

받침배치에 따른 연속 플레이트 거더 사교의 지진거동 변화

Variation of Seismic Behavior of Continuous Skew Plate Girder Bridges According to the Arrangement of Bearings

문성권^{1)*}

Moon, Seong Kwon

Abstract

The capacity of bearings installed at abutments and piers for continuous bridges is usually determined by the magnitude of the maximum vertical reaction at each support and the capacity of bearings placed at piers is higher than that at abutments. In this study, the possibility of the improved seismic performance of base-isolated continuous skew bridges was investigated by analysing the variation of the seismic behavior of them according to three arrangements of bearings. Based on the conventional arrangement of bearings(Case A), three arrangements of bearings such as Case B, Case B and Case C were selected considering the variation of the horizontal stiffness of the lead rubber bearing(LRB) installed at the pier. The seismic behavior of the total 36 skew bridges was investigated by conducting the response spectrum analysis using the hybrid response spectrum considered the effect of LRB's damping. Results of analyses show that a more desirable seismic behavior of base-isolated continuous skew bridges can be obtained by reducing the magnitude of the horizontal stiffness of LRB placed at the pier to similar to or less than that of LRB installed at abutments. The variation of LRB's stiffness at the pier brings about period elongation and the change of mode shapes of base-isolated skew bridges and results in the reduction of the total base shear, the maximum base shear at the pier and the girder stresses. Although positive effects on the seismic behavior of base-isolated skew bridges caused by the change of arrangement of bearings decreased slightly with an increase in the flexibility of the substructure, the proposed arrangements of bearings bring about the improved seismic performance of base-isolated continuous skew plate girder bridges with less than 10m height of piers.

Keywords : Arrangement of bearings, Continuous skew plate girder bridges, Flexibility of substructure, Girder stress, Hybrid response spectrum, Lead rubber bearing, Maximum base shear, Total base shear

1. 서론

교량의 기하학적 평면 형태는 교량이 설치되는 현장조건에 따라 직선교, 곡선교, 사교 등으로 크게 구분되어진다. 상부구조물과 하부구조물의 구조특성상 가능하다면 직선교로 설계하는 것이 바람직하지만 공간상의 제약이나 현장의 지형조건으로 인하여 도로선형 변경이 힘들거나 도로에 대하여 비스듬히 교차하는 사면 등으로 굴착토량을 현저히 감소시킬 수 있는 경우에는 사교(skew bridges)가 적절한 것으로 알려져 있다. 하지만 사교는 바닥판의 기하학적 평면형상과 그로 인한 경사진 방향으로의 받침배치 때문에 직선교보다 훨씬 복잡한 거동

(behavior)을 나타낸다. 즉, 상부구조물에 휨과 비틀림이 동시에 작용하여 인근 거더간에 상대적인 슬림 현상과 둔각부 받침에 수직반력이 집중되는 현상이 발생하며 사각이 심한 사교에서는 예각부 받침에 부반력이 유발될 수도 있다.

사교의 대표적인 연구로서는 Ebeido and Kennedy (1996)에 의해 진행된 단순 합성교의 반력특성 및 거더의 휨모멘트 평가를 들 수 있다. 이 논문에서는 거더간격만을 고려했던 종래의 연구와는 달리 사교의 거동에 영향을 미치는 매개변수들(거더간격, 바닥판 중횡비, 차선 수, 사각, 가로보)의 영향이 고려되었으며 OHBDC 트럭하중과 고정하중에 대한 지점반력 및 휨모멘트 분배계수 그리

1) 정회원, 대구한의대학교 건축·토목설계학부 교수, 공학박사

* Corresponding author : skmoon@dhu.ac.kr 053-819-1509

• 본 논문에 대한 토의를 2011년 10월 31일까지 학회로 보내주시면 2011년 11월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

고 관련 경험식들이 제시되었다. Charles and Tomas (1998)는 합성 플레이트 거더교의 동적거동을 효과적으로 재현할 수 있는 단일 보(바닥판과 거더 단면을 함께 고려함)를 제안하였으며 실험결과와의 비교로부터 제안된 모델은 장경간을 가지는 단순교와 연속교의 모델로서 적절하다고 주장하였다. Maleki(2002)은 직선교의 고유진동주기와 이전 논문에서 유도한 상호계수들을 이용하여 연속 플레이트 거더교의 고유진동수를 산정할 수 있는 수식을 제안하였으며 이때 바닥판은 강막(rigid diaphragm)으로 간주하고 각 지점에서의 가로보 강성과 탄성받침 강성도 함께 고려하였다. 하지만 제안된 수식은 적용상 한계가 있어 기하학적 형상과 지점 강성이 대칭인 연속 플레이트 거더교에만 적용이 가능하다. Meng et al.(2004)은 36°의 사각을 가지는 사교를 대상으로 모형실험에서 구한 결과들(정적 변위, 고유진동수, 모드 형상, 감쇠비)과 그들이 개발한 이중-보 막대모델로부터 구한 결과들을 서로 비교하여 개발모델의 신뢰성을 입증한 바 있다. Huang et al.(2004)은 사각이 심한 2경간 연속 플레이트 거더 사교를 대상으로 AASHTO LRFD에 제시된 횡방향 활하중 분배식을 평가하기 위해 현장실험과 유한요소해석을 수행하여 그 결과를 서로 비교하였다. Huo and Zhang(2008)는 서로 다른 세 가지 거더(두개의 프리스트레스 콘크리트 I 형 거더와 1개의 강재 I 형 거더)를 대상으로 활하중에 의한 교각부 받침의 반력분배에 미치는 사각의 영향을 분석하여, LRFD에 언급된 전단방정식(shear equations)이 외부 거더의 경우에는 과대평가 결과를, 내부 거더의 경우에는 과소평가 결과를 가져올 수 있음을 지적하였다.

한편, 교량의 지진성능 향상 차원에서 지진격리장치와 관련된 연구가 최근 활발히 진행되고 있다. Hwang and Chiou(1996)는 20개의 지반운동에 대한 비탄성 변위 응답스펙트럼의 특성을 규명한 후, 납고무받침(LRB)의 유효강성과 등가 감쇠비를 이용하여 LRB가 설치된 교량의 지진해석을 위한 등가선형모델(equivalent linear model)을 제안하였다. Dicleli(2002)는 교대부에는 적층탄성받침이 교각부에는 마찰진자형 받침이 적용된 혼합지진격리장치로 구성된 교량의 지진성능 향상 가능성을 언급하였다. 즉, 혼합지진격리장치로 구성된 교량은 마찰진자형 받침들만이 설치된 교량에 비해 길어진 고유진동주기로 인한 지진력의 감소 효과와 더불어 혼합지진격리장치의 사용으로 지진격리장치의 변위를 제어시킬 수 있고 교대

와 교각에 균등한 지진력이 작용될 수 있다고 주장한 바 있다. 최승호 등(2004)은 기존 받침 대신 여러 지진격리장치를 적용할 때 교량이 훨씬 안정적인 거동을 보이며 특히 StLRB를 적용할 경우 받침의 마찰과 STU의 강절거동 효과로 인해 높은 지진력 감소 효과가 있음을 지적하였다. Kunde and Jangid(2006)는 지진격리장치가 설치된 연속교의 지진거동을 분석하여 효율적인 해석모델을 제안하였다. 그들은 바닥판과 교각의 유연성에 관한 고려 유무에 따라 서로 다른 모델을 설정하고 세 가지 지진격리장치(고감쇠 적층받침, 납고무받침, 마찰진자형 받침)를 고려한 후 지진거동을 서로 비교하여, 지진격리장치가 설치된 연속교의 지진거동은 교각과 바닥판을 강체로 고려한 단자유도계로 모형화함으로써 효과적으로 구할 수 있다고 주장하였다. 조창백 등(2008)은 지진격리장치로 널리 사용되고 있는 납고무받침(LRB)과 적층고무받침(RB)에 대한 전단특성 평가시험과 온도의존성 시험을 실시하여 지진격리장치의 전단성능 오차를 분석한 후 전단특성이 온도변화에 의해 매우 큰 영향을 받을 수 있음을 지적하였다.

본 연구에서는 교량의 지진성능 향상 차원에서 최근까지 진행되어 왔던 기존 연구들과는 접근 방법을 달리하여 연속 사교의 교대부와 교각부에 설치되는 지진격리장치들간의 수평강성변화를 고려한 받침배치 변경에 따른 사교의 지진거동 변화를 비교·분석함으로써 사교의 지진성능 향상 가능성을 검토하였다. 사교의 거동에 큰 영향을 주는 사각, 거더간격, 교각 높이 등을 매개변수로 선정하여 총 36개의 2경간 연속 플레이트 거더 사교에 대한 동적해석을 수행하였다.

2. 지진격리장치

2.1 지진격리장치의 특성

지진격리장치에는 기존의 적층고무받침에 납을 삽입한 납고무받침(LRB)과 곡률반경의 조정을 통해 전체구조물의 고유진동수를 원하는 값으로 이동시키는 마찰진자형(friction pendulum system, FPS)이 있으나 가장 널리 사용되는 LRB의 특성을 살펴보면 다음과 같다. Fig. 1에서 보는 바와 같이 LRB는 고무와 보강철판으로 구성되는 적층고무받침의 중심부에 1개 또는 여러 개의 원형 납심(lead plug)이 추가적으로 삽입된다. 이때 심의 재료로서 납

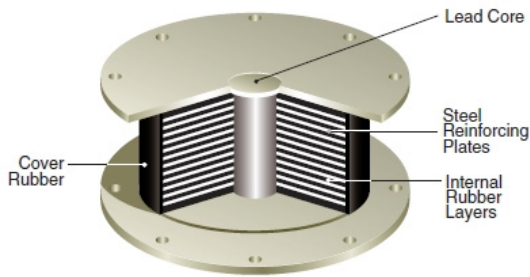


Fig. 1 Lead rubber bearing(LRB)

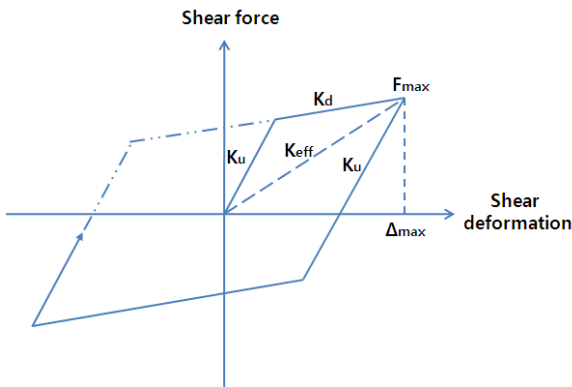


Fig. 2 Characteristics of bilinear isolation bearings

이 이용되는 이유는 납의 이력전단변형(hysteretic shear deformation)을 통해 높은 감쇠(damping)가 가능해지기 때문이다. 기존 적층고무받침의 낮은 수평강성은 지진력의 감소 효과는 있지만 적층고무받침의 전단변위가 크게 증가하게 되어 이 전단변위를 충족시키기 위해서는 보다 폭이 넓은 신축이음이나 더 큰 받침지지 길이의 확보가 요구된다. 하지만 높은 감쇠를 통한 에너지 소산 메커니즘을 보이는 LRB는 적층고무받침의 큰 전단변위를 허용범위 이내로 감소시켜준다. 납고무받침의 거동 특성을 나타내는 Fig. 2에서 알 수 있듯이 납심이 항복되기 전에는 납심과 적층고무의 탄성거동으로 LRB의 횡방향 강성이 적층고무받침의 횡방향 강성보다 훨씬 크지만 납심이 항복된 후에는 적층고무의 전단 탄성강성으로만 나타나게 된다. 납심의 횡방향 강성은 적층고무의 횡방향 강성

보다 약 10배 정도 큰 것으로 알려져 있다. 따라서 풍하중 또는 제동하중과 같은 단기하중에 대해서는 납심의 초기강성으로 교량의 이동이 억제되고 지진이 작용할 때에는 납의 비선형 거동으로 진동에너지를 흡수하여 지진변위가 억제된다.

2.2 납고무받침(LRB)의 강성변화를 고려한 받침배치

본 연구에서는 받침배치의 변경에 따른 사교의 지진성능 향상 가능성을 검토하기 위해 Fig. 3과 같이 세 가지 받침배치(Case A, Case B, Case C)를 고려하였으며 각 받침배치에 표현되어 있는 T1, T2, T3는 적용 LRB를 의미한다. 연속교의 교각부와 교대부에 설치되는 받침의 용량은 통상적으로 각 지점에 작용하는 최대수직반력의 크기에 따라 결정되며 이때 반력이 크게 유발되는 교각부에 교대부보다 더 큰 용량의 받침이 설치되는 것이 일반적이며 이러한 사실에 입각한 받침배치가 Fig. 3(a)의 Case A이다. 받침배치 Case B는 Case A의 교대부에 설치된 LRB와 동일한 수평강성을 가지는 LRB를 교각부에 적용한 경우를 나타내며 받침배치 Case C는 Case A의 교대부에 설치된 LRB의 약 절반 수준의 수평강성을 가지는 LRB를 교각부에 설치한 경우를 나타낸다. 즉, 본 연구에서는 교대부에 설치되는 LRB 강성을 고정시키고 교각부에 설치되는 LRB의 수평강성에 변화를 주어 세 가지 받침배치를 고려하였다. Fig. 3에 표시되어 있는 납고무받침 T1, T2, T3는 LRB 제작사에서 공급되는 다양한 LRB들 중에서 본 연구에서 사용된 36개 사교들의 어떤 지점에도 적용 가능하도록 선정되었으며 이들 LRB들의 특징치는 Table. 1과 같다.

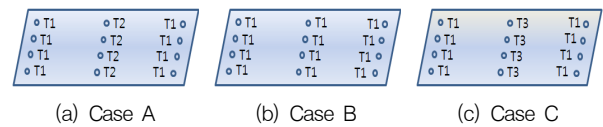


Fig. 3 Three arrangements of bearings

Table 1 Characteristic values of used LRB

LRB	Effective stiffness (K_{eff} , KN/m)	Elastic stiffness (K_u , KN/m)	Yielded stiffness (K_d , KN/m)	Vertical stiffness (K_v , KN/m)	Equivalent damping ratio(%)	Yield strength (KN)
T1	5214.0	24799.7	2877.3	18755739.0	25.5	158.7
T2	9708.9	54255.2	6345.1	47068380.0	20.5	228.9
T3	2841.9	11754.3	1346.9	10487871.0	28.7	100.8

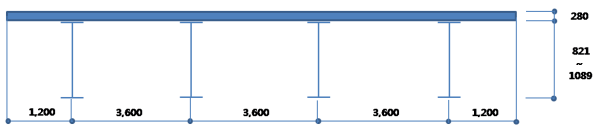


Fig. 4 Cross section of bridge superstructure

Table 2 Member sizes (mm)

Members	Elements (Width × Thickness)
Main girder	Flange : 302 × 40 Web : 1008 × 21
Cross beam	Flange : 200 × 14 Web : 800 × 12
Vertical bracing at supports	Upper chord : □ 300 × 90 × 12 × 16 Diagonal chord : L 150 × 150 × 12 Lower chord : L 130 × 130 × 9
Intermediate vertical bracing	Upper chord : L 130 × 130 × 9 Diagonal chord : L 100 × 100 × 10 Lower chord : L 130 × 130 × 9
Vertical stiffener at supports	200 × 10

3. 수치 예제

세 가지 받침배치에 따른 2경간 연속 플레이트 거더 사교의 전반적인 동적거동 변화를 분석하기 위해 사교의 거동에 큰 영향을 주는 인자로서 알려진 사각(skew angle), 거더간격, 교각 높이 등을 매개변수로 선정하였다. 사각으로서는 사각 30°, 45°, 60°의 세 가지와 사각 0°(직선교)을 고려하였다. 이때 사각은 교축직각방향(횡방향)과 받침선의 중심선이 이루는 각을 의미한다. 횡방향 총폭원은 13.2m이며 지간길이는 2@26.4m=52.8m이다. 거더간격은 1.8m, 2.7m, 3.6m 세 가지를 고려하였다. 교각의 높이로는 하부구조의 유연성에 따른 지진거동 변화를 파악하기 위해 3가지 높이(H=0m, 7m, 10m)를 고려하여 총 36개의 다양한 사교들을 선정하였다. 본 연구에 사용된 거더간격 3.6m 사교의 횡단면은 Fig. 4와 같으며 사교를 구성하는 각 부재들의 제원은 Fig. 4와 Table. 2에 나타나 있다. Fig. 4의 횡단면도에 나타나 있지 않은 보도와 난간 단면에 대한 하중효과는 고정하중으로 처리하여 간접적으로 고려하였다.

3.1 해석모델과 동적해석

사교의 복잡한 거동을 재현하기 위해 유한요소법을 적용

하였으며 범용 유한요소해석 프로그램인 MIDAS/CIVIL (2006)을 사용하여 3차원 유한요소모델들을 작성한 후 동적해석을 수행하였다. 상부구조물의 구성요소들 중 바닥판의 경우 막 작용과 휨 작용을 동시에 고려하기 위해 4절점 plate/shell 요소를 사용하였다. 거더의 경우 LRB의 횡방향(교축직각방향) 병진이동으로 인한 거더 복부의 면외 변형(out of plane)을 재현하기 위해 거더 복부는 4절점 plate/shell 요소로 모형화하였으며 거더의 상부 및 하부플랜지는 효율적인 해석모델을 작성하기 위해 3차원 보(beam)로 모형화하였다. 수직브레이싱의 상현재, 하현재, 사재들과 하중분배 가로보 그리고 지점수직보 강재는 3차원 보요소로 모형화하였으며 교각의 경우 2주식 원형교각(기둥 직경 D=1.6m, 기둥 중심간격=7.2m)을 대상으로 교각 코핑부의 보와 기둥은 3차원 보요소로 모형화하고 부재 두께가 상대적으로 큰 코핑부의 보 부재와 기둥 부재가 만나는 부분에 대해서는 도로교표준시방서(1996) 12.2.3항에 준하여 강역으로 처리하였다. 지진격리장치가 설치된 교량은 지진격리장치가 설계하중에 대한 교량의 소성변형을 방지하거나 최소화 시켜주므로 이런 특성을 감안하여 구조 부재들은 탄성거동을 하고 비선형 거동은 LRB에서 발생한다고 가정하였다. 즉, 총단면(gross section)에 근거하여 교각의 강성을 산정하였다. 지진격리장치가 설치된 교량의 지진거동을 정확히 파악하기 위해서는 지진격리장치의 비선형 거동을 감안하여 비선형(nonlinear) 시간이력해석법을 수행하여야 하지만, AASHTO(1999), Canadian(2000), M. C. Constantinou, et al.(2010), 도로교설계기준(2010) 내진설계편에는 유효길이가 3초보다 길지 않은 교량 또는 지진격리받침의 등가감쇠비가 30%를 초과하지 않은 교량에 대하여 지진격리장치의 비선형특성을 선형화한 등가선형해석 방법이 직·간접으로 언급되어 있다. 받침배치 변경에 따른 다양한 사교들의 전반적인 지진거동 변화의 경향을 파악하고자 하는 본 연구의 목적에 부합되면서 해석상의 간편성을 감안하여 비선형 시간이력해석 대신 선형 응답스펙트럼해석을 적용하였다. 적용된 응답스펙트럼은 기존 응답스펙트럼과 유사한 개념이지만 LRB 시스템의 감쇠(damping) 효과를 고려하기 위해 지진응답계수값이 조정된 다중모드스펙트럼으로서 Fig. 5와 같이 두개의 모드(구조 모드 및 지진격리모드)로서 구성된다. 이때 지진격리모드의 경계주기는 LRB의 변형과 관련된 고유진동주기 T_{eff} 에 0.8을 곱한 값으로 결정되며 다중모드스펙트럼의 지진응답

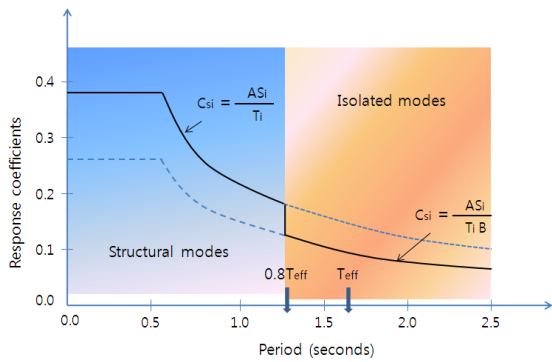


Fig. 5 Hybrid response spectrum(base-isolated bridges)

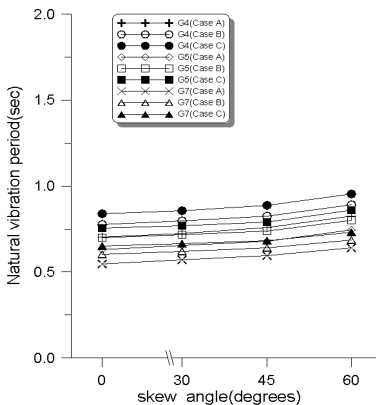
계수값은 아래의 식으로부터 결정된다[도로교설계기준(2010) 6.9.7.4 조항 참조].

$$C_{si} \leq \frac{A S_i}{T_i} \quad (T_i \leq 0.8 T_{eff}) \quad (1)$$

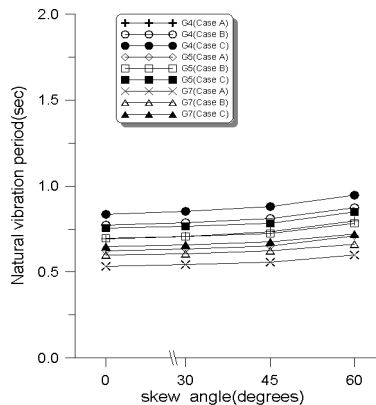
$$C_{si} \leq \frac{A S_i}{T_i B} \quad (T_i > 0.8 T_{eff}) \quad (2)$$

Eq.(2)의 B는 LRB의 증가감쇠비(effective damping ratio) β (%) 값에 의해 결정되는 감쇠계수[도로교설계기준(2010), 표 6.9.3 참조]를 의미하며 사교 전체에 대한 증가 감쇠비 β_{eff} 는 하부구조의 유연성이 고려될 때 다음 식(AASHTO, 1999)으로부터 구해진다.

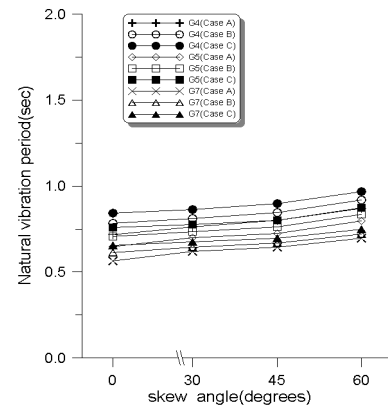
$$\beta_{eff} = \frac{2 \sum_{i=1}^n Q_{di} (D_{di} - D_{yi})}{\prod \sum_{i=1}^n k_{ei} (D_{di} + D_{si})^2} \quad (3)$$



(a) Height of a pier= 0.0m



(b) Height of a pier = 7.0m



(c) Height of a pier = 10.0m

Fig. 6 Variation of Natural vibration periods according to the change of arrangements of bearings(the first transverse vibration mode)

여기서 n 은 사용된 LRB 전체 수를, k_{ei} 는 i 번째 LRB의 유효강성을, D_{di} , D_{yi} 는 각각 i 번째 LRB의 설계변위와 항복변위를 의미하며 D_{si} 는 i 번째 LRB가 설치된 하부구조의 변위를 나타낸다. 각 사교들에 대한 등가감쇠비는 가정한 설계변위값이 일정한 값에 수렴될 때까지 여러 번의 시산 과정을 거쳐 최종적으로 결정된다. 사용된 가속도계수(A)와 지반계수(S)는 각각 0.154, 1.5를 적용하였다. 통상적으로 지진 작용방향으로는 종방향과 횡방향이 적용되지만 사교의 특성을 감안하여 종방향과 횡방향 이외에도 받침선 방향과 받침선 직각방향도 함께 고려하였다.

3.2 동적 거동

본 연구에서는 세 가지 받침배치(Case A, Case B, Case C)에 따른 사교들의 지진거동 변화를 파악하기 위해서 우선 동적특성인 고유진동주기와 모드형상을 비교·분석하고 사교들의 지진거동으로서는 전체밀면전단력(종방향 및 횡방향)과 교각 및 교대에 걸리는 최대밀면전단력(종방향 및 횡방향) 그리고 바닥판과 거더에 발생하는 응력 등을 고려하였다.

3.2.1 동적특성변화

사교들을 대상으로 한 동적해석 결과들 중 받침배치에 따른 저차 모드와 관련된 고유진동주기의 변화는 Figs. 6과 7에, 고유진동 모드형상 변화는 Figs. 8과 9에 나타나 있다. Figs. 6과 7에 나타나 있는 G4, G5, G7은 사교에 사용된 거더 수가 각각 4개, 5개, 7개임을 의미하며 Case A, Case B, Case C는 앞서 언급된 세 가지 받침배치를

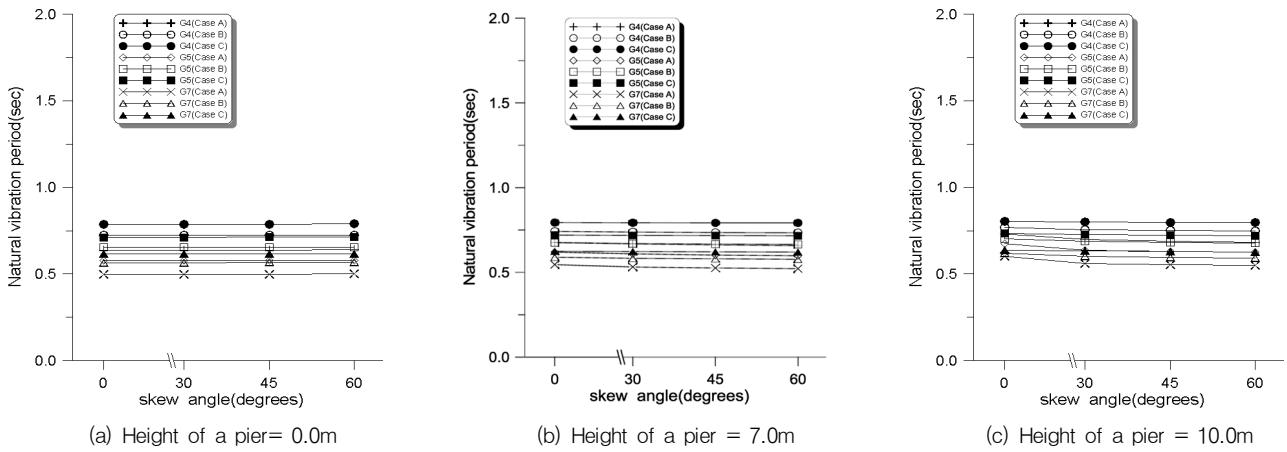


Fig. 7 Variation of Natural vibration periods according to the change of arrangements of bearings(the first longitudinal vibration mode)

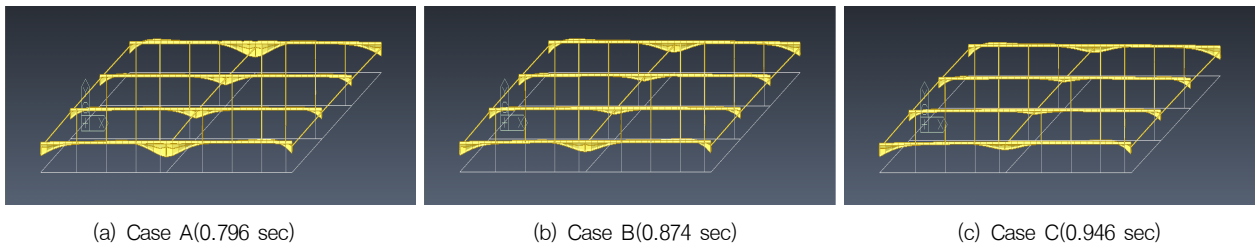


Fig. 8 Variation of mode shapes associated with the first transverse vibration mode

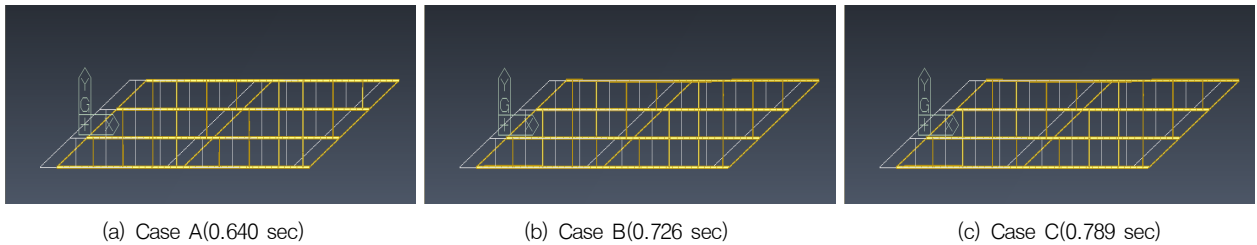


Fig. 9 Variation of mode shapes associated with the first longitudinal vibration mode

나타낸다. 이때 거더 수가 4개, 5개, 7개일 때 거더간격은 각각 3.6m, 2.7m, 1.8m이다. Figs. 8과 9는 받침배치에 따른 2경간 연속 플레이트 거더 사교(사각 60°, 거더간격 =3.6m, 교각 높이=0m)의 고유진동 모드형상 변화를 나타내며 그림의 기는 실선은 변형 전 사교의 형상을 의미하며 편의상 수평, 수직방향의 스케일을 달리 적용하였다.

받침배치에 무관하게 전반적으로 횡방향 병진진동, 종방향 병진진동, 중력방향의 비틀림 진동 순으로 진동모드들이 나타나는 경향을 보인다. 예외적으로 사각이 심한 사각 60° 사교들의 경우 받침배치 Case A에서 종방향 병진 진동모드와 중력방향에 대한 비틀림 진동모드의 순서가 바뀌는 현상을 확인할 수 있다. Figs. 6, 7과 Figs.

8, 9로부터 받침배치가 사교의 고유진동주기와 모드형상에 영향을 미치는 것을 확인할 수 있다. 즉, Figs. 6과 7에서 알 수 있듯이 교대부에 비해 상대적으로 큰 강성의 LRB가 교각부에 설치된 받침배치 Case A를 받침배치 Case B, Case C로 변경할 때 교각부에 설치된 LRB 강성의 감소로 인하여 고유진동주기가 길어지는 현상이 발생하며 이러한 현상은 하부구조의 유연성이 고려될 때에도 발생하지만 고유진동주기가 길어지는 정도는 하부구조의 유연성이 증가할수록 다소 감소한다. Fig. 8은 받침배치 변경에 따른 횡방향 병진 진동모드의 모드형상 변화를 나타내며 여기서 주목할 사실은 교대부와 교각부에 배치된 LRB의 상대적인 수평강성비와 유사하게 거더 하부

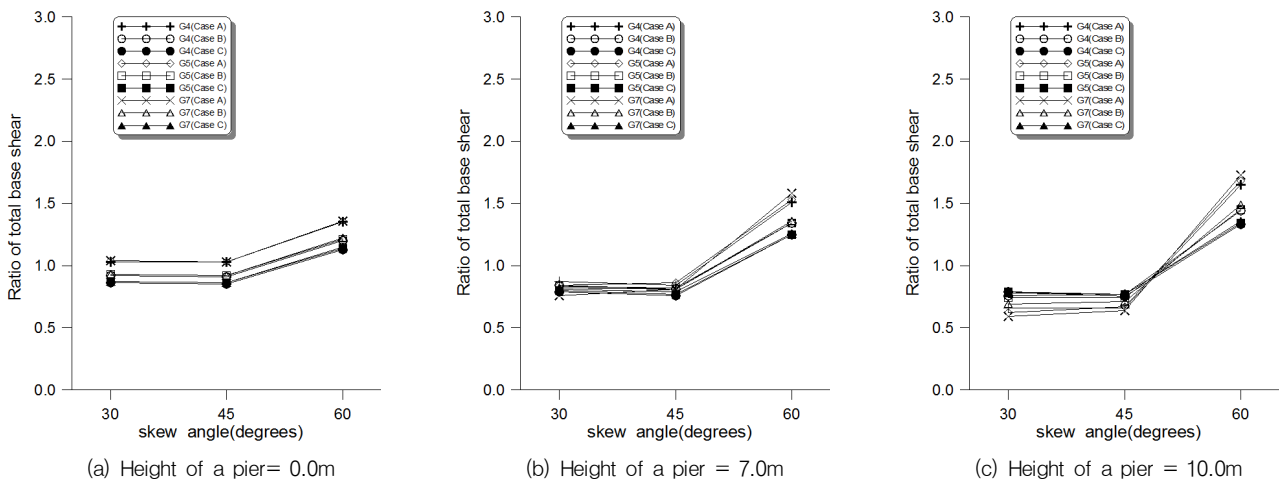


Fig. 10 Variation of the ratio of total base shear according to the change of arrangements of bearings(longitudinal direction)

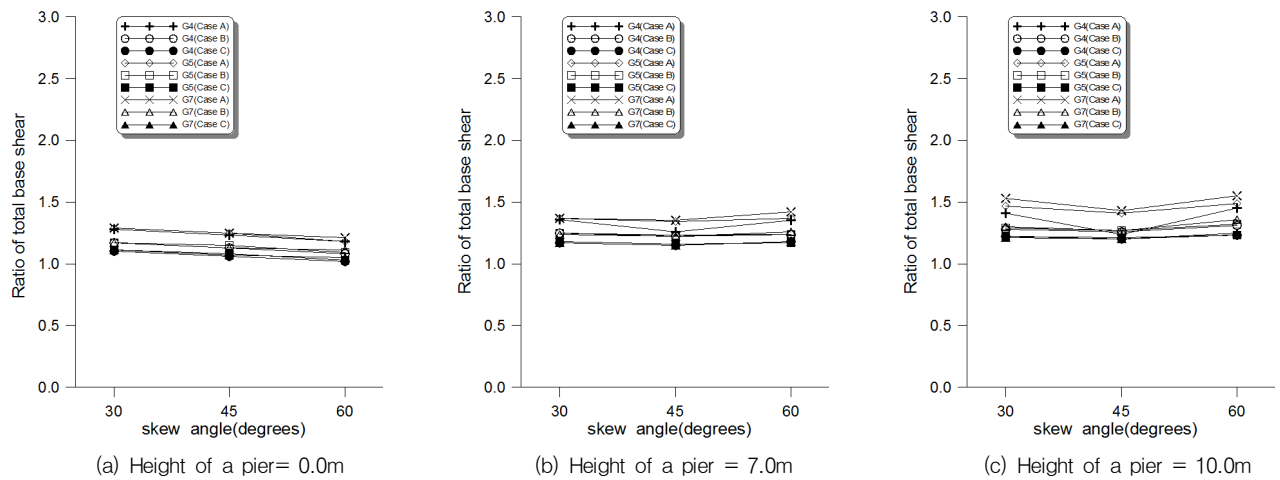


Fig. 11 Variation of the ratio of total base shear according to the change of arrangements of bearings(transverse direction)

플랜지가 횡방향으로 이동한다는 것이다. 즉, 받침배치 Case A의 경우 교대부보다는 교각부에서 훨씬 큰 이동이 일어나는데 반해, 받침배치 Case B의 경우에는 유사한 크기의 이동이 교대부와 교각부에서 발생하고 받침배치 Case C의 경우에는 받침배치 Case A와 반대로 교대부보다 교각부에서 작은 이동이 발생한다. 이러한 고유진동 주기와 고유진동 모드형상 변화는 사교의 지진거동에도 영향을 미칠 것으로 예상된다.

3.2.2 사교들의 지진거동

본 연구에서는 사교의 지진성능 향상 차원에서 교대와 교각에 설치되는 남고무받침들간의 강성변화와 하부구조(교각)의 강성변화에 따른 사교의 지진거동 변화를 조사하였다.

3.2.2.1 받침배치 효과

다양한 사각과 거더간격의 변화에 따른 사교의 전반적인 지진거동 변화를 파악하기 위해 각 사교들의 거동을 관련 직선교의 거동으로 정규화시켰다. 세 가지 받침배치(Case A, Case B, Case C)에 따른 사교들의 지진거동 변화 중 사교에 작용하는 각 방향별(종방향, 횡방향) 전체밀면전단력비는 Figs. 10과 11에, 교각부의 각 방향별 최대밀면전단력비는 Figs. 12와 13에, 교대부의 각 방향별 최대밀면전단력비는 Figs. 14와 15에 나타나 있다. Fig. 16은 거더의 최대유효응력비를 의미한다. 우선 하부구조의 유연성을 고려하지 않은 조건(교각 높이 $H=0m$) 하에서의 받침배치에 따른 사교의 지진거동 변화 중 전체 밀면전단력의 크기에 미치는 효과는 Figs. 10(a)와 11(a)에서 알 수 있듯이 사각과 거더간격과는 무관하게 받침배

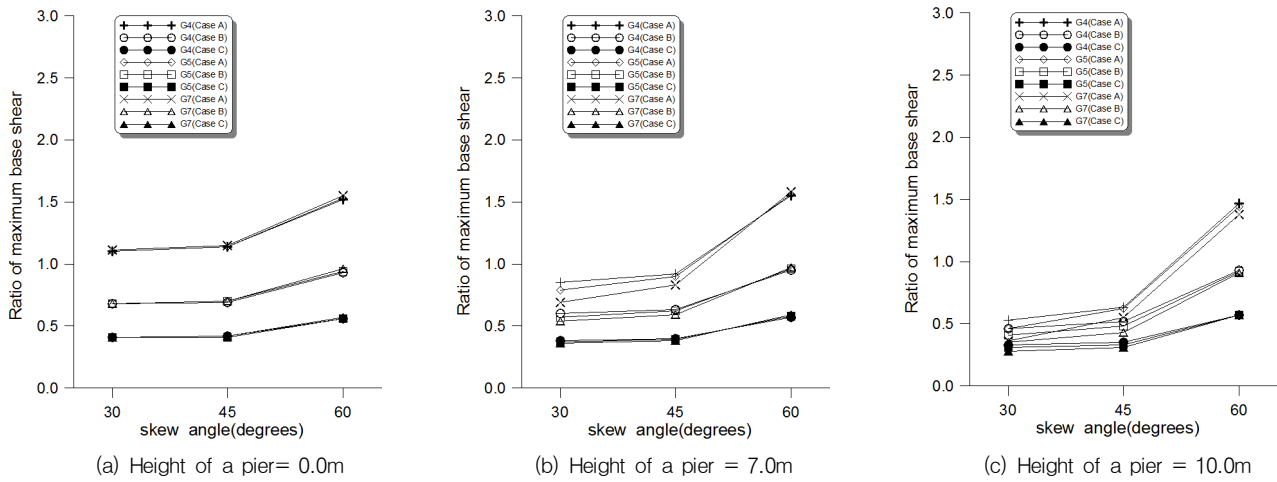


Fig. 12 Variation of the ratio of maximum base shear at a pier according to the change of arrangements of bearings(longitudinal direction)

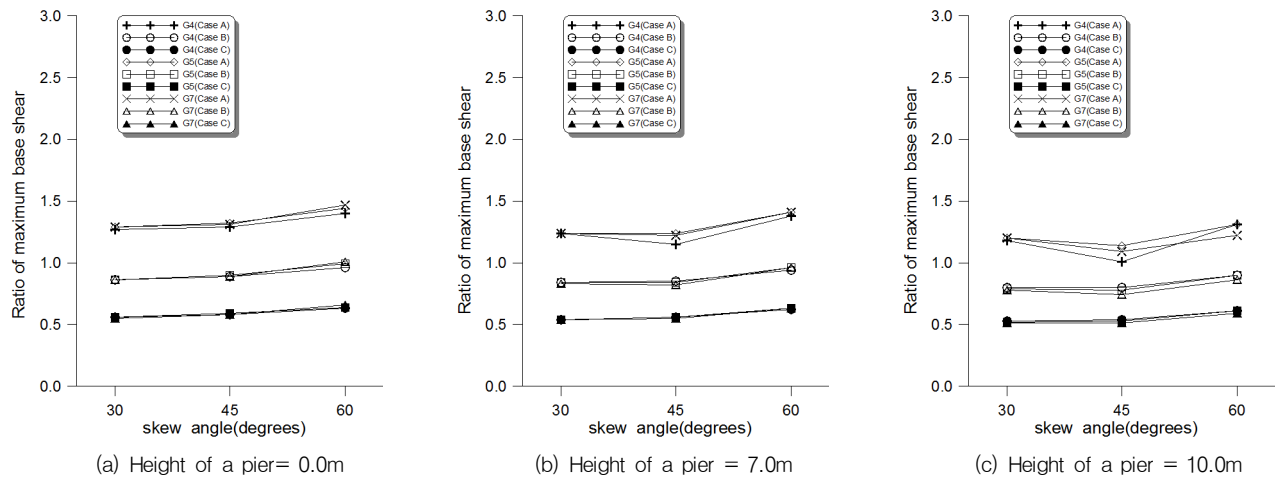


Fig. 13 Variation of the ratio of maximum base shear at a pier according to the change of arrangements of bearings(transverse direction)

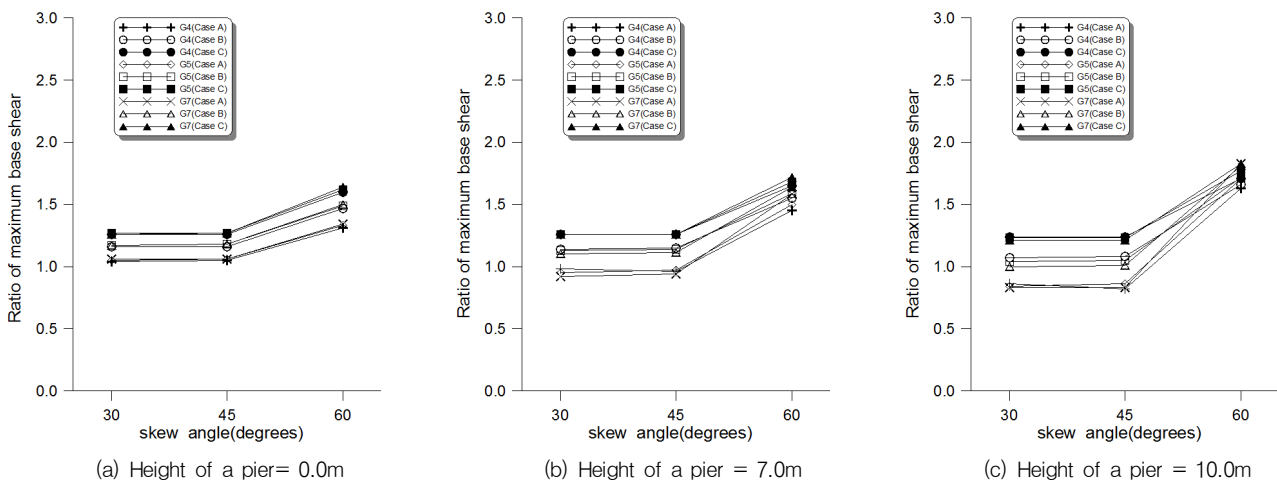


Fig. 14 Variation of the ratio of maximum base shear at abutments according to the change of arrangements of bearings(longitudinal direction)

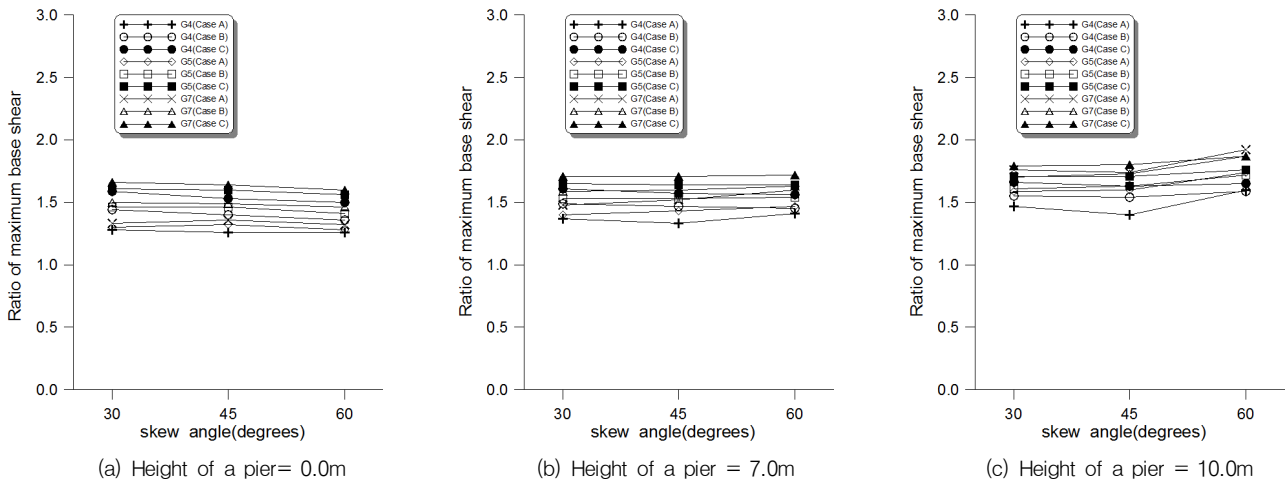


Fig. 15 Variation of the ratio of maximum base shear at abutments according to the change of arrangements of bearings(transverse direction)

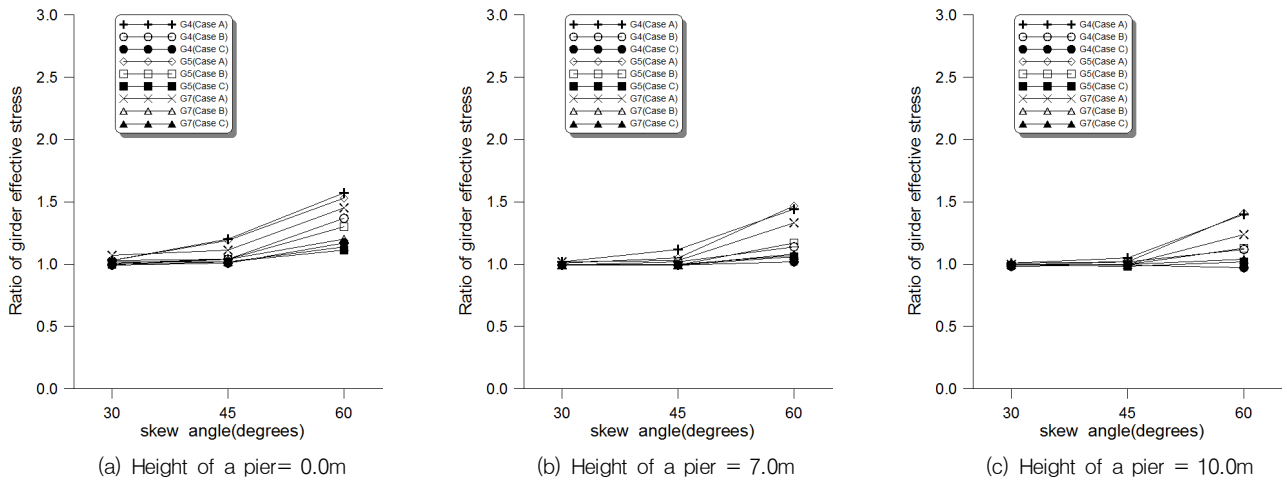


Fig. 16 Variation of the ratio of girder effective stress according to the change of arrangements of bearings

치 Case A를 Case B와 Case C로 변경할 경우 종방향, 횡방향의 전체밀면전단력이 일정 수준 감소하며 특히 Case C에서 이러한 감소 효과가 좀 더 크게 나타난다(최대 20% 감소). 이는 받침배치 Case A에 비해 상대적으로 감소된 수평강성을 가진 LRB가 교각부에 설치됨으로써 LRB의 면내 변형과 관련된 진동모드의 고유진동주기가 Case A의 고유진동주기보다 더 길어져 지진응답계수값이 감소되었기 때문인 것으로 판단된다.

받침배치 Case A가 Case B나 Case C로 변경될 경우 사교에 작용하는 전체밀면전단력의 크기는 감소하지만 교각부에 설치된 보다 유연한 LRB의 수평강성으로 인하여 교각부에 집중되던 밀면전단력의 일부분이 양측 교대부로 이동하는 현상이 발생한다. 즉, Figs. 12(a)와 13(a)

에서 보는 바와 같이 교각부에 걸리는 최대밀면전단력의 크기는 매우 크게 감소하는 반면 교대부에 걸리는 최대밀면전단력의 크기는 다소 증가[Figs. 14(a)와 15(a) 참조]하는 것을 알 수 있다. 교각부에 걸리는 최대밀면전단력은 종방향에 대해서는 약 65%, 횡방향에 대해서는 약 55% 정도 감소하며 교대부에 걸리는 최대밀면전단력은 종방향에 대해서는 약 20%, 횡방향에 대해서는 약 23% 정도 증가하는 현상을 보인다.

거더의 유효응력(effective stress)에 미치는 받침배치 변경 효과는 Fig. 16(a)에서 알 수 있듯이 기존 받침배치 Case A보다 상대적으로 수평강성이 작은 LRB를 교각부에 설치한 받침배치 Case B와 Case C의 경우 거더의 유효응력 감소효과를 확인할 수 있으며 특히 받침배치 Case

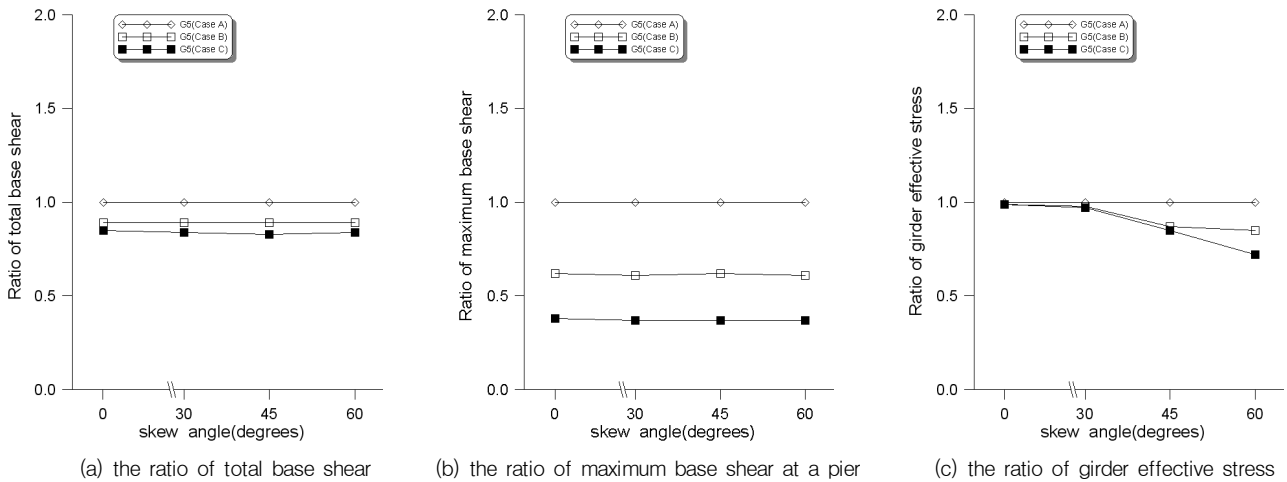


Fig. 17 Variation of seismic response according to the change of arrangements of bearings

C에서 감소효과가 현저히 발생한다. 예를 들어 사각 60°, 거더간격 3.6m 사교의 경우 약 30%의 유효응력 감소 효과가 발생하며 이러한 현상은 사각이 심할수록 크게 나타난다. 이는 사각이 심할수록 크게 발생하는 거더의 면외(out of plane) 변형이 3.2.1절에서 언급된 받침배치 Case C의 모드형상 특성으로 인하여 감소되었기 때문인 것으로 판단된다. 참고로 바닥판의 최대응력에 미치는 받침배치 변경 효과는 무시할 정도이며 이는 수직강성이 수평강성에 비해 월등히 큰 LRB의 구조특성상 LRB의 거동이 주로 받침의 면내에서 발생하여 바닥판의 응력에는 거의 영향을 미치지 못하기 때문이다. 따라서 기존의 받침배치 Case A를 Case B, Case C로 변경할 경우 전반적으로 바람직한 지진거동이 유발됨을 알 수 있었다.

참고로 제안된 받침배치 변경에 따른 직선교의 지진성능 향상 효과를 알아보기 위해 네 가지 사각(0°, 30°, 45°, 60°)을 가지는 사교들을 대상으로 받침배치 Case B와 Case C를 적용하여 구한 지진거동을 받침배치 Case A를 적용하여 구한 지진거동으로 정규화시켰다. Figs. 17(a)~(c)는 거더간격 2.7m, 교각 높이 H=0m인 사교들을 대상으로 위에서 언급된 지진거동 중 상대적으로 효과가 크게 나타난 전체밀면전단력비(중방향), 교각부 최대밀면전단력비(중방향), 그리고 거더 유효응력비를 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이 교각부에 상대적으로 수평강성이 작은 LRB가 설치된 받침배치 Case B와 Case C에서 1.0보다 작은 값들이 분포되어 있어 직선교에서도 지진성능 향상 효과를 확인할 수 있으며 이는 받침배치의 변경으로 인하여 LRB의 면내 변형과 관련된 진동모드의 고유진동주기가 기존 받침배치 Case A의 고유진동주기

보다 더 길어져 지진응답계수값이 감소되었기 때문이다. 이러한 지진성능 향상 효과의 정도는 사각(skew angle)과는 상관없이 유사하게 나타나지만 거더 유효응력의 감소효과는 앞서 언급된 바 있듯이 직선교에서는 기대하기 힘들다. 유사한 결과가 거더간격 1.8m와 3.6m의 사교에서도 나타났다.

3.2.2.2 하부구조의 유연성

본 연구에서는 받침배치 변경에 따른 사교의 지진거동에 미치는 하부구조(교각) 유연성의 영향을 조사하기 위해 세 가지 교각의 높이(H=0m, 7.0m, 10m)를 고려하였으며 2주식 원형교각(기둥 중심간 거리=7.2m)을 대상 교각으로 선정하였다. 교각 높이 H=0m인 경우는 하부구조의 유연성을 고려하지 않은 경우를 나타내며 교각 높이 H=7m, 10m은 현장에서 널리 적용되는 높이로서 H=7m인 경우는 H=10m인 경우보다 약 3배 정도 강성이 크다.

하부구조의 유연성이 고려될 때 하부구조와 관련된 진동의 개입으로 사교의 동적 특성에 약간의 변화가 발생한다. 즉, 하부구조의 유연성으로 인하여 사교의 고유진동주기가 상대적으로 길어지며(Figs. 6과 7 참조), 상부구조의 면내변형과 관련된 횡방향, 종방향 첫 번째 진동모드의 질량참여율이 99%에서 80~85%로 감소하며 특히 교각 높이 H=10m이며 받침배치가 Case A인 사각 45° 사교에서는 72~79%, 사각 30° 사교에서는 49~66%로 크게 감소한다. 아울러 하부구조의 유연성이 커질수록 사교의 전반적인 지진거동에 미치는 하부구조의 영향이 증가하여, 교각과 납고무받침에 의해 나타나는 사교의 전체 수평변위 중 납고무받침의 수평변위가 차지하는 비율이

상대적으로 감소하는 현상이 발생한다.

하부구조의 유연성이 고려될 때 받침배치의 변경에 따른 사교의 지진거동 변화는 Figs. 10~16에서 알 수 있듯이 전반적으로 앞의 3.2.2.1절에 언급된 지진거동 변화와 유사한 경향을 보이지만, 받침배치의 변경에 따른 바람직한 지진거동이 하부구조의 유연성이 커질수록 다소 감소하는 경향이 나타난다. 하지만 교각 높이가 10m이면서 사각 60°, 거더간격 3.6m 사교의 경우 전체밀면전단력(중방향)과 교각부 최대밀면전단력 그리고 거더의 유효응력은 받침배치를 Case A에서 Case C로 변경하였을 때 각각 최대 20%, 60%, 30% 정도 감소한다. 주의할 점은 Fig. 10(c)의 교각 높이 10m인 30°, 45° 사교의 경우 예상과는 달리 받침배치 Case A 사교의 중방향 전체밀면전단력비가 받침배치 Case B, Case C 사교보다 작게 나타나는데, 이는 받침배치 Case A 사교의 진동 특성이 받침배치 Case B, Case C 사교와는 달리 한 진동모드에 중방향 진동과 횡방향 진동이 공존하고(첫 번째 고유진동모드의 중방향 질량참여율 43.1%, 횡방향 질량참여율 49.8%) 이런 진동 특성으로부터 구한 지진력을 네 개의 지진방향에 대하여 조합하는 과정에서 유발된 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 세 가지 받침배치에 따른 사교의 지진거동 변화를 분석하여 사교의 지진성능 향상 가능성을 검토하였다. 세 가지 받침배치(Case A, Case B, Case C)는 기존에 적용되고 있는 받침배치를 기준으로 교각부에 설치되는 LRB의 수평강성에 변화를 주어 선정되었다. 즉, 세 가지 받침배치 중 Case A는 기존에 널리 적용되어온 받침배치로서 교대부에 설치된 LRB의 수평강성보다 상대적으로 큰 수평강성을 가지는 LRB가 교각부에 설치된 경우를, 받침배치 Case B와 Case C는 각각 Case A의 교대부에 설치된 LRB와 동일한 수평강성과 약 절반 수준의 수평강성을 가지는 LRB를 교각부에 적용한 경우를 나타낸다. 세 가지 받침배치에 따른 2경간 연속 플레이트 거더 사교의 전반적인 지진거동 변화를 분석하기 위해 사교의 거동에 큰 영향을 미치는 인자로 알려진 사각(0°, 30°, 45°, 60°), 거더간격(1.8m, 2.7m, 3.6m), 교각 높이(0m, 7m, 10m) 등을 매개변수로 사용하여 총 36개의 사교들을 고려하였다. 받침배치 변경에 따른 다양한 사교들의 전반적인 지진거동 변화의 경향을 파악하고자 하는

본 연구의 목적에 부합되면서 해석상의 간편성을 감안하여 비선형 시간이력해석 대신 LRB 시스템의 감쇠효과가 고려된 혼합응답스펙트럼(hybrid response spectrum)을 이용한 선형 응답스펙트럼 방법을 적용하였다. 다양한 해석모델들에 대한 동적해석 수행 결과로부터 다음과 같은 결론을 이끌어 낼 수 있었다.

- (1) 교대부에 설치되는 LRB의 강성보다 큰 강성을 가진 LRB를 교각부에 설치하는 기존 받침배치(Case A) 대신 본 연구에서 제안된 받침배치(기존 받침배치의 교대부에 설치된 LRB의 수평강성과 유사한 강성 또는 그 보다 작은 수평강성을 가진 LRB를 교각부에 설치)를 적용할 경우, 기존 받침배치에 비해 유연한 강성의 LRB가 교각부에 설치됨으로써 고유진동주기가 길어지고 교각부에 집중되던 힘이 양쪽 교대부로 분산되는 현상이 발생하여 교대부에 발생하는 최대 밀면전단력의 크기는 다소 증가하지만 사교의 전체 밀면전단력, 교각부에 발생하는 최대밀면전단력 그리고 거더의 유효응력 등이 감소되는 등 바람직한 지진거동이 유발된다.
- (2) 하부구조의 유연성이 커질수록, 사교의 전반적인 지진거동에 미치는 하부구조의 영향이 증가하여 받침배치 변경에 따른 긍정적인 지진거동 효과가 감소한다. 즉, 교각 높이가 7m일 때 받침배치 변경에 따른 긍정적인 지진거동 효과는 사각 30°, 45° 사교의 경우 하부구조가 고려되지 않을 때보다 약간 감소하며 교각 높이가 10m일 때 감소 현상이 두드러진다. 비록 하부구조의 유연성이 커질수록 받침배치 변경에 따른 긍정적인 지진거동 효과가 감소하는 경향이 있지만, 본 연구에서 제안한 받침배치 Case B, Case C를 적용할 경우 교각 높이 7m 사교의 경우에는 사각에 관계없이 모든 사교들에서, 교각 높이 10m 사교의 경우에는 사각 60°인 사교들에서 지진성능이 향상됨을 알 수 있었다.

본 연구에서는 받침배치 변경에 따른 연속 플레이트 거더 사교의 지진거동 변화를 분석하기 위해 편의상 하부구조에 대해서는 교각의 유연성만을 고려하였으나 교대와 교각의 상대적인 강성의 차이에 따라 사교의 지진거동 변화가 예상되므로 향후 연구에서는 교대와 교각의 상대적인 강성이 고려되어야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 대구한의대학교 기린연구비에 의하여 연구되었기에 이에 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

1. 대한토목학회, 도로교설계기준, 대한토목학회, 2010.
2. 대한토목학회, 도로교표준시방서, 대한토목학회, 1996.
3. 조창백, 광임중, 김영진, “지진격리받침의 전단특성 및 온도의 존성에 대한 실험적 연구”, 한국전산구조공학회논문집, 제21권 제1호, 2008, pp.67-77.
4. 유니슨, 교량형 원형 납고무받침 설계 제원표, (주) 유니슨, 2001.
5. 최승호, 한경봉, 박선규, “StLRB 지진격리장치를 적용한 교량의 거동특성과 비교분석”, 한국구조물진단학회논문집, 제8권 제1호, 2004, pp.139-146.
6. AASHTO, Guide Specifications for Seismic Isolation Design, American Association of State Highway and Transportation Officials, 1999.
7. Canadian Standards Association, Canadian Highway Bridge Code - Final draft, Toronto, 2000.
8. Charles, R. F. and Thomas, A. D., “Bridge Modal Properties Using Simplified Finite Element Analysis”, Journal of Bridge Engineering, vol. 3, No. 1, 1998, pp.38-46.
9. Dicleli, M., “Seismic Design of Lifeline Bridge using Hybrid Seismic Isolation”, Journal of Bridge Engineering, vol. 7, No. 2, 2002, pp.94-103.
10. Ebeido, T. and Kennedy, J. B., “Girder Moments in Simply Supported Skew Composite Bridges”, Canadian Journal of Civil Engineering, vol. 23, No. 4, 1996, pp.904-916.
11. Huang, H., Shenton, H. W. and Chajes, M. J., “Load Distribution for a Highly Skewed Bridge: Testing and Analysis”, Journal of Bridge Engineering, vol. 9, No. 6, 2004, pp.558-562.
12. Huo, X. S. and Zhang, Q., “Effect of Skewness on the Distribution of Live Load Reaction at Piers of Skewed Continuous Bridges”, Journal of Bridge Engineering, vol. 13, No. 1, 2008, pp.100-104.
13. Hwang, J. S. and Chiou, J. M., “An equivalent linear model of lead-rubber seismic isolation bearings”, Engineering Structure, vol. 18, No. 7, 1996, pp.528-536.
14. Ian, B., Michael, C., Murat, D. and Hamid, G., “Seismic Isolation of Highway Bridges”, MCEER-06-SP07, 2006.
15. Kunde, M. C. and Jangid, R. S., “Effects of Pier and Deck Flexibility on the Seismic Response of Isolated Bridges”, Journal of Bridge Engineering, vol. 11, No. 1, 2006, pp.109-121.
16. Maleki, S., “Free Vibration of Continuous Slab-Beam Skewed Bridges”, Journal of Sound and Vibration, vol. 255, No. 4, 2002, pp.793-803.
17. M. C. Constantinou, I. Kalpakidis, A. Filiatrault and R. A. Ecker Lay, “Lrfd-based Analysis and Design Procedures for Bridge Bearings and Seismic Isolators”, MCEER, 2010.
18. Meng, J. Y., Ghasemi, H. and Lui, E. M., “Analytical and experimental study of a skew bridge model”, Engineering Structures, vol. 26, 2004, pp.1127-1142.
19. Midas information Technology Co. Ltd, MIDAS/CIVIL, South Korea, 2006.

(접수일자 : 2011년 4월 4일)

(수정일자 : 2011년 6월 30일)

(심사완료일자 : 2011년 7월 7일)

요 지

연속교의 교대부와 교각부에 설치되는 받침 용량은 통상적으로 각 지점에 작용하는 최대수직반력의 크기에 따라 결정되며 교각부에 더 큰 용량의 받침이 위치한다. 본 연구에서는 지진격리장치가 적용된 세 가지 받침배치에 따른 사교의 지진거동 변화를 비교·분석하여 연속 사교의 지진성능 향상 가능성을 검토하였다. 기존 받침배치(Case A)를 기준으로 교각부에 설치되는 납고무받침(LRB)의 수평강성에 변화를 주어 세 가지 받침배치(Case A, Case B, Case C)를 선정하였다. 납고무받침 자체의 감소효과가 고려된 hybrid response spectrum을 이용한 응답스펙트럼 해석을 수행하여 총 36개의 연속 플레이트 거더 사교들의 지진거동을 조사하였다. 해석결과 교대부에 설치된 LRB와 유사한 수평강성 또는 작은 수평강성을 가진 LRB를 교각부에 설치할 때 훨씬 바람직한 사교의 지진거동이 유발되었다. 즉, 교각부에 설치되는 LRB의 수평강성 변화는 사교의 고유진동주기를 길게 하고 모드형상에 변화를 유발시켜 전체밀면전단력과 교각부에서의 최대밀면전단력 그리고 거더에 걸리는 응력을 크게 감소시킨다. 비록 하부구조의 유연성이 증가할수록 받침배치 변경에 따른 지진거동의 긍정적인 효과가 다소 감소되지만, 10m 미만의 교각 높이를 가지면서 지진격리받침(LRB)이 설치된 연속 플레이트 거더 사교의 경우 제안된 받침배치는 지진성능 향상을 가져온다.

핵심 용어 : 받침배치, 연속 플레이트 거더 사교, 하부구조의 유연성, 거더 응력, 혼합응답스펙트럼, 납고무받침, 최대밀면전단력, 전체 밀면전단력