프리텐션 방식의 PSC 거더 이동식 제작장치 해석모델에 관한 기초연구

A Basic Study on the Analysis Model of Portable Prestressing Device for Pretensioning PSC girders

변지석* · 윤기용** · 김종석*** · 김용혁****

Byeon, Ji Seok · Yoon, Ki Yong · Kim, Jong Suk · Kim, Yong Huck

Abstract

In this study, a portable prestressing device to produce pretensioning PSC girders on site has been developed. In order to develop a portable prestressing device it shall be safe and stable about jacking force. In this paper, the analytical model was developed to analysis the device using finite element analysis program ABAQUS. In the previous study, the portable prestressing device to produce 10 m-span pretensioning PSC girders was made and performed the static loading test. By comparing analytical results with these experimental results, the validity of the analytical model was demonstrated. Using the analytical model, the structural characteristics of each component of the developed device are investigated. The analytical model will be used in researching about various lengths and various analysis of the developed device.

Key words : Pretension, PSC girder, Portable Prestressing Bed

요 지

본 연구에서는 현장에서 프리텐션 방식으로 PSC 거더를 제작할 수 있는 이동식 긴장대를 개발하였다. 이동식 긴장대는 매우 큰 긴장력에 대하여 안전성과 안정성을 갖추어야 한다. 본 논문에서는 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS를 사용하여 개발한 이동식 긴장대를 해석할 수 있는 해석모델을 개발하였다. 10 m 정도의 프리텐션 방식의 PSC 거더를 생산할 수 있는 이동식 긴장대 실험체를 제작하여 수행한 정적하중재하 실험을 통한 실험결과와 비교하여 해석모델의 타당성을 입증하였다. 개발한 해석모델을 이용하여 실험에서는 파악하기 힘든 부분의 응력상태를 파악할 수 있었으며, 이 해석모델을 이용하여 다양한 길이와 다양한 해석으로 이동식 긴장대의 구조적 메카니즘을 파악할 수 있을 것으로 판단된다.

핵심용어 : 프리텐션, PSC 거더, 이동식 긴장대

1. 서 론

국토해양부의 통계자료에 의하면 2007년까지 완공된 도로 교의 수는 총 24,923개소(연장 2,289 km)에 달하며 2003년에서 2007년 사이에 건설된 교량의 약 26%가 PSC I형 교량으로 가설되었다.(국토해양부, 2008) 국내에서 PSC I형 거더의 제작은 포스트텐션방식을 주로 사용하고 있는데, 이는 프리텐션방식이 쉬스, 그라우팅, 정착장치 등을 사용하지 않아 포스트텐션방식 보다 제작비를 감소시킬 수 있으나(신현목, 2003), 거더의 길이가 30~50 m에 달하면 중량과 크기 제한(국토해양부, 2010)으로 공장에서 제작하여 현장으로 운반하기에

어렵기 때문이다. 따라서 현장에서 프리텐션방식의 PSC I형 거더를 생산하게 된다면 운반의 문제점을 극복하고 경제성을 향상시킨 PSC I형 교량을 제작할 수 있을 것이다.

프리텐션방식의 PSC부재에 관련된 연구를 살펴보면 고성능 콘크리트를 적용하기 위한 연구(남유석 등, 2006), 긴장강선의 절단방식 또는 절단순서의 영향을 파악하는 연구(김창호 등, 2008; 문도영 등, 2009), 강연선과 콘크리트 부착에 의한 유효프리스트레스를 전달시키기 위한 전달길이에 관한 연구(오병환 등, 2000; Byung Hwan Oh 등, 2000; 오병환 등, 2004), 등 프리텐션방식의 PSC부재에 특성에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 그러나 운반문제로 인하여 이들

*정회원 · 현대해상 교통기후환경연구소 전문위원(E-mail : jsbyeon@hi.co.kr)

**정회원 · 선문대학교 공과대학 토목공학과 교수(교신저자)

***선문대학교 대학원 토목공학과 석사과정

****정회원 · (주)장현산업 전무이사

연구들은 대부분 슬래브부재나 20 m이하의 단지간 거더와 같은 소규모 프리텐션방식의 PSC 부재에 적용되고 있다. 따라서 30 m이상의 중장지간 프리텐션방식의 PSC I형 거더에 적용하기 위해서는 포스트텐션방식과 같이 현장에서 거더를 생산함으로써 운반문제를 해결하기 위한 연구가 필요한 실정이다.

일반적으로 프리텐션 방식의 PSC 부재의 제작은 공장에서 고정식 긴장대를 설치하여 긴장력을 도입하나, 현장마다 고정식 긴장대를 설치하는 것은 비경제적이다. 현장에서 경제적으로 적용하기 위해서는 긴장대를 이동, 조립하여 설치한 후 PSC 거더를 생산하고 해체한 후 다른 현장으로 이동할 수 있어야 한다.

선행된 연구에서 10 m정도 크기의 PSC 거더를 생산할 수 있는 이동식 긴장대 실험체를 제작, 운반, 조립을 하면서 운반 및 사용성을 검증하였고, 강연선을 긴장하고 정착함으로써 2,952 kN의 긴장력을 도입하여 하중재하실험을 실시하여 기본적인 구조적 안전성을 검증하였다(이규세 등, 2011). 본 논문에서는 긴장Box, 더블 H-형 거더, RC바닥판으로 구성된 이동식 긴장대를 정확하게 해석할 수 있는 해석모델을 개발하고, 개발된 해석모델을 사용하여 실험체를 해석함으로써 해석모델의 적합성 및 타당성을 검증하고자 한다.

2. 해석 개요

이동식 긴장대의 하중재하 실험을 통하여 더블 H-형 거더와 RC바닥판은 부분적으로 합성 거동을 하는 것으로 파악되었다(이규세 등, 2011). 부분 합성 거동의 원인은 두 부재간의 마찰에 의한 것으로 판단되어지고 이를 정확히 고려하여 해석할 수 있어야 한다.

이동식 긴장대 실험체는 그림 1과 같이 RC바닥판, 정착부인 긴장BOX, 더블 H-형 거더로 구성되며 이동을 고려하여 길이 10 m이내, 무게 200 kN 이내로 제작하여 현장에서 조립한다. 사용된 강종은 SS400이고, 더블 H-형거더는 H형강(808×302×16×30, 단면적:30,760 mm²) 2개를 용접이음으로 제작하였다. RC바닥판은 M22 볼트로 더블 H-형 거더와 체결하여 긴장력 도입시 더블 H-형 거더의 좌굴 발생을 억제

그림 1. 이동식 긴장대 구성요소

한다. RC바닥판에 사용한 콘크리트의 설계기준강도는 60 MPa이다. 현장에서 이들을 조립하여 긴장대로 사용하게 된다. 이동식 긴장대는 50 m급 PSC 거더를 제작할 수 있도록 설계하였고, 구조특성을 파악하기 위한 실험용 이동식 긴장대는 단부거더(길이: 3.5 m 2개)와 중간거더(길이: 10 m)를 조립, 총길이 17 m로 제작하여 10 m급 PSC 거더를 생산할 수 있다(이규세 등, 2011).

2.1 긴장Box

2.1.1 긴장Box 해석모델

긴장Box의 해석모델은 전면판과 후면판은 두께가 50 mm 강판으로 4절점 shell요소(S4R)를 사용하여 모델링하였으며, 상부판과 하부판, 양측 측면판 및 내부보강재는 두께가 30 mm 강판으로 4절점 shell요소(S4R)를 사용하여 모델링하여, 육면체의 형상에 격자형으로 내부를 보강한 긴장 Box의 형태와 동일하게 그림 2와 같이 모델링하였다. 긴장Box의 재료특성은 표 1과 같다.

2.1.2 긴장Box 경계조건

실험체의 긴장Box의 거동을 살펴보면 2,952kN의 긴장력에 저항하면서 거더부의 더블 H-형 거더에 전달되는 단순보 형태의 휨부재 거동을 보이는 것으로 나타났다. 그러므로 해석 모델에서도 이와 같은 단순보 형태의 휨부재 거동을 할 수 있도록 적절한 경계조건을 구속하여야 한다. 해석모델에서는 그림 3에 보이는 정착부 긴장Box 후면판에 경계조건을 표 2

그림 2. 긴장Box 해석모델

표 1. 긴장Box의 재료특성

사용재료	항복강도 (MPa)	탄성계수 (GPa)	허용응력 (MPa)	포아송비
강재 (SS400)	240	210	140	0.3

그림 3. 긴장Box 후면판에 적용한 경계조건

표 2. 긴장Box 경계조건

절점 set	구속방향	비고
a	3번 방향의 변위구속	거더 길이방향
b	1번 방향의 변위구속	상하방향
c	2번 방향의 변위구속	좌우방향

그림 4. 긴장Box 전면판 가력하중

와 같이 각 방향으로의 변위를 구속하여 단순보 형태의 거동을 나타나게 하였으며, 3번 방향의 변위를 구속한 그림 3의 a부분의 크기는 해석결과와 실험결과를 비교하여 결정하였다.

2.1.3 긴장Box 가력하중

실험체의 하중재하 위치와 동일한 위치에서 하중을 재하하기 위하여 긴장Box 전면판에 그림 4에서 보이는 바와 같이 하중재하 위치와 동일하게 절점 및 요소를 구성하여 모델링하였다. 따라서 실험에서 강연선을 긴장한 순서와 동일한 순서로 각 절점에 184.5 kN의 집중하중을 작용시킬 수 있었다. 각 절점에 184.5 kN의 집중하중을 순차적으로 16개 절점에 도입하여 총 가력된 하중은 실험체와 동일한 2,952 kN이다.

2.2 거더부

2.2.1 거더부 해석모델

ABAQUS를 이용한 유한요소 해석을 수행하기 위하여 개발한 해석모델의 단면은 그림 5와 같다. 더블 H-형 거더는 4절점 shell요소(S4R)를 사용하여 모델링하였는데 상부플랜지와 하부플랜지는 4등분하여 절점을 형성하였고, 복부판도 4등분하여 절점을 형성하였다. RC바닥판은 8절점 solid요소(C3D8R)를 사용하여 모델링하였고, 더블 H-형 거더가 위치하는 곳에서는 절점의 위치를 높이차만 갖도록 형성하였다.

더블 H-형 거더와 RC바닥판의 부분 합성 정도를 모사하기 위해서 ABAQUS의 weld option을 이용하였다. weld option

그림 5. 거더부 해석요소 기본 모델링

그림 6. 거더부 weld option 위치

은 그림 5의 점선으로 동그라미를 표시한 곳에 더블 H-형 거더의 하부플랜지 절점과 RC바닥판의 절점에 적용하였으며, 길이방향으로 weld option을 적용하는 개수는 그림 6에서 보는 바와 같이 8곳에 적용하였다. 길이방향으로 weld option을 적용하는 개수는 더블 H-형 거더와 RC바닥판의 부분 합성 정도를 모사하는데 결정적인 영향을 미치는 요인이다. 따라서 본 해석모델은 길이방향으로의 weld option을 적용하는 개수를 다양하게 조절하여 시행착오방법으로 해석결과와 응력분포가 실험결과와 응력분포 기울기가 같아질 때까지 반복적으로 조절하여 실험결과와 가장 근접한 응력분포가 될 때의 길이 방향으로의 weld option을 적용한 개수이다.

2.2.2 거더부 경계조건

이동식 긴장대는 평지에 거치되어 거더부에 축력과 단부모

그림 7. 거더부에 작용하는 하중상태

그림 8. 거더부 경계조건

표 3. 거더부 경계조건

절점 set	구속방향	비고
a	2번 방향의 변위구속	상하방향
b	3번 방향의 변위구속	거더길이방향
c	1번 방향의 변위구속	좌우방향

멘트가 전달되나 지중의 효과를 무시하면 그림 7과같이 축력과 단부모멘트가 작용하는 경우에 단순지지조건을 갖는 보-기둥문제로 생각할 수 있다. 그러므로 해석모델의 경계조건은 단순지지조건이 되도록 그림 8과 표 3과 같이 거더부 저면 즉, RC바닥판의 저면에 경계조건을 부여하였다.

2.2.2 거더부 가력하중

실험체에서 긴장Box의 전면판과 후면판을 관통하여 강연선을 삽입 후 전면판에서 강연선을 긴장하여 정착하면 후면판과 단부거더의 보강판과 맞닿아 긴장력이 거더부로 전달되어 진다. 그러므로 단부거더의 보강판으로 전달되는 하중은 긴장력 가력시 그림 3의 긴장Box 후면판 절점set a에서 발생하는 반력의 합과 같다. 긴장Box 해석에서 최종하중재하 단계인 2,952 kN의 하중재하시 한쪽 절점set a에서 발생하는 반력의 크기는 표 4와 같다. 표 4를 보면 하중작용점과 단면도심의 편심으로 인하여 반력의 크기가 지면으로 갈수록 커지는 것을 알 수 있다. 즉 거더부로 축력과 단부모멘트가 전달되는 것을 알 수 있다.

단부거더의 보강판은 그림 9에서 보는 바와 같이 절점이 가로 및 세로로 5개씩으로 구성되도록 모델링 되었다. 단부거더의 보강판에 작용하는 하중의 크기는 표 4의 긴장Box 후면판에서의 반력과 같은 분포가 되도록 높이별로 산정하여 절점에 집중하중으로 작용시켰다. 각 절점에 작용하는 절점하중의 크기는 그림 9와 같다. 지면에서부터 높이별로 단부거더 보강판 절점의 개수가 5개씩이고, 단부거더가 2개 있으므로 양측 단부거더를 통하여 가력되는 총 하중은 2,952 kN 이고 그림 9에서 보는 바와 같이 절점하중의 크기는 지면에서부터 높이가 작을수록 커서 작용하는 절점하중은 축력과 단부모멘트로 더블 H-형 거더에 전달되게 된다. 절점하중의

표 4. 한쪽 절점set a 높이별 반력합계

저면으로부터 높이(mm)	반력(N)
978	3.24E+04
881	-2.98E+03
784	1.09E+05
701	1.47E+05
646	1.64E+05
591	1.86E+05
536	2.49E+05
454	2.42E+05
327	7.24E+04
215	3.07E+05
합계	1,476,000

그림 9. 거더부 하중재하 위치 및 크기

크기는 지면에서부터 높이가 작을수록 커지는 것은 단부거더 단면의 도심보다 하중합력 작용점의 위치가 낮다는 것을 의미한다.

3. 해석 결과

3.1 긴장Box

3.1.1 긴장Box 하중단계별 응력분포

하중재하 단계별 응력분포를 실험체의 변형률 게이지를 부착하여 측정한 위치에서 비교하면 그림 9와 같다. 실험 및 해석결과가 하중재하 단계별로 모두 선형적으로 거동을 하며, 두 결과의 응력분포가 유사하다. 그러므로 그림 10의 결과를 통하여 본 해석모델의 타당성을 확인할 수 있었다. 실험체와 마찬가지로 해석모델에서도 하중이 가력되는 전면판 부근에는 압축응력이 발생하며, 후면판 부근에서는 인장응력이 발생하는 휨 거동을 하는 것을 알 수 있다.

3.1.2 최종 하중재하 단계에서의 응력분포

최종 하중재하 단계에서의 긴장Box 상부판의 응력분포는 그림 11과 같다. 그림 11의(a)를 살펴보면 하중이 작용하는 전면판 부근에서는 압축응력이 발생하고, 후면판 부근에서는 인장응력이 함께 발생하는 단순보 형태의 휨 거동을 보이고 있는 것을 알 수 있다. 또한 그림 11의(b)와 표 5의 최종 하중재하 단계에서의 측정 위치에서의 실험결과와 해석결과

그림 10. 긴장Box 상부판 하중재하 단계별 응력분포

(a) 응력분포 (b) 실험, 해석결과 비교
그림 11. 긴장Box 최종 하중재하 단계에서의 응력분포

표 5. 상부판 측정위치별 결과 비교 (단위:MPa)

게이지 No.	33	34	35	36	37	38	39
실험결과	16.73	4.80	4.41	-1.12	-1.09	-6.72	-13.58
해석결과	16.92	8.61	4.79	0.05	-4.94	-9.34	-17.57
허용응력 대비(%)	12.1	6.2	3.4	-	3.5	6.7	12.6

를 비교하면 거의 동일한 크기의 응력임을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서 개발한 긴장Box의 해석 모델은 합리적인 결과를 제공하고 있음을 입증하였다. 표 5의 최종 하중재하 단계에서의 해석결과 최대 압축응력의 크기는 17.57 MPa이고, 최대 인장응력의 크기는 16.92 MPa로 모두 SS400강재의 허용응력(140 MPa)의 13% 이내 수준으로 하중에 대한 안전성은 충분히 확보한다.

3.1.3 내부보강재의 해석 결과

내부보강재의 위치는 그림 12와 같으며, 표 6에 각 위치에서 발생하는 최대 응력과 Von Mises 응력을 정리하였다.

그림 12에서 보는 바와 같이 내부보강재의 응력분포는 격벽과 Diaphragm의 교차로 인하여 매우 복잡한 양상을 보이며, 긴장재가 정착되는 하중작용점 근처에서 응력이 집중되는 현상을 나타내고 있다. 그러나 표 6에서 해석된 결과를 살펴보면 발생하는 모든 응력이 강재의 허용응력 140 MPa 이내로 나타나고 있어 긴장Box의 내부보강재는 안전성을 충분히 확보하고 있는 것으로 파악되었다.

3.2 거더부

3.2.1 거더부 높이별 응력분포

최종 하중재하단계에서의 거더부 각 단면에서 계측높이에 따른 응력분포 실험결과와 해석결과는 그림 13과 같다. 측정

그림 12. 긴장Box 내부보강재 Von Mises 응력분포

표 6. 긴장Box 내부보강재 최대응력 (단위:MPa)

	가력하중 (kN)	최대 인장응력	최대 압축응력	Von Mises
web1	2,952	8.60	-6.47	16.93
web2		4.78	-14.80	45.69
web3		2.64	-10.56	18.75
상부판		18.52	-18.72	18.23
6		19.41	-18.93	26.66
5		21.10	-22.54	31.27
4		21.97	-28.49	34.01
3		22.30	-40.99	57.47
2		21.87	-48.32	76.69
1		21.14	-36.19	64.53
하부판		26.09	-28.22	50.35

그림 13. 거더부 높이별 응력분포

높이가 높아짐에 따라 응력의 크기가 커지는 것을 알 수 있는데 이는 긴장력이 비록 거더의 도심에 작용하더라도 거더부의 더블 H-형 거더와 RC바닥판이 볼트에 의해 합성되어 도심의 위치가 하중 작용점보다 낮아졌음을 의미한다. 따라서 긴장력의 작용위치와 합성된 단면의 도심과의 편심이 발생하여 거더부는 축력과 휨모멘트가 동시에 작용하는 거동을 하게 된다. 또한 RC바닥판으로도 일정량의 긴장력이 전달되나 합성정도는 낮은 것으로 사료된다. 측정높이에 따라 응력구배의 형상이 실험결과와 해석결과가 유사한 거동을 보이는 것으로 보아 해석모델이 타당한 것을 파악되었다. 실험결과가 해석결과에 비해 응력 정도가 대략 81%정도로 다소 낮게 나타나는데 이는 긴장력 가력시 발생하는 프리스트레스 손실에 따른 것으로 판단된다.

4. 결 론

프리텐션 방식의 PSC 거더 생산이 가능한 이동식 긴장대의 정적하중재하 실험과 유한요소해석프로그램을 사용한 해석을 통하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 하중재하 단계에 따라 선형거동을 하며 2,952 kN의 가력하중에서 발생하는 응력수준은 도로교 설계기준의 허용범위 내에 있다.
- 2) 합성정도를 예측할 수 있는 해석모델을 개발하였으며, 정적하중재하 실험을 통한 결과와 비교한 응력분포 양상이 동일한 것으로 보아 해석모델이 타당하다고 사료된다.
- 3) 최종하중스텝에서 시간 중앙에서 거더부 높이별 응력분포 실험결과가 해석결과에 비해 81% 수준으로 다소 낮

게 나타나는데 이는 긴장력 가력시 발생하는 프리스트레스트 손실에 따른 것으로 판단된다.

- 4) 최종하중스텝에서 긴장Box 상부판에 발생하는 응력수준은 허용응력대비 13% 이내로 하중에 대한 안전성은 확보하였다.
- 5) 본 연구를 통하여 실험결과로 판단하기 어려운 긴장Box 내부의 응력을 검토할 수 있었으며, 긴장Box 내부에서 발생하는 응력도 도로교 설계기준의 허용치 140 MPa 이내로 하중에 대한 안전성은 확보하였다.

본 연구를 통하여 이동식 긴장대에 대한 해석모델을 완성하였으므로 추가적인 연구를 통하여 좌굴안정성에 대한 연구 및 다양한 길이의 이동식 긴장대의 구조적 특성에 대한 연구를 진행할 예정이다.

감사의 글

본 연구는 중소기업청 지원 산학연공동기술개발지원사업의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

건설교통부 (2005) 도로교설계기준.
 국토해양부 (2008) 국토해양통계연보, 도로교량 및 터널현황
 국토해양부 (2010) 국토해양부훈령, 차량의 운행제한 규정.

김장호, 문도영, 지광습, 김규선 (2008) 긴장재 절단에 따른 프리텐션 부재의 동적 거동 고찰, **대한토목학회 논문집**, 제28권, 제5A호, pp.747-756
 남유석, 조창근, 박문호 (2006) 고성능 콘크리트(HPC)를 사용한 프리텐션 부재의 시간의존거동 해석, **한국콘크리트학회 논문집**, 제18권, 제4호, pp.479-487
 문도영, 김장호, 김규선, 윤만근, 지광습 (2009) 프리텐션 슬래브 구조에서 긴장강선 용접절단순서에 따른 긴장재 및 콘크리트의 응력변화 고찰, **한국콘크리트학회 논문집**, 제21권, 제4호, pp. 419-429.
 오병환, 김의성 (2000) 프리텐션 프리스트레스트 콘크리트 부재의 전달길이 평가 및 영향 인자 연구, **대한토목학회 논문집**, 제20권, 제6-A호, pp. 945-956.
 오병환, 임시내, 최영철 (2004) 프리텐션 PSC부재의 전달길이 해석 및 예측에 관한 연구, **한국콘크리트학회 논문집**, 제16권, 제3호, pp. 293-302.
 이규세, 윤기용, 김종석, 김용혁 (2011) 프리텐션 방식의 PSC 거더 이동식 제작장치의 개발에 관한 실험적 기초연구, **한국방재학회 논문집**, 제11권, 제6호, pp. 61-66.
 신현목 (2003) **프리스트레스트 콘크리트**, 동명사.
 ABAQUS (2007) Manual & Reference Manual Ver. 6.5-1
 Oh, B.H. and Kim, E.S. (2000) Realistic Evaluation of Transfer Lengths in Prestressed Concrete Members, *ACI Journal*, Vol. 97, No. 6, pp. 821-830.

◎ 논문접수일 : 11년 10월 14일
 ◎ 심사의뢰일 : 11년 10월 14일
 ◎ 심사완료일 : 11년 11월 08일