

RC 슬래브 교량의 요소별 노후도를 고려한 지진취약도 비교분석

안효준¹, 박기태², 정규산³, 김유희⁴, 이종한^{5*}

A Comparative Study on Seismic Fragility of RC Slab Bridge Considering Aging Effect of Components

Hyojoon An¹, Ki-Tae Park², Kyu-San Jung³, Yu-Hee Kim⁴, Jong-Han Lee^{5*}

Abstract: In recent years, large-scale earthquake activity has occurred in Korea, and thus public interest in earthquakes is increasing. Accordingly, the importance of seismic performance management of structures is emerging. In particular, the collapse of a bridge, one of main road facilities, directly leads to many casualties. Therefore, engineers need to evaluate the seismic fragility of the bridge and prepare for the earthquake event. The service life of these bridges has been over 30 years, which requires a study on the aging effect on bridges. In this study, seismic analysis of the target RC slab bridge was performed considering the aging effects of each component of the bridge. Components of the bridge included pier and bearing, which dominate the seismic response of the bridge. The seismic performance of the bridge was evaluated using nonlinear static and dynamic analyses. In addition, the limit state and dynamic response of each component were used to evaluate the seismic fragility according to the aging of each component.

Keywords: RC bridge, Aging effect, Nonlinear analysis, Limit state, Seismic fragility

1. 서 론

최근 국내 포항 및 경주에서 발생한 대규모 지진으로 인해 국민들의 지진에 대한 관심이 증가하고 구조물의 내진성능 관리에 대한 중요성이 대두되고 있다. 또한 근대 이후 국내의 급격한 성장으로 인한 도시화와 많은 도로시설물이 건설됨에 따라 인구밀집지역에서 발생하는 자연재해에 대한 대비가 필요하다. 이러한 국민 안전 및 생활 보장이란 비전아래 큰 피해가 발생할 수 있는 대형 구조물과 도로시설물의 지진에 대한 안전성을 확보 및 평가하는 연구들이 증가하고 있는 추세이다. 특히, 국내에서는 1980년대 이후로 많은 교량이 새로 건설되었으며, 이는 국내 교량의 약 56%를 차지하고 있다 (MOLIT, 2020). 또한, 운영기간이 30년이 초과한 교량의 비율은 전체의 약 11%를 차지하고 있다. 이러한 노후 교량들은 내진설계가 수행되지 않은 교량이 대부분이므로 더욱 세심한 관리가 요구된다. 따라서 교량의 노후화가 지진응답에 미치

는 영향을 연구하고 이에 대한 정량적인 비교분석을 통하여 지진에 대한 안전성을 확보하는 것이 필요하다.

교량에 있어서 노후화의 발생은 사용연수가 증가함에 따라 구조부재의 재료 및 역학적 성질이 저하되며 최종적으로는 구조적 성능이 저하되어 더욱 지진하중에 취약하게 된다. 또한, 교량에 있어서 지진에 대한 응답을 지배하는 요소는 일반적으로 교각과 교량받침이며, 노후화 평가 또한 해당 부재들에 대해 우선적으로 진행된다. 특히 교량의 노후화는 내진성능의 관점에서 상판의 노후화에 의한 영향보다 교각 및 교량받침의 노후화가 교량의 지진취약도에 있어 더욱 큰 영향을 끼친다. 이러한 교량의 중요 부재별로 노후화에 의해 구조적 성능이 감소하며 각 부재의 성능저하가 복합적으로 구조물 전체에 영향을 끼치게 된다. 따라서, 교량의 개별 부재에 대한 노후화 영향 분석을 선행적으로 진행 후 전체적인 교량 구조물의 내진성능을 평가하는 것이 필요하다.

교각의 노후화는 피복 콘크리트의 박리박락 혹은 누수 및 제설제로 인한 철근부식 등이 대표적인 예이다. 또한, 교량받침은 신축이음부 혹은 배수시설에 의한 누수로 인해 열화 발생으로 인해 노후화가 주로 발생하게 된다. 교각의 노후화로 인해 지진하중에 대하여 교량의 횡변위가 증가 및 연성 감소 등이 발생할 수 있으며, 교량받침 또한 노후화로 인해 전단강성의 증가와 허용변위 감소 등이 발생하며 이는 모두 교량의 전체적인 내진성능 감소로 이어지게 된다. 하지만, 이러한 부

¹학생회원, 인하대학교 토목공학과 박사과정

²정회원, 한국건설기술연구원 노후인프라센터 선임연구원의원

³정회원, 한국건설기술연구원 노후인프라센터 수석연구원

⁴정회원, 한국건설기술연구원 노후인프라센터 박사후연구원

⁵정회원, 인하대학교 토목공학과 부교수

*Corresponding author: jh.lee@inha.ac.kr

Department of Civil Engineering, Inha University, Incheon, 22212, Korea

•본 논문에 대한 토의를 2022년 1월 31일까지 학회로 보내주시면 2022년 2월 호에 토론결과를 게재하겠습니다.

재별 노후화를 평가하기 위해서는 많은 인력과 시간이 소요되며 대체적으로 교량에 대한 지진취약도를 평가 시에 고려하지 않는 경우가 대부분인 것이 현실이다.

본 연구에서는 국내에서 일반적으로 사용되는 RC슬래브 교량에 대해 교각 및 교량받침의 노후화에 따른 영향을 비교분석하였다. 교량의 정확한 지진해석을 위해 재료 및 구조의 비선형성을 고려하였으며, 각 부재 별 노후화에 따라 케이스를 나누어 모델링하였다. 교량의 지진안전성을 평가하기 위해서 비선형 정적해석과 다양한 지진하중을 이용한 동적해석을 통해 교각의 내진성능 및 교량의 동적응답에 대해 비교하였다. 또한, 교량의 주요 부재에 대해서 한계상태를 정의하고 지진취약도 곡선을 산정하여 노후화에 따른 영향을 비교분석하였다.

2. 해석모델

2.1 대상 교량 제원

해석에 사용된 교량은 국내에서 일반적으로 사용되고 있는 RC 슬래브 교량을 선택하였다. 교량은 경간장 30m로 3경간 연속교로 이루어져 있다. 교각은 지름 2m 원형단면으로 높이는 10m이다. 교각의 철근 배근은 주철근 D25을 사용하여 2단 배근하였으며, 띠철근은 D16을 300mm 간격으로 배근하였다. 또한 교량받침은 일반적으로 사용되는 고무탄성받침

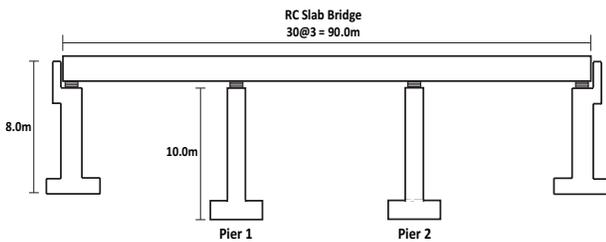


Fig. 1 Side layout of the bridge

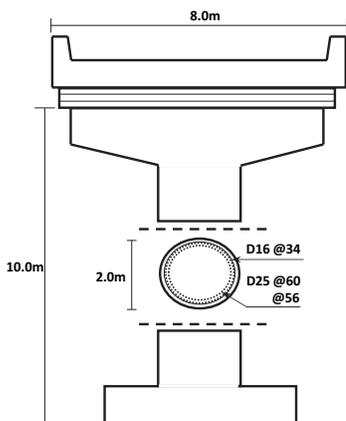


Fig. 2 Cross section of the pier

(Rubber Bearing, RB)으로 교대 및 교각에 사용되었다. 교량 및 교각에 대한 일반도는 다음 Fig. 1-2에 나타내었다.

2.2 비선형 수치해석을 위한 대상 교량의 모델링

본 연구에서는 구조물의 비선형 및 동적거동을 분석하기 위해 OpenSEES 프로그램(Mazzoni et al., 2005)을 사용하였다. 지진에 의한 교량의 거동은 일반적으로 교각과 교량받침에 의해 지배된다. 따라서, 상부구조는 지진하중에 의해 탄성 거동을 하는 탄성 보-기둥 요소(Elastic beam-column element)를 사용하였다. 상부구조의 가로보와 교각의 캡(Cap)은 강체 요소(Rigid beam element)를 사용하였다. 또한, RB 교량받침은 탄성 스프링 요소(Zero-length spring element)를 사용하여 모사하였다. 이때 사용된 교량받침의 전단강성과 압축강성은 주어진 고정하중에 맞는 제원을 사용하였다. 교량받침의 허용 변위를 벗어난 경우에는 받침의 저항이 상실되어 상판의 미끄러짐이 발생하도록 하였다. 이때, 교량받침은 각 교대 및 교각에 2개씩 배치하였다.

지진하중에 의해 비선형 거동이 예측되는 교각은 섬유 요소(Fiber element)를 사용하여 교각의 철근 및 콘크리트의 항복과 파괴에 대해 고려하였다. 교각의 비선형 거동을 상세하게 분석하기 위해 원형 단면을 50개의 섬유 요소로 분할하여 해석을 수행하였으며, 교각의 소성힌지 구역은 보다 상세하게 요소를 분할하여 구성하였다. 콘크리트의 비선형 재료 물성치는 비구속 콘크리트(Unconfined concrete)와 띠철근에 의해 횡구속 효과가 나타나는 구속 콘크리트(Confined concrete)로 나누어 정의하였다(Mander et al., 1988). 콘크리트의 피복 두께는 0.1m이며, 비구속 콘크리트의 압축강도는 27MPa, 횡방향 및 축방향의 철근의 항복강도는 300MPa이다.

교량의 기초는 확대기초로 이루어져 있으며, 이를 고정단으로 가정하여 해석을 수행하였다. 또한, 대상 교량의 교대와 지반 사이의 경계조건도 고정단으로 가정하였다. 교량의 자중은 점하중으로 표현하였으며, 교대 및 교각에 5MN, 10MN을 각각 재하하였다. 교량의 수치해석 모델링에 대한 설명을 Fig. 3에 나타내었다.

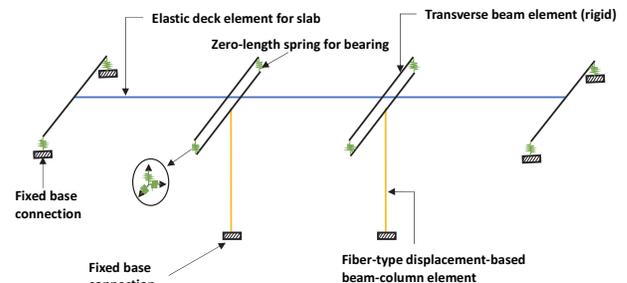


Fig. 3 Numerical modeling of the bridge

2.3 노후도 효과를 반영한 교각의 모델링

교각은 교량 구조물에 있어서 지진하중에 의해 가장 큰 영향을 받는 요소 중 하나이며 교량의 지진거동에 지배적인 영향을 끼친다. 이러한 교각의 노후도 효과는 다른 구조요소들에 비해 많은 영향을 끼친다. 일반적으로 교각의 노후도를 고려하기 위해서는 다음과 같은 사항들을 고려한다.

- (1) 철근의 질량 감소
- (2) 피복 콘크리트의 강도 감소
- (3) 철근과 콘크리트의 부착강도 감소

위의 3가지 요인에 대해서 다양한 실험과 수치해석을 통해 검증 연구를 진행하였으며, 가장 지배적인 요인을 분석하였다 (Aquino and Hawkins, 2007). 또한, Berry and Eberhard (2007)에 의하면 콘크리트의 강도 감소와 부착강도 감소는 철근 질량 감소에 비해 영향이 크지 않으며, 철근 질량 감소율이 교각의 거동에 있어서 가장 지배적인 영향을 끼친다는 것을 확인하였다. Nguyen(2013)의 연구에 의하면 노후화에 의한 철근 질량 감소율이 주철근보다 띠철근에서 1.5배 이상 나타나며, 일반적으로 질량 감소율이 10% 이상에서 교각의 거동에 영향을 주는 것으로 확인하였다. 따라서, 본 연구에서는 노후 교각에 대해 철근 질량 감소율을 10%로 가정하였으며, 띠철근은 1.5배인 15%를 감소하여 모델링하였다. 철근의 질량 감소율(γ)은 Eq. (1)과 같다.

$$\gamma(\%) = \frac{m_o - m}{m_o} \times 100 \quad (1)$$

여기서, m_o 는 초기 철근 질량이며, m 은 노후도가 발생한 철근의 최종 질량이다.

2.4 노후도 효과를 반영한 교량받침의 모델링

교량받침은 온도, 하중, 굽힘 등의 다양한 요인에 의해서 노후화가 발생하며, 이러한 노후화 효과는 교각과 상판 사이의 변위, 에너지의 전달에 있어서 영향을 끼치게 된다. Hamaguchi(2009)는 탄성고무받침에 대해서 노후화를 발생시켜 10년, 22년 후로 나누어 전단강성과 압축강성의 변화에 대해 연구하였다. 고무탄성받침의 전단강성 변화는 10년 후에 약 7.1% 증가하였으며, 22년 후에는 약 11% 증가량을 확인하였다.

AASHTO(2010)에서는 교량받침의 노후화 영향을 물성치인 초기강성(K_d)과 특성하중(Q_d)에 보정계수를 곱하여 표현하고 있으며, 탄성받침의 종류에 따라 그 보정계수를 달리 하고 있다. 이때 보정계수는 노후화 원인에 따라 다르지만 대부분의 경우 통일된 보정계수를 사용하고 있다. 일반적으로 보정계수는 고무에 영향을 미친다 가정하여 납에 의한 거동이

Table 1 AASHTO values λ for aging effect

Elastomeric Bearing Type	λ , aging	
	K_d	Q_d
Low Damping Natural Rubber	1.1	1.1
High-Damping Rubber-A	1.2	1.2
High-Damping Rubber-B	1.3	1.3
Lead-Rubber	1.0	1.0
Neoprene	3.0	3.0

지배되는 납-고무탄성받침에 대해서는 보정계수를 고려하고 있지 않다. Table 1은 AASHTO에서 규정한 노후화 보정계수(λ)를 나타내었다. 본 연구에서는 RB에 대해 노후화 효과를 명확하게 고려하기 위해 AASHTO 규정의 탄성받침 중 가장 큰 보정계수인 1.3을 고려하여 반영하였다.

3. 요소별 노후화를 고려한 교량의 지진취약도 비교분석

3.1 교량의 비선형 정적해석

교각의 내진성능과 노후도에 의한 영향을 판단하기 위해 푸쉬오버 해석(Push-over analysis)을 진행하여 교각의 성능점을 산정하였다. 푸쉬오버 해석은 교각에 대해 설정한 정적하중을 점차적으로 증가시켜 구조물 하부 전단력과 상부 변위의 관계를 그려 능력곡선(Capacity curve)을 산정한다. 일반 교각과 노후 교각의 푸쉬오버 해석 결과 변위-전단력 곡선은 Fig. 4에 나타내었다. 교각의 성능을 분석하기 위해 각 능력곡선에서 항복 변위와 극한변위를 산정하였다. 각 능력곡선에서 최대 전단력은 일반 교각은 2.73MN, 노후 교각은 2.30MN이 발생하여 노후화에 의해 약 16% 성능저하를 확인하였다. 항복변위는 일반적으로 사용하는 유효강성 근사화 방법을 통해 산정하였다. 유효강성 근사화 방법은 변위-전단력 곡선에서 초기 및 항복 강

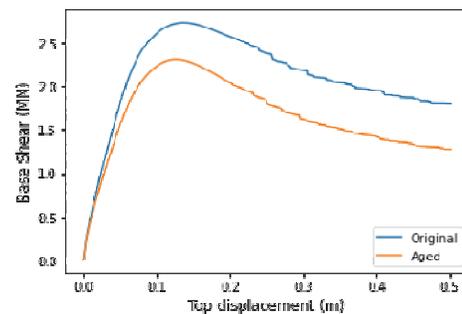


Fig. 4 Relationship between base shear and displacement for the original and aged piers

Table 2 Summary of the yield and ultimate displacements (units: mm)

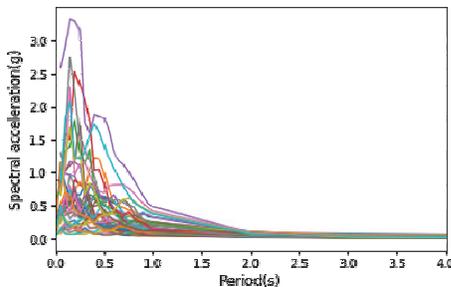
Displacement limit states	Original	Aged
Yield displacement (D_y)	87.0	75.0
Ultimate displacement (D_u)	280.0	210.0

성을 통해 항복점을 산정한다. 초기 강성은 최대 전단력의 60% 지점으로 설정하며, 초기 강성과 항복강성의 교차점에서 각 면적이 동일한 지점을 선정하여 항복 변위로 설정한다. 극한 변위는 일반적으로 최대 전단력의 85% 지점 혹은 콘크리트의 극한 변형률에 해당하는 변위를 사용하며, 본 연구에서는 최대 전단력의 85%인 지점을 극한 변위로 설정하였다.

Table 2는 일반 교각과 노후 교각에 대해 항복 변위와 극한 변위를 정리하였다. 항복 변위와 극한 변위 모두 노후화에 의해 감소하는 것을 확인하였다. 항복 변위는 일반 교각과 노후 교각이 각 87.0mm와 75.0mm로 약 14%의 감소가 발생하였다. 또한, 극한 변위는 280.0mm와 210.0mm로 약 25%가 감소하였다. 노후화에 의해 교각의 극한 변위가 항복 변위보다 더 큰 감소율을 보였으며, 전체적으로 교각의 노후화에 의해 내진 성능이 감소하는 것을 확인하였다.

3.2 사용 지진하중

교량의 비선형 동적해석을 위한 지진하중은 총 40개를 선정하여 사용하였다. 국내 실정을 반영하기 위해서는 국내에서 발생한 지진하중을 사용하여야 하지만 국내에서 발생한 지진하중은 그 수가 적으며 크기가 다양하지 않으므로 지진 취약도 해석에 있어서 편향된 결과가 나올 수 있다. 따라서, 최근 국내에서 발생한 경주(GJ), 포항(PH) 지역의 지진하중 6개와 SAC Steel Project (2000)에서 사용된 보스턴(BO) 지역의 지진하중을 사용하였다. 사용한 지진하중에 대한 정보와 응답스펙트럼은 Table 3과 Fig. 5에 나타내었다. 지진하중의 최대 지반가속도(Peak Ground Acceleration, PGA)의 범위는 0.02~0.78g로 다양한 세기의 지진하중을 포함하고 있다. 또

**Fig. 5** Spectral accelerations for ground motions**Table 3** Summary of ground motions

Name	Record	Magnitude (M)	PGA (g)
BO1	Simulation, hanging wall	6.5	0.12
BO2	Simulation, hanging wal	6.5	0.07
BO3	Simulation, foot wall	6.5	0.14
BO4	Simulation, foot wall	6.5	0.11
BO5	New Hampshire, 1982	4.3	0.58
BO6	New Hampshire, 1982	4.3	0.32
BO7	Nahanni, 1985	6.9	0.09
BO8	Nahanni, 1985	6.9	0.08
BO9	Nahanni, 1985	6.9	0.06
BO10	Nahanni, 1985	6.9	0.07
BO11	Nahanni, 1985	6.9	0.13
BO12	Nahanni, 1985	6.9	0.14
BO13	Saguenay, 1988	5.9	0.20
BO14	Saguenay, 1988	5.9	0.29
BO15	Saguenay, 1988	5.9	0.52
BO16	Saguenay, 1988	5.9	0.25
BO17	Saguenay, 1988	5.9	0.18
BO18	Saguenay, 1988	5.9	0.23
BO19	Saguenay, 1988	5.9	0.18
BO20	Saguenay, 1988	5.9	0.27
BO21	simulation, foot wall	6.5	0.32
BO22	simulation, foot wall	6.5	0.36
BO23	simulation, foot wall	6.5	0.34
BO24	simulation, foot wall	6.5	0.24
BO25	simulation, foot wall	6.5	0.29
BO26	simulation, foot wall	6.5	0.31
BO27	Nahanni, 1985 Station 1	6.9	0.25
BO28	Nahanni, 1985 Station 1	6.9	0.24
BO29	Nahanni, 1985 Station 2	6.9	0.17
BO30	Nahanni, 1985 Station 2	6.9	0.21
BO31	Nahanni, 1985 Station 3	6.9	0.38
BO32	Nahanni, 1985 Station 3	6.9	0.39
BO33	Saguenay, 1988	5.9	0.57
BO34	Saguenay, 1988	5.9	0.78
GJ1	DKJ Station	5.8	0.09
GJ2	MKL Station	5.8	0.28
GJ3	USN Station1	5.8	0.40
PH1	CHS Station	5.4	0.02
PH2	DKJ Station	5.4	0.05
PH3	USN Station2	5.4	0.28

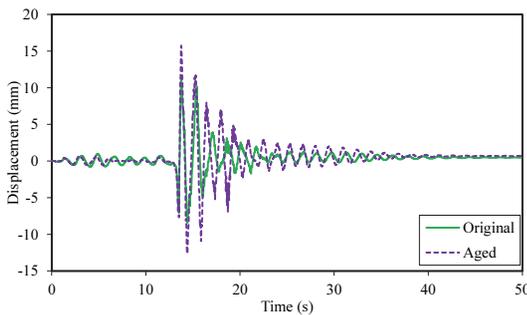
한, 응답스펙트럼 상에서 지진하중의 평균 최대응답은 0.2~0.5초 사이에서 발생하며 최대 3.0g의 응답을 가지고 있다. 선정된 지진하중을 교량의 교각방향과 교량방향에 입력하여 비선형 동적해석을 수행하였다.

3.3 교량의 비선형 동적해석

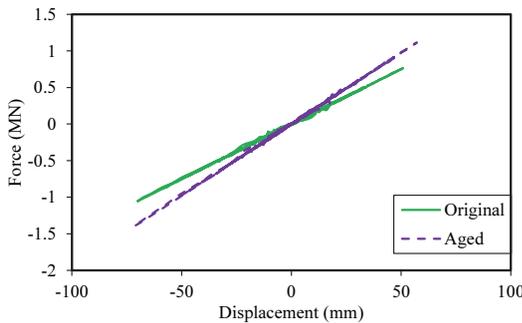
비선형 동적해석은 교량의 요소별 노후화를 고려하여 진행하였다. 즉, 교량과 받침 노후화가 없는 일반 상태(Case 1), 교량받침 노후화만 발생한 경우(Case 2), 교각 노후화만 발생한 경우(Case 3), 교량받침과 교각 노후화가 동시가 발생한 경우(Case 4)로 총 4가지의 케이스(Case)로 정의하였다. 모든 지진하중에 대해 각 케이스의 동적응답은 크기의 차이는 있지만, 경향은 유사하였다. Table 4는 하나의 지진하중(BO34)에 대한 각 케이스 별 최대 동적응답을 비교하였다. 교량의 동적응

Table 4 Summary of the maximum displacements for the pier and bearing (units: mm)

Max. displacement	Case1	Case2	Case3	Case4
Pier	11.2	15.7	11.2	15.7
Bearing	70.2	71.8	70.2	71.8



(a)



(b)

Fig. 6 Dynamic responses of the original and aged bridges: (a) Response of the pier (b) Response of the bearing

답은 교각의 상단 교축변위와 교량받침의 상대변위를 모니터링 하였다. 모든 케이스에 있어 교각의 노후화는 동적 응답에 큰 영향을 미치지 않았으며, 교량받침의 노후화에 따라 응답이 변하는 것을 확인하였다. 교각의 최대변위는 Case1과 Case3이 11.2mm이며, Case2와 Case4는 15.7mm로 교량받침의 노후화 여부에 따라서 최대 응답이 약 29% 증가하였다. 교량받침의 최대응답 또한 교각과 유사하게 Case1과 Case3은 70.2mm, Case2와 Case4는 71.8mm의 응답을 보였다. 이는 교량받침의 노후화 여부에 따라 약 3% 증가하였으며, 교량받침의 변위는 교각의 최대응답에 비해 상대적으로 적은 변화를 보였다.

Fig. 6은 BO34 지진하중에 대해 Case1과 Case4에 대한 교각 및 교량받침의 시간이력 응답을 나타내었다. Fig. 6(a)는 교각의 변위 시간이력이며, 노후화에 따라 곡선의 위상은 큰 차이가 없지만 일반상태 보다 변위의 크기가 증가하는 것을 확인하였다. 교량받침은 Fig. 6(b)와 같이 변위-전단력 관계 곡선을 통해 교량받침의 응답을 평가하였다. 교량받침의 노후화가 강성에 영향을 미치지므로 일반 교량받침은 전단력이 약 1.0MN 발생하였고 노후 교량받침은 강성이 증가함에 따라 약 1.5MN의 전단력이 발생하여 노후화에 의해 더 큰 전단력이 발생하는 것을 확인하였다.

3.4 교량의 노후화에 따른 지진취약도 비교분석

구조물의 지진취약도 해석이란 임의의 지진하중 크기에서 정의된 손상확률을 초과하여 구조물이 파괴되는 것을 확률곡선으로 정의하는 것이다. 이러한 지진취약도 해석을 위해 우선 교량의 요소별로 한계상태를 정의할 필요가 있다. 한계상태의 정의는 일반적으로 4단계(경미한 손상, 중간 손상, 심각한 손상, 붕괴)를 사용하며, 교량의 지진응답에서 중요한 요소인 교각과 교량받침에 대한 한계상태를 정의하여 지진취약도 곡선을 산정하였다.

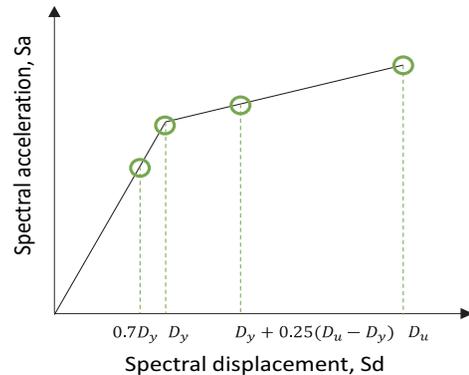
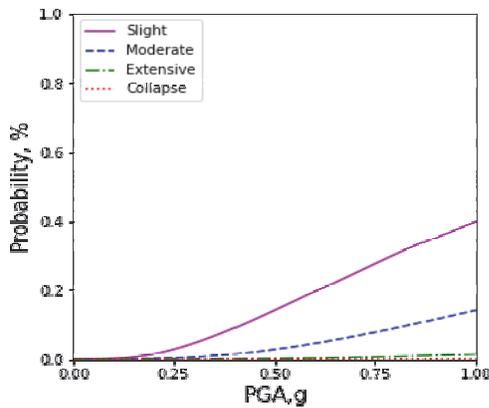


Fig. 7 Definition of Limit states for pier

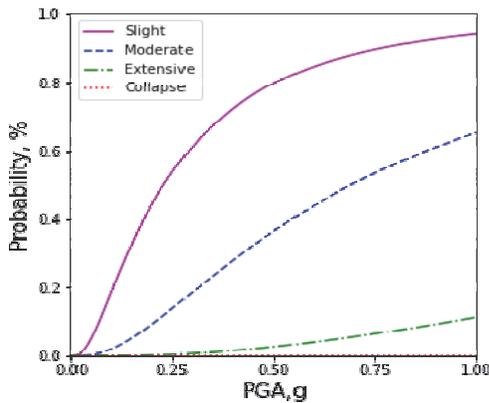
교각의 한계상태는 비선형 정적해석을 통해 얻은 항복 변위와 극한 변위를 사용하여 Barbat(2008)이 제시한 한계상태를 사용하였다. 제시한 한계상태는 항복변위와 극한변위를 조합하여 교각의 변위응답에 따른 한계상태를 정의하였으며, 이에 대한 설명은 Fig. 7에 나타내었다. 이를 통해 일반 교각과 노후 교각에 대한 한계상태를 정의하였다. 또한, 교량받침의 한계상태는 Stefanidou and Kappos(2017)의 실험결과를 사용하여 정의하였다. 교량받침은 전단변형률을 사용하여 한계상태를 구분하였으며, 노후 교량받침에 대해서는 주어진 전단 변형률에 증가된 강성비를 나누어 고려하도록 가정하였다. 이에 대한 설명은 Table 5에 나타내었다.

Table 5 Definition of Limit states for bearing

Limit states	Shear strain(γ , %)	
	Original	Aged
Slight	20	15
Moderate	100	76
Extensive	200	153
Collapse	300	230



(a)

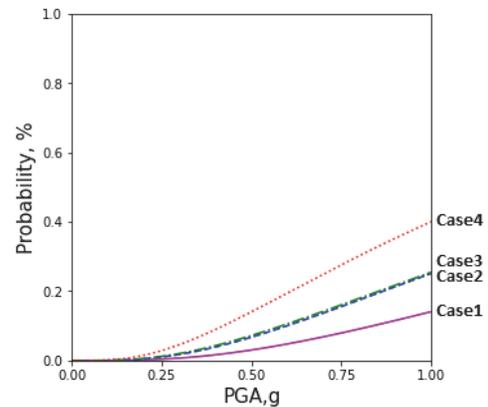


(b)

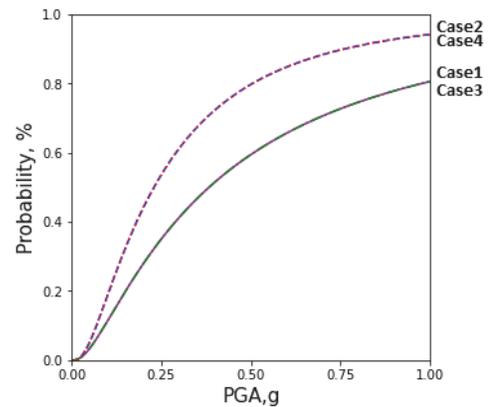
Fig. 8 Fragility curves of the aged bridges: (a) Pier (b) Bearing

정의된 각 요소별 한계상태를 통해 각 케이스 별 지진취약도 곡선을 산정하여 비교분석을 수행하였다. Fig. 8은 각 요소별 노후화를 고려한 교각과 교량받침의 지진취약도 곡선이다. 모든 한계상태에 대하여 교각에 비해 교량받침이 높은 파괴확률을 가지고 있으며, 특히 경미한 손상과 중간 손상에서 차이가 큰 것을 확인하였다. 교각은 1g에서 경미한 손상이 약 0.45 발생하며, 교량받침은 0.96 발생으로 가장 큰 차이를 보인다. 또한, 교각은 심각한 손상 이상부터는 큰 파괴가 발생하지 않으며 이는 고무탄성받침에서 지진하중에 대한 에너지가 소산되므로 교량받침에 비해 낮은 파괴확률을 보인다.

Fig. 9은 각 요소별 노후화가 지진취약도 곡선에 미치는 영향을 비교하기 위해 가장 파괴확률이 높은 경미한 손상에 대한 각 케이스 별 지진취약도 곡선을 나타내었다. 교각의 경미한 손상에 대한 지진취약도 곡선은 Fig. 9(a)와 같으며, 고무탄성받침으로 내진보강이 수행되어 큰 파괴확률을 가지지 않는다. 또한, 파괴확률은 모든 요소에 노후화 영향이 없는 Case1이 가장 낮으며, 교각과 교량받침 모두 노후화가 있는 경우 (Case4)가 가장 높게 산정되었다. Case4는 교각의 동적응답과 한계상태에 모두 노후화 영향이 있으므로 모든 케이스 중 가



(a)



(b)

Fig. 9 Fragility curves of slight damage for each case: (a) Pier (b) Bearing

장 높은 파괴 확률을 가진다. Case2와 Case3의 파괴확률은 비슷하게 산정되었다. Case2는 교량받침에만 노후화가 발생한 경우로 교각의 응답에 영향을 보였으며, 교각에 노후화 영향이 있는 Case3은 동적응답에는 큰 영향이 없었지만 교각의 한계상태 자체에 노후화 영향이 있으므로 Case1에 비해 증가하는 것을 확인하였다.

교량받침의 경미한 손상에 대한 지진취약도 곡선인 Fig. 8(b)은 모든 케이스에서 상대적으로 교각보다 높은 파괴확률을 보였다. 교량받침은 교각과 다르게 교량받침에 노후도가 있는 경우(Case2, 4)와 없는 경우(Case1, 3)에 따라 파괴확률이 양분되는 경향을 보인다. 교량받침의 변위는 요소별 노후도에 따라 큰 변화를 보이지 않았지만 교량받침 자체에 노후도가 있는 경우는 한계상태가 변화하기 때문에 이와 같은 경향을 보이는 것을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구는 교량 부재 별 노후화가 구조물의 지진응답 및 지진취약도에 대한 영향을 분석하였다. 교량의 부재는 지진응답에 주요한 교각과 교량받침을 고려하였다. 비선형 정적해석을 통해 노후화에 따른 교각의 내진성능을 비교하였으며, 비선형 동적해석을 통해서도 각 부재별 노후화에 따른 동적응답과 부재의 노후화가 응답에 끼치는 영향을 비교분석하였다. 마지막으로 지진취약도 분석을 통해 노후화가 각 부재의 지진취약도에 대한 영향을 분석하였다. 본 연구의 주요 결론은 다음과 같다.

교각의 내진성능과 노후화에 의한 영향을 평가하기 위해 비선형 정적해석을 수행하였다. 일반교각과 노후교각의 변위-전단력 능력곡선을 통해 교각의 항복변위와 극한변위를 정의하였으며, 이를 이용해 교각의 노후화에 의한 내진성능의 변화를 평가하였다. 노후화에 의해 항복변위와 극한변위는 모두 감소하였으며, 항복 변위는 일반 교각 대비 약 14%, 극한 변위는 약 25% 감소하여 노후화에 의한 내진성능 감소를 확인하였다. 특히, 교각의 노후화에 의한 극한변위 감소가 항복변위에 비해 크게 나타났다.

교량의 비선형 동적해석은 국내의 환경을 반영한 포항, 경주 지역의 지진하중과 다양한 크기를 고려할 수 있도록 해외의 지진하중을 사용하여 수행하였다. 교각의 상단 변위와 교량받침의 상대변위를 모니터링하여 요소별 노후화에 따라 비교하였다. 교각의 노후화는 교량의 동적응답에 큰 영향을 미치지 않았으며, 교각과 교량받침의 응답에 큰 차이가 발생하지 않았다. 반면에 교량받침의 노후화는 교각과 교량받침 변위에 모두 영향을 주었다. 교각의 최대변위는 교량받침 노후화에 따라 약 29% 증가하였고, 교량받침의 상대변위는 약 3%

증가로 교각에 비해 상대적으로 적은 영향을 받았다. 하지만 교량받침이 받는 최대 전단력은 노후화에 따라 약 50% 증가하여 노후 교량받침이 일반 교량받침에 비해 더 높은 전단력을 받는 것을 확인하였다.

교량의 내진성능을 확률적으로 평가하기 위해 지진취약도 해석을 수행하였다. 지진취약도 곡선은 교각과 교량받침 두 개의 요소에 대해서 산정하였으며, 각 변위와 전단변형률을 통해 한계상태를 정의하였다. 모든 한계상태에 대하여 교각에 비해 교량받침이 더 높은 파괴확률을 가지고 있으며, 교각은 1g에서 경미한 손상이 0.45 발생하였고 교량받침은 0.96으로 큰 차이를 보인다. 또한, 요소별 노후화에 따라 교각과 교량받침의 경미한 손상에 대한 지진취약도 곡선을 비교분석하였다. 교각의 지진취약도는 교각과 교량받침 모두 노후화가 있는 경우가 가장 높은 파괴확률을 가지며, 교각만 노후화가 있는 경우와 교량받침만 노후화가 있는 경우는 비슷한 파괴확률을 가지는 것을 확인하였다. 교량받침의 지진취약도는 교각과 다르게 교량받침에 노후화가 있는 경우에만 더 높은 파괴확률을 보였다.

감사의 글

본 연구는 한국건설기술연구원 주요사업 "DNA 기반 노후 교량 구조물 스마트 유지관리 플랫폼 및 활용기술 개발" 과제 (20210289-001)를 통해 수행되었음.

References

1. Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2020), 2020 Road Bridge and Tunnel Status Report, Sejong, South Korea
2. Mazzoni S, McKenna F, Scott MH, Fenves GL. (2006), OpenSees command language manual, Pacific Earthquake Engineering Research (PEER) Center. University of California, Berkeley, Berkeley.
3. Mander JB, Priestley MJN, Park R. (1988), Theoretical stress-strain model for confined concrete. *Journal of Structural Engineering ASCE*. 114(8), 1804-1825.
4. Aquino, W., and Hawkins, N. M. (2007), Seismic retrofitting of corroded reinforced concrete columns using carbon composites. *ACI Structural Journal*, 104, 348-356.
5. Berry, M. P., and Eberhard, M. O. (2007), Performance modeling strategies for modern reinforced concrete bridge columns (Technical report). Berkeley, CA: Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California.
6. Nguyen, Y. (2013), Determining the capacity of deteriorated reinforced concrete bridge structures under seismic loading, Ph.D. dissertation, California, San Diego State University, Department of Civil Engineering.
7. Hamaguchi, H. (2009), A study of aging effect on rubber bearings

after about twenty years in use, 11th World Conference on Seismic Isolation, Energy Dissipation and Active Vibration Control of Structures.

8. AASHTO, (2010), Guide Specifications for Seismic Isolation Design 3rd edition, Washington D.C.
9. Cornell CA, Jalayer F, Hamburger RO, Foutch DA. 2002, Probabilistic Basis for 2000 SAC Federal Emergency Management Agency Steel Moment Frame Guidelines. *J Struct Eng.*, 128, 526-33.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2002\)128:4\(526\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2002)128:4(526)).
10. Barbat, A. H., Pujades, L. G., and Lantada, N., (2008), Seismic

damage evaluation in urban areas using the capacity spectrum method: Application to Barcelona, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 28(10-11), 851-865.

11. Stefanidou SP, Kappos AJ. (2017), Methodology for the development of bridge-specific fragility curves. *Earthq Eng Struct Dyn.*, 46, 73-93.

Received : 10/27/2021

Revised : 11/15/2021

Accepted : 11/22/2021

요 지 : 근 국내에서 발생한 대규모 지진으로 인해 국민의 지진에 대한 관심이 증가하고 있다. 이에 따라 구조물의 내진성능관리에 대한 중요성이 대두되고 있다. 특히, 주요 도로시설물인 교량의 붕괴는 많은 인명피해로 직결되기 때문에, 교량의 지진취약도를 사전에 평가하고 대비를 하는 것이 중요하다. 최근에는 공용년수 30년 이상의 교량 구조물이 늘어나고 있어 교량의 노후화 영향에 대한 연구가 필요한 실정이다. 본 연구에서는 교량의 부재별 노후화를 고려하여 대상 RC 슬래브 교량의 지진해석을 실시하였다. 교량의 부재는 지진응답에 지배적인 영향을 주는 교각과 교량받침에 대해서 고려하였다. 교량의 내진성능 응답은 비선형 정적 및 동적 해석을 통해 분석하였다. 또한, 각 부재의 한계상태와 동적응답을 사용하여 부재별 노후화에 따른 지진취약도 비교분석을 수행하였다.

핵심용어 : RC교량, 노후화, 비선형 해석, 한계상태, 지진취약도
