

단순 사교의 거동에 미치는 콘크리트 상판과 주형간의 상호작용 효과

Effects of Interactions between the Concrete Deck and Steel Girders on the Behavior of Simply Supported Skew Bridges

문 성 권†

Moon, Seong-Kwon

(논문접수일 : 2005년 12월 2일 ; 심사종료일 : 2006년 5월 30일)

요 지

합성형은 비합성형에 비해 역학적 측면에서 큰 장점을 지닌 것이 사실이지만 사각이 심한 사교들의 경우 합성형은 매우 큰 상판응력을 유발할 수 있기 때문에 종종 이들 사교들에 대한 비합성형 설계가 검토되어지곤 한다. 하지만 이러한 비합성형은 상판과 주형 경계면에서의 미끄러짐(slip)과 같은 구조적인 문제점을 지니고 있어 현장에 적용하기에는 다소 어려움이 있다. 본 연구에서는 사교들의 전반적인 거동에 영향을 미치는 상판과 주형간의 두 가지 상호작용(합성작용과 비합성작용) 효과를 분석하여 사각이 심한 사교들에 대한 합성형의 적용 타당성을 조사하였다. 주형간격, 사각, 상판 종횡비를 매개변수로 총 27개의 단순지지된 사교들에 대한 일련의 연구를 수행하였다. 이전 연구에서 제안된 바 있는 받침들간의 강성조정 개념을 이용하여 합성형 사교의 거동을 개선시킬 수 있는 가능성도 함께 검토하였다. 해석결과로부터 비합성 사교들보다 합성형 사교들에서 훨씬 바람직한 거동이 나타나며 받침들간의 강성조정 방법은 보다 합리적이고 경제적인 합성형 사교 및 하부구조의 설계를 가능하게 해준다.

핵심용어 : 합성형, 비합성형, 콘크리트 상판, 주형, 상판응력, 받침, 강성조정

Abstract

Although composite construction has many mechanical advantages over noncomposite construction, the design of noncomposite construction for skew bridges with large skew angles has been often checked because composite construction caused large stresses in the bridge deck. But there is somewhat difficulty to apply noncomposite construction in the field because of the structural problem such as the slip at the interface between the concrete deck and steel girders. In this study, the validity of the application of the composite construction to skew bridges with large skew angles is investigated by analyzing effects of two interactions such as composite and noncomposite actions between the concrete deck and steel girders on the behavior of skew bridges. A series of parametric studies for the total 27 simply supported skew bridges was conducted with respect to parameters such as girder spacing, skew angle, and deck aspect ratio. The improvement of the behavior of composite skew bridges was examined by using the concept of the stiffness adjustment of bearings which I suggested in previous research. Results of analyses show that a more desirable behavior of skew bridges can be obtained from composite construction instead of noncomposite construction and the method of the stiffness adjustment of bearings results in a more rational and economical design of composite skew bridges and substructures.

keywords : composite construction, noncomposite construction, concrete deck, steel girders, deck stresses, bearings, stiffness adjustment

1. 서 론

예비 설계단계에서 교량의 기하학적 평면 형태는 주어진

제한 여건에 따라 직선교, 곡선교 그리고 사교로 크게 구분되어진다. 가능하다면 직선교로 설계하는 것이 상부구조물과 하부구조물의 구조 특성상 바람직하지만, 선형상 피할 수 없

† 책임저자, 정회원 · 대구한의대학교 건축토목설계학부 부교수
전화: 053-819-1509 ; Fax: 053-819-1273
E-mail: skmoon@dhu.ac.kr

• 이 논문에 대한 토론을 2006년 9월 30일까지 본 학회에 보내주시며 2006년 12월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

는 경우나 도로에 대하여 비스듬히 교차하는 사면 등으로 굴착 토량을 현저히 감소시킬 수 있는 경우에는 사교를 적용하는 것이 더 합리적일 수도 있다. 하지만 이러한 사교는 기하학적 평면형상으로 인하여 직선교보다 훨씬 복잡한 거동을 보인다. 즉, 상부구조물에 휨과 비틀림이 동시에 작용하여 인근 주형간에 상대적인 솟음 현상이 유발되고 주형에 걸리는 휨모멘트는 직선교에 비해 다소 작지만 가로보에 걸리는 휨모멘트와 전단력은 직선교에 비해 다소 큰 값이 발생한다. 또한 둔각부 받침에 수직반력이 집중되는 현상이 발생하고 사각이 심한 사교에서는 예각부 받침에 부반력이 유발될 수도 있다. 이런 부반력의 영향으로 사교 단부에 부모멘트가 발생하고 이는 콘크리트 상판에 과도한 인장력을 유발시키는 문제점을 가져올 수 있어 이들 사교들에 대한 비합성형 설계가 검토되어지곤 한다. 하지만 비합성형으로 시공될 경우, 상판과 주형 경계면에 설치된 앵커로서는 힘을 전달할 수 없으며 상판의 자중에 의한 상판과 주형 경계면에 발생하는 마찰력도 그다지 크지 않아 구속력을 기대하기 어려워 상판과 주형사이의 미끄러짐에 대한 보강이 절실히 요구되고 있으며 기존 비합성형 교량이 현재의 중량화된 차량하중을 제대로 지지하지 못한다는 지적도 제기되고 있다(Lin 등, 1994). 이에 반해 주형의 상부플랜지에 용접으로 부착된 전단 연결재(shear connector)를 콘크리트 상판 속에 매립시킴으로서 외부하중에 대하여 상판과 주형이 함께 저항하도록 한 합성형 판형 사교는 비합성형에 비해 단면이차모멘트의 증가를 가져오고 이는 부재내에 발생하는 응력의 감소와 처짐 감소 그리고 주형의 높이를 줄일 수 있어 경제적인 설계가 가능하도록 해준다.

합성형 사교의 이러한 역학적인 이점 때문에 수많은 연구들(Chung 등, 2005; Dennis 등, 2005; Methee 등, 2004)이 합성 판형교를 중심으로 진행되어 왔었다. Chung(2005)은 3차원 비선형 유한요소해석을 이용하여 합성 판형교의 거동을 분석하였다. 이때 상판과 주형은 각각 Mindlin 쉘요소와 Timoshenko 보요소로서 모형화되었고 상판과 주형간의 합성작용은 multipoint constraints로서 고려되었다. 또한 여러 층(layer)을 고려하여 부재 깊이에 따른 균열과 항복을 감안함으로써 균열발생, 극한 강도와 균열 양상 등을 예측할 수 있는 3차원 비선형 유한요소모델을 제시한 바 있다. Dennis(2005)는 상판과 주형 경계면에서의 하중과 미끄러짐과의 관계와 합성 작용하에서의 전단연결재의 전단강도 등이 인발시험의 결과 자료에 한정되어 있다는 점에 착안하여 유한요소법을 이용하여 인발시험을 재현할 수 있는 효율적인 수치모델을 제안하였다. Methee(2004)는 전단지연 현상과 관련되어 사용되고 있는 기존의 유효폭 식은 상판 두께의 절반에 해당되는 위치에서의 전단지연을 감안한 평면응력 분포

를 기준으로 유도되어 상판의 깊이에 따른 응력 변화가 고려되어 있지 않은 점에 착안하여 상판의 깊이에 따른 응력 변화를 감안한 새로운 유효폭 개념을 소개하였다. 사교의 대표적인 연구로서는 Ebeido(1996)에 의해 진행된 단순 합성교의 반력 특성 및 주형의 휨모멘트 평가를 들 수 있다. 이 논문에서는 주형 간격만을 고려했던 종래의 연구와는 달리 사교의 거동에 영향을 미치는 매개변수들(주형 간격, 상판 종횡비, 차선수, 사각, 가로보 등)의 영향이 고려되었으며 OHBDC 트럭하중과 사하중에 대한 지점반력 및 휨모멘트 분포계수 그리고 관련 경험식들이 제시되었다. Meng(2002)는 상판의 비틀림 모드를 재현시켜 보다 정확한 사교의 고유진동수와 고유모드의 예측 그리고 상부구조의 변위와 하부구조에 작용하는 내력을 평가할 수 있는 개선된 막대모델(stick model)을 제안하였다. Meng(2004)은 36°의 사각을 가지는 사교를 대상으로 모형실험에서 구한 결과들(정적 변위, 고유진동수, 모드 형상, 감쇠비)과 그들이 개발한 이중-보(dual beam) 막대모델로부터 구한 결과들을 서로 비교하여 개발 모델의 신뢰성을 입증하고자 하였다.

현재까지 사교와 관련된 대부분의 연구들은 주어진 합성 또는 비합성 사교의 거동 특성을 파악하는 것이 주를 이루며 사교의 거동을 개선시키려는 목적으로 추진된 연구는 찾아볼 수 없다. 앞서 언급된 바와 같이 사각이 심한 사교들의 경우 합성형은 매우 큰 상판응력을 유발할 수 있기 때문에 종종 이들 사교들에 대한 비합성형 설계가 검토되어지긴 하지만 이러한 비합성형은 상판과 주형 경계면에서의 미끄러짐(slip)과 같은 구조적인 문제점을 지니고 있어 현장에 적용하기에는 다소 어려움이 있다. 본 연구에서는 사교들의 거동에 영향을 미치는 상판과 주형간의 상호작용(합성작용, 비합성작용) 효과를 분석하여 심한 사각을 가지는 사교들에 대한 합성형의 적용 타당성을 조사하였다. 아울러 이전 연구(문성권, 2003)에서 제안된 바 있는 받침들간의 강성조정 방법을 이용하여 합성형 사교의 거동을 개선할 수 있는 가능성도 함께 분석하였다.

2. 콘크리트 상판과 주형간의 상호작용

2.1 합성작용, 비합성작용, 부분합성작용

콘크리트 상판과 주형간의 상호작용은 대체적으로 상판과 주형사이 경계면에서의 연결 정도(degree of connection)에 따라 좌우되며 크게 세 가지로 구분되어질 수 있다(Joseph 등, 1997). 첫째는 상판과 주형 사이에 상호작용이 전혀 존재하지 않는다고 간주하는 비합성작용(noncomposite action)으로서 이때 부재의 극한강도는 단지 주형의 소성 내력으로 결정된다. 하지만 상판과 주형사이 경계면에서의 부착과 마찰력

때문에 사용하중하에서는 합성으로 거동하려는 경향이 있으나 콘크리트속에 강재가 충분히 매립되어 있지 않는 이상 부차과 마찰은 신뢰할 수 없으며, 관련 시방서(AASHTO, 1983; CSA, 1989; OHBDC, 1991)에서도 이들 효과를 고려하지 않고 있다. 둘째는 상판과 주형 사이에 완전한 상호작용이 발휘되어 상판과 주형사이 경계면에서 불연속적인 변형률이 존재하지 않는 합성작용(composite action)이다. 이때 주형과 상판은 외부하중에 대하여 단일 부재로서 거동하게 되며 이러한 거동하에서는 전단연결재의 축방향 강성과 휩강성 그리고 전단 강성이 무한대가 되어야 하지만 이를 만족시킬 수 있는 전단연결재는 현실적으로 존재하지 않는다. 셋째는 이상적인 두 가지 작용(합성작용, 비합성작용)이 아닌 실제 거동에 가장 잘 부합되는 부분합성작용(partial composite action)이 그것이다. 이때 부재 강도는 두 가지 작용에 대한 선형 보간으로부터 구해질 수 있으며 시방서에서는 단면이 설계강도에 도달한 이후에도 얼마간의 연성(ductility)을 확보하려는 측면에서 완전 합성작용의 25%~50%를 최소값으로 규정하고 있다. 참고로 충분한 합성작용이 확보되지 않을 경우 상판과 주형사이 경계면에서 갑작스런 전단파괴가 발생할 수도 있다(Johnson 등, 1991). 본 연구에서는 설계목적상 현재 적용되고 있는 비합성작용과 합성작용을 사용하여 상판과 주형간의 상호작용에 따른 사교의 거동 변화를 조사하였다.

2.2 상판과 주형간의 상호작용에 관한 모형화

다양한 사각을 가지는 사교들의 복잡한 거동을 파악하기 위해 본 연구에서는 범용 구조해석 프로그램인 MIDAS/CIVIL을 사용하여 3차원 유한요소 해석모델을 작성하였다. 앞서 언급된 상판과 주형간의 상호작용을 모형화하기 위해서는 상판과 주형 경계면을 나타낼 필요가 있으며 이는 하나의 주형을 한 개의 3차원 보로 나타내는 기존의 모형화로서는 불가능하므로 상판, 주형 상·하 플랜지, 주형 복부 등을 plate/shell 요소들을 사용하여 모형화하였다. 콘크리트 상판을 나타내는 판요소의 절점들과 주형 상부 플랜지를 모형화한 판요소의 관련 절점들을 MIDAS/CIVIL 프로그램에서 지원하는 "rigid link" 기능을 사용하여 서로 연결시킴으로서 사교의

합성작용을 모형화하였다. 이때 사용되는 rigid link는 두 절점 사이를 강체로 연결시켜주며 이러한 모형화는 외부하중에 대하여 주형과 상판이 하나의 부재로서 저항할 수 있도록 해준다. 또한 동일 프로그램에서 지원하는 "elastic link" 기능을 사용하여 상판과 주형 경계면에서의 미끄러짐을 재현함으로써 비합성작용 해석모델을 제안하였다. 이때 사용된 elastic link의 강성은 부재 축방향의 강성과 부재축에 직교하는 평면의 두 축에 대한 전단강성 그리고 각 방향별 회전 강성으로 구성된다. 상판으로부터 전달되는 수직하중이 주형에 전달될 수 있도록 elastic link의 축방향에 대한 강성은 매우 큰 값(1.0^9)을 부여하고 경계면에서의 미끄러짐을 재현하기 위해서 교축방향과 관련된 축에 대한 전단강성은 0에 가까운 값을 부여하였다. 상판과 주형 상부플랜지의 두께 차이가 클 경우에 전단 스프링의 위치는 교량의 전반적인 거동(처짐, 상판응력, 주형응력)에 영향을 미칠 수 있으므로 본 연구에서는 전단 스프링의 정확한 위치 설정이 가능한 MIDAS/CIVIL의 elastic link 기능을 사용하였다.

3. 수치 예제

교량의 거동에 큰 영향을 주는 인자로서 사각(skew angle), 상판 종횡비, 주형간격 등을 매개변수로 고려하여 이들 매개변수의 변화에 따른 두 가지 작용(합성작용, 비합성작용)하에서의 사교의 거동을 비교·분석하였다. 사각으로서는 사교로 간주되는 사각 30°, 45°, 60°의 세가지를 고려하였다. 본 연구에서 사용되는 사각은 받침선의 중심선과 교축직각방향이 이루는 사이각으로 정의한다(AASHTO LRFD, 1996). 상판 종횡비로서는 상판의 일방향 및 이방향 거동 모두를 감안할 수 있도록 1:1.5, 1:2.0, 1:2.5 세 가지를 고려하였으며 이때 지간은 각각 14.4m, 19.2m, 24.0m이다. 참고로 본 연구에서 언급되는 상판 종횡비는 교량의 횡방향 길이를 고정시킨 상태에서 종방향 길이를 변화시켜 결정하였다. 주형간격으로서는 1.8m, 2.4m, 3.6m 세가지를 감안하였다. 따라서 본 연구에서는 합성형, 비합성형 거동의 차이를 분석하기 위하여 총 54개(3×3×3×2)의 해석모델을 고려하였다. 주형간격 3.6m를 가지는 사교의 횡단면은 그림 1과 같

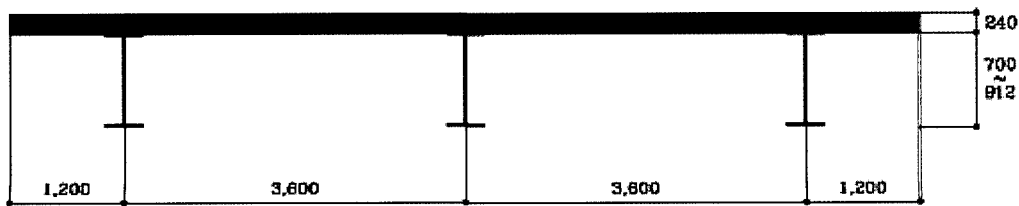


그림 1 사교의 횡단면도(주형간격 3.6m)

표 1 부재 단면치수(mm)

부재	지간	단면 치수(폭 x 두께)	설치 위치
주형	14.4m	플랜지 : 220 × 14~16 복부 : 750 × 12	-
	19.2m	플랜지 : 260 × 14~16 복부 : 1000 × 12	-
	24.0m	플랜지 : 300 × 14~16 복부 : 1250 × 12	-
하중 분배 가로보	19.2m	플랜지 : 200 × 14 복부 : 600 × 12	경간 중앙
	24.0m	플랜지 : 200 × 14 복부 : 1000 × 12	경간 중앙
단부수직브레이싱	14.4m	상현재 : □300×90×12×16 사재 : 2-L150×150×12 하현재 : L130×130×9	양쪽지점(역V형)
	19.2m		
	24.0m		
중간수직브레이싱	14.4m	상현재 : L130×130×9 사재 : 2-L100×100×10 하현재 : L130×130×9	V형 14.4m : L/4, L/2, 3L/4 19.2, 24.0m : L/4, 3L/4
	19.2m		
	24.0m		

으며 사교를 구성하는 각 부재들의 제원은 그림 1과 표 1에 잘 나타나 있다. 그림 1의 횡단면에 나타나 있지 않는 보도와 난간 단면에 대한 하중효과는 사하중으로 고려되었다. 활하중으로서는 AASHTO LRFD (1996)에 규정된 design truck, design tandem, design lane 하중들을 감안하였다.

3.1 사교의 3차원 해석모델

3.1.1 사교 구성요소의 모형화

사교의 복잡한 거동을 파악하기 위해 본 연구에서는 기존의 여러 해석방법들(격자법, 유한대판법, 유한요소법) 중에서 유한요소법을 사용하였으며 이를 위해 범용 구조해석 프로그램인 MIDAS/CIVIL을 이용하여 3차원 유한요소모델들을

작성한 후 해석을 수행하였다. 교량의 구성요소들 중 상판의 경우 막작용(membrane action)과 휨작용(bending action)을 동시에 고려하기 위해 4절점 plate/shell 요소를 사용하였다. AASHTO LRFD(1996) 시방서에서는 해석모델에 사용되는 plate/shell 요소의 종횡비를 최대 5.0으로 보고 있으나 이 방법으로는 사교와 같은 복잡한 거동을 표현하기에 무리가 있을 것으로 판단되어 가급적 1.0에 가까운 요소 종횡비로 모형화하였다. 또한 주형의 상부 플랜지, 하부 플랜지, 복부에 대해서도 4절점 plate/shell 요소로 모형화하였다. 수직브레이싱의 상현재, 하현재, 사재들과 하중 분배 가로보는 3차원 보요소로 모형화하였다. 그림 2는 각각 45°, 지간 19.2m(종횡비 1:2.0), 주형간격 3.6m와 관련된 3차원 유한해석모델을 나타낸다.

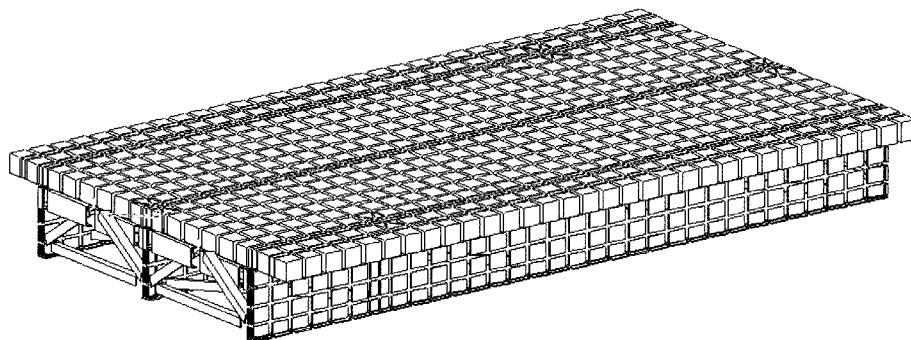


그림 2 3차원 유한요소모델

3.1.2 해석모델의 검증

두 가지 형식(비합성형, 합성형)의 해석모델에 대한 신뢰성을 검증하기 위해 상판과 주형 경계면에서 미끄러짐이 발생하는 비합성형에 대해서는 상판의 상면과 하면에 발생하는 응력을 서로 비교하고, 외부하중에 대하여 상판과 주형이 단일 부재로 거동하는 합성형의 경우에는 상판과 주형 상부 플랜지를 서로 연결시킨 rigid link와 관련된 두 절점에서의 수직 처짐과 세방향(교축방향, 교축직각방향, 상판 평면에 수직인 방향)에 대한 회전각을 비교하였다. 그림 3은 사각 45°, 주형간격 1.8m, 지간 19.2m(중형비 1:2.0)의 사교에 대한 해석결과 중 내부 및 외부 주형과 연결된 상판의 상면과 하면에 작용하는 교축방향 응력(σ_{XX})을 지간을 따라 나타낸 것으로서 상판의 상면과 하면에 걸리는 응력이 거의 동일한 값을 알 수 있으며 이는 상판과 주형 경계면에서의 미끄러짐이 제대로 구현된 것을 의미한다. 또한 합성형으로 모형화한 동일 사교의 경우에도 rigid link로 연결된 두 절점들에서 동일한 수직 처짐과 회전각이 나타남을 확인할 수 있었다.

3.2 탄성받침의 설계

본 연구에서는 받침으로서 하중의 전달이 효과적이며 전

단변형에 의한 이동과 탄성변형에 의한 회전이 가능하며 내구성과 유지관리 측면에서 우수한 것으로 알려진 강재보강 탄성받침(steel-reinforced elastomeric bearings)을 사용하였다. 강재보강 탄성받침은 고무층과 강재 보강층을 함께 부착하여 여러 층으로 구성되는 비교적 간단한 형식의 받침으로서 관련 규정에 따르면 사용되는 고무의 전단탄성계수(G)는 0.6~1.2MPa이며, 공칭경도는 50~60정도이다. AASHTO LRFD(1996) 시방서에 준하여 탄성받침을 설계할 때에는 압축응력, 압축처짐, 전단변형, 압축과 회전 및 안정성 등의 요구조건이 만족되어야 한다. 표 2는 본 연구에 사용된 탄성받침의 제원과 각 방향별 강성을 나타내며 이들 탄성받침들은 AASHTO LRFD(1996) 규정의 모든 요구조건들을 만족시키도록 설계되었다.

3.3 상판과 주형간의 상호작용 효과

사교의 거동에 미치는 콘크리트 상판과 주형간의 상호작용 효과를 파악하기 위해 두 가지 조건(합성작용, 비합성작용)으로부터 구한 해석결과들 중에서 설계인자로서 중요한 최대 수직변위, 둔각부 받침에서의 수직반력, 상판에 걸리는 최대응력 및 주형에 걸리는 최대응력 등을 고려하였다. 그림 4~7의 종축에 나타난 변위비, 반력비, 응력비는 자중 조건

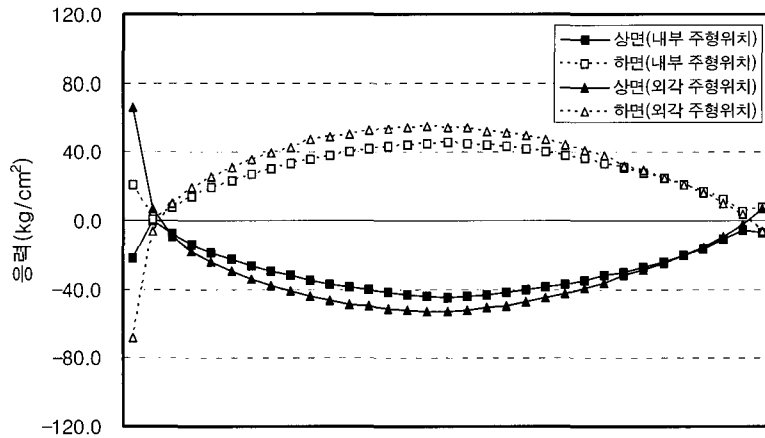


그림 3 상판의 상면과 하면에 걸리는 응력

표 2 AASHTO LRFD(1996) 시방서에 준하여 설계된 탄성받침의 제원 및 방향별 강성

지간 (m)	받침제원 (폭×길이) (cm×cm)	전단강성(KN/m)		압축강성(KN/m) 상판수직방향	회전강성(KN·m/rad)		
		교축방향	교축직각방향		교축방향	교축직각 방향	상판수직 방향
14.4	17.5×13.0	4773.6	4773.6	1688354.0	27747.6	15312.4	117.7
19.2	19.0×13.0	5800.7	5800.7	1379898.1	26732.3	12514.6	159.9
24.0	19.0×13.5	5989.0	5989.0	1131740.5	11068.6	21925.4	169.7

하에서 합성 및 비합성형 사교로부터 구한 해석결과를 합성형 직선교로부터 구한 해석결과로 나눈 값을 의미한다. 활하중과 관련된 해석결과 그림들은 전반적으로 자중과 유사하여

본 연구에서는 생략하였다.

주형 처짐의 경우 그림 4에서 보는 바와 같이 사각이 심할수록 변위비가 감소(주형의 처짐량이 감소)하는 것을 확인

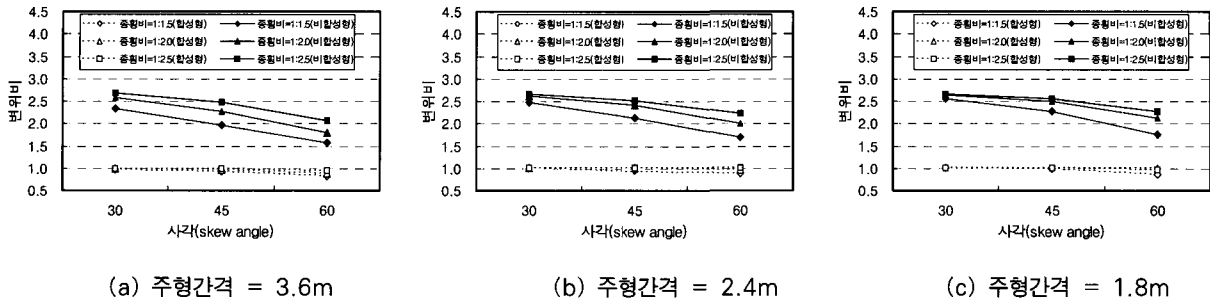


그림 4 주형의 수직 처짐에 미치는 상판과 주형간의 상호작용 효과(하중조건=자중)

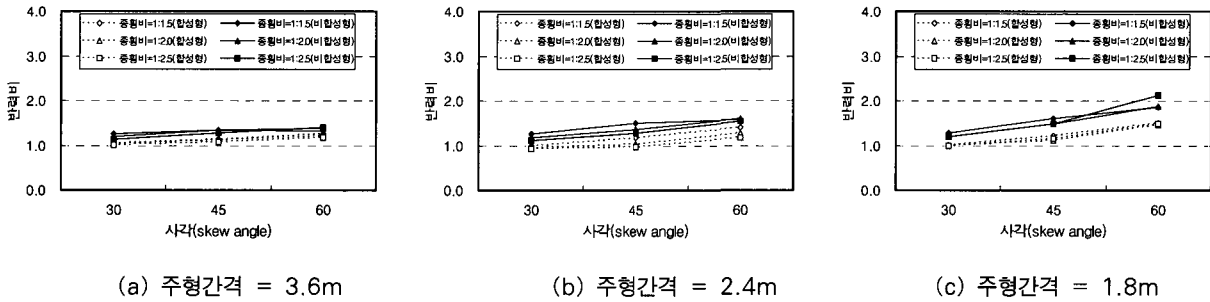


그림 5 둔각부 받침의 수직반력에 미치는 상판과 주형간의 상호작용 효과(하중조건=자중)

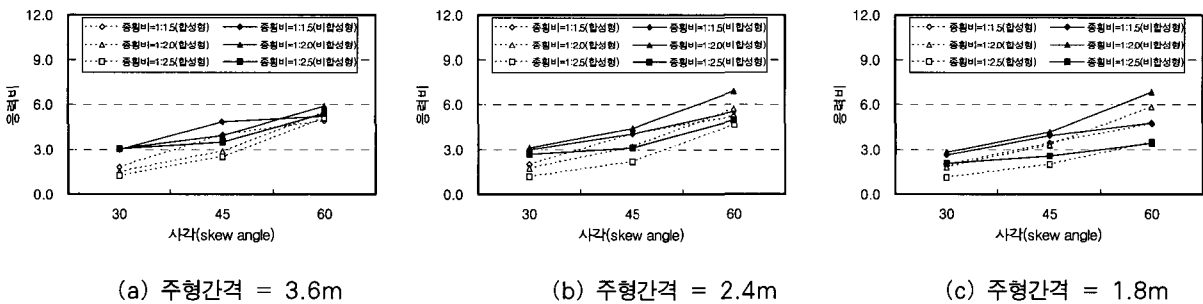


그림 6 상판응력에 미치는 상판과 주형간의 상호작용 효과(하중조건=자중)

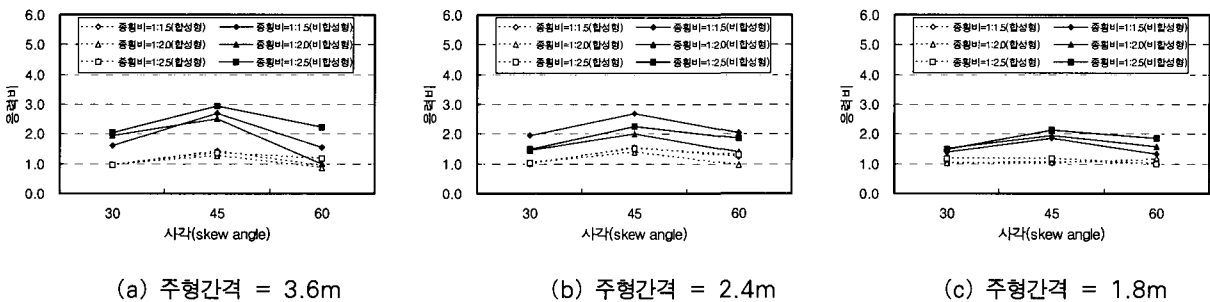


그림 7 주형응력에 미치는 상판과 주형간의 상호작용 효과(하중조건=자중)

할 수 있으며 특히 사교를 비합성형으로 설계할 경우에는 합성형으로 설계할 때보다 1.5~2.7배 큰 주형 처짐이 유발되며 큰 종횡비를 가지는 사교에서 상대적으로 더 큰 주형 처짐이 발생한다. 사교 거동 특성중 하나인 둔각부 받침에서의 수직반력은 그림 5에서 보는 바와 같이 사각이 심할수록 둔각부 받침에서의 수직반력 집중현상이 두드러지며 사교를 비합성형으로 설계할 경우에는 합성형으로 설계할 때보다 이러한 현상이 더 심하게 나타난다. 특히 주형간격이 좁은 사교(그림 5(c))를 비합성형으로 설계할 때에는 매우 큰 수직반력이 발생함과 동시에 설계시 피해야 할 부반력이 인근 받침에 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 주형간격 1.8m, 사각 60°, 종횡비 1:2.5의 비합성형 사교의 둔각부에 걸리는 수직반력은 합성형으로 설계했을 때보다 약 1.5배 크게 나타난다. 사교의 상판에 발생하는 상판응력은 그림 6에서 보는 바와 같이 직선교에 비해 상대적으로 매우 큰 값(1배~7배)을 보이며 이러한 상판응력은 사각이 심할수록 증가하는 경향을 보인다. 상판 응력비의 변화에 일관된 경향을 찾아보기는 힘들지만, 전반적으로 비합성형의 응력비가 합성형의 응력비보다 큰 값을 나타내며 사각이 심해질수록 합성형과 비합성형의 응력비의 차이는 점차적으로 줄어드는 경향이 있다. 주형응력의 경우 그림 7에서 보는 바와 같이 합성형 사교의 주형에 발생하는 응력의 크기는 직선교에서 발생하는 주형의 응력비와 전반적으로 유사하게 나타나지만 비합성형 사교에서는 예상한 바와 같이 다소 큰 주형응력(1.5~3.0배)이 유발된다. 이는 합성형 사교의 경우 외부하중에 대하여 상판과 주형이 하나의 부재로서 저항하는데 반해 비합성형 사교는 상판과 주형이 독자적으로 외력에 저항하기 때문이다. 활하중에 대한 해석결과는 전반적으로는 자중과 유사한 결과를 보이지만 주의할 점은 사교의 거동이 뚜렷하게 나타나는 사각이 심하면서 종횡비가 작고 주형간격이 넓은 경우(예를 들어 사각 60°, 종횡비 1:1.5, 1:2.0, 주형간격 3.6m, 2.4m)에 합성형 사교의 상판응력이 비합성형 사교의 상판응력보다 최대 1.38배 정도 크게 나타날 수 있다는

것이다. 하지만 여러 하중조합을 감안할 때 비합성형 사교의 최대 상판응력값이 합성형 사교의 최대 상판응력값보다 다소 크게 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 사각, 주형간격 그리고 상판 종횡비에 무관하게 비합성형 대신 합성형으로 설계하는 것이 보다 합리적이며 경제적인 설계가 될 수 있다.

3.4 받침들간의 강성변화에 따른 사교의 전반적인 거동 변화

위의 해석결과로부터 확인된 바와 같이 합성형 사교들에서 훨씬 바람직한 사교의 거동이 나타나지만 이들 거동을 직선교의 거동과 비교해 볼 때 둔각부 받침에서의 수직반력과 상판응력은 여전히 큰 값이 유발된다. 이러한 문제점을 극복하기 위해 본 연구에서는 이전 연구(문성권, 2003)에서 제시된 바 있는 받침들간의 강성조정 개념을 이용하여 합성형 사교의 거동을 개선할 수 있는 가능성을 검토하였다. 받침들간의 강성조정 방법의 기본 개념은 수직반력이 상대적으로 크게 발생하는 둔각부 받침의 수직강성을 인근 받침의 수직강성보다 감소시키는 것으로서 현실성을 감안하여 약 10배의 강성 차이를 고려하였다. 그림 8~11의 종축은 받침들간의 수직강성 차이를 고려하지 않은 기존 합성형 사교의 해석결과를 수직강성 차이를 감안한 합성형 사교의 해석결과로 나눈 값이다. 그림 8에서 보는 바와 같이 주형에 발생하는 수직처짐은 예상한 바와 같이 둔각부에 설치된 작은 수직강성으로 인하여 다소 증가하며 사각이 심할수록 이러한 현상은 두드러져 사각 60°, 종횡비 1:1.5, 주형간격 1.8m 사교의 주형 처짐의 증가량은 대략 8% 정도이다(그림 8(c) 참조). 그림 9에서 알 수 있듯이 받침의 수직강성 조정에 따른 상판응력의 변화는 매우 긍정적인 결과를 가져와 기존의 동일한 수직강성을 설치한 경우보다 10~25% 정도의 상판응력 감소 효과가 발생한다. 이러한 상판응력의 감소 효과는 둔각부 위치에 설치되는 받침의 수직강성을 감소시킴으로서 상판에 걸리는 전단력과 비틀림이 감소되었기 때문인 것으로

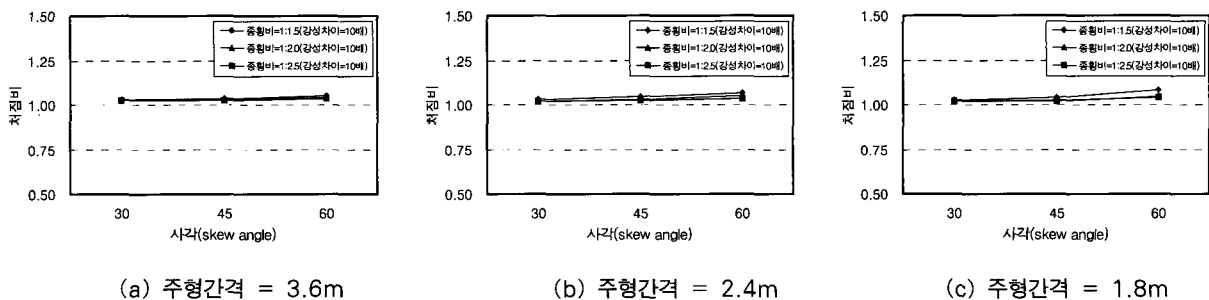


그림 8 주형의 수직처짐에 미치는 받침들간의 수직강성 차이 효과(하중조건=자중)

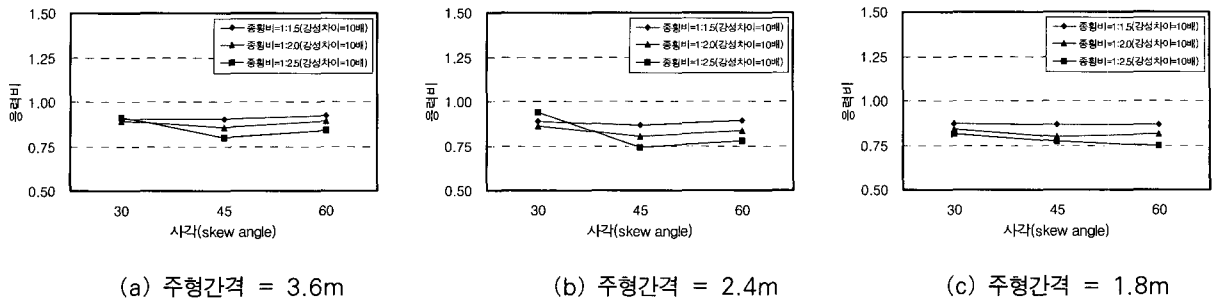


그림 9 상판 응력에 미치는 받침들간의 수직강성 차이 효과(하중조건=자중)

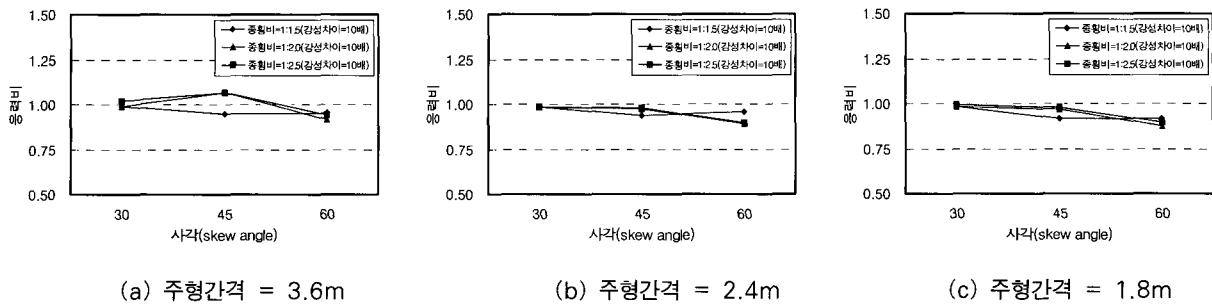


그림 10 주형 응력에 미치는 받침들간의 수직강성 차이 효과(하중조건=자중)

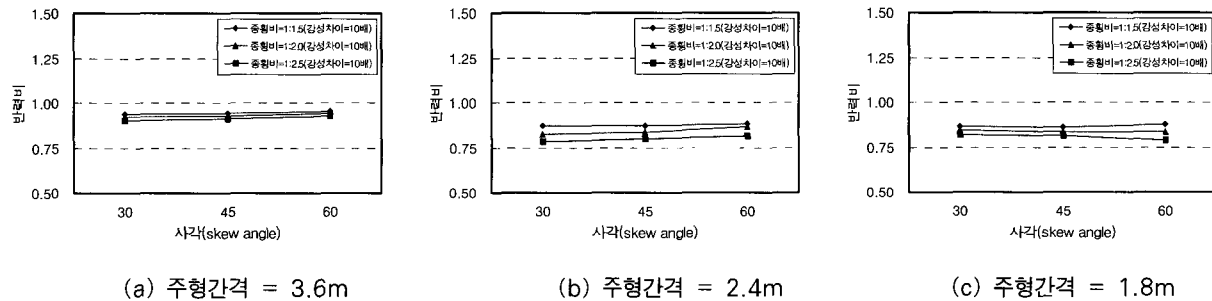


그림 11 둔각부 수직반력에 미치는 받침들간의 수직강성 차이 효과(하중조건=자중)

판단된다. 아울러 그림 10에서 보는 바와 같이 주형간격 3.6m이면서 사각 45°를 가지는 몇몇 사교를 제외하고는 받침들간의 수직강성 조정은 주형에 발생하는 응력을 감소시키며 특히 사각이 심한 사각 60°에서 감소 효과가 크게 나타난다. 활하중이 작용할 때 주형 처짐비, 상판 응력비 및 주형 응력비에 대한 받침들간의 강성조정 효과는 주형간격이 좁은 경우에 크게 발생하는 경향이 있으며 특히 상판응력의 경우 약 15% 정도의 감소효과가 나타남을 확인할 수 있었다. 받침들간의 강성조정은 그림 11과 같이 사교의 기하학적 형상에 기인된 둔각부 받침에서의 수직반력 집중화 현상을 현저히 감소시켜줄 뿐만 아니라 그림 12에서 보는 바와 같이 편차가 심한 사교의 수직반력 분포를 직선교의 수직반력 분포와 유사하게 변경시켜줌으로서 보다 경제적인 하부구

조 설계가 가능해진다.

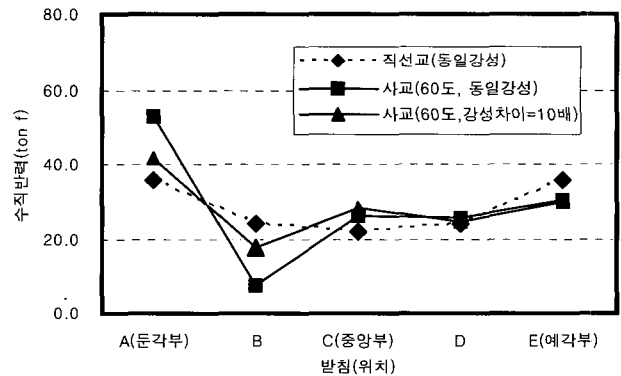


그림 12 받침들간의 강성조정에 따른 수직반력 분포 변화(하중조건=자중)

4. 결 론

사각이 심한 사교들의 경우 합성형은 매우 큰 상판응력을 유발할 수 있어 종종 이들 사교들에 대한 비합성형 설계가 검토되어지긴 하지만 이러한 비합성형은 상판과 주형 경계면에서의 미끄러짐(slip)과 같은 구조적인 문제점을 지니고 있어 현장에 적용하기에는 다소 어려움이 있다. 본 연구에서는 다양한 사교들에 대하여 두 가지 거동(비합성작용, 합성작용)을 고려한 해석모델들을 작성하여 각 모델로부터 구한 사교의 거동(둔각부 반력, 최대 변위, 주형응력, 상판응력)을 서로 비교한 후 사각이 심한 사교들에 대한 합성형의 적용 타당성을 조사하였다. MIDAS/CIVIL 프로그램내의 elastic link 기능을 사용하여 콘크리트 상판과 주형 경계면에서의 미끄러짐을 고려함으로써 사교의 비합성작용을 재현할 수 있는 해석모델을 제안하였다. 사교 거동에 큰 영향을 미치는 주형간격, 사각, 상판 중횡비 등을 매개변수로 사용하였으며 다양한 사교들에 대한 전반적인 경향을 파악하기 위하여 총 27개의 단순 지지 사교들을 대상 교량으로 선정하였다. 또한 이전 연구에서 제안된 바 있는 받침들간의 강성조정 개념을 이용하여 합성형 사교의 거동을 개선시킬 수 있는 가능성도 함께 검토하였다. 받침들간의 강성차이는 현실성을 감안하여 10배를 고려하였다. 수치해석 결과로부터 다음과 같은 결론을 이끌어낼 수 있었다.

- 1) 외부하중에 대하여 상판과 주형이 독자적으로 저항하는 비합성형 사교는 상판과 주형이 하나의 부재로서 저항하는 합성형 사교에 비해 두가지 하중조건(자중과 활하중)하에서 사교 설계시 고려되는 모든 설계인자들의 값이 크게 발생하였다. 예를 들어 합성형 사교일 때보다 약 1.5~2.7배 더 큰 주형처짐이 유발되고, 사각이 심할수록 크게 발생하는 둔각부 받침에서의 수직반력 집중 현상도 합성형 사교일 때보다 더욱 더 현저하게 발생할 뿐만 아니라 주형간격 1.8m, 사각 60°의 사교들에서는 인근 받침에 부반력도 유발될 수 있다. 합성형 사교의 주형에 걸리는 응력보다 1.5~2.0배 더 큰 주형응력이 비합성형 사교에서 발생하며 합성형 사교보다 비합성형 사교에서 더 큰 상판응력이 유발된다. 따라서 비합성형 대신 합성형으로 설계하는 것이 보다 합리적이며 경제적인 설계가 될 수 있다.
- 2) 받침들간의 수직강성 조정 개념이 사교의 거동에 미치는 영향은 정도의 차이는 있으나 자중과 활하중에 대하여 유사한 경향을 보인다. 받침들간의 수직강성을 조정할 경우 둔각부 받침에 설치된 상대적으로 작은 수직강성으로 인하여 주형처짐이 약간 증가하지만 다

른 거동에서는 긍정적인 결과를 가져온다. 즉, 주형응력은 몇몇 사교를 제외하고는 전반적으로 감소하는 경향을 보이며 상판응력은 약 10~25%(활하중의 경우에는 15% 정도)의 감소 효과가 발생한다. 아울러 둔각부 받침에서의 집중화 현상을 현저히 감소시켜주는 효과와 더불어 받침들간의 편차가 심한 수직반력 분포를 직선교의 수직반력 분포와 유사하게 변경시켜줌으로써 보다 경제적인 하부구조의 설계가 가능해진다.

감사의 글

본 연구는 대구한의대학교 기린연구비에 의하여 연구되었기에 이에 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

- 문성권 (2003) 받침의 강성조정에 의한 사교 지점반력의 재분배, 대한토목학회논문집, 23(2A), pp. 295~304.
- 최창근, 김경호, 김재범 (2001) 정적해석에 의한 표준적인 P.S.C 거더 교량의 적정 가로보 수에 대한 연구, 한국전산구조공학회논문집, 14(1), pp.43~55.
- AASHTO (1983) *Standard Specifications for Highway Bridges*, American Association of State Highway and Transportation Officials.
- AASHTO (1996) *AASHTO LRFD Bridge Design Specifications*, American Association of State Highway and Transportation Officials.
- Chung, W. S., Sotelino, E. D. (2005) Nonlinear Finite-Element Analysis of Composite Steel Girder Bridges, *Journal of Structural Engineering*, AISC, 131(2), pp.304~313.
- CSA (1989) *Design of highway bridges*, CAN/CSA-S6-88, Canadian Standards Association.
- Dennis L. M., Ehab E. L. (2005) Behavior of Headed Stud Shear Connectors in Composite Beam, *Journal of Structural Engineering*, AISC, 131(1), pp.96~107.
- Ebeido, T., Kennedy, J. B.(1996) Girder Moments in Simply Supported Skew Composite Bridges, *Canadian Journal of Civil Engineering*, 23, pp.904~916.
- Johnson, R.P., Molenstra, N. (1991) Partial Shear Connection in Composite Beams for Buildings, *Proceedings, Institution of Civil Engineers*, 91(2), pp.679~704.
- Joseph, P. C., Richard, W. F., Lawrence, G. G., Roberto T. L., Loring, A. W. J. (1997) *Composite Construction Design for Building*,

McGraw-Hill.

Lin, J. J., Beaulieu, D., Fafard, M. (1994) Parametric study on noncomposite slab-on-girder bridges with enforced frictional contact, *Canadian Journal of Civil Engineering*, 21, pp.237~250.

Meng, J. Y., Lui, E. M. (2002) Refined Stick Model for Dynamic Analysis of Skew Highway Bridges, *Journal of Bridge Engineering*, AISC, 7(3), pp.184~194.

Meng, J. Y., Ghasemi, H., Lui, E. M. (2004) Analytical and experimental study of a skew bridge model, *Engineering Structures*, 26, pp. 1127~1142.

Methee C., Amjad J. A., Stuart S. C., Ahn, I. S. (2004) Effective Flange Width Definition for Steel-Concrete Composite Bridge Girder, *Journal of Structural Engineering*, AISC, 130(12), pp.2016~2031.

Midas information Technology Co. Ltd., MIDAS/CIVIL, South Korea.

O'Brien, E.J., Keogh, D.L. (1999) *Bridge Deck Analysis*, E&FN SPON.

OHBC (1991) *Ontario highway bridge design code*, Ontario Ministry of Transportation and Communications.

Yam, L. P. (1981) *Design of composite steel-concrete structures*, Surrey University Press.