확폭플랜지를 갖는 U형 프리스트레스 거더의 유사정적거동 Pseudo-Static Behaviors of U-shaped PSC Girder with Wide Flanges

이인규*	이주범*	김이현**	박주남**	곽종원***
Rhee, Inkyu	Lee, Joo-Beom	Kim, Lee-Hyeon,	Park, Joo-Nam,	Kwak, Jong-Won

ABSTRACT

A girder height limitation is the critical parameter for rapid construction of bridge deck and construction space limitation especially in urban area such as high population area and high density habitats. A standard post-tensioned I-shaped concrete girder usually demands relatively higher girder height in order to retain sufficient moment arm between compression force and tensile force. To elaborate this issue, a small U-shaped section with wide flanges can be used as a possible replacement of I-shaped standard girder. This prestressed concrete box girder allows more flexible girder height adjustment rather than standard I-shaped post-tensioned girder plus additional torsion resistance benefits of closed section. A 30m-long, 1.7m-high and 3.63m-wide actual small prestressed concrete box girder is designed and a laboratory test for its static behaviors by applying 6,200kN amount of load in the form of 4-point bending test was performed. The load-deflection curve and crack patterns at different loading stage are recorded. In addition, to extracting the dynamic characteristics such as natural frequency and damping ratio of this girder, several excitation tests with artificial mechanical exciter with un-symmetric mass are carried out using operational frequency sweep-up. Nonlinear finite element analysis of this 4 point bending test under monotonic static load is investigated and discussed with aids of concrete damaged plasticity formulation using ABAQUS program.

국문요약

인구밀집지역인 도심부나 주거지역 인근에서 이루어지는 철도교량 신축에 있어서 급속시공은 매우 의미가 있다. 이러한 신속한 시공과 더불어 교량 거더의 형고의 유동적 조절도 중요하다. 기존 I형 거 더는 단면에서 수직방향으로 중립축으로부터 떨어진 모멘트 팔 길이와 긴장력을 이용한 평형을 근간으 로 하는 까닭에 형고 조절에 있어 다소 어려움이 있었다. 이에 기존 단일 박스거더의 축소형인 확폭플 랜지를 갖는 U형 프리캐스트 보는 긴장력 조절과 콘크리트 압축강도에 따라 경간길이 및 형고 변화가 상대적으로 I형보에 비해 용이하다. 확폭플랜지를 갖는 U형 프리캐스트 거더의 철도교 적용성을 확인 하기 위해 지간 30m, 형고 1.7m, 폭 3.63m의 실물크기 거더를 제작하였고 하중재하/변위재하를 이용하 여 총 6,200kN의 하중을 유사정적으로 가력하였다. 실험은 4점재하시험으로 하중-변위곡선, 하중-변형 율을 이용하여 휨성능을 기본적으로 확인하였고 1차 하중제거와 재재하를 통해 긴장재의 역할을 확인 하였다. 유사정적거동을 본질적으로 확인하기 위해 쉘요소를 이용한 3차원 재료비선형해석을 통하여 실험결과와 평행하게 비교하였다. 콘크리트의 비선형성은 손상-소성모델(Lee & Fenves,1998)을 이용하 여 콘크리트 인장/압축 소성연화거동, 인장강화거동을 묘사하였다. 실제 균열패턴과 해석 손상패턴을 비교검토 하였고 하중-변위, 단면에 따른 하중-변형율 관계를 실제 실험결과와 비교검토 하였다. 비선 형 해석에 사용된 재료물성치와 해석모델의 보유 탄성에너지 조율은 실제 거더에 가진실험을 통해 획 득한 고유주파수를 통하여 확인하였다.

책임저자 : 정회원, 한국철도기술연구원, 철도시스템연구센터, 선임연구원 E-mail: rheei@krri.re.kr TEL: (031)460-5369 FAX: (031)460-5359 정회원, 인하대학교, 토목공학과, 박사과정

^{**} 정회원, 한국철도기술연구원, 철도시스템연구센터, 선임연구원

1. 서 론

확폭플랜지를 갖는 U형 프리스트레스 거더(Wide-flanged prestresses concrete; WPC)는 상부플랜지 폭이 넓은 Box형태의 거더가 서로 맞닿도록 배치한 후 슬래브를 타설하는 구조형식으로서, 중립축을 위 쪽으로 이동시켜 상·하부 플랜지 응력값의 효율성을 극대화 시킴으로써 최적단면에 의한 경제성과 시 공성을 향상시킨 거더형식이다. WPC거더의 구조적 특징은 그림 1과 같다. 기존의 프리스트레스 콘크리 트는 인장부에 PS 긴장제를 설치하여 거더의 인장부에 발생하는 인장변형에 대해 강재의 탄성복원력을 이용하여 설계한다. 즉 인장된 긴장재의 탄성복원 압축력과 부재의 중립축과의 곱에 의한 휨모멘트로써 거더 단면 하단의 인장변형에 대해 대응하는 방법으로 일반 철근콘크리트의 단면보다 우수한 구조적 효 율을 보여주고 있다. 반면에 WPC 거더에서는 압축 측 상부플랜지의 폭을 넓게 하여 중립축이 상향으로 이동하여 중립축 하부에 배치되어 있는 강선의 편심거리가 증대된다. 이는 WPC 거더 상·하부 플랜지 에 작용하는 응력 균형을 최적화하여 형고의 감소로 이어져 낮은 형고에서는 동일 경간장에 대해 단면 축소로 인한 시공성, 경제성의 장점을 획득할 수 있으며 동일 형고에서는 경간장을 반대로 확장할 수 있다. 일반적으로 PSC 거더의 경우 압축플랜지의 확대는 자중증가와 단면확대를 초래한다. 그러나 WPC 거더의 경우 EPS블럭을 이용한 폐합단면으로 거더 자체의 중량변화에 다소 둔감하며 더불어 비 틀림 강성에 유리하다.



그림 1. 확폭플랜지를 갖는 U형 프리스트레스 거더의 일반적 구조

2. 확폭플랜지를 갖는 U형 프리스트레스 거더의 4점 재하 휨실험

WPC 거더의 구조적 거동을 검증하고자 그림 2와 같이 경간길이 30m, 형고 1.7m 그리고 거더상부 폭이 3.63m인 실물 WPC 거더 1본을 제작, 실물시험을 실시하였다. 1~7번의 강선긴장이 순차적으로 이루어졌고 이에 따른 응력분포를 측정하고, 슬래브 타설, 증기양생, 그라우팅 작업을 실시하였다. 양생 이 완료된 후 센서설치(철근 변형율계는 거더 콘크리트 타설 전 매립설치) 및 배선작업, 데이터로거 설 치 작업을 수행한 후 재하시험을 실시하였다. 재하시험을 통해 측정된 시험자료들을 정리하여 하중-변 형률, 하중-처짐 등에 관련된 그래프를 확인할 수 있었으며, 균열망도를 작성하여 각 하중단계별 균열 의 진전상황을 확인 할 수 있었다. 그림 3과 같이 3주형 경간 30m 철도교에 사용할 수 있도록 설계된 WPC 거더에 대해 정·동적 성능을 검토하기 위하여 한국건설기술연구원 구조시험동에서 실내실험을 수행하였다. 거더의 규모가 실물과 같은 크기로 제작 운송이 불가능하여 시험동 현장에서 거푸집 설치 타설하고 동절기, 양생시간을 단축하기 위해 증기양생을 시행하였다.



그림 2. 정적 휨성능을 확인을 위한 4점 재하실험에 이용된 경간길이 30m의 WPC거더 제원



(a)

그림 3. 정적 휨성능을 확인을 위한 4점 재하실험의 준비 전경 및 해석모델의 조율을 위한 고유주파수/ 감쇠비 측정방법(강제진동발생기, 충격햄머)



그림 4. 강제진동발생기를 이용한 고유주파수 추정(4.5Hz) 및 공진시 자유진동영역에서 측정한 대수감 쇠비(0.8%)

신뢰성이 높은 전산해석 모형을 위해 실제 시험대상에 강제진동을 주어 가속도응답을 통해 탁월주파 수를 감지하여 건전한 상태의 피시험체 탄성에너지 수준을 판단하고자 하였다. 더불어 구조물의 감쇠 능력을 가진진동과 응답진동이 유사한 상황인 공진 시 진동기록 중 자유진동부분(강제진동 종료 후 진 동 부분)에 대해 대수감쇠 함수를 이용하여 추정하였다. 피시험체의 건전성을 확보하여야 하므로 유사 정적 훰실험 전에 이루어졌다. 그 결과 피실험대상인 30m WPC거더의 고유진동수는 그림 4(a),(b)에서 처럼 4.5Hz, 대수감쇠비는 0.8%로 각각 나타났다. 30m 실물 WPC거더의 가진주파수-가속도 응답관계 를 나타내며 특히, 4.5Hz의 가진주파수를 가질 때 가속도 응답이 4.492Hz(0.17% 편차)로 나타났다. 따 라서 추정된 본 시험체의 1차 고유진동수는 4.5Hz이다. 그림 4(a)는 가진주파수를 1.0Hz부터 6.0Hz까지 단조증가(sweep)시켰을 때 발생하는 강제진동에 의한 가속도-시간응답 중 각 주파수별 최대 가속도를 그린 내용이다. 이때 4.5Hz 일 때 가장 높은 최대가속도 0.1605g를 나타냄을 알 수 있다. 그림 4(a)는 공진주파수 대역인 4.5Hz시 측정된 5개의 서로 다른 위치의 가속도-시간이력 중 각 최대가속도를 거더 길이(가속도계 위치: 1.5m, 7.5m, 15m, 22.5m, 28.5m)에 따라 표현한 그래프이다. 이 그림을 통해 거더 의 1차 모드형상을 추정할 수 있다. 가진 실험을 수행한 후 실험거더의 정적성능을 평가하기 위해 단 순지지 조건하에서 정적하중 재하시험을 실시하였다.

정적재하시험은 그림 5와 같이 단경간 단순지지 조건하에서 수행하였으며, 거더의 1/2지점으로부터 양쪽으로 2.5m의 거리를 두어 5m의 간격을 갖는 2점 재하로 P1과 P2하중을 재하하였다. 1차 하중재하는 균열발생 직후인 3,400kN까지 재하한 후 하중을 제거하였고 2차 하중재하는 모든 하중을 제거한 후 가력기의 최대성능인 6,200kN까지 재하하였다. 재하실험은 1차 하중재하시는 하중조절방식으로 진행되었고, 2차 하중재하 시는 균열하중까지는 하중재하방식으로 회복하다가 균열하중 이후에는 실험실 안 전을 고려하여 변위조절방식으로 전환하여 수행하였다. 변형률계와 변위계로부터 하중 재하 단계별로 하중-처짐, 하중-변형률의 관계를 분석하였고, 균열발생 후 거더의 균열양상을 파악하기 위해 그림 5와 같이 균열도를 작성하였다. 피실험체의 규모가 3주형 30m 철도교량의 설계에서 일부분인 거더로서 그 파괴성능이 실험실 최대가력규모인 6,200kN보다 월등히 높아 종국적인 파괴양상을 파악하기 어려웠다.



균열하중은 3,252kN으로 나타났고 하중이 증가함에 따라 그림 5(a)와 같이 중앙부의 무전단구간 좌, 우로 휨균열이 성장하였고 4,400kN~5,600kN사이에는 지속적인 수직 휨균열의 성장과 함께 사인장균열 의 발현, 성장이 그림 5(b)와 같이 나타났다. 하중재하 마지막 단계인 5,600kN~6,200kN 구간에서는 사 인장 균열의 원격전이가 좌측하중 재하점을 기점으로 좌측방향으로 9m~12m 구간에 발생하였고 균열 성장 속도와 횜곡률이 증가하였다. 철도교량으로서 WPC거더의 정적성능은 30m WPC철도교량에 화물 열차, 새마을호 그리고 KTX열차의 복선재하 시 거더에 발생하는 최대 사용하중으로 유추할 수 있다. 다시 말하면 정적최대하중이 각각 화물열차 1,864kN, 새마을호 1,313kN, KTX 1,321kN이어서 정적재하 실험대상인 30m WPC 단일거더의 균열하중인 3,252kN에 미치지 못하고 있고 사용하중 하에서 인장측 거더하면에 인장균열이 발생하지 않음을 알 수 있다. 표 1에서 처럼 30m WPC 단일거더의 균열하중대 비 화물열차, 새마을호, KTX의 사용하중의 비가 각각 57.3%, 40.4%, 40.6%의 여유가 발생함을 알 수 있었다. 총 가력하중의 규모인 6,200kN은 복선재하기준으로 화물열차, 새마을호, KTX의 사용하중에 대 비 각각 3.33, 4.72, 4.69배 이상의 크기가 적용되었다.

표 1. 복선재하 시 작용 중앙부 최대모멘트로부터 환산한 정적성능 등가하중(단위: kN)

구 분	발생 최대모멘트		2P F	Б	F _{max}	F	F	
	$M_c(1+i)$	도상+침목+레일	환산된 (사용하중)	г _{ст} (균열하중)	최대 (가력하중)	$\frac{1}{2P}$	$\frac{1}{2P}$	비고
화물열차	6,225.5	5,004.7	1,863.8	3,252	6,200	1.74	3.33	보서
새마을호	2,907.7	5,004.7	1,313.2	3,252	6,200	2.48	4.72	- <u></u> ~인 게칭
KTX	2,956.6	5,004.7	1,321.4	3,252	6,200	2.46	4.69	

3. 재료비선형을 고려한 거더의 휨 거동 분석

본질적인 파괴거동을 추적하기 위해 유한요소프로그램인 ABAQUS 6.2-1을 이용하여 해석 후 균열 양상, 하중-처짐관계, 응력-변형율 관계를 각각 실험결과와 비교, 검토하였다. 재료상수는 U형 거더 콘 크리트의 압축강도 $f_c'=45.0\,MPa$, 탄성계수 $E_c=29,837\,MPa$ 이며 상부 바닥판 거더콘크리트의 압축 강도는 $f_c' = 27.0 MPa$, 탄성계수 $E_c = 24,422 MPa$ 이다. PC강재는 SWPC 7B 15.2mm 규격으로 저릴랙 세이션 강재를 사용하였고 항복강도는 $f_{py} = 1,600 MPa$, 탄성계수는 $E_p = 200,000 MPa$ 를 사용하였다. 그림 6(a)와 같이 전산해석모델이 실제 피실험체의 초기(건전한 상태)의 보유 탄성에너지 준위와 유사 하도록 2절에서 가진실험을 실시하여 추출한 고유진동수를 기준으로 해석모델을 검증하고 조율하였다. 현실적인 4점 휨재하실험을 묘사하기 위해 각 재료의 비선형성을 표현하였으며 그 주요 대상은 콘크리 트 인장/압축 연화현상(손상-소성모델; Lee & Fenves 1998)이며, PC강재의 경우 이선형 경화모델을 사용하였다. 유한요소모델은 그림 6(a)와 같이 쉘요소를 이용하여 U형 거더와 바닥판을 표현하였고 PC 강재와 구조철근은 3차원 보요소를 이용하여 묘사되었다. 그림 6(b)는 하중-변위(처짐)관계로 경간의 1/4지점과 1/2지점에서 각각 실험결과와 해석결과를 비교한 내용이며 상호 근접한 결과를 나타내고 있 다. 그림 7은 실제 발생하고 있는 휨균열에 영향을 주는 유효소성변형률에 대한 벡터형식의 표현이며 각 변형률 방향에 직각방향으로 균열이 발생하고 벡터의 크기에 따라 균열성장을 나타내고 있다. 그림 8은 4점재하 휨실험 시 종방향 철근부에 부착되어 있는 변형률계를 통해 측정된 경간 1/4지점 및 1/2 지점의 종방향 응력-변형률 관계 그래프이며 이와 평행하게 해석모델에서도 동일한 위치의 철근에서

얻어진 응력-변형율 관계에 대한 비교 그래프이다. 이들 결과에서 매우 유사한 결과를 나타내고 있다. 그러나 전산해석모델의 이용은 4점 재하 휨실험 시에 파악하지 못했던 WPC거더의 전역적 파괴이력 및 극한파괴양상을 예측하는 것이 목적이었다. 실험 시에 최대하중인 6,200kN의 범위까지의 파괴양상 과 기타 하중-변위, 응력-변형률 관계는 유사한 것으로 나타났지만 그 이후의 종국적인 파괴는 수치해 의 수렴성에 있어 극심한 어려움이 있어 파악하기 어려웠다. 이는 6,200kN 하중이 재하되는 시점에 무 전단구간을 비롯하여 단부방향에 많은 수직 휨균열이 발생하였고, 그 깊이 또한 중립축을 훨씬 상회하 여 진전하였다. 다시말하면, 실험거더 자체는 아직 6,200kN 하중수준에서도 인장-압축의 균형을 유지하 며 더욱 큰 재하하중을 전달하고 있고, 이를 위해서는 압축 측의 매우 좁은 영역에 응력전달 흐름을 유지하였기에 가능하였다. 이러한 매우 좁은 압축영역(하중재하점간 상부구간)에서는 2축압축/인장이 수시로 변화하는 고도 비선형성을 나타내고 있어 수치상으로 수렴해를 추정하기에는 각각의 하중단계 가 매우 불안정한 상황으로 판단된다.



(a)

(b)

그림 6. 인장손상변수(d_t)의 변화를 통한 수직 휨균열과 사인장균열의 전파예측(6,200kN) 및 경간 1/4위 치와 1/2위치에서의 하중 및 처짐관계



그림 7. 유효소성변형율에 대해 벡터형식을 이용한 그래프

4. 결 론

WPC거더의 철도교량 적용성을 확인하기 위하여 30m WPC거더에 대한 정 동적 시험을 수행하고 수 치해석 결과와 비교 검토하였다. 정적하중을 균열이 발생한 직후까지 1차 하중재하하고 하중을 완전히 제거하여 변형을 회복한 후 2차 하중 재하시험을 통해 최대 6,200kN까지 가력하였으며, 이때까지 중앙 부에서 좌우 9.0m~12.0m 범위에 수직 휨균열과 사인장 균열 등이 관측되었고 최종파괴는 나타나지 않 았다. 1차 하중재하 시와 2차 하중재하 시 균열하중-변형율 곡선이 완전히 일치하여 일반적인 PSC 보 의 거동을 보이고 있음을 알 수 있었다. 30m WPC철도교량에 화물열차, 새마을호 그리고 KTX열차의 복선재하 시 거더에 발생하는 최대 사용하중은 화물열차 1,864kN, 새마을호 1,313kN, KTX 1,321kN이 다. 이는 정적재하 실험대상인 30m WPC 단일거더의 균열하중인 3,252kN에 미치지 못하고 있어 사용하 중 하에서 인장 측 거더하면에 인장균열이 발생하지 않음을 알 수 있다. 30m WPC 단일거더의 균열하 중대비 화물열차, 새마을호, KTX의 사용하중의 비가 각각 57.3%, 40.4%, 40.6%의 여유가 발생함을 알 수 있었다. 총 가력하중의 규모인 6,200kN은 복선재하기준으로 화물열차, 새마을호, KTX의 사용하중에 대비 각각 3.33, 4.72, 4.69배 이상의 크기가 적용되었다. 충격햄머와 가진기를 이용한 동특성 시험을 통 해 30m 경간의 WPC거더의 1차 고유진동수는 4.5Hz, 감쇠비는 0.8%임이 확인되었다. 재료비선형성을 고려한 3차원 유한요소해석이 본질적인 파괴거동을 파악하기위해 ABAQUS 프로그램을 이용하여 실시 되었다. 콘크리트의 인장손상변수를 이용하여 유사한 균열발생 및 진전양상을 파악할 수 있었고 이는 전역적 변수인 하중-변위(처짐)관계 및 지역적 변수인 응력-변형률 관계에서도 실험치와 해석치의 유사 성을 확인 할 수 있었다. 그러나 긍국적인 최종파괴 시 파괴양상은 하중재하점사이의 매우 좁은 상부압 축 스트립영역에 발생하는 매우 복잡하며 수시로 변화하는 2축 응력상태에 수치해의 수렴성이 쉽게 획 득되지 않아 추정하기 어려웠다. 이상의 문제를 해결하기 위해 다양한 재료구성모델, 기하학적 모델, 수 치해 게사번의 벼하를 투해 시도한 필요가 인다



그림 8. 응력-변형률 관계 그래프를 이용한 실험치와 해석치의 비교: (a) 경간 1/4지점, (b) 경간 1/2지점

알림

참여저자는 본 연구가 한국철도기술연구원 CP07013과제의 연구비로 진행되었으며 연구비는 ENE건설주식 회사, 고려개발주식회사, (주)신성엔지니어링, (주)케이지엔지니어링에서 공동으로 출연되었음을 알립니다.

참고문헌

1. HKS Inc.(2003),"ABAQUS Standard Manual 6.2-1", NY, USA.

2. J.H. Lee, G.L. Fenves(1998), "Plastic-Damage Model for Cyclic Loading of Concrete Structure", J. Engrg. Mech. Vol. 124, Issue 8, pp892-900