

교각의 노후도 영향에 따른 강합성 상자형 거더교의 지진응답 평가

신수봉¹·홍지영²·문지호³·송종걸^{4†}

¹인하대학교 사회인프라공학과 교수, ²강원대학교 건축·토목·환경공학부 석사졸업,
³강원대학교 건축·토목·환경공학부 조교수, ⁴강원대학교 건축·토목·환경공학부 교수

Seismic Response Evaluation of Composite Steel-Concrete Box Girder Bridge according to Aging Effect of Piers

Soobong Shin¹, Ji-Yeong Hong², Jiho Moon³ and Jong-Keol Song^{4†}

¹Professor, Department of Civil Engineering, Inha University, Incheon, 22212, Korea

²Master of Science, Department of Civil Engineering, Kangwon National University, Chuncheon, 24341, Korea

³Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Kangwon National University, Chuncheon, 24341, Korea

⁴Professor, Department of Civil Engineering, Kangwon National University, Chuncheon, 24341, Korea

Abstract

Among the bridges used in Korea, those that are more than 30 years old account for approximately 11% of the total bridges. Therefore, developing a seismic performance-evaluation method is necessary by considering the bridge age. Three composite steel-concrete box girder bridges with port, elastic-rubber, and lead-rubber bearings were selected, and a structural analysis model was developed using the OpenSEES program. In this study, pier aging was reflected by the reduction in the area of the longitudinal and transverse rebars. Four conditions of 5%, 10%, 25%, and 50% in the degree of pier aging were used. As input earthquakes, 40 near-fault and far-field earthquakes were used, and the maximum displacement and maximum shear-force responses of the piers were obtained and compared. The result shows that as the aging degree increases, the pier strength decreases. Therefore, the pier displacement response increases. To analyze the effects of displacement response and shear resistance, displacement ratio D_{ratio} and shear-force ratio F_{ratio} were evaluated. The older the sample bridge is, the greater is the tendency of D_{ratio} to increase and the smaller is the tendency of F_{ratio} to decrease.

Keywords : composite steel-concrete box girder bridge, aging effect, pier, confined concrete, near-fault earthquake, far-field earthquake

1. 서론

교량 시설물은 국가 경제발전 및 현대화와 더불어 1970년 대 이후부터 급격히 증가하였다. 2019 국토교통부에서 발간한 ‘도로 교량 및 터널 현황조사서’(Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2018)에 나타난 교량의 공용년수별로 비교하면 공용년수가 40년(’78년 이전) 이상 경과된 교량이 1,455개(4%), 30년(’79~’88년) 이상 경과된 교량이 2,626개(8%), 20년(’89~’98년) 이상 경과된 교량이 8,679개(25%), 10년(’99~’08년) 이상 경과된 교량이 12,418개(36%), 10년(’09년~현재) 미만 경과된 교량이 9,051개(27%)로 조사되었다. Fig. 1에 나타낸 바와

같이 현재 우리나라에서 운영 중인 교량 중 30년 이상된 교량이 전체의 약 12%를 차지할 정도로 노후화된 교량의 수가 증가하고 있는 추세이다.

노후화된 교량은 구조부재의 열화 현상으로 인해 구조적 성질이 변하여 준공시의 구조성능 보다 저하될 가능성이 높다. 교량 시설물의 노후화 정도가 급속도로 증가하는 현실에서 노후도의 영향을 반영한 내진성능 평가가 중요하다. 현재는 교량의 내진성능 평가에 노후도는 반영하지 못하고 있는 실정이며 단지 내진설계의 적용 유무만을 반영하고 있을 뿐이다. 노후화에 따른 구조적 성능저하를 반영하지 않은 내진성능 평가는 교량의 내진성능을 실제 보다 과대평가하게 된다. 또한 노

†Corresponding author:

Tel: +82-33-250-6231; E-mail: songj@kangwon.ac.kr

Received July 15 2020; Revised August 8 2020;

Accepted August 10 2020

© 2020 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.

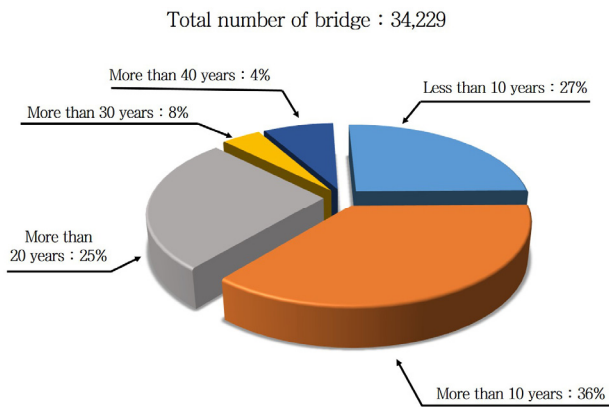


Fig. 1 Status of bridges according to number of years of use

후화를 적절히 반영한 내진성능 평가를 통하여 교량의 부족한 내진성능의 정확한 평가가 가능하고 이를 통하여 적절한 내진 보강 방법의 적용이 가능하다. 지진 시 교량 구조물의 구조요소 중 비탄성 거동에 의해 손상될 확률이 높은 구조요소가 교량받침과 교각이다. 본 연구에서는 교각의 노후화만 고려하였으며 교각의 노후도에 따른 교량의 지진거동의 영향을 분석하였다. 교각의 노후도에 가장 큰 영향을 주는 인자로 주철근과 띠철근의 부식에 의한 단면감소로 인한 교각의 강성 및 강도저하가 가장 일반적일 것이다. 철근의 부식정도에 따른 단면 감소의 정도를 노후도로 가정하여 몇가지 노후도에 따른 강상자형 교량의 대표적인 교량을 예제 모델로 작성한 후 실제 지진

응답 가속도 기록을 사용하여 지진응답을 구해 비교하였다. 철근의 부식에 따른 교각의 비탄성응답을 정교하게 구현하기 위해서 OpenSEES 프로그램(Mazzoni *et al.*, 2007)의 fiber 모델을 사용하여 교각을 모델링하였으며, 띠철근 부식에 따른 교각 콘크리트의 구속효과의 감소를 구속 콘크리트의 응력-변형률 관계로부터 반영하였다.

2. 강합성 상자형거더교의 제원 및 구조해석 모델링

시설물 정보관리 종합시스템(Ministry of Land, Infrastructure and Transport, FMS)에서 제공하는 국내 강합성 상자형 거더교의 현황으로부터 경간장, 교각 높이, 상자형 거더의 교폭, 경간수에 대한 빈도분포를 구하여 Fig. 2에 나타내었다. 경간장, 교각 높이, 상자형 거더의 교폭, 경간수가 빈도가 많은 값을 예제교량의 제원으로 선택하였다. 단지 경간수는 단경간이 가장 많지만 이 경우에는 교대만 있고 교각이 없으므로 교각의 노후화정도를 고려할 수 없으므로 차순위로 빈도가 많은 3경간을 선택하였다. 결론적으로 국내의 강합성 상자형 거더교의 가장 보편적인 제원으로 경간장 50m, 교각 높이 5m, 교폭 12m, 경간수는 3경간을 선택하였다. 이러한 강합성 상자형 거더교의 제원을 Fig. 3에 나타낸 종단면도에 나타내었다. 5m 높이의 교각 2개가 대칭적으로 위치한 3경간 강합성 상자형 거더교로 각 경간의 길이는 50m로 일정하며 총 길이는 150m이다. 강합

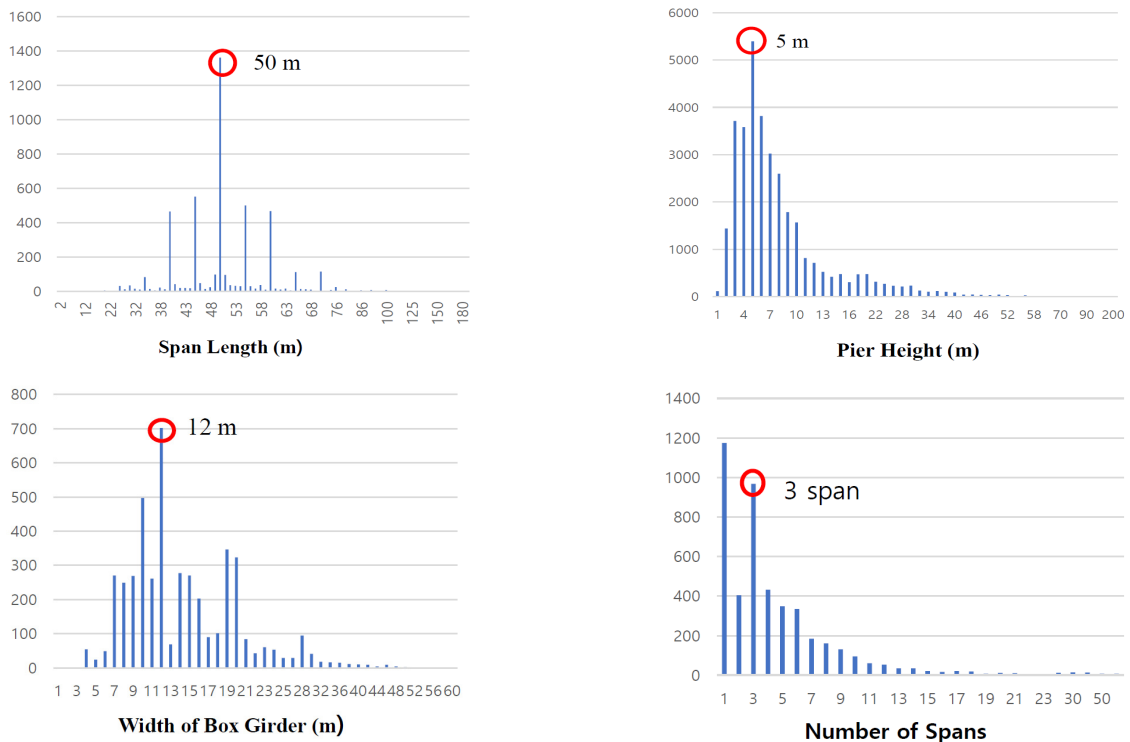


Fig. 2 Frequency distribution for detailed specifications of the composite steel-concrete box girder bridge

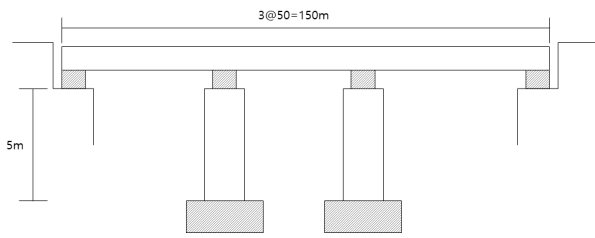


Fig. 3 Geometric details of composite steel-concrete box girder bridge

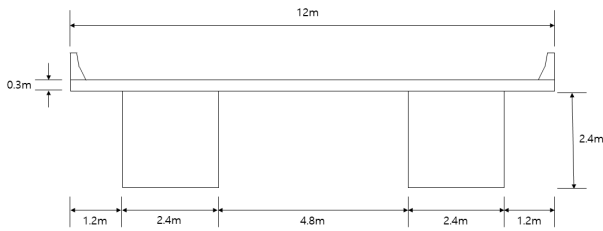


Fig. 4 Cross section of composite steel-concrete box girder

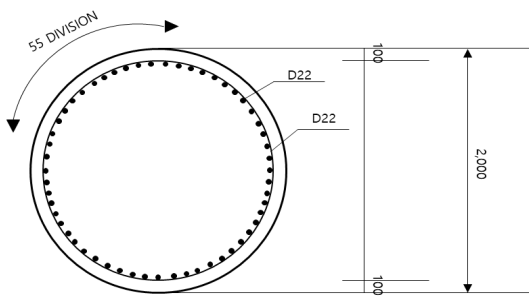
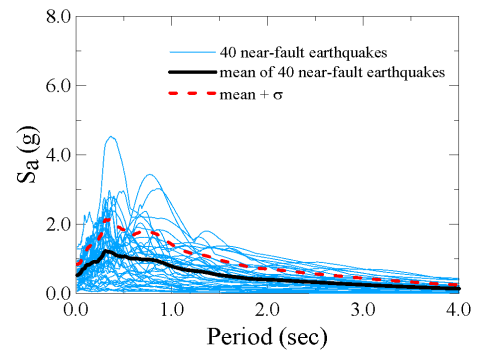


Fig. 5 Pier cross section

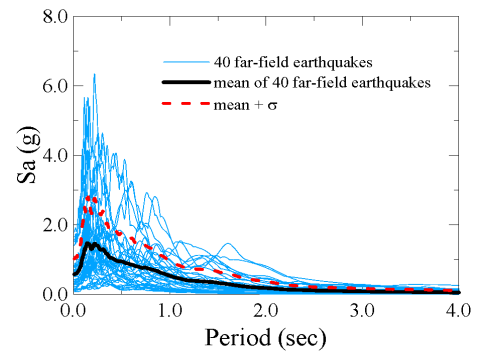
성 상자형 거더교의 상부구조물 횡단면도는 Fig. 4에 나타내었다. 교폭은 12m, 콘크리트 바닥 슬래브의 두께는 0.3m이고 거더의 높이는 2.4m, 강상자형의 좌·우 벽 두께는 0.01m, 강상자형 하부의 두께는 0.012m로 2개의 강상자형이 콘크리트 바닥 슬래브에 일체로 구성된 거더 형태이다.

교각 단면의 제원 및 철근 배근의 형태를 Fig. 5에 나타내었다. 교각단면은 원형으로 지름은 2m이고, 콘크리트의 피복 두께는 0.1m이다. 주철근은 D22 철근 55개가 배근되었고, 띠철근은 D22 철근을 교각의 길이 방향으로 0.15m 간격으로 배근하여 주철근과 심부콘크리트를 구속하였다.

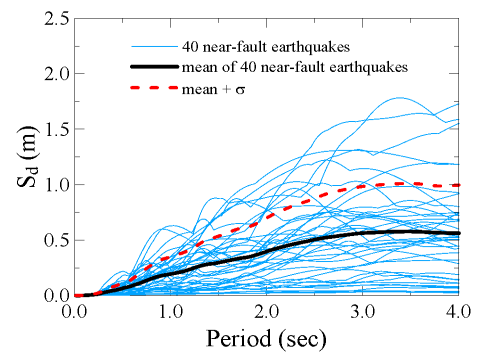
해석에 사용된 지진은 SAC Steel Project(SAC Joint Venture Steel Project Phase 2, 1997)에서 제공된 미국의 세 곳(Boston, Seattle, Los Angeles)에서 관측된 실제지진으로 10km 이내에서 계측된 근거리(Near-fault) 지진 기록과 25km 이상 떨어진 곳에서 계측된 원거리(Far-field) 지진의 기록 각각 40개를 선정하여 사용하였다. 사용된 근거리 지진과 원거리 지진은 Jeong 등(2019)의 논문에서 사용한 지진과 동일하며 상세한 정보는 이 논문에 제시되어 있다. 해석에 사용한 근거리 지진



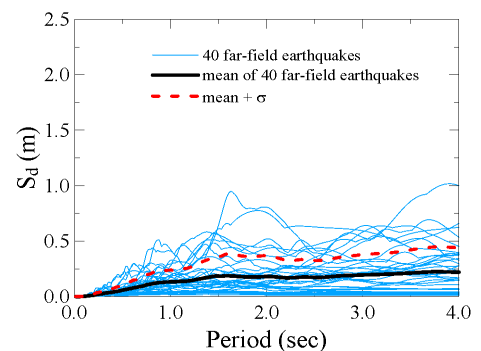
(a) spectral acceleration of near-fault earthquakes



(b) spectral acceleration of far-field earthquakes



(c) spectral displacement of near-fault earthquakes



(d) spectral displacement of far-field earthquakes

Fig. 6 Spectral acceleration S_a and spectral displacement S_d for near-fault and far-field earthquakes

과 원거리 지진에 특성을 비교하기 위하여 가속도 응답스펙트럼과 변위 응답스펙트럼을 작성하여 Fig. 6에 비교해 나타내었다.

3. 교각의 노후화도를 반영한 지진응답해석

3.1 노후화도를 반영한 콘크리트의 응력-변형률 관계

교각의 노후도의 정도를 철근의 부식정도로 반영하였으며 철근의 부식정도는 부식에 의한 철근의 단면적 감소로 반영하였다. 교각의 철근으로는 크게 교각의 종방향으로 설치된 주철근과 횡방향으로 설치된 띠철근으로 구분할 수 있다. 교각 철근의 부식에 관한 실험(Cho *et al.*, 2005)에 의하면 띠철근의 부식이 주철근의 부식 보다 1.5배 수준이라고 한다. 그러므로 본 논문에서도 띠철근의 부식에 의한 노후도를 주철근의 노후도 보다 1.5배 크다고 가정하고 노후도 정도를 결정하였다. 즉, 노후도가 5%라고 가정한다면 주철근의 단면적의 감소가 5% 발생했고 띠철근의 단면적의 감소는 1.5배인 7.5% 발생하였다고 가정하였다. 노후도는 5%, 10%, 25%, 50%를 해석에 사용하였으며, 노후도에 따른 종방향 철근인 주철근의 감소된 면적과 횡방향 철근인 띠철근의 면적을 노후화 정도에 대응되도록 Table 1에 정리하여 나타내었다.

교각은 철근과 콘크리트로 이루어져 있는데 콘크리트는 역학적 성질에서 주철근과 띠철근에 의해 구속 콘크리트(confined concrete)와 그렇지 않은 비구속 콘크리트(unconfined concrete)로 구분할 수 있으며 주철근과 띠철근에 의한 구속정도에 따라 콘크리트의 응력-변형률 관계의 특성이 달라진다. 구속 콘

크리트와 비구속 콘크리트의 일반적인 응력-변형률 관계를 Fig. 7에 나타내었다. 구속 콘크리트는 주철근과 띠철근의 구속정도에 따라 비구속콘크리트에 비하여 응력-변형률 관계가 이루는 면적이 증가한다. 응력-변형률 관계가 이루는 면적이 지진에 의해 구조물에 부과되는 에너지를 흡수하는 능력을 의미하므로 띠철근에 의해 적절하게 구속된 콘크리트는 내진성능이 향상된다고 할 수 있다. 이러한 개념을 내진상세라고 하며 내진설계에서 중요하게 사용된다.

콘크리트의 응력을 다음의 식(Mander *et al.*, 1988a; 1988b)을 사용하여 정의할 수 있다.

$$f = \frac{f'_{\alpha} x r}{r - 1 + x} \tag{1}$$

여기서,

$$f'_{\alpha} = f'_c (2.254 \sqrt{1 + \frac{7.94 f'_L}{f'_c}} - 2 \frac{f'_L}{f'_c} - 1.254) \tag{2}$$

$$x = \epsilon_f / \epsilon_{cc} \tag{3}$$

$$r = E_c / (E_c - E_{sec}) \tag{4}$$

$$E_{sec} = f'_{\alpha} / \epsilon_{cc} \tag{5}$$

$$f'_L = K_e f_L \tag{6}$$

$$f_L = \frac{2 f_{yh} A_{sp}}{D s} \tag{7}$$

Table 1 Area of longitudinal and transverse rebars reduced by the degree of aging effects

Rebar Types	Ageing Effect				
	0%	5%	10%	25%	50%
	Rebar area (A_s, A_h) reduced by ageing effect (cm^2)				
Longitudinal rebar	3.871	3.677	3.484	2.903	1.936
Transverse rebar	3.871	3,581	3.290	2.419	0.968

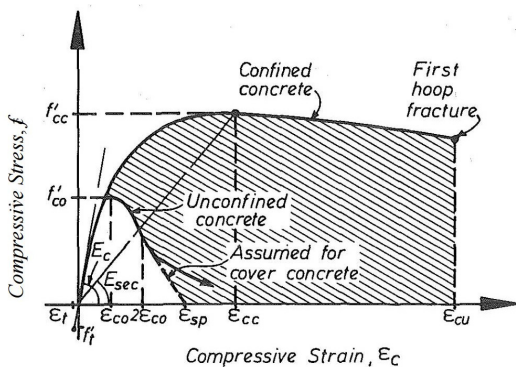


Fig. 7 Stress-strain model for confined concrete and unconfined concrete in compression(Priestley *et al.*, 1996)

f'_c 는 비구속 콘크리트의 압축강도이고, f'_{α} 는 구속콘크리트의 압축강도이다. f'_L 는 띠철근의 구속에 의해 생성되는 유효 구속력이다. K_e 는 구속 유효성 계수로 원형단면의 전형적인 값은 0.95이다. f'_L 는 띠철근에 의해 생성되는 최대 유효 횡방향압력이다. f_{yh} 와 A_{sp} 는 원형띠철근(spiral)의 항복응력과 단면적이다. D 는 원형 교각단면에서 원형띠철근이 이루는 직경이다. s 는 교각에서 원형띠철근의 종방향(교각기둥의 축방향) 배치간격이다.

주철근과 띠철근의 부식을 노후화의 주요인자로 가정하면, 띠철근의 면적 감소에 따른 콘크리트의 구속효과가 감소하여 구속 콘크리트의 응력-변형률 관계도 변화하게 되는데 노후도에 따른 구속 콘크리트의 응력-변형률 관계를 Fig. 8에 비교하여 나타내었다. 노후도에 따른 구속콘리트의 압축강도 f'_{α} 와

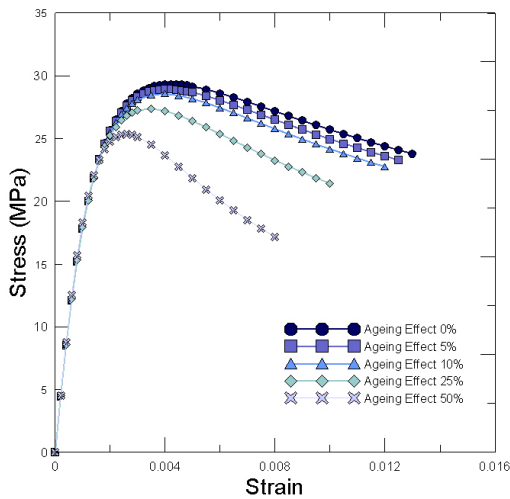


Fig. 8 Comparison of stress-strain relationship of confined concrete according to several aging degree

Table 2 Comparison of stress and strain characteristic values of confined concrete due to aging effects

Stress and strain characteristic values of confined concrete	Ageing Effect				
	0%	5%	10%	25%	50%
Compressive strength of confined concrete, f'_{cc} (MPa)	29.334	28.949	28.561	27.382	25.367
Strain at peak stress, ϵ_{cc}	0.0042	0.0040	0.0039	0.0034	0.0026
Ultimate compressive concrete stress, f'_{cu} (MPa)	24.934	24.607	24.277	23.275	21.562
Ultimate compression strain, ϵ_{cu}	0.0133	0.0128	0.0123	0.0107	0.0081

이에 대응되는 변형률인 ϵ_{cc} 와 락철근이 파괴에 도달하는 한계 압축응력인 f'_{cu} 와 이에 대응하는 한계압축변형률 ϵ_{cu} 를 Table 2에 비교하여 나타내었다.

교각의 주철근과 락철근의 노후도가 증가할수록 구속 콘리트의 응력-변형률 관계가 이루는 면적이 작아짐을 알 수 있다. 이는 노후화가 진행되어 락철근의 부식에 의해 구속력이 감소되면 구속콘리트의 응력-변형률 관계가 이루는 면적도 작아져서 지진에너지를 흡수, 소산시킬수 있는 능력이 감소함을 의미함으로써 궁극적으로는 동일한 강도의 지진하중에 대해 교각의 비탄성 거동이 증가하고 손상이 증가되므로 교각의 내진 성능이 저하된다고 할 수 있다.

3.2 교각의 노후도에 따른 지진응답의 비교

예제 교량은 교좌장치로 포트받침(Port Bearing, PB)과 탄성고무받침(Rubber Bearing, RB), 납-고무받침(Lead-Rubber Bearing, LRB)을 각각 적용하여 3가지 구조해석모델을 작성

Table 3 Material properties of rubber bearing(RB)

	Size of Bearing			G=1.15MPa		
	Applied Axial Force (kN)	Height, H (mm)	Effective Rubber Thickness (mm)	Horizontal Force		Shear Spring Coefficient, K (kN/m)
				Always 70% (kN)	Earthquake 150% (kN)	
Abutment	2,800	100	48	193	414	5,750
Pier	6,000	119	64	934.5	845.3	8,805

Table 4 Material properties of lead-rubber bearing(LRB)

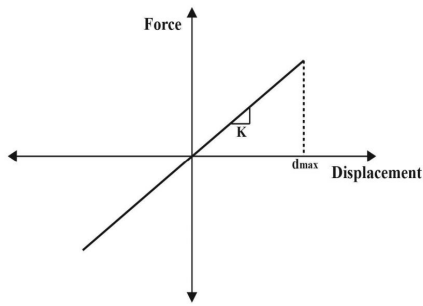
	Applied Axial Force (kN)	Diameter, D (mm)	Height, H (mm)	Post-Yield Stiffness, Kd (kN/m)	Stiffness, Ku (kN/m)
Abutment	3,000	650	367	1,303	13,079
Pier	6,000	900	372	2,593	25,716

Table 5 Natural period of example bridges

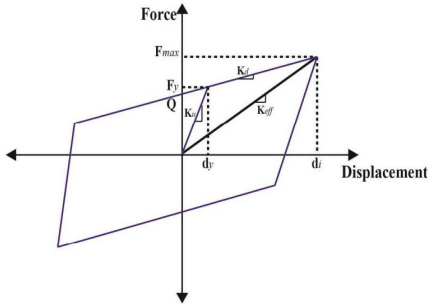
Bridge ID.	B2-PB	B2-RB	B2-LRB
Natural Period(sec)	0.359	1.674	2.798

하였으며, 교량의 명칭은 B2-PB, B2-RB, B2-LRB으로 각각 명명하였다. B2는 교각이 2개인 교량을 의미하며 PB, RB, LRB는 교좌장치로 사용된 것이 각각 포트받침, 탄성고무받침, 납-고무받침임을 나타낸다. 예제교량에 적용된 탄성고무받침과 납-고무받침의 제원과 특성을 각각 Tables 3~4에 나타내었다. 탄성고무받침과 납-고무받침의 비탄성 해석 모델은 Fig. 9에 나타내었다. 고유치해석에 의한 고유주기를 Table 5에 나타내었다. 고무받침과 납-고무 받침의 적용으로 교량의 고유주기가 증가하였음을 알 수 있다.

노후도에 따른 세가지 교좌장치를 가지는 예제교량에 대하여 교각의 힘-변위 관계를 근거리 지진기록인 LA23과 LA27 (Jeong *et al.*, 2019)을 사용한 경우에 대하여 비교하여 Fig. 10에 나타내었다. 노후도가 증가할수록 힘-변위 관계에서 교각의 강도저하가 발생함을 알 수 있으며 이로 인하여 교각의 변위응답이 증가함을 알 수 있다. 교좌장치로 포트받침이 사용된 B2-PB는 지진하중에 의한 상부구조물의 관성력을 직접적으로 교각에 전달함으로써 교각의 비선형 거동이 B2-RB와 B2-LRB의 경우보다 크게 일어남을 알 수 있으며 노후도에 따른 최대변위의 차이도 다른 경우보다 작음을 알 수 있다. 노후도에 따른 교각의 최대변위의 차이는 LA27 지진에 대하여 B2-LRB의 경우가 가장 뚜렷하게 나타난다. LA23 지진에 대한 B2-LRB의 경우는 탄성거동을 하기 때문에 노후화의 영향이 나타나지 않는다.



(a) analysis model for rubber bearing



(b) analysis model for lead rubber bearing

Fig. 9 Analysis models for rubber bearing and lead rubber bearing

교각의 노후도에 따른 지진응답의 영향을 분석하기 위하여 변위비(D_{ratio})와 전단력비(F_{ratio})를 다음과 같이 정의한다.

$$D_{ratio} = \frac{D_{ageing}}{D_{original}} \quad (8)$$

$$F_{ratio} = \frac{F_{ageing}}{F_{original}} \quad (9)$$

여기서, D_{ageing} 는 노후화 효과를 고려할 경우의 교각의 최대변위이며, $D_{original}$ 은 노후화 효과를 고려하지 않을 경우의 교각의 최대변위이다. F_{ageing} 는 노후화 효과를 고려할 경우에 작용하는 최대전단력이며, $F_{original}$ 은 노후화 효과를 고려하지 않은 경우에 교각에 작용하는 최대전단력이다.

교각의 최대변위를 근거리 지진 40개와 원거리 지진 40개에 대하여 노후화 정도(5%, 10%, 25%, 50%)를 고려한 경우에 세가지 예제교량인 B2-PB, B2-RB, B2-LRB에 대하여 비교하여 Fig. 11에 나타내었다. 그림의 가로축은 사용지진의 일련번

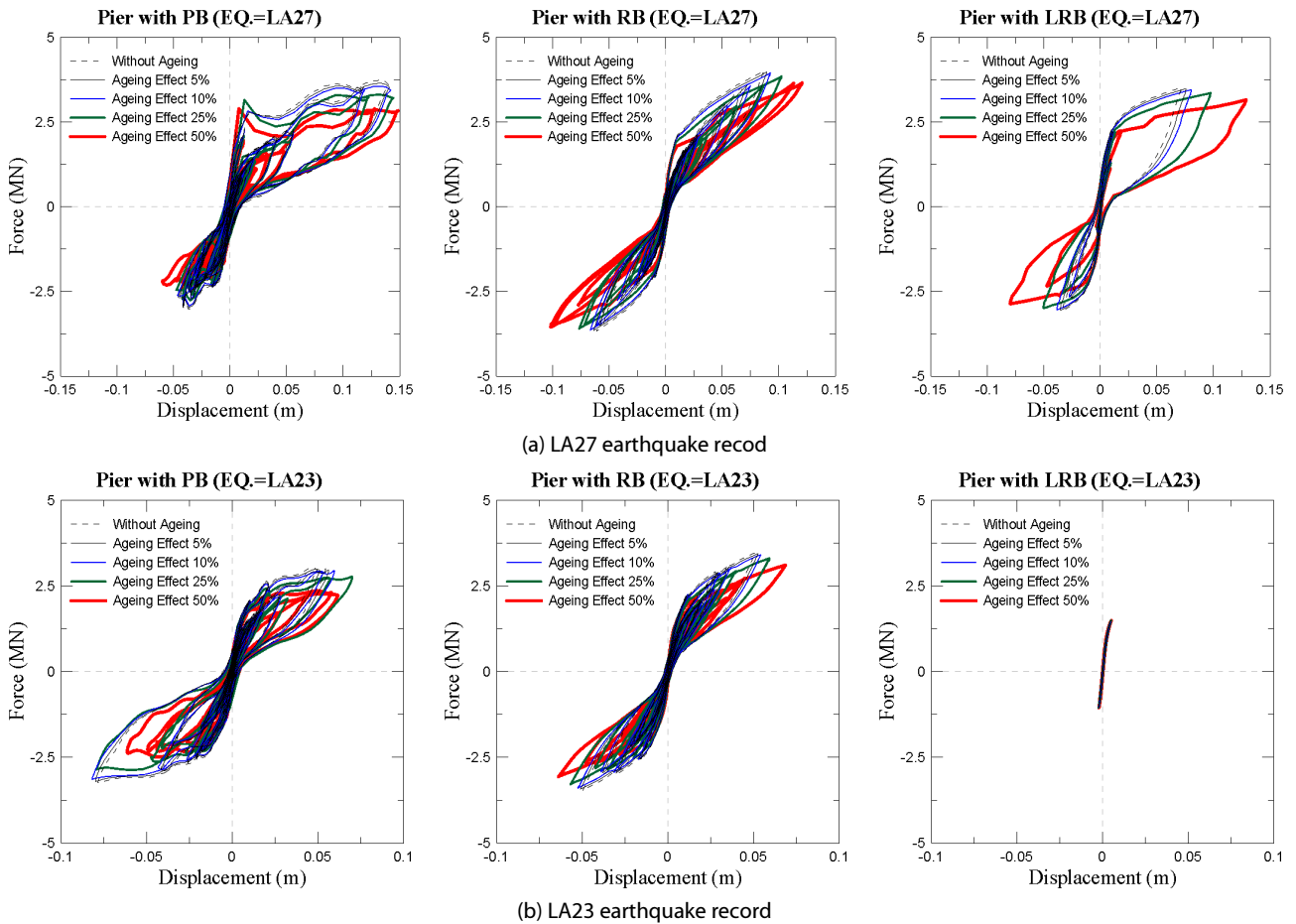


Fig. 10 Comparison of force-displacement relationship of piers according to aging effect

호를 나타내었는데 이는 Jeong 등(2019)의 논문에 나타난 지진의 일련번호와 동일하다. 동일한 일련번호의 지진에 대하여 교각장치 종류에 따른 최대변위응답의 차이가 크게 나타나며 남-고무 받침이 적용된 교량인 B2-LRB가 남-고무 받침의 지진에너지 소산 효과에 의해 최대변위 응답이 상대적으로 작게 나타남을 알 수 있다. Fig. 11(a)에 나타낸 근거리 지진에 대한 최대변위가 Fig. 11(b)의 원거리 지진에 대한 최대변위 보다 크게 나타나는데, 이는 Fig. 6(b)에 나타낸 변위응답스펙트럼과 유사한 경향을 나타냄을 알 수 있다. 근거리 지진의 경우가 큰 지진에너지를 가진 속도펄스파를 가지는 특성으로 인하여 원거리 지진의 경우보다 변위 응답을 크게 유발하는 특성을 나타내는데, 이러한 경향을 Fig. 11을 통하여도 알 수 있다. Fig. 6(a)에 나타낸바와 같이 근거리 지진이 원거리 지진에 비하여 장주기에서 가속도응답스펙트럼이 크게 나타나는데, B2-LRB의 경우에는 남-고무 받침이 지진의 단주기 성분을 효과적으로 차단함으로써 Fig. 11(b)에 나타낸 바와 같이 40개의 원거리 지진에 대한 B2-LRB 교량의 교각의 최대변위는 대부분 1cm 미만으로 탄성범위내에 있으므로 노후화의 영향이 대부분의 경

우에는 나타나지 않는다. Fig. 11에 나타낸 최대변위응답을 사용하여 식 (8)을 이용하여 변위비를 구하고 Fig. 12에 나타내었다. 변위비(D_{ratio})가 1 보다 큰 경우는 노후도에 따른 교각의 변위응답이 증가함을 의미하고 1 보다 작은 경우는 노후도에 따른 변위응답이 감소함을 나타낸다. B2-PB 교량의 경우에는 변위비(D_{ratio})가 대략 0.5~2의 분포를 가지는데 1 보다 큰 경우가 대부분이다. 노후도에 따른 변위비의 차이는 Fig. 12(a)에 나타낸 근거리 지진의 경우에 B2-RB와 B2-LRB에 뚜렷하게 나타남을 알 수 있다. 변위비(D_{ratio})가 1인 경우는 교각의 변위응답이 탄성범위내에서 있어서 노후화의 영향이 나타나지 않음을 의미한다. Fig. 11과 Fig. 12를 비교하여 볼 때 비탄성 변위응답의 크기와 변위비의 크기가 비례적인 관계를 나타내지는 않음을 알 수 있다. 이는 노후화의 영향이 이력거동의 반복적인 거동에 작용함으로 최대변위 하나의 값으로서 영향을 평가하기에는 충분하지 않음을 의미한다. 그렇지만 노후화의 영향을 최대변위의 비율인 변위비로서 대략적으로 모사할 수 있으며 간단한 변수이기 때문에 비교의 목적으로 적절하다고 판단되어 본 연구에 지표로 사용하였다.

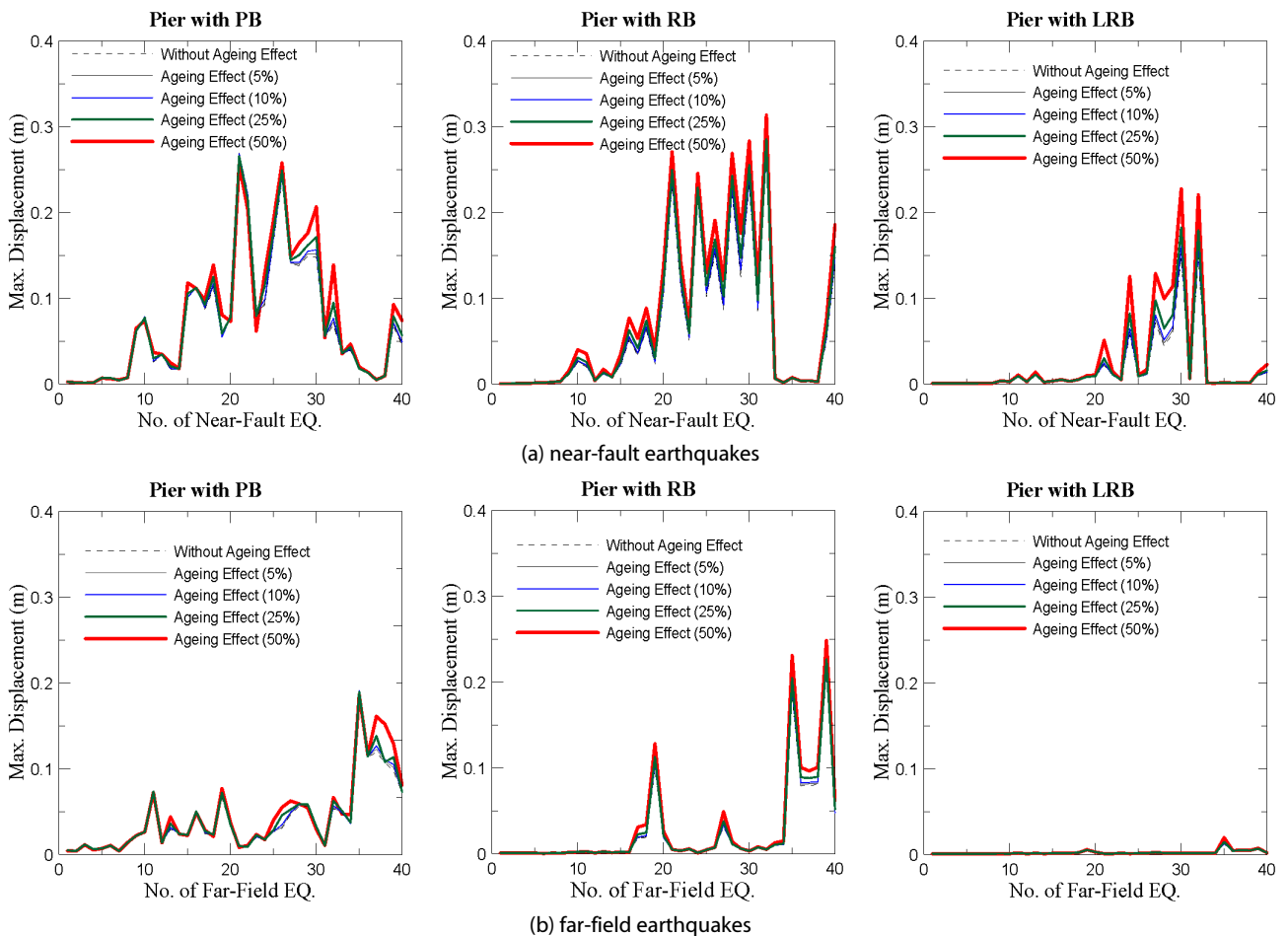


Fig. 11 Comparison of the maximum displacement of piers according to the degree of aging effect

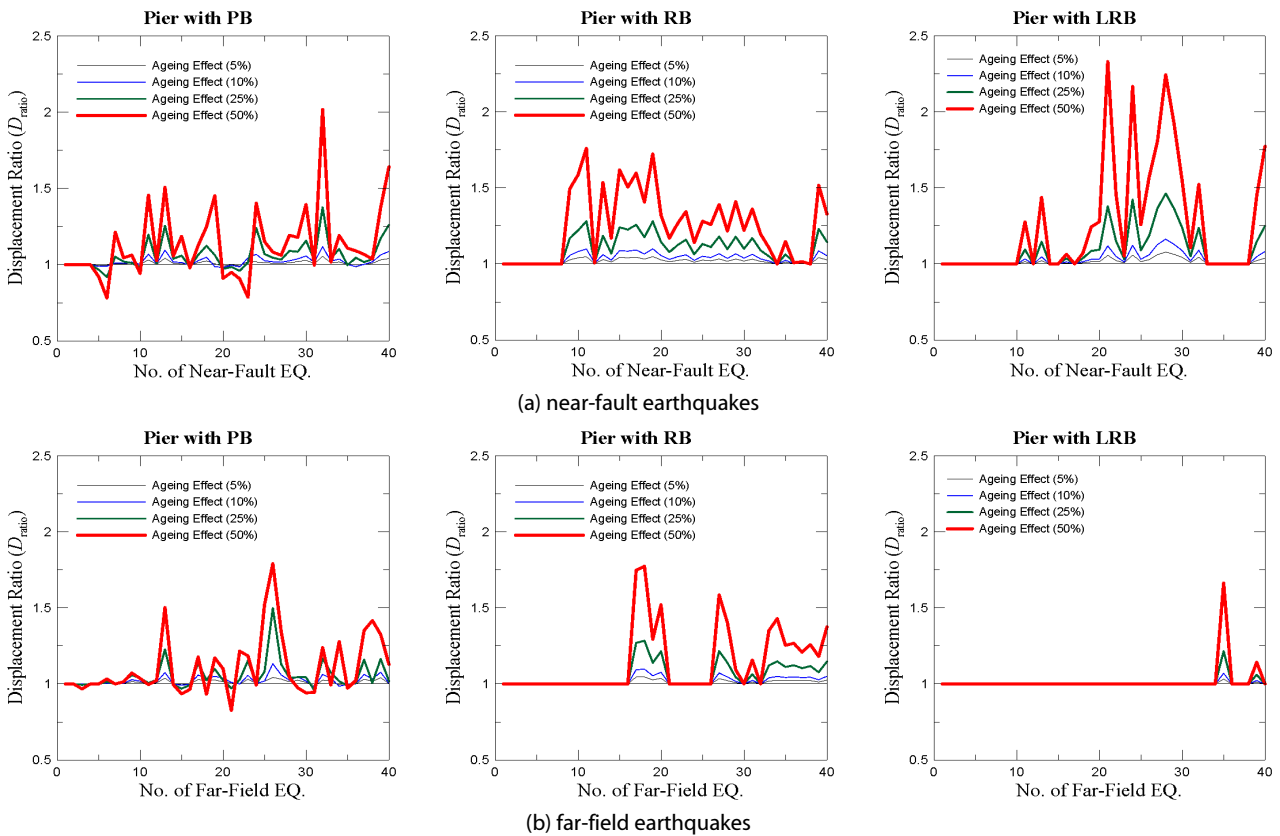


Fig. 12 Comparison of the displacement ratio(D_{ratio}) of piers according to the degree of aging effect

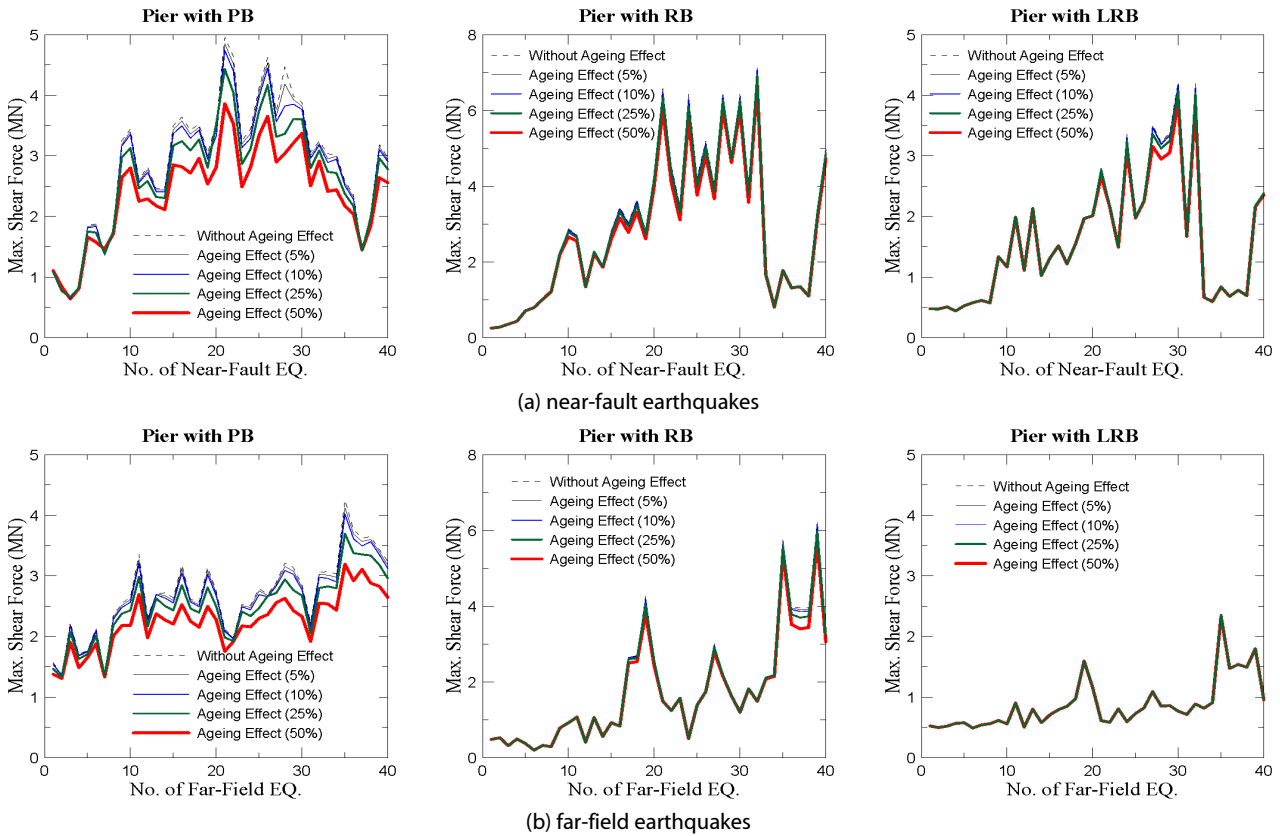


Fig. 13 Comparison of the maximum displacement of piers according to the degree of aging effect

교각의 최대전단력을 근거리 지진 40개와 원거리 지진 40개에 대하여 4가지 노후도(5%, 10%, 25%, 50%)를 고려한 경우에 세가지 예제교량인 B2-PB, B2-RB, B2-LRB에 대하여 비교하여 Fig. 13에 나타내었다. 노후도가 증가할수록 일반적으로 교각에 작용하는 최대전단력은 감소함을 알 수 있다. 이는 노후도가 증가할수록 Fig. 8에 나타낸 구속콘크리트의 응력-변형률 관계에서 알 수 있듯이 교각의 구속 콘크리트가 받을 수 있는 응력이 감소하게 되어 응력의 합으로서 나타나는 전단력도 노후도가 증가하면 감소하는 경향을 나타내는 것이다. B2-RB와 B2-LRB 교량의 경우에는 B2-PB 교량의 경우보다 노후도에 의한 전단력의 감소가 작게 발생하는데, 이는 탄성 고무받침(RB)과 납-고무 받침(LRB)에 의해 교량의 주기가 장주기화 되면서 교각 변위응답의 반복이력 횟수의 감소에 의한 영향으로 판단된다. 교량의 주기가 짧아질수록 Fig. 10에 나타낸 바와 같이 교각의 힘-변위 이력곡선의 반복이력 횟수가 증가하면서 강도저하가 크게 발생하며 노후도가 큰 경우에 반복이력에 의한 강도저하의 경향이 보다 크게 나타나는 것을 알 수 있다. Fig. 13에 나타낸 최대전단력을 식 (9)를 이용하여 전단력비를 구하여

Fig. 14에 나타내었다. 전단력비(F_{ratio})가 1 보다 큰 경우는 노후도에 따른 교각의 최대전단력이 증가함을 의미하고 1 보다 작은 경우는 노후도에 따른 최대전단력이 감소함을 나타낸다. 전단력비(F_{ratio})는 교각의 힘-변위응답의 반복이력 횟수와 노후도가 증가할수록 감소하는 경향을 나타냄을 알 수 있다. 근거리 지진의 경우가 원거리 지진의 경우보다 노후도에 따른 전단력비(F_{ratio})의 감소가 크게 나타나는데, 이는 근거리 지진이 비탄성 응답을 유발하는 크기나 횟수(예를 들면 Fig. 10의 힘-변위 관계에서 변위응답의 크기와 반복횟수)가 상대적으로 많기 때문으로 판단된다.

Fig. 12에 나타낸 변위비(D_{ratio})를 노후도에 따른 평균값을 구하여 Table 6에 나타내었다. 교각의 응답이 탄성범위내에 있는 경우에는 노후도의 영향이 없으므로 평균값 계산에 포함하지 않았다. 노후도의 증가에 따른 변위비의 증가 경향이 비례하여 나타나며, B2-PB, B2-RB, B2-LRB 교량의 순서대로 즉, 교량의 주기가 길어질수록 노후도에 따른 변위비의 증가가 크게 나타남을 알 수 있다. B2-PB와 B2-RB의 경우에는 노후도에 따른 변위비가 원거리 지진과 근거리 지진의 경우에 특정한

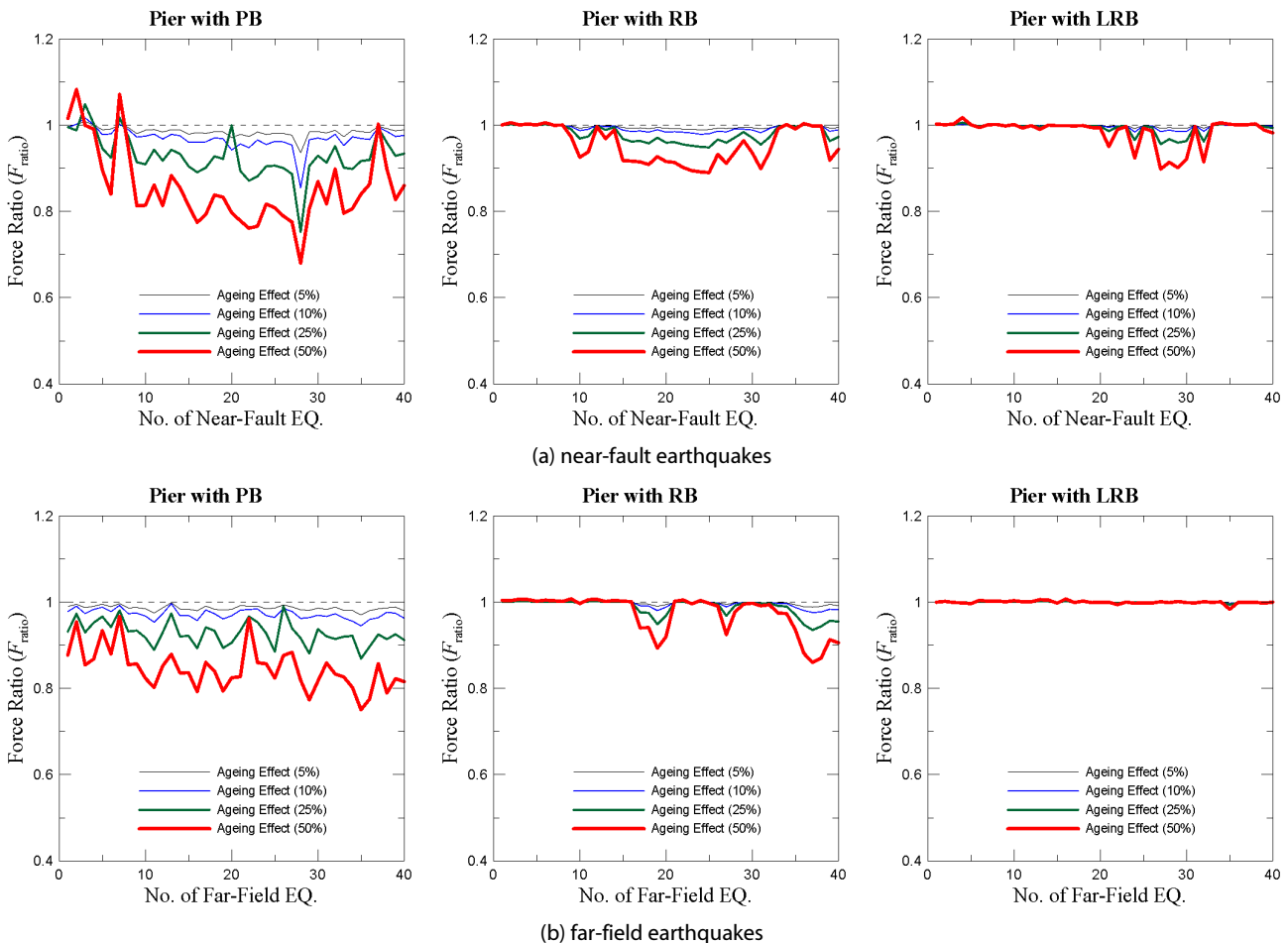


Fig. 14 Comparison of the displacement ratio(D_{ratio}) of piers according to the degree of aging effect

Table 6 Average displacement ratio according to aging effect of pier

Ageing Effect	Average of Displacement Ratio(D_{ratio})					
	Near-Fault			Far-Field		
	B2-PB	B2-RB	B2-LRB	B2-PB	B2-RB	B2-LRB
5%	1.0123	1.0256	1.0315	1.0134	1.0250	1.0216
10%	1.0267	1.0524	1.0658	1.0269	1.0516	1.0463
25%	1.0764	1.1420	1.1935	1.0623	1.1455	1.1382
50%	1.1726	1.3371	1.5294	1.1267	1.3691	1.4030

Table 7 Average force ratio according to aging effect of pier

Ageing Effect	Average of Force Ratio(F_{ratio})					
	Near-Fault			Far-Field		
	B2-PB	B2-RB	B2-LRB	B2-PB	B2-RB	B2-LRB
5%	0.9856	0.9954	0.9976	0.9854	0.9947	0.9991
10%	0.9705	0.9909	0.9950	0.9704	0.9888	0.9984
25%	0.9291	0.9759	0.9865	0.9234	0.9699	0.9967
50%	0.8551	0.9459	0.9667	0.8350	0.9313	0.9908

경향이 없이 비슷한 값을 나타내지만 B2-LRB의 경우에는 근거리 지진의 변위비가 원거리 지진에 비하여 약 1~9% 정도 크게 나타난다. 이는 납-고무받침(LRB)이 고진동수 성분이 많은 원거리 지진에 의한 거동을 근거리 지진에 비하여 효과적으로 저감시키기 때문으로 판단된다.

Fig. 14에 나타난 전단력비(F_{ratio})를 노후도에 따른 평균값을 구하여 Table 7에 나타내었다. 교각의 응답이 탄성범위내에 있는 경우에는 노후도의 영향이 없으므로 평균값 계산에 포함하지 않았다. 노후도의 증가에 따른 전단력비의 감소가 노후도에 비례하여 나타남을 알 수 있으며, 교각의 주기가 짧아질수록 노후도에 따른 전단력비의 감소가 크게 나타남을 알 수 있다. B2-PB와 B2-RB의 경우에는 노후도에 따른 전단력비의 감소가 근거리 지진의 경우에 원거리지진에 비하여 약간 크게 나타난다. 이는 근거리 지진이 원거리 지진에 비하여 교각의 비탄성 변위응답을 크게 유발하기 때문에 노후화 효과에 의한 전단력비의 감소도 근거리 지진의 경우에 크게 나타나는 것으로 판단된다.

4. 결론

교각의 노후도를 해석적으로 분석하기 위하여 노후도의 영향은 주철근과 이를 둘러싼 띠철근의 부식에 의한 감소량으로 고려하여 근거리 지진과 원거리 지진에 대한 지진해석을 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 노후도가 증가할수록 힘-변위 관계에서 교각의 강도저하가 발생함을 알 수 있으며 이로 인하여 교각의 변위응답이 증가함을 알 수 있다.
- 2) 교각의 최대변위응답을 사용하여 노후화에 따른 변위비(D_{ratio})를 구하였으며, 대부분의 경우에 1보다 큰 값을 나타내며 노후화 정도가 증가할수록 변위비로 증가함을 알 수 있다.
- 3) 세가지 예제교량에서 고유 주기가 긴 교량일수록 노후도에 따른 변위비(D_{ratio})의 증가가 크게 나타남을 알 수 있다. B2-PB와 B2-RB의 경우에는 노후도에 따른 변위비가 원거리 지진과 근거리 지진의 경우에 특정한 경향이 거의 비슷한 값을 나타내지만 B2-LRB의 경우에는 근거리 지진의 변위비가 원거리 지진에 비하여 약 1~9% 정도 크게 나타난다.
- 4) 전단력비(F_{ratio})도 노후도가 증가하면 1보다 작은 값으로 감소하는 경향을 나타낸다. B2-RB와 B2-LRB 교량의 경우에는 B2-PB 교량의 경우보다 교각의 노후도에 의한 전단력비(F_{ratio})의 감소가 작게 발생하는데 이는 탄성 받침(RB)와 납-고무 받침(LRB)에 의해 교각의 주기가 장주기화 되면서 교각의 반복이력 횟수의 감소에 의한 강도저하가 상대적으로 작게 발생하기 때문으로 판단된다. 노후도와 반복이력의 횟수가 많을수록 전단력비의 감소경향(또는 강도저하의 경향)이 보다 크게 나타나는 것을 알 수 있다.
- 5) 교각의 주기가 짧아질수록 노후화에 따른 전단력비의 감소가 크게 나타남을 알 수 있다. B2-PB와 B2-RB의 경우에는 노후화에 따른 전단력비의 감소가 근거리 지진의 경우가 원거리지진에 비하여 약간 크게 나타난다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 건설기술연구사업의 연구비지원(20SCIP-B146946-03)에 의해 수행되었습니다.

References

- Cho, S.H., Chung, L., Roh, Y.S. (2005) Estimation of Rebar Corrosion Rate in Reinforced Concrete Structure, *Corros. Rev.*, 23(4-6), pp.329~353.
- Jeong, Y.H., Song, J.K., Shin, S.B. (2019) Evaluation of Seismic Response Considering the Ageing Effect of Rubber and Lead-Rubber Bearings Applied to PSC Box Bridge, *EESK, J. Earthq. Eng.*, 23, pp.311~319.

- Mander, J.B., Priestley, M.J.N., Park, R.** (1988a) Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete, *J. Struct. Eng.*, 114(8), pp.1804~1826.
- Mander, J.B., Priestley, M.J.N., Park, R.** (1988b) Observed Stress-Strain Behavior of Confined Concrete, *J. Struct. Eng.*, 114(8), pp.1827~1849.
- Mazzoni, S., McKenna, F., Scott, M.H., Fenves, G.L.** (2007) OpenSees: Open System of Earthquake Engineering Simulation. Pacific Earthquake Engineering Center. Univ. of Calif. Berkeley. Available from: <http://opensees.berkeley.edu>.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport** (2018) Yearbook of Road Bridge and Tunnel Statistics.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport** (2018) Facility Management System, Available from: <https://www.fms.or.kr/com/mainForm.do>.
- Priestley, M.J.N., Seible, F., Calvi, G.M.** (1996) *Seismic Design and Retrofit of Bridges*, John Wiley & Sons, Inc., New York, p.686.
- SAC Joint Venture Steel Project Phase 2** (1997) Suites of Earthquake Ground Motions for Analysis of Steel Moment Frame Structures, Available from : http://nisee.berkeley.edu/data/strong_motion/sacsteel/ground_motions.html.

요 지

현재 우리나라에서 운영 중인 교량 중 30년 이상 된 교량이 전체의 약 11%를 차지할 정도로 노후교량의 수가 증가하고 있다. 따라서 교량의 노후화에 따른 영향을 고려한 내진성능 평가방법의 개발이 필요하다고 볼 수 있다. 예제 교량으로는 포트받침, 탄성고무받침과 납-고무받침을 가진 3가지의 강합성 상자형 거더교를 선정하고, opensees 프로그램을 사용하여 구조해석모델을 작성하였다. 본 연구에서는 교량의 노후도를 교각의 주철근과 띠철근의 부식에 의한 면적의 감소로 반영하였다. 교각의 노후화 정도로는 5%, 10%, 25%, 50%의 4가지 조건을 사용하였다. 입력지진으로는 근거리 지진과 원거리 지진을 각각 40개씩 사용하였으며, 노후화 정도에 따른 예제교량의 교각에 대한 최대변위와 최대 전단력 응답을 구하여 비교하였다. 노후도가 증가할수록 힘-변위 관계에서 교각의 강도 저하가 발생함을 알 수 있으며, 이로 인하여 교각의 변위응답이 증가함을 알 수 있다. 교각의 노후도에 따른 변위응답과 전단저항능력의 영향을 분석하기 위하여 변위비(D_{ratio})와 전단력비(F_{ratio})를 정의하여 평가하였다. 예제교량의 고유주기가 길어질수록 노후도에 따른 변위비(D_{ratio})의 증가가 크게 나타남을 알 수 있으며, 전단력비(F_{ratio})의 감소 경향은 작게 나타남을 알 수 있다.

핵심용어 : 강합성 박스 거더교, 노후도, 교각, 구속콘크리트, 근거리 지진, 원거리 지진