

경량골재 콘크리트를 활용한 중공 PPC 거더의 구조거동 평가

The Evaluation of Structural Behavior of Hollowed PPC Girder Using Lightweight Aggregate Concrete

노 병 철^{1)*} 이 경 수²⁾ 김 익 상³⁾ 차 광 일⁴⁾
Lho, Byeong Cheol Lee, Kyung Su Kim, Ik Sang Cha, Kwang Il

Abstract

Recently prestressed concrete bridges are generally used instead of reinforced concrete. PSC is more durable than RC because it can reduce crack problems, reinforcement corrosion, leakage and carbonation etc. And also PSC is more effective because there is no crack in tension area, and the entire concrete section is considered in section analysis. And it can reduce section size because vertical component by prestressing force can reduce the shear force. However, using high strength concrete can increase the self weight of bridge because of it's higher density. So the hollowed PPC girder with light weight aggregate can be a alternative.

In this study the hollowed PPC girder with light weight aggregate is designed and the performance of hollowed PPC girder is evaluated by experimental tests as well as numerical analysis. As a result, The hollowed PPC girder of light aggregate behaved fully elastically under service load of 110kN, and the plastic behavior was showed after elastic behavior through experimental test, and it can be also estimated by numerical analysis.

Keywords : Prestressed concrete, Light weight aggregate, Hollowed prefabricated prestressed concrete girder

1. 서론

프리스트레스 콘크리트는 철근 콘크리트가 지니는 균열발생 문제, 철근의 부식, 누수 등 내구성에 미치는 약점을 보완할 뿐만 아니라, 전단면이 유효하고, 자중을 감소시킬 수 있으므로 장대 교량의 건설에 유리한 구조이다. (Elliott and K. S, 2002)

이러한 이유로 최근에 가설되는 콘크리트 교량은 PSC 교량이 주종을 이루고 있는데, 특히 공기절약, 안정된 품질, 경제성 확보 등으로 고품질의 프리캐스트 PSC 교량 공법이 늘어나는 추세이다. (오병환 등, 2004) 그러나 이러한 기존의 방법은 프리캐스트 거더의 거치 이후 상부 슬래브의 현장타설이 필요하여 공기의 증가와 전체 교량의 내구성이 저하되는 단점이 있다. 또한 고강도 콘크리트가 사용되기 때문에 밀도가 강도에 비하여 상대적으로 커지고, 자중이 증가되어 시공성 및 경제성을 감소시키는

단점이 있다. (안재철, 2001)

PPC 교량 시스템(Prefabricated Prestressed Concrete Girder Systems, 이하 PPC)은 프리캐스트 교량과 다중보 교량의 장점을 접목시킨 교량 시스템으로 PPC 거더를 공장에서 제작하고 현장으로 운반하여 하부구조 위에 거치한 후, 전단키와 횡방향 프리스트레싱으로 일체화시켜 조립하는 중공 슬래브 교량 시스템으로 거더간 하중분배 효과를 증대시키고 기존 다중보 교량의 문제점을 개선시킨 교량 시스템이다. 이러한 PPC 교량시스템에 경량골재를 활용하여 구조물 자체의 무게를 감소시킬 수 있는 경량골재를 이용한 중공 PPC 교량 시스템(Hollowed Prefabricated Prestressed Concrete girder systems using Light Aggregate, 이하 HPPCLA)의 성능효과를 고려해 볼 만 하다.

미국의 경우 PSC 교량의 장점을 이용하여 강교량을 PSC 교량으로 대체해 나가고 있으며, Fig. 1에 나타난 바와 같이 전체 교량 형식의 50% 이상을 차지할 정도로 증

1) 정희원, 상지대학교 건설시스템공학과 교수
2) 정희원, 상지대학교 토목공학과 공학석사
3) 정희원, 삼표이엔씨 기술연구소 선임연구원
4) 정희원, 삼표이엔씨 기술연구소 연구원

* Corresponding author : bclho@sangji.ac.kr 033-730-0474

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

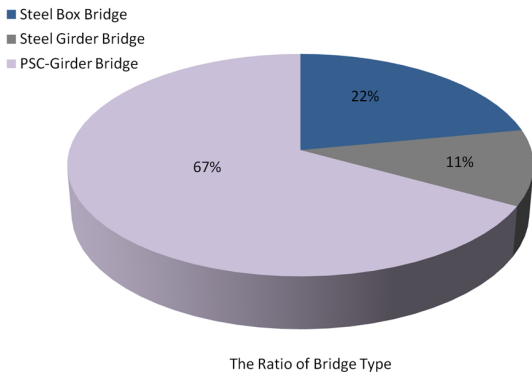


Fig. 1 The Types of Bridge Built

가하고 있다. (오병환 등, 2004)

본 연구에서는 이러한 요구에 적합한 교량형태 중의 하나로 프리캐스트 바닥판을 갖는 HPPCLA 거더에 대한 3차원 비선형 수치해석과, 정적재하시험을 통하여 성능을 평가하였다.

2. HPPCLA 교량의 특징 및 시편의 제작

2.1 HPPCLA 교량의 특징

HPPCLA 교량은 프리캐스트 교량과 다중보 교량의 장

점을 접목시킨 교량 시스템으로, 시공방법은 HPPCLA 거더를 공장에서 제작하고, 현장으로 운반하여 하부구조 위에 거치한 후, 전단키와 횡방향 프리스트레싱으로 일체화시켜 조립하는 중공 슬래브 교량이다.

이 공법은 거더간 하중 분배 효과를 증대시키는 장점을 가지고 있다. (Chung et al, 2001)

2.2 단면제원

Fig. 2는 실험 및 해석을 위한 HPPCLA 거더의 제원을 나타낸 것으로, 순경간 16 m의 프리스트레스 중공형 박스 단면으로 구성하였으며, 강연선은 $\phi 15.2$ SWPC 7BN 15개를 사용하였다. 거더의 중앙부, 약 1/4 지점 그리고 단부에는 횡방향 프리스트레싱을 위하여 횡방향 쉬스관을 매설하였다. (삼표이엔씨(주), 2005)

한편, HPPCLA 교량은 Fig. 3에 나타낸 바와 같이 HPPCLA 거더를 횡방향으로 연결한 형태로 시공된다.

2.3 배합설계 및 사용재료

본 연구에서 사용한 경량골재는 비조립형 단일입도 경량골재로서 이의 탄성계수와 푸아송비는 KS F 2437

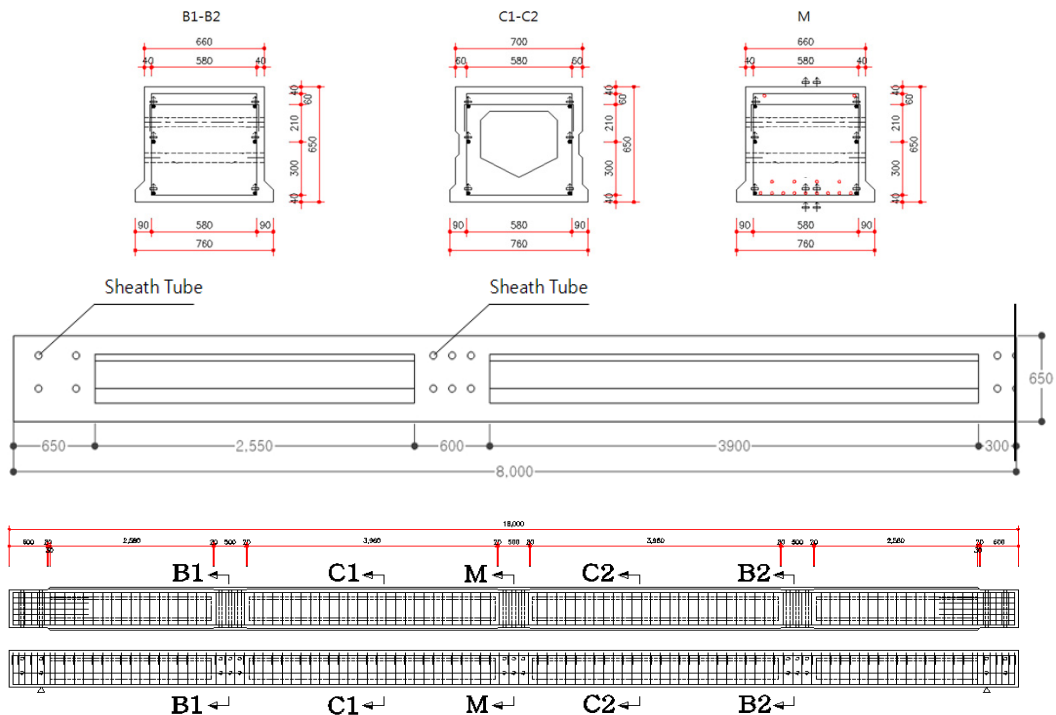


Fig. 2 Single HPPCLA Girder

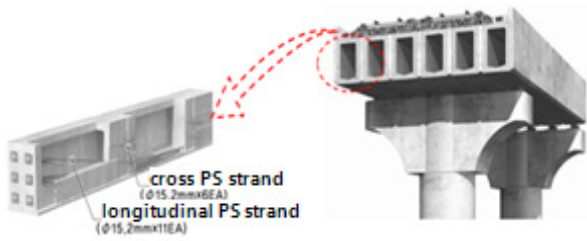


Fig. 3 Concept of HPPCLA Bridge System

<공명진동에 의한 콘크리트의 동탄성 계수 및 푸아송비 시험방법>에 의하여 구하였으며, 실험을 통하여 구한 재료 물성값은 Table 1에 나타난 바와 같다. 한편 HPPCLA 거더는 전체 골재체적의 30%를 경량골재로 치환하였으며, 이의 주요물성은 Table 2에 나타난 바와 같다.

Table 3과 4는 실제시험에 사용된 배합설계와 철근 및 강연선의 물성을 각각 나타낸 것이다. (ASCE, 1980)

Table 1 Properties of Materials

Materials used		Properties
Fine aggregate		density (g/cm^3) = 2.56, fineness modulus = 2.68, absorption ratio of aggregate = 1.47%
Coarse aggregate	SLG	density (g/cm^3) = 1.59, single size (19mm), absorption ratio of aggregate = 4.20%
Chemical agent		Polycarboxylate high range water reducer

Table 2 Properties of Lightweight Concrete

fck (MPa)	Elastic modulus (MPa)	Unit volume weight (kg/m^3)	Poisson's ratio
50	2.73×10^4	1,900	0.17

Table 3 Mix Proportions of Light Weight Concrete

fck (MPa)	Slump (mm)	Air (%)	W/B (%)	S/a (%)	Unit volume weight (kg/m^3)				AE	AD
					C	W	G	S		
50	500	3	24	45	646	155	575	716	0.005	1.05

Table 4 Properties of PS Strand and Steel

Index		PS Strand $\phi 15.2\text{SWPC 7BN}$	Steel D10
Elastic modulus (MPa)		2.0×10^5	2.0×10^5
Unit weight (kg/m)		1.1	0.56
Strength (MPa)	Fracture	1,900	400
	Yield	1,600	160
Poisson's ratio		0.30	-

3. HPPCLA 거더의 거동 분석

3.1 수치해석

HPPCLA 거더에 대한 구조해석은 범용 구조해석 프로그램인 MIDAS/FEA를 이용하여 재료비선형 해석을 수행하였다. Fig. 4에 나타난 바와 같이 폭 760 mm, 높이 800 mm의 단면을 단부, 다이아프레임부 그리고 중공부로 구분하여 모델링을 하였으며, 전체적인 모델링은 Fig. 5에 나타난 바와 같이 지간 16 m의 단순지지 구조로 솔리드 요소를 이용하여 3차원 모델링하였다. 총 16,457개의 절점과 38,147개의 요소로 구성하였으며, 하중은 재하시험과 같은 조건인 중앙부 집중하중으로 재하 하였다. 해석에 사용된 항복기준 모델은 콘크리트의 인장거동을 정의하는데 사용되는 모델인 Rankine 모델을 사용하였으며, 경량골재를 사용한 콘크리트를 설계에 반영하기 위해 Fig. 6의 응력-변형률 곡선을 측정하여 해석과정에 반영하였다.

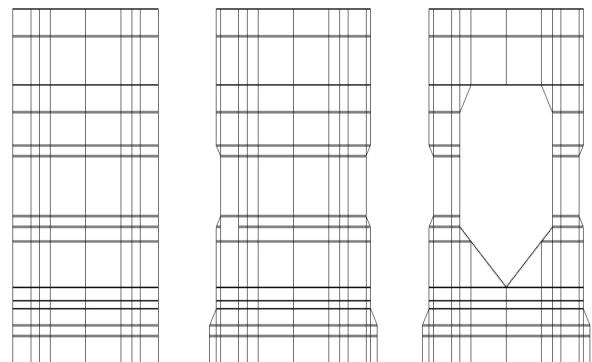


Fig. 4 Modeling of HPPCLA Single Girder Section

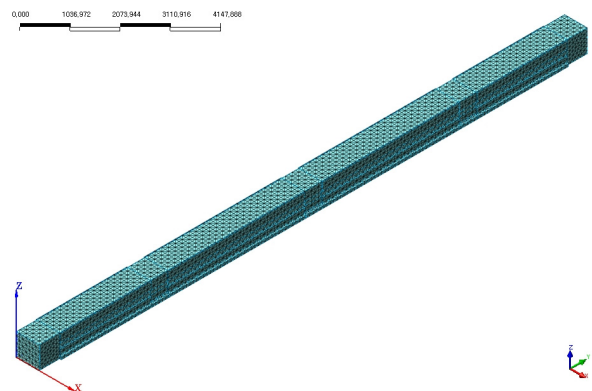


Fig. 5 Modeling of HPPCLA Single Girder

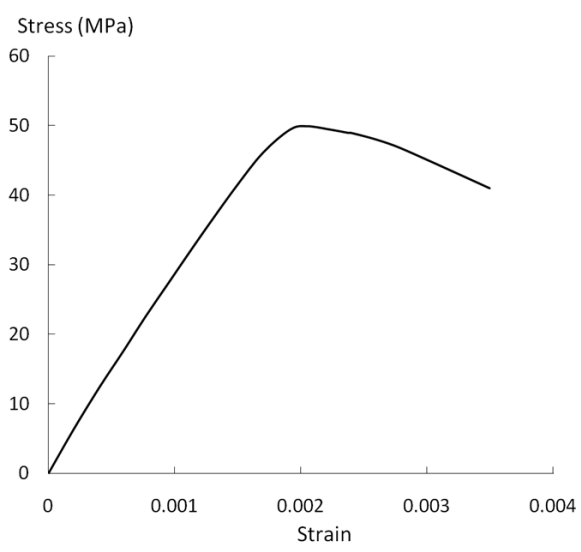


Fig. 6 Stress-strain Curve of Light Weight Agg. Concrete

3.2 정적 재하시험

3.2.1 게이지 부착

Fig. 6와 같이 거더의 처짐, 변형률 등을 측정하고자 철근 변형률 게이지 24개, PS 강연선 게이지 4개, 콘크리트 인장·압축부에 변형률 게이지 8개, 수직 변위계 4개를 설치하였다.

3.2.2 하중재하

Table 5는 하중재하방법을 나타낸 것으로 탄성구간과 소성구간의 거동을 분석하기 위하여 4단계로 나누어 실시하였다. P_{3rd}까지는 1 kN/mm로 하중제어를 실시하였으며, P_{4th}는 3 mm/min로 변위제어를 실시하였다. 본 연구에서는 거더의 최대 휨모멘트를 구하기 위하여 Fig. 8에

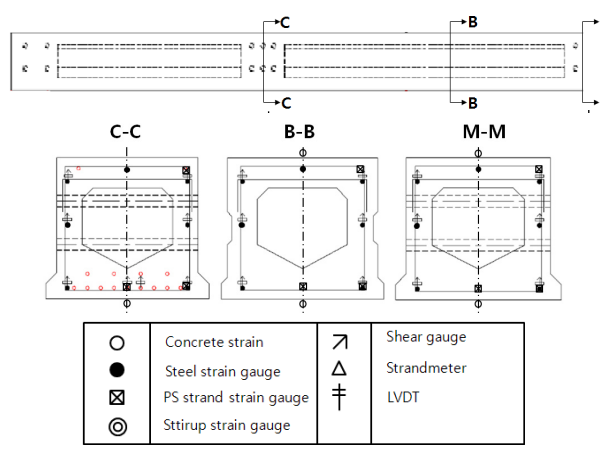


Fig. 7 Gauge Mounting Position Profile

Table 5 Loading Steps of PPC Single Girder

Load (kN)	Loading method	Content
P _{1st}	Load Control	Analysis in elastic region.
P _{2nd}	Load Control	Analysis in elastic region.
P _{3rd}	Load Control	Analysis in elastic region.
P _{4th}	Load → Displ. Control	Leading to failure of specimens P _{3rd} load after load control to displacement control

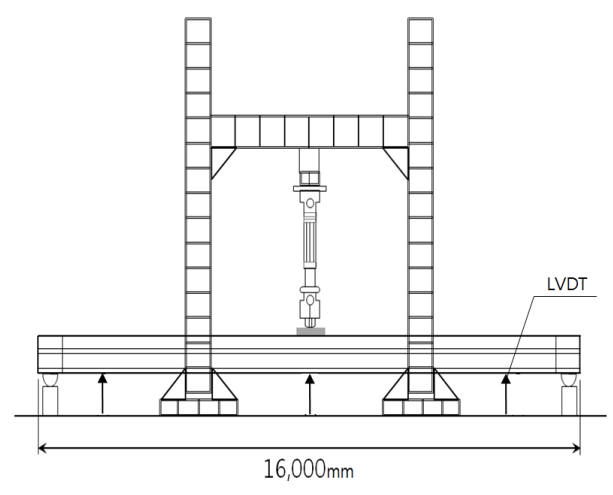


Fig. 8 Test Setup

나타낸 바와 같이 3점 재하 방식으로 시험을 실시하였다.

4. HPPCLA 단일거더 거동평가의 비교·분석

4.1 하중 - 처짐

본 연구 대상인 경량골재를 활용한 HPPCLA 거더는 거더 3개가 횡방향으로 체결된 후 교량으로써의 기능을 하는 것으로 계획하였으며, 실물전체에 대한 실험은 여러 가지 이유로 곤란하므로, DB 24의 하중 재하시 거더 1개에 전달되는 114 kN을 재하 하였다. 실험에 의한 HPPCLA 거더의 하중-처짐 결과는 Table 6에 나타낸 바와 같이 최대하중은 430 kN, 최대처짐은 약 159 mm 발생하는

Table 6 Results of Load-deflection

Index		deflection (mm)	
		Static test	Analysis
P _{1st}	= 116 kN	15.18	16.60
P _{2nd}	= 196 kN	33.47	33.12
P _{3rd}	= 345 kN	77.17	85.21
P _{4th}	= 430 kN	159.50	131.28

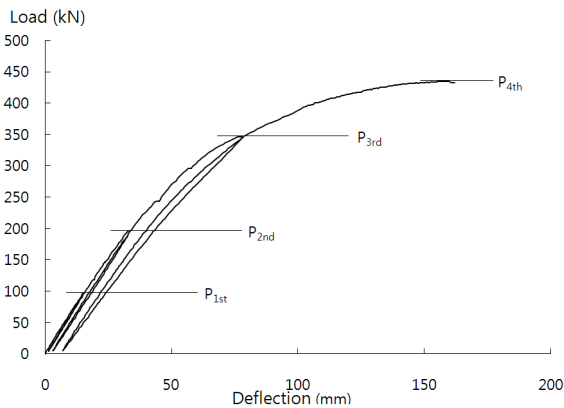


Fig. 9 Load-deflection Curve

것으로 나타났다. 한편, 하중-처짐 곡선은 Fig. 9에 나타난 바와 같으며 P_{1st} 구간에서 하중을 사용하중인 114 kN 보다 큰 116 kN 까지 재하 후 제하하였을 때 잔류변형이 남지 않았으며, 이로써 P_{1st} 구간에서는 안정적인 탄성거동을 하여 소성변형이 발생하지 않은 것으로 판단된다. 초기균열은 사용하중 114 kN 이상인 196 kN에서 발생하였으며, 처짐은 약 33 mm 발생하였다.

Fig. 10은 시험결과와 수치해석 결과를 비교한 것이다. 해석결과 최대하중과 최대처짐은 각각 450 kN, 138 mm로 실험결과 약간의 차이를 보이나 거의 일치하는 것으로 나타났다. 즉, 탄성구간인 P_{2nd} 구간까지는 약 4%의 오차를 나타내어 거의 일치하는 것으로 판단되며, 비선형 구간에서는 약 10%의 차이를 보였으며, 이는 시험체 내 횡방향 프리스트레싱을 위한 스위관 주위의 응력집중에 의한 압축부 콘크리트의 파괴에 기인한 것으로 판단되나, 시험결과와 해석결과의 낮은 오차율로 볼 때 수치해석 모델은 Table 1과 Table 2에 나타난 경량골재 콘크리트의

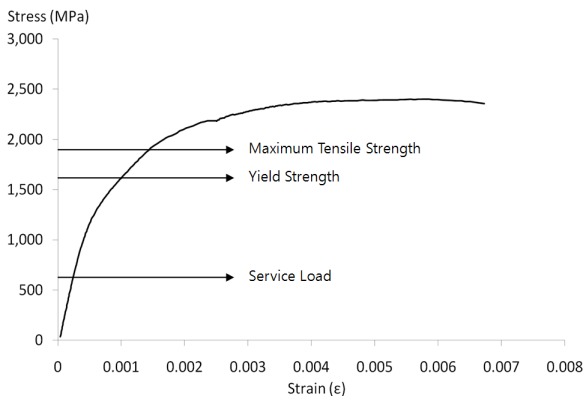


Fig. 11 Stress - Strain Curve of PS strand

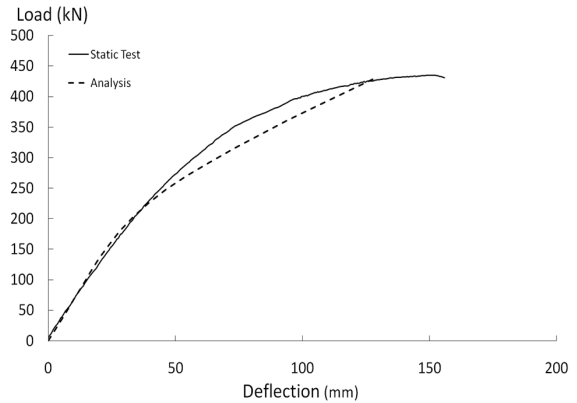


Fig. 10 Comparison of Analysis and Test

기초시험 특성이 적절히 반영되어 PPC 교량 설계에 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

4.2 PS 강연선의 응력 - 변형률

Fig. 11은 PS 강연선의 응력 - 변형률을 나타낸 것이다. 초기균열 발생 구간인 P_{2nd}까지는 탄성거동을 하였으며, 사용하중 하에서의 최대 인장응력은 617.4 MPa로 강연선의 허용인장응력인 1,280 MPa 이하인 것으로 나타났다. 시험 종료까지 강선의 완전한 항복은 발생하지 않은 것으로 시험 확인되어 최종 파괴하중 이상의 상태에서도 연성거동이 가능할 것으로 판단된다.

4.3 중립축 변화

일반적으로 거더는 하중에 의한 인장부 균열 발생시 중립축에 변화가 발생하는 것으로 알려져 있다. Fig. 12는 대상 거더의 하중에 따른 중립축의 변화를 나타낸 것으

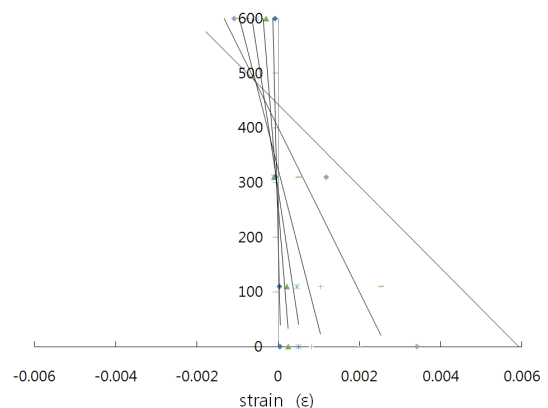


Fig. 12 Neutral Axis Changes at the Central Section

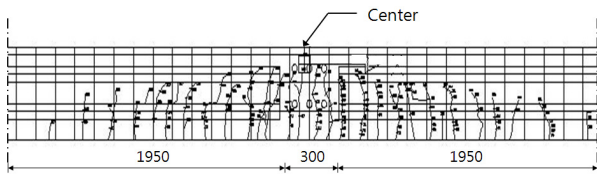


Fig. 13 Crack Propagations of HPPCLA Single Girder

로, 초기 중립축은 콘크리트 바닥면에서 약 380 mm인 것으로 나타났으며, 하중이 증가함에 따라 중립축이 변화는 거의 없었다. 또한 파괴하중에 도달할 때 중립축은 약 150 mm 상승하는 것으로 나타났다. 또한 사용하중 하에서는 중립축의 변화가 거의 없는 것으로 나타났는데, 이는 PS 강연선에 의한 프리스트레스 힘에 의해 전단면이 유효하기 때문인 것으로 판단된다. 또한 전단면이 유효하게 거동하는 균열 발생 전에는 중립축의 변화가 거의 없는 것으로 측정되어 사용중에는 문제가 되지 않을 것으로 판단된다. (정철언 등, 2006)

4.4 균열형태

거더의 파괴거동을 분석 및 초기균열을 확인하기 위하여 균열 분석을 실시하였다. Fig. 13에 나타난 바와 같이 균열은 전형적인 휨파괴에 의한 균열진전을 보였으며, 단부에는 전단균열이 발생하지 않은 것으로 나타났다. 따라서 적절한 휨설계가 이루어진 것으로 판단된다. (진세진 등, 2004)

5. 결론

국내에서 가장 많이 건설되고 있는 PSC 거더 교량에 대해 시공성과 경제성 그리고 신속성 등을 갖춘 시스템의 개발이 요구되고 이러한 요구에 적합한 교량의 형태중의 하나가 프리캐스트 바닥판을 갖는 PSC 합성거더 교량이다. 이러한 요구에 부합하는 경량골재 콘크리트를 이용한 HPPCLA 거더의 성능 평가 연구를 통해 얻어진 결론은 다음과 같다.

- (1) 경량골재를 이용한 중공 PPC 교량 시스템 HPPCLA의 단일거더 시험 결과 정적시험 하중에서 발생하는 응력은 허용응력 범위내에 존재하여 시공단계의 안전성을 확보하였다.
- (2) 경량골재를 이용한 HPPCLA 거더에 대한 비선형구조해석과 정적재하시험을 통하여 다소의 차이는 있

었으나 수치해석 모델의 타당성을 검증할 수 있었다.

- (3) 실험결과 경량골재를 활용한 HPPCLA 거더는 거더 1개의 사용하중인 114 kN에서는 탄성거동을 하는 것으로 판단된다.
- (4) DB 24의 하중을 재하시에 거더 1개의 중앙부에는 427 kN·m의 모멘트가 작용하며, 시험결과 HPPCLA 거더의 초기균열시 작용모멘트는 735 kN·m로 측정되어 설계하중으로 가정한 DB 24 하중에 대한 안전성을 충분히 확보한 것으로 판단된다.
- (5) HPPCLA 거더는 중공형으로 제작되어 비교적 가벼우며, 현장타설을 최소화하여 경제성 및 시공성이 우수하고, 프리캐스트로 제작이 되어 품질관리, 공사기간, 시공성, 경제성 면에서 효율이 우수한 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 2010년 (주)삼표ENC의 지원으로 이루어진 것으로 본 연구에 대한 아낌없는 지원에 감사드립니다.

참고문헌

1. 변근주, 송하원, 김호진, 남상혁, 김윤수, “조립식 프리캐스트 프리스트레스트 콘크리트 중공 슬래브교의 구조거동”, 대한토목학회 정기 학술대회 논문집, 2004, vol. 1A, pp.467-481.
2. 삼표이엔씨(주), “조립식 프리캐스트 콘크리트 중공 슬래브 교량 시스템 (PPC 교량 시스템)”, 건설신기술, 제464호, 2005, pp.11-14.
3. 안재철, “재생경량골재 콘크리트의 개발에 관한 연구”, 대한건축학회 논문집(구조계), 17권, 3호, 2001, pp.43-50.
4. 오병환, “PSC 박스거더 교량의 건설공법별 설계 및 시공특성”, 동부건설주식회사, 1994, 12.
5. 오병환, 최영철, “프리스트레스트 콘크리트 구조물의 활용현황과 전망”, 한국콘크리트학회지, 제16권, 1호, 2004, pp.12-21.
6. 진세진, 김수만, “프리스트레스트 콘크리트 구조물의 해석기법”, 한국콘크리트학회지, 제16권, 1호, 2004, pp.57-64.
7. 정철언, 현병학, “프리캐스트 바닥판 PSC 합성거더 교량의 거동”, 대한토목학회 논문집, 제26권, 5A호, 2006, pp.873-880.
8. ASCE, A Guide for the Field Testing of Bridges, 1980.
9. Chung, C. H., Shim, C. S., Jeong, U. Y., “Experimental Study on Shear Connector for Precast Concrete Decks”, KCI Journal vol. 13, No. 1, 2001, pp.61-67.
10. Elliott, K. S., Precast Concrete Structures, Butterworth Heinemann, 2002.

(접수일자 : 2010년 12월 6일)
 (1차 수정일자 : 2011년 2월 9일)
 (2차 수정일자 : 2011년 3월 11일)
 (심사완료일자 : 2011년 7월 26일)

요 지

최근 건설되는 교량은 철근 콘크리트 대신에 주로 프리스트레스트 콘크리트 교량이 주종을 이루고 있다. 프리스트레스 콘크리트 (PSC)는 철근 콘크리트 (RC)가 지니는 균열발생 문제, 철근의 부식, 누수 등 내구성에 미치는 약점을 보완할 수 있다. 또한 프리스트레싱으로 인한 인장영역의 보완으로 인하여 구조물의 크기를 줄일 수 있다. 하지만 이러한 구조용 주재료인 고강도 콘크리트의 경우는 밀도가 강도에 비하여 상대적으로 크기 때문에 상대적으로 자중을 증대시키는 문제가 있다. 따라서 자중을 감소시킬 수 있는 경량골재를 활용한 중공형 PPC 거더 (Hollowed Prefabricated Prestressed Concrete girder systems using Light Aggregate, 이하 HPPCLA)는 이러한 문제점을 해결할 수 있는 대안이 될 수 있다.

본 연구에서는 HPPCLA 거더의 성능시험 뿐 만 아니라 수치해석을 수행하였으며, 그 결과 HPPCLA 거더는 전형적인 휨과 파괴 형상을 나타내었다. 수치해석에서 예상한 바와 같이 PPC 거더의 사용하중인 110 kN에서는 완전한 탄성거동으로 구조물의 사용성에는 무리가 없을 것으로 판단된다.

핵심 용어 : 프리스트레스트 콘크리트, 경량골재, 중공형 프리캐스트 거더
