

지진하중 하에서 교량 곡률과 사각 크기에 따른 받침부의 반력 검토

박성렬¹, 김연태², 김상철^{3*}

Seismic Evaluation of Supporting Reactions for the Bridge with Various Curvatures and Skew Angles

Seong-Ryel Park¹, Yun-Tae Kim², Sang-Chel Kim^{3*}

Abstract: This study has addressed to evaluate the effects of radius of curvature and skew angle on the negative reaction in a plate girder bridge with LRB (Lead Rubber Bearing) supports. As analytical parameters, various radius of curvatures and skew angles were selected and two seismic loads of El-Centro and artificial earthquakes were applied to the bridge in the longitudinal and transverse directions. As results of 3D analysis, the possibility of negative reaction is shown at the part of acute angle and inner side of the curved bridge, and becomes increased when seismic load is applied in the transverse direction. In addition, the occurrence of negative reaction is found to be increased as both radius of curvature and skew angle decrease, which means that curved bridge has higher possibility of negative reaction than straight one. Conclusively, all of earthquake wave, gradient, radius of curvature and skew angle should be considered together to investigate the possibility of negative reaction at the bridge support subject to seismic load.

Keywords: Negative reaction force, Seismic load, Curved bridge, Radius of curvature, Gradient, Skew angle

1. 서 론

우리나라는 평지보다 산과 하천들이 많은 지리적 요건 때문에 도로망 내에 교량 설치가 불가피한 경우가 많으며, 최근 교통량이 증가하고 도심이 복잡해짐에 따라 교통의 원활한 흐름을 위하여 고속도로 인터체인지 및 도시의 입체 교차로와 같은 곡선주형을 사용한 교량이 많이 건설되고 있다. 단순 직교에 비하여 곡선교는 도심지에서 상대적으로 하부구조를 적게 할 수 있기 때문에 공간 활용에 유리하지만, 수평면 내의 곡률로 인해 교량상부구조의 자중만으로도 휨뿐만 아니라 비틀림이 발생하게 되고 이로 인하여 교량의 받침에 부반력이 발생할 가능성이 있으며(Park, 2007), 지진이 발생할 경우에는 예상보다 큰 부반력이 발생될 수 있다. 부반력은 교량 받침의 들림 현상을 초래하게 되고, 이러한 들림에 의한 국부적인 받침 손상은 교량 전체의 붕괴를 초래할 수 있기 때문에 교량 설계 및 시공시에 꼭 고려되어야 한다(Kar et al., 2012; Kim, 2010).

따라서 새로 개정된 도로교 설계기준의 내진설계기준에서는 받침을 면진받침으로 사용하는 지진격리교량의 경우 지진이 발생하지 않는 평상시 상태뿐만 아니라, 지진이 발생했을 때도 받침부에 부반력이 발생하는 경우에 지진격리 설계를 적용하지 않도록 명시하고 있다(Kim, 2003; MLIT, 2010) 그렇기에 면진받침을 사용하는 교량의 경우 내진해석을 통하여 받침부의 부반력 발생여부를 검토할 필요가 있다.

본 연구에서는 실제와 유사한 교량 단면을 가정하여 편구배에 따른 곡선반경과 사각을 해석변수로 정하고 내진해석을 실시함으로써 받침부에서 발생하는 반력을 통해 부반력 발생 여부를 확인하였으며, 곡선반경과 사각이 받침부의 부반력 발생에 미치는 영향을 제한함으로써 차후 교량설계 및 유지관리에 유용하게 활용하고자 하였다.

2. 구조 및 거동 특성

2.1 곡선교

곡선교는 원활한 차량의 주행을 위해 편경사이외에도 곡률을 가진 선형적 특징으로 인해 휨뿐만 아니라 상당한 크기의 비틀림 모멘트가 발생하게 된다(Kang et al., 2006; Park, 2007). 이런 비틀림 모멘트에 의해서 거더에는 수직방향의 변위가

¹정회원, 한국코레일 토목 주임

²정회원, 서울과학기술대학교 건설시스템공학과 교수

³정회원, 한서대학교 토목공학과 교수, 교신저자

*Corresponding author: schkim@hanseo.ac.kr

Department of Civil Engineering, Hanseo University

•본 논문에 대한 토의를 2017년 2월 1일까지 학회로 보내주시면 2017년 3월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

발생하고 비틀림 변형을 일으킨다. 또 지점 상에서는 비틀림 모멘트로 인해 내측과 외측의 반력 분포가 서로 크게 달라진다. 내측 받침부는 상대적으로 작은 반력이나 부반력이 발생할 수 있고, 반면에 외측 지점부는 내측 지점부가 부담하지 못한 반력까지 추가적으로 부담하게 되어 과도한 반력으로 인한 받침부 파괴 등 전체적으로 교량의 안정상의 문제점을 유발할 수 있게 된다(KISTC, 2004).

2.2 사고

교량의 평면 형상은 상부나 하부구조물의 구조 특성상 직선교를 채택하는 것이 바람직하지만(Chopra, 2007), 공간상의 제약이나 지형적 문제, 선형상 피할 수 없는 경우 사교를 적용하는 것이 보다 합리적일 수 있다. 하지만 상판의 기하학적 형상과 그로 인한 사각방향으로의 받침 배치로 인해 휨 이외에도 비틀림의 복합작용이 교량단면에 발생하고, 하중재하조건에 따라서는 들림 현상도 유발될 수 있다(MLIT, 2015). 사교에서의 사각은 교량의 교축방향과 교축직각방향에 의해 형성되는 각으로 Fig. 1과 같이 정의하도록 한다.

3. 해석 모델과 변수 설정

3.1 해석 조건

곡선교 및 사교는 기하학적 평면형상과 지점의 지지조건에 의해 비틀림 모멘트가 발생하게 되며, 받침에는 비틀림 모멘트에 의해 곡선내측과 외측지점, 그리고 둔각부와 예각부의 반력크기가 달라지고 경우에 따라서는 부반력이 발생하게 된다(Kim, 2003; KISCT, 2004).

본 연구에서는 플레이트 거더교를 대상교량으로 하였으며 Fig. 2와 같이 2경간 연속교로써 교량연장 40.0 m, 교량폭원 12.14 m를 적용하였다. 상부구조는 5개의 플레이트거더 I형강으로 이루어져 있으며, 교축방향 5.0 m마다 가로보를 삽입

한 것으로 하였다. 하부구조는 Fig. 3과 같이 지름이 2.0 m인 원형 교각 형식이며, 교량의 내진해석시 교각과 지점부의 반력 성능 평가를 위해 교량의 교각부와 교대부의 지반과의 상호 작용은 고려하지 않았다. 사용된 플레이트 거더와 가로보의 I형강 단면도는 Fig. 4와 같다.

교량받침은 Fig. 5와 같이 지진격리장치로써 LRB(Lead Rubber Bearing) 받침을 사용하는 것으로 하였으며, 그 제원은 Table 1과 같다.

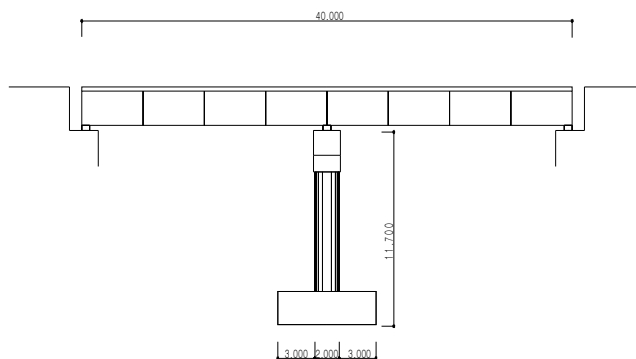


Fig. 2 Longitudinal section of bridge

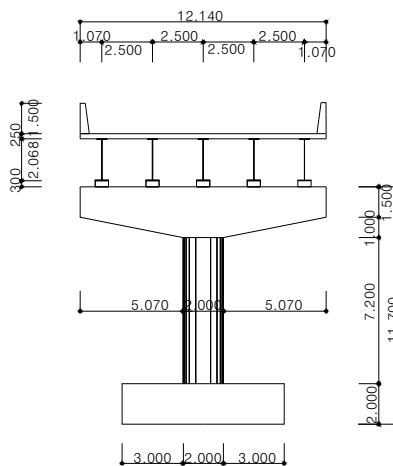


Fig. 3 Cross section

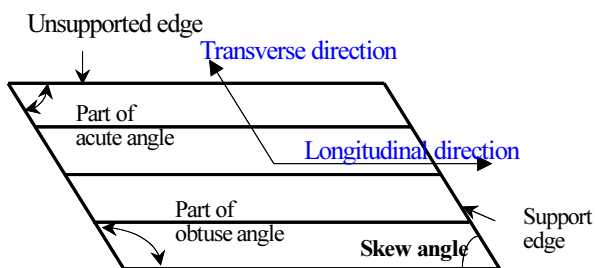


Fig. 1 Plan of skew bridge deck

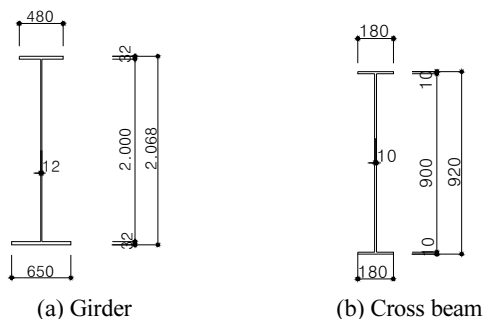


Fig. 4 I-typed steel

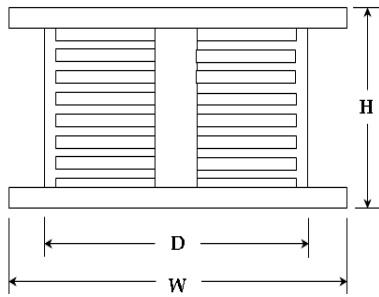


Fig. 5 Section of LRB

Table 1 Criterion for LRB

D (mm)	W (mm)	H (mm)	Yielding strain (mm)	1st intensity (N/mm)	2nd intensity (N/mm)
470	610	466	15.6	2047.347	536.607

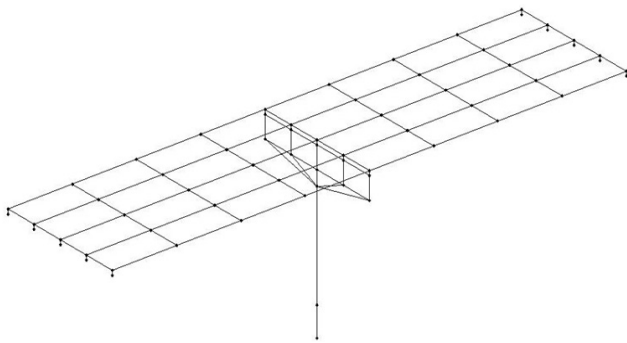


Fig. 6 3D modeling

3.2 모델링

내진해석 프로그램 OpenSees를 통하여 대상교량을 Fig. 6과 같이 3D 모델링을 실시하였으며, 플레이트 거더와 바닥판은 합성단면으로, 그리고 교각은 콘크리트 단면으로 가정하였다. 본 연구의 목적이 지진이 발생했을 시 받침의 부반력 발생여부를 검토하는 것으로 활화중은 고려하지 않았으며, 고정하중의 경우 상판의 질량은 상판 전체 45개의 절점에, 교각의 질량은 최하단 절점을 제외한 모든 절점에 분포시킨 Lumped mass로 가정하였다. 이 가정을 통해 모델링된 대상 교량은 다음에 정의한 해석변수에 따라 Fig. 6과 같은 직선교량으로부터 교량의 형상을 변형시키면서 프로그램을 통해 해석하였다.

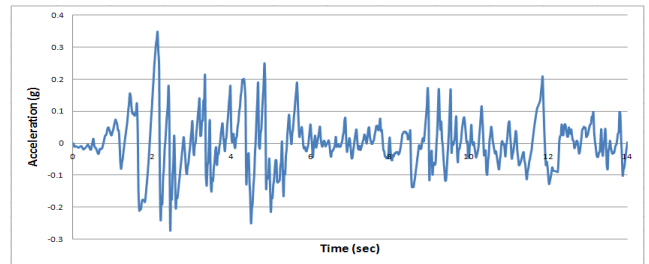
3.3 해석변수의 조건과 설정

3.3.1 곡선반경과 사각

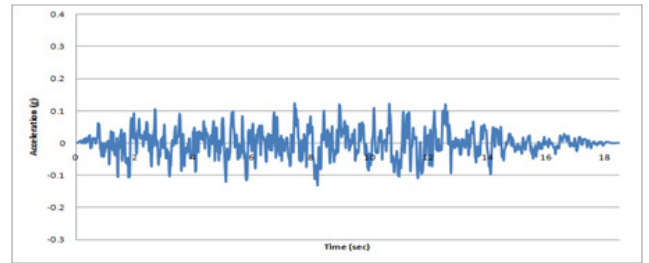
곡선반경은 도로의 구조·시설 기준에 관한 규칙(MLIT, 2015)에 의거하여 Table 2와 같이 편구배별로 5가지의 곡선반경을 사용하였다. 여기서, 도로의 구조·시설 기준에서는 편구배 6%, 7%, 8%에 관한 곡선반경이 명시되어 있는데, 본 연구에서는

Table 2 Radius of curve corresponding to design velocity

Design velocity (km/hr)	Minimum radius of curve (m)		
	Applied gradient		
	6%	8%	10%
80	280	250	220
70	200	180	160
60	140	130	120
50	90	80	70
40	60	50	40



(a) El-Centro (1940-S00E) earthquake



(b) Artificial earthquake

Fig. 7 Earthquake records used

편구배 10%를 선형보간법에 의해 변수로 선정하여 해석 변수에 적용하였다.

사각은 곡선반경별로 90°, 75°, 60°, 45°, 30°의 5가지 변수 분류하여 적용하였다. 따라서 사용하게 되는 총 매개변수의 개수는 75개의 해석변수가 적용되었다.

3.3.2 지진파

내진해석을 위해 입력되는 지진기록으로는 El-Centro, Olumpia, Taft, Hachinohe Habor, Pacomima Dam의 지진기록 등이 자주 쓰이며(KISTC, 2004), 본 해석에서는 이러한 지진기록들 중 Fig. 7(a)의 El-Centro(1940-S00E) 지진 기록을 사용하기로 하였다. 이 기록이외에도 우리나라 실정에 맞게 작성한 인공 지진파를 내진해석에 적용하도록 하였다. 인공지진파는 지진 구역 I구역에 따른 지진 구역계수 0.11, 지진 재현주기 500년에 따른 위험도계수 1.0, 지반 종류는 연암지반이 주를 이루는 한반도의 특성을 고려하여 S_c 로 산정하고, 그에 따른 지진 계수 C_a 는 0.13, C_v 는 0.18을 적용하였다(Kim, 2010). 시간이력

지속시간은 우리나라에 발생 가능한 최대 지진 규모가 6.0~7.0인 것을 고려하여 중간 규모인 6.5를 적용하여 상승시간 1.5초, 강진 지속시간 10초, 감쇠시간 7초, 총 18.5초의 주기를 갖게 되는 인공지진파를 프로그램 Eqmaker를 통해 작성하였고, 작성된 인공지진파는 다음 Fig. 7(b)와 같다.

4. 해석결과 및 고찰

4.1 자중에 의한 반력

내진해석을 실시하기 전 부반력 발생 가능성이 높은 위치를 찾기 위해서 자중에 의한 반력을 구하도록 하였다. 해석조건으로는 사각만을 변수로 하였을 때 예각부와 둔각부 받침에서의 반력을 검토하였고, 곡선반경만을 변수로 하였을 때는 곡선 내측과 곡선 외측 받침에서의 반력을 산정하였다. 그 해석결과를 나타내면 Fig. 8, 9와 같다.

해석 결과에 따르면, 둔각부에 비해 예각부의 반력이 더 낮고, 곡선 외측에 비해 내측의 반력이 더 낮은 것을 확인할 수 있다. 따라서 내진해석시 교량의 곡선 내측의 예각부 받침에서 부반력 발생확률이 높다고 판단되며, 차후의 해석결과는 곡선 내측 예각부 반력만을 통해 평가하도록 하였다.

4.2 지진에 의한 반력

지진발생시의 편구배별 곡선반경과 사각에 의한 받침부의

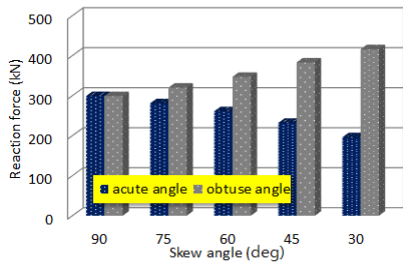


Fig. 8 Reaction forces associated with different skew angles(only self-weight)

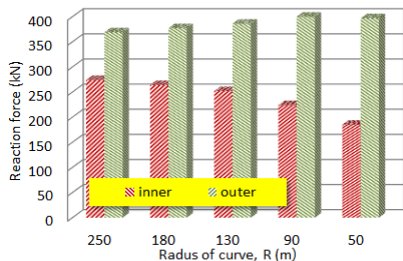


Fig. 9 Reaction forces associated with different radii of curved bridge(only self-weight)

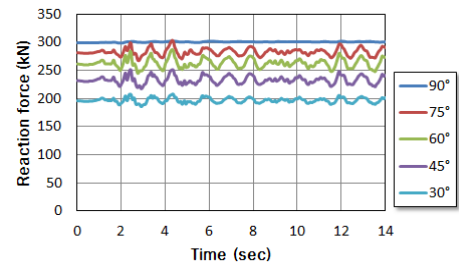
부반력 발생여부를 확인하기 위하여 El-Centro (1940-S00E)지진파와 우리나라 실정에 맞는 인공지진파 등 두 종류의 지진파를 사용하였으며, 지진의 작용방향은 교축방향과 교축직각 방향을 적용하였다.

4.2.1 교량 조건의 영향

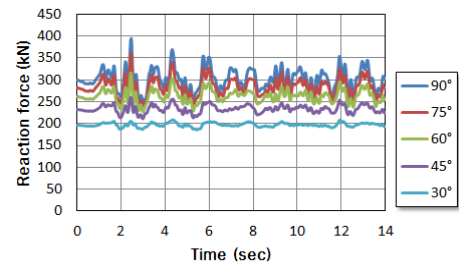
Fig. 10과 11은 El-Centro 지진파가 교축방향과 교축직각방향으로 발생하였을 때 곡선 내측 예각부 받침에서의 반력변화를 시간별로 나타낸 것으로, Fig. 10은 직선교의 경우를, Fig. 11은 대표적으로 편구배 8%, 곡선반경 R=180 m인 곡선교의 시간이력 반력을 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 지진의 작용방향이 교축방향일 때보다 교축직각방향일 때 반력의 변화 폭이 크다는 것을 알 수 있다.

Fig. 12와 13은 Fig. 10과 11에서 나타난 곡선 내측 예각부 받침에서 발생하는 시간에 따른 반력에 대해 각 사각별로 최소의 값을 응력으로 변환하여 나타낸 것으로, 직선교와 곡선교 모두에 있어 교축방향보다는 교축직각방향으로 지진이 작용하였을 때 받침부에 작은 응력이 작용하여 차후 부반력 발생 가능성이 높은 것으로 확인되었다. 또한 직선교량일 때는 사각이 변화하여도 반력의 변화가 크게 변하지 않았지만, 곡선교량의 경우에는 사각의 의존도가 높아 사각이 작을수록 응력이 감소되어 부반력 발생의 가능성이 높아짐을 알 수 있다.

이와 같은 경향은 각 편구배별 곡선 내측 예각부 받침에서의 최소반력을 응력으로 나타낸 Fig. 14에서 확실하게 보여진다. 그림에서 보는 바와 같이 곡률이 작을수록 반력의 변화가 커지며, 사각이 작아질수록 부반력의 가능성이 높아지는 것

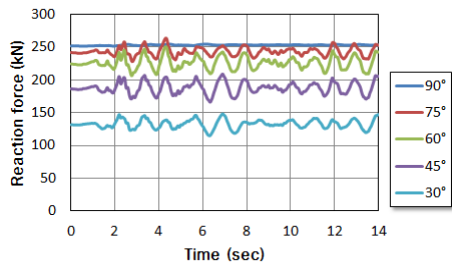


(a) Longitudinal

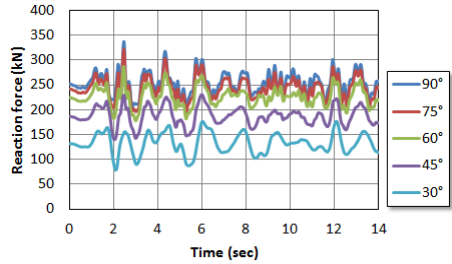


(b) Transverse

Fig. 10 Time history of reaction forces(straight bridge, El-Centro)



(a) Longitudinal



(b) Transverse

Fig. 11 Time history of reaction forces(curved bridge with gradient 8%, R=130 m, El-Centro)

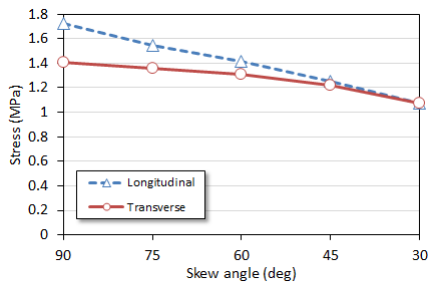


Fig. 12 Min. stress at bearing plate with different skew angles(straight bridge)

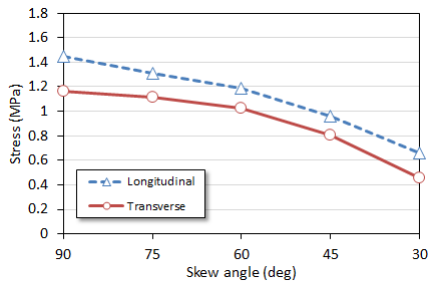
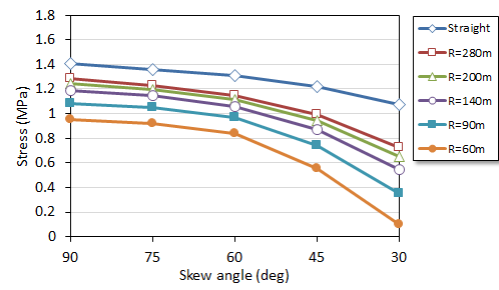
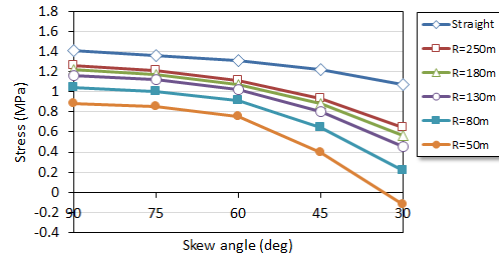


Fig. 13 Min. stress at bearing plate with different skew angles(curved bridge with $\xi=8\%$, R=130 m)

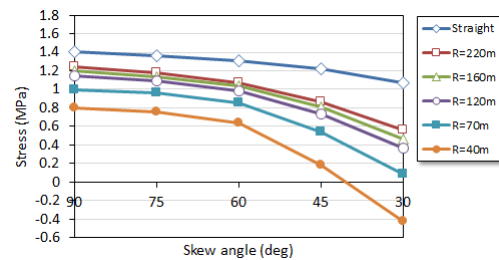
을 확인할 수 있다. 실질적으로 Fig. 14 (b)와 (c)에서 El-Centro 지진방향이 교축직각방향으로 작용할 때, 편구배 8%에서 곡선반경 50 m, 사각 30°에서 또한, 편구배 10%에서 곡선반경 40 m, 사각 30°의 조건에서 자중만으로도 부반력이 발생하는 것으로 해석되었다.



(a) gradient $\xi=6\%$



(b) gradient $\xi=8\%$



(c) gradient $\xi=10\%$

Fig. 14 Minimum stresses at support with respect to each gradient

4.2.2 지진파 종류의 영향

Fig. 15는 El-Centro 지진파와 인공지진파가 작용하였을 때 각 조건별 곡선 내측 예각부 받침에서 발생하는 최소응력을 함께 도시한 것이다. 전체적으로 볼 때 교량의 사각이나 곡선 반경의 영향에 비해 지진파의 영향은 그다지 크지 않다는 것을 알 수 있으며, 단지 곡선교의 경우 사각과 편구배의 크기에 따라 지진파의 의존도가 약간 다르게 나타나고 있다. 그림에서 나타난 바와 같이 El-Centro 지진파보다는 진도가 작은 인공지진파에서 대체로 높은 응력을 보이고 있어 부반력의 가능성이 낮게 나타났다.

그 예로서 Fig. 15(c)에서 El-Centro 지진파가 편구배 $\xi=8\%$ 에서 곡선반경 50 m, 사각 30°에서 (-)응력을 나타나고 있는 반면에 인공지진파의 경우는 (+)응력을 보이고 있어 받침부에 부반력이 작용하지 않는다는 것을 보이고 있다.

이상의 결과를 정리하면, 대상 플레이트 거더교의 편구배 별 곡선반경, 사각과 같은 해석변수들의 상호간 기하학적 관계를 통해 지진이 발생했을 때 부반력이 발생할 가능성이 있음을 확인할 수 있었다. 따라서 내진설계규정이 도입되기 이

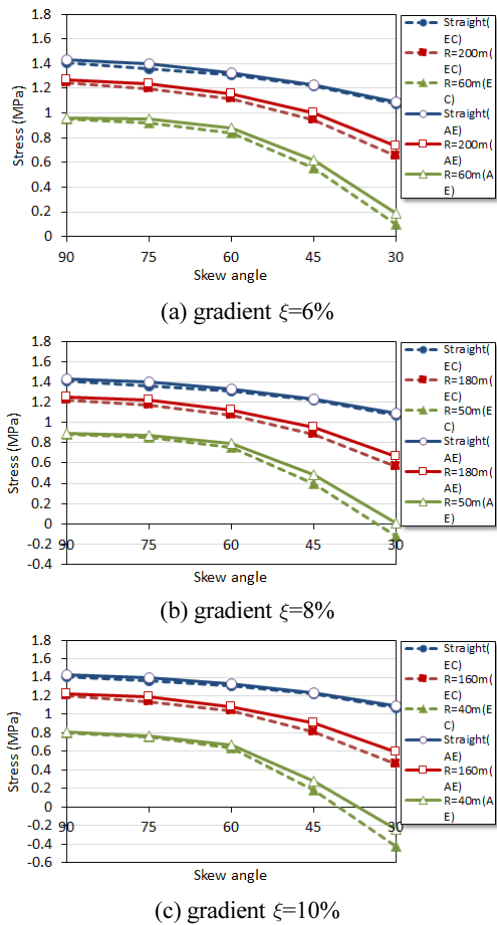


Fig. 15 Comparison of minimum stresses at support due to El-Centro and artificial earthquakes (where, EC=El-Centro, AE=Artificial Earthquake)

전에 건설된 곡선교 및 사교의 경우 부반력 검토를 통해 부반력 발생시 일어나는 들림현상에 대한 대책을 세워야 하며, 새로 건설되는 지진격리장치를 사용하는 교량의 경우는 내진해석을 통하여 지진발생시에도 받침부에 부반력이 발생하지 않도록 도로교 설계기준에 맞는 설계를 적용해야 할 것으로 판단된다. 본 연구의 해석 결과는 지진 발생시 부반력이 면진받침부에 발생되지 않도록 실무의 곡선교 및 사교의 교량 설계 지침에 활용될 것으로 기대되며, 앞으로 부반력에 대한 연구는 플레이트 거더교 뿐만 아니라 다방면에 걸쳐 여러 교량형식에서 이루어져야 할 것으로 판단된다.

5. 결론

플레이트 거더 교량을 대상으로 편구배별 곡선반경과 사각을 해석변수로 선정하고 El-Centro (1940-S400E) 지진파와 우

리나라 실정에 맞게 작성된 인공지진파를 적용하여 각 변수별 교량 받침부의 부반력 발생에 미치는 영향을 검토한 결과, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 먼저 지중에 의한 반력 검토에서 곡선내측 예각부 받침부가 다른 지점보다 작은 반력이 산출되어 지진 발생시 부반력이 발생할 가능성이 높은 것으로 해석되었으며, 설계시 이 부분에서의 부반력 발생 가능성 검토가 필요한 것으로 판단된다.
- 2) 교량의 내진해석결과에서 교축직각방향으로 지진이 발생할 경우 부반력이 발생할 가능성이 교축방향으로 지진이 발생할 경우보다 높은 것으로 나타났다. 따라서 내진해석시에 교축직각방향에 대한 내진해석 검토가 선행되는 것이 바람직하다.
- 3) 지진과 작용시 직선교량의 경우는 부반력이 발생할 가능성이 낮은 반면, 편구배가 있는 곡선교량의 경우는 사각의 크기에 따라 자중만으로도 부반력 발생 가능성이 있는 것으로 나타났다. 해석결과, 곡선교량의 곡률이 작을수록 반력의 변화가 커지며 사각이 작을수록 부반력의 가능성이 높아지는 것으로 평가되었다.
- 4) El-Centro 지진파와 인공지진파를 대상 교량에 적용하여 반력을 산출한 결과, 곡률과 사각에 비해 지진파의 영향은 그리 크지 않은 것으로 나타났지만, 직선교에 비해 곡선교에서 지진파의 영향을 더 받는 것으로 해석되었다. 따라서 내진해석시 교량의 부반력 발생여부는 교량 형식, 지진파의 종류 및 교량의 편구배, 곡선반경, 사각 등을 종합적으로 고려해서 검토하여야 할 것으로 판단된다.

References

- Chopra, A. K. (2007), Dynamics of Structures, Pearson Prentice Hall.
- Kang, H. T., Seo, J. W., Kang, S. K., and Lee, J. Y. (2006), Study on the Seismic Design Code for Reinforced Concrete Bridge Pier and Its Rationalization, Material Published by Korea expressway corporation.
- Kar, A., Khatri, V., Maiti, P. R., and Singh, P. K. (2012), Study on Effect of Skew angle in Skew Bridges, *International Journal of Engineering Research and Development*, e-ISSN: 2278-067X, p-ISSN: 2278-800X, www.ijerd.com 2(12), 13-18.
- Kim, I. H. (2010), Status of Seismic Design Codes of Major Civil Facilities, *Magazine of KSCE*, 58(7), KSCE, 17-24.
- Kim, M. J. (2003), Improvement of Seismic Performance using Isolation in Existing Bridge, Thesis of Graduate school, Sungkyunkwan university.
- Korea Infrastructure Safety & Technology Corporation (2004), Seismic Evaluation of Existing Bridges and Improvement, Ministry of Construction and Transportation.
- Lee, T. H. (2005), Opensees, an Open-source Structural Analysis Platform,

Journal of the Korean Steel Construction, 17-3, Korean Society of Steel Construction (KSSC), 55-61.

Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2010), Korean Highway Bridge Design Code, Korea Road Association.

Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2015), Rules on the Design Criteria of the Road Structures and Facilities.

Park, C. M. (2007), Study for Negative Reactions of One-span Steel Composite Girder Bridges with Curves and Skew, Thesis of Graduate School, Hanbat National University.

Received : 09/20/2016

Revised : 09/26/2016

Accepted : 09/28/2016

요 지 : 본 연구에서는 LRB 받침을 갖는 플레이트 거더교를 해석 대상 교량으로 하고 편구배별 곡선반경과 사각을 해석변수로 하여 교량 받침의 반력에 미치는 영향을 평가하고자 하였다. 지진파로는 El-Centro 지진 기록과 인공지진파를 각각 교축방향과 교축직각방향으로 적용하고 3D 해석을 수행하였다. 해석결과, 곡선교 내측과 예각부에서 부반력이 발생될 가능성이 높은 위치로 나타났으며, 또한, 교축 직각방향으로 지진이 작용하였을 때가 또한 가능성이 높은 조건으로 해석되었다. 그 이외에도 직선교보다는 곡선교이면서 곡률반경이 작고 사각이 작을 수록 부반력의 발생 가능성이 높은 것으로 나타났다. 따라서 교량의 부반력 발생여부는 지진파의 종류 및 교량의 편구배, 곡선반경, 사각 등을 종합적으로 고려하여 검토하여야 할 것으로 판단된다.

핵심용어 : 부반력, 지진하중, 곡선교, 곡선반경, 편구배, 사각
