 21322).

References

- Aviram, A., Mackie, K.R., Stojadinovic, B. (2008) Guidelines for Nonlinear Analysis of Bridge Structures in California, Report PEER 2008/3, Berkeley, CA: Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California.
- Biswas, S.K., Vijayan, K. (1992) Friction and Wear of PTFE - a Review, *Wear*, 158(1-2), pp.193~211.
- Buckle, I.G., Mayes, R.L. (1990) Seismic Isolation: History, Application, and Performance - a World View, *Earthq. Spectra*, 6(2), pp.161~201.
- Caltrans, S.D.C. (2004) Caltrans Seismic Design Criteria Version 1.3, California Department of Transportation, Sacramento.
- Constantinou, M., Mokha, A., Reinhorn, A. (1990) Teflon Bearings in Base Isolation II: Modeling, *J. Struct. Eng.*, 116(2), pp. 455~474.
- Federal Emergency Management Agency (FEMA) (2020) HAZUS Earthquake Model Technical Manual: Hazus 4.2 SP3.
- Fenz, D.M., Constantinou, M.C. (2008) *Mechanical Behavior of Multi-Spherical Sliding Bearings* (No.7), Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research. p.186.
- Hwang, H.H.M., Jaw, J.W. (1990) Probabilistic Damage Analysis of Structures, *J. Struct. Eng.*, 27(3), pp.349~359.
- Kim, S.J., Kim, J.S., Han, T.S. (2021) Performance Analysis of Friction Pendulum System using PVDF/MgO Friction Material, *J. Comput. Struct. Eng. Inst. Korea*, 34(4), pp.213~219.
- Mackie, K.R., Stojadinović, B. (2006) Post-Earthquake Functionality of Highway Overpass Bridges, *Earthq. Eng. & Struct. Dyn.*, 35(1), pp.77~93.

- Mander, J.B., Priestley, M.J., Park, R.** (1988) Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete, *J. Struct. Eng.*, 114(8), pp.1804~1826.
- McKenna, F.** (2011) OpenSees: A Framework for Earthquake Engineering Simulation, *Comp. Sci. & Eng.*, 13(4), pp.58~66.
- Medina, R.A., Krawinkler, H.** (2003) Seismic Demands for Nondeteriorating Frame Structures and Their Dependence on Ground Motion, Report No. 144, Stanford University.
- Mokha, A., Constantinou, M., Reinhorn, A.** (1990) Teflon Bearings in Base Isolation I: Testing, *J. Struct. Eng.*, 116(2), pp.438~454.
- Moon, J.H., Kim, J.S., Lee, T.H., Han, T.S.** (2017) Seismic Fragility Analysis of a LNG Tank with Friction Pendulum System of Various Friction Coefficient, *J. Comput. Struct. Eng. Inst. Korea*, 30(2), pp.95~102.
- Nacim, F., Kelly, J.M.** (1999) *Design of Seismic Isolated Structures: From Theory to Practice*, John Wiley & Sons, New York. p.304.
- Zayas, V.A., Mahin, S.A.** (1987) The FPS Earthquake Resisting System Experimental Report, UCB/EERC-87/01, Earthquake Engineering Research Center, Berkeley.

요 지

본 연구에서는 마찰모델에 따라 다른 마찰진자시스템(FPS)이 적용된 교량의 성능을 비교·분석하기 위해 구조해석을 수행하였다. 마찰해석모델 별 성능을 분석하기 위해 PVDF/MgO 마찰재의 마찰계수를 활용하여 쿨롱 마찰모델과 속도 의존 마찰모델을 구축했다. 쿨롱 마찰모델은 마찰속도와 관계없이 단일 마찰계수를 사용하며, 속도 의존 마찰모델은 마찰속도에 따른 마찰계수의 변화를 반영하는 마찰모델이다. 지진해석으로 비선형 시간 이력 해석과 지진 취약도 해석을 수행하여 구조물의 응답을 확인하였다. 마찰모델에 따른 바닥판과 교각의 지진 응답을 활용해 면진된 교량의 성능을 분석하였으며, 면진된 교량의 성능을 효과적으로 평가할 수 있는 마찰 모델을 분석했다.

핵심용어 : PVDF/MgO 마찰재, 쿨롱 마찰, 속도 의존 마찰, 지진 취약도 분석, 비선형 시간 이력 해석