

바닥판조립식 단순보교량의 합성거동에 관한 연구

The Composite Behaviors of Fabricated Concrete Deck Simple Bridges

구민세*
Koo, Min-Se

장성수**
Chang, Suong-Su

윤우현***
Yun, Uh-Heon

요 지

본 연구는 거더 상면에 연장 형성된 수직돌출부의 양측에 상부플랜지를 가지는 주형과 바닥면에 모서리보가 형성되어 있는 바닥판이 현장에서 그라우팅에 의한 전단키로 연결되어 교량구조물을 형성하는 새로운 형태의 바닥판조립식 교량구조를 제안하고 그에 따른 정적실험 및 유한요소해석을 통해 구조거동을 분석하여 실제 적용가능성을 입증하는데 목적이 있다. 먼저 주형과 바닥판의 연결부에서 발생하는 구조적 평형조건을 입증하기 위해 주형과 바닥판의 연결부에 스프링 효과를 이용한 유한요소해석을 통해 바닥판에서 발생하는 부재력을 해석하였다. 이때 바닥판에 가장 불리하게 작용하는 하중위치를 관찰하였으며 이를 실제 정적실험모델과 동일한 유한요소해석모델에 적용하여 부재 각 위치에서의 거동을 분석하였다. 연결부에서 스프링 효과를 이용한 유한요소해석결과와 실험결과를 비교로부터 바닥판조립식교량은 설계하중하에서 충분한 저항내력을 확보하고 있는 것으로 나타났다. 또한 정적실험에서의 내·외측 주형의 처짐과 유한요소해석결과를 비교한 결과로부터 실험에 의한 처짐이 유한요소해석결과보다 작게 나타났으며 이러한 결과로부터 바닥판조립식교량의 실제 강성은 충분한 것으로 증명되었다. 또한 바닥판조립식교량에서 주형사이의 가로보의 설치개수에 따른 하중횡분배효과 및 바닥판이 합성된 후의 합성효과등을 관찰하기 위한 유한요소해석을 수행하였다. 하중횡분배효과는 편심하중제하시에 가로보의 개수가 3개로 증가하였을 때 가장 현저하게 나타났으며 합성단면에서의 하중횡분배는 바닥판연결에 의한 합성효과로 인해 비합성단면에서의 하중횡분배의 약 1/2의 크기로서 효과적인 합성효과가 발생하는 것으로 나타났다.

핵심용어 : 바닥판조립식교량, 전단키, 합성효과

Abstract

In this study, a new method of fabricated concrete deck bridge construction is proposed. This paper details the method in which concrete multi-girders and fabricated concrete decks are rested on the upper flange of the girder and the female to female type shear-key is formed to connect girder and deck. The finite element analysis is performed to verify the accuracy of the structural behaviors of the fabricated concrete deck bridge by comparing with experimental results. The first task performed is the analysis of the equilibrium of the member force occurring between the deck and the girder. After verifying equilibrium of the member force determined by the finite element analysis, this process is applied to the analysis of maximum member force as the position of design load. This task is utilized to determine the safety of each member according to the same scale finite element model. The final process in this study is to compare the deflection of girders used in experiment with that of the same scale finite element model to verify the strength of fabricated concrete deck bridge. By this comparison, it is shown that the behavior of the fabricated concrete deck bridge is almost same as the finite element analysis. The second task is to analyze the load distribution effect according to the number of diaphragms and the composite effect due to the connection of the deck and girder by the finite element analysis. From the results of second task, it is found that the load distribution effect is not related to the number of diaphragms in case of the central loading, but is related to the number of diaphragms for eccentric loading. Analysis of the load distribution indicates that the effective number of diaphragm is three. It is also shown that the maximum deflection is decreased to almost one half due to the composite action of the deck and girder.

Keywords : fabricated concrete deck bridge, shear key, composite effect

* 정회원 · 인하대학교 토목공학과, 교수
** 인하대학교 산업과학기술연구소, 연구원
*** 경원대학교 산업대학원, 교수

· 이 논문에 대한 토론을 2000년 3월 31일까지 본 학회에 보내주시면 2000년 6월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

1. 서 론

교량은 크게 상부구조와 하부구조로 구성되어 있고 상부구조는 차량이 직접 통과하는 바닥판과 차량 하중인 활하중과 교량의 자중에 저항하는 주형으로 구성되어 있다. 또한 하부구조는 상부구조에서 전달되는 하중을 기초에 전달하는 교각과 교량전체의 하중을 지반에서 지지하는 기초등으로 구성되어 있으며 지금까지의 일반적인 교량의 상부 및 하부구조의 건설은 거의 현장타설콘크리트공법에 의해 시공되어 왔다. 이러한 현장타설콘크리트공법은 현장형상에 대한 적합성, 재료운반의 용이성 및 지역적 조건에 크게 영향을 받지 않는 장점이 있다. 반면에 현장타설콘크리트공법은 시공 및 관리에 주의가 필요하고 시공의 용이성을 배려한 기술이 요구되며 구조물의 면적이 큰 경우 긴 양생기간이 필요하므로 양생설비의 규모, 양생기간에 대한 작업상의 준비등 현장에서 콘크리트를 타설하므로 발생하는 일반적인 문제점들을 안고 있다. 또한 완전히 현장에서 콘크리트를 타설하는 방법외에 부분적으로 주형을 프리캐스트 부재로 현장 또는 공장제작하고 바닥판을 현장타설콘크리트로 마감하거나 바닥판을 프리캐스트부재로 제작하여 현장에서 설치하고 그 위에 철근을 배근한 후 현장콘크리트를 타설하는 방법이 있는데 이러한 경우에도 앞에서 언급한 현장타설콘크리트공법에서 발생하는 문제점들을 수반하고 있다. 국내의 경우에는 최근 수년간 성수대교 붕괴사고, 당산철교의 철거문제 등 교량에 관련된 큰 사고들이 속출하고 있는 실정이고 이에 따른 국내의 교량안전진단결과로부터 비교적 많은 수의 교량이 보수 및 보강이 필요한 것으로 판명되었으며 심지어는 철거를 요하는 교량도 적지 않은 것으로 나타났다. 이는 기존의 교량을 건설할 때 부실시공과 콘크리트의 품질불량 등과 같은 현장타설콘크리트가 안고 있는 문제점이 큰 원인중의 하나라 볼 수 있다. 이에 교량의 신설과 노후화된 교량의 보수 및 교체시 보다 신속하고 효율적이며 심각한 교통체증문제를 해결하고 경제적 측면에서 유리하게 시공할 수 있는 새로운 공법의 개발이 필요하다. 따라서 이러한 기존의 현장타설콘크리트를 사용하여 교량을 건설할 때 발생하는 많은 문제점들을 개선할 수 있는 공법으로 조립식교량공법을 제안할 수 있으며 이에 대한 적극적인 연구 및 실용화 방안이 모색되어야 한다. 그러나 현재 프리

캐스트 조립식교량에 대한 국내의 자료는 극히 한정적이고 시공된 사례가 극히 적은 실정에 있으나 국내의 경우에는 교량바닥판을 형성하는 웹브와 주형의 기능을 갖는 양측 플랜지부로 구성된 이른바 프리캐스트 채널보를 이용한 조립식 채널보 교량이 알려진 바 있다. KICT[1989]에서는 채널형 조립식 PC교량구조개발에 대한 연구가 있었으며 이후 1992년에는 단순보 형식의 다중보 교량 및 합성거더교량의 여러 단면형태에 대한 연구와 다중보 교량의 연결방법, 연결부형태, 연결부강도 등을 분석하여 횡하중분배에 대해 연구한 프리캐스트 P.S.C 교량의 설계에 관한 연구가 있었다. 또한 장승필[1996]은 프리캐스트 콘크리트 교량바닥판의 특성 및 시공사례 등을 연구한 바 있다. 미국의 경우는 PCI에서 AASHTO 규정에 따른 프리캐스트 프리스트레스트 콘크리트 교량의 바닥판 패널의 설계, 제작 및 시공에 대한 안내서를 제시하였고 John B. Kelly[1979]는 강재 주형과 프리스트레스트 I-형 및 Box-형 주형에 프리캐스트 프리스트레스트 콘크리트 교량의 바닥판 패널을 적용하는 연결상세 등을 제시하였다. 일본의 경우에도 단면 형태가 한정되어 있으나 프리캐스트 바닥판교란 이름으로 조립식 교량을 사용하고 있으며 독일에도 여러형태의 단면을 사용한 다중보 교량을 실용화 하고 있다. 따라서 국내에서의 조립식교량 실용화를 위해 본 연구에서는 첫째로 일반 현장타설콘크리트 교량건설에서의 제반적인 문제점들을 해결할 수 있으며 주형 및 바닥등의 상부구조전체를 프리캐스트 부재로 제작하여 현장에서 그라우팅과 볼트를 이용하여 조립함으로써 시공성 및 역학적 강성이 뛰어난 바닥판조립식 교량공법을 제안하고 둘째로는 바닥판조립식 교량의 이론적인 구조적 특성 및 역학적 거동을 분석하고 정적실험과 유한요소해석을 통해 실제 적용가능성 및 실용화 가능성을 규명하고자 하는데 그 목적이 있다.

2. 바닥판조립식교량의 구조

일반적으로 시공되는 교량은 현장타설콘크리트공법에 의해 제작되는 주형 또는 프리캐스트 제품으로 제작되는 주형이 교대위에 거치된 후 현장타설콘크리트공법에 의해 바닥판이 형성되는 구조를 갖고 있다. 그러나 본 연구에서 개발한 바닥판조립식교량은 교량의 상부구조전체 즉 주형과 바닥판을 각각 프리

캐스트제품으로 제작하여 현장에서 볼트와 그라우팅으로 연결하는 완전한 조립식 구조를 이루고 있으며 교량의 교각위에 횡방향으로 배치되는 주형과 주형의 상부에 연속 배치되는 규격화된 바닥판이 전단기에 의해 조립되어 일체화되는 특성을 가진다.

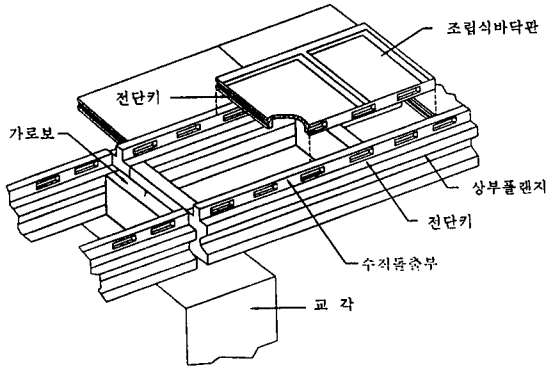


그림 1 바닥판조립식 교량의 구조도

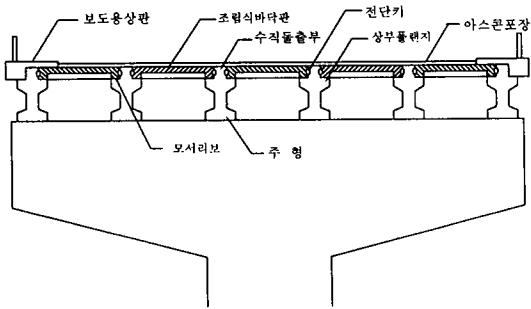


그림 2 주형과 바닥판이 전단기에 의해 조립된 횡단면도

이러한 전단기에 의한 조립은 외부로부터 가해지는 각종 변형 요인으로부터 바닥판과 주형간의 체결 상태를 안정되고 견고하게 유지함과 아울러 주형과 바닥판의 조립을 통해서 교량전체의 휨강성을 증대시킬 수 있다. 다음의 그림 1은 바닥판조립식 교량의 구조를 나타내고 있다. 바닥판조립식 교량구조에서 주형의 특성은 그림 1과 그림 2와 같이 I-형 단면을 가지는 주형의 상부 중간에 일정폭과 높이를 가지는 수직돌출부가 교량의 길이방향을 따라 전단면을 통해 수직방향으로 형성되어 있으며 주형의 수직돌출부의 양측에는 일정폭의 상부플랜지가 형성되어 있다. 또한 그림 2와 같이 교량의 횡방향으로 교각위에 놓이는 주형과 주형의 사이에는 바닥판의 하면

모서리부분에 보강과 지지를 위한 모서리보를 가지는 프리캐스트 바닥판이 주형의 양측 상부플랜지에 거치되어 조립되게 된다. 이때 바닥판 모서리보의 바닥면과 주형의 양측 상부플랜지의 상부면이 그리고 모서리보의 측면과 주형의 수직돌출부의 측면이 서로 밀착되어 조립되며 그 사이에는 전단키가 형성되어 연결형태를 이룬다. 프리캐스트 바닥판의 바닥 모서리 부분에 형성된 모서리보의 바닥면 두께는 주형의 상부플랜지의 폭과 동일한 두께를 가지며 모서리보의 외면에는 주형의 전단키와 대칭의 형태인 female to female 방식의 전단키가 길이방향을 따라 등간격으로 형성되어 있다. 또한 바닥판의 횡방향 외면에는 일정한 폭과 깊이를 갖는 직선형 전단키가 형성되어 있으며 바닥판의 바닥면 중간부에는 바닥면 모서리 부분의 모서리보와 같은 형태로 구성된 횡방향으로 가로지르는 보강 모서리보가 형성되어 있다. 바닥판조립식교량은 위와 같이 구성된 주형과 바닥판을 현장에서 조립한 후 주형과 바닥판의 전단키 사이에 시멘트 몰탈등을 충전하여 일체화시키는 구조를 가지고 있다. 또한 횡방향에 대한 교량전체의 결속력을 강화하기 위해 가로보를 1/2로 미리 분할하여 각각 주형과 일체화 제작한 후 현장에서 용접 및 고장력 볼트에 의해 횡방향으로 연결한다. 이때 가로보의 윗부분에는 미리 인장철근을 노출시켜 설치한 후 서로 용접으로 일체화시키므로 주형의 하중전달에 따른 인장력을 받도록 한다. 더욱이 횡방향으로 상호 조립된 바닥판의 사이에는 주형의 수직돌출부가 노출되어 그 수직돌출부와 바닥판의 상면이 동일평면을 유지하게 되므로 바닥판에 작용되는 수직 하중에 대해 각 바닥판과 주형이 개별적으로 변형되지 않고 균일하게 대응할 수 있게 된다. 각 주형의 수직돌출부가 차지하는 폭만큼 바닥판의 전체폭을 축소할 수 있게 되므로 보다 유리하고 경제적인 바닥판의 설계가 가능해질 뿐만 아니라 그 수직돌출부가 가지는 높이만큼 주형의 단면 2차 모멘트를 증대시킴에 의해 휨강성을 증가시킬 수 있다.

3. 바닥판조립식교량의 정적실험

3.1 정적실험의 개요

다음은 본 연구에서 제안된 바닥판조립식교량의 구조적 거동을 분석하고 역학적 타당성을 입증하기 위하여 수행된 실험크기의 1/2 축소모형에 대한 정

적실험에 관한 내용이다. [구민세, 1992]

실험체 설치의 횡단면도 및 종단면도는 각각 그림 3 및 그림 4와 같으며 실험체는 설계기준강도 300kg/cm^2 을 기준으로 하여 28일간 양생한 후 실험대(H 400×400) 위에 프리캐스트 주형을 설치하고 가로보는 철판과 볼트를 이용하여 연결함으로써 제작되었다. 주형과 바닥판의 조립에서는 조립식 바닥판을 주형의 상부플랜지에 설치한 후 바닥판과 주형의 연결부에는 모르타르를 주입하여 전단기를 형성함으로써 조립하였다. 또한 하중재하시 지점에서 교량의 횡방향 이동을 방지하기 위하여 내측보의 모서리에 스토퍼를 설치하였으며 전단기 형성을 위한 모르타르에는 주입시 시공성을 높이기 위하여 유동화제를 사용하였고 시멘트는 조강시멘트를 사용하였다. 그림 4에 나타난 바와 같이 하중재하점 밑에는 하중 분산용 형강을 부착하여 실험크기 4.2m 간격의 각 하중점에 하중이 P/2가 되도록 설치하여 트럭의 후륜하중이 재하되는 효과를 나타내도록 하였다. 바닥판조립식교량의 단면은 I-형 단면에 수직 돌출부를 갖는 형상으로 구성되어 있으나 실제단면의 제작에서는 시공의 용이성 및 전단등에 유리한

단면형상으로의 수정이 가능하므로 본 실험에서는 주형의 제작을 간편화하기 위하여 그림 3에서와 같이 I-형 단면과 등가의 단면 2차 모멘트를 갖는 구형의 환산단면을 이용하였다. 이렇게 실제 I-형 단면을 구형단면으로 환산할 경우 비틀림강성에 차이가 발생할 수 있으나 주형과 주형간의 횡방향 연결이 볼트등에 의해 체결되어 교량전체가 완전히 일체화되기 때문에 단면을 환산함으로써 발생하는 실제 거동의 차이는 극히 미소하리라 판단된다.

3.2 하중재하 및 실험결과

바닥판조립식교량의 실험에서는 약 13.4t까지의 정적하중을 2회씩 재하하여 각 부위의 처짐량, 연결부의 벌어짐, 변형량등을 측정하였고 하중을 제거하였을 때 변형이 회복되는 것을 확인하였다. 다음은 정적하중에 대한 주형과 바닥판의 전반적인 거동 및 균열발생에 관한 내용으로 실험을 시작하기 전 실험체의 바닥판 표면 자체에는 건조수축에 의한 균열이 없었으나 모르타르에 의해 접착된 부분에는 약간의 건조수축에 의한 균열이 발생하였다. 정적하중실험은 13.4t까지 재하되었으며 약 9t 정도에서

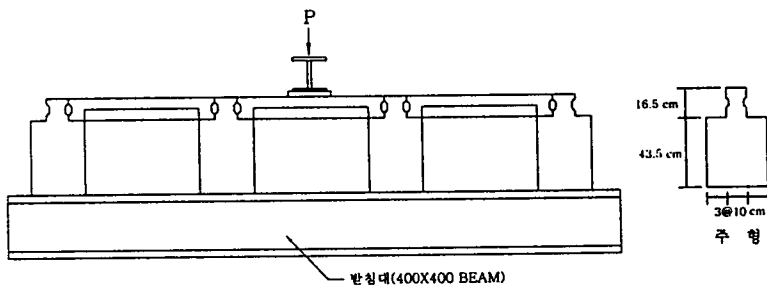


그림 3 실험체 설치의 횡단면도

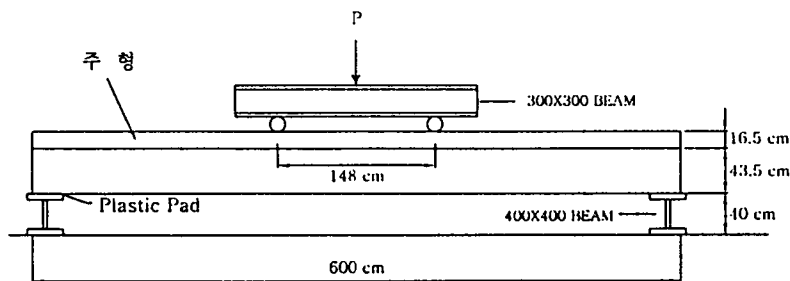


그림 4 실험체 설치의 종단면도

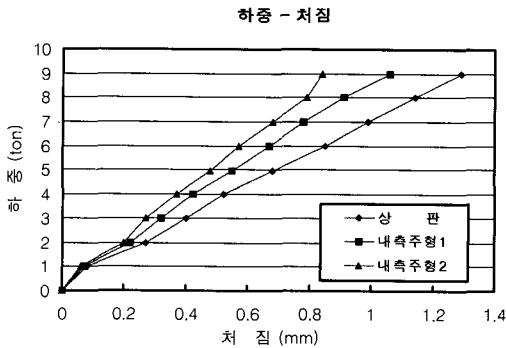


그림 5 정적하중재하시 2개의 내측주형과 바닥판의 하중-처짐곡선

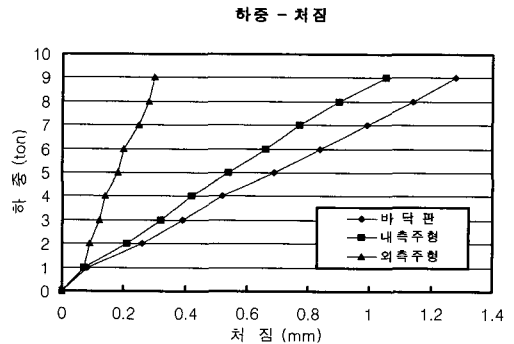


그림 6 내·외측주형과 바닥판의 하중-처짐곡선(첫번째재하)

바닥판하부에 미세한 균열이 발견되었고 바닥판상부에서의 균열이나 연결부에서의 벌어짐은 발생하지 않았으며 가로보에서의 균열도 관찰되지 않았다. 또한 7t 정도의 하중에서 내측주형의 처짐은 약 0.7mm 정도였으며 외측주형의 처짐은 약 0.3mm로 관찰되었다. 최대재하능력을 측정하기 위한 최종 파괴실험에서는 약 50t 정도의 하중하에서 바닥판의 편칭전단에 의한 파괴로 실험은 종료되었다. 다음의 그림 5는 바닥판에 균열이 발생되기전의 하중-변형 관계이다. 하중을 10t까지 재하하였을 때 2개의 내측주형과 바닥판의 처짐을 관찰한 결과 하중이 증가함에 따라 하중-변형 관계는 거의 선형적으로 증가함을 알 수 있으며 바닥판과 내측주형의 처짐이 거의 유사함을 알 수 있다. 이는 바닥판조립식교량이 하중을 재하하였을 때 일체적으로 거동함을 나타낸다. 그림 6은 첫번째 정적하중에 대한 내측주형과 외측주형 및 바닥판에 대한 하중-처짐곡선을 나타내고 있다. 외측주형의 처짐이 내측주형과 바닥판의 처짐보다 적게 발생함을 알 수 있으며 이는 하중재하점이 2개의 내측주형사이에 위치하기 때문에 하중전달이 내측주형에 집중되기 때문이다. 또한 그림 7은 두번째 정적하중에 대한 바닥판과 내측주형 및 외측주형의 하중-처짐관계를 나타내고 있으며 그림 6과 그림 7로부터 첫번째와 두번째의 정적하중에 대한 바닥판과 내측주형의 강성에는 거의 변화가 없는 것으로 나타났으나 외측주형의 경우에는 다소 강성의 변화가 있는 것으로 나타났다. 첫번째와 두번째의 정적하중이 재하되는 동안에 육안 및 dialgauge에 의해 관찰된 바닥판과 바닥판 사이의 벌어짐은 무시

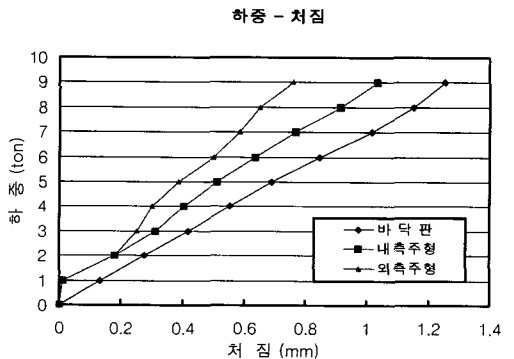


그림 7 내·외측주형과 바닥판의 하중-처짐곡선(두번째재하)

할 만한 크기로 나타났다.

4. 바닥판연결부의 구조해석

본 절에서는 바닥판조립식교량의 실험결과와의 비교를 목적으로 바닥판 중앙에 집중하중을 재하시켜 주형과 바닥판의 연결부에서의 부재력을 산정하였다. 이를 위하여 2개의 주형사이에 바닥판이 설치되어 있는 유한요소모델을 선정하여 해석하였으며 이때 실험결과와 근접한 해석모델을 찾기 위하여 그림 8과 같이 바닥판만을 분리하여 주형과 바닥판의 연결부 경계조건을 실험조건과 유사한 형태로 취해 지지점에서의 고정단 모멘트, 축력, 수직력을 산정하여 비교·검토하였으며 최종적으로는 바닥판조립식교량의 연결부에서의 거동 및 부재력에 대한 평형조건을 검증하였다. 부재력산정을 위한 유한요소모델

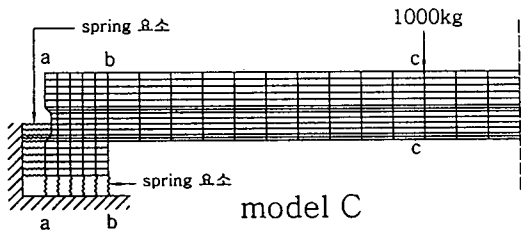
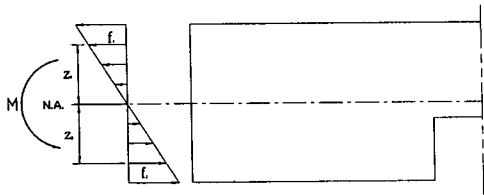


그림 8 부등단면을 갖는 바닥판의 유한요소해석모델

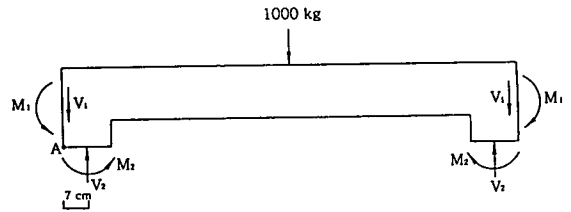


$$M = \sum_{i=1}^n f_i z_i + \sum_{j=1}^n f_j z_j$$

그림 9 부재력성분을 이용한 모멘트 산정

요소로는 2차원 해석을 위한 shell 요소를 사용하였으며 주형과 바닥판 및 전단키의 연결에는 스프링 요소를 사용하였다. 이때 주형과 바닥판이 밀착되는 효과를 나타내기 위해 스프링 요소의 강성은 콘크리트의 강성에 해당하는 값인 콘크리트의 설계강도 300kg/cm^2 을 기준으로 하였을 때의 탄성계수 260000kg/cm^2 를 사용하였다. 다음의 그림 10은 그림 8의 유한요소해석모델을 그림 9와 같은 부재력산정방법을 이용하여 해석한 부재력이다.

다음은 바닥판에 작용하는 하중위치에 따른 거동을 분석하기 위하여 그림 11에서와 같이 하중의 위치를 ①에서부터 ⑧까지 각각 재하하였을 경우에 대해 a-a, b-b, c-c, d-d에서의 반력 및 부재력을 분석하였으며 결과는 표 1과 같다. 이러한 하중위치에 따른 거동분석결과중 가장 불리한 응력이 발생하는 하중위치를 선정하여 실제 정적실험에 대한 유한요소해석시 적용하여 연결부 및 바닥판에 대한 저항내력을 판정하였다. 그림 11에서와 같이 각각 다른 위치에 하중을 재하하였을 경우에 연결부에서 발생하는 수직반력성분을 검토한 결과 그림 11의 횡방향 지간의 1/3의 위치에서 가장 불리한 부재력이 발생하며 하중이 바닥판의 중앙에서 단면이 변하는



$$\begin{aligned} M_1 &= 1500 \text{ kg} \cdot \text{cm} & M_2 &= 10430 \text{ kg} \cdot \text{cm} \\ V_1 &= 990 \text{ kg} & V_2 &= 1490 \text{ kg} \end{aligned}$$

그림 10 연결부에서의 부재력

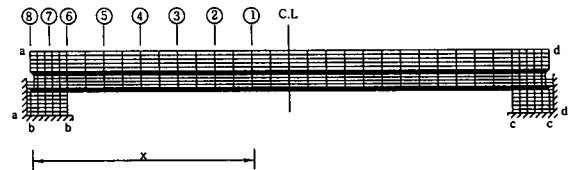


그림 11 연결부에서의 하중위치에 따른 유한요소해석 모델

표 1 Model C의 하중위치에 따른 반력(단위 : kg)

하중위치(x) \ 검토위치	a-a 단면	b-b 단면	c-c 단면	d-d 단면
① (60cm)	-1125	1731	1195	-800
② (50cm)	-1178	1884	875	-582
③ (40cm)	-1118	1918	563	-364
④ (30cm)	-920	1802	288	-172
⑤ (20cm)	-557	1503	87	-35
⑥ (10cm)	140	851	12	-4
⑦ (5cm)	510	489	-3	4
⑧ (0cm)	784	215	-3	3

곳 사이에 재하될 경우는 전단키가 위치한 곳에서 하향의 수직반력이 발생한다는 것을 알 수 있으며 이는 바닥판이 상향으로 치솟는 거동을 하는 것으로 나타났다. 그러나 하중이 내측지지구간내에 작용하는 경우는 전단키와 내측지지구간에서 상향의 수직반력이 발생한다는 것을 알 수 있다.

5. 바닥판조립식교량의 유한요소해석

본 절에서는 바닥판조립식교량의 정적실험에 대한 역학적 타당성을 입증하기 위하여 탄성범위내에

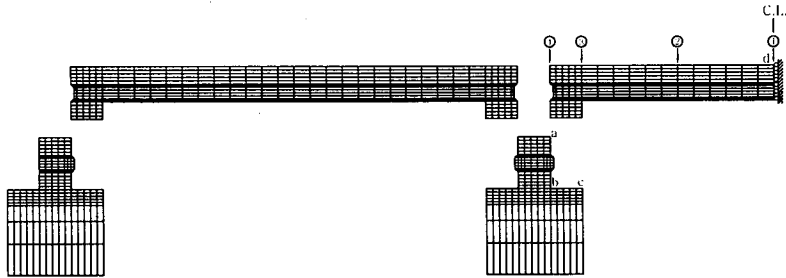


그림 12 실험체와 비교를 위한 유한요소해석모델

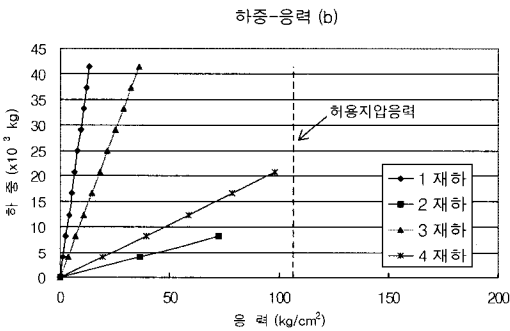


그림 13 b 위치에서의 응력비교

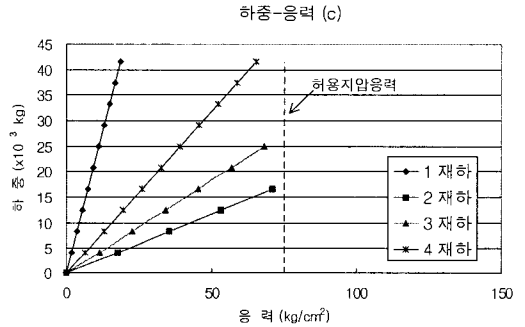


그림 14 c 위치에서의 응력비교

서 정적실험시의 실험체와 동일한 모델에 대해 유한요소해석을 수행하여 해석결과를 분석하였다. 연결부 및 바닥판에 대한 안전률의 산정은 앞 절의 해석결과를 기준으로 부재의 각 부위에 가장 불리한 응력이 발생하는 하중재하 위치를 참고하였으며 실험 모델에 동일하게 적용하여 저항내력에 대한 평가를 하였다. 또한 정적실험에 의한 내·외측 주형의 처짐과 그림 12의 유한요소모델의 처짐결과를 비교하여 바닥판조립식교량의 구조적 일체성을 입증하였다. 그림 12는 바닥판조립식교량의 실험체에 대한 정적결과와 비교하기 위해 18000개의 절점수를 부여한 모델로서 주형과 바닥판의 접촉면에서 그림 8에 해당하는 경계조건을 갖는다. 이러한 유한요소모델은 바닥판과 주형이 접촉되는 구간에는 콘크리트의 강성에 해당하는 frame 요소를 이용하여 연결함으로써 바닥판과 주형사이에서 스프링 역할을 하여 하중이 바닥판의 변형에 의해서 주형으로 전달되는 효과를 나타낼 수 있다. 이때 frame 요소의 탄성계수는 실험체의 탄성계수와 동일한 탄성계수를 사용

하였으며 접촉되는 면을 n개로 분할하였을 때 각각의 면적을 frame 요소의 단면적으로 취하였고 요소의 길이는 1mm로 제한하였다.

바닥판과 주형의 접촉현상에 대한 정밀해석을 수행하기 위해서 그림 12와 같이 바닥판조립식교량의 실험체 모델과 동일한 제원을 갖는 1/2의 스프링 효과를 이용한 유한요소모델을 작성하여 ①부터 ④까지 각기 다른 위치에 하중을 재하한 경우에 b, c, d에서의 응력 및 a에서 주형의 측면과 바닥판 측면 사이의 벌어짐등을 정적실험결과와 비교하면 다음과 같다. 재하된 하중의 크기는 실험체의 종단면도에서 정적실험시 사용한 설계하중 8.3t이 재하될 때 2점재하를 위한 형강에 의해 1/2로 분배된 4.15t의 하중을 재하하였다. 먼저 b의 위치에서의 지압응력을 살펴보면 그림 13에 나타난 바와 같이 위치 ②에 하중을 재하한 경우가 가장 불리하게 작용하며 안전률은 약 3에 해당하는 것으로 나타났고 설계하중하에서 b의 위치에서는 충분한 저항내력을 가진 것으로 판단할 수 있다. 다음은 c 위치에서의 응력을 위치 ①, ②, ③, ④

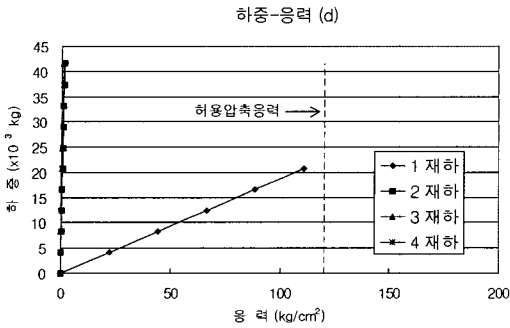


그림 15 d 위치에서의 응력비교

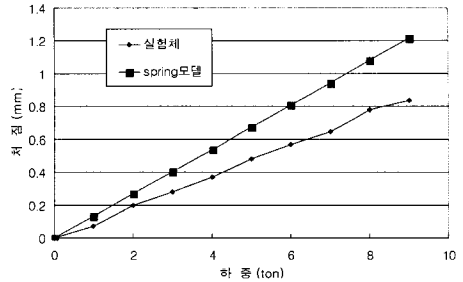


그림 17 내측주형에서의 유한요소해석과 실제실험과의 처짐비교

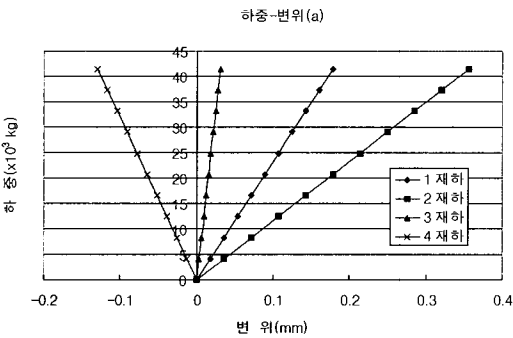


그림 16 a에서의 변위비교

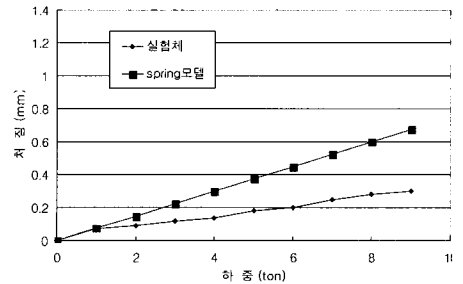


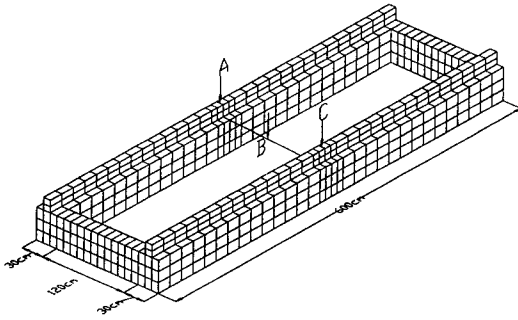
그림 18 외측주형에서의 유한요소해석과 실제실험과의 처짐비교

에 하중을 재하한 각 경우에 대해 비교하면 다음의 그림 14와 같다. 그림 14에 나타난 바와 같이 c의 위치에서는 각각의 하중위치에 따라 모두 지압응력이 발생하게 되며 위치 ②에 하중을 재하한 경우가 가장 큰 지압응력을 발생시키며 설계하중의 약 4배에서 허용지압응력을 초과함으로써 지압에 대한 저항내력에는 전혀 이상이 없는 것으로 나타났다. 바닥판에 해당하는 d의 위치에서의 압축응력을 위치 ①, ②, ③, ④에 하중을 재하한 각 경우에 대해 비교하면 다음의 그림 15와 같다. 그림 15에 나타난 바와 같이 d의 위치에는 각각의 하중위치에 따라 모두 압축응력이 발생하게 되나 바닥판 중앙에 하중이 재하되는 경우인 위치 ①에 하중을 재하한 경우가 가장 큰 압축응력을 발생시킨다. 바닥판에서 가장 불리하게 작용될 수 있는 하중의 위치가 d이기 때문에 설계하중이 d의 위치에 작용하는 경우인 위치 ①에 하중을 재하한 경우가 다른 경우보다 가장 큰 압축응력이 발생하게 됨을 알 수 있다. 따라서 d의 위치에서도 설계하중의 5배가 넘는 안전률을 확보하고 있는 것으로 나타났으며 c점 및 d점과 마찬가지로 충분한 저항내

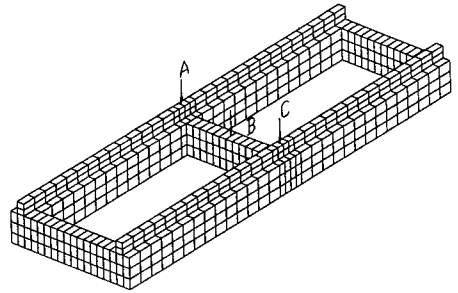
력을 가졌다고 할 수 있다. 마지막으로 그림 16에 나타난 바와 같이 그림 12의 a에서의 하중재하위치에 따른 벌어짐의 크기를 살펴보면 다음과 같다. 하중의 재하위치가 연결부에서 멀어질수록 a에서의 벌어지는 크기는 크게 발생하게 되고 주형과 바닥판의 접촉면인 위치 ④에 하중이 재하될 경우에는 ①, ②, ③의 하중위치에서와는 반대방향의 변위가 발생하는 것을 알 수 있으며 이는 바닥판 단부의 전면이 주형의 수직돌출부쪽으로 밀착되는 현상이 발생함을 의미한다. 그러나 전반적으로 설계하중하에서 a에서의 변위는 거의 무시할 만한 크기라 판단된다.

다음은 정적실험과 스프링효과를 고려한 유한요소해석을 통해 1t부터 10t까지의 하중을 재하하였을 때의 내·외측 주형의 처짐결과를 비교하였다. 이러한 유한요소해석과 실제실험에서의 처짐결과를 비교함으로써 바닥판조립식교량에 대한 전반적인 거동 및 전체강성을 평가할 수 있다.

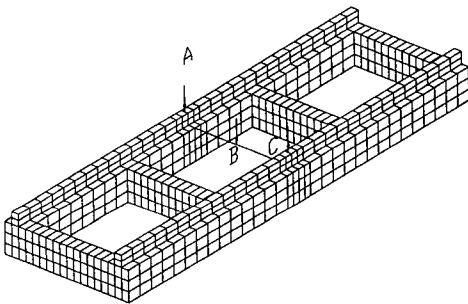
다음 그림 17과 그림 18은 각각 내·외측주형의 처짐을 나타내고 있으며 정적실험에 의한 결과가 유한요소해석결과보다 작게 나타났음을 알 수 있으며



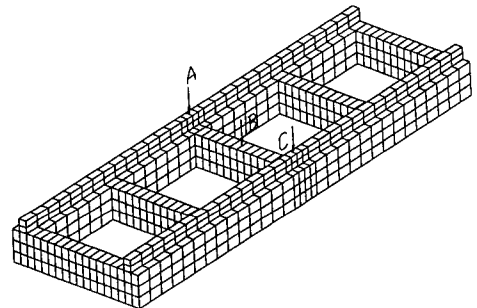
(a) BR1의 유한요소모델



(b) BR2의 유한요소모델



(c) BR3의 유한요소모델



(d) BR4의 유한요소모델

그림 19 가로보 개수에 따른 유한요소모델

하중 증가에 따른 처짐이 유사한 경향을 나타내고 있음을 알 수 있다. 이러한 결과로부터 실험체의 강성이 이론적인 강성보다 크게 나타났음을 알 수 있으며 설계하중하에서 바닥판조립식교량의 전체강성에는 아무런 문제점이 없는 것을 알 수 있다.

6. 하중분배효과와 합성효과

본 절에서는 바닥판조립식교량에서 주형과 바닥판이 전단키에 의해 연결되었을 때의 전체적인 합성거동을 관찰하기 위하여 비합성단면의 거동과 합성단면의 거동등을 유한요소해석을 통해 비교·관찰하였다. 이를 위해 먼저 그림 19의 (a)에서 (d)와 같이 2개의 주형사이에 표 2와 같이 가로보의 갯수를 달리 취하였을 때 비합성단면에 대한 하중횡분배효과를 관찰하여 적절한 가로보의 설치갯수를 제안하였으며 바닥

표 2 가로보의 개수 및 설치간격

	가로보의 수	설치간격(m)
모델 BR1	2	5.8
모델 BR2	3	2.8
모델 BR3	4	1.8
모델 BR4	5	1.3

판이 결합된 합성단면에 대한 주형과 바닥판의 합성효과를 관찰하여 주형과 바닥판의 합성 및 구조적 일체성을 입증하였다.

그림 20, 그림 21에서와 같이 바닥판 합성전의 하중횡분배효과를 살펴보면 주형과 주형사이에 하중이 재하되었을 경우에는 가로보의 개수에 관계없이 양쪽의 주형에서 일정한 처짐이 발생함을 알 수 있었고 한쪽 주형에 편심되어 하중이 작용하였을 경우에는 가로보의 개수가 증가함에 따라 하중이 횡분배

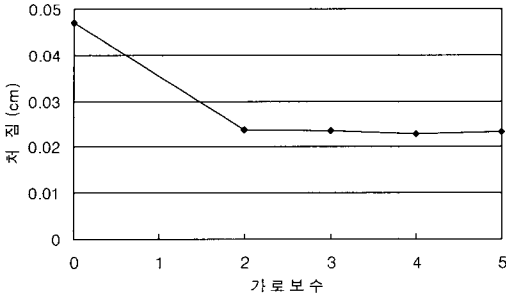


그림 20 비합성단면의 중앙에 집중하중 재하시 처짐곡선

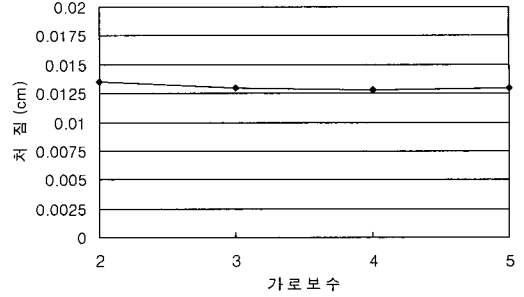


그림 22 합성단면의 중앙에 집중하중 재하시 처짐곡선

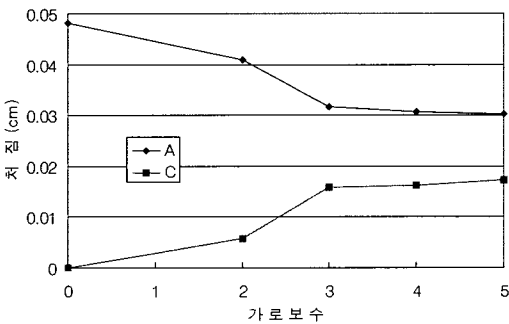


그림 21 비합성단면의 편심하중 재하시 처짐곡선

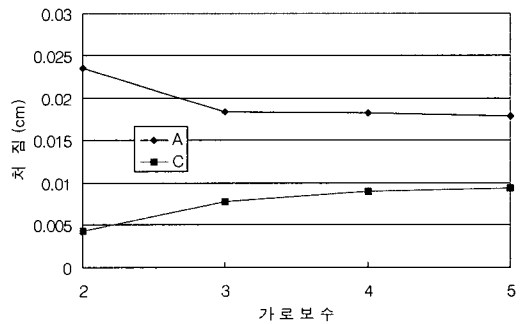


그림 23 합성단면의 편심하중 재하시 처짐곡선

됨으로써 하중이 재하된 주형의 처짐은 감소하게 되며 하중이 전달되는 위치의 주형은 증가하게 되는데 이때 가로보의 개수를 3개 이상 증가시켜도 양쪽 주형의 처짐에는 큰 변화가 없었다. 또한 그림 22, 그림 23에서와 같이 바닥판의 합성후의 하중분배효과도 합성전의 경우와 유사한 거동을 나타냈는데 바닥판의 합성효과의 영향으로 합성전 처짐의 약 1/2로 감소함을 알 수 있었다. 따라서 바닥판조립식교량에 대한 실제 거동을 보다 정확하게 표현할 수 있는 접촉효과를 이용한 유한요소해석으로부터 바닥판조립식교량의 하중분배 및 합성효과가 효율적으로 발생함을 알 수 있다.

7. 결 론

바닥판조립식교량의 합성거동에 관한 연구의 결론은 다음과 같다.

첫번째는 거더 상면에 연장 형성된 수직돌출부의 양측에 상부플랜지를 가지는 주형과 바닥면에 모서리보가 형성되어 있는 바닥판이 현장에서 그라우팅

에 의한 전단키로 연결되어 교량구조물을 형성하는 바닥판조립식교량구조를 제안하였다.

두번째로는 주형과 바닥판의 연결부에 콘크리트의 강성에 해당하는 스프링 효과를 이용한 유한요소해석을 통해 바닥판조립식교량의 핵심부인 주형과 바닥판의 연결부에서 재하된 하중에 의해 발생하는 부재력을 해석하였다. 바닥판조립식교량의 연결부에서의 부재력을 산정한 결과로는 양단고정의 형태에서 추가적으로 주형의 상부플랜지 지지구간에서 발생하는 수직반력에 의한 모멘트가 발생하는 것으로 나타났으며 특히 바닥판 횡방향길이의 1/3의 위치에 하중을 재하하였을 때 주형과 바닥판의 연결부인 전단키 및 주형의 상부플랜지쪽에 가장 큰 수직반력이 발생함을 알 수 있었다. 이러한 하중위치를 정적실험의 유한요소해석모델에 적용하여 각 부재위치에서의 응력 및 벌어짐등을 관찰하여 저항내력을 산정하는데 적용하였으며 해석결과로부터 바닥판조립식교량은 가장 불리한 하중위치에서도 충분한 안전율을 확보하고 있는 것으로 나타났다. 또한 바닥판조립식교량의 전체 강성을 검토하기 위한 정적실험에서의 내·외측 주형의

처짐과 유한요소해석결과를 비교한 결과에서는 실험에 의한 처짐이 유한요소해석결과보다 작게 나타났으며 이로부터 바닥판조립식교량의 실제 강성은 충분히 안전한 것으로 증명되었다.

세번째로는 바닥판조립식 교량구조의 특성상 바닥판이 현장에서 조립되었을 때 비합성 및 합성단면의 합성효과와 하중전달효과등을 비교하였다. 비합성단면에서 중앙에 집중하중재하시 하중횡분배효과는 가로보의 개수에 관계가 없는 것으로 나타났으나 편심하중재하시에는 가로보의 개수가 3개로 증가하였을 때 가장 현저하게 나타났다. 그러나 가로보의 개수를 4개 이상으로 증가시켜도 하중횡분배효과는 진전되지 않는 것으로 나타났고 따라서 하중의 횡분배에 가장 적절한 가로보의 개수는 3개로 결정하였다. 또한 합성단면에서의 하중횡분배는 바닥판연결에 의한 합성효과로 인해 비합성단면에서의 하중횡분배의 약 1/2의 크기로 나타났으며 이러한 결과로부터 효율적인 합성효과가 발생함을 알 수 있었다.

마지막으로 본 연구는 바닥판조립식교량의 바닥판설치 유무에 따른 합성효과 및 하중전달효과에 대해 주로 연구하였으나 추가적으로 전단거동에 대한 연구가 필요하리라 사료된다.

감사의 글

본 연구는 인하대학교 산업과학기술연구소의 지원아래 이루어졌으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. 구민세, 정란, 김금환, 김종승, 노영숙, "상판조립식 PC 교량의 피로시험연구", 한국콘크리트학회 논문집, 제3권 2호(통권 제5집), 1992
 2. 구민세, "상판조립식 PC 교량개발", 인하대학교 부설 컴퓨터 응용과학 연구소, 1992
 3. 구민세, "프리캐스트 슬래브 조립용 프리스트레스트 교량의 실용화에 관한 연구", 인하대학교 산업과학기술연구소, 1995
 4. 구민세, "프리캐스트 슬래브 조립용 RC 교량의 실용화에 관한 연구", 인하대학교 산업과학기술연구소, 1995
 5. 장승필, 김영진, 김종희, 심창수, "프리캐스트콘크리트바닥판의 구조 특성에 관한 연구", 대한토목학회 학술발표회 논문집, 1996, pp.169~172
 6. 장승필, 김영진, 김종희, 심창수, "프리캐스트 바닥판 교량의 female-to-female 타입 전단키의 거동 연구", 대한토목학회 학술발표회 논문집, 1997, pp.199~202
 7. 한국건설기술연구원, "프리캐스트 PS콘크리트 교량의 설계에 관한 연구", 1992
 8. 한국건설기술연구원, "채널형 조립식 PC교량구조개발", 1989
 9. Precast Concrete Connection Details, Beton-Verlag, Netherlands, 1978
- (접수일자 : 1997. 8. 4)