

PSC 연속 거더교의 연속화부 거동에 관한 해석적 연구

Analysis of the Behaviors of Continuous parts in Continuous PSC Girders Bridges

구민세* 김훈희** 정영도***
Koo, Min-Se Kim, Hun-Hee Jung, Young-Do

ABSTRACT

The PSC 2-span-continuous-bridge by Up-Down Method on construction process is used for this research. It is measured the strain of lower-steel-plate at continuous section on the active range of negative moment at the stage of introducing compressive stress to bottom-plate and compared with results of structural analysis. On the basis of these results, it is confirmed the introduced compressive stress to bottom-plate. The object of this research is presenting the degree of continuity at the stage of lifting up process

1. 서 론

PSC 빔 (Precast prestressed concrete beam girder) 교량은 1950년대 초반 미국에서 처음으로 건설되기 시작했고 1956년 미국의 연방 도로국(Bureau of Public Road)이 AASHTO 거더로 불리우는 표준 단면을 제시함으로써 초기부터 표준화된 주형이 사용되었다. 국내에는 1960년대 말 처음으로 도입되었으며 현재 공용중의 고속도로 콘크리트 교량 중 약 28%가 PSC빔 교량일 정도로 중, 소규모 지간의 교량에 널리 사용되고 있다. 국내에서 주로 사용되고 있는 PSC 주형은 도로공사에서 제시한 표준 주형으로서 AASHTO 주형을 기준으로 국내 실정에 맞게 수정된 형식이다.

주형이 프리캐스트 부재인 만큼 1960년대 전반기까지 PSC 교량은 단순교로 시공되었다. 그러나 단순교는 많은 신축이음으로 인하여 주행 차량의 승차감이 나쁠 뿐 아니라 신축이음을 통한 누수로 인해 주형 단부와 하부구조에 손상이 발생할 수 있고 신축이음자체의 유지관리에 많은 비용이 소요된다. 이러한 문제점을 해결하려는 노력의 일환으로 단순보형으로 제작된 보를 가로보와 바닥판으로 연속처리하는 방법이 사용되어져 왔다. 그러나 이 PSC 연속보 교량의 경우 일정기간 후에 내측 지점의 바닥판 콘크리트에 균열이 발생하여 구조물의 강성 및 내구성이 저하되는 단점이 있고, 특히 콘크리트의 크리프 및 건조수축에 의한 모멘트 재분배가 시간의 경과와 더불어 증가함으로 인해 부모멘트 구간의 바닥판에 균열이 발생하게 되며 결국 이 균열은 구조 역학적으로도 불리한 거동을 유발시킨다. 즉 단순보 또는 단순보에 가까운 거동을 하게 되므로 정모멘트 구간에 큰 모멘트를 발생시키는 물론 처짐 및 진동이 증가하게 되어 사용성과 내구성에 불리한 영향을 준다.

* 정희원, 인하대학교 토목공학과 교수
** 인하대학교 토목공학과 박사과정수료
*** 인하대학교 토목공학과 석사과정

결국 이러한 결점을 보완할 수 있는 PSC 연속보 교량을 개발하기 위해 많은 연구가 진행되었으며 국내에서는 유압잭을 이용하여 부모멘트 구간의 바닥판에 필요한 만큼의 압축력을 도입시킬 수 있는 공법인 지점 하강·상승에 의한 PSC 연속화 공법이 개발되어 시공되어지고 있다. 본 연구에서는 실제 시공 과정에 있는 지점하강·상승에 의한 PSC 2경간 연속보 교량을 대상으로 부모멘트 구간의 바닥판에 압축력을 도입시키는 단계에서 연속부의 하부강판의 변형률을 측정하였고 구조해석의 결과와 비교 검토하였다. 이를 토대로 실제 교량의 부모멘트 구간의 바닥판에 도입되는 압축응력을 예측하고 PSC 연속보의 연속화 거동을 해석하는데 연구의 목적이 있다.

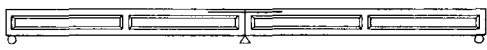

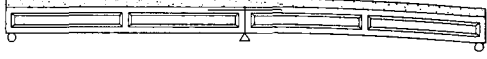
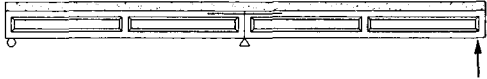
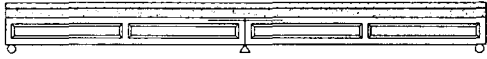
2. 지점하강·상승에 의한 PSC 교량 공법

PSC 연속화 공법의 일안인 지점 하강·상승 공법은 공장 또는 현장에서 제작된 PSC 빔을 단순거치시키고 추가의 철근과 수평연결재를 이용하여 완전 연결시킨 후 외측 교대 지점의 하강 및 상승 과정을 통하여 PSC 빔의 하부에는 2차 압축응력을, 내측 지점부의 바닥판 콘크리트에는 합성후의 인장응력에 대응하는 압축응력을 도입시키고자 하는 시공법이다. 이 공법은 기존 PSC 연속화 공법인 지점 상승·하강 공법의 시공성을 개선한 형태이며 연속 PSC 교량에서 문제시되는 내측 지점에서의 바닥판 균열 및 파손을 감소시키는 데 유리한 특징을 갖고 있다.

PSC 빔의 연속화를 위한 주형간의 길이방향 연결은 합성후 추가의 사하중과 활하중에 대해 발생될 연속 지점부(내측 지점) 주형상단의 휨 인장응력과 주형하단의 휨 압축응력의 제어가 관건이며, 연속 지점부 주형상단에 발생될 휨 인장응력에 대해서는 PSC 빔의 상단에 추가의 철근을 연결하고 빔 전체적으로 수평연결재를 이용하여 주형간의 연결을 도모하여 효과적으로 대응하도록 했다.

지점 하강·상승 공법에 의한 2경간 PSC 연속보 교량은 모두 5단계의 과정으로 시공되며 단계별 과정은 표 1과 같다.

표 1. 2경간 PSC 연속보 교량의 시공과정

제작 단계	시공 과정	개략도
단계 1	빔 거치 및 연결	
단계 2	외측 교대 지점 하강	
단계 3	전 구간 바닥판 타설 및 양생	
단계 4	외측 교대 지점 상승	
단계 5	아스팔트 타설 및 2차 사하중	

(1) 단계 1 : 빔 거치 및 연결

공장 또는 현장에서 미리 주형을 제작하여 양생 후 초기 프리스트레스력을 도입시킨 후 교대 위에 단순치하고 차후에 상단에 발생하는 부모멘트에 의한 인장력에 저항할 수 있도록 내측 지점의 보 상부에 정착길이 이상으로 매설된 철근을 용접하여 연결하는 단계이다. 빔 하부에는 플레이트를 스티드로 접합하여 연결부를 보강하여 시공한다.

(2) 단계 2 : 외측 교대 지점 하강

연결이 완료된 후 외측 교대 지점을 하강시키는 단계로서 빔 하부에 2차 압축력을 도입한다. 여기서 지점을 하강시킬 때는 하부플랜지 콘크리트의 응력이 허용압축응력을 초과하지 않고 상부플랜지 콘크리트의 응력이 인장응력이 발생하지 않는 범위에서 하강량을 결정한다.

(3) 단계 3 : 전 구간 바닥판 타설 및 양생

전 구간에 걸쳐 바닥판을 타설하는 단계로서 바닥판 자중에 의한 초기 손실과 바닥판 자중에 의한 응력을 고려한다.

(4) 단계 4 : 외측 교대 지점 상승

바닥판이 양생된 후 지점을 상승시키는 단계로서 연속 지점부 바닥판 상부 및 주형 상부에 압축력 도입이 도입된다. 바닥판 콘크리트에는 약 $30\sim60\text{ kgf/cm}^2$ 의 압축응력이 도입된다.

(5) 단계 5 : 아스팔트 타설 및 2차 사하중

아스팔트 타설 및 추가의 작업을 마무리한다.

3. 현장실험

3.1. 실험대상의 제원 및 실험방법

측정에 사용된 대상교량은 지점 하강·상승 공법을 이용한 총 지간장 42.2m 인 2경간 연속교이며, 주형 단면은 내측지점을 중심으로 역대칭을 이루고 있다. 측정된 두 개의 교량에 대해 이하 B1, B2라 명칭한다.

그림 1은 내측 지점부의 연속화부에 대한 상세도를 보여준다. 빔 상단에는 연결철근의 배치하여 인장력에 대응하였고 하단에는 소울판을 교좌장치 상판과 용접하였다. 표 2는 현장실험에 사용된 장비를 보여준다. Strain Gage는 Steel Gage를 사용하였으며 게이지의 부착은 마킹, 그라인더 작업 후 실시하였고 그 위치는 연결부의 소울판에 부착하였다.

표 2. 현장실험 장비

실험장비	규격	사용목적
Data Logger	UCAM 70A 30-Channel	Data 획득
Strain Gage	5mm	하부강관의 변형을 측정
유압잭	Stroke 100m/m, 100ton	외측 지점 상승

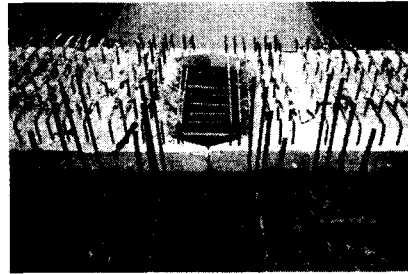
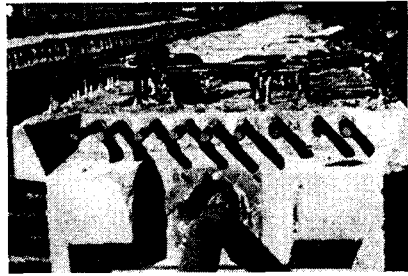
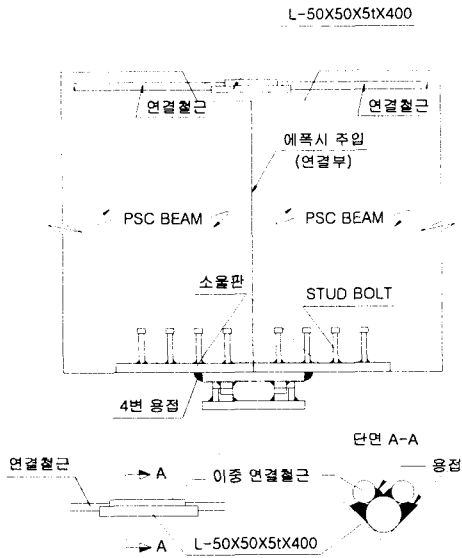


그림 1. 대상교량의 연속화부 상세

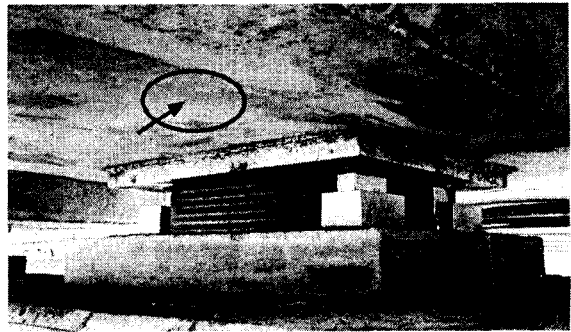
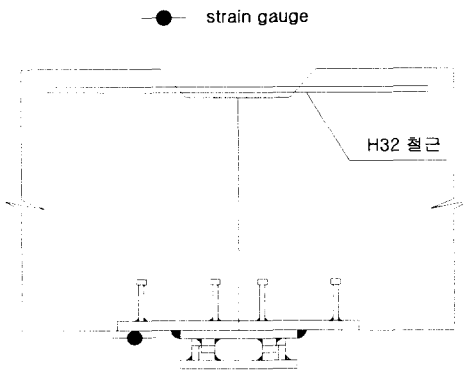
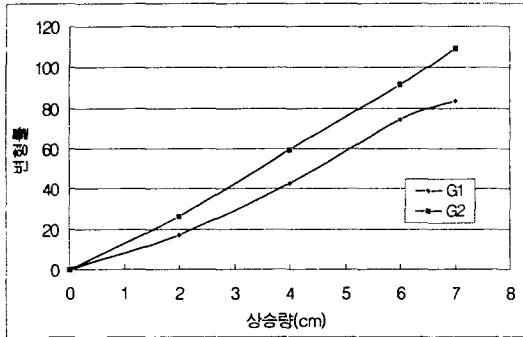


그림 2. 게이지 부착위치

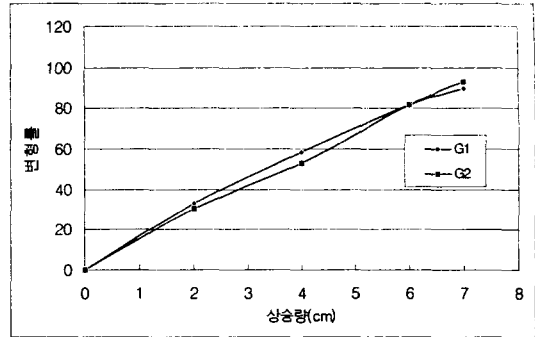
실험 방법은 Gage의 부착과 UCAM에 케이블연결이 끝난 후 외측 교대 지점에 유압잭을 설치하고 7cm까지 상승시키면서 하부강판의 변형률을 측정하였다. 지점 상승시 부모멘트 구간의 바닥판에 압축응력을 산정하기 위하여 하부강판의 변형률을 측정하였다. 그림 2는 소울판의 게이지 부착위치를 보여준다.

3.2 실험결과

그림 3은 상승량에 따른 측정된 변형률의 변화정도를 나타낸다. 여기서 변형률 게이지의 값은 단위가 μ 이며 분석과정은 응력으로 환산하여 계산하였다.



(a) B1 측정결과



(b) B2 측정결과

그림 3. 상승량에 따른 변형률

대상 교량에 대하여 모든 거더에 대해 측정하였으며 측정값이 크게 문제가 있는 것으로 분석된 값은 해석에서 제외하였다. 측정값들은 최대 상승량 7cm까지 선형적인 추세로 변형률이 증가하며 유사한 거동을 함을 확인할 수 있다. 측정된 실험결과를 분석하면 대상교량 B1, B2 모두 동일한 거동을 보였으며 결과를 통하여 연속화가 유지됨을 확인할 수 있다.

4. 구조해석 및 분석

4.1 개요

본 연구에서는 연속부의 연속화 거동을 파악하고 바닥판에 도입되는 압축응력을 예측하기 위해 구조해석을 수행하였다. 대상교량의 거더를 Solid요소와 Frame요소를 사용하여 모델링하였으며 구조해석에는 상용 프로그램인 MIDAS/CIVIL을 사용하였다.

표 3은 구조해석을 수행하기 위해 적용한 재료상수를 보여준다.

표 3. 구조해석에 사용된 재료상수

분류 \ 재료상수	해석 요소	단위중량(kg/cm ³)	탄성계수(kg/cm ²)	프와송비
거더 콘크리트	Solid	0.0025	3.0717e+5	0.18
바닥판 콘크리트	Solid	0.0025	3.0717e+5	0.18
하부장판	Solid	0.00785	2.1e+6	0.3
연결장판	Solid	0.00785	2.1e+6	0.3
연결철근	Frame	0.00785	2.1e+6	0.3

표 4는 구조해석에 사용되는 모델링 매쉬의 적절성을 보여준다. Solid 요소는 요소수, 형상비 등에 따라 정확도의 차이가 나타나기 때문에 제시된 연결지점부를 고려하지 않은 2경간 완전연속보를 구조해석에 사용될 mash로 모델링하여 등분포하중하에서 이론값과 비교하였다. 검토 결과 구조해석에 사용되는 요소수와 형상비가 적절하다고 판단된다.

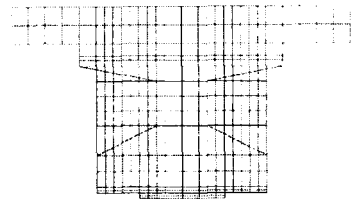
표 4. 요소수 및 형상비 검토

등분포하중 (ton/m)	정모멘트(ton · m)		부모멘트(ton · m)		최대 처짐(cm)	
	이론값	모델링	이론값	모델링	이론값	모델링
1	30.128	29.890	53.561	54.198	0.399	0.399
2	60.256	59.780	107.123	108.400	0.799	0.797
3	90.385	89.669	160.684	162.59	1.198	1.196
4	120.513	119.56	214.245	216.79	1.597	1.595
5	150.641	149.45	267.806	270.99	1.996	1.993

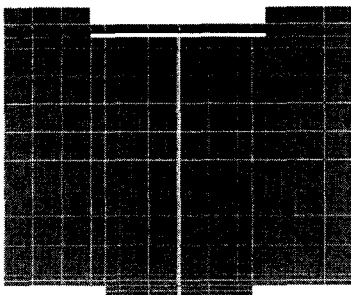
그림 4는 해석에 사용된 모델을 도식화하여 보여준다. 그림 4(a)와 그림 4(b)는 전체적인 모델 형상을 나타내며 그림 4(c)와 그림 4(d)는 제시된 방법으로 연속화된 연결부 형상을 보여준다.



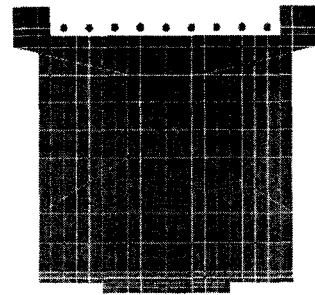
(a) iso direction 모델링 형상



(b) front direction 모델링 형상



(c) 연속화부 모델링 형상(측면부)



(d) 연속화부 모델링 형상(정면부)

그림 4. 구조해석 모델링

4.2 해석결과 및 분석

연속화부에 대한 구조해석 모델의 적정성을 판단하기 위하여 해석된 결과를 분석하고 실험결과와 비교하여 그림 5에 나타내었다. 실제 실험에 의한 B1, B2의 측정치와 구조해석에 의한 결과치를 비교 분석하여 볼 때 유사한 거동을 보이며 전체적으로 약 1.5%의 차이가 발생됨을 확인할 수 있고 제안된 구조 모델이 실제 구조물의 거동과 비슷하게 적용되었음을 알 수 있다.

그림 6은 실제 교량의 바닥판의 압축응력 도입정도를 예측하고 판단하기 위하여 구조해석에 의해 계산된 값과 완전 연속인 경우의 해석결과를 비교하여 나타내었다. 완전 연속일 경우의 바닥판 압축응력 도입량 보다 구조해석에 의한 바닥판 압축응력 도입량이 최소 5%에서 최대 9%정도 작게 도입됨을 알 수 있다. 이론적으로 본 실험 대상교량인 B1, B2는 완전 연속이 되었음을 가정하여 볼 때 미소한 차이가 있음을 알 수 있으며 값의 차이가 일어나는 원인은 적은 값이지만 소울판의 전단연결재의 슬립현상이나 연결철근의 인발현상 및 시공상의 오차등으로 발생된 것으로 추정되며 본 현상은 추후에 연구되어질 문제이며 본 논문에서는 언급하지 않았다.

그림 7은 구조해석 모델링에 등분포 하중을 1ton/m²에서 10ton/m²까지 재하 하여가며 최대 부모멘트, 최대 정모멘트의 변화를 완전 연속 2경간 연속보의 이론값과 비교하였다. 분석하여 볼 때 모델링에 의한 결과값이 완전 연속의 경우보다 부모멘트에서 4%정도 크게 해석되었고 정모멘트에서는 3% 정도 작게 해석되었고 이는 상승 작업시 연속보가 완전 연속과 유사한 거동을 함을 예측할 수 있다.

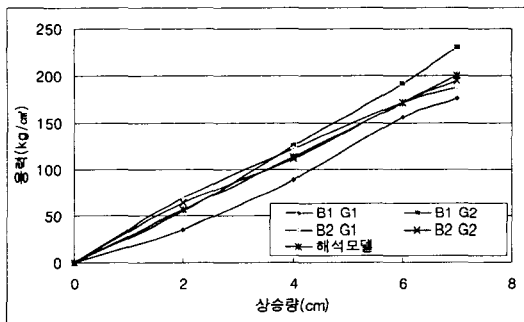


그림 5. 구조해석과 실험치 비교

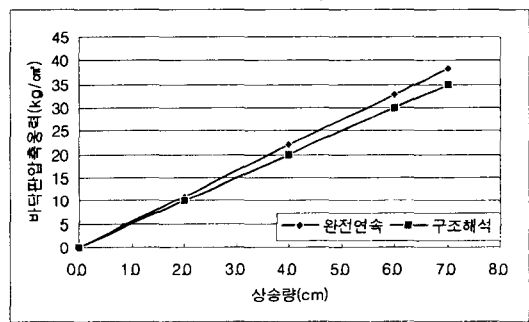
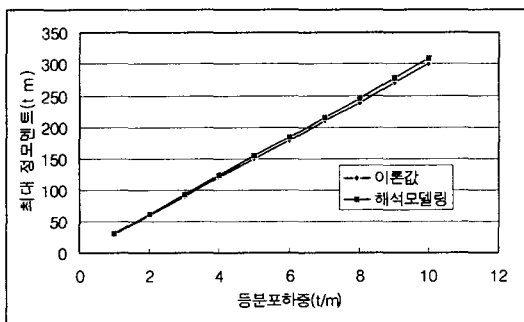
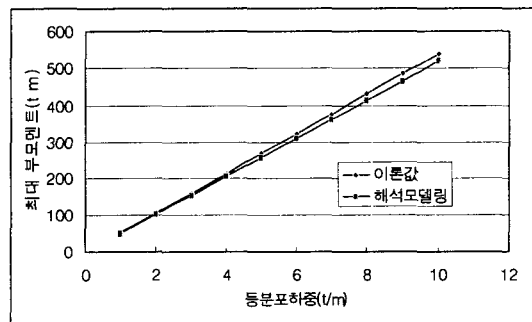


그림 6. 바닥판에 도입되는 압축응력



(a) 정모멘트



(b) 부모멘트

그림 7. 완전연속보의 거동과 구조해석에 사용된 보의 거동

5. 결론

본 연구에서는 지점 하강·상승 공법을 이용한 2경간 연속 PSC빔 교량을 대상으로 상승과정시 바닥판에 도입되는 압축응력과 연속부의 연속화 거동에 대하여 실험 및 해석을 통하여 분석하였다. 실험에서 얻은 측정치와 구조해석을 통한 유한요소 해석치를 비교함으로써 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 제시된 방법으로 연속화된 교량은 측정된 실험결과를 분석하여 볼 때 대상교량 B1, B2 모두 동일한 거동을 보였으며 어느 정도의 상승량까지는 연속화가 유지됨을 확인할 수 있다.
2. 본 연구에서 제시된 모델의 거동은 PSC 연속화 교량에 사용된 교량연속화부와 유사한 거동을 보이도록 적절하게 모델이 구현되었음을 실험 결과와 비교하여 알 수 있다.
3. 구조해석결과 완전 연속 해석의 경우보다 바닥판에 도입되는 압축응력이 최대 9%정도 감소됨을 확인하였다. 감소의 원인은 적은 값으로 소울판의 전단연결재의 슬립현상이나 연결철근의 인발현상 및 시공상의 오차등으로 발생된 것으로 추정되며 본 현상은 추후에 연구가 진행될 것이다.
4. 동일한 등분포하중을 가한 완전 연속모델과 구조해석 모델의 연속거동을 비교한 결과 구조해석 모델의 결과치가 부모멘트에서 4%정도의 감소를 보였고 정모멘트에서는 3% 정도의 증가를 보여주었다. 따라서 본 연구 대상교량의 주형간의 길이 방향 연결방법은 완전 연속과 유사한 거동을 하는 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 김경수, (1999), “지점 상승·하강에 의한 2경간 연속 P.S.C 합성보의 Prestressing 효과에 관한 연구.” 인하대학교 공학석사 학위논문.
2. 김민관(2000), “지점 상승·하강에 의한 3경간 연속 PSC 교량의 개발.” 인하대학교 공학석사 학위논문.
3. 신현목(2000), 프리스트레스트 콘크리트, 동명사.
4. 한국도로공사 도로연구소, (1999). “P.S.C Beam교의 연속화 방안에 관한 연구.” 도로연 99-47-30.
5. Basile G.Rabbat , Henry G.Russell, (1982), “Optimized Sections for Precast Prestressed Bridge Girders.” Journal of the Prestressed Concrete Institute, pp.88~104.
6. Robert J.Peterman, Julio A.Ramirez, (1998), “Restraint Moments in Bridges with Full-Span Prestressed Concrete Form Panels.” Journal of the Prestressed Concrete Institute, pp.54~73.
7. MIDAS 프로그램 메뉴얼