이중합성 박스 거더교의 콘크리트 타설 두께에 따른 휨강도 변화

Effects of Flexural Strengths of Double Composite Box Girder Bridges on Different Concrete Depths

신 동 훈* 성 원 진* 심 기 훈* 최 지 훈** 이 용 학***
Shin, Dong Hun Sung, Won Jin Shim, Ki Hoon Choi, Ji Hoon Lee, Yong Hak

ABSTRACT

The double composite box girder is a structural system filled with concrete at the bottom of the steel box in the negative moment region increasing the flexural strengths. Flexural strengths of the double composite steel box girders are investigated through a series of the experimental tests and the numerical analysis. The experimental tests are performed on the three kinds of steel box girders with the different concrete depths including 10cm, 15cm, and 20cm. Moment-curvature relations are calculated based on the sectional analysis method describing the nonlinear natures of concrete and steel. In the finite element analysis the nonlinear nature of concrete is described based on the three dimensional four-parameter constitutive model recently developed and that of steel is described based on von Mises failure criterion. The ultimate flexural capacities of the box girders predicted using sectional analysis and finite element analysis show good agreement with those of the experiments.

1. 서론

휨, 전단, 비틀림 강성이 일반 거더에 비해 크게 증가하는 박스거더는 곡선 및 지간 30m 이상의 비교적 장지간 교량형식으로 널리 사용되고 있다. 최근에는 장지간화 및 경량화를 목적으로 두 종류 이상의 구조형식을 결합한 합성형 박스거더에 관한 기술개발 및 연구가 활발하게 진행되고 있다. 거더의 부 모멘트 구간 하부에 콘크리트를 타설하여 하부 플랜지의 압축력을 압축에 대한 저항성이 큰 콘크리트가 분담하게 하는 이중합성 박스 거더는 하부 콘크리트의 하중 분담 효과로 형고가 감소하고, 국부좌굴에 대한 저항성이 증가하며, 상대적으로 공사비가 적은 콘크리트가 압축력을 분담하여 사하중 증가로 인한 공사비 증가보다 전체 공사비의 절감 효과가 매우 큰 장점을 갖는다.

이중합성 박스 거더의 휨 저항 미케니즘은 강박스의 휨 저항, 중립축 하단에 타설된 콘크리트의 휨 저항 및 박스의 콘크리트 횡방향 거동 구속으로 인한 콘크리트와 강재의 상호작용으로 구성된다. 중립축 하단에 타설된 콘크리트는 단면의 도심축 및 중립축과 같은 기본적인 단면상수 값 뿐만 아니라 전단지연 현상으로 인한 플랜지의 휨 응력과 이에 따른 유효폭에 또한 변화를 주므로 기존의 강박스 거

* 정회원, 건국대학교 대학원 토목공학과
** 정회원, 한구 엔지니어링 이사, 공학박사
*** 정회원, 건국대학교 토목공학과 조교수

더에 적용되는 이론적 해석방법에 부가적인 접근방법을 필요로 한다. 본 연구는 이러한 이중합성 강박스 거더의 상호 복합적인 작용으로 발생하는 휨 거동을 실험을 통해서 휨강도 변화를 연구하고 단면해석(section analysis)과 유한요소 해석(F.E.A)을 통하여 내부 콘크리트의 타설 두께변화에 따른 이중합성 박스 거더교의 휨강도 변화를 비교 규명하고자 한다.

2. 이중합성 박스거더 부재의 휨실험

2.1 실험 재료

휨거동 실험을 위해 사용된 재료는 28일 콘크리트 설계기준 강도 $270kgf/cm^2$을 목표로 하였다. 압축강도용 공시체는 $\phi 150 \times 300mm$ 실린더 몰드를 사용하여 제작하였다. KS F 2405(콘크리트의 압축강도 시험 방법)에 따라 압축강도 실험을 수행하였고 종방향 변형율과 횡방향 변형율을 측정하기 위해 60° 각도로 종방향 변형율 게이지3개, 횡방향 변형율 게이지3개를 각각 부착하였다. 콘크리트 압축강도 실험결과는 Table 1에 제시하였다.

실험체 제작에 사용된 강재는 SS400(항복강도 $2500kgf/cm^2$이상)으로 KS B 0801(금속재료 인장 시험편)에 따라 9T의 판형 시험편인 소재 1A로 시험편을 3개를 KS B 0802(금속 재료 인장 시험방법)에 따라 실험하였다. 변형율 게이지는 시험편의 중앙의 상하면에 종방향으로 각각 1개씩 부착하였다. 강재의 탄성 계수는 인장강도 실험시 편심의 영향을 배제하기 위하여 상-하면 종방향 게이지의 변형율을 평균하고 항복응력의 약 85%이내의 데이터를 회귀분석하여 결정계수 99.99%로 산정되었다. 강재 인장강도 실험 결과는 Table 2에 제시하였다.

Table 1 Material properties of concrete

Day	Compressive strength (kgf/cm^2)	Modulus of elasticity ($\times 10^5$ kgf/cm^2)	Poisson's ratio
28 days	240	2.5	0.20

Table 2 Material properties of steel

Specimen	Tensile strength (kgf/cm^2)	Modulus of elasticity ($\times 10^6$ kgf/cm^2)	Poisson's ratio
SS400-9T	3500	2.1	0.30

2.2 실험체 제작

실험체의 형상은 상하부 플랜지폭 340mm, 복부의 높이 482mm, 박스 거더의 길이 4150mm이며 지점부와 하중 가력부는 외부 다이아프램으로 보강하였고 박스거더 내부에 각각 콘크리트 타설높이 10cm, 15cm, 20cm인 3개 실험체를 제작하여 실험체 명칭을 각각 C10, C15, C20으로 나타내었다. 실험체의 단면은 Fig. 1과 같다. 실험체 제작 과정을 요약하면 다음과 같다.

① 강재 재단 후 세 개 실험체 하부 플랜지와 복부 등을 ㄷ 자 형태로 제작하였다.
② 하부 플랜지와 콘크리트 사이에 계획된 강재 변형율 게이지를 부착하고 콘크리트를 타설하였다.
③ 타설된 콘크리트 위에 부직포를 덮고 1일 2회 살수하여 22일간 습윤 양생하였다.
④ 콘크리트 타설 22일 후 콘크리트 상면에 계획된 콘크리트 변형율 게이지를 부착한 후 다음날 상부 플랜지를 용접하였다.

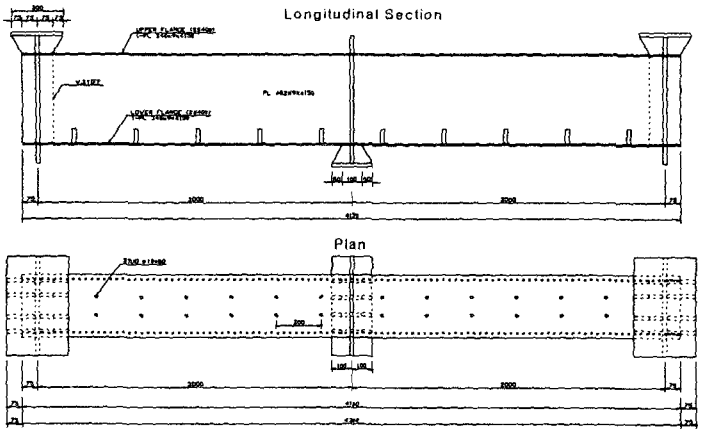
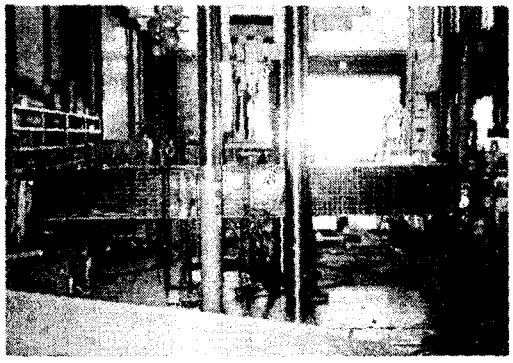


Fig. 1 Details of test girder

2.3 실험방법

실험시 만능시험기의 하중은 하향으로 재하되므로 콘크리트에 압축응력이 발생하게 하기 위해 실험체의 하부플랜지가 위로 향하도록 거치하여 재하 하였다. 각 채널의 인식 방법은 콘크리트 두께-게이지 설치 위치와 측정 방향-실험시 할당된 채널의 일련번호로 구성하였다. 강박스 외부의 휨거동을 측정할 단면의 상·하부 플랜지에는 플랜지 중앙과 양쪽 복부판으로부터 2.5cm떨어진 위치에 횡방향 구속 효과를 측정하기 위하여 종-횡방향으로 2 방향 강재 게이지를 부착하였다. 복부판은 휨과 전단 변형율을 측정하기 위하여 3방향 강재 게이지를 부착하였고 그 부착위치는 콘크리트와 강재 사이의 전단 흐름(shear flow)을 계측하기 위해 복부 1면당 총 4개의 로젯 게이지를 부착하였다.

강박스 내부의 게이지는 콘크리트 타설전 하부 플랜지 중앙에 종방향으로 30cm간격의 1방향 강재 게이지 9개와 횡방향으로 4개의 1방향 강재 게이지를 부착하였다. 강박스 내부 콘크리트 상면에는 보의 중앙 단면, 휨거동 측정단면(양쪽 단부로부터 각각1.675m, 1.775m단면) 및 매설된 강재 게이지와 일치하는 2개의 단면 등, 총 5개의 단면에 단면당 3개의 (종방향-1개, 횡방향-2개) 콘크리트 게이지를 부착하였다. LVDT(200mm)는 외부 보강된 중앙부 다이아프램을 피하여 보 중앙으로부터 왼쪽(1.675m 단면쪽)으로 2.5cm이격하여 플랜지하단에 설치하였고 0.03mm/sec의 변위제어(displacement control)로 하중을 재하하였다.

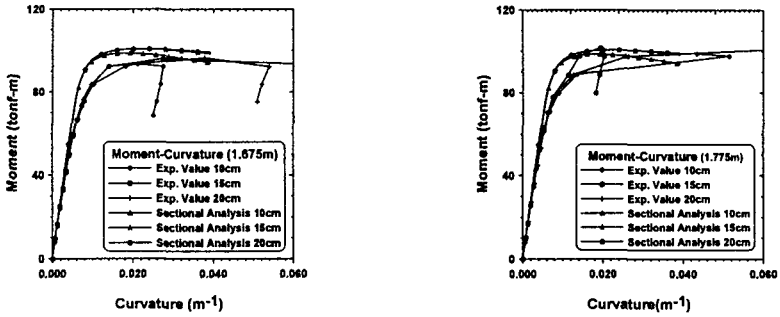


· Fig. 2 Test setup

3. 실험결과 분석 및 예측

3.1 단면해석에 의한 모멘트-곡률($M-\phi$)관계

실험과 이론적 단면해석으로 모멘트-곡률($M-\phi$)관계를 비교 평가하였다. 실험에서 곡률값은 1.675m단면과 1.775m단면에서 계측된 값 가운데 10tonf 단위의 하중과 최대하중 재하점에서 계산된 중립축 위치와 각 하중에 대한 압축측 연단의 변형율로부터 $\phi=\varepsilon/y$의 관계를 이용하여 계산하였다. 계산된 곡률에 해당되는 모멘트는 재하하중으로부터의 실험체 곡률측정 단면의 모멘트를 계산하여 구하였다. 이론적 단면해석에서의 모멘트-곡률 관계는 선형관계의 응력-변형율 해석에 적용된 개념을 콘크리트 및 강재의 비선형 응력 변형율 관계를 고려함으로써 비선형 영역으로 확장하였다. 단, 비선형 영역에서도 평면 보존의 법칙은 성립하는 것으로 가정하였으며, 콘크리트의 응력-변형율 관계는 콘크리트 공시체 압축강도 실험으로부터 구해진 결과를 적용하였다. Fig. 6은 실험과 이론적 단면해석의 모멘트-곡률($M-\phi$)관계를 비교한다.



(a) 1.675m Section (b) 1.775m Section

Fig. 3 Moment-Curvature curve

3.2 유한요소해석에 의한 거동예측

콘크리트와 강재의 재료 비선형성을 고려한 유한요소 해석은 건국대학교 토목공학과 콘크리트 연구실에서 개발 사용하고 있는 New-MICROFEM을 이용하여 수행하였다. New-MICROFEM은 콘크리트를 네 계수 파괴 포락선에 근거한 3차원 구성모델[1]로 수치모델화 하며, 강재는 von-Mises 파괴규준을 이용한 3차원 탄-소성 구성모델로 수치모델화하고 있다. 유한요소해석에서 타설된 콘크리트는 절점당 3개의 전이 자유도를 갖는 27절점 육면체 요소, 강박스는 절점당 3개의 전이자유도와 2개의 회전자유도를 갖는 9절점 민드린 쉘요소를 사용하여 유한요소모델화하였다. 강재와 콘크리트의 접합면에서 쉘요소의 회전자유도로 인해 발생되는 콘크리트의 자유도 불일치는 콘크리트에 가상의 회전자유도를 삽입하고 강성행렬을 구성하여 소거하는 방법으로써 해결하였다. Fig. 7은 수치해석에 의해 예측된 하중-변위관계와 실험결과와의 비교를 보여준다.

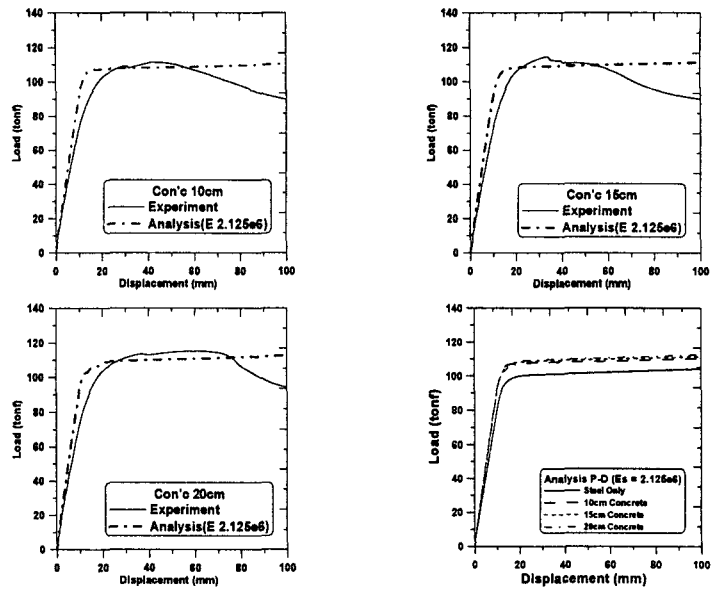


Fig. 4 Comparison of load-displacement curve

3.3 횡방향 구속응력

Fig. 8은 C10, C15 및 C20실험체의 콘크리트와 하부 플랜지 사이에 부착한 내부 강재 게이지의 종-횡 변형율을 나타낸 것으로 실선은 강재의 프와송비인 0.3, 점선은 콘크리트의 프와송비인 0.2의 기준선이다. 그림에서 알 수 있듯이 콘크리트와 강재 접촉면에서의 횡변형율은 약 0.0005 이내의 종변형율일 때 종변형율의 30%보다 작고 20%보다 크며, 약 0.0005 이후의 종변형율에 대해서는 종변형율의 30%보다 커진다. 콘크리트 공시체 압축강도 실험으로부터 0.0005의 변형율은 약$0.5f_{ck}$에 해당되므로 콘크리트의 압축응력 $0.5f_{ck}$이내에서는 콘크리트의 횡방향 구속효과로 인장응력이 작용함을 알 수 있다. 일반적으로 교량에 작용하는 허용응력 단계의 하중으로는 콘크리트에 횡방향 인장응력이 작용하고 이 응력이 교량의 사용기간 이내에 지속적으로 반복될 경우 콘크리트의 품질에 문제가 있을 것으로 판단된다.

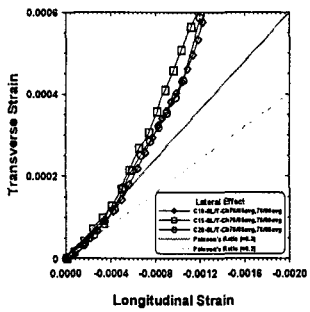


Fig. 5 Longitudinal-Transverse strain curve of internal lower flange

4. 결 론

이중합성 박스 거더교의 콘크리트 타설 두께에 따른 휨강도에 대한 실험 및 이론적 해석을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 콘크리트 없이 강재만 있는 경우와 콘크리트 10cm, 15cm 및 20cm를 타설한 경우에 대한 수치 해석을 통한 하중-변위 곡선으로 콘크리트가 타설된 경우 강재만 있는 경우보다 강성 및 최대하중의 증가의 결과를 규명하였고 콘크리트 타설 두께에 따른 강성의 큰 변화가 없으므로 일정 두께 이상의 콘크리트 타설이 구조물의 강성 증가에는 큰 영향을 미치지 못하는 것으로 판단된다.
2) 실험을 통하여 이중합성 강박스 거더의 박스내부 콘크리트가 탄성구간에서 콘크리트와 강재의 횡방향 구속효과에 의해 횡방향 인장응력이 작용함을 규명하였고, 그 인장응력에 의해 발생하는 콘크리트 압축강도의 감소에 따른 보강 방안이 필요하다고 사료된다.
3) 9절점 민드린 쉘 요소와 27절점 육면체 요소를 공식화하여 콘크리트와 강재의 비선형성을 고려하는 유한요소해석 프로그램 New-MICROFEM에 내장시켜 재료 비선형 수치해석을 수행한 결과 최대 재하하중이 실험치와 잘 일치하고 하중-변위 곡선이 유사하여 재료 비선형 수치해석만으로도 이중합성 강박스 거더의 휨거동을 예측하였다.
4) 휨거동 실험, 비선형 수치해석 및 이론적 단면 해석을 통한 모멘트-곡률($M-\phi$)관계를 분석하여 이론적 단면 해석시 휨거동 실험에서 최대 재하하중이 같고, 모멘트-곡률 관계가 일치하므로 간단한 단면 해석을 통해서도 휨거동을 예측할 수 있었다.

참 고 문 헌

1. 이용학, "콘크리트 3차원 구성모델을 위한 네 계수 파괴포락선의 개발," 대한토목학회 논문집, Vol. 19, No. I-1, 1999, pp. 79-88.
2. 최지훈, "이중합성 강박스 거더교의 휨거동," 건국대학교 토목공학과 박사학위논문,2000.
3. Bazant, Z. P. and Pijaudier-Cabot, G., "Measurement of Characteristic Length of Nonlocal Continuum," J. of Engrg. Mech., ASCE, Vol. 4, No. 115, 1989, pp. 755-767.
4. Brauns, J., "Analysis of Stress State in Concrete-filled Steel Column," J. of Constructional Steel Research, 49, 1999, pp. 189-196.
5. Chen, W. F., "Plasticity in Reinforced Concrete," McGraw-Hill, 1982.
6. Kondo, K., Komatsu, S., and Nakai, H., "Theoretical and Experimental Researches on Effective Width of Girder Bridges with Steel Deck Plates," Transactions of the Japanese Society of Civil Engineers, No. 86, 1962, pp.1-17.
7. Lee, Y. H. and Willam, K., "Mechanical Properties of Concrete in Uniaxial Compression," ACI Materials J., Vol. 94, No. 6, 1997, pp. 457-471.
8. Saul, R., "Bridges with Double Composite Action," Journal of IABSE, Structural Engineering International, Vol. 6, 1996, pp. 32~36.
9. Schneider, S. P., "Axially Loaded Concrete-filled Steel Tubes," Journal of Structural Engineering, Vol. 124, No. 10, 1998, pp. 1125-1138.