

PSC 교량의 노후도 및 FRP 보강 효과를 고려한 지진취약도 분석

안효준¹, 이종한^{2*}

A Study on Seismic Fragility of PSC Bridge Considering Aging and Retrofit Effects

Hyojoon An¹, Jong-Han Lee^{2*}

Abstract : In recent years, magnitude and frequency of earthquakes have increased in Korea. Damage to a bridge, which is one of the main infrastructures, can directly lead to considerable loss of human lives. Therefore, engineers need to evaluate the seismic fragility of the structure and prepare for the possible seismic damage. In particular, the number of aging bridges over 30 years of service increases, and thus the seismic analysis and fragility requires accounting for the aging and retrofit effects on the bridge. In this study, the nonlinear static and dynamic analyses were performed to evaluate the effects of the aging and FRP retrofit on a PSC bridge. The aging and FRP retrofit were applied to piers that dominate the response of the bridge during earthquakes. The maximum displacement of the bridge increased due to the aging of the pier but decreased when FRP retrofit applied to the aged pier. In addition, seismic fragility analysis was performed to evaluate the seismic behavior of the bridge combined with the seismic performance of the pier. Compared with the aged bridge, the FRP retrofit bridge showed a decrease in the seismic fragility in all levels of damage. The reduction of the seismic fragility in the FRP bridge was prominent as the value of PGA and level of damage increased.

Keywords: PSC bridge, aging effect, FRP retrofit, nonlinear analysis, seismic fragility

1. 서 론

국내의 급격한 성장으로 인해 도시화와 인구밀집 지역이 발생하였으며, 자연재해는 점차 대형화되고 있다. 또한, 최근에는 국내에서 발생한 대규모 지진으로 인해 국민들의 지진에 대한 관심과 위험을 효율적으로 대비하여 관리할 수 있는 기술에 대한 요구가 높아지고 있다. 따라서, 주요한 사회인프라시설물의 하나이며 큰 인명피해를 유발할 수 있는 도로시설물에 대한 지진 안전성 확보를 위한 다양한 연구가 추진되고 있다.

특히 국내에서 1980년대 이후로 건설된 교량은 약 19,091개이며 이는 전체 교량의 약 56%를 차지하고 있다(MOLIT, 2020). 이 중 30년 이상 운영 중인 노후화된 교량은 전체의 약 11%를 차지하고 있다. 또한 노후화된 교량의 경우 내진설계가 수행되지 않은 교량이 대부분이며, 내진설계가 미적용된 교량은 우선 순위를 정하여 내진보강을 수행하고 지진 안전

성을 확보하는 작업을 순차적으로 진행하여야 한다. 이는 교량의 노후화에 대한 연구와 노후화를 극복하기 위한 보수보강에 대한 연구가 필요하다는 것을 의미한다.

지진에 대해 교량의 응답에 가장 지배적인 요소는 교각이다. 즉, 교량의 노후화는 내진성능 관점에서 상판의 노후화에 의한 영향보다 교각의 노후화가 교량의 지진취약도에 더욱 큰 영향을 준다. 교각의 노후화는 일반적으로 콘크리트와 철근의 노후화를 고려할 수 있으며, 이로 인한 철근의 부착력 감소가 발생할 수 있다. 이러한 교각의 노후화는 교량의 횡변위 증가 및 연성 감소 등이 발생할 수 있다.

노후화된 교각에 대한 보수보강 방법은 일반적으로 섬유강화 폴리머(Fiber Reinforced Polymer, FRP) 보강 방법이 사용된다. FRP보강은 구조물의 에너지 소산 능력과 연성을 효과적으로 증가시킬 수 있다. 따라서, 지진 손상이 발생할 확률이 높은 교각의 소성힌지 구간에 FRP보강을 적용하여 교각의 지진 피해를 줄일 수 있다. 이는 교각뿐만 아니라 교량 시스템의 관점에서 강도와 변형에 대한 저항능력을 향상시킬 수 있다.

본 연구에서는 국내에서 일반적으로 많이 사용하는 PSC 교량에 대해서 교각의 노후화 및 FRP보강에 따른 지진거동과 지진취약도를 분석하였다. 교량의 지진해석은 일반상태의 교

¹학생회원, 인하대학교 토목공학과 박사과정

²정회원, 인하대학교 토목공학과 부교수

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

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

•본 논문에 대한 토의를 2021년 1월 31일까지 학회로 보내주시면 2021년 2월 호에 토론결과를 게재하겠습니다.

량, 노후 교량, FRP 보강된 교량에 대해서 재료와 거동의 비선형성을 고려하여 수행하였다. 이때, 교량의 노후도와 FRP 보강은 교각의 재료 물성치로써 반영하였다. 우선적으로 비선형 정적해석과 지진해석을 수행하여 교각의 성능점과 교량 시스템의 지진파에 의한 동적거동을 평가하였다. 정의된 한계상태와 동적거동을 바탕으로 지진취약도 분석을 수행하여 각 한계상태에서 교량의 노후도와 FRP 보강에 따른 영향을 비교 분석하였다.

2. 해석모델

2.1 대상 교량 제원

해석에 사용한 교량은 국내에서 일반적으로 시공되어 사용하는 PSC 거더 교량을 선택하였다. 대상 교량은 3경간 연속교로 경간장은 15.0m, 총 연장은 45.0 m이다. 차폭은 8.0m이며 5개의 거더로 이루어져 있다. 교각의 높이는 10m이며, 단면은 지름은 2.0m인 원형 단면이다. 철근의 배근은 D25 철근 96개로 2단 배근으로 구성되어 있다. 띠철근은 D16 철근이 300mm의 간격으로 배근되어 있다. 교좌장치의 경우, 적층 탄성 고무받침(Rubber Bearing, RB)이 각 교대와 교각에 설치되어 있다. 해석에 사용된 교량의 평면도와 교각의 단면도는 Figs. 1 & 2에 각각 나타내었다.

2.2 비선형 해석을 위한 교량의 모델링

본 연구에서는 구조물의 비선형 거동을 분석하기 위해 OpenSEES 프로그램(Mazzoni et al., 2005)를 사용하였다. 교량의 지진에 의한 비선형 거동은 일반적으로 교각과 교좌장치에 집중된다. 따라서 상부구조는 탄성 거동을 하는 탄성 보-기둥 요소(Elastic beam-column element)로 하였다. 상부구조의 가로보와 교각의 캡 부분은 일체 거동을 하는 강체 요소(Rigid beam element)를 사용하였다. 교좌장치의 경우 탄성 스프링 요소(Zero-length spring element)를 사용하여 모형화 하였으며, 강성은 제공된 제원을 사용하였다. 또한 교좌장치의 한계 변위 이후에는 슬립이 발생하므로 Fig. 3에 나타난 바와 같이 강성이 영(0)이 되도록 하였다. 교좌장치는 교대와 교각에 각각 2개씩 배치된다.

비선형 거동이 예상되는 교각은 섬유 요소(Fiber element)를 이용하여 콘크리트와 철근의 항복 및 파괴를 고려하였다. 교각의 비선형 거동을 보다 정확하게 분석하기 위해 원형 섬유 요소를 40개의 단면으로 분할하여 해석을 수행하였다. 또한 교각의 소성힌지 구역은 요소를 보다 세밀하게 구성하였다. 이때 사용되는 콘크리트의 비선형 재료물성치는 비구속 콘크리트

와 띠철근에 의한 횡구속 콘크리트로 분리하여 모델링 하였다. 콘크리트 피복의 두께는 0.1m이며, 비구속 콘크리트의 압축강도는 24 MPa, 횡방향 및 축방향 철근의 항복강도는 300 MPa이다. 이때, 횡구속 철근에 의한 구속효과는 OpenSEES 내에서 고려될 수 있도록 하였다.

교량의 기초는 말뚝 기초로 이루어져 있어, 이를 고정단으로 가정하였다. 교대와 지반의 경계조건 또한 교각과 마찬가지로 고정단으로 가정하였다. 해석 교량의 자중은 교대와 교각에 각 5MN, 10MN의 질점하중으로 고려하였다. Fig. 4는 대상 교량의 해석 모델을 보여준다.

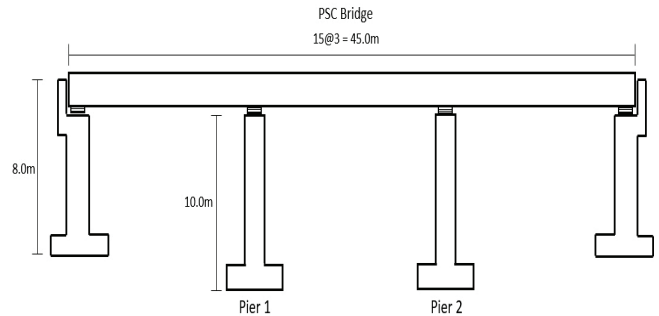


Fig. 1 Side layout of the bridge

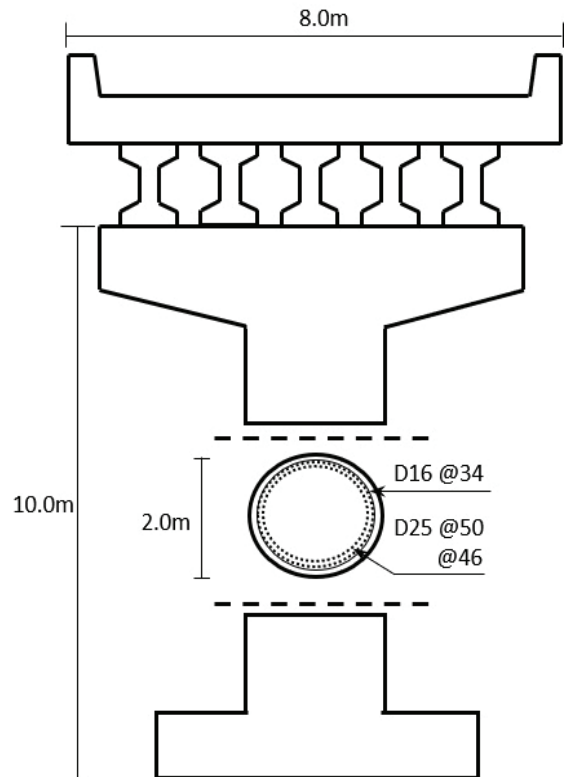


Fig. 2 Cross section of the pier

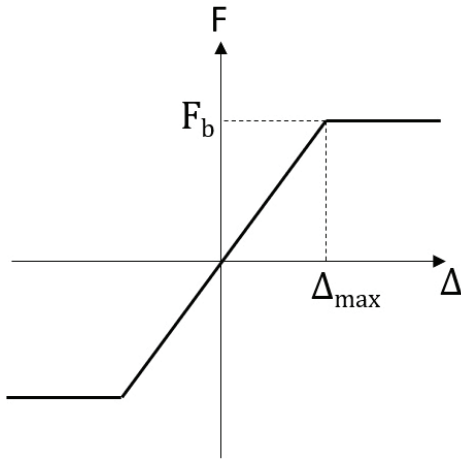


Fig. 3 Analytical modelling of RB

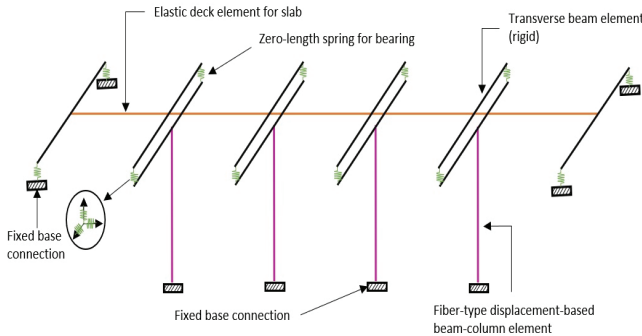


Fig. 4 Numerical modelling of the bridge

2.3 노후도를 고려한 교각 모델링

교량 구조물에서 교각은 지진거동에 큰 영향을 주는 요소이며 노후도에 의해서도 다른 구조요소들에 비해 많은 영향을 받는다. 교각의 노후도는 일반적으로 아래의 사항을 고려한다.

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

이러한 요인들에 대해서 교각 실험과 구조해석 모델을 통한 검증 연구를 진행하였다(Aquino and Hawkins, 2007). 또한 교각의 노후도 효과 3가지 요소 중 가장 지배적인 요소를 분석하였다. Aquino and Hawkins (2007)의 연구 결과와 함께, Berry and Eberhard (2007)에 따르면 철근의 질량 감소율이 가장 지배적인 영향을 보였다. 콘크리트의 강도감소와 부착력은 교각의 거동에 상대적으로 큰 영향을 끼치지 않는 것을 확인하였다. 그리고, 락철근이 주철근에 비해 철근의 질량 감소율이 1.5배 이상 발생하였으며, 질량 감소율 10% 이상부터 교

각의 거동에 영향을 미치는 것을 확인하였다(Nguyen, 2013).

따라서, 본 연구에서는 교각의 노후 효과를 철근의 질량 감소율 10%로 고려하였으며, 락철근의 경우 1.5배인 15%를 고려하여 수치해석 모델링을 진행하였다. 철근의 질량 감소율 (γ)은 다음 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 FRP보강을 고려한 교각 모델링

교각의 보수보강은 일반적으로 사용하는 FRP보강을 적용하였다. FRP보강은 교각의 소성힌지 구역에 횡방향 구속응력을 증가시켜 지진 발생시 교각의 항복 및 파괴를 방지하는 역할을 한다. 본 연구에서 FRP보강은 교각의 소성힌지 구간인 상단과 하단부를 보강하였다. 교각의 보강량을 결정하기 위해 Priestley et al. (1996)이 제안한 식을 이용하여 FRP보강의 두께(t_j)와 소성힌지 구간의 길이(L_p)를 산정하였다. Eqs. (2) & (3)은 FRP보강 두께와 소성힌지 구간의 길이를 산정하는 식이다.

$$t_j(\text{mm}) = \frac{0.18(\epsilon_{cm} - 0.004)Df'_{cc}}{f_{yf}\epsilon_{sm}} \quad (2)$$

$$L_j \geq L_p(\text{mm}) = v_g + 0.044f_y d_{bl} \quad (3)$$

여기서, ϵ_{cm} 은 콘크리트의 한계변형률이며, ϵ_{sm} 은 FRP보강의 한계변형률, $D(\text{mm})$ 는 원형 교각의 지름, $f'_{cc}(\text{MPa})$ 은 구속 콘크리트의 압축강도, $f_{yf}(\text{MPa})$ 는 FRP 재킷의 항복강도이다. Eq. (3)의 $L_j(\text{mm})$ 는 FRP보강의 설치 길이이며, $v_g(\text{mm})$ 는 보강의 종점부와 기초 사이의 유격, $f_y(\text{MPa})$ 와 $d_{bl}(\text{mm})$ 은 각각 주철근의 항복강도와 직경이다. 본 연구에서 기초와 보강의 유격은 설계도면을 참고하여 50mm로 사용하였다. 또한 FRP보강의 길이는 Seible et al. (1997)가 제시한 Eq. (4)의 교각의 FRP 재킷의 최소 요구길이를 고려하여 결정하였다.

$$L_j \geq \max(L_p, D_c/2, L/8) \quad (4)$$

여기서, $D_c(\text{mm})$ 는 비보강 교각의 직경이며, $L(\text{mm})$ 은 소성힌지구역 내 임계점부터 휨의 변곡점까지의 거리이다.

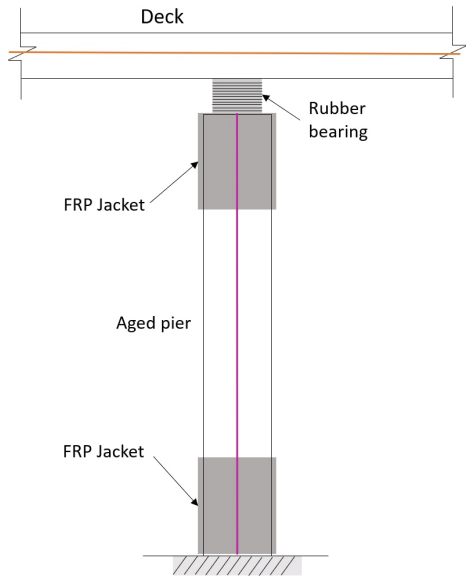


Fig. 5 Pier strengthened with FRP

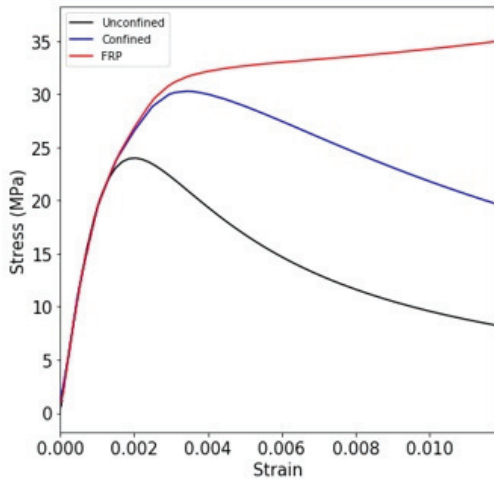


Fig. 6 Stress-strain models for unconfined, confined, and FRP-retrofitted concrete in compression

본 연구에서는 노후도가 고려된 교각에 대해 두께 0.87mm, 길이 1250mm 인 FRP보강을 교각의 상단과 하단에 설치하였다. Fig. 5는 보수보강을 적용한 교각의 단면도이다. 설계된 FRP모델은 OpenSEES내에서 교각의 상단과 하부에 보강된 물성치를 사용하여 나타내었다. 교각의 중앙부는 노후화된 철근의 물성치를 사용하여 노후교각의 보수보강 효과를 분석하였다. 콘크리트의 구속응력을 통해 보수보강의 효과를 확인하기 위해서 단면해석을 진행하였다. 단면해석을 통해 보수보강에 따른 응력-변형률 곡선을 산정하였다. Fig. 6에 나타난 바와 같이 FRP보강을 진행한 단면의 경우 기존의 구속 단면보다 더 뛰어난 연성도를 가지고 있는 것을 확인하였다.

3. 교각의 노후도 및 보수보강을 고려한 PSC교량의 지진해석

3.1 교량의 비선형 정적해석

교량의 내진성능을 판단하기 위해서 푸쉬오버 해석(Push-over analysis)을 진행하여 교각의 성능점을 평가하였으며, 이를 통해 지진취약도 곡선에서 교량의 한계상태를 정의하였다. 푸쉬오버 해석의 결과 변위-전단력 곡선은 Fig. 7과 같다. 교각의 변위-전단력 관계를 이용하여 항복 변위(D_y)와 극한 변위(D_u)를 산정하였다(An, 2020).

항복 변위를 산정하는 방법은 일반적으로 사용하는 유효강성 근사화 방법이 있다. 유효강성 근사화 방법은 초기 및 항복 강성을 사용하여 항복 변위를 산정한다. 초기 강성은 최대 전단력의 60% 지점으로 설정한다. 항복 변위는 초기 강성과 항복 강성의 교차점에서 각 면적이 동일해 지는 변위로 정의한다. 또한, 극한 변위는 콘크리트의 극한변형률을 통해서 설정되며, 본 연구에서는 최대 전단력의 85%인 지점을 극한 변위로 설정하였다.

Table 1은 일반 교각과 노후교각, FRP 보강된 교각의 항복 변위와 극한 변위를 정리하였다. 교각의 노후화에 의해서는 항복 변위와 극한 변위 모두 감소하였다. 항복 변위는 일반 교각 대비 노후교각이 약 18%의 감소하였으며, 극한 변위는 약 13% 감소하였다. FRP 보강된 교각은 노후교각 대비 항복 변위는 약 50%, 극한 변위는 약 65% 증가하였다.

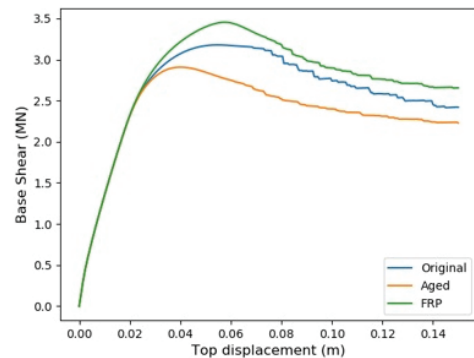


Fig. 7 Relationship between base shear and displacement for the original, aged, and FRP-retrofitted piers

Table 1 Summary of the yield and ultimate displacements (units: mm)

Displacement limit states	Original	Aged	FRP
D_y	27.0	22.0	33.0
D_u	77.0	67.0	110.0

3.2 교량의 비선형 동적해석

본 연구에서는 총 40개의 지진파를 사용하여 대상 교량의 지진해석을 수행하였다. 국내에서 발생한 지진파를 사용하는 것이 국내 실정을 좀 더 반영할 수 있지만 실제 국내 지진파는 최대가속도의 다양성과 개수가 한정되어 있다. 따라서 SAC Steel Project (2000)에서 사용된 지진파를 사용하였다. 사용한 지진파에 대한 정보는 Table 2에 요약하였고, 지진파의 가속도 스펙트럼과 변위 스펙트럼은 Figs. 8 & 9에 나타내었다. 사용한 지진파의 최대지반가속도(Peak Ground Acceleration, PGA)는 0.05 ~ 1.50g의 넓은 범위에 있었으며, 스펙트럼 가속도는 평균적으로 약 0.2초에서 최대값을 가지고 있었다.

비선형 동적해석을 수행하여 최대 변위와 모멘트가 발생하는 지점에서 모니터링을 진행하였다. 변위는 교각의 최상단, 모멘트는 교각의 하부에서 최대값을 나타냈다. Fig. 10은 BO25 지진파에 의한 일반 교량에서의 변위와 모멘트의 시간 이력곡선이다. Fig. 11은 노후도 및 보수보강 효과를 고려한 교량의 변위차이를 비교한 것이다. 일반 교각의 경우 최대 변위는 약 100.0mm, 최대 모멘트는 약 13.0MN·m 발생하였다. 이는 교각의 항복점을 크게 상회하는 값을 알 수 있다. Fig. 11에서 교각의 노후도 및 보수보강을 고려하였을 때의 최대 변위는 각각 107.2mm, 96.5mm이다. 즉, 노후 교각은 일반 교각에 비해 최대변위가 약 7% 증가하였다. FRP보강을 한 교각의 경우, 노후교각 대비 약 10%의 변위 감소가 나타났다. 따라서 보강을 통해서 노후교각이 일반교각 이상의 성능을 확보할 수 있는 것을 확인하였다. 비선형 동적해석에 의한 교각의 노후도 및 보강 효과와 함께 교각의 성능점 변화에 의한 효과를 복합적으로 확인할 수 있는 지진취약도 곡선 분석을 추가적으로 진행하였다.

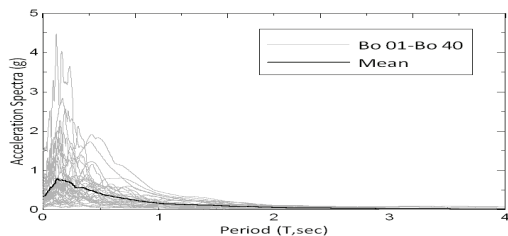


Fig. 8 Spectral accelerations for ground motions

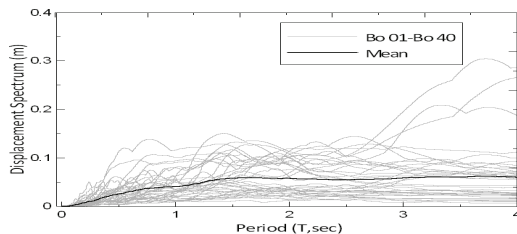


Fig. 9 Spectral displacements for ground motions

Table 2 Summary of ground motions

SAC 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
BO35	Saguenay, 1988	5.9	1.50
BO36	Saguenay, 1988	5.9	0.71
BO37	Saguenay, 1988	5.9	0.52
BO38	Saguenay, 1988	5.9	0.65
BO39	Saguenay, 1988	5.9	0.51
BO40	Saguenay, 1988	5.9	0.78

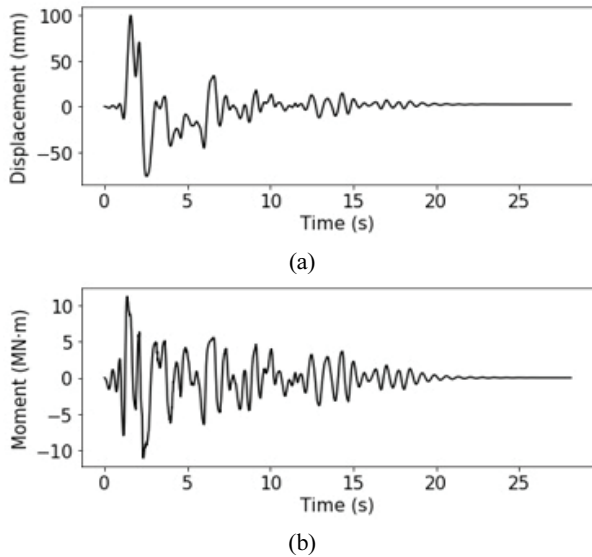


Fig. 10 Variations in the displacement and moment obtained from the nonlinear dynamic analysis for the original bridge: (a) Displacement time history (b) Moment time history

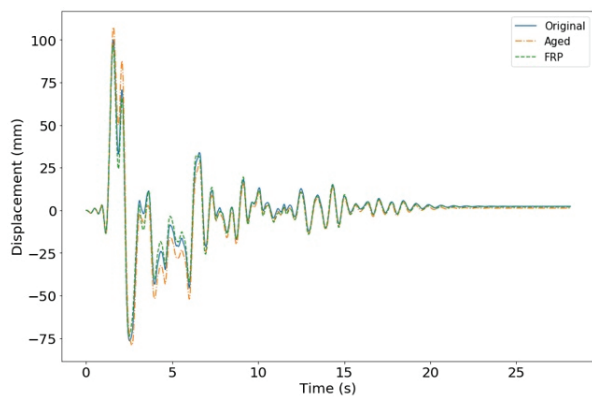


Fig. 11 Displacement response of the original, aged, and FRP-retrofitted piers

3.3 노후도 및 보수보강에 따른 지진취약도 분석

구조물의 지진취약도는 임의의 크기를 가지는 지진파에 대해 정의된 손상한계를 초과할 확률을 의미하며, 구조물의 지진 안전성을 확률적으로 정의할 수 있다. 지진에 의한 교량의 파괴는 일반적으로 교각에 의해 지배적이므로, 본 연구에서는 교각의 한계상태를 고려하여 지진취약도 곡선을 작성하였다.

교각의 한계상태를 산정하기 위해 3.1절에서 정의한 항복 변위와 극한 변위를 이용하여 Barbat (2008)이 제시한 4가지 한계상태(경미한 손상, 중간 손상, 심각한 손상, 붕괴)를 사용하였다. Fig. 12은 정의된 한계상태를 나타낸 것이며, Table 3은 각 한계상태에 해당되는 교각의 변위를 정리하였다. 한계상태가 증가할수록 각 손상에 해당하는 변위도 점차적으로

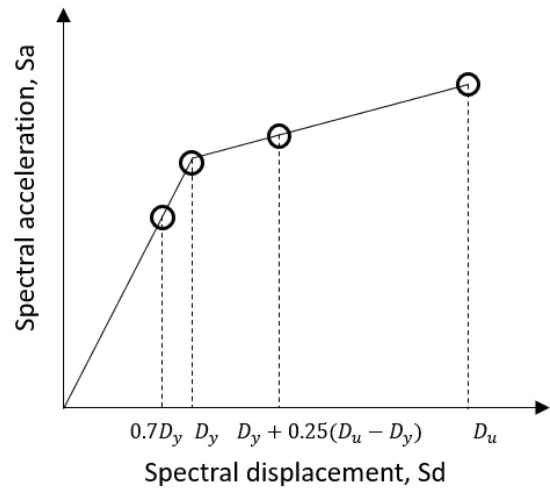


Fig. 12 Definition of limit states for bridge

Table 3 Displacement limit states of the bridge for the original, aged, and FRP-retrofitted piers (units: mm)

Limit states	Slight	Moderate	Severe	Collapse
Original	0.019	0.027	0.040	0.077
Aged	0.015	0.022	0.033	0.067
FRP	0.023	0.033	0.052	0.110

증가하였다.

Figs. 13 & 14는 일반 교량과 노후 교량, 노후 교량과 보강한 교량의 지진취약도 곡선을 비교하였다. 지진취약도 곡선은 일반적으로 가장 많이 사용되는 지진파의 PGA를 이용하여 작성하였다. 일반 교량과 노후 교량의 지진취약도 곡선의 경우 지진파의 PGA가 약 0.3~1.0g 범위에서 차이가 발생하였다. 특히 한계상태가 낮은 경미한 손상은 교각의 노후화에 대한 영향이 최대 약 5.0% 이내로 차이가 크지 않았다. 한계상태가 가장 큰 붕괴 상태에서는 최대 약 30.0%의 차이가 발생하였으며, PGA가 증가할수록 그 차이는 감소하는 경향을 보였다. 이는 본 연구에서 고려한 교각의 노후도에 의해 교량의 지진취약도는 증가하지만 그 영향이 교량의 전체적인 안전성에는 지배적이지 않을 것으로 판단된다.

노후 교량과 FRP 보강한 교량의 지진취약도 곡선을 비교하였을 때, 교량의 지진취약도가 현저하게 낮아지는 것을 확인하였다. 특히, 손상한계가 높을수록 차이가 명확하게 나타났다. 심각한 손상과 붕괴 수준에서는 지진취약도 곡선 간의 차이가 뚜렷하였으며, PGA가 높아질수록 그 차이는 더욱 크게 나타났다. 이는 노후화 및 보수보강에 따른 극한 변위의 변화 폭이 항복 변위의 변화 폭보다 크기 때문이며, 손상상태가

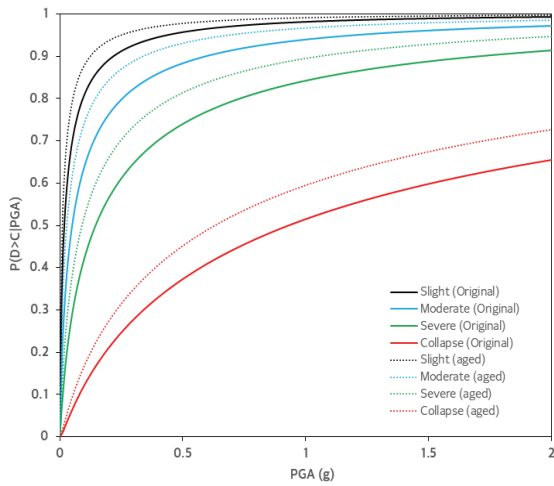


Fig. 13 Fragility curves for the original and aged bridges

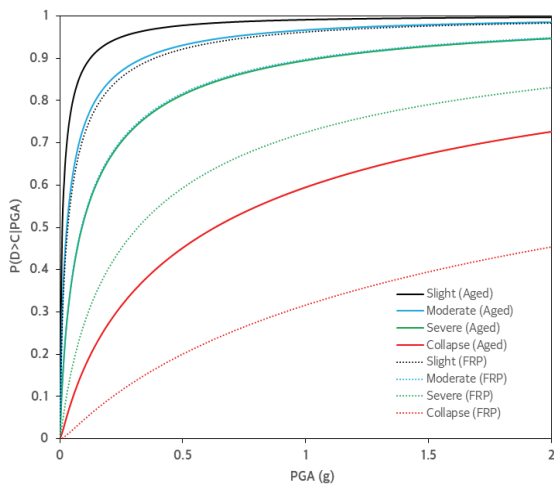


Fig. 14 Fragility curves for the aged and FRP-retrofitted bridges

높아질수록 그 차이도 더욱 크게 나타나게 된다. 특히, 일반 교각과 비교하였을 때, 다른 손상단계에서는 비슷한 수준을 이루지만 붕괴 상태에 대해서는 보수보강을 한 경우가 훨씬 높은 지진 안전성을 가지고 있는 것을 확인하였다. 따라서, 보수보강을 통해 모든 손상단계에 대해서 지진취약도를 낮추고 특히 인명손실이 날 수 있는 심각한 손상과 붕괴 수준에 대해서 더욱 높은 지진 안전성을 확보할 수 있을 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구는 PSC교량의 노후도와 FRP보강의 효과를 고려하여 지진해석과 지진취약도 분석을 수행하였다. 노후도는 교각의 철근 질량 감소율로 고려하였으며, FRP 보강은 보강량

결정을 통해 노후교각의 상하부에 적용하였다. 비선형 정적 해석과 동적해석을 수행하여 교각의 성능점과 동적거동을 분석하였다. 교각의 성능점에 기반하여 동적해석의 결과를 복합적으로 평가할 수 있는 지진취약도를 비교 분석하였다. 본 연구의 주요 결론은 다음과 같다.

비선형 정적해석을 수행하여 교각의 변위-전단력 관계를 산출하여 노후화와 FRP 보강에 따른 교량의 성능점과 교량의 한계상태를 정의하였다. 교각의 노후화에 의해 항복 변위와 극한 변위는 모두 감소하였다. 항복 변위는 일반 교각 대비 약 18%, 극한 변위는 약 13% 감소하였다. FRP보강을 한 교각은 노후 교각 대비 항복 변위는 약 50%, 극한 변위는 약 65% 증가하였다.

교량의 비선형 동적해석은 다양한 PGA를 가진 40개의 지진파를 사용하였다. 교각 상단부의 최대변위는 일반 교각은 100.0mm, 노후 교각은 107.2mm, FRP 보강 교각은 96.5mm 발생하였다. 즉, 노후 교각은 일반 교각 대비 최대변위가 약 7.0% 증가하였으며, FRP 보강 교각은 노후 교각 대비 약 10%의 최대변위 감소하였다. 교량의 비선형 해석 결과를 통해 FRP가 보강된 노후 교각은 일반 교각 이상의 성능을 발휘할 수 있었다.

교각의 성능점과 교량의 동적응답을 복합적으로 고려하기 위해 4단계의 한계상태에 대해서 지진취약도 해석을 수행하였다. 일반 교량과 노후 교량의 지진취약도 곡선은 PGA 약 0.3~1.0g 범위에서 차이가 발생하였다. 노후 교량은 경미한 손상단계에서 일반 교량 대비 최대 약 5% 감소하였으며, 붕괴 수준단계에서는 약 30% 감소하였다. FRP 보강 교량의 경우 지진취약도가 노후 교량 대비 모든 손상단계에서 감소하였으며, PGA가 높아질수록 감소 경향이 뚜렷하게 나타났다. 특히, 일반 교량과 FRP 보강 교량은 낮은 손상상태에서는 비슷한 확률을 보이지만 붕괴 상태에서는 보강을 한 경우가 더 높은 지진 안전성을 보였다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 건설기술연구사업의 연구비지원(20SCIP-B146946-03)과 인하대학교의 지원에 의해 수행되었습니다.

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. Aquino, W., & Hawkins, N. M. (2007), Seismic retrofitting of corroded reinforced concrete columns using carbon composites. *ACI Structural Journal*, 104, 348-356.
4. Berry, M. P., & 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.
5. 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.
6. Priestley MJN, Seible F, Calvi GM. (1996), Seismic design and retrofit of bridges. John Wiley & Sons Inc., New York.
7. Seible F, Priestley MJN, Hegemier GA, Innamorato D. (1997), Seismic retrofit of RC columns with continuous carbon fiber jackets. *J. Compos. Constr.* May; 1(2), 52-62.
8. An H, Lee J-H, Shin S. (2020), Dynamic Response Evaluation of Bridges Considering Aspect Ratio of Pier in Near-Fault and Far-Fault Ground Motions, *Applied Sciences*, 10(17), 60-98.
9. FEMA. (2000), State of the Art Report on Systems Performance of Steel Moment Frames subject to Earthquake Ground Shaking, FEMA 355C.
10. Barbat, A. H., Pujades, L. G., & 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.

Received : 09/10/2020

Revised : 10/28/2020

Accepted : 10/29/2020

요 지 : 최근 국내에서는 지진의 발생 빈도와 규모가 증가하고 있다. 이러한 상황속에서 대표적인 도로 구조물인 교량의 지진피해는 많은 인명피해로 직결될 수 있다. 따라서, 사전에 구조물의 지진취약도를 분석하여 피해를 대비하는 것이 필요하다. 특히 국내의 교량은 공용년수 30년 이상의 노후 교량이 증가하고 있어, 교량의 노후화와 보수보강을 고려한 지진해석과 취약도 분석 연구가 필요하다. 본 연구에서는 PSC 교량에 대해 노후화와 FRP 보강효과를 고려하여 비선형 정적 및 동적해석을 수행하였다. 노후화 및 FRP 보강은 지진응답에 지배적인 영향을 주는 교각에 적용하였다. 최대 변위는 노후도에 의해 증가되었지만, FRP 보강에 의한 교량의 변위를 감소시킬 수 있었다. 지진해석과 함께 교각의 성능점과 동적거동을 복합적으로 평가할 수 있는 지진취약도 해석을 수행하여 노후화 및 FRP 보강에 대한 효과를 분석하였다. FRP 보강 교량의 지진취약도는 노후 교량에 비해 모든 손상단계에서 감소하였으며, PGA와 손상손상수준이 높아질수록 감소정도가 뚜렷하였다.

핵심용어 : PSC교량, 노후화, FRP보강, 비선형 해석, 지진취약도
