

# 마찰복원형 지진격리장치가 설치된 케이블교량의 성능 기반 내진설계법 개선(II-내진설계 절차 제안)

## Improvement of the Performance Based Seismic Design Method of Cable Supported Bridges with Resilient-Friction Base Isolation Systems (II-Proposal for the Seismic Design Procedure)

길흥배<sup>1)</sup> · 박선규<sup>2)</sup> · 한경봉<sup>3)</sup> · 윤완석<sup>4)\*</sup>

Gil, Heungbae<sup>1)</sup> · Park, Sun Kyu<sup>2)</sup> · Han, Kyoung Bong<sup>3)</sup> · Yoon, Wan Seok<sup>4)\*</sup>

<sup>1)</sup>한국도로공사 초장대교량연구단 연구위원, <sup>2)</sup>성균관대학교 건설환경시스템공학과 교수, <sup>3)</sup>한국도로공사 초장대교량연구단 수석연구원, <sup>4)</sup>한국도로공사 스마트건설사업단 차장

<sup>1)</sup>Research Fellow, Super Long Span Bridge R&D Center, Korea Expressway Corporation, <sup>2)</sup>Professor, Department of Civil Engineering, Sungkyunkwan University, <sup>3)</sup>Chief Researcher, Super Long Span Bridge R&D Center, Korea Expressway Corporation, <sup>4)</sup>Senior manager, Center for Smart Construction Technology, Korea Expressway Corporation

### / A B S T R A C T /

In a previous paper, ambient vibration tests were conducted on a cable stayed bridge with resilient-friction base isolation systems (R-FBI) to extract the dynamic characteristics of the bridge and compare the results with a seismic analysis model. In this paper, a nonlinear seismic analysis model was established for analysis of the bridge to compare the difference in seismic responses between nonlinear time history analysis and multi-mode spectral analysis methods in the seismic design phase of cable supported bridges. Through these studies, it was confirmed that the seismic design procedures of the "Korean Highway Bridge Design Code (Limit State Design) for Cable Supported Bridges" is not suitable for cable supported bridges installed with R-FBI. Therefore, to reflect the actual dynamic characteristics of the R-FBI installed on cable-supported bridges, an improved seismic design procedure is proposed that applies the seismic analysis method differently depending on the seismic isolation effect of the R-FBI for each seismic performance level.

**Key words:** Performance-based seismic design, Cable supported bridges, Resilient-friction base isolation systems, Nonlinear seismic analysis

## 1. 서론

저자들의 동반논문(‘마찰복원형 지진격리장치가 설치된 케이블교량의 성능기반 내진설계법 개선(I-실교량 실험 결과 분석)’), 이하 ‘동반논문’ 이라고 함)[1]에서 기술한 바와 같이 마찰복원형 지진격리장치를 적용한 케이블교량의 경우 해석상 강성값이 교량 전체의 동적 특성에 민감한 영향을 미치는 것을 실험적으로 확인하였다.

「도로교설계기준(한계상태설계법) 케이블교량편[2]」은 케이블교량의 특수성을 고려한 설계를 위하여 2015년에 최초로 제정되었다. 이 기준은 일반 도로교의 설계기준을 규정한 「도로교설계기준」과 달리 성능기반 내진설계기준을 채용하고 있다. 일반 도로교는 내진설계 시 내진등급(I, II)만

을 고려하여 설계지진력을 결정하며, 붕괴방지수준에 해당하는 단일 내진 성능 목표를 제시하고 있다. 반면, 케이블교량은 내진성능수준을 ‘기능수행수준’, ‘장기복구수준’, ‘붕괴방지수준’의 3단계로 구분하며, 내진설계 시 교량 설계수명(100년, 200년)과 내진성능수준에 따라 그에 해당하는 설계지진력을 적용하고 내진성능수준별 목표성능을 만족해야 한다.

「도로교설계기준(한계상태설계법) 케이블교량편」은 각 내진성능수준 별로 설계지진력, 목표성능 뿐만 아니라 지진해석법도 규정하고 있다. 기능수행수준과 장기복구수준에 대해서는 다중모드스펙트럼해석법 또는 시간이력해석법을 적용할 수 있고, 붕괴방지수준에 대해서는 비선형 시간이력 해석법을 적용해야 한다. 또한, 「도로교설계기준(한계상태설계법) 케이블교량편」에 의하면 케이블교량 내진설계 시 구성요소의 단면은 장기복구수준의 지진세기를 반영한 하중조합(극단상황한계상태 하중조합 I)에 대해 안전하도록 결정하고 이렇게 설계된 교량은 장기복구수준을 만족하는 것으로 간주할 수 있으며, 기능수행수준의 지진세기를 반영한 하중조합(사용

\*Corresponding author: Yoon, Wan Seok

E-mail: yws@ex.co.kr

(Received November 18, 2019; Revised April 13, 2020; Accepted April 27, 2020)

한계상태 하중조합 VI)에 대해 사용성을 만족하면 기능수행수준을 만족하는 것으로 간주할 수 있다. 따라서, 기능수행수준과 장기복구수준 검토단계는 내진 설계단계에 해당하며, 이 내진 설계단계를 거친 후 붕괴방지수준의 지진세기에 대해 주탑 및 교각의 휨성능, 전단성능 등을 검증하는 내진성능 검증단계를 수행한다.

교량 및 건물에 적용하는 지진격리장치에 대한 연구는 1970년대 후반에 미국, 뉴질랜드, 일본, 유럽 등의 국가에서 시작되어 1980년대 중반부터 본격화 되었다. 1990년대에 들어서는 교량 구조물에 대해 지진격리시스템의 설계, 단순 모델에 기초한 지진격리장치를 사용한 교량의 거동파악 등의 연구와 비선형 이력곡선을 갖는 지진격리장치의 설계가 이루어졌으며[3, 4], 2000년대에 들어서는 납과 적층고무의 조합, 마찰력과 탄성 스프링의 조합 및 강재패드 등의 다양한 종류의 지진격리시스템을 선보였다[5].

여러 종류의 지진격리장치 중 마찰형식을 사용한 교량은 지진 응답이 지진의 주기 특성 변화나 강도 변화에 민감하지 않으며, 마찰에 의한 감쇠효과로 변위 응답을 줄일 수 있는 특징이 있다[6]. 마찰 형식 중 마찰복원형 지진격리장치는 국내에서 교량용 지진격리장치로도 사용되고 있으며, 면진 성능과 내구성 및 지진 후 구조물을 원위치로 복구시키는 복원 성능이 있는 것으로 알려져 있다[7]. 일반 구조물과 더불어 국내 원전 구조물에도 마찰복원형 지진격리장치를 사용하고 있으며, 마찰복원형 지진격리장치의 역학적 특성, 성능 및 교량 등 구조물 적용시 지진 거동 특성 및 실무 설계 등 적용성 향상에 대한 연구가 수행되고 있다[8-12].

지진격리장치를 사용한 지진격리교량에 대한 설계기준은 일반 도로교의 경우 「도로교설계기준」 2005년 개정분부터 수록되어 있으나, 「도로교설계기준(한계상태설계법) 케이블교량편」에는 지진격리교량에 대한 별도 설계기준이 마련되어 있지 않다. 케이블교량 내진 설계단계(기능수행수준, 장기복구수준)에서 일반적으로 선형 해석법인 다중모드스펙트럼해석법을 적용하는데 지진격리장치를 사용하는 경우 지진격리장치의 비선형 거동특성을 반영하기 위해 유효강성( $K_{eff}$ )을 적용한다. 그러나, 동반논문[1]에서 확인한 바와 같이 마찰복원형 지진격리장치는 타 지진격리장치에 비해 마찰면의 미끄럼 발생 유무에 따라 거동 특성이 매우 상이하므로 유효강성( $K_{eff}$ )은 마찰복원형 지진격리장치의 비선형 거동 특성을 제대로 반영하지 못한다.

이에 본 논문에서는 지진격리된 케이블교량의 합리적인 내진설계를 위해서는 지진격리장치의 비선형 거동 특성을 명확히 파악하고 이를 설계에 반영해야 하므로, 동반논문[1]의 실험 결과를 바탕으로 대상 교량의 비선형 지진해석 모델 구축 및 지진해석을 통해 마찰복원형 지진격리장치를 사용한 케이블교량의 내진설계 절차 개선사항을 도출하였다.

## 2. 마찰복원형 지진격리장치 구조 및 거동 특성

마찰복원형 지진격리장치의 구조는 Fig. 1과 같으며, 위판(Top plate)이 상부구조물과 연결되고 아래판(Bottom plate)이 하부구조물에 고정된다.

마찰재인 PTFE(Polytetrafluoroethylene)는 지진하중의 반복운동에 따른 감쇠기능을 가지며 마찰에 의해 운동방향 반대방향으로 저항하는 원리에 의해 지진에너지를 소산시키는 1차 강성 요소이다. 폴리우레탄 스프링은 지진에 의한 변위응답의 종료 후 내부 구조체와 PTFE를 원래의 위치로 복원시키는 기능을 하고 또한 지진격리장치의 마찰 발생 하중 이후 강성

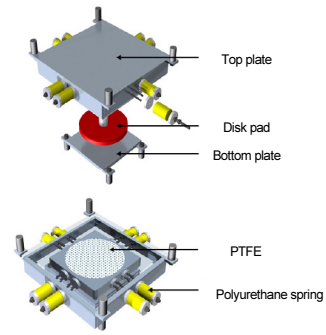


Fig. 1. Resilient-friction base isolation systems (R-FBI)

(2차 강성)의 크기를 결정하는 역할을 한다. 디스크패드는 자중에 의한 연직하중을 지지하고 진동을 감쇠시키며 회전변위도 수용한다[13].

마찰복원형 지진격리장치의 거동은 연직하중에 PTFE의 마찰계수를 곱한 항과 측면 폴리우레탄 스프링의 강성과 변위의 곱으로 나타나는 항을 합하여 식 (1)과 같이 표현할 수 있다.

$$P = k_2 \Delta h \pm N \mu \tag{1}$$

여기서,  $k_2$  : 측면 폴리우레탄 스프링의 강성

$\Delta h$  : 측면 폴리우레탄 스프링의 압축 변위

$N$  : 연직하중(상부구조물 하중)

$\mu$  : 마찰계수

케이블교량의 내진 설계단계에서 비선형 시간이력해석법은 오랜 시간이 소요되고 많은 노력이 필요하므로, 일반적으로 선형 해석법인 다중모드스펙트럼해석법을 사용한다. 그리고 지진격리장치의 해석시 수평강성으로는 동반논문[1]에서 설명한 바와 같이 지진격리장치의 전체거동을 결정론적으로 적용하는 유효강성( $K_{eff}$ )을 이용하여 설계하는게 일반적이다.

그러나 동반논문[1]의 분석 결과로부터 마찰복원형 지진격리장치의 유효강성( $K_{eff}$ )을 적용한 해석모델은 지진 시 교량 거동에 영향을 미치는 모드 및 고유주기를 정확히 반영하지 못하는 것을 알 수 있었다. 그리고 지진격리장치 마찰면의 미끄럼이 발생하기 전에는 초기강성( $K_u$ )이나 무한강성( $K_\infty$ )을 적용한 해석모델이 실험결과와 비슷한 거동을 보이므로 마찰복원형 지진격리장치는 마찰 발생 하중 전 즉, 마찰면의 미끄럼이 발생하기 전에는 고정단처럼 거동한다는 사실을 실험적으로 확인하였다. 이는 대상 교량의 경우 마찰복원형 지진격리장치는 마찰면의 미끄럼이 발생하지 않는 하중 미만의 지진세기가 가해지는 경우에는 고정단처럼 작동하고, 마찰면의 미끄럼이 발생하는 하중 이상의 지진세기가 가해지는 경우에만 당초 목표 되었던 비선형 이력거동을 한다는 사실을 의미한다.

## 3. 케이블교량 비선형 해석 모델 구축 및 지진해석

### 3.1 케이블교량 비선형 지진해석 모델 작성

#### 3.1.1 비선형 해석을 위한 파이버 모델 적용

내진 설계단계(기능수행수준, 장기복구수준)에서 비선형 시간이력해석

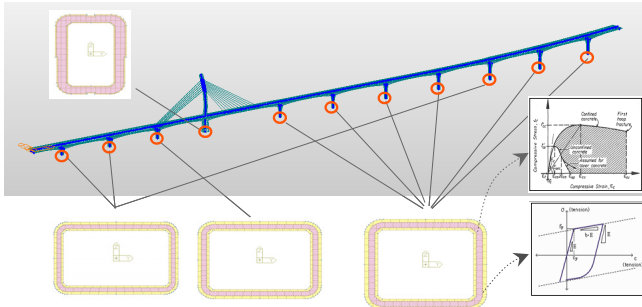


Fig. 2. Fiber member for non-linear time history analysis

Table 1. Property of fiber member

Category	Pylon		Pier	
	Concrete	Steel	Concrete	Steel
Material	Concrete	Steel	Concrete	Steel
Strength (MPa)	45 MPa	400 MPa	40 MPa	400 MPa
Inelastic Model	Mander	Menegotto-Pinto	Mander	Menegotto-Pinto

과 다중모드스펙트럼해석 간의 지진응답 차이를 확인하기 위해 구조해석 프로그램 Midas Civil(2018)[14]을 이용하여 비선형 지진해석 모델을 구축하였다.

주탑 및 교각은 지진력을 교량의 각 구성요소로 전달하고 큰 지진하중을 경험하면 단부구역 중 일부는 소성변형을 한다. 따라서 구조시스템 전체의 비선형거동 특성을 구현하기 위해서는 이들 소성현지역역의 비선형거동 특성을 모델화하여야 한다.

Fig. 2와 같이 대상 교량의 지진해석 모델에 지진시 비선형 거동을 할 것으로 예상되는 주탑 및 교각에 파이버(fiber) 모델을 적용하였다. 주탑 및 교각은 여러 개의 파이버 다발로 구성된 것으로 가정하며 각각의 파이버는 파이버의 축방향으로만 응력을 받는다. 따라서 각각의 파이버에 재료의 비선형 응력-변형률 곡선을 적용하면 파이버는 축방향으로 비선형 거동을 하며 이로 인해 구조물 전체의 비선형 거동 특성을 표현할 수 있다.

본 해석모델에서 재료의 비선형성을 고려하기 위한 콘크리트 및 철근의 응력-변형률 모델은 구조물의 비선형 해석에 많이 사용되고 있는 비선형 재료 모델 중 하나인 Mander, Menegotto-Pinto를 적용하였으며, 재료 상수 및 물성은 Table 1과 같다.

### 3.1.2 입력지반운동

「내진설계기준 공통적용사항」에 의거 재현주기 1000년 S1 지반의 설계 응답스펙트럼(PGA=0.154 g)을 만족하는 9개의 인공합성 지진파를 규모 6.5~7.0에 해당하는 포락함수의 형상과 지속시간에 만족하도록 인공지진파 생성 프로그램인 SIMQKE를 이용하여 만들었다.

Fig. 3과 같이 인공합성 지진파를 X, Y, Z 방향으로 총 3SET 생성하였으며, 수평지반 가속도 방향에 대한 수직지반 가속도의 비는 0.77을 적용하였다. 재현주기 200년(PGA=0.08 g), 2400년(PGA=0.22 g)의 지반가속도 시간이력은 재현주기 1000년(PGA=0.154 g)에 대한 최대지반가속도 비율 만큼 조정하여 적용하였다.

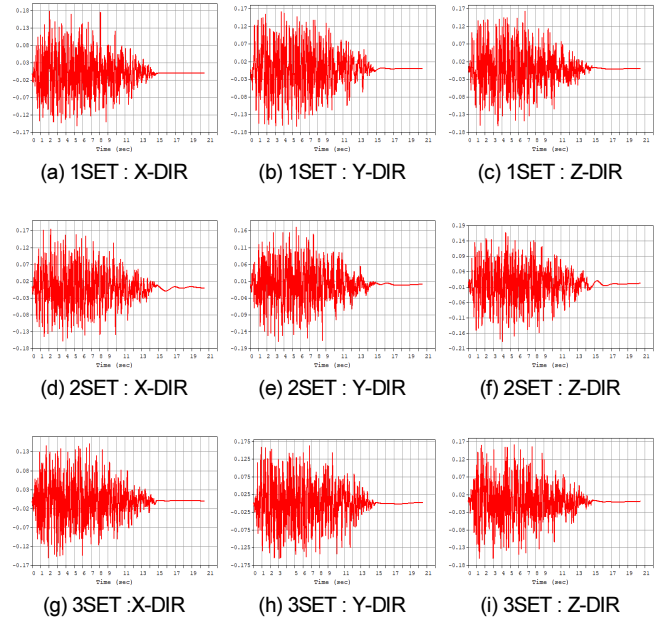


Fig. 3. Artificial earthquake for seismic analysis

Table 2. Correlation coefficient of artificial earthquake

Correlation coefficient	X, Y	Y, Z	X, Z
1SET	0.0698	0.0569	-0.0247
2SET	-0.0194	0.0703	0.0432
3SET	0.0429	0.0234	0.0570

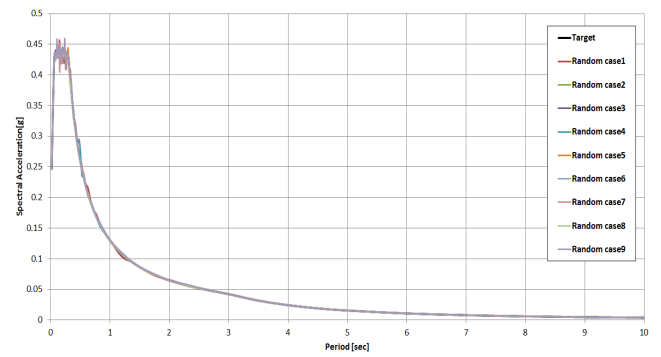


Fig. 4. Earthquake spectrum for seismic analysis

생성한 인공지진파 3개 SET의 각 방향별 상관계수는 Table 2와 같이 0.16 이하로 「내진설계기준 공통적용사항」 기준을 만족하며, 설계스펙트럼과의 비교는 Fig. 4와 같다.

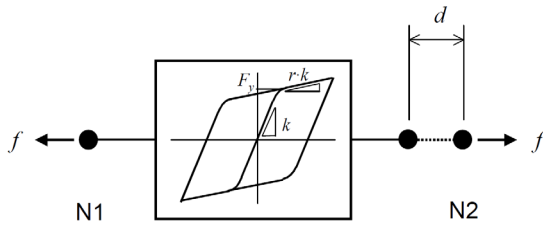
### 3.1.3 마찰복원형 지진격리장치 모델링

Midas Civil에서 면진 및 제진장치의 비선형 경계요소는 범용연결요소 (General Link)를 통해 모델링할 수 있는데, 범용연결요소(General Link) 중 Fig. 5와 같은 이력거동시스템(Hysteretic System)을 이용하여 마찰복원형 지진격리장치의 선형 및 비선형 속성을 부여하였다. 이력거동시스템(Hysteretic System)은 이력거동을 통한 에너지 소산장치를 모델링하는데

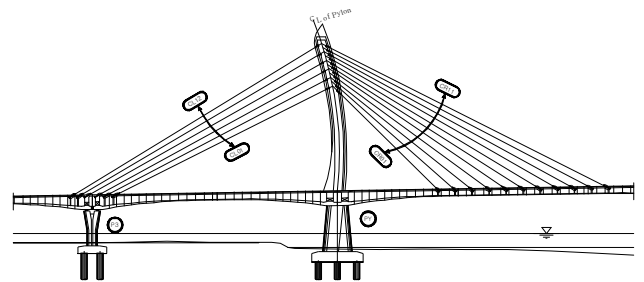
**Table 3.** Parameters of the R-FBI installed in the test bridge

Type	Capacity (kN)	Ku (kN/m)		Kd (kN/m)		Keff (kN/m)		ratio (r=kd/ku)
		X dir	Ydir	X dir	Ydir	X dir	Ydir	
OMEQS*	7,000	233,071	233,071	0	510	1,850	2,360	0.0022
	15,000	459,846	459,846	0	1,006	3,650	4,656	0.0022
	30,000	1,165,357	1,165,357	0	2,549	9,250	11,799	0.0022
	35,000	1,354,330	1,354,330	0	2,963	10,750	13,713	0.0022
	40,000	1,700,788	1,700,788	0	3,720	13,500	17,220	0.0022
EQS	25,000	913,388	913,388	1,998	1,998	9,248	9,248	0.0022

\* One Directional Mer Spring Eradi Quake System



**Fig. 5.** Hysteretic System for friction



**Fig. 6.** Cable arrangement of the test bridge

사용할 수 있으며, 강재 댐퍼 등과 비교하여 많은 반복에 대해 안전한 성능을 발휘할 수 있고, 진폭 및 진동수에 의존하지 않기 때문에 일정한 마찰력을 얻을 수 있다[14].

이력저동시스템의 힘-변형 관계식은 식 (2)와 같이 표현된다.

$$f = r \cdot k \cdot d + (1 - r) \cdot F_y \cdot z \tag{2}$$

여기서,  $k$  : 초기강성

$F_y$  : 항복강도

$r$  : 항복 후 강성 저하율

$d$  : 두 절점 사이의 변형

$z$  : 이력저동 내부변수

이력저동시스템(Hysteretic System)으로 마찰복원형 지진격리장치의 선형 및 비선형 이력저동 특성을 구현하기 위해 1차강성( $K_u$ ), 마찰발생 강도(항복강도,  $F_y$ ), 2차강성( $K_d$ ) 및 마찰발생 후 강성 저하율  $r$ 은 마찰복원형 지진격리장치의 물성을 정리한 Table 3과 같이 입력하였으며, 이력저동 내부변수( $z$ )는 기존 문헌을 참고하였다[14, 15].

### 3.1.4 초기평형력 입력

비선형 시간이력해석은 단면력 산정 시 하중조합에 따른 중첩의 원리가 적용되지 않기 때문에 대상교량의 초기치 해석 결과 거더, 교각, 주탑 등의 beam 요소 700개와 케이블의 truss 요소 23개에 대한 초기평형력을 부재 내력으로 입력한 상태에서 비선형 시간이력해석을 수행하였다. 지진해석 모델에 입력한 초기평형력 중 케이블의 입력값은 Fig. 6 및 Table 4와 같다.

사상교 구성요소의 부재력은 케이블 장력에 의해 큰 영향을 받으므로, 교량 거동의 정확한 모사를 위해서는 실제 케이블 장력과 최대한 유사한 값

**Table 4.** Initial equilibrium tension force of the test bridge cables

No.	Cable name	Cable Specification	Axial-i (kN)	Axial-j (kN)
1	CL12	Φ7mm-163	4,150	4,180
2	CL11	Φ7mm-163	4,330	4,360
3	CL10	Φ7mm-163	4,270	4,300
4	CL09	Φ7mm-163	4,330	4,370
5	CL08	Φ7mm-253	6,880	6,930
6	CL07	Φ7mm-253	6,900	6,950
7	CL06	Φ7mm-301	7,610	7,660
8	CL05	Φ7mm-301	7,570	7,620
9	CL04	Φ7mm-301	7,870	7,910
10	CL03	Φ7mm-301	7,900	7,950
11	CL02	Φ7mm-301	6,860	6,900
12	CL01	Φ7mm-301	6,830	6,880
13	CR01	Φ7mm-253	5,780	5,820
14	CR02	Φ7mm-253	6,580	6,620
15	CR03	Φ7mm-301	7,620	7,660
16	CR04	Φ7mm-301	7,250	7,300
17	CR05	Φ7mm-367	9,040	9,100
18	CR06	Φ7mm-367	8,970	9,030
19	CR07	Φ7mm-367	9,510	9,580
20	CR08	Φ7mm-367	9,540	9,610
21	CR09	Φ7mm-367	7,830	7,890
22	CR10	Φ7mm-301	7,850	7,910
23	CR11	Φ7mm-301	6,620	6,680

을 지진해석 모델 초기평형력으로 입력해야 한다[16].

비선형 지진해석 모델에 초기평형력으로 입력한 케이블장력과 현장 실

**Table 5.** Comparison of cables tension force

No.	Cable name	Initial equilibrium tension force (a)	Measured tension force (b)	Ratio of difference of tension ((b-a)/a*100 (%))
1	CL12	4,165	4273	2.59
2	CL11	4,345	4124	5.09
3	CL10	4,285	4264	0.49
4	CL09	4,350	4183	3.84
5	CL08	6,905	6811	1.36
6	CL07	6,925	6814	1.60
7	CL06	7,635	7547	1.15
8	CL05	7,595	7494	1.33
9	CL04	7,890	7742	1.88
10	CL03	7,925	7738	2.36
11	CL02	6,880	6518	5.26
12	CL01	6,855	6483	5.43
13	CR01	5,800	5210	10.17
14	CR02	6,600	6231	5.59
15	CR03	7,640	7409	3.02
16	CR04	7,275	7098	2.43
17	CR05	9,070	8762	3.40
18	CR06	9,000	8766	2.60
19	CR07	9,545	9332	2.23
20	CR08	9,575	9332	2.54
21	CR09	7,860	7588	3.46
22	CR10	7,880	7687	2.45
23	CR11	6,650	6508	2.14

측값을 비교한 결과 Table 5에서 보는 바와 같이 두 값의 차이는 평균 3.15% 로 거의 유사하다. 따라서, 위의 비교 결과들로부터 비선형 지진 해석 모델은 시공과정에서의 구조부재 단면력의 변화를 적절히 반영한 것으로 볼 수 있다. 본 대상 교량과 같은 사장교의 경우 비선형 지진 해석시 케이블 장력에 의한 교량 단면의 초기 응력상태가 중요하며, 비선형 해석모델의 정확도를 향상시키고 지진시 거동을 합리적으로 예측하기 위해서는 실험 교량 실험에 의한 케이블 장력 변화값을 파악하고 해석모델과 비교하는 것이 해석모델의 정확도를 위해서 매우 중요하다.

### 3.2 지진해석법에 따른 지진응답 비교

케이블교량의 기능수행수준과 장기복구수준의 내진성능 만족 여부를 확인하는 내진 설계단계에서 다중모드스펙트럼해석법을 적용할 수 있도록 하는 현 내진설계 절차의 적용성 검토를 위해, 대상 교량의 비선형 지진 해석 모델을 이용하여 기능수행수준(PGA : 0.08 g)과 장기복구수준(PGA : 0.154 g)의 지진하중에 대해 비선형 시간이력해석법 및 다중모드스펙트럼해석법으로 지진응답을 산출하고 그 결과를 비교하였다.

비선형 시간이력해석 결과 지진세기에 따른 마찰복원형 지진격리장치의 전단력 및 최대 변위를 종합적으로 정리하면 Table 6 및 Table 7과 같다. 비선형 시간이력해석 결과 마찰복원형 지진격리장치는 지진세기가 증가하

**Table 6.** Shear force and displacement of the R-FBI (X dir)

Loc.	Specification of the R-FBI			Result of non-linear time history analysis		
	$f_y$ (kN)	$f_u$ (kN)	$d_u$ (mm)	PGA	Shear force (kN)	Displacement (mm)
P1	925	925	100	0.08 g	925	6.95
				0.154 g	925	15.27
				0.22 g	925	23.80
P2	925	925	100	0.08 g	925	5.11
				0.154 g	925	12.50
				0.22 g	925	21.24
P3	725	923	100	0.08 g	731	3.91
				0.154 g	738	7.51
				0.22 g	753	14.57
P4	1,075	1,368	100	0.08 g	1,075	6.80
				0.154 g	1,075	14.55
				0.22 g	1,075	25.70
P5	1,075	1,368	100	0.08 g	1,075	3.53
				0.154 g	1,075	14.73
				0.22 g	1,075	24.38
P6	1,075	1,368	100	0.08 g	1,075	5.21
				0.154 g	1,075	23.19
				0.22 g	1,075	35.42
P7	1,075	1,368	100	0.08 g	1,070	2.29
				0.154 g	1,075	18.16
				0.22 g	1,075	30.01
P8	1,075	1,075	100	0.08 g	1,074	2.79
				0.154 g	1,075	15.07
				0.22 g	1,075	30.48
P9	1,075	1,075	100	0.08 g	1,075	5.82
				0.154 g	1,075	28.05
				0.22 g	1,075	39.87
P10	1,075	1,075	100	0.08 g	1,075	15.99
				0.154 g	1,075	35.41
				0.22g	1,075	48.20

**Table 7.** Shear force and displacement of the R-FBI (Y dir)

Loc.	Specification of the R-FBI			Result of non-linear time history analysis		
	$f_y$ (kN)	$f_u$ (kN)	$d_u$ (mm)	PGA	Shear force (kN)	Displacement (mm)
P1	925	1,177	100	0.08g	945	9.31
				0.154g	998	29.28
				0.22g	1,042	46.70
P2	925	1,177	100	0.08g	944	8.22
				0.154g	1,004	31.63
				0.22g	1,042	47.84
P3	725	923	100	0.08g	740	8.54
				0.154g	782	29.50
				0.22g	803	40.01
P4	1,075	1,368	100	0.08g	1,085	4.14
				0.154g	1,145	24.27
				0.22g	1,221	49.97
P5	1,075	1,368	100	0.08g	1,098	8.55
				0.154g	1,142	23.33
				0.22g	1,226	51.84
P6	1,075	1,368	100	0.08g	1,020	1.38
				0.154g	1,129	18.90
				0.22g	1,217	48.83
P7	1,075	1,368	100	0.08g	816	0.71
				0.154g	1,116	14.60
				0.22g	1,202	43.88
P8	1,075	1,368	100	0.08g	1,014	1.30
				0.154g	1,134	20.84
				0.22g	1,202	44.11
P9	1,075	1,368	100	0.08g	1,007	1.14
				0.154g	1,140	22.90
				0.22g	1,223	51.07
P10	1,075	1,368	100	0.08g	1,046	1.78
				0.154g	1,125	17.80
				0.22g	1,189	39.38



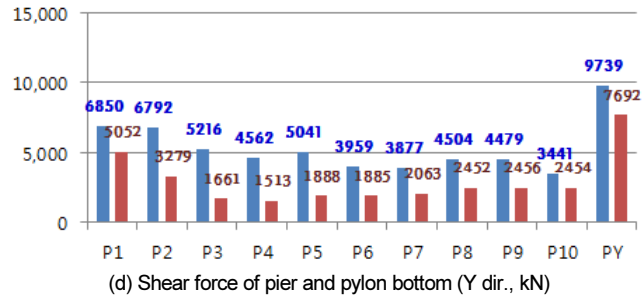
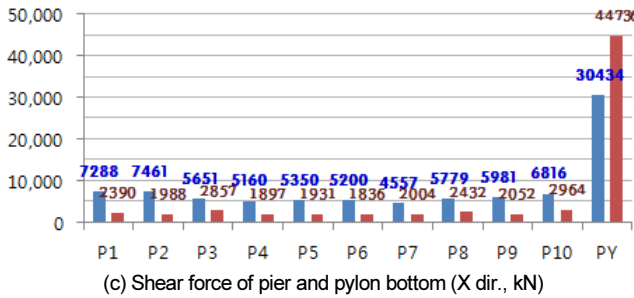
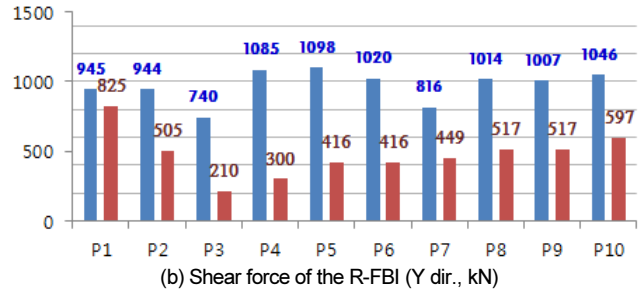
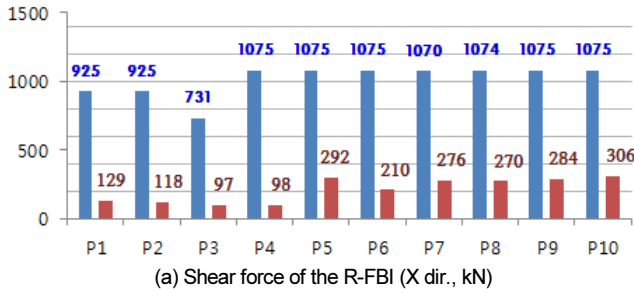


Fig. 7. Comparison of the results of non-linear time history analysis and multi-mode spectral analysis (PGA: 0.08 g) ■ TH ■ RS

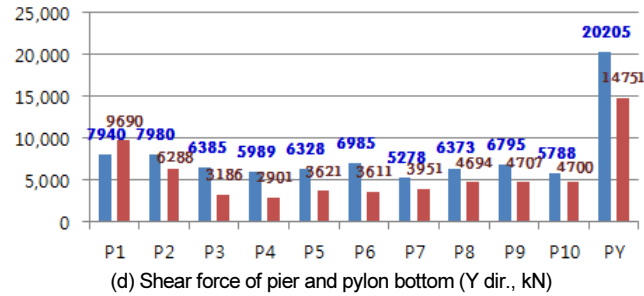
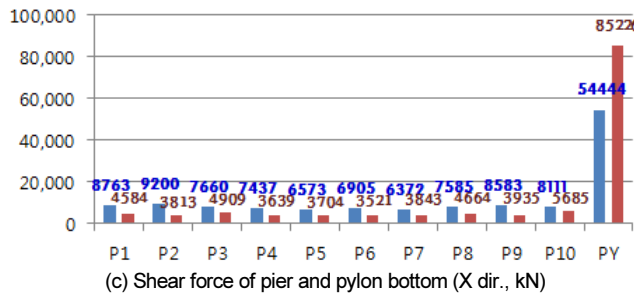
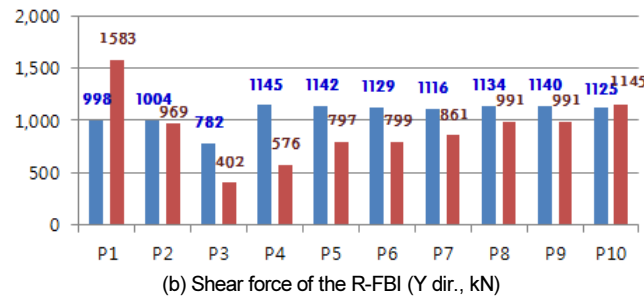
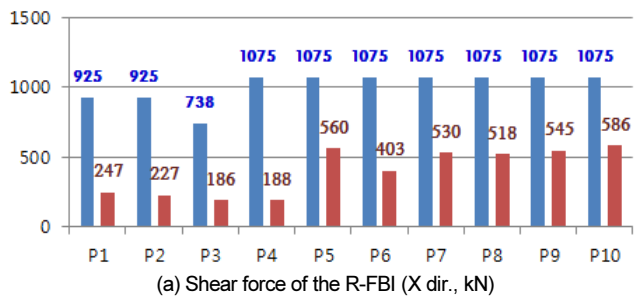


Fig. 8. Comparison of the results of non-linear time history analysis and multi-mode spectral analysis (PGA: 0.154 g) ■ TH ■ RS

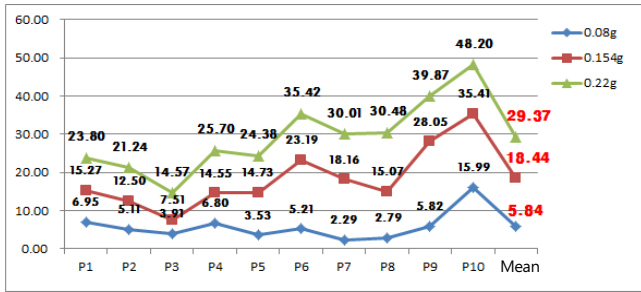
더라도 받침 전단력의 증가량은 크지 않고, 변위만 증가하는 양상을 보이는 것으로 분석되었다. 교축방향은 고정단인 P3을 제외하고 지진세기가 증가 하더라도 받침 전단력 증가량은 없고, P3 위치에서의 증가량은 최대 2.0% 수준에 불과한 것으로 나타났다. 교축직각 방향은 지진세기가 0.08 g에서 0.154 g로 증가하는 경우 받침 전단력의 최대 증가량은 36.8%로 나타났으며, 0.154 g에서 0.22 g로 증가하는 경우에는 최대 7.8%로 증가함을 해석적으로 확인할 수 있었다.

Fig. 7과 Fig. 8에서 보는 바와 같이 기능수행수준과 장기복구수준의 지진하중에 대해 지진해석을 수행한 결과 비선형 시간이력해석법과 다중모드스펙트럼해석법 간의 지진응답이 매우 큰 차이를 보였다. 다중모드스펙트럼해석 결과 대비 비선형 시간이력해석 결과는 지진격리장치 전단력의

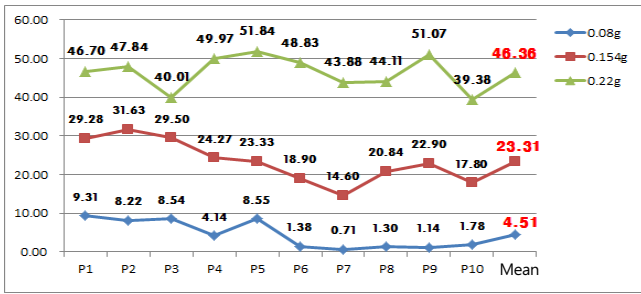
경우 기능수행수준에서는 최대 10.97배, 장기복구수준에서는 최대 5.72배의 차이가 발생했고, 교각 및 주탑 하부 단면력의 경우 기능수행수준에서는 최대 3.95배, 장기복구수준에서는 최대 3.47배의 차이가 발생했다. 또한, 다중모드스펙트럼해석 결과는 지진하중에 의해 발생하는 교량 구성요소의 부재력을 상대적으로 과소 평가하는 경향을 보이는 것으로 나타났다.

받침의 변위는 Fig. 9에서 알 수 있듯이, 비선형 시간이력해석 결과 마찰복원형 지진격리장치의 평균 변위는 지진세기가 증가함에 따라 교축 방향의 경우 5.84 mm(0.08 g)에서 18.44 mm(0.154 g), 29.37 mm(0.22 g) 순으로 증가하였고, 교축직각 방향의 경우 4.51 mm(0.08 g)에서 23.31 mm(0.154 g), 46.36 mm(0.22 g) 순으로 증가하는 추세를 보였다.

이와 같은 결과는 마찰복원형 지진격리장치에 작용하는 수평력이 마찰



(a) X-direction



(b) Y-direction

Fig. 9. Displacement of the R-FBI due to increase of PGA (mm)

발생 하중 이하일 때에는 PTFE 마찰면의 미끄럼이 발생하지 않아 유효강성( $K_{eff}$ )보다 매우 큰 수평강성인 1차강성( $K_u$ )으로 수평력에 저항하고, 마찰복원형 지진격리장치에 작용하는 수평력이 마찰 발생 하중에 도달하거나 초과하는 경우에는 1차강성( $K_u$ )으로 수평력에 저항하다가 미끄럼이 발생하면서 지진격리장치의 변위가 증가하고 지진에너지를 소산시키기 때문이다.

두 해석법 간의 비교 분석 결과로부터, 마찰복원형 지진격리장치를 사용한 케이블교량은 다중모드스펙트럼해석법을 이용하여 내진설계를 수행하면, 내진성능수준별 성능목표 만족 여부를 잘못 판단할 수 있고, 교량 안전성 또는 경제성 측면에서 불합리한 설계가 될 수 있다는 사실을 확인할 수 있다.

## 4. 케이블교량 내진설계 절차 개선

### 4.1 마찰복원형 지진격리장치의 거동특성 반영

현재 「도로교설계기준(한계상태설계법) 케이블교량편」에서 규정하고 있는 내진 설계단계(기능수행수준 및 장기복구수준)의 세부 절차는 Fig. 10과 같으나 이 절차는 마찰복원형 지진격리장치의 거동 특성을 제대로 반영하지 못한다.

대상교량은 동반논문[1] 실험 결과와 본 논문의 비선형 시간이력해석 결과를 통해 마찰복원형 지진격리장치는 마찰면의 미끄럼이 발생하지 않는 하중 미만의 지진세기가 가해지는 경우에는 고정단처럼 작동하고, 마찰면의 미끄럼이 발생하는 하중 이상의 지진세기가 가해지는 경우에는 Fig. 11과 같이 비선형 이력거동을 한다는 사실을 확인할 수 있었다.

그러므로, 위와 같은 마찰복원형 지진격리장치의 거동특성을 고려하지 않고 케이블교량 내진설계 단계에서 일률적으로 유효강성( $K_{eff}$ )을 적용하

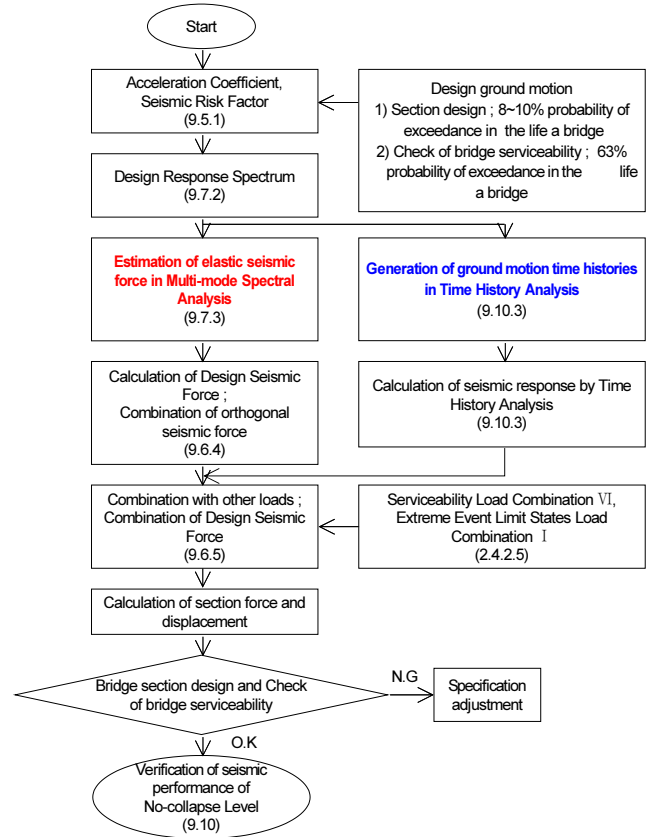


Fig. 10. Procedure of seismic design using performance based design method [Korean Highway Bridge Design Code (Limit State Design) for Cable Supported Bridges]

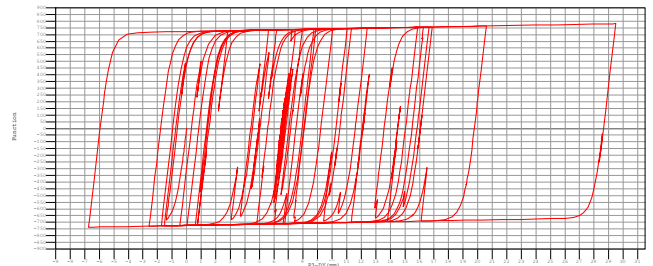


Fig. 11. Force-Displacement hysteresis curve of the R-FBI (P3, PGA = 0.154 g)

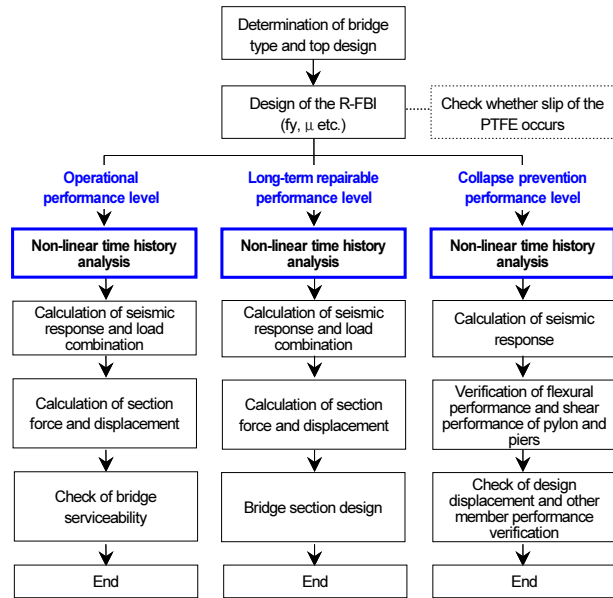
는 다중모드스펙트럼해석법을 이용하면 내진성능수준별 목표성능 확보 여부를 잘못 판단할 수 있으므로 마찰복원형 지진격리장치의 거동특성을 반영한 내진설계 절차가 필요하다.

### 4.2 성능기반설계에 기초한 케이블교량의 내진설계법 제안

마찰복원형 지진격리장치의 거동 특성을 이용하여 설계자는 지진격리장치 설계변수(마찰계수 등) 조정을 통해 내진성능수준별로 교량 거동상태를 설정할 수 있다. 즉, 내진성능수준별 지진세기에 대해 지진격리효과 발휘 여부에 따라 그에 적합한 지진격리장치 모델링 및 지진해석법을 적용함으로써 설계 효율성을 제고하고 합리적인 설계를 유도할 수 있다.

마찰복원형 지진격리장치가 설치된 케이블교량의 거동 특성을 반영하

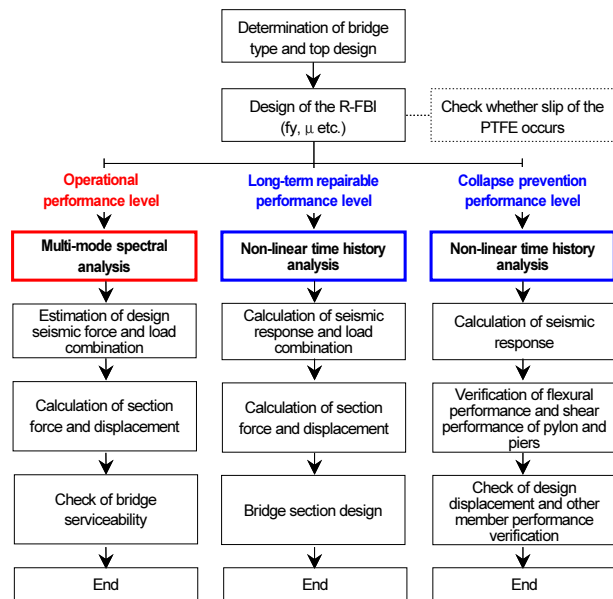
□ CASE I : PTFE friction surface slip from Operational performance level



※ Modelling of the R-FBI  
 - Operational performance level : *nonlinear hysteresis*, Long-term repairable performance level : *nonlinear hysteresis*, Collapse prevention performance level : *nonlinear hysteresis*

Fig. 12. Proposed the performance-based seismic design procedure for cable supported bridges with the R-FBI (CASEI)

□ CASE II : PTFE friction surface slip from Long-term repairable performance level



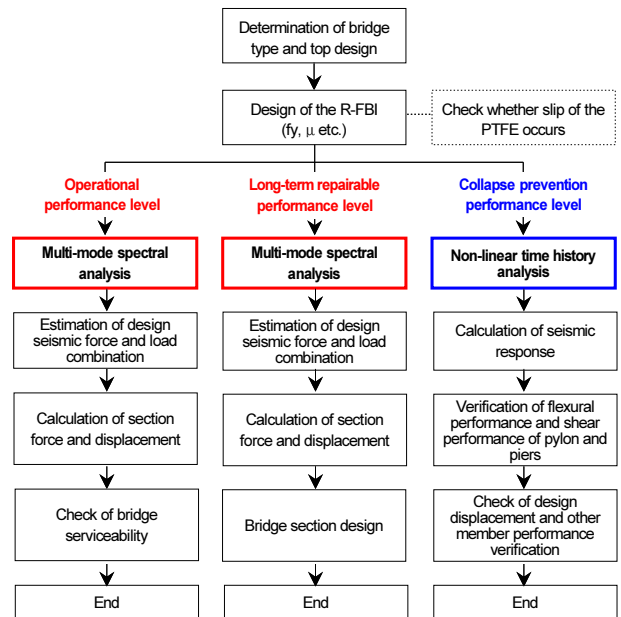
※ Modelling of the R-FBI  
 - Operational performance level : *initial stiffness*, Long-term repairable performance level : *nonlinear hysteresis*, Collapse prevention performance level : *nonlinear hysteresis*

Fig. 13. Proposed the performance-based seismic design procedure for cable supported bridges with the R-FBI (CASEII)

여 내진성능수준별 지진격리효과 발휘 여부에 따른 CASE별 내진설계 절차를 Fig. 12~Fig. 14와 같이 제안하였다.

CASE 1은 기능수행수준 지진세기부터 지진격리효과를 발휘토록 하

□ CASE III : PTFE friction surface slip from Collapse prevention performance level



※ Modelling of the R-FBI  
 - Operational performance level : *initial stiffness*, Long-term repairable performance level : *initial stiffness*, Collapse prevention performance level : *nonlinear hysteresis*

Fig. 14. Proposed the performance-based seismic design procedure for cable supported bridges with the R-FBI (CASEIII)

는 경우이다. 이 경우는 1 단계(Operational Performance level)부터 마찰 복원형 지진격리장치의 비선형 이력거동을 통해 지진에너지를 소산시키므로 모든 내진성능수준에 대해 지진격리장치를 비선형 이력거동으로 모델링하고, 지진해석은 비선형 시간이력해석법을 적용해야 한다. CASE 1은 주기 이동을 통해 지진력을 저감시킬 필요가 있는 단주기 교량에 효율적일 수 있다.

CASE 2는 장기복구수준의 지진세기부터 지진격리효과를 발휘토록 하는 경우이다. 이 경우는 2단계(Long-term Repairable Performance level)부터 마찰복원형 지진격리장치의 비선형 거동을 통해 지진에너지를 소산시키므로 장기복구수준과 붕괴방지수준에 대해서는 지진격리장치를 비선형 이력거동으로 모델링하고, 비선형 시간이력해석법을 적용해야 한다. 반면 기능수행수준에 대해서는 지진격리효과를 고려할 필요가 없으므로 지진격리장치를 초기강성 또는 고정단으로 모델링하고 다중모드스펙트럼해석법을 적용할 수 있다.

CASE 3은 붕괴방지수준의 지진세기부터 지진격리효과를 발휘토록 하는 경우이다. 이 경우는 3단계(Collapse Prevention Performance level)부터 마찰복원형 지진격리장치의 비선형 거동을 통해 지진에너지를 소산시키므로 기능수행수준과 장기복구수준에 대해서는 지진격리장치를 초기 강성 또는 고정단으로 모델링하고, 지진해석은 다중모드스펙트럼해석법을 적용할 수 있다. 그러나 붕괴방지수준에 대해서는 지진격리장치의 비선형 거동을 고려해야 하므로 지진격리장치를 비선형 이력거동으로 모델링하고 비선형 시간이력해석법을 적용해야 한다. CASE 3은 주기 이동을 통한 지진력 저감 효과가 낮으므로 장주기 교량에 효율적일 것이다.



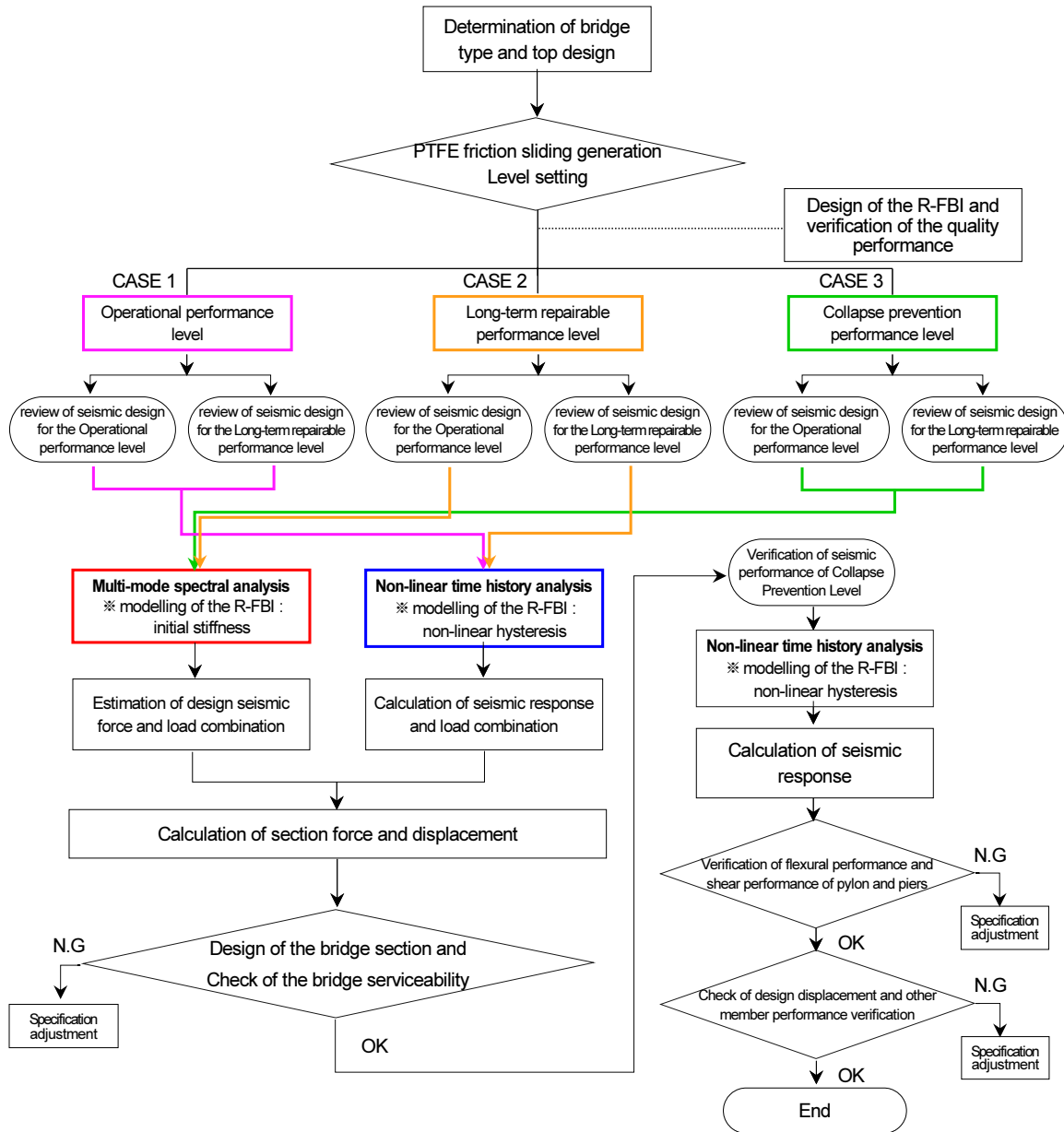


Fig. 15. Proposed the performance-based seismic design method for cable supported bridges with the R-FBI

최종적으로 본 논문에서는 동반논문[1]의 현장실험 결과와 비선형 시간 이력해석 결과를 바탕으로 마찰복원형 지진격리장치가 설치된 케이블교량의 성능에 기반한 내진설계 절차와 적용법을 Fig. 15와 같이 제안하며, 향후 실무 적용성을 높이기 위해서는 다양한 형태의 마찰복원형 지진격리장치와 보다 많은 경우의 케이블교량 구조형태를 고려한 연구가 추가되어야 할 것이다.

## 5. 결론

「도로교설계기준(한계상태설계법) 케이블교량편」은 케이블교량의 특수성을 고려한 설계를 위해 최근에 제정되었으며, 성능기반 내진설계 기준을 채용하고 있다. 본 기준은 기능수행수준, 장기복구수준, 붕괴방지수준의 3단계 내진성능수준을 설정하고 있다. 각 내진성능 수준별 설계지진과 목

표 성능 뿐만 아니라 적용할 수 있는 지진해석법도 규정하고 있다. 기능수행수준과 장기복구수준의 내진 설계단계에서는 다중모드스펙트럼해석법 또는 비선형 시간이력해석법을 적용할 수 있고, 내진성능 검증단계인 붕괴방지수준에 대해서는 비선형 시간이력해석법을 적용해야 한다고 명시되어 있다.

이에 본 논문에서는 대상 케이블교량의 파이버모델 구성 등을 통해 비선형 시간이력 지진해석 모델을 구축하였고, 각 내진성능수준별 지진제기에 대해 지진해석을 수행한 결과 비선형 시간이력해석법과 다중모드스펙트럼해석법 간의 지진응답 차이가 매우 크며 다중모드스펙트럼해석법은 지진응답을 과소평가하는 것을 확인하였다.

케이블교량을 대상으로 한 실험교량 실험 결과와 지진해석 결과는 기능수행수준과 장기복구수준의 내진설계 단계에서 지진격리장치의 비선형 거동 특성을 고려하지 않고 지진격리장치의 수평강성으로 일률적인 유효강성

( $K_{eff}$ )을 사용하는 선형 지진해석법(다중모드스펙트럼해석법)을 적용하면 내진성능수준별 목표 성능 만족 여부를 잘못 판단할 수 있고, 교량의 안전성 또는 경제성 측면에서 불합리한 설계가 될 수 있음을 보여준다.

마찰복원형 지진격리장치를 사용한 케이블교량의 합리적이고 효율적인 내진설계를 위해서는 마찰복원형 지진격리장치가 마찰발생 하중 전에는 고정단 처럼 작동하고 마찰 발생 하중 후에는 비선형 이력거동을 하는 지진격리장치의 거동특성을 내진설계 절차에 반영함으로써, 내진성능수준별로 설계자가 설정한 지진격리효과 발휘 유무에 따라 지진해석법을 달리 적용하도록 하여야 한다. 즉, 내진성능수준별 지진세기에 대해 지진격리장치의 미끌림이 발생하지 않도록 하는 경우에는 지진격리장치를 초기강성으로 모델링하여 다중모드스펙트럼해석법을 적용하고, 지진격리장치의 미끌림이 발생하여 격리효과를 발휘토록 하는 경우에는 지진격리장치의 비선형 이력거동을 반영할 수 있도록 비선형 시간이력해석법을 적용해야 한다.

최종적으로 본 논문에서는 마찰복원형 지진격리장치가 적용된 케이블교량의 성능에 기반한 내진설계 절차와 적용법을 제안하였으며, 향후 실무 적용성을 높이기 위해서는 다양한 형태의 제품과 구조계를 고려한 연구가 추가적으로 수행되어야 할 것이다.

**/ REFERENCES /**

1. Gil HB, Park SK, Han KB, Yoon WS, Improvement of the performance based seismic design method of cable supported bridges with the resilient-friction base isolation systems (I-Analysis of field testing of cable supported bridge). *Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea*, 2020 Jul;24(4):157-167.
2. Ministry of Land, Infrastructure and Transportation, Korean Highway Bridge Design Code (Limit State Design) for Cable Supported Bridges, c2016.
3. Ali HM, Abdel-Ghaffar AM, Seismic energy dissipation for cable-stayed bridges using passive devices, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 1994 Aug;23(8):877-893.
4. AASHTO, Design procedures for seismically isolated bridge, Dynamic Isolation System, Inc, Berkeley, CA, c1994.
5. Shin YS, Park JH, Choi KS, Hong SH, Seismic behavior and economic analysis of bridge for PSC I-Shaped Gider of isolated device, *Journal of the Computational Structural Engineering Institute*

- of Korea, 2008 Apr;21(2):145-151.
6. Ha DH, Koh HM, Earthquake response characteristics of seismically isolated bridges with frictional bearings, *KSCE Journal of Civil Engineering*, 2000 Nov;20(6-A):937-944.
7. Yu SM, Lee YI, Ji YS, Choi DS, Kim DK, A study on the application of EQS bearings for seismic isolation of building structures by ICT case study, *Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea*, 2013 Mar;17(2):61-70.
8. Kim BS, Song JK, Seismic responses of seismically isolated nuclear power plant structure considering post-yield stiffness of EQS bearing, *Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea*, 2016 Sep;20(5):319-329.
9. Park HG, Lee YI, Jung DY, Experimental and analytical study of the dynamic behavior of a polyurethane spring restoring disk bearing, *Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea*, 2011 Mar; 15(2):61-69.
10. Asgari B, Osman SA, Application of isolation systems in the seismic control of cable-stayed bridges : A state-of-the-art review, *Latest Trends on Engineering Mechanics, Structures, Engineering Geology, International Conference on Geography and Geology*, c2010.
11. Lee YI, Lee YJ, Lee HP, Cho MS, Jee YS, Beak JH, Study on the performance improvement of an EQS device applied nuclear power plant, *Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea*, 2015 Jan;19(1):13-19.
12. AASHTO, Guide Specifications for Seismic Isolation Design (third editoin), c2010.
13. Bang IS, Experiences of Sliding Disk Bearing in Korea, 7th World Congress on Joints Bearings and Seismic Systems for Concrete Structures, Las Vegas, Nevada USA, c2011.
14. MidasIT Co., Analysis Reference.
15. Park YJ, Wen YK, Ang AH-S, Random vibration of hysteretic systems under bi-directional ground motions, *The Journal of the International Association for Earthquake Engineering*, 1986 Jul/Aug;14(4):543-557.
16. Cho YW, Kim SH, Son YK, Yoo DH, A systematic approach to the geometric control (construction engineering) for long span cable-stayed bridges, *Korean Society of Steel Construction*, c2011, p. 68-76.