

주형과 상판과의 상호작용이 단순 사교의 동적거동에 미치는 영향

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

문 성 권*

Moon, Seong-Kwon

(논문접수일 : 2007년 4월 30일 ; 심사종료일 : 2007년 8월 27일)

요 지

합성형 사교는 비합성형 사교에 비해 역학적 측면에서 큰 장점을 지니고 있는 것이 사실이지만 사각이 심한 사교들의 경우 합성형 사교에 매우 큰 상판응력이 유발될 가능성이 있어 종종 이들 사교들에 대한 비합성형 설계가 검토되어지곤 한다. 본 연구에서는 동적해석이 가능한 비합성형 사교의 해석모델을 제안하고 이 해석모델들을 이용하여 사교들에 대한 비합성형의 적용 타당성을 검토하였다. 또한 주형과 상판과의 세 가지 상호작용(합성작용, 부분합성작용, 비합성작용)이 단순 판형사교들의 동적특성과 동적거동에 미치는 영향을 조사하였다. 주형간격, 사각, 상판 종횡비를 매개변수로 총 27개의 판형 사교들에 대한 일련의 연구를 수행하였다. 상판과 주형 경계면에서의 미끄러짐은 고유진동주기가 길어지는 현상을 유발하여 사교의 교축직각방향에 작용하는 전체밀면전단력의 크기를 감소시킬 수도 있지만 모드형상과 강성분포에 큰 영향을 미쳐 바람직하지 않은 사교 거동을 유발할 수도 있다. 부분합성작용의 최소 규정에 따라 설치된 전단연결재는 주형응력과 상판응력을 감소시키는 효과가 있다. 즉, 몇몇 사교의 경우를 제외하고는 전반적으로 부분합성형으로부터 구한 주형응력과 상판응력의 크기는 합성형 사교로부터 구한 관련 응력들의 크기와 유사하거나 약간 크게 나타난다.

핵심용어 : 합성형, 부분합성형, 비합성형, 콘크리트 상판, 주형응력, 상판응력, 전체밀면전단력, 처짐, 미끄러짐

Abstract

Although composite construction has more mechanical advantages compared to noncomposite construction, the design of noncomposite construction for skew bridges with large skew angles has been often checked because composite construction may cause large stresses in the bridge deck. In this study, the analytical model considered dynamic behaviors for noncomposite skew bridges was proposed. Using the proposed analytical model, the validity of the application of noncomposite construction to skew bridges was checked. Also, the effects of interactions between the concrete deck and steel girders such as composite construction, partial composite construction, and noncomposite construction on the dynamic characteristics and dynamic behaviors of simply supported skew bridges were investigated. A series of parametric studies for the total 27 skew bridges was conducted with respect to parameters such as girder spacing, skew angle, and deck aspect ratio. Although the slip at the interfaces between the concrete deck and steel girders results in the reduction of seismic total base shear in the transverse direction due to period elongation, it causes an undesirable behavior of skew bridges by the modification in mode shapes and distributions of stiffness. Shear connectors placed by minimum requirements for partial composite action have an effect on reducing the girder stresses and deck stresses; except case of some skew bridges, the magnitude of the girder stresses and deck stresses obtained from partial composite skew bridges is similar to or slightly more than those acquired from composite skew bridges.

Keywords : composite construction, partial composite construction, noncomposite construction, concrete deck, girder stresses, deck stresses, total base shear, deflection, slip

1. 서 론

교량의 기하학적 평면 형태는 주어진 제반 여건에 따라

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

· 이 논문에 대한 토론을 2007년 12월 31일까지 본 학회에 보내주
시면 2008년 2월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

직선교, 곡선교, 사교 등으로 크게 구분된다. 가능하다면 직선교로 설계하는 것이 상부구조물과 하부구조물의 구조 특성상 바람직하지만 도심지내의 공간 제한이나 복잡한 교차로 등과 같은 제약 조건 때문에 사교에 대한 관심이 증가되고 있다. 현장의 지형조건으로 인하여 도로선형 변경이 힘들거나 도로에 대하여 비스듬히 교차하는 사면 등으로 굴착 토량을 현저히 감소시킬 수 있는 경우에 사교는 효과적으로 이용될 수 있다. 하지만 이러한 사교는 상판의 기하학적 평면형상과 그로 인한 사면방향으로의 받침배치 때문에 직선교보다 훨씬 복잡한 거동(behavior)을 나타낸다. 즉, 상부구조물에 휨과 비틀림이 동시에 작용하여 인근 주형간에 상대적인 솟음 현상이 유발되고 둔각부 받침에 수직반력이 집중되는 현상과 더불어 사각이 심한 사교에서는 예각부 받침에 부반력이 유발될 수도 있다. 이러한 부반력의 영향으로 사교 단부에 부모멘트가 발생하고 이로 인해 콘크리트 상판에 과도한 인장력이 유발될 수 있어 이들 사교들에 대한 비합성형 설계가 검토되어지곤 한다. 하지만 비합성형으로 시공될 경우 상판과 주형 경계면에 설치된 앵커로서는 상판으로부터의 힘을 주형에 충분히 전달할 수 없으며 상판 자중에 의한 상판과 주형 경계면에 발생하는 마찰력도 그다지 크지 않아 구속력을 기대하기 어려워 상판과 주형 경계면에서의 미끄러짐에 대한 보강이 절실히 요구된다. 아울러 기존 비합성형 교량이 현재의 중량화된 차량하중을 제대로 지지하지 못한다는 지적도 제기된 바 있다(Lin 등, 1994). 이에 반해 주형의 상부 플랜지에 용접으로 부착된 전단연결재(shear connector)를 콘크리트 상판 속에 매립시킴으로서 외부하중에 대하여 상판과 주형이 함께 저항하도록 한 합성형 판형 사교는 비합성형에 비해 단면이차모멘트의 증가를 가져와 부재 내에 발생하는 응력의 감소와 구조물의 전반적인 처짐 감소 그리고 주형의 높이를 줄일 수 있는 이점 등으로 경제적인 설계가 가능하다.

합성형 사교의 이러한 역학적인 이점 때문에 수많은 연구들이 주로 합성 판형 사교를 중심으로 진행되어 왔었다. 판형 사교의 대표적인 연구로서는 Ebeido(1996)에 의해 진행된 단순 합성교의 반력 특성 및 주형의 휨모멘트 평가를 들 수 있다. 이 논문에서는 주형간격만을 고려했던 종래의 연구와는 달리 사교의 거동에 영향을 미치는 매개변수들(주형간격, 상판 중형비, 차선 수, 사각, 가로보 등)의 영향이 고려되었으며 OHBDC 트럭하중과 사하중에 대한 지점반력 및 휨모멘트 분배계수 그리고 관련 경험식들이 제시되었다. Charles(1998)는 합성 판형교의 동적거동을 효과적으로 재현할 수 있는 단일 보(상판과 거드 단면을 함께 고려함)를 제안하였으며 실험결과와의 비교로부터 제안된 모델은 장경

간과 다경간 교량의 간략화된 모형화에 적절하다고 주장한 바 있다. Bruneau(2000)는 횡방향으로 작용하는 지진하중에 대하여 상부구조와 지점 유연성간의 상호작용을 조사하였으며 상부구조를 양단 지점에서 탄성스프링에 의해 지지된 단순보로 모형화하고 동적매개변수에 대한 정형화된 수식을 제안하였다. Lui(2002)는 상판을 하나의 보로 간주함으로써 상판의 비틀림 모드가 재현될 수 없었던 기존의 막대모델(stick model)의 문제점을 극복할 수 있는 이중-보(dual beam) 막대모델을 제안하여 사교의 동적해석을 수행하였다. 아울러 상부구조의 유연성, 하부구조의 경계조건, 사각, 강성 편심 등의 효과도 고려하였다. Maleki(2002)은 직선교의 고유진동주기와 그의 논문에서 유도한 상호계수들을 이용하여 연속 판형교의 고유진동수를 산정할 수 있는 수식을 제안하였다. 그는 상판을 강막(rigid diaphragm)으로 간주하였으며 지간 양단에서의 가로보 강성과 탄성받침 강성도 함께 고려하였다. 하지만 그가 제안한 수식은 기하학적 형상과 지점 강성이 대칭인 연속 판형교에만 적용 가능하다. Meng(2002)는 상판의 비틀림 모드를 재현시켜 보다 정확한 사교의 고유진동수와 고유모드의 예측 그리고 상부구조의 변위와 하부구조에 작용하는 내력을 평가할 수 있는 개선된 막대모델을 제안하였다. Meng(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 개발 모델의 신뢰성을 입증한 바 있다.

사교에 대한 현재까지의 연구는 주로 직선교와 합성형 사교와의 거동 차이, 효율적인 합성형 사교의 해석모델 개발 등에 집중되어 왔으며 상판과 주형간의 상호작용이 사교의 거동에 미치는 영향과 관련된 연구는 거의 전무한 실정이었다. 비록 사교의 정적거동에 미치는 상판과 주형간의 상호작용 효과(문성권, 2006)가 저자에 의해 소개된 바 있지만 수직 정적하중만이 고려되어 있어 연구결과를 사교의 전반적인 설계에 바로 적용하기에는 다소 무리가 있다. 이전 논문에서 제안된 비합성형 사교 해석모델은 횡력이 작용할 때 상판과 주형 경계면을 따라 강체거동이 발생하여 사교의 동적 거동을 전혀 예측할 수 없는 문제점을 안고 있었다. 따라서 본 연구에서는 이러한 문제점을 극복할 수 있는 비합성형 해석모델을 제안하고 이들 해석모델을 사용하여 사교들에 대한 비합성형의 적용 타당성도 함께 검토하였다. 또한 상판과 주형과의 상호작용(합성작용, 부분합성작용, 비합성작용)이 사교의 동적특성과 동적거동에 미치는 영향을 조사하였다.

2. 콘크리트 상판과 주형간의 상호작용

2.1 합성작용, 비합성작용, 부분합성작용

콘크리트 상판과 주형간의 상호작용은 대체적으로 상판과 주형 경계면에서의 연결 정도(degree of connection)에 따라 좌우되며 크게 세 가지로 구분되어질 수 있다(Joseph 등, 1997). 첫째는 합성작용(composite action)으로서 상판과 주형 사이에 완전한 상호작용이 발휘되어 주형과 상판이 외부하중에 대하여 단일 부재로서 거동하게 된다. 이러한 거동하에서는 전단연결재의 축방향 강성과 휨강성 그리고 전단강성이 무한대가 되어야 하지만 이를 만족시킬 수 있는 전단연결재는 현실적으로 존재하지 않는다. 둘째는 상판과 주형 사이에 상호작용이 전혀 존재하지 않는 비합성작용(non-composite action)으로서 이때 부재의 극한강도는 주형의 소성내력으로 결정된다. 하지만 상판과 주형사이 경계면에서의 부착과 마찰력 때문에 사용하중하에서는 합성으로 거동하려는 경향이 있으나 콘크리트 속에 강재가 충분히 매립되어 있지 않는 이상 부착과 마찰은 신뢰할 수 없으며 관련 시방서(AASHTO, 1983; CSA, 1989; OHBDC, 1991)에서도 이들 효과를 고려하지 않고 있다. 셋째는 이상적인 위의 두 가지 작용(합성작용, 비합성작용)이 아닌 실제 거동에 가장 잘 부합되는 부분합성작용(partial composite action)이 그것이다. 다소 보수적이지만 이때의 부재강도는 두 가지 작용에 대한 선형보간으로부터 구해질 수 있으며 시방서에서는 단면이 설계강도에 도달한 이후에도 얼마간의 연성(ductility)을 확보하려는 차원에서 완전합성작용의 25%~50%의 상호작용이 이루어지도록 최소 규정을 두고 있으며 이보다 낮은 상호작용하에서는 전단연결재에 갑작스런 전단파괴가 야기될 수도 있다고 한다(Johnson 등, 1991).

2.2 상판과 주형간의 상호작용에 관한 모형화

저자에 의해 수행된 이전 연구(문성권, 2006)에서는 상판과 주형간의 두 가지 상호작용(합성작용, 비합성작용)을 재현하기 위해 범용 유한요소해석 프로그램인 MIDAS/CIVIL (2006)에서 제공하는 rigid link와 elastic link 기능을 사용하여 상판과 주형간의 합성작용과 비합성작용을 각각 고려하였다. 이전 연구에서 언급된 비합성작용에 관한 모형화 방법은 수직하중이 작용하는 경우에는 해석상 문제가 없지만 수평하중이 작용하는 경우에는 상판과 주형 경계면에서의 미끄러짐에 의해 이들 경계면을 따라 강체(rigid body) 거동이 발생하여 결과적으로 관련 진동모드에 대한 해석결과를 신뢰

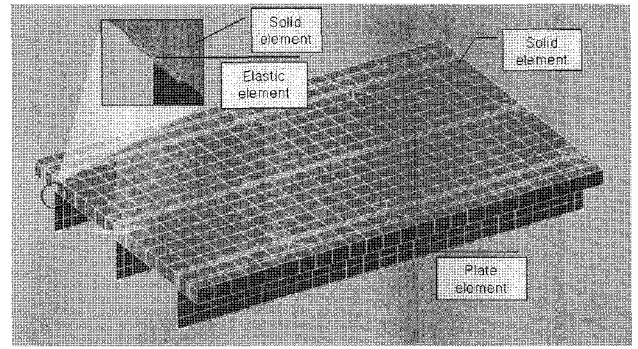


그림 1 사교의 3차원 해석모델 (상판과 주형 상부플랜지의 모형화)

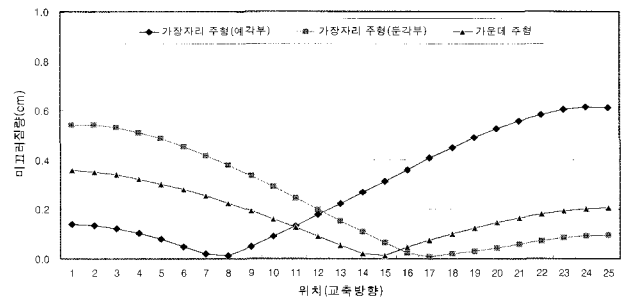


그림 2 상판과 주형 경계면에서의 미끄러짐량

할 수 없게 된다. 본 연구에서는 주형과 상판 경계면에서의 미끄러짐이 존재하는 비합성형 교량의 경우 대체적으로 지간의 중앙부 근방에서 양쪽 지점으로 갈수록 미끄러짐이 증가한다는 사실 즉, 지간길이를 따라 미끄러짐이 발생하지 않는 임의 위치가 존재한다는 사실에 착안하여 강체 거동의 문제점을 해결하였다. 각 주형의 지간길이를 따라 미끄러짐이 발생하지 않는 위치를 찾기 위하여 기존의 해석모델에 약간의 수정을 가하여 주형과 상판 경계면에서의 미끄러짐량을 계산하였다. 이러한 미끄러짐량은 상판 하면과 주형 상부플랜지의 상면을 서로 연결시키는 임의 요소의 양쪽 끝단 절점에서의 수평 변위차로부터 구할 수 있다. 그림 1에서 보는 바와 같이 상판은 8절점 solid 요소로 주형 상부플랜지는 판요소로 모형화 하였으며, elastic link 요소를 사용하여 상판과 주형 상부플랜지를 연결하였다. 외부 하중의 영향을 받지 않는 자중 조건하에서 미끄러짐이 발생하지 않는 위치를 구하였다.

그림 2는 특정 사교(사각 45°, 종횡비 1:1.5, 주형간격 = 3.6m)의 지간길이를 따라 주형과 상판 경계면에서의 미끄러짐량을 각 주형별로 나타낸 것으로 지간 중앙부 근방에서 양쪽 지점으로 갈수록 미끄러짐량이 증가하는 현상을 확인할 수 있으며, 미끄러짐이 발생하지 않는 위치는 가운데 주형의 경우에는 지간 중앙부 근방, 양쪽 가장자리 주형에서는 지간 중앙부에서 다소 떨어진 곳에서 발생하는 것을 알 수 있다. 양쪽 가장자리 주형에 대한 미끄러짐량이 서로 대칭을 이루

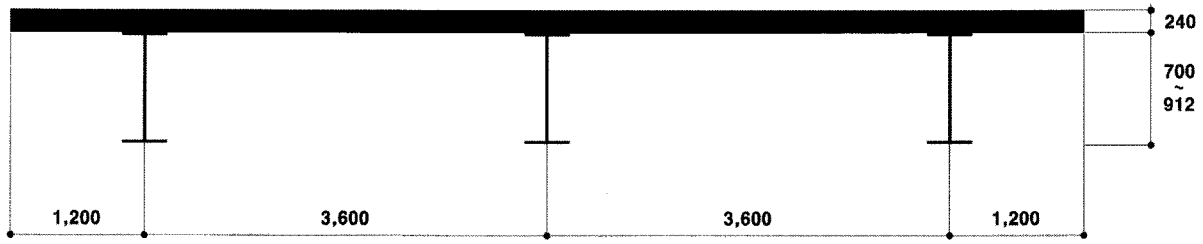


그림 3 사교의 횡단면도(주형간격 3.6m)

표 1 부재 단면치수(mm)

부재	지간	단면 치수(폭 × 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		

지 않는 것은 이용된 사교의 경계조건이 완전 대칭이 아니기 때문인 것으로 판단된다. 다양한 사교들에 대한 해석결과로부터 미끄러짐이 발생하지 않는 위치는 각 사교별로 서로 다르게 분포되며 이러한 분포 양상은 사교의 고유 진동주기와 모드형상에 큰 영향을 미칠 수 있음을 확인할 수 있었다.

3. 수치 예제

본 연구에서는 주형과 상판과의 상호작용이 단순 판형교의 동적거동에 미치는 영향을 조사하기 위해 세 가지 상호작용(합성작용, 부분합성작용, 비합성작용)을 고려하였으며 교량의 거동에 큰 영향을 주는 인자로서 알려진 사각(skew angle), 상판 중횡비, 주형간격 등을 매개변수로 선정하였다. 사각으로서는 사교로 간주되는 사각 30°, 45°, 60°의 세 가지를 고려하였으며 이때 사각은 교축방향과 받침선이 이루는 각으로 정의하였다. 따라서 직선교의 경우에 사각은 90°가 된다. 상판의 일방향, 이방향 거동을 감안하기 위해 9.6m

폭원(교축직각방향)을 기준으로 지간길이를 변화시켜 세 가지 상판 중횡비(1:1.5, 1:2.0, 1:2.5)를 고려하였으며 이때 지간길이는 각각 14.4m, 19.2m, 24.0m이다. 주형간격으로는 1.8m, 2.4m, 3.6m 세 가지를 고려하였다. 따라서 본 연구에서는 총 27개(3×3×3)의 다양한 사교들을 이용하였다. 본 연구에 사용된 주형간격 3.6m의 사교의 횡단면은 그림 3과 같으며 사교를 구성하는 각 부재들의 제원은 그림 3과 표 1에 나타나 있다. 그림 3의 횡단면에 나타나 있지 않은 보도와 난간 단면에 대한 하중효과는 사하중으로 고려하였다.

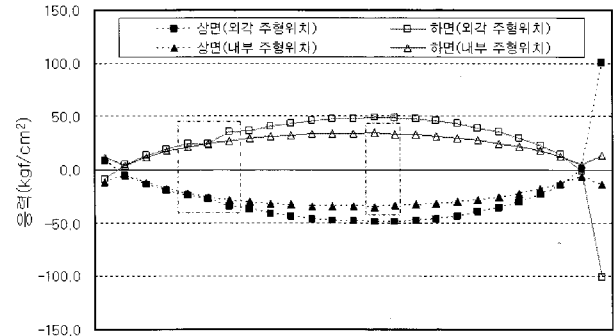
주형과 상판과의 상호작용이 사교의 동적거동에 미치는 영향을 파악하기 위해 특정 지진에 대한 시간이력해석(time history analysis) 대신에 사교들의 전반적인 경향을 파악하는데 보다 합리적인 응답스펙트럼 해석(response spectrum analysis)을 수행하였다. 응답스펙트럼 해석을 수행하기 위해 지반계수=1.0, 지진구역계수=0.11, 중요도 계수=1.4, 반응수정계수=1.0을 고려한 설계스펙트럼(도로교설계기준, 2000)을 사용하였으며 응답스펙트럼 해석으로부터 구해진

응답(response)은 CQC 조합방법을 사용함으로써 인근 모드 간의 영향을 고려하였으며 감쇠비로서는 0.05를 적용하였다. 아울러 직선교의 거동보다 훨씬 복잡한 거동을 보이는 사교의 거동을 제대로 나타내기 위하여 지진하중의 주방향(principle direction)으로서 교축방향과 교축직각방향 이외에도 받침선 방향과 받침선 직각방향도 함께 고려하였다. 각 방향별 응답에 대한 합성방법으로 현재 널리 사용되고 있는 100/30 percent 방법(도로교표준시방서, 1996; AASHTO, 1996)을 적용하였다.

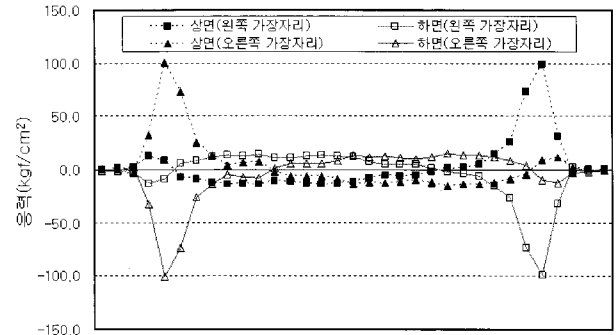
3.1 해석모델의 검증

사교의 복잡한 거동을 재현하기 위해 유한요소법을 적용하였으며 범용 유한요소해석 프로그램인 MIDAS/CIVIL을 사용하여 3차원 유한요소모델들을 작성한 후 해석을 수행하였다. 교대와 탄성받침의 각 방향별 강성은 각 방향별 탄성스프링으로 모형화될 수 있으며, 이때 교대와 탄성받침은 서로 직렬(series) 연결 상태로서 이들 스프링들에 대한 등가 스프링(equivalent spring) k_e 은 결국 교대에 비해 강성이 훨씬 작은 탄성받침의 강성으로 표현되기 때문에 교량의 하부구조물인 교대의 강성은 고려하지 않았다.

합성작용에 소요되는 전단연결재의 수보다 작은 전단연결재를 사용하여 27개의 사교들이 부분합성작용을 할 수 있도록 하였다. 즉 부분합성을 유도하기 위해 시방서 규준(AISC, 1989)에 언급되어 있는 최소 규정인 합성거동에 소요되는 전단연결재 수의 25%를 사용하였다. 직경 19mm, 높이 15cm의 스티드를 60cm 간격으로 2열로 균등하게 배치하였다. 상판과 주형을 연결하는 전단연결재는 elastic link로 모형화 하였으며, 이때 각 방향별 강성은 사용 스티드의 강성을 이용하였다. 상판과 주형 경계면에서의 미끄러짐에 의해 이들 경계면을 따라 발생하는 강체거동을 방지하기 위해 앞서 언급된 상판과 주형 경계면에서의 미끄러짐이 발생하지 않는 위치를 파악한 후, 그 위치에 대해서만 미끄러짐이 허용되지 않도록 상판과 주형 상부플랜지를 서로 연결시킨다. 즉, 상판과 주형 경계면에서 각각의 주형에 대하여 한 곳에서만 미끄러짐이 허용되지 않도록 서로 연결시키고 나머지 부분은 미끄러짐이 허용되도록 상판과 주형을 연결시킨다. 이때 수평방향의 미끄러짐에 대한 허용 여부는 elastic link요소의 해당 방향의 전단스프링 강성의 크기에 따라 결정되며, 특히 횡력이 작용할 때 미끄러짐이 발생하는 수평면의 위치가 구조물의 거동에 영향을 미칠 수 있으므로 상판과 주형 경계면에 정확히 전단스프링을 설치하여야 한다. 이러한 방법으로 모형화된 비합성형 해석모델에 대한 신뢰성을



(a) 교축방향



(b) 받침선 방향

그림 4 상판의 상면과 하면에 걸리는 응력(하중조건=자중)

검증하기 위해 교축방향과 받침선 방향에서의 상판의 상면과 하면에 발생하는 응력들을 서로 비교하였다. 그림 4(a)는 각각 45°, 주형간격 1.8m, 지간 14.4m(중횡비 1:1.5)의 사교에 대한 해석결과 중 내부 및 외부 주형과 연결된 상판의 상면과 하면에 작용하는 교축방향 응력(σ_{XX})을, 그림 4(b)는 양쪽지점 위치에서의 가장자리 상판의 상면과 하면에 작용하는 교축방향 응력을 나타낸다. 이들 그림들로부터 상판의 상면과 하면에 걸리는 응력이 거의 동일한 값을 알 수 있으며 이는 상판과 주형 경계면에서의 미끄러짐이 제대로 구현된 것을 의미한다. 여기서 주목할 사실은 그림 4(a)의 직사각형 형태로 표시된 부분이 상판과 주형 경계면에서 미끄러짐이 발생하지 않도록 상판과 주형을 연결시킨 곳으로서 상판 하면에서의 응력과 상판 상면에서의 응력에 약간의 차이가 존재하지만 다른 곳에서는 거의 무시할 정도로 유사한 응력값을 나타내고 있다는 것이다. 따라서 상판과 주형 경계면에서의 미끄러짐이 제대로 구현됨과 동시에 각 주형의 임의 한 점에서 상판과 주형 경계면의 미끄러짐이 발생하지 않도록 연결되어 있어 동적해석에서 경계면을 따라 강체 거동을 보이던 문제점이 더 이상 발생하지 않는다. 그림 4에서 상판의 상면과 하면에서 인장응력과 압축응력이 동시에 존재하는데 이는 대상 사교의 경우 자중에 의한 처짐 형태가 말의 안장 모양과 유사하게 나타나기 때문이다. 외부하중에 대

하여 상판과 주형이 단일 부재로 거동하는 합성형 사교의 경우에는 rigid link로 상판과 주형이 연결된 점들에서 동일한 수직처짐과 회전각들이 나타남을 확인할 수 있었다.

3.2 동적 거동

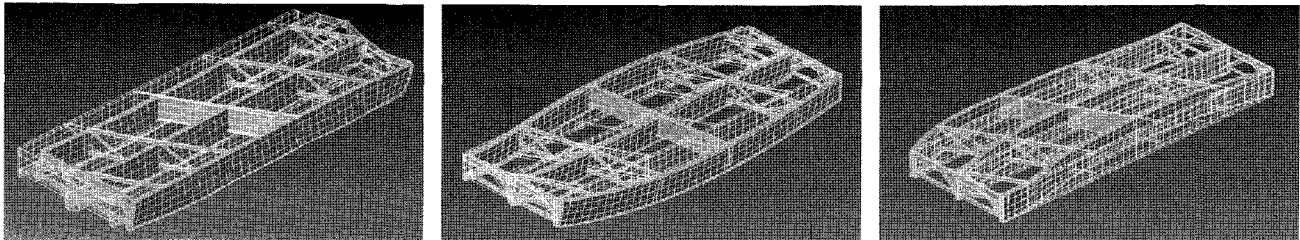
본 연구에서는 주형과 상판과의 상호작용에 따른 사교의 동적거동 변화를 알아보기 위해서 우선 동적특성을 나타내는 고유 진동주기와 모드형상을 비교, 분석하고 사교의 거동으로서는 사교 전체에 걸리는 교축 및 교축직각 방향의 전체밀면전단력과 둔각부 받침에 걸리는 수직반력, 상판응력, 주형 응력, 처짐 등을 고려하였다.

3.2.1 동적특성

본 연구에서는 여러 모드들 중에서 가장 근본적인 각 방향별(교축직각방향, 교축방향, 중력방향) 첫 번째 진동모드만을 언급하였다. 그림 5~7에는 주형간격=3.6m, 지간길이=24m(중형비 1:2.5), 사각=60°인 사교를 대상으로 상판과 주형

간의 상호작용(합성작용, 부분합성작용, 비합성작용)에 따른 모드형상이, 표 2~4에는 그림 5~7과 관련된 고유 진동주기 값들이 서로 비교되어 있다. 약간의 예외가 있지만 전반적으로 교축직각방향의 병진 진동, 주형단면의 강축방향의 휨 진동, 교축방향의 병진 진동 순으로 진동모드들이 나타나는 경향을 확인할 수 있다.

교축직각방향의 병진 진동모드와 관련된 모드형상의 경우(그림 5 참조) 상판과 주형 경계면에서의 미끄러짐이 구속된 합성형에서는 각 주형마다 지간을 따라 주형의 수평 이동량이 동일하게 나타나는 반면 미끄러짐이 허용된 비합성형에서는 수평 이동량이 양쪽 지점에서 지간중앙으로 갈수록 크게 나타나며 부분합성형에서는 비합성형에서의 거동 이외에 주형이 다소 휘는 거동이 추가적으로 나타난다. 주형단면의 강축방향 휨 진동모드와 관련된 모드형상의 경우(그림 6 참조)에는 전반적으로 합성형, 비합성형, 부분합성형의 모드형상이 유사하게 나타난다. 교축방향의 병진 진동모드와 관련된 모드형상의 경우(그림 7 참조) 상판과 주형 경계면에서 미끄러짐이 구속된 합성형에서는 주형이 교축방향으로 이동하는 거

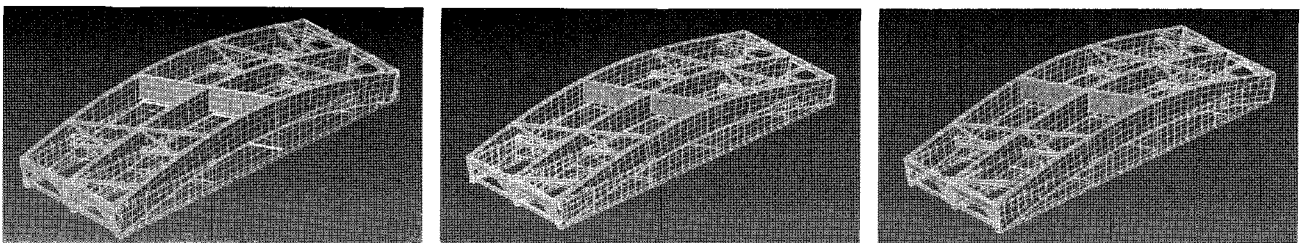


(a) 합성형(0.276sec)

(b) 부분합성형(0.422sec)

(c) 비합성형(3.380sec)

그림 5 교축직각방향의 병진 진동모드와 관련된 모드형상

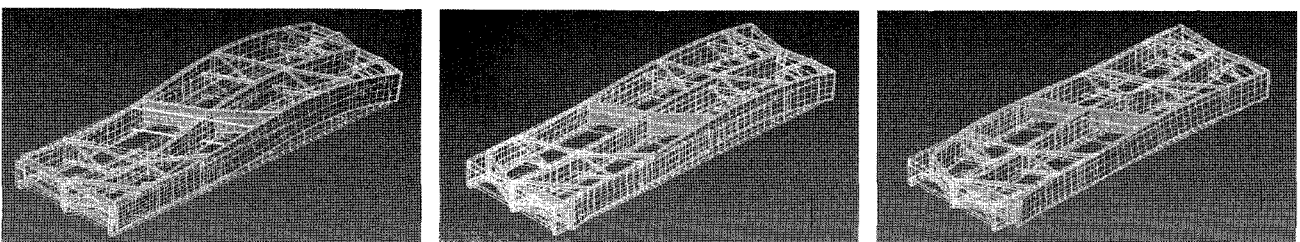


(a) 합성형(0.377sec)

(b) 부분합성형(0.530sec)

(c) 비합성형(0.603sec)

그림 6 주형단면의 강축방향 휨 진동모드와 관련된 모드형상



(a) 합성형(0.139sec)

(b) 부분합성형(0.216sec)

(c) 비합성형(0.214sec)

그림 7 교축방향의 병진 진동모드와 관련된 모드형상

표 2 상판과 주형간의 상호작용에 따른 고유진동주기의 변화(교축직각방향의 병진 진동모드) (sec)

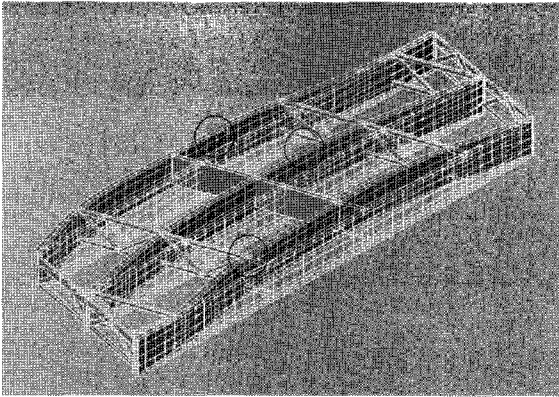
		지간 길이								
		14.4m(중형비 1:1.5)			19.2m(중형비 1:2.0)			24.0m(중형비 1:2.5)		
주형 간격	사각	합성형	부분 합성형	비합성형	합성형	부분 합성형	비합성형	합성형	부분 합성형	비합성형
1.8m	30°	0.271	0.336	0.370	0.320	0.407	0.960	0.379	0.454	0.873
	45°	0.218	0.305	0.538	0.253	0.352	0.795	0.304	0.401	0.956
	60°	0.169	0.272	1.022	0.195	0.304	1.757	0.236	0.337	1.054
2.4m	30°	0.429	0.476	0.491	0.374	0.487	1.396	0.436	0.532	0.758
	45°	0.245	0.330	0.451	0.279	0.405	1.003	0.334	0.460	1.809
	60°	0.183	0.282	0.788	0.210	0.347	1.999	0.254	0.401	2.947
3.6m	30°	0.355	0.438	1.038	0.361	0.475	1.289	0.481	0.569	1.007
	45°	0.269	0.354	0.462	0.305	0.420	0.836	0.366	0.484	1.550
	60°	0.209	0.323	1.174	0.230	0.367	2.250	0.276	0.422	3.380

표 3 상판과 주형간의 상호작용에 따른 고유진동주기의 변화(주형단면의 강축방향 휨 진동모드) (sec)

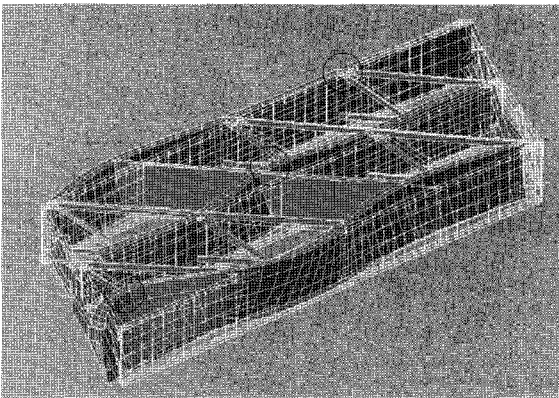
		지간 길이								
		14.4m(중형비 1:1.5)			19.2m(중형비 1:2.0)			24.0m(중형비 1:2.5)		
주형 간격	사각	합성형	부분 합성형	비합성형	합성형	부분 합성형	비합성형	합성형	부분 합성형	비합성형
1.8m	30°	0.181	0.240	0.242	0.288	0.374	0.353	0.324	0.431	0.578
	45°	0.203	0.283	0.280	0.263	0.367	0.369	0.312	0.430	0.461
	60°	0.200	0.289	0.309	0.260	0.370	0.412	0.312	0.433	0.538
2.4m	30°	0.200	0.266	0.267	0.250	0.319	0.366	0.361	0.471	0.570
	45°	0.213	0.296	0.324	0.282	0.392	0.473	0.340	0.471	0.508
	60°	0.214	0.308	0.337	0.280	0.401	0.440	0.338	0.473	0.538
3.6m	30°	0.212	0.277	0.289	0.324	0.421	0.394	0.396	0.508	0.579
	45°	0.238	0.320	0.354	0.309	0.426	0.471	0.376	0.518	0.561
	60°	0.235	0.334	0.352	0.311	0.444	0.489	0.377	0.530	0.603

표 4 상판과 주형간의 상호작용에 따른 고유진동주기의 변화(교축방향의 병진 진동모드) (sec)

		지간 길이								
		14.4m(중형비 1:1.5)			19.2m(중형비 1:2.0)			24.0m(중형비 1:2.5)		
주형 간격	사각	합성형	부분 합성형	비합성형	합성형	부분 합성형	비합성형	합성형	부분 합성형	비합성형
1.8m	30°	0.098	0.151	0.134	0.114	0.172	0.163	0.127	0.177	0.170
	45°	0.100	0.162	0.142	0.114	0.181	0.172	0.128	0.185	0.182
	60°	0.099	0.166	0.148	0.113	0.186	0.179	0.127	0.190	0.192
2.4m	30°	0.102	0.156	0.124	0.115	0.179	0.135	0.129	0.193	0.175
	45°	0.098	0.159	0.112	0.114	0.187	0.129	0.131	0.203	0.149
	60°	0.098	0.169	0.139	0.115	0.191	0.133	0.132	0.208	0.153
3.6m	30°	0.121	0.171	0.152	0.131	0.188	0.146	0.140	0.203	0.200
	45°	0.113	0.176	0.151	0.125	0.196	0.188	0.139	0.211	0.205
	60°	0.110	0.181	0.156	0.123	0.201	0.189	0.139	0.216	0.214



(a) 사각=60°(고유진동주기=3.380sec)



(b) 사각=30°(고유진동주기=1.007sec)
그림 8 사각의 변화에 따른 모드형상의 변화
(지간길이=24.0m, 주형간격=3.6m)

동보다는 주형이 휘는 거동이 두드러지게 나타나는 반면 미끄러짐이 허용된 비합성형에서는 주형이 교축방향으로 이동하는 거동이 주가 된다. 부분합성형의 모드형상도 비합성형의 모드형상과 유사한 거동을 보인다.

표 2~4는 주형과 상판과의 상호작용에 따른 각 방향별 고유 진동주기 변화를 나타내며 각각 교축직각방향 병진 진동모드, 주형단면의 강축방향 휨 진동모드, 교축방향 병진 진동모드와 관련된 고유진동주기를 나타낸다. 표 2와 표 3으로부터 상판과 주형 경계면에서의 미끄러짐이 허용되는 비합성형 사교의 고유진동주기가 미끄러짐이 구속된 합성형 사교의 고유진동주기보다 전반적으로 크게 나타나며 부분합성형의 고유진동주기는 합성형보다는 크고 비합성형보다는 작게 나타나는 경향을 확인할 수 있다. 참고적으로 표 4의 경우에는 부분합성형의 고유진동주기가 비합성형의 고유진동주기보다 약간 큰 경향을 보이는데 이는 서로 비교되어 있는 고유진동주기와 관련된 비합성형의 모드형상과 부분합성형의 모드형상이 다소 상이하기 때문인 것으로 판단된다. 특히 상판과 주형 경계면에서의 미끄러짐이 뚜렷이 나타나는 교축직각방향 병진 진동모드에서 고유 진동주기값들간에 큰 차이가 발생하며 그 중에

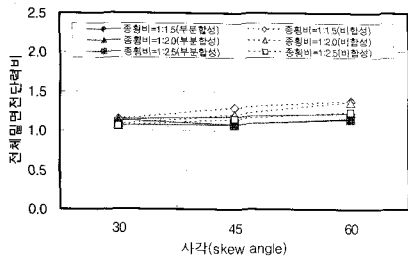
서도 주형간격과 상판 종횡비가 크면서 사각이 심하지 않은 사교들에서 현저한 차이를 보인다(표 2 참조).

사각이 심하지 않은 사교에서 고유 진동주기값의 차이가 더 크게 나타나는 이유는 그림 8에서 보는 바와 같이 상판과 주형 경계면에서의 미끄러짐이 발생하지 않는 위치(그림 8에서 등갈게 표시된 부분)가 사각이 심하지 않은 경우에는 주로 지간 중앙부 근처에 분포되어 있는 반면 사각이 심한 경우에는 지간 전반에 걸쳐 분포되어 있어, 사각이 심하지 않은 사교의 교축직각방향의 병진 진동이 사각이 심한 사교의 관련 진동보다 쉽게 발생하기 때문인 것으로 판단된다. 주형단면의 강축방향 휨 진동 모드 경우 합성형일 때에는 상판과 주형이 일체로 거동을 하게 되어 비합성형보다 휨강성이 상대적으로 크게 작용함으로써 결과적으로 다소 짧은 고유진동주기값을 나타낸다.

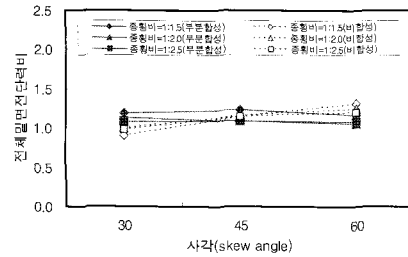
3.2.2 사교의 거동

응답스펙트럼 해석을 통한 사교의 거동 중에서 설계에 널리 이용되는 전체밀면전단력(교축방향, 교축직각방향)과 둔각부 받침에 걸리는 수직반력, 주형응력, 상판응력, 처짐 등에 대하여 주형과 상판과의 상호작용에 따른 이들 거동들의 변화를 조사하였다. 주형과 상판과의 상호작용에 따른 사교의 거동 변화를 분석하기 위해 부분합성형 사교의 거동과 비합성형 사교의 거동을 각각 합성형 사교의 거동으로 나누어 각 거동의 비(ratio)를 구하였다. 사교 거동과 관련된 다음 그림들(그림 9~그림 14)에서 1.0보다 큰 값을 보이는 것은 부분합성형 사교와 비합성형 사교의 거동이 합성형 사교의 거동보다 크게 나타난다는 것을 의미한다.

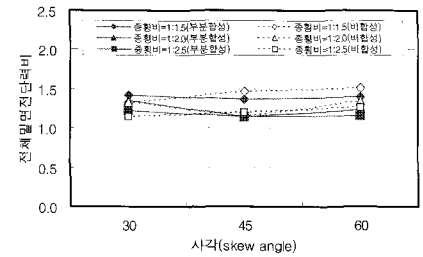
그림 9와 10은 각각 교축방향과 교축직각방향에 대한 사교들의 전체밀면전단력비를 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이 전반적으로 교축방향에 대해서는 1.0보다 큰 값을, 교축직각방향에 대해서는 1.0보다 작은 값을 보인다. 즉, 교축방향에 대해서는 부분합성형 사교와 비합성형 사교로부터 구한 전체밀면전단력은 합성형 사교로부터 구한 전체밀면전단력보다 큰 전체밀면전단력을 유발하는데 반해, 교축직각방향에 대해서는 합성형 사교에서 더 큰 전체밀면전단력이 발생한다. 또한 교축직각방향에 대해서는 비합성형 사교에서 구한 전체밀면전단력이 부분합성형 사교로부터 구한 전체밀면전단력보다 작은 값을 유발한다는 사실도 알 수 있다. 교축직각방향의 경우 비합성형 사교에서 가장 작은 전체밀면전단력이 유발되는 이유는 교축직각방향의 병진 진동모드와 관련된 고유진동주기를 서로 비교한 표 2에서 알 수 있듯이 비합성형 사교에서 구한 고유진동주기값이 합성형 사교와 부분합성형 사교에서 구한 고유진동주기값보다 훨씬 크며 결과적으로



(a) 주형간격 = 1.8m

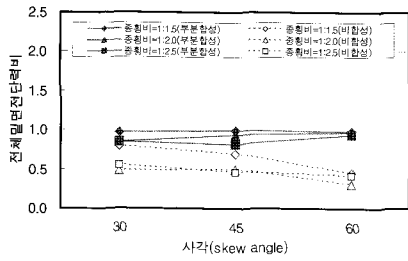


(b) 주형간격 = 2.4m

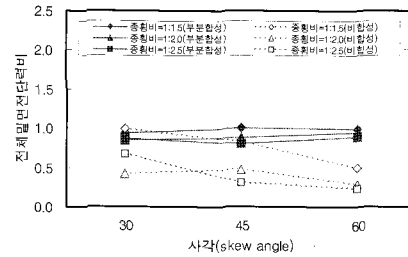


(c) 주형간격 = 3.6m

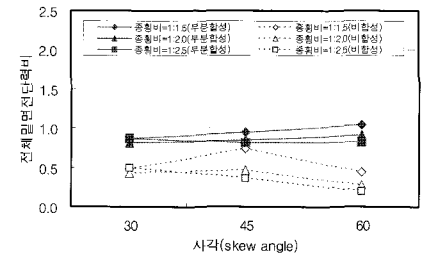
그림 9 주형과 상판과의 상호작용에 따른 전체밀면전단력의 변화(교축방향)



(a) 주형간격 = 1.8m

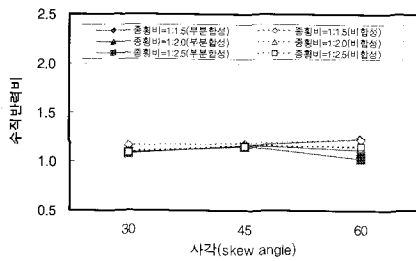


(b) 주형간격 = 2.4m

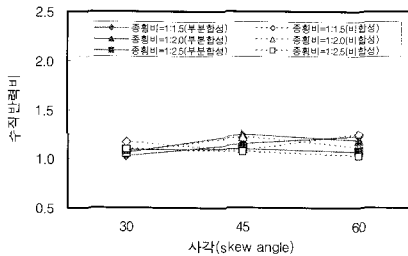


(c) 주형간격 = 3.6m

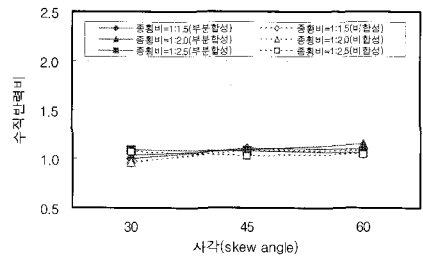
그림 10 주형과 상판과의 상호작용에 따른 전체밀면전단력의 변화(교축직각방향)



(a) 주형간격 = 1.8m

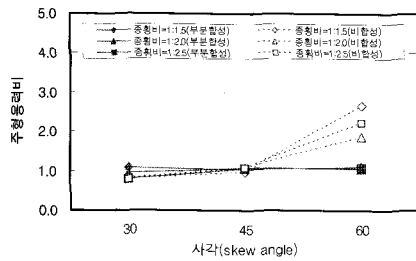


(b) 주형간격 = 2.4m

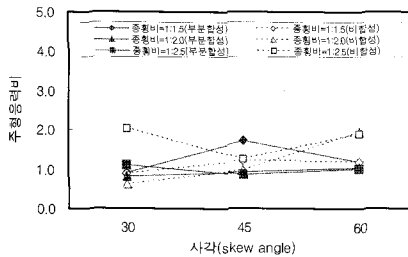


(c) 주형간격 = 3.6m

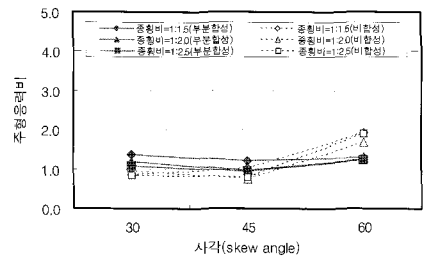
그림 11 주형과 상판과의 상호작용에 따른 둔각부 수직반력의 변화



(a) 주형간격 = 1.8m

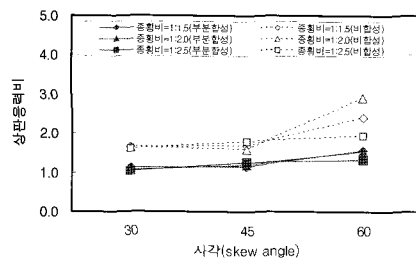


(b) 주형간격 = 2.4m

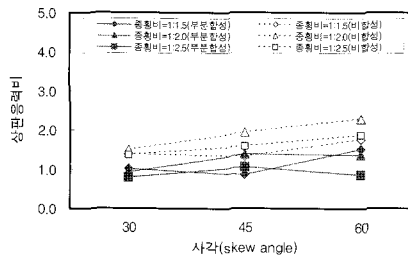


(c) 주형간격 = 3.6m

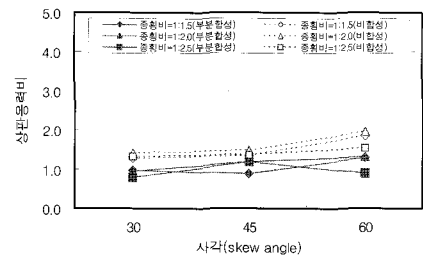
그림 12 주형과 상판과의 상호작용에 따른 주형응력의 변화



(a) 주형간격 = 1.8m



(b) 주형간격 = 2.4m



(c) 주형간격 = 3.6m

그림 13 주형과 상판과의 상호작용에 따른 상판응력의 변화

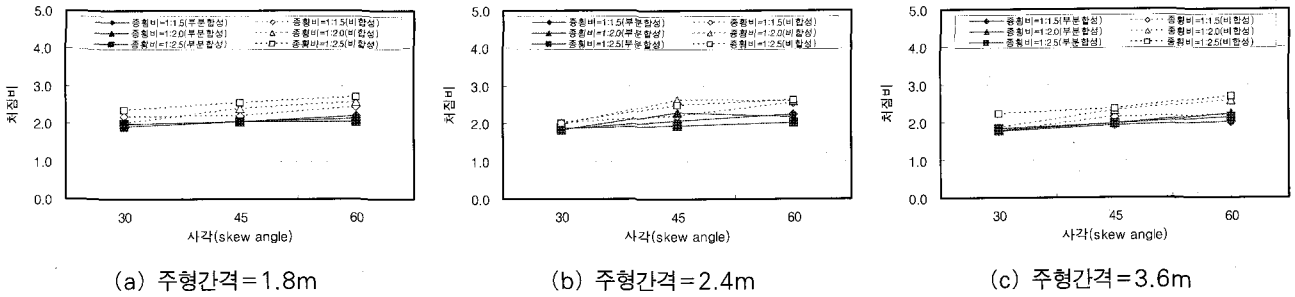


그림 14 주형과 상판과의 상호작용에 따른 수직처짐의 변화

밀면전단력의 크기에 직접적인 영향을 주는 설계스펙트럼값이 작아졌기 때문이다. 둔각부 받침에 걸리는 수직반력의 경우에는 그림 11에서 알 수 있듯이 부분합성형과 비합성형 사교의 수직반력은 합성형 사교의 수직반력보다 전반적으로 크게 나타나며 최대 25%정도 큰 값을 보인다.

그림 12에서 알 수 있듯이 주형과 상판과의 미끄러짐을 허용한 부분합성형 사교와 비합성형 사교로부터 구한 주형응력은 전반적으로 합성형 사교보다 큰 주형응력을 유발한다. 이는 합성작용하에서는 외부하중에 대해 주형과 상판이 단일 부재로 저항하지만 미끄러짐이 허용될 때에는 독자적으로 저항하기 때문이다. 특히 사각이 심하지 않은 비합성형 사교에서 주형응력비가 크게 발생하는데, 이는 표 2~4에서 알 수 있듯이 사각이 심한 사교보다 사각이 심하지 않은 사교에서 합성형과 비합성형간의 고유 진동주기 차이가 크게 발생하기 때문이다.

그림 13의 상판응력의 경우도 주형응력과 유사하게 전반적으로 합성형 사교보다 비합성형 사교로부터 구한 상판응력이 큰 값을 나타낸다. 이러한 양상은 사각이 심한 사교의 경우 주형과 상판 경계면의 상호작용이 존재하지 않을 때 상판응력이 작게 유발될 수 있다는 기존 설계개념과는 정반대의 현상으로서 이는 자중에 의한 상판응력과 수평력(지진하중)에 의한 상판응력의 조합으로 최종 상판응력이 결정되며 일반적으로 자중이 작용할 때 비합성형으로부터 구한 상판응력이 합성형으로부터 구한 상판응력보다 훨씬 크게 나타나 결과적으로 비합성형으로부터 구한 상판응력이 더 크게 유발될 수 있기 때문인 것으로 판단된다. 참고적으로 사각 60°, 주형간격=1.8m, 종횡비 1:2.0인 사교의 경우에 비합성형으로부터 구한 상판응력은 합성형으로부터 구한 상판응력보다 약 2.8배 크게 나타난다. 잘 알려진 바와 같이 수직처짐의 경우 (그림 14 참조) 부분합성형과 비합성형으로부터 구한 수직처짐은 합성형으로부터 구한 수직처짐보다 크게 나타나며 부분합성형의 경우에는 약 1.8~2.3배 정도, 비합성형의 경우에는 2.0~2.8배 정도 큰 수직처짐이 발생한다.

부분합성거동을 유발시키는데 필요한 최소 전단연결재만

을 고려하여 설계할 경우(본 연구에서는 완전합성작용에 필요한 전단연결재의 25%만을 적용) 최소 규정에 따라 설치된 전단연결재는 몇몇 사교를 제외하고는 전반적으로 합성형 사교로부터 구한 주형응력 및 상판응력의 크기와 유사하거나 약간 큰 수준까지 응력을 감소시키는 효과가 있음을 확인할 수 있다.

4. 결 론

사각이 심한 사교들을 합성형으로 설계할 경우 큰 상판응력이 유발될 가능성이 있어 종종 이들 사교들에 대한 비합성형 설계가 거론되곤 한다. 하지만 현재까지 비합성형 사교의 동적거동을 재현할 수 있는 해석모델이 개발되어 있지 않아 사각, 주형간격, 상판 종횡비 등의 변화에 따른 비합성형 사교와 합성형 사교의 거동 차이를 제대로 분석할 수 없었다. 본 연구에서는 동적해석이 가능한 비합성형 사교의 새로운 해석모델을 제안하고 이들 해석모델들을 이용하여 상판과 주형간의 세 가지 상호작용(합성작용, 부분합성작용, 비합성작용)이 사교들의 동적특성(고유진동주기, 모드형상)과 동적거동(전체밀면전단력, 둔각부 받침의 수직반력, 주형응력, 상판응력, 처짐)에 미치는 영향을 조사하였다. 부분합성을 유도하기 위해 시방서(AISC, 1989)에 언급되어 있는 최소 규정인 합성거동에 필요한 전단연결재 수의 25%를 사용하여 부분합성작용을 고려하였다. 사교 거동의 전반적인 특성을 파악하기 위해 사교 거동에 큰 영향을 미치는 주형간격, 사각, 상판 종횡비 등을 매개변수를 사용하여 단순 지지된 27개의 다양한 사교들을 고려하였다. 응답스펙트럼 해석결과로부터 다음과 같은 결론을 이끌어 낼 수 있었다.

1. 주형과 상판 경계면에서의 미끄러짐이 존재하는 비합성형 교량의 경우 대체적으로 지간 중앙부 근방에서 양쪽 지점으로 갈수록 미끄러짐이 증가한다는 사실 즉, 지간 길이를 따라 미끄러짐이 발생하지 않는 임의 위치가 존재한다는 사실에 착안하여 각 주형에서 미끄러짐이 발

생하지 않는 위치를 찾아 이 위치에서 미끄러짐이 허용되지 않도록 상판과 주형을 서로 연결시킴으로써 동적 해석이 가능한 비합성형 사교의 해석모델을 개발하였다. 교축방향과 받침선 방향에서의 상판의 상면과 하면에 발생하는 응력값들의 비교로부터 개발된 해석모델의 신뢰성을 확인할 수 있었다.

2. 상판과 주형 경계면에서의 미끄러짐이 허용되는 비합성형 사교의 고유 진동주기는 미끄러짐이 구속되어 있는 합성형 사교의 고유 진동주기보다 전반적으로 크게 나타난다. 특히 상판과 주형 경계면에서의 미끄러짐과 관련된 교축직각방향의 병진 진동모드의 경우 비합성형 사교와 합성형 사교의 고유 진동주기값의 차이는 크게 나타나며 그 중에서도 주형간격과 상판 중횡비가 크면서 사각이 심하지 않은 사교에서 고유 진동주기값의 차이는 더욱더 크게 발생한다. 부분합성형의 고유 진동주기는 합성형보다는 크고 비합성형보다는 작게 나타나는 경향을 보인다.
3. 상판과 주형 경계면에서의 미끄러짐이 허용된 비합성형 사교로부터 구한 고유 진동주기는 합성형 사교로부터 구한 고유 진동주기보다 큰 값을 보여 사교의 교축직각 방향에 작용하는 전체밀면전단력의 크기는 감소하지만 상판과 주형 경계면에서의 미끄러짐 허용에 따른 모드형상의 변화와 강성분포 변화로 인하여 주형응력, 상판응력, 처짐과 같은 사교의 거동은 합성형보다 오히려 큰 값을 유발시킬 수 있다. 사각이 심한 사교의 경우 비합성형으로 설계하는 것이 거동 측면에서 유리하다는 기존의 설계개념과는 달리 이들 사교의 경우 주형과 상판간의 상호작용에 따른 거동 차이는 크지 않으며, 오히려 사각이 심하지 않은 사교들의 경우에 합성형으로 설계하는 것이 사교의 거동 측면에서 매우 유리하다는 것을 알 수 있다.
4. 부분합성작용의 최소 규정에 따라 설치된 전단연결재는 전단연결재가 존재하지 않는 비합성형의 주형응력과 상판응력을 감소시키는 효과가 있다. 즉 몇몇 사교의 경우를 제외하고는 전반적으로 부분합성형으로부터 구한 주형응력과 상판응력의 크기는 합성형 사교로부터 구한 관련 응력들의 크기와 유사하거나 약간 크게 나타난다.

참 고 문 헌

- 대한토목학회 (1996) 도로교표준시방서, 대한토목학회.
 대한토목학회 (2002) 도로교설계기준, 대한토목학회.
 문성권 (2003) 받침의 강성조정에 의한 사교 지점반력의 재분

배, 대한토목학회논문집, 23(2A), pp.295~304.

문성권 (2006) 단순사교의 거동에 미치는 콘크리트 상판과 주형간의 상호작용 효과, 한국전산구조공학회논문집, 19(2), pp.203~212.

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.

AISC (1989) *Manual of Steel Construction(Allowable Stress Design)*, Ninth Edition, American Institute of Steel Construction, Illinois, p.1114.

Bruneau, M., d Alfawakhiri, F. (2000) Flexibility of Superstructure and Supports in the Seismic Analysis of Simple Bridges, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 29, pp.711~729.

Charles, R. F., Thomas, A. D. (1998) Bridge Modal Properties Using Simplified Finite Element Analysis, *Journal of Bridge Engineering*, 3(1), pp.38~46.

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, New York, p.333.

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.

- Lui, E. M., Meng, J. Y.** (2002) Refined Stick Model for Dynamic Analysis of Skew Highway Bridges, *Journal of Bridge Engineering*, 3(1), pp.38~46.
- Maleki, S.** (2002) Free Vibration of Continuous Slab-Beam Skewed Bridges, *Journal of Sound and Vibration*, 255(4), pp.793~803.
- 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.
- Midas information Technology Co. Ltd** (2006) *MIDAS/CIVIL*, South Korea.
- O'Brien, E. J., Keogh, D. L.** (1999) *Bridge Deck Analysis*, E&FN SPON, New York, p.278.
- OHBDC** (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, London, p.168.