

비부착 압축 프리스트레싱을 도입한 중공박스 거더의 거동

Behavior of Hollow Box Girder Using Unbonded Compressive Pre-stressing

김성배* · 김장호** · 김태균*** · 어철수****

Kim, Sung Bae · Kim, Jang-Ho Jay · Kim, Tae Kyun · Eoh, Cheol Soo

Abstract

Generally, PSC girder bridge uses total gross cross section to resist applied loads unlike reinforced concrete member. Also, it is used as short and middle span (less than 30 m) bridges due to advantages such as ease of design and construction, reduction of cost, and convenience of maintenance. But, due to recent increased public interests for environmental friendly and appearance appealing bridges all over the world, the demands for longer span bridges have been continuously increasing. This trend is shown not only in ordinary long span bridge types such as cable supported bridges but also in PSC girder bridges. In order to meet the increasing demands for new type of long span bridges, PSC hollow box girder with H-type steel as compression reinforcements is developed for bridge with a single span of more than 50 m. The developed PSC girder applies compressive prestressing at H-type compression reinforcements using unbonded PS tendon. The purpose of compressive prestressing is to recover plastic displacement of PSC girder after long term service by releasing the prestressing. The static test composed of 4 different stages in 3-point bending test is performed to verify safety of the bridge. First stage loading is applied until tensile cracks form. Then in second stage, the load is removed and the girder is unloaded. In third stage, after removal of loading, recovery of remaining plastic deformation is verified as the compressive prestressing is removed at H-type reinforcements. Then, in fourth stage, loading is continued until the girder fails. The experimental results showed that the first crack occurs at 1,615 kN with a corresponding displacement of 187.0 mm. The introduction of the additional compressive stress in the lower part of the girder from the removal of unbonded compressive prestressing of the H-type steel showed a capacity improvement of about 60% (7.7 mm) recovery of the residual deformation (18.7 mm) that occurred from load increase. By using prestressed H-type steel as compression reinforcements in the upper part of cross section, repair and rehabilitation of PSC girders are relatively easy, and the cost of maintenance is expected to decrease.

Keywords : PSC girder bridge, compressive prestressing, unbonded PS tendon, H-type compression reinforcements, girder repair and rehabilitation

요 지

일반적으로 PSC 거더 교량은 철근 콘크리트 부재와 달리 전단면을 사용하여 외부하중을 저항한다. 또한 설계와 시공의 용이성, 구조적 안전성, 경제성, 유지관리의 편리성 등의 장점 때문에 30 m 이하의 중/소 경간 교량에 많이 적용되고 있다. 그러나, 최근 전세계적으로 환경, 미관 등에 관심이 높아짐에 따라, 교량의 경간은 점점 길어지는 추세이다. 이러한 추세는 케이블 교량뿐만 아니라 PSC 교량에서도 나타난다. 본 연구는 시대적 흐름에 맞춰 PSC 거더를 50 m 이상의 장경간에 적용하기 위한 연구의 일환으로 상부에 H형 강재가 도입된 중공 박스 합성거더를 개발하였다. 개발된 거더는 타설 전 상부에 H형 강재에 미리 비부착 압축 프리스트레스를 주어 거더의 성능저하 시 프리스트레스력을 제거하여 성능을 회복시키는 방법이다. 개발된 거더는 실제 교량에 사용하기 위한 필수적인 정적실험을 3점 재하로 4단계로 구분하여 수행하였다. 1차 하중은 균열발생시점까지로 하였으며, 하중 제거 후 미리 상부강재에 도입된 프리스트레스력을 제거하여 거더의 성능회복력을 확인하였다. 그 후, 거더가 파괴될 때까지 하중을 재하하였다. 실험 결과, 18.7 mm의 잔류변형이 발생하였으나, 상부 강재의 PS 제거에 의해 7.7 mm로 회복되었다. 즉, 상부 H형 강재에 도입된 비부착 압축 프리스트레스의 제거에 의한 거더 하연의 추가 압축응력으로 하중 증가에 따른 잔류변형을 약 60%가량 회복시키는 성능향상을 보였다. 상부에 H형 강재를 시공함으로써 추후 보수보강을 용이하게 할 수 있고, 비용도 절감할 수 있다.

핵심용어 : PSC 거더 교량, 압축 프리스트레싱, 비부착 PS 텐던, H형 압축 보강강재, 거더 보수보강

*정회원 · 연세대학교 토목공학과 BK 박사후 연구원 · 공학박사 (E-mail : sztk77@yonsei.ac.kr)

**정회원 · 교신저자 · 연세대학교 사회환경시스템공학부 부교수 · 공학박사 (E-mail : jjhkim@yonsei.ac.kr)

*** (주)홀지디에스 대표이사 · 공학석사 (E-mail : ceo@hgdc.com)

**** (주)한국PC 차장 (E-mail : hkpc@hkpc.co.kr)

1. 서 론

PSC 거더(Pre-Stressed Concrete girder)교량은 세계 2차 대전 이후 프리스트레스트 콘크리트의 사용량 증가와 함께 비약적인 발전을 이루었으며, 표준화된 도면이 제시되어 설계와 시공의 용이성, 뛰어난 경제성, 유지관리의 편리성 때문에 경간길이 35 m이하인 중·소 경간교량에 많이 적용되고 있는 실정이다. 실제로 1998년 말까지 국내 고속도로 상에 있는 교량을 형식별로 분류한 건설교통부의 자료에 의하면 PSC 거더교의 형식이 총 교량 형식의 25% 이상을 차지할 정도로 많은 시공 실적을 보이고 있다(건설교통부, 1998). 현재 국내에서는 PSC 거더의 표준설계단면으로 설계 압축강도 40 MPa의 콘크리트를 적용한 경간길이 25 m~35 m 거더단면이 제시되어 널리 사용되고 있으며, 2000년대 이후에 새롭게 개발된 개량형 PSC 거더는 기존의 35 m 이하의 교량에 적용해 오던 적용 경간을 45 m까지 향상시키는 기술적인 진보를 이루었다(PCI, 2003). 최근에 국내에서 적용되는 개량형 PSC 공법으로는 IPC(Han *et al.*, 2003), SCP, NE Bulb-T 거더(Bardow *et al.*, 1997) 등 다양한 공법들이 활발하게 설계되어 장경간화를 위한 노력을 기울이고 있다. 그러나, 이 개량형 PSC 거더 교량들은 고강도 콘크리트의 적용, 하중 단계별 긴장력의 도입, I형식의 단면형상 등의 이미 오래전에 개발된 기술 및 요소들을 적절히 조합하여 거더 높이를 낮추고 경간을 길게하는 국부적인 개량만을 시도하고 있어 기존 PSC 거더와 큰 기술적인 차이를 보이지 못하고 있다. 또한, I형태의 단면이 갖는 구조적인 단점은 45 m 이상의 경간에 적용하기에는 거더의 단면강성이 작기 때문에 이동하중에 의한 처짐 및 진동이 크게 발생하여 사용성에 문제가 발생한다. 이러한 이유로 2000년대에 들어서면서 낮은 거더 높이를 확보하면서 50 m 이내의 경간에 적용이 가능한 강복합 프리스트레스트 콘크리트 교량이 다양하게 적용되었다. 이 형식의 대표적인 공법은 1980년대 후반에 국내 소개되어 적용되고 있는 프리플렉스 공법으로서 이를 개량한 다양한 형태의 기술이 추가적으로 개발되었다. 그러나, 강복합 프리스트레스트교량들은 주요부재가 강재와 콘크리트로 구성되어 있으며, 공사비에서 차지하는 강재의 비중이 매우 크기 때문에 2005년 강재가격 급등으로 인한 공사비의 증가요인이 되고 있다(전세진 등, 2009a). 또한, 중국과의 원자재 확보경쟁으로 강재의 수급이 원활하지 못해 공사기간의 연장 등 큰 어려움을 겪었다.

한편, 국내에서 45 m~60 m 이상의 장경간 교량에는 강박스교량 또는 PSC 박스 거더 교량만이 적용되고 있다(전세진 등, 2009b). 이들 교량은 그 적용경간이 길어 장경간화 하는데 매우 유리하며, 그 시공실적이 풍부한 장점이 있다.

그러나, 공사비와 거더의 높이가 다른 공법에 비해 매우 높기 때문에 이를 대체할 공법의 개발이 필요한 실정이다. 또한, 국내 대도시 주변의 교통체증 해소를 위한 차선 수 확대와 교량의 하부 공간의 활용성이 증대되면서 경간장을 50 m~60 m까지 적용할 수 있는 거더 공법의 개발이 요구되고 있다.

따라서 본 연구에서는 기존의 PSC 거더의 한계를 극복하고 중·소경간 및 장경간 교량에 적용이 가능한 IT 거더(Intelligent Technology Girder)를 개발하였다. IT 거더는 경간에 대한 장점뿐만 아니라 제작 공정이 단순화·합리화되어 공기를 단축할 수 있고, 보다 경제적인 비용으로 강성이 높고, 응력제어가 용이한 교량을 건설할 수 있다. 교량 경간이 50 m 내외에서는 뚜렷한 우위의 시공성과 경제성을 확보할 수 있으며, 타 형식 교량으로는 시공이 어려운 60~70 m 형식의 경우에도 단면의 큰 증가가 없고 또한 성능저하로 인하여 발생하는 추가적인 보수·보강비가 불필요해 경제적이면서도 용이한 시공이 가능하다.

2. IT 거더의 기본 원리

장경간화와 관련하여 설계 측면에서 단면형상을 개선하여 최적화하려는 국내외의 연구 동향은 이미 많이 언급되고 있다(전세진 등, 2009a). 본 연구에서는 이러한 실정에 따라 기존의 35 m 정도의 중소 경간에 사용하던 거더를 50~60 m 이상의 장경간에 경제적으로 적용할 수 있는 교량을 개발하였다. 개발된 IT 거더는 중공단면을 갖는 강합성 거더로써 그 자중을 줄이고 단면 높이를 최소화하였다. 또한, 비부착 PS 강선으로 미리 압축프리스트레스를 도입한 H형 강재를 콘크리트 거더의 상면에 합성시켜 제작함으로써 단면강성을 크게 향상시키고, 교량의 성능 저하 시 H형 강재에 도입된 압축력을 제거하여 거더의 하면에 압축력을 추가로 도입하여 불필요한 보수보강 비용을 제거한 신개념 공법이다. 아래 그림 1은 개발된 IT 거더의 기술적 특징을 보여주고 있다.

3. 실험내용 및 방법

본 연구에서는 IT 거더의 구조성능 및 안전성 평가를 위하여 실험 구조실험을 실시하였다. IT 거더 교량은 IT 거더와 바닥판으로 구성되나 IT 거더 자체만의 거동을 자세히 규명하고 바닥판이 없는 불리한 조건에서 거더의 극한성능 검증에 확인하기 위하여 실험실은 바닥판이 없는 거더로 실험을 수행하였다. 구조성능 실험은 3점 정적 휨 파괴실험을 실시하여, 상부에 보강된 H형 강재의 영향과 비부착 프리스트레스에 의한 회복력 및 재하 하중에 의한 IT 거더

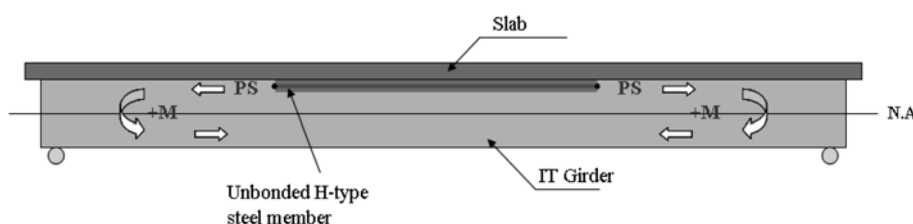


그림 1. 기술적 특징



(a) 철근 조립 및 슈스관 설치



(b) 중공단면 스티로폼 삽입



(c) 스티로폼 부상방지 작업



(d) H형 강재 거치



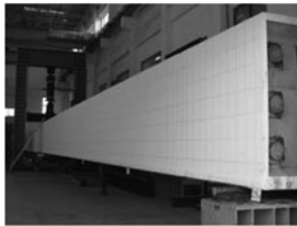
(e) 강재 프리스트레싱 도입



(f) 콘크리트 타설



(g) 프리스트레싱 도입



(h) 제작완료

그림 2. 거더 제작 공정

의 거동을 분석하여 IT 거더의 성능을 규명하고자 한다.

3.1 실험체 제작

구조실험을 위한 최초 실험체는 거더 경간장이 60 m로 계획되었으나 국내 실험 여건상 불가피하게 50 m로 수정하였다. 실험의 목적이 개발된 IT 거더의 실제 거동을 확인하는

표 1. IT 거더의 재료 물성 및 PS

콘크리트 강도	설계기준강도 (f_{ck})	45 MPa
	측정된 콘크리트 압축강도 (f_c)	35 MPa
H형 강재	SM 490	$f_{py}=320$ MPa
긴장재	SWPC 7BN	$f_{py}=1,600$ MPa

표 2. 상부 강재의 비부착 압축 프리스트레싱력과 도입순서

텐던 번호	긴장순서	프리스트레싱력 (kN)	상부강재의 텐던
1	1번	165.74	
2	4번	139.81	
3	2번	157.09	
4	3번	148.45	

표 3. 하중 재하 단계

하중 재하 단계	세부 내용
Stage 1	초기균열 발생시점까지 하중재하
Stage 2	Unloading
Stage 3	상부 H형 강재의 압축 프리스트레싱력 제거
Stage 4	파괴하중까지 Reloading

데 있으므로, 도로교 설계기준(건설교통부, 2005)에 따라 그림 2와 같이 실험체를 제작하였으며, 실험체의 제작 순서는 현장에서 제작하는 시공순서와 동일하게 제작하였다. 실험체는 사이즈가 크기 때문에 외부에서 반입이 어려워 실험동 내부에서 제작하였다. IT 거더는 중앙에 중공부분을 갖기 때문에 그림 2와 같이 스티로폼을 사용하여 중공부분을 만들었으며, 기존 실험체에서 발생하는 스티로폼의 부상을 방지하기 위하여 부상방지 시스템을 적용하였다. 실험동 내부에서 제작한 시편은 강재 거푸집을 사용하여 설계기준강도 45 MPa의 콘크리트를 타설하였고, 콘크리트 타설 이후에 조기 강도발현을 위해 증기양생을 실시하였다. 그러나, 실제 측정된 콘크리트의 압축강도는 35 MPa를 나타내었다. 실험에 사용된 IT 거더의 재료물성은 표 1에 나타내었으며, 상부 강재에 도입된 압축 프리스트레싱력은 표 2와 같다.

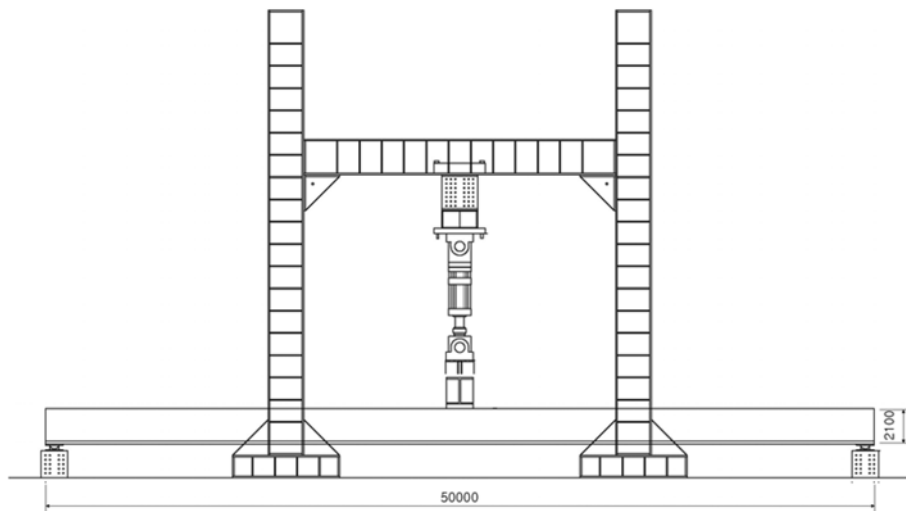


그림 3. IT 거더의 정적 구조실험 재하 장치도

3.2 하중 재하 및 측정방법

IT 거더의 하중재하실험은 단경간 단순지지 조건하에서 수행하였으며 거더 중앙점에 점 재하를 실시하였다. 실험에 사용된 가력장치는 최대 용량 3,000 kN을 갖는 UTM을 사용하였으며, 하중은 거더의 중앙점에서 0.02 mm/sec의 속도로 변위제어를 실시하였다. 본 연구에서는 하중 단계에 따른 처짐, 변형을 뿐 아니라 상부에 도입한 H형 강재의 회복력을 확인하기 위해서 표 3과 같은 하중을 재하하는 방법으로 실험을 실시하였으며, 그림 3은 실험체의 장치도이다.

재하실험 시 부재의 거동을 측정하기 위하여 콘크리트 타설 전에 H형 강재와 하부 인장철근에 변형률 게이지를 부착하였으며, 콘크리트 게이지는 실험체의 제작이 완료된 후 콘크리트 표면에 변형률 게이지를 부착하였다. 실험체의 중립축 거동을 확인하기 위하여 중앙부(0.5L) 단면에 200 mm 간격으로 콘크리트 게이지를 부착하였으며, 중앙부 최대 처짐을 확인하기 위하여 거더 하부에 전기식 변위계(이하 LVDT: linear variational deformation transducer)를 설치하였다. 또한, 상부 H형 강재와 콘크리트의 거동을 확인하기 위하여 강재와 콘크리트가 접하는 단면에서의 변형률과 H형 강재의 프리스트레스 제거에 따른 거더의 영향을 확인하기 위하여 0.3L과 0.2L 위치에 LVDT와 게이지를 부착하였다. 콘크리트와 철근의 변형률 측정에는 일본 T사 제품의 변형률 게이지를 사용하였으며, 변위는 LVDT를 사용하여 측정하였다. 또한, 실험에 사용된 데이터 로거는 일본 T사 제품의 계측 장비인 TDS-303을 사용하였으며, 확장 연결케이블도 일본 T사 제품인 50채널의 스위칭 박스를 연결하여 사용하였다. 그림 4는 실험체의 단면도와 게이지 부착 위치를 나타내고 있다.

4. IT 거더의 정적성능 실험 결과

4.1 하중-변위

상부 H강재를 도입한 IT 거더 실험체의 중앙점 및 0.3L, 0.2L 지점의 하중-변위 곡선은 그림 5에 나타내었다.

변위 제어법에 따라 0.02 mm/sec의 속도로 하중을 재하한 실험체는 초기 균열이 1,615 kN에서 발생하였으며, 그 시점의 중앙점에서의 변위는 187.0 mm이다. 그 후, 균열하중이 발생한 1,615 kN에서 하중을 제거하였을 때 18.7 mm의 잔류변형이 발생하였다. 본 연구에서는 비부착 PS강선을 이용하여 H형 강재에 압축프리스트레스를 미리 도입하여 콘크리트 구체와 합성시켜 제작하였다. 그러므로, 비부착 PS강선을 절단하여 이 강재에 도입된 압축 프리스트레스를 제거한 결과, 거더 상부에는 인장력이 도입되고 하부에는 압축력이 도입되어서 그림 5(a)에 점선으로 표시된 것처럼 11.0 mm의 잔류변형이 회복되는 것을 확인할 수 있다. 따라서, 1차 하중재하와 상부 H형 강재의 압축프리스트레스 제거에 따른 잔류변형은 7.7 mm이다. 상부 H형 강재의 압축프리스트레스 제거 후에 2차 하중재하를 실시하였으며, 실험체가 파괴될 때까지 하중을 재하 하였다. 실험체는 약 1,400 kN 재하 하중에서 1차 하중 곡선과 교차하였으며, 약 2,000 kN에서 상부 강재와 접합된 콘크리트의 급작스런 압축파괴에 의해 파괴되었다. 이러한 압축파괴는 IT 거더의 콘크리트 강도가 조기 발현이 되지 않아 설계강도인 45 MPa에 미치지 못하고 IT 거더 자체의 성능을 확인하기 위해 상부 강재를 구속해 주는 바닥판 콘크리트를 타설하지 않았기 때문인 것으로 판단된다.

초기 균열 발생 하중인 1,615 kN에서 0.3L과 0.2L 지점에서의 변위는 각각 148.7 mm와 106.2 mm이며, 하중제거에

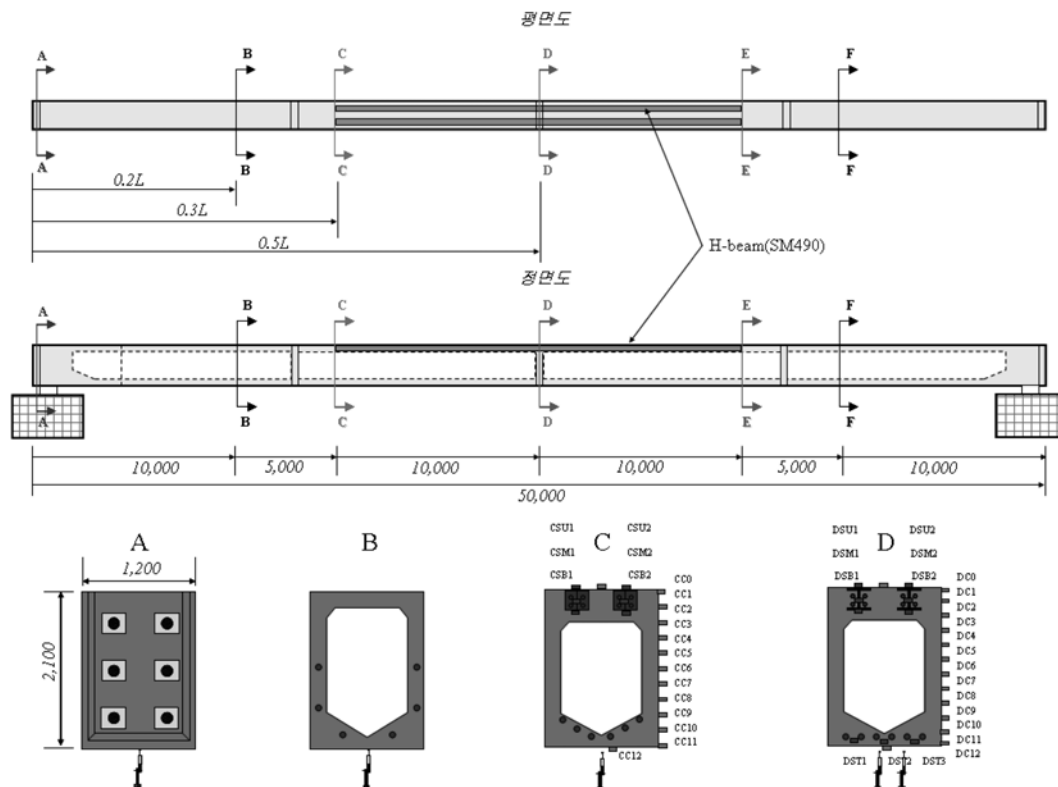


그림 4. 실험체의 단면도 및 게이지 위치

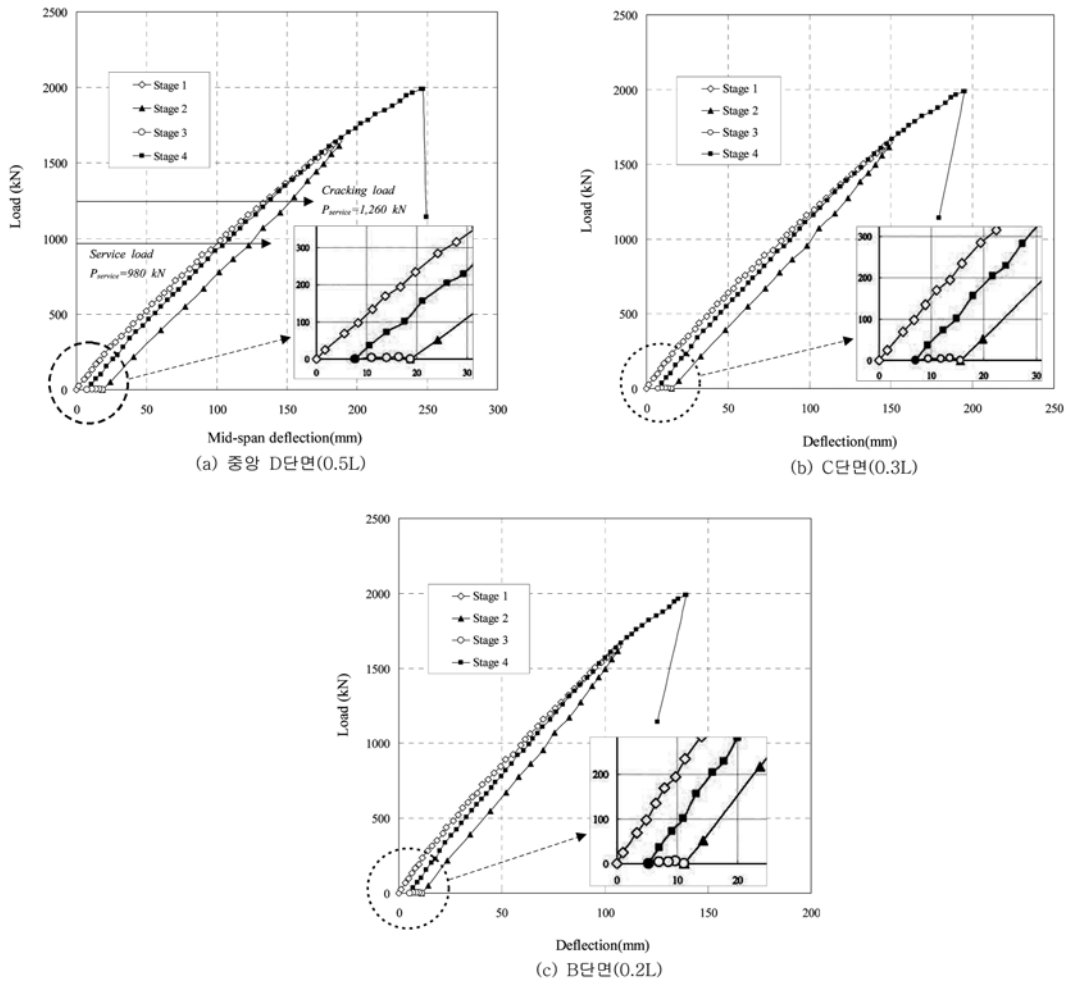


그림 5. 하중-변위 곡선

표 4. 하중단계에 대한 측정위치별 변위

하중단계	재하하중 (kN)	변위 (mm)		
		0.5L(중앙점)	0.3L지점	0.2L지점
Stage 1 (균열하중)	1,615	187.0	148.7	106.2
Stage 2 (Unloading)	0	18.7	15.5	11.0
Stage 3 (H형 강재의 압축 프리스트레스력 제거)	0	7.7	7.0	5.2
Stage 4 (파괴하중)	2,000	246.8	195.2	139.5

표 5. 설계값과 실험값의 비교

하중단계	하중 (kN)		처짐 (mm)
	설계값	실험값	
사용하중	980	-	-
균열하중	1,260	1,615	187.0
극한하중	3,000	2,000	246.8

따른 잔류변형은 각각 15.5 mm와 11.0 mm이다. 상부 H형 강재의 압축 프리스트레스력 제거에 따라 각각 8.5 mm와 5.8 mm의 잔류변형이 회복되어 최종 잔류 변형은 각각 7.0 mm와 5.2 mm로 나타났다. 표 4에는 하중-변위의 단계별 거동을 나타내었다.

실험체의 사용하중, 균열하중, 극한하중 및 처짐에 대한 설계값과 실험값을 표 5에 비교하여 나타내었다. 설계값에 의한 균열하중은 1,260 kN이고 실험에 의한 균열하중은 1615

kN으로 나타났다. 그림 5에서 보이는 것과 같이 사용하중에 해당하는 980 kN에서 탄성거동을 보여, 안전성에는 문제가 없는 것으로 나타났다. 실험에 의한 균열하중은 충격계수를 포함한 설계하중인 980 kN에 비해 1.7배 이상 큰 것으로 나타나 사용하중상태에서 균열이 발생하지 않는 것으로 나타났다. 또한, 극한하중은 설계기준강도인 45 MPa에 미치지 못하는 35 MPa의 낮은 콘크리트를 강도를 사용하고 바닥판을 합성하지 않은 상태에서도 실험값과 설계값이 매우 유사하게 나타났다. 따라서, 추후 콘크리트의 강도를 증진시키고 바닥판을 사용할 경우 더욱더 안전성은 높아질 것으로 판단되며, 50 m~60 m 이상의 장경간 교량에 충분히 적용할 수 있을 것으로 기대된다.

4.2 하중-변형률

4.2.1 콘크리트의 변형률

IT 거더 실험체의 위치별로 하중에 대한 거더 상·하연 콘

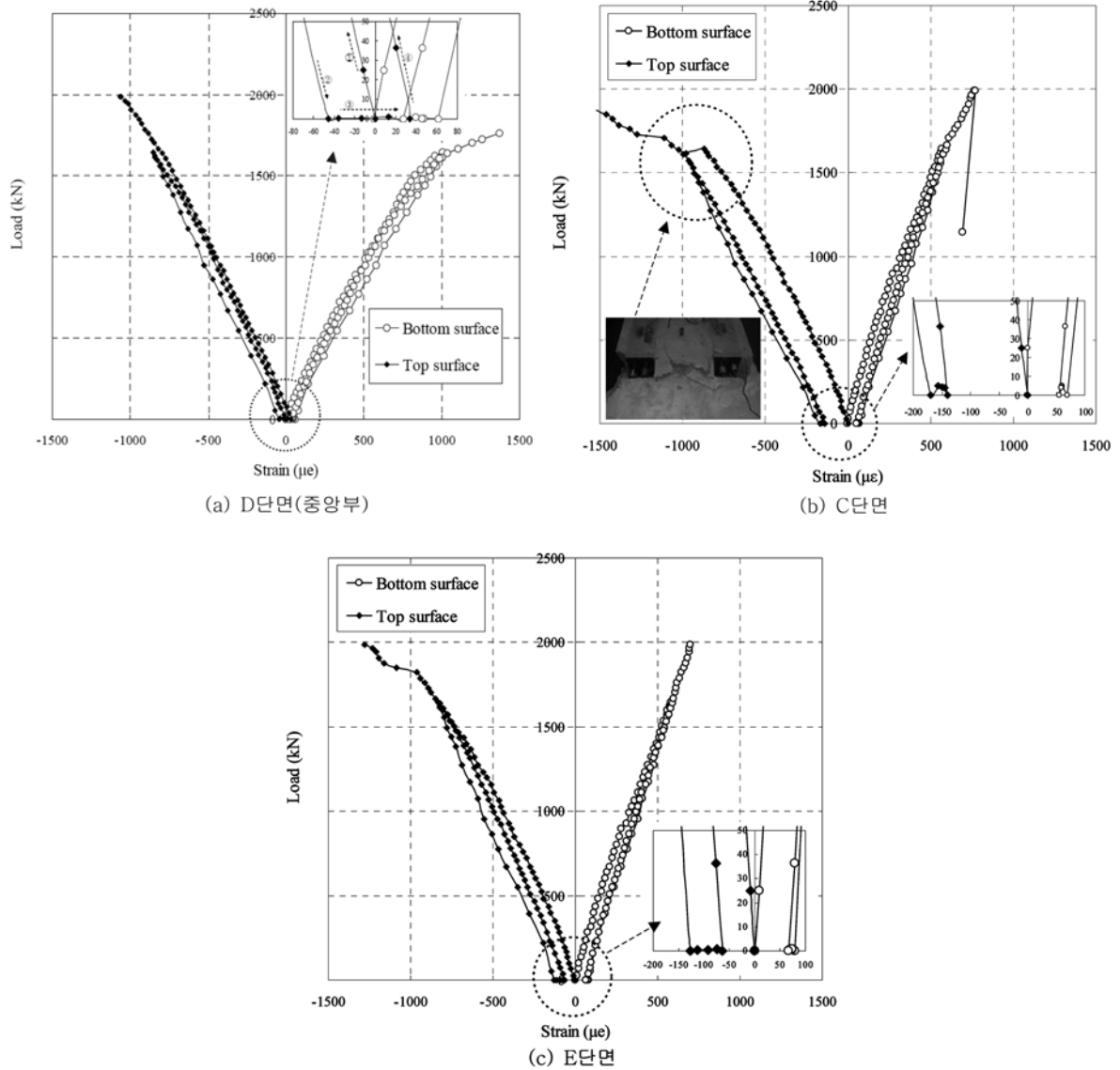


그림 6. 하중상·하연 콘크리트의 변형률

콘크리트 변형률 곡선은 그림 6에 나타내었다. 그림 6(a)에서 보이는 것과 같이 중앙부 상면에 부착한 게이지로부터 측정된 값을 보면 파괴하중단계에서도 콘크리트는 압축파괴시 변형률 0.003에 도달하지 않았으며, 압축파괴는 관찰되지 않았다. 콘크리트의 하연 인장변형률을 측정된 결과 약 1,615 kN에서 미세한 인장균열이 발생한 것이 관찰되었으나 구조적으로 큰 영향을 미치지 않는 균열이었으며, 예상균열하중 값인 1,300 kN 이상을 초과하는 것으로 충분한 균열저항성을 확보하는 것으로 확인되었다.

그림 6(b)와 (c)는 C단면과 E단면에서의 상·하연 콘크리트 변형률을 각각 보여주고 있다. 그림 6(b)에서 보이는 것과 같이 C단면의 상부에서 압축파괴가 발생한 것을 확인할 수 있다. 점선으로 표시된 부분은 상부 H형 강재와 콘크리트의 계면파괴(Interface failure)에 의한 거동을 나타내고 있다. 그림 6(a)와 같이 D단면에서는 상부 H형 강재의 압축 프리스트레스력을 제거하였을 때 IT 거더는 잔류변형이 회복될 뿐만 아니라 상부 콘크리트가 인장을 받는 것으로 나타났다. 반면 계면파괴가 발생한 C단면과 E단면에서는 압축 프리스트레스력 제거에 의한 회복이 거의 일어나지 않는 것을 확인할 수 있다.

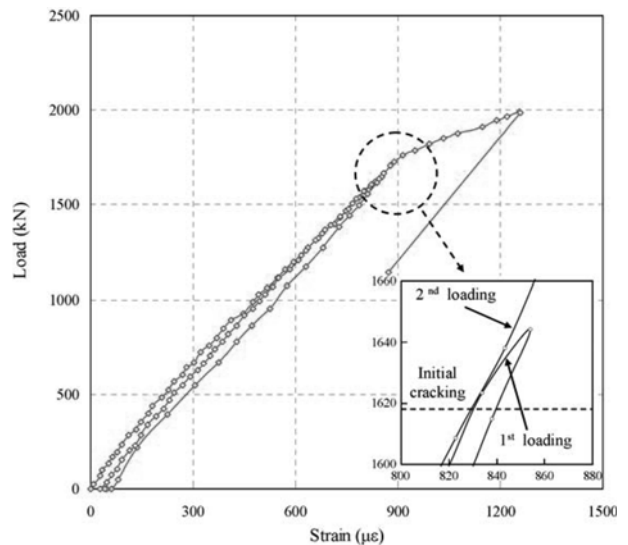


그림 7. 중앙단면(D단면)에서 하연 인장철근의 하중-변형률 관계

4.2.2 인장철근의 변형률

그림 7은 중앙부 단면에서 하중에 대한 인장철근의 변형률을 나타내고 있다. 초기 균열 발생시점을 콘크리트의 변형

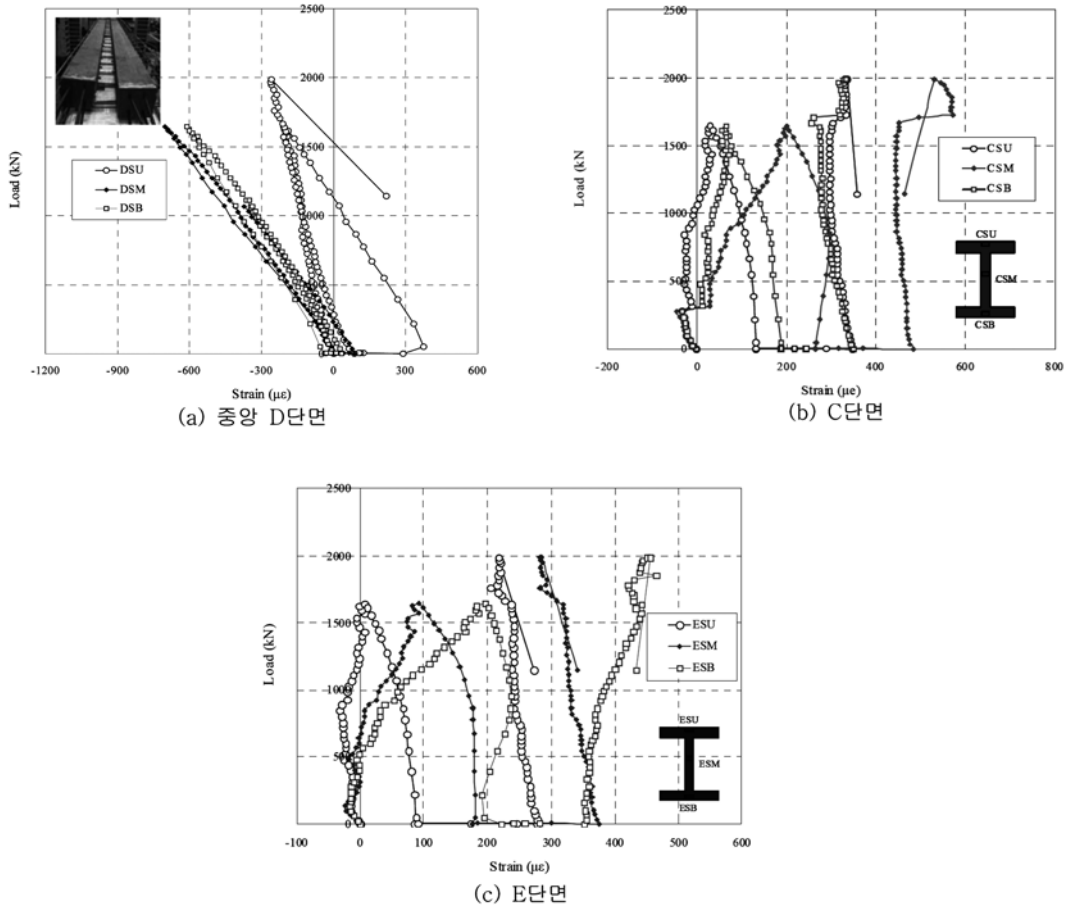


그림 8. 상부 H형 강재의 하중-변형을 관계

를에서 확인한 것보다 더욱 확실하게 잘 포착하고 있는 것을 볼 수 있다. IT 거더의 하연 인장철근은 초기 균열이 발생한 1,615 kN 재하하중 이후에 단면력 분담에 따른 급격한 변형을 증가를 보이고 있으나 지속적으로 하중을 분담하고 있어 항복에 도달하지 않은 것으로 판단된다. 따라서, IT 거더는 상부 압축부의 콘크리트를 보강하면 더욱 높은 하중에 대해 견딜 수 있을 것으로 판단되며, 단면의 축소로 형고 또한 낮아져 경제성이 증대될 것으로 판단된다.

4.2.3 상부 H형 강재의 변형을

그림 8(a)~(c)은 측정 위치별 상부 H형 강재의 변형을 나타내고 있다. 그림 8(a)와 같이 중앙단면(D단면)에서의 상부 H형 강재는 1차 하중재하 시점까지 계속 압축력을 받는다. 균열하중 이후 하중을 제거하여도 중앙단면에서의 강재의 잔류변형은 크지 않은 것으로 나타났다. H형 강재에 도입된 압축프리스트레스를 제거한 시점에서는 강재가 인장력을 받는 것으로 나타났으며, 강재의 하부에서 상부로 갈수록 인장력은 크게 나타났다. 이러한 결과는 거더의 잔류변형이 회복되는 것을 나타낸다.

C단면과 E단면에서 강재는 초기하중에서 압축력을 받다가 일정 하중단계를 지나면 인장력을 받는 것으로 나타났다. 이러한 이유는 상부의 H형 강재와 콘크리트의 계면에서의 미세균열의 발생에 의한 것으로 판단된다. 균열하중 이후 하중을 제거하였을 때 D단면에서와 달리 확인한 잔류변형을 보이고 있다. 또한 강재에 도입된 압축프리스트레스를 제거한 경우에서도 하중제거에 따른 회복이 크게 나타나고 있다. 그

리나, 상부 H형 강재의 압축프리스트레스 제거에 따른 영향은 거더와 강재가 접하는 계면에서의 균열 발생으로 인하여 상대적으로 계면으로부터 멀리 떨어져있는 중앙부 D 단면에서는 영향을 적게 받고 계면에 근접한 C, E 단면에서는 영향을 크게 받는 것으로 나타났다.

5. 실험결과의 검증

5.1 유한요소해석

본 연구에서는 IT 거더의 구조실험결과를 예측하고 구조거동을 분석하기 위하여 3D 정밀 해석을 수행하였다. 해석 프로그램은 범용 유한요소 해석프로그램인 DIANA(1998)를 사용하였으며, 사용재료에 대한 비선형거동을 고려하여 IT 거더에 대한 정밀 해석을 수행하였다. 또한, IT 거더의 특성을 고려하여 제작에서부터 실제 조건과 동일하게 설정하여 해석을 실시하였으며, 본 연구에서는 콘크리트의 모델링을 위해 IT 거더를 중공부와 다이아프레임부, 그리고 상부 H형 강재로 구분하여 8절점 Solid 요소와 6절점 Solid 요소를 이용하여 그림 9와 같이 3차원 모델링을 하였다. 재료모델은 콘크리트의 경우 Drucker-Prager의 항복이론을 적용하였으며, H형 강재와 PS 강연선은 von Mises의 항복이론을 적용하여 해석하였다.

5.2 실험결과와 해석결과의 비교

다음 그림 10은 거더 중앙에서의 하중-변위값을 해석결과와 실험결과를 비교해 놓은 것이다.

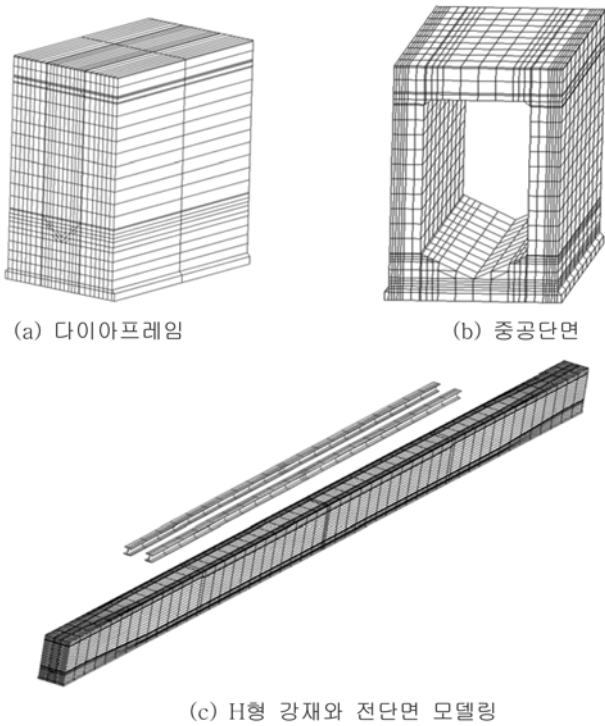


그림 9. IT 거더 실험체 모델링

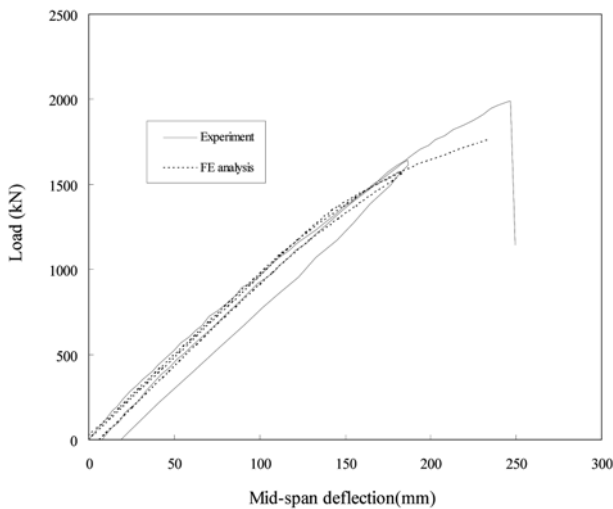


그림 10. 해석결과와 실험결과의 비교

시공단계별 해석기법을 도입하여 해석한 결과 IT 거더는 프리스트레스 도입 직후 거더 하부는 압축을 받고 상부는 인장을 받는 것으로 나타났으며, 중앙부에서 최대 솟음 111 mm가 발생하였다. 초기 균열은 재하하중 약 1,200 kN에서 상부에 강재와 콘크리트의 계면을 따라서 발생하는 것으로 나타났으며, 하부에서도 거의 동시에 인장균열이 발생하는 것을 확인할 수 있다. 또한 양단부에서는 프리스트레스 도입에 따른 지압균열이 발생하는 것을 확인할 수 있는데 이는 IT 거더의 콘크리트 설계강도인 45 MPa에 미치지 못하는 35 MPa의 콘크리트로 타설하여 양단부에서 프리스트레스에 의한 지압파괴가 발생한 것으로 판단된다. 한편, 하중변위에 대한 해석결과는 그림 10에 나타난 바와 같이 실험결과와 매우 유사한 거동을 보이는 것으로 나타났다. 1차하중 재하시점인 1,600 kN까지는 거의 일치하고 있으나, 하중제거 후 잔류변형이 실험에서보다 작은 값으로 나타났다. 이러한 결과는 해석상 상부강재와 콘크리트를 완전부착 상태로 가정

하고 해석을 수행한 결과에 의한 차이라고 판단되며, 또한 상부 콘크리트 타설시 지연에 의한 시공이음부의 발생에 의한 것으로 생각된다. 상부 압축프리스트레스 제거에 의한 회복력 76 mm로 나타나 상부 강재의 프리스트레스 제거에 의한 IT 거더의 성능회복능력을 확인 할 수 있었다. IT 거더는 1,800 kN에서 파괴가 발생하는 것을 확인할 수 있는데 이는 실제 실험결과인 2,000 kN보다 낮게 평가되고 있다. 하지만 안전성 측면을 고려한 해석결과는 전체적인 거동면에서 IT 거더의 실제 구조 실험결과를 매우 유사하게 예측하고 있다.

6. 결 론

PSC 거더의 장경간화를 위해 개발된 IT 거더의 실제 적용성을 평가하기 위하여 50 m 길이의 실물 거더에 대한 정적 성능 평가실험을 통해 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. IT 거더는 사용하중 상태에서 선형거동을 하는 매우 안정적인 거동을 보였으며, 콘크리트의 조기 강도가 발현되지 않아 설계강도인 45 MPa에 훨씬 미치지 못하는 강도의 콘크리트를 사용하였음에도 불구하고 약 2,000 kN의 높은 성능을 보였다. 따라서, 설계강도인 45 MPa의 콘크리트를 사용하고, 상부 바닥판 슬래브로 강재를 구속할 경우 IT 거더의 성능은 더욱 향상될 것으로 예상된다.
2. 상부 H형 강재에 도입된 비부착 압축프리스트레스의 제거에 의한 거더 하연의 추가 압축응력 도입은 하중 증가에 따른 잔류변형(18.7 mm)을 약 60%(11.0 mm)가량 회복시키는 성능향상을 보여 그 효과를 충분히 확인할 수 있었으며, 거더의 성능 저하시 추가적인 보수·보강비의 소요 없이 거더의 성능을 향상시킬 수 있어 매우 경제적이고 효과적인 것으로 평가되었다.
3. 현재 개발된 IT 거더는 경간(50 m)대비 매우 낮은 형고(2.1 m)를 갖는 것으로 평가되고 있으며, 또한 중공단면을 사용함으로써 자중 감소효과를 보여 50 m~60 m에 적용하는 것은 물론, 그 이상의 장경간 교량에도 충분히 적용이 가능할 것으로 판단된다.

본 연구를 통하여 개발된 IT거더교는 기존 35 m까지 적용되었던 PSC 거더교의 연장을 60 m 이상까지 확대할 수 있어 기존 강교 및 PSC 박스교량을 대체하는 것이 가능하며, 정부의 건설공사 절감 방안 및 공사기간 단축을 위해, 향후 활용 및 적용이 기대된다.

감사의 글

이 논문은 (주)한국PC의 재정적인 연구지원에 의해 수행되었으며, 한국과학기술재단이 지원하는 “일반 콘크리트 구조물 및 충격·폭발하중을 받는 구조물의 보수보강을 위한 고인성, 고연성 폴리우레아의 개발(과제번호 R01-2008-000-1117601)”의 부분적인 연구비 지원에 의해 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

참고문헌

건설교통부(1998) **건설현황조사**, 연구보고서, 건설교통부.

- 건설교통부(2005) 도로교설계기준, 한국도로교통협회.
- 전세진, 최명성, 김영진(2009a) PSC 거더교의 장경간화 평가 기법: I. 경간 평가 기법의 제안, **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제29권 제3A호, pp. 235-241.
- 전세진, 최명성, 김영진(2009b) PSC 거더교의 장경간화 평가 기법: II. 예제 분석, **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제29권 제3A호, pp. 243-250.
- Barow, A.K., Seraderian, R.L., and Culmo, M.P. (1997) Design, fabrication and construction of the New England Bulb-Tee girder, *PCI Journal*, Vol. 42, No. 6, pp. 30-40.
- DIANA (1998) User's Manual, Release 7.2, TNO.
- Han, M.Y., Hwang, E.S., and Lee, C.D. (2003) Prestressed Concrete Girder with Multistage Prestressing Concept. *ACI Structural Journal*, Vol. 100, No. 6, pp. 723-731.
- Precast/Prestressed Concrete Institute(PCI) (2003) *Precast Prestressed Concrete Bridge Design Manual*, 2nd Ed.
- (접수일: 2009.7.6/심사일: 2009.8.28/심사완료일: 2010.3.20)