

경주 지진에 대한 국내 공용 중 케이블지지교량의 지진응답특성: 사례 연구

박성우¹, 이승한^{2*}, 최가희³

Seismic Response Characteristics of Domestic Cable-supported Bridges Due to Gyeongju Earthquakes: Case Study

Sung Woo Park¹, Seung Han Lee^{2*}, Gahee Choi³

Abstract: This study presents the seismic response characteristics of domestic cable-supported bridges due to 3 earthquakes with magnitudes of 5.1, 5.8, and 4.5 in Richter scale, which occurred around Gyeongju region in 2016. The seismic acceleration response signals, recorded by the seismic acceleration sensors at the free field near bridge and designated positions on bridge, are utilized to characterize the seismic responses of structural elements of cable-supported bridges. The dynamic behaviors of bridges are presented through Fourier transform of acceleration time history. Using the peak accelerations normalized by those at the free fields, amplification effects on the tops of the pylons are analyzed comparatively bridge by bridge. Using aforementioned analyses, the necessity of development on the criteria of alert levels is discussed for the earthquake disaster response of cable-supported bridges.

Keywords: Gyeongju earthquake, Cable-supported bridges, Seismic response characteristic, Seismic acceleration sensors

1. 서론

현수교나 사장교와 같은 케이블지지교량은 붕괴 시 초래할 수 있는 인명 및 재산 피해 등의 사회적, 경제적 영향의 심각성의 정도를 고려하여 일반교량에 비해 높은 안전율을 갖도록 설계되고, 정밀한 시공이 이루어지도록 관리될 뿐만 아니라, 공용 중에도 계측기반 유지관리 시스템 운영을 통한 실시간 안전 관리가 수행되도록 하고 있다. 근래에 들어 케이블지지교량을 포함한 국내 사회기반 시설물들의 지진 안전성에 대한 관심이 높아짐에 따라, 행정안전부(ministry of the interior and safety, MOIS)에서는 사회기반 시설물에 지진가속도계측기(seismic acceleration sensor, 이하 지진가속도계)를 설치 및 운영하도록 규정하였다. 2009년 3월 시행된 「지진재해대책법」의 시행령 제5조(지진가속도계측 대상 시설 등)에 근거하여 지진가속도계측이 의무화되는 대상 시설물이 명시되었

고, ‘지진가속도계측기 설치 및 운영기준(MOIS, 2017)’이 2010년 9월 고시(소방방재청 고시 제2010-30호)되어 시행됨에 따라 지진가속도계측기의 설치 위치와 수량이 구체화되었으며, 이 기준은 2012년 12월, 2013년 5월, 2015년 1월, 2016년 8월 및 2017년 7월에 개정 고시되었다.

지진가속도계의 설치에 지진발생 이후 시설물의 구조적 거동을 상세하게 파악하기 위함에도 목적이 두지만, 지진 발생 시 케이블지지교량의 안전성을 긴급하게 평가하여 앞으로 일어날 추가적인 재난에 대응할 수 있도록 하기 위함에 그 주된 목적을 둔다. 국토교통부(ministry of land, infrastructure and transport, MOLIT)에서는 ‘해상교량 재난대응 현장 조치 행동매뉴얼(표준안)(IROCM, 2016)’에 근거하여 자유장(또는 주탑 기초부)에 설치된 지진가속도계에서 측정된 최대지반가속도(peak ground acceleration, PGA) 크기를 기준으로 지진재난에 대응하도록 하는 체계를 갖추도록 하고 있다(Table 1 참조). 이러한 대응체계는 자유장 PGA값 하나만을 이용하여 재난 단계를 즉각적으로 분류하고 대응할 수 있도록 함으로써, 명확하고 신속한 대처가 가능하다는 장점이 있다. 그러나 현수교 및 사장교와 같은 케이블지지교량은 구조적 형식이 매우 다양한데다가 그 형식에 따른 구조적 거동의 특성이 상이하게 나타남에도 불구하고, 시설물의 구조적 거동의 영향을 거의 받지 않는 자유장에 설치된 지진가속도계 신호만을

¹정회원, 한국시설안전공단 특수교관리센터 부장

²정회원, 한국시설안전공단 국가내진센터 과장, 교신저자

³정회원, 한국시설안전공단 시설성능연구소 연구원

*Corresponding author: shlee@kistec.or.kr

National Center for Seismic Safety, Korea Infrastructure Safety and Technology Corporation, Jinju, Gyeongsangnamdo, 52856, Korea

•본 논문에 대한 토의를 2018년 10월 1일까지 학회로 보내주시면 2018년 11월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

Table 1 Alert levels for seismic disaster situations based on the peak ground acceleration (PGA) measured at the free field (IROCM, 2016)

Alert level	PGA measured at the free field	Seismic disaster situation	Response manual
Blue (Attention)	> 15 gal	There is a sign of seismic activity but its level is low. It is unlikely to develop into a national crisis in the near term.	The managing organization shall monitor the signs, and check the cooperation system with the relevant organizations such as the emergency contact network.
Yellow (Caution)	> 25 gal	Sign of seismic activity is relatively active. It appears a certain level of tendency to develop into a national crisis.	The managing organization shall operate cooperation system with relevant organizations using collection of related information and reinforcement of information sharing activities.
Orange (Alert)	> 50 gal	Sign of seismic activity is active, and the speed and tendency of its development are remarkable. It is likely to develop into a national crisis.	The managing organization shall review the action plan and prepare the mobilization of human and material resources with the relevant organizations.
Red (Serious)	> 100 gal	Sign of seismic activity is very active, and the speed and tendency of its development are serious. It is certain to develop into a national crisis.	The managing organization shall make efforts to put the relevant capacity as much as possible with relevant organizations and be ready to respond immediately to the national crisis.

가지고 복잡한 구조계의 안전성을 일반화하여 단순하게 평가할 수 밖에 없다는 한계점이 있다.

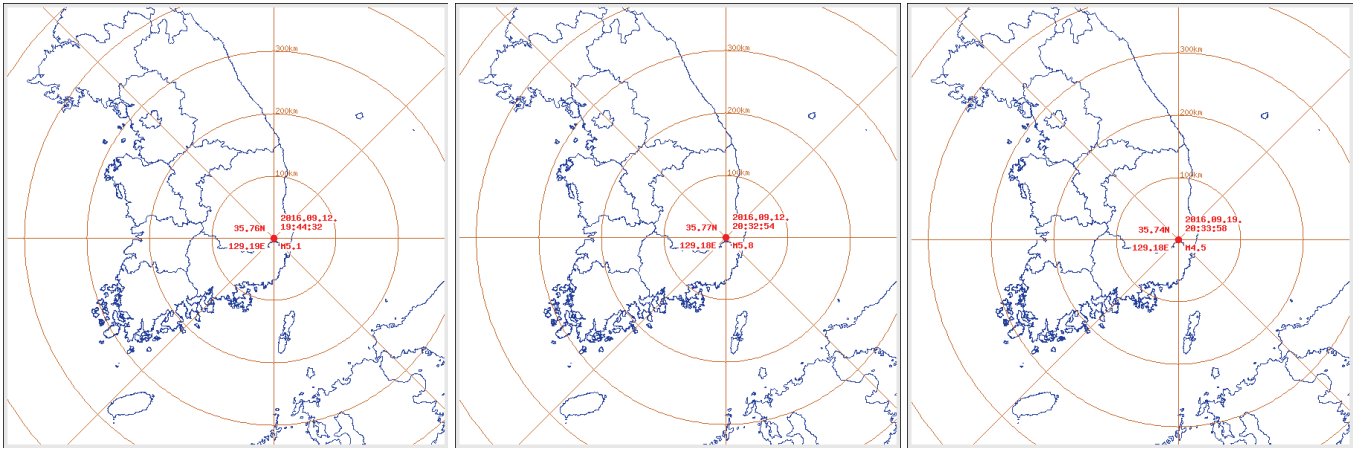
2. 경주 지진 시 공용 중 현수교 및 사장교 지진가속도 계측 현황

2.1 경주 지진 발생 현황

경주 지진의 본진은 2016년 9월 12일 20시 32분에 발생하였으며, 본진의 리히터규모(Richter magnitude, M_L)는 5.8로서 1978년 기상청이 계기지진 관측을 시작한 이후에 한반도에서 발생한 역대 최대 규모의 지진으로 확인되었다. 진원(hypocenter)의 심도(depth)는 15 km로, 그리고 지진파의 탁월주파수(predominant frequency)는 케이블지교량의 고유주파수(natural frequency)를 감안했을 때 상대적으로 고주파 영역에 해당하는 13.77 Hz로 관측되었다(KISTEC, 2017). 여기서, 탁월주파수란 진동에 포함된 주파수 성분 중 빈도나 진폭이 다른 주파수에 비하여 두드러진 주파수를 의미한다. 본진뿐만 아니라 본진이 발생하기 40여분 전에 발생한 전진(2016년 9월 12일 19시44분)과 1주일 후에 발생한 여진(2016년 9월 19일 20시33분)의 규모도 각각 5.1과 4.5로서 국내 지진 계측 역사를 기준으로는 상당히 규모가 큰 지진으로 분류된다. 이 논문에서는 본진과 함께 전진과 여진의 지진가속도 계측기록

도 함께 분석하며, 3개 지진의 진앙(epicenter)은 Fig. 1에서 보는 바와 같이 거의 동일하다(KMA, 2017).

경주 지진으로 인한 인명 피해는 사망자 없이 경상에 해당하는 부상자만 23명 발생하였으며, 경상자 역시 시설물의 구조적인 파괴로 인한 부상이 아닌 대피 중 넘어짐(10명), 물건의 낙하(4명), 뛰어내림(3명) 등 2차적 요인에 의해 발생한 부상이 대부분이었다(Park, 2017). 경주 지진이 규모 자체만을 놓고 봤을 때 국내 지진 계측 역사 이래 최대 규모를 기록하였음에도 불구하고 인명피해 및 시설물에 나타난 피해가 비교적 크지 않았던 것은 진원의 심도와 탁월주파수에서 그 이유를 찾을 수 있다. 일반적으로 지표면에서의 지진동은 진앙거리(epicentral distance)가 길수록, 진원의 심도가 깊을수록 감소의 영향을 많이 받아 지진동의 강도가 감소되게 되는데, 경주 지진과 같이 진앙이 한반도 내에 존재하여 진앙거리가 매우 짧은 경우에는 심도의 영향도 많이 받게 된다. 경주 지진 진원의 심도는 1978년 이후 국내에서 발생한 규모 5.0 이상의 지진들의 평균 심도 8.2 km에 비해 약 2배 정도 깊었던 것으로 관측되어, 상대적으로 깊은 심도가 지표면에서의 지진동 완화에 영향을 미쳤던 것으로 분석된다. 지진의 탁월주파수가 대형 시설물의 저차모드 고유주파수에 해당하는 영역에 존재할 경우 공진(resonance)에 의한 큰 피해가 유발될 수 있는데, 경주 지진의 경우 단층의 파열면이 강성이 높은 암반으로 둘러싸여 있어서 고주파를 발생시켰기 때문으로 분석되었다(Park, 2017).



(a) Foreshock (2016. 9. 12. 19:44, $M_L=5.1$) (b) Main shock (2016. 9. 12. 20:32, $M_L=5.8$) (c) Aftershock (2016. 9. 19. 20:33, $M_L=4.5$)

Fig. 1 Epicenters of Gyeongju Earthquakes(Foreshock, Main shock, and aftershock) (KMA, 2017)

2.2 현수교 및 사장교 지진가속도 계측 현황

한국시설안전공단 특수교관리센터에서는 지난 2009년부터 현재까지 통합관리계측시스템을 통한 일반국도 상 특수교 통합유지관리업무를 수행해오고 있다. 통합관리계측시스템은 2017년 9월 기준 일반국도 상 교량 21개소(현수교 4개소, 사장교 14개소, 아치교 2개소, 강상형교 1개소)의 구조 거동 데이터를 통합 관리해오고 있으며, 이 중 현수교 및 사장교 17개 교량에는 ‘지진가속도계측기 설치 및 운영기준(MOIS, 2017)’에 근거 지진가속도계를 설치하여 운영해오고 있다

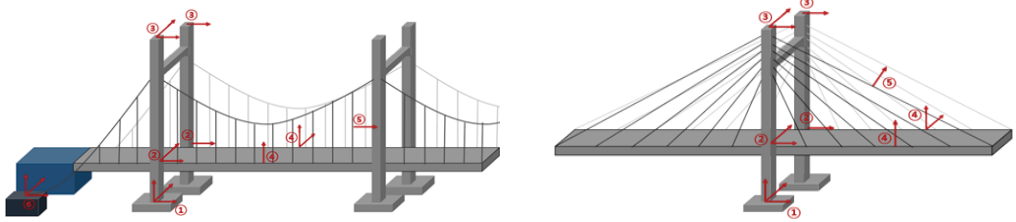
(KISTEC, 2017). 이 연구에서는 지진가속도계 설치대상 17개 교량 중 최근에 준공된 3개 교량을 제외한 14개의 교량의 계측기록을 바탕으로 경주 지진에 대한 지진응답 특성을 분석한다. Table 2에는 분석 대상 14개 교량을 진앙과 가까운 순서대로 나타내었다. 교량 형식은 현수교(suspension bridge, SB)와 사장교(cable-stayed bridge, CB)로 구분하여 주탑의 개수 및 형상과 함께 나타내었고, 총 경간장과 주경간장 길이 및 주탑의 높이 등의 교량의 치수 정보와 주탑과 거더의 재료 성질 등의 제원도 함께 나타내었다. 교량의 이름은 영문이니셜로 처리하였다.

지진가속도계의 설치는 현수교 및 사장교의 경우 Table 3

Table 2 Epicentral distances (Gyeongju Earthquakes) and primary information of 14 bridges (KISTEC, 2017)

Bridge name	SCP	NH	DG	GBS	DS	HT	SR	GG	YG	WD	MP	JD	JD2	DE
Epicentral distance [km]	137	149	168	172	173	183	231	232	251	274	278	291	291	313
Bridge type (CB: Cable-stayed Br., SB: Suspension Br.)	CB	SB	CB	CB	CB	CB	SB	CB	CB	CB	CB	CB	CB	CB
Types	Number of pylon	2	2	1	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2
	Pylon shape (H, A, D(diamond), Y, iY(inverted Y))	H	H	Y	H	A	iY	D	D	iY	A	D	A	A
Dimensions	Total span [m]	436	660	200	464	450	1,020	470	1,116	590	500	900	484	484
	Main span [m]	230	404	100	230	280	500	250	480	320	200	500	344	344
	Pylon height [m]	89	60	35	90	62	130	87	168	112	75	168	69	69
Materials (S: steel, C: concrete, SC: steel-concrete composite)	Pylon	C	S	C	C	S	S	C	SC	C	S	C	S	C
	Deck(main span)	SC	S	C	C	S	SC	S	S	C	S	S	S	SC
	Deck (side span)	SC	S	C	C	S	SC	S	S	C	S	C	S	-

Table 3 Example of the installation locations for seismic acceleration sensors (IROCM, 2016)



Structural Elements	Installation locations for seismic acceleration sensors
Free field	3-directional sensor on the base rock near the bridge
Pylon	3 directional sensor on the foundation, 2-directional sensor and 1-directional sensor near deck, 2-directional sensor and 1-directional sensor on the top
stiffened girder	2-directional sensor and 1 directional sensor at the center of the span
Anchor block	3-directional sensor(suspension bridge)
Hanger or Stay cable	1-directional sensor

에서 보는 바와 같이 자유장과 주탑 3개 위치(기초부, 보강거더 연결부 및 상부), 보강거더 중앙 및 케이블에 이루어져야 하며, 현수교의 경우에는 앵커리지에도 추가적인 설치가 필요하다. Table 4에는 14개 대상교량의 지진가속도계 설치 현황을 나타내었다. NH대교와 DS대교의 경우 자유장에 설치할 적절한 위치가 없어서 각각 앵커리지 내부와 링크룸 내부에 대체 설치하였고, MP대교의 경우에도 주변 지반조건 상의 이유(매립지)로 주탑 기초 상단의 지진가속도계로 자유장 계측 센서를 대체하였다. 그리고 DG대교, SR대교의 경우에는 주탑 기초 상단의 높이가 상시 수면 높이보다 낮아 설치를 제외하였다. 또한, JD2대교의 경우 자유장 지진가속도계는 병렬교량인 JD대교와 공유해서 사용할 수 있으므로 설치하지 않았고, 주탑 기초가 지중에 매립되어 있어 지상에 노출된 최하단 교각 측면에 대체 설치하였다. 현수교의 경우 앵커리지에도 추가적인 설치가 필요하지만, 자정식(self-anchored) 현

수교인 SR대교는 대상에서 제외된다.

3. 지진응답특성 분석

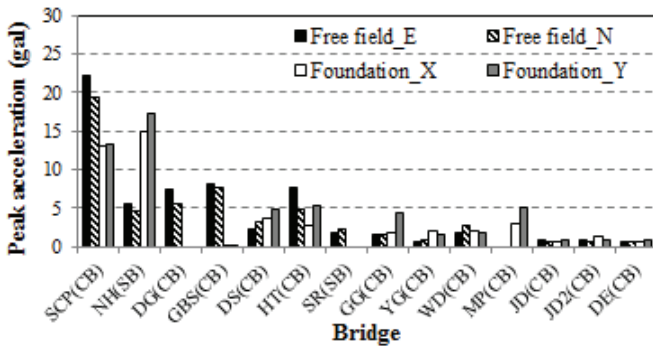
3.1 지진가속도계측기 위치별 지진가속도 최대응답

3.1.1 자유장 및 주탑기초부

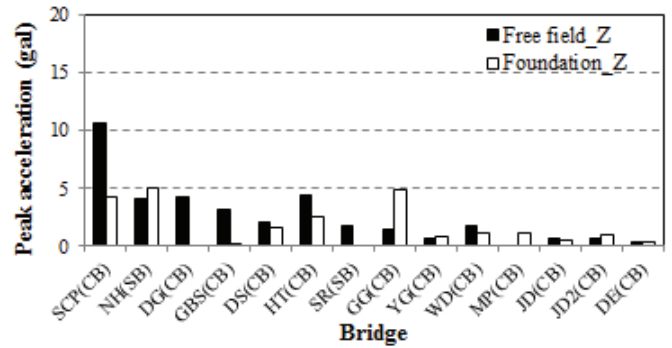
자유장은 구조물의 영향보다는 지반운동 자체의 영향을 많이 받아서 구조물의 형식과는 무관하게 해당 부지 지진동의 크기를 판단하는데 용이하기 때문에 계측결과에 대한 분석이 필수적이다. 주탑 기초부는 자유장과 비교하면 구조물의 영향을 조금 더 받게 되지만, 상부구조 내 다른 위치와 비교해서는 여전히 부지의 지진동의 영향을 많이 받기 때문에 분석의 필요가 있다. 특히, 주탑 기초부는 기반암에 직접 고정되기

Table 4 Installation conditions of seismic acceleration sensors in 14 bridges (KISTEC, 2017)

Bridge name	SCP	NH	DG	GBS	DS	HT	SR	GG	YG	WD	MP	JD	JD2	DE
Free filed	○	×	○	○	×	○	○	○	○	○	×	○	-	○
on the foundation	○	○	×	○	○	○	×	○	○	○	○	○	×	○
Pylon near deck	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
on the top	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Stiffening girder	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Hanger or Stay cable	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Anchor block	-	○	-	-	-	-	×	-	-	-	-	-	-	-

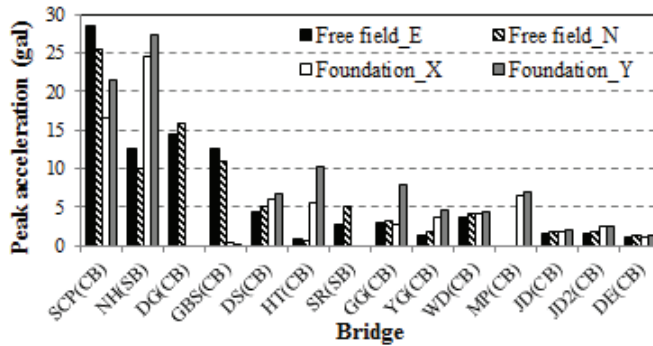


(a) Horizontal direction

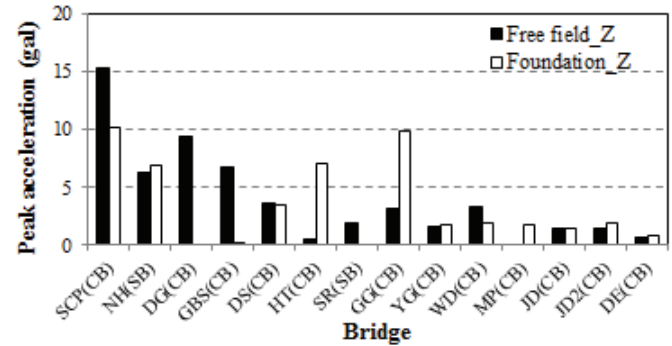


(b) Vertical direction

Fig. 2 Peak accelerations at the free fields and foundations of bridges (Foreshock, $M_L=5.1$)

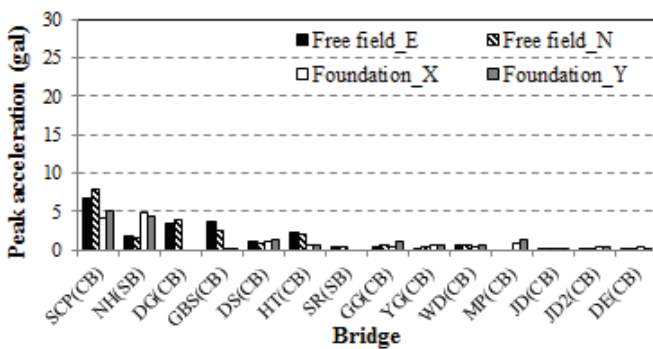


(a) Horizontal direction

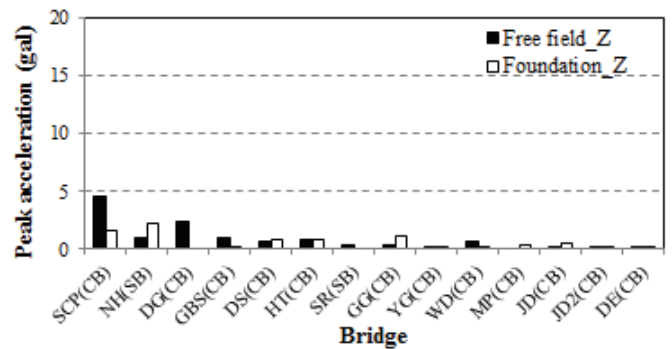


(b) Vertical direction

Fig. 3 Peak accelerations at the free fields and foundations of bridges (Main shock, $M_L=5.8$)



(a) Horizontal direction



(b) Vertical direction

Fig. 4 Peak accelerations at the free fields and foundations of bridges (Aftershock, $M_L=4.5$)

때문에 자유장보다 오히려 지반에 의한 지진동 증폭의 영향을 덜 받는다는 측면에서 자유장 계측결과와 함께 분석할 필요가 있다. Figs. 2~4에는 각각 경주 지진의 전진, 본진 및 여진 발생 시 14개 케이블지교량의 자유장과 주탑 기초부 위치 지진가속도계에서 측정된 가속도의 최대응답을 나타내었다. 각 그림의 (a), (b)에서는 각각 수평(horizontal)방향 응답(기호 E, N 또는 X, Y로 표시)과 수직(vertical)방향 응답(기호 Z로 표시)을 나타내었다. 여기서, 자유장의 수평방향은 동서

방향(east-west, E)과 북남방향(north-south, N)으로, 주탑 기초부의 수평방향은 교량의 교축방향(X)과 교축직각방향(Y)로 구분하여 나타내었다. 앞의 2.2에서 언급한 이유로 인하여 MP대교는 자유장 계측값이 빠져 있고, SR대교와 DG대교는 주탑 기초부 계측값이 빠져있으며, NH대교와 DS대교의 경우 대체 설치된 위치(앵커리지 내부와 링크룸 내부)에서 측정된 값을 자유장값으로서 나타내었다.

자유장 측정 가속도 기준 최대응답은 진앙거리가 가장 짧

은 SCP대교에서 발생하였으며, 전진 및 본진 시 최대 가속도가 각각 22 gal(E) 및 28 gal(N)로 기록되어 Table 1 기준의 관심(blue) 단계를 넘어서서 주의(yellow) 단계에 해당하는 상황이 발생하였다. 이외의 교량의 경우 본진 시 3개 교량(NH, DG, GBS)에서 10~16 gal 정도로 기록되었고, 나머지 교량은 5 gal 이하로 기록되었다. 14개 교량의 설계 최대지반가속도는 도로교설계기준(MOLIT, 2016)의 지진구역 구분에 근거하여 지진구역 I에 해당하는 8개 교량(NH, DG, MP, GBS, DS, GG, HT, DE)은 151 gal(=0.154g)이고, 지진구역 II(전라남도 남서부)에 해당하는 5개 교량(JD, JD2, WD, SR, YG)은 96 gal(=0.098g)이다. 단, SCP대교의 경우는 지진구역 I에 해당하지만, 설계 당시의 설계기준에 근거하여 137gal(=0.140g)로 설정되었다. 경주 지진에 의한 최대가속도응답은 설계지반가속도 기준으로 SCP대교에서 21%, 3개 교량(NH, DG, GBS)에서 7~10%, 나머지 교량에서는 4% 미만에 해당한다.

전진, 본진 및 여진에 대한 자유장 계측결과를 분석해보면, 전반적으로 진앙거리가 길어짐에 따라 최대가속도응답의 크기가 점점 작아지는 경향을 확인할 수 있으며, 이는 앞의 2.1에서 언급한 바와 같이 거리에 의한 감쇠의 영향으로 판단된다. 그러나 NH대교처럼 DG대교와 GBS대교보다 진앙거리가 짧음에도 불구하고 최대가속도가 작게 나타나는 경우도 발견할 수 있다. 이 현상에 대한 원인은 다음과 같이 분석된다. 먼저 NH대교의 최대가속도응답은 자유장 계측값이 아닌 대체 설치된 앵커리지 내부에서의 계측값이기 때문에 다른 교량의 자유장 계측결과와 상이할 수 있다. 일반적으로 지진동은 기반암(bedrock)에서 지표면으로 전달되면서 지반의 영향으로 강도가 증폭이 되기 때문에 자유장에서 계측된 값도 지반 증폭의 영향을 받은 값이라 할 수 있다. 이에 반해 앵커리지의 경우는 암반에 직접 정착되어 있기 때문에 앵커리지 내부에서 측정된 NH대교의 계측값은 지반 증폭의 영향을 거의 받지 않았다고 볼 수 있다. 이로 인하여 상대적으로 짧은 진앙거리에도 증폭되지 않은 NH대교의 최대가속도가 증폭된 DG대교와 GBS대교보다 작은 것으로 분석된다.

주탑 기초부에서의 계측결과를 보면, 대부분의 교량에서 자유장과 주탑 기초부에서 측정된 최대가속도의 차이가 크지 않게 나타나지만, NH대교나 HT대교, GG대교와 같이 자유장 측정 최대가속도에 비하여 기초부 측정 최대가속도의 크기가 크게 계측된 결과를 발견할 수 있다. 이러한 현상은 해당 교량들의 주탑 기초부가 다른 교량에 비해서 상부구조의 영향을 많이 받았기 때문이라고 분석된다. HT대교 및 GG대교가 다른 사장교에 비해 주경간장 길이나 주탑 높이의 측면에서 대형 교량에 해당된다는 것은 이러한 분석을 뒷받침하는 근거가 되며, NH대교는 현수교라는 점에서 그 영향을 더 크게 받았다고 분석할 수 있다. 또한, MP대교 주탑 기초부에서는 지

리적으로 주변에 있는 다른 교량들보다는 비교적 큰 값인 7 gal의 PGA가 측정이 되었는데, 이는 앞의 2.2에서 언급한 바와 같이 매립지라는 지반 특성의 영향이라 분석된다.

자유장과 주탑기초부의 최대가속도응답 계측결과를 분석해본 결과 다음과 같은 경향성을 찾아낼 수 있다. 먼저, 거리에 의한 감쇠의 영향으로 진앙거리가 길어질수록 최대가속도응답은 작아진다. 주탑 기초가 기반암에 직접 고정되기 때문에 지표면에 위치한 자유장보다 지반으로 인한 지진동 증폭의 영향을 덜 받게 되어 자유장 보다 지진동이 작을 수 있지만, 반대로 상부구조의 영향을 많이 받아 자유장보다 큰 최대가속도 계측결과를 보일 수도 있다. 결론적으로 두 개의 영향 중 어느 쪽 영향을 많이 받느냐에 따라서 결정되지만, 규모가 큰 교량의 경우 후자의 영향을 더 많이 받는 것으로 나타난다.

3.1.2 주탑

Table 5에는 경주 지진의 전진, 본진 및 여진 시 주탑에 부착된 지진가속도계에서 기록된 최대가속도 응답을 나타내었다. 교축방향(longitudinal)과 교축직각방향(transverse)의 응답을 구분하여 나타내었고, 각 높이별로 좌우 주탑에 각각 지진가속도계가 설치된 경우는 그 평균을 취하였다. 주탑 기초부에서의 계측결과는 앞의 3.1.1에서 분석하였으나, 주탑 내 진동의 증폭 정도를 파악하기 위하여 함께 나타내었다. 전체적인 경향은 주탑의 기초부에서 상부로 갈수록 최대가속도는 전체적으로 거리에 의한 감쇠의 영향이 줄어들고, 상부구조의 규모나 형식의 영향을 많이 받게 되는 것으로 분석되었다.

교축방향응답의 경우, 진앙거리가 가장 짧은 SCP대교에서 전진과 본진, 여진 기준 최대 가속도가 각각 59 gal과 79 gal, 16 gal로 측정되어 첫 번째 혹은 두 번째로 큰 값을 나타냈다. 반면에 비교적 진앙거리가 길지만 교량의 규모가 큰 GG대교와 HT대교에서도 각각 본진 기준 111 gal과 54 gal로 측정되어 상부구조의 진동은 지진동의 크기뿐만 아니라 상부구조의 진동특성을 고려해야 할 필요성을 보여주었다. 특히 GG대교의 경우 주탑 기초부 측정값 2.7 gal에 비해 주탑의 보강거더 높이에서는 4.7배 큰 12.6 gal로, 주탑 상부에서는 41배가 큰 111 gal로 측정되어 상당한 크기의 증폭량을 보인다. 이와 같은 현상의 원인과 관련해서는 뒤의 3.2에서 분석한다.

교축방향의 진동 경향을 분석해보면, 사장교에서는 주탑 기초부에서부터 상부로 갈수록 최대가속도가 점점 더 크게 증폭되지만, 현수교에서는 그러한 현상이 뚜렷하게 나타나지 않는다. 이는 교량 형식에 따라 주탑에 구속조건으로서 작용하는 케이블과 거더의 영향이 차이가 나기 때문이다. 사장교의 경우 보강거더의 증폭은 가로보와 함께 사장케이블의 장력에 의해 지지되며, 각각의 케이블에 의해 수직력 및 수평력의 조합으로 주탑에 분산되어 전달된다. 이에 반해 현수교 보

Table 5 Peak acceleration recorded by sensors located at 3 positions in pylons of 14 bridges [gal]

Bridge	Foreshock, $M_L=5.1$						Main shock, $M_L=5.8$						Aftershock, $M_L=4.5$					
	Longitudinal			Transverse			Longitudinal			Transverse			Longitudinal			Transverse		
	Foun datio n	Near deck	Top	Foun datio n	Near deck	Top	Foun datio n	Near deck	Top	Foun datio n	Near deck	Top	Foun datio n	Near deck	Top	Foun datio n	Near deck	Top
SCP	13.0	17.8	59.0	13.2	15.9	53.1	16.5	18.5	79.3	21.4	32.8	60.1	4.2	4.8	15.5	5.1	8.2	14.2
NH	15.0	15.3	13.3	17.3	8.6	7.8	24.5	25.2	17.0	27.3	13.7	13.6	5.0	11.4	6.9	4.3	2.9	3.6
DG	-	3.3	45.2	-	4.2	14.0	-	5.1	55.7	-	10.6	29.8	-	1.8	24.3	-	5.3	12.1
GBS	0.2	6.3	11.3	0.0	8.8	13.4	0.3	11.5	23.4	0.0	11.6	18.7	0.1	2.0	3.1	0.0	3.2	4.6
DS	3.6	8.1	21.0	4.8	6.9	0.1	6.1	13.6	34.2	6.7	12.2	0.2	1.1	3.2	8.1	1.3	2.1	0.0
HT	2.8	3.9	32.1	5.5	10.1	13.9	5.7	8.3	53.8	10.1	17.4	37.9	0.8	1.8	7.2	0.7	1.6	4.0
SR	-	6.8	8.3	-	3.2	6.2	-	10.8	13.0	-	5.2	10.1	-	1.3	2.1	-	1.1	2.5
GG	1.7	10.6	52.2	4.4	0.1	8.9	2.7	12.6	111.0	8.0	0.2	23.5	0.4	2.1	10.9	1.2	0.1	2.6
YG	2.2	2.2	5.9	1.7	1.7	3.4	3.8	3.8	13.6	4.6	4.6	6.1	0.6	0.6	1.7	0.6	0.6	1.0
WD	2.0	28.0	21.6	1.8	8.2	16.8	4.1	34.4	34.5	4.5	13.2	23.3	0.5	8.2	5.5	0.7	2.1	4.7
MP	3.0	3.9	6.9	5.0	2.3	4.6	6.5	6.4	10.4	6.9	6.7	8.2	1.0	0.8	1.5	1.3	1.2	1.5
JD	0.7	3.3	7.0	1.0	3.6	7.2	1.9	6.5	11.2	2.1	5.0	14.0	0.2	1.3	8.1	0.2	0.8	2.4
JD2	1.4	6.1	13.0	1.0	2.5	7.0	2.5	8.6	16.6	2.6	7.1	14.7	0.4	1.6	3.7	0.4	1.2	3.0
DE	0.6	1.0	5.7	0.8	0.9	2.0	1.1	1.5	9.3	1.4	1.4	5.7	0.4	0.4	1.7	0.3	0.3	0.7
Max.	15.0	28.0	59.0	17.3	15.9	53.1	24.5	34.4	111.0	27.3	32.8	60.1	5.0	11.4	24.3	5.1	8.2	14.2

강거더의 중량은 기본적으로 행어의 장력에 의해 지지되며, 주 케이블에 수직력만이 전달되고 다시 주탑 상부에 수직력으로 집중되어 전달된다. 주탑을 기준으로 다시 말하면, 현수교 주탑은 보강거더 높이에서의 진동에 구속조건으로 작용하는 외력이 크게 작용하지 않지만, 사장교 주탑은 가로보를 통해 전달되는 보강거더의 중량이 주탑의 진동을 구속하는 방향으로 크게 작용한다는 것을 의미한다. 반대로, 주탑의 상부에서는 현수교 주 케이블로부터 전달되는 외력이 사장교 사장 케이블들로부터 전달되는 외력의 합보다도 훨씬 더 크게 작용하기 때문에, 주탑 상부에서의 진동에 대한 구속은 현수교에서 더 크게 나타난다. 전반적으로 교량의 규모가 크고 주탑의 높이가 높을수록 주탑 기초부 대비 최대가속도로부터의 증폭이 크게 발생하는 것을 확인할 수 있다.

교축직각방향 응답의 경우에도 진앙거리가 가장 짧은 SCP대교에서 전진과 본진, 여진 기준 최대 가속도가 각각 53gal과 60 gal, 14 gal로 측정되어 가장 큰 값을 나타내었고, HT대교에서 본진 기준 38 gal이 측정되었으며, 나머지 교량들에서는 30 gal 이하로 비교적 크지 않은 결과를 나타내었다. 전반적으로 교축방향에 비하여 지진동의 증폭이 크게 나타나지 않았다. 또한, 교축방향에 비해서 교량의 규모와 더불어 주탑의 형상에도 영향을 받는 것으로 분석되었다. 주탑 상부에서 케이블을 1면 배치하는 다이아몬드형, A형 및 역Y형 주탑이 케

이블을 2면 배치하는 H형 주탑에 비해 증폭효과가 크게 나타는 경향을 보인다.

3.1.3 보강거더

Table 6에는 경주 지진의 전진, 본진 및 여진 시 보강거더 중앙에 설치된 지진가속도계에서 기록된 최대가속도 응답을 나타내었다. 수평방향(horizontal)과 연직방향(vertical)의 응답을 구분하여 나타내었고, 지진가속도계가 보강거더 양면에 각각 설치된 경우는 그 평균을 취하였다. 여기서, 수평방향은 교축직각방향을 의미한다.

수평방향응답의 경우, 진앙거리가 가장 짧은 SCP대교에서 전진과 본진, 여진 시 최대가속도가 각각 16 gal과 17 gal, 6 gal로 측정되어 첫 번째 혹은 두 번째로 큰 값을 나타냈고, 본진 시에만 DS대교에서 27 gal의 최대가속도가 측정되어 가장 큰 값을 기록했다. 나머지 교량들은 그 보다도 작은 값을 기록했다. 그러나 전체적으로 최대가속도값들 자체가 크지 않고, 교량들 간의 차이도 크게 나타나지 않았다. 이는 케이블지지교량 보강거더의 수평방향 진동은 주 경간장 길이가 길어질수록 지진의 영향보다는 풍하중의 영향을 많이 받기 때문이라 판단된다. 해당 교량들의 장기계측결과에 근거하여 분석해 보았을 때, 상시에 측정된 최대가속도값과 큰 차이를 보이지 않았으며, 오히려 강풍 시에 더 큰 값이 계측되었다.

Table 6 Peak acceleration recorded by sensors located at the center of girders of 14 bridges [gal]

Bridge	Foreshock, $M_L=5.1$		Main shock, $M_L=5.8$		Aftershock, $M_L=4.5$	
	Horizontal	Vertical	Horizontal	Vertical	Horizontal	Vertical
SCP	16.49	19.20	16.85	27.71	6.02	6.09
NH	4.39	30.42	7.20	10.64	3.33	13.22
DG	7.57	8.65	13.27	18.54	5.08	5.36
GBS	7.12	7.34	10.81	14.14	1.63	1.77
DS	10.64	19.38	27.12	20.69	3.69	33.76
HT	12.46	13.43	1.76	4.62	-	-
SR	4.50	4.41	6.49	7.46	0.88	1.23
GG	8.08	8.22	13.91	9.89	2.45	2.74
YG	2.59	2.75	5.00	6.45	0.73	0.76
WD	3.69	6.40	8.58	12.65	1.55	2.31
MP	2.44	5.11	4.31	12.55	1.46	12.47
JD	3.02	4.44	5.42	8.76	1.16	3.43
JD2	1.83	3.04	3.79	8.18	0.73	5.15
DE	2.05	0.00	3.47	0.00	0.80	0.01
Max.	16.49	30.42	27.12	27.71	6.02	33.76

수직방향응답의 경우에도 수평방향응답과 마찬가지로 전체적으로 최대가속도값들 자체가 크지 않고, 교량들 간의 차이도 크게 나타나지 않았다. 장기계측결과에 근거하여 분석해보았을 때, 상시에 측정된 최대가속도값과 큰 차이를 보이지 않았으며, 이는 케이블지지교량 보강거더의 수직방향 진동은 지진의 영향보다는 차량 활하중의 영향을 많이 받기 때문이라 판단된다.

3.2 주파수 영역 해석

지진가속도계로부터 얻은 가속도 시간이력을 푸리에 변환(Fourier transform)하여 주파수 영역 해석을 실시하였다. 대부분의 교량에서 자유장 위치의 수평방향 가속도 응답의 주파수 특성과 연직방향 가속도 응답의 주파수 특성이 다르게 나타났다. 수평방향의 경우, 대부분의 교량에서 탁월주파수가 1.5~5.5 Hz의 영역에 분포하였고, 일부 교량에서는 13 Hz 전후에 탁월주파수가 분포하였다. 각 교량 별 자유장 위치에서의 가속도응답 주파수 특성이 다르게 나타나는 것은 지진가속도계가 설치된 자유장이 기반암에 설치된 것이 아니기 때문에 해당 부지 지반 조건의 영향을 받았고, 진원으로부터 지진파가 전달되어 오는 동안 각 지역별 지반 조건의 영향을 상이하게 받았기 때문으로 판단할 수 있다. 자유장에서의 측

정된 가속도의 주파수 영역 해석 결과 탁월주파수가 명확하게 하나로 대표되는 경우는 많지 않았다. Fig. 5의 (a)와 (b)는 각각 SCP대교 자유장 위치에서의 측정된 수평방향과 연직방향 가속도 시간이력에 대한 주파수 영역 해석 결과를 나타낸 것이다. 여기서, 그래프의 범례에 표기된 EQK_SCG 다음에 붙는 E, N 및 Z는 각각 동서방향(east-west), 북남방향(north-south) 및 연직방향을 의미한다.

Table 7에는 각 교량에서 자유장, 주탑 상단과 보강거더 중앙부에서의 가속도응답에 대한 탁월주파수를 정리하여 나타내었다. 연직방향의 경우 1.0 Hz를 하회하는 보강거더의 1차 모드의 영향으로 지진에 대한 응답의 탁월주파수는 저주파에 해당하는 0.25~2.66 Hz영역에 존재하는 것을 확인할 수 있다. 이는 보강거더의 1차 모드가 지진 응답의 탁월주파수를 지배하였거나, 보강거더의 저차모드와 지진의 저차모드가 공진(resonance)이 일어났을 가능성을 예상할 수 있다. 수평방향의 경우, GG대교와 DG대교의 자유장 지진응답의 탁월주파수와 주탑 상단 지진응답의 탁월주파수가 거의 일치하는 것을 발견할 수 있다. 이를 통해 주탑 상단에서 공진에 의한 증폭의 발생을 예상할 수 있다. 앞의 3.1.2에서 언급한 바와 같이 Table 5를 보면 진앙으로부터 비교적 떨어져 있는 GG대교

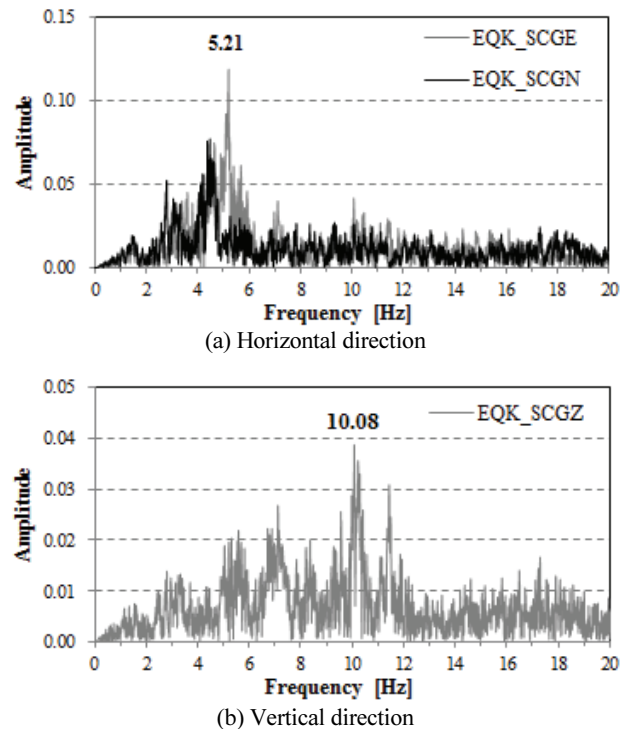


Fig. 5 Fourier transforms of acceleration time histories at the free-field of SCP bridge (Main shock, $M_L=5.8$) (진앙거리 232 km)에서 주탑 기초부 측정값 2.7 gal에 비해 주탑의 보강거더 높이에서는 4.7배 큰 12.6 gal로, 주탑 상부에서

는 41배가 큰 111 gal로 측정되어 상당한 크기의 증폭량을 보는 것을 발견할 수 있으며, 주탑 높이가 상대적으로 낮은 DG 대교에서도 주탑 높이가 상대적으로 낮음에도 불구하고 가속도 응답이 비교적 크게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 이를 통해 공진에 의한 증폭이 발생하였다는 예상에 설득력을 부여한다. Figs. 6~9에는 GG대교와 DG대교의 가속도 시간이력과 주파수 영역 해석 결과를 나타내었다. GG대교의 경우 Fig. 7을 통해 주탑 상단 교축방향 가속도응답(EQK_GGAX)의 탁월주파수와 자유장 가속도응답의 탁월주파수가 거의 일치하는 것을 확인할 수 있으며, Fig. 6을 통해 주탑 상단의 가속도응답의 증폭을 확인할 수 있다. DG대교의 경우에도 Fig. 9를 통해 자유장의 탁월주파수와 주탑의 교축방향센서(EQK_DGEX)센서의 탁월주파수가 거의 일치하는 것을 확인할 수 있으며, Fig. 8에서 가속도의 시간이력에서도 주탑 상단의 가속도 파형은 미미하긴 하지만 공진이 발생하였을 때 일반적으로 나타나는 파형과 유사한 형상을 볼 수 있다.

3.3 지진가속도 응답에 대한 고찰

각 지진가속도계의 최대가속도 응답을 분석한 결과, 자유장에서 주탑 기초부, 보강거더 연결부 및 주탑 상부로 갈수록 지진동으로 인한 최대가속도의 증폭이 발생하는 것을 발견할 수 있었다. 이 절에서는 주탑 상부에서의 최대가속도를 자유장 위치에서의 최대가속도로 표준화(normalization)하여 주탑

상부에서 발생한 가속도 증폭에 대하여 분석하였다.

Table 8에는 주탑 상부에서의 교축 및 교축직각방향 최대가속도를 자유장 위치에서의 최대가속도로 표준화하여 주탑의 형식, 재료, 높이와 함께 나타내었다. 표준화된 가속도를

Table 7 Predominant frequencies in acceleration time histories of bridges (Main shock, $M_L=5.8$)

Bridge Name	Horizontal direction [Hz]			Vertical direction [Hz]		
	free field	top of the pylon		free field	center of girder	
		longitudinal direction	transverse direction		1st mode	predominant frequency
SCP	5.21	3.62	2.61	10.08	0.45	1.31
NH	13.30	3.14	0.77	2.44	0.25	0.25
DG	4.46	4.48	0.92	9.90	0.97	1.24
GBS	5.38	3.32	0.70	8.86	0.42	0.42
DS	4.12	5.73	-	1.84	0.55	2.40
SR	5.39	2.71	0.86	2.01	0.42	2.66
GG	1.48	1.49	1.37	2.97	0.31	1.50
YG	2.92	2.95	0.68	2.11	0.33	0.88
WD	8.05	5.21	7.85	10.01	0.50	2.48
JD	3.12	5.11	3.60	1.58	0.50	1.03
JD2	3.12	5.24	1.47	1.58	0.43	0.43
DE	1.67	1.67	1.59	1.56	-	-

Table 8 Normalized accelerations at the tops of pylons and their slopes due to heights of pylons (Main shock, $M_L=5.8$)

	Properties of pylon			Normalized acceleration (Top of the pylon / free field)		Slope of normalized acceleration [m-1]	
	Type	Material	Height [m] (a)	longitudinal (b)	transverse (c)	longitudinal (b) / (a)	transverse (c) / (a)
SCP(CS)	H	concrete	89	2.79	2.12	0.03	0.02
NH(SB)	H	steel	60	1.35	1.08	0.02	0.02
DG(CS)	Y	concrete	35	3.52	1.88	0.06	0.03
GBS(CS)	H	concrete	90	1.85	1.48	0.02	0.02
DS(CS)	A	steel	62	6.74		0.08	
HT(CS)	iY	steel	130	-	-	-	-
SR(SB)	D	concrete	87	2.59	2.02	0.03	0.03
GG(CS)	D	steel, concrete	168	33.43	7.08	0.2	0.04
YG(CS)	iY	concrete	112	7.06	3.17	0.07	0.03
WD(CS)	A	steel	75	8.17	5.51	0.1	0.06
MP(CS)	D	concrete	168	-	-	-	-
JD(CS)	A	steel	69	5.95	7.47	0.07	0.08
JD2(CS)	A	steel	69	8.85	7.82	0.1	0.09
DE(CS)	iY	concrete	100	6.47	3.97	0.06	0.04

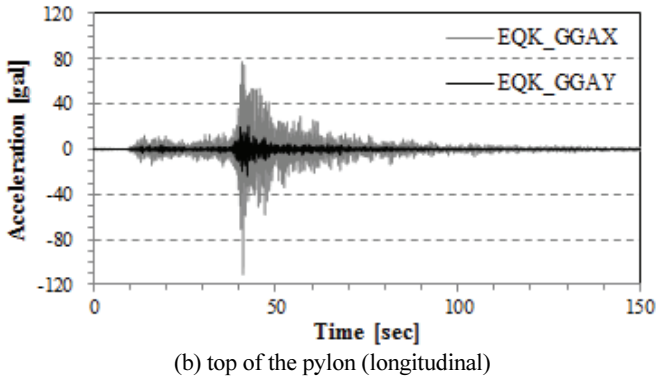
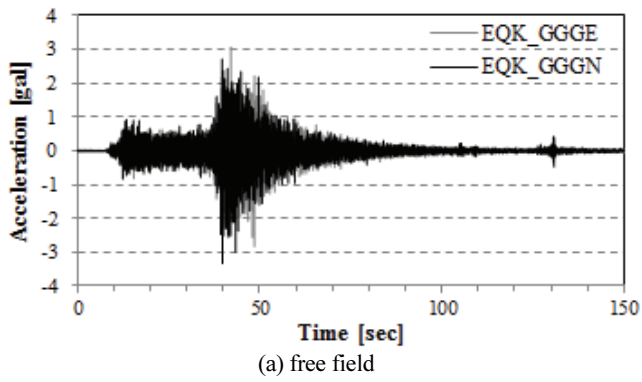


Fig. 6 Acceleration time histories of GG Bridge (Main shock, $M_L=5.8$)

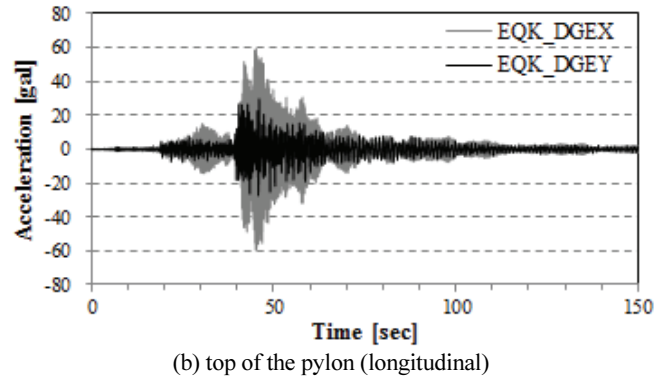
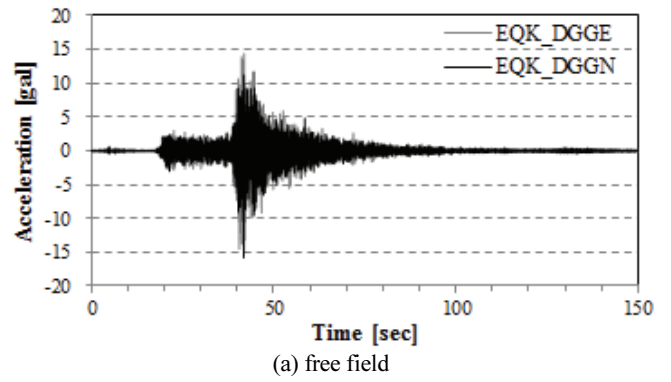


Fig. 8 Acceleration time histories of DG Bridge (Main shock, $M_L=5.8$)

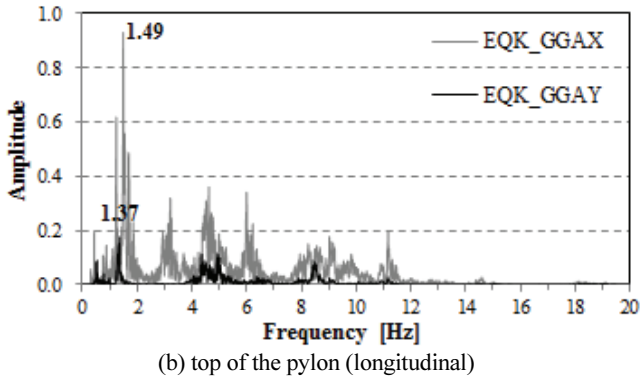
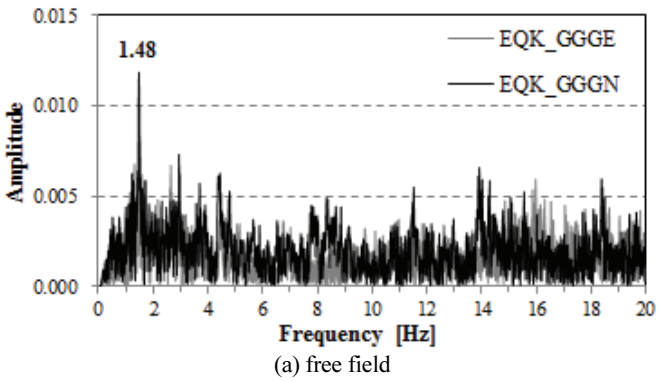


Fig. 7 Fourier transforms of accelerations time histories of GG Bridge (Main shock, $M_L=5.8$)

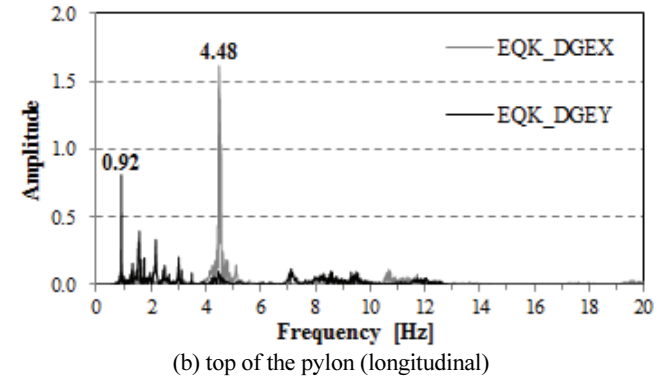
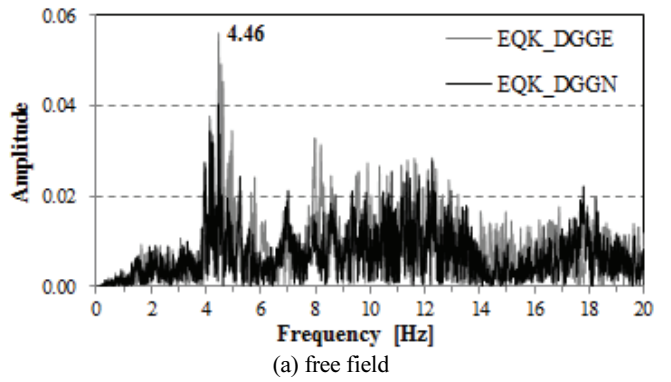


Fig. 9 Fourier transforms of accelerations time histories of DG Bridge (Main shock, $M_L=5.8$)

이용하면 주탑 상부의 수평성분 최대가속도가 자유장의 수평 성분 최대가속도에 비해 얼마나 증폭되었는지에 대한 교량별 비교가 가능하다. 또한, 일반적으로 주탑의 높이가 높으면 그 증폭이 크게 일어나기 때문에 증폭의 정도에 미치는 주탑 높이의 영향을 제거하기 위하여 표준화된 최대가속도의 경사 (gradient)를 구하여 Table 8의 오른쪽에 (b)/(a)와 (c)/(a)로 나타내었다. 표준화된 최대가속도의 경사를 분석해본 결과, 주탑의 높이가 낮은 DG대교의 교축방향은 주탑 상부의 가속도에 대한 자유장의 가속도비로 비교한 것보다 상대적으로 증폭이 크게 일어났음을 알 수 있다. 가속도 경사의 증폭이 크게 나타난 DG대교, DS대교, GG대교, YG대교, WD대교, JD대교, JD2대교, DE대교 8개 교량에 대해 분석하면 다음과 같다.

우선 사장교와 현수교의 구분에 대한 평가이다. 8개의 교량은 모두 사장교로서 주탑 상부의 증폭은 사장교가 더 큰 경향이 있는 것으로 분석된다. 이는 3.1에서 전술한바와 같이 사장교는 현수교에 비해 케이블의 영향을 덜 받아서 캔틸레버의 형태로 진동이 일어나지만, 현수교는 주 케이블이 주탑 새들에서 축방향으로 진동을 억제하는 효과가 있기 때문에 주탑 상부보다는 중앙부의 진동이 더 강하게 발생할 수 있다. 단, 이 논문에서는 분석 대상 현수교가 2개소이고, 그 중 하나는 자정식 현수교이기 때문에 보다 확실한 분석을 위해서는 현수교에 대한 추가적인 분석이 필요하다. 주탑의 재료에 따른 분석 결과 강 주탑 6개 교량 중 현수교인 1개 교량을 제외하고는 모두 가속도 증폭이 큰 것으로 분석되었다. 콘크리트 주탑이면서 증폭이 발생한 교량은 DG, GG, YG, DE 등 4개 교량으로서 앞선 Table 7에서 수평방향 자유장의 탁월주파수와 주탑 상부의 탁월주파수가 유사했던 교량과 일치한다. 즉 콘크리트 주탑은 강 주탑에 비하여 증폭이 크지 않으나 주탑의 고유주파수와 유사한 주파수성분을 갖는 지진동에 대해서는 증폭이 크게 발생하는 것을 알 수 있다. 주탑 형식의 경우 H형 주탑을 가진 3개 교량이 다른 교량에 비해서 증폭이 크게 발생하지 않는 경향을 발견할 수 있다.

4. 결 론

이 연구에서는 2016년 발생한 경주 지진의 전진, 본진, 및 여진에 대하여 현수교 및 사장교 14개 교량에 대한 지진응답 특성을 분석하였다. 자유장 위치에서 측정된 수평방향 최대 가속도 응답은 진앙거리가 짧을수록 강하게 나타나 거리에 의한 감쇠의 영향이 지배적이었다. 반면, 주탑에서는 기초부에서 보강거더 연결부를 거쳐 상부로 갈수록 거리에 의한 감쇠의 영향이 점점 줄어들고, 상부구조의 규모나 형식의 영향을 많이 받게 되는 것으로 분석되었다. 또한, 자유장 위치에

서 주탑 기초부를 거쳐 상부로 갈수록 최대가속도 크기의 증폭이 일어나는 것을 확인할 수 있었는데, 이러한 경향은 현수교보다 사장교에서, 콘크리트주탑보다 강주탑에서 더 크게 나타났고, 지진동의 탁월주파수와 주탑의 고유주파수가 유사할 경우 공진에 의해 증폭이 크게 일어나는 경우도 발생하였다. 이러한 결과는 지진 재난에 대응하기 위한 케이블지지교량의 관리기준에 현행 자유장 측정 최대가속도의 관리 기준치 뿐만 아니라 주탑의 각 위치에서 측정된 최대가속도에 대한 기준치가 추가적으로 개발되어야 할 필요성에 근거를 제시해주었다. 보강거더 중앙에 설치된 지진가속도계에서 경주지진의 전진과 본진, 여진 시 측정된 최대가속도 응답을 상시 측정결과와 분석해본 결과 수평방향 및 수직방향 응답 모두 상시에 비해 지진의 영향으로 인하여 두드러진 계측값을 보이지는 않았다. 이는 전술한바와 같이 보강거더의 수평방향 및 수직방향 진동은 각각 풍하중과 차량 활하중의 영향을 많이 받기 때문으로 판단된다. 주탑 계측결과와는 반대로 보강거더 계측결과는 지진가속도계의 보강거더에 설치할 필요성에 대한 검토가 이루어져야 한다는 문제 제기의 의미를 발견할 수 있었으며, 이를 위해 추가적으로 상세한 분석과 연구가 필요하다 판단된다.

감사의 글

본 연구는 행정안전부 극한 재난대응 기반기술개발사업의 연구비 지원(2017-MOIS31-002)에 의해 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

References

1. Iksan regional office for construction and management (IROCM) (2016), Disaster response manual for offshore bridges, Ministry of land, infrastructure and transport (MOLIT), written in Korean.
2. Korea infrastructure safety and technology corporation (KISTEC) (2017), 2016 Final report of integrated maintenance of cable-supported bridges, Ministry of land, infrastructure and transport (MOLIT), written in Korean.
3. Korea meteorological administration (KMA) (2017), List of domestic earthquakes, http://www.weather.go.kr/weather/earthquake_volcano/domesticlist.jsp, written in Korean.
4. Ministry of the interior and safety (MOIS) (2017), Installation and operation manual for the seismic accelerometer, Ministry of the interior and safety (MIS), written in Korean.
5. Ministry of land, infrastructure and transport (MOLIT) (2016), Korean highway bridge design code (limit state design), written in Korean.

6. Park, K. S. (2017), Main achievement of earthquake disaster countermeasure. *Proceedings of the international seminar for earthquake disaster countermeasure: One year after 9.12 earthquake*, 7-8th Sep. 2017, Gyeongju, Korea, pp.22-41, written in Korean.

Received : 11/13/2017

Revised : 12/06/2017

Accepted : 07/16/2018

요 지 : 이 연구는 2016년 발생한 경주 지진의 규모 4.5이상의 3개 지진, 즉, 전진(규모 5.1), 본진(규모 5.8), 여진(규모 4.5)에 대한 국내 공용 중 케이블교량의 지진응답 특성을 제시한다. 교량 주위의 자유장과 교량 내 지정된 위치에 설치된 지진가속도계측기에서 측정된 지진가속도 응답기록을 이용하여 케이블교량의 각 구조부재별 지진응답을 분석한다. 측정 가속도 시간이력의 푸리에 변환을 이용한 주파수 영역 해석을 통하여 교량의 동적 거동 특성을 분석한다. 주탑 상부에서의 최대가속도를 자유장 위치에서의 최대가속도로 표준화하여 주탑 상부에서의 가속도 증폭에 대하여 분석한다. 분석 결과를 통해 지진 재난에 대응하기 위한 케이블지교량의 지진가속도계측기 위치별 관리 기준치 개발의 필요성에 대해 논의한다.

핵심용어 : 경주지진, 케이블교량, 지진 응답 특성, 지진가속도계측기
