

보강강판을 이용한 연속 PSC 교량 공법에 관한 연구

A Study of continuous PSC bridge with a reinforcement steel plate

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

ABSTRACT

It is limited to decrease height or section even by system conversion to indeterminate structure - continuous beam - in existing PSC girder bridges. In this study, the movement of connection is analyzed through actual field test, by increasing stiffness of negative moment area in continuous PSC bridge and developing continuous PSC bridge with embedded steel plate, that can overcome the demerit of existing connection. As a result, it is confirmed that the body unification of the connection is being realized and maintained. Moreover, the height of a span is suggested in continuous PSC girder bridge with embedded steel plate by computational analysis

1. 서 론

프리스트레스트 콘크리트(Prestressed concrete : 이하 PSC) 부재는 1950년대 초 처음으로 미국에서 시작되어 1960년에 국내에 처음으로 도입되었다. 철근 콘크리트 부재가 지니는 균열발생 제어 문제 및 그에 따른 철근의 부식·누수 등 내구성에 미치는 약점을 보완할 수 있는 장점과 부재 단면을 작게 할 수 있는 장점 및 부재 단면을 작게 할 수 있는 효율성 등의 장점을 가지고 있다. 또한 시공이 간편하고 경제적이어서 현재 국내 콘크리트 교량의 대부분을 차지하고 있을 정도로 중, 소규모 지간의 교량에 널리 사용되고 있다.

현재의 도로공사에서 제시되어 사용되고 있는 PSC 거더교는 대부분이 단순교 형식에 국한되어 있으며 다경간 교량으로 시공될 때에는 보와 보의 연결부를 신축이음장치로 처리하여 시공하였다. 이러한 시공법은 부재의 형고의 증가로 인하여 형하공간 확보에 불리하며 교차장치의 개소가 많이 요구되며 신축이음부에서의 충격으로 인해 차량의 주행감을 저하시키고 교량의 열화현상 촉진 및 신축이음부를 통한 누수 등 지속적인 보수 및 유지관리를 필요로 하는 단점을 가지고 있다. 신축이음부의 문제점을 해결할 수 있는 방법 중의 하나로 단순보 형식으로 제작된 PSC 거더를 가로보와 바닥판만으로 연속 처리하여 시공하는 방법(활하중 연속형 거더교)이며 이 시공법은 콘크리트의 크리프 및 건조수축에 의한 시간에 따른 모멘트 재분배로 인하여 부모멘트 구간의 바닥판에 균열을 야기시킬 수 있으며 실제 설계시에도 부모멘트 발생 구간의 균열을 허용하고 있다. 더욱이 이러한 균열은 설계된 연속형 교량을 단순보 또는 단순보에 가까운 거동을 하게 함으로써 정모멘트 구간에 과도한 모멘트를 발생시킴은 물론 처짐 및 진동이 증가하게 되어 사용성과 내구성에 불리

* 정희원, 인하대학교 토목공학과 교수

** 인하대학교 토목공학과 박사과정수료

*** 인하대학교 토목공학과 박사과정

한 영향을 미칠 수 있다.

결국 이러한 단점을 보완할 수 있는 PSC 거더교를 개발하기 위해 많은 연구가 진행 중에 있으며 국내에서는 PSC 거더를 이용한 다수의 신기술 교량이 개발되었다.

2. PSC 거더교의 신기술 개발 동향

최근에 주로 사용하고 있는 가로보와 바닥판만으로 연속 처리하는 활하중 연속형 PSC 거더교의 경우는 프리캐스트 부재가 연속부에서 구속되어 지점에 구속모멘트가 발생된다. 이러한 구속모멘트는 사하중과 프리스트레스에 의한 크리프, 현장타설 바닥판과 거더의 건조수축차, 긴장재의 손실, 인접지점에 작용하는 충격을 포함한 활하중 및 온도변화 등에 의해서 발생한다. 따라서 각 국가별로 <그림 1>과 같은 연결부 상세 기준을 제시하여 지점에 발생하는 정, 부모멘트에 효율적으로 저항하고 교량의 공용기간 동안 충분한 내하력을 확보하게 하고 있다. 각각의 연결부 상세를 설명하면 다음과 같다.

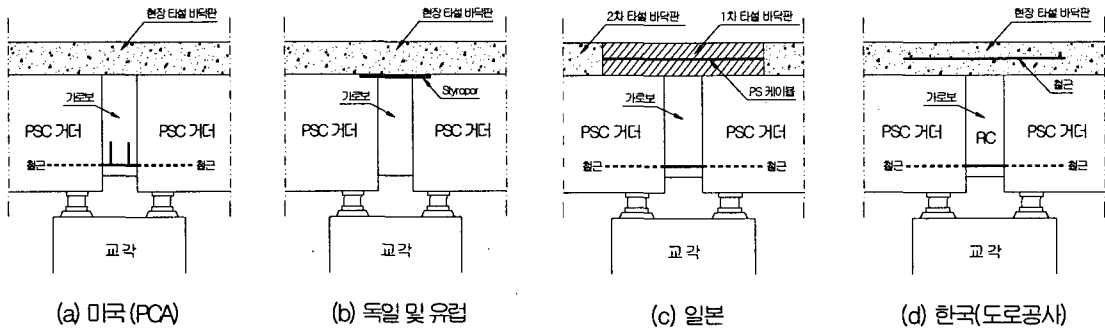


그림 1. 국가별 PSC 거더교의 연결부 상세도

<그림 1 (a)>는 PCA에서 제시한 연결부 상세도로서 양쪽 인접한 보에 철근을 미리 매입하고 보를 제작한 후 갈고리 형태로 연결하여 가로보를 타설하고 바닥판을 타설하는 것이 특징이다. PCA에서는 이 철근의 설계방법을 상세히 설명하고 있지만 최근 TRB의 연구 결과에 의하면 PCA 설계방법에 따라 설계된 연결부는 현장에서 시공하기 어렵고, 많은 시간이 소요되며 또한 그 효과에 대해서 의문이 제기되고 있다.

<그림 1 (b)>는 1978년 제정된 “PS 콘크리트 및 RC로 된 프리캐스트 거더교에 관한 잠정지침서”에 소개된 콘크리트 탄성 연결 바닥판의 상세도이다. 먼저 PSC 거더를 가설하고 거더와 바닥판 사이에 Styropor를 삽입하고 난 후에 바닥판 콘크리트를 타설한다. 이것은 주로 독일을 중심으로 한 유럽지역에서 많이 사용하는 설계방법으로 이미 설치된 연결부의 내구성을 조사하기 위해 10년 이상 경과된 몇 개소의 포장을 제거하여 그 상태를 조사하였으나 전혀 균열이나 그 밖의 결함도 발견되지 않았음이 보고된 바 있다. 그러나 이 연결부 설계는 거의 단순보와 같은 상태로 거동하기 때문에 연속교의 거동을 나타내지 못하고 또한 형고 및 단면의 감소도 기대하기 어려운 연결 방법이다.

<그림 1 (c)>는 일본에서 시공되고 있는 사례로 PSC 거더를 가설하고 1차 바닥판 부분을 타설한 후에 바닥판 PS 케이블을 긴장한 후 2차 바닥판을 타설하는 방법이다. 그러나 이 방법은 긴장재의 정착구가 바닥판에 매설되므로 바닥판이 마모되거나 균열에 의해 긴장력이 손실되는 문제점이 내포하고 있는 것으로 알려진 공법이다. 또한 바닥판 PS 케이블 긴장재 배치 및 긴장 작업시 번거로운 과정을 거쳐야 하는 단점이 있다.

<그림 1 (d)>는 현재 국내의 연결 형태로 PSC 거더를 가설한 후 바닥판 및 부모멘트 보강철근을 배근하고 바닥판 및 연결부 콘크리트를 타설하는 방법이나 이는 모멘트의 재분배를 전혀 고려하지 않고 설계하며 균열이 발생하여 연속형 교량의 거동을 전혀 발휘하지 못하는 연결방법이다.

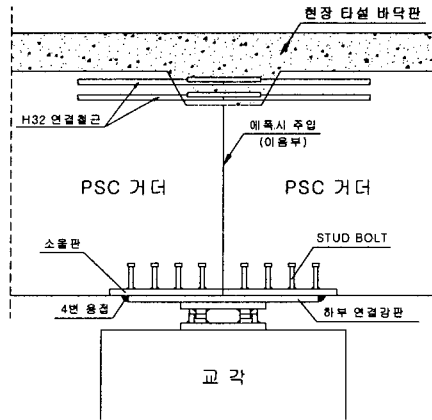


그림 2. 국내 신기술 UDPSC 거더교의 연속 연결부 상세도

<그림 2>는 내측지점의 상승·하강을 이용한 연속 PSC 거더 (UDPSC : Up Down Prestressed Concrete Girder)에 대한 것으로 PSC 거더와 거더를 완전 연결하여 연속교로의 거동을 원활히 발휘할 수 있도록 개발된 방법으로 연속 지점부에 있어서 상부는 연결철근끼리의 플래어용접 연결로 거더 상승시의 인장력과 하강시의 압축력을, 하부는 소울플레이트와 접합 설치된 연결플레이트를 필렛용접 연결로 상승시의 압축력과 하강시의 인장력에 저항하도록 하였으며, 상부플랜지로부터 복부 하단까지는 교축직각 방향으로 설치된 약 1.2m 두께의 가로보에 의해서 각각의 거더를 연결하여 전단력에 대응토록 하였다. 또한 연결부 거더와 거더 사이의 틈새는 에폭시의 주입으로 매움으로써 활하중 시의 진동에 의한 연결 용접부에 발생하는 피로 손상을 방지하고자 한 방법이다. 상기의 연결 방법에 의해 시공된 연속 PSC 거더교는 연결부에 어떠한 균열이나 결함이 발견되지 않았으며 교량의 내하력도 충분히 설계 내하력을 발휘하는 것으로 나타나 완전 연속된 PSC 거더교로서 그의 적용이 활발히 이루어지고 있다. 그러나 상기의 연결 방법은 지간이 긴 거더의 경우 연결부에 필요한 상부 연결철근이 과다해지는 관계로 연결부의 용접 작업 등 시공이 까다로워지고 조잡하다는 문제점을 가진다.

3. 보강강판을 이용한 연속 PSC 교량 공법의 개발

지금까지 사용되어 온 PSC 거더교는 콘크리트와 압축력 도입을 위한 강선만으로 이루어진 콘크리트교로서 연속교와 같은 부정정 구조물로의 시스템 전환으로도 형고 또는 단면의 감소에는 그 한계가 있다. 따라서 강재와 콘크리트의 합성 효과로 인하여 단면의 형고를 대폭 줄일 수 있는 프리플렉스 거더교와 같이 PSC 거더교에도 강재를 매설하여 콘크리트와 합성을 시킨다면 연속교로의 시스템 전환과 더불어 형고 또는 단면의 감소도 추가로 시킬 수 있다. 그러나 프리플렉스 거더교와 같이 강재를 거더의 전단면에 적용시킨다면 PSC 거더교의 상대적 장점인 저렴한 공사비를 유지할 수 없으므로 구조적으로 필요한 구간에만 강재를 매설하여 경제성은 유지시킨다. <그림 3>은 일례로서 2경간 연속교의 시스템에서 등분포하중에 의해 발생하는 모멘트도를 나타낸 것이다. 연속교에서 정모멘트에 비해서 상대적으로 큰모멘트가 발생하는 부모멘트 구간에 강재를 매설하여 강성을 제고시키면 정모멘트 구간에 발생하는 에너지까지를 흡수하여 전체 교량의 형고를 보다 낮출 수 있다.

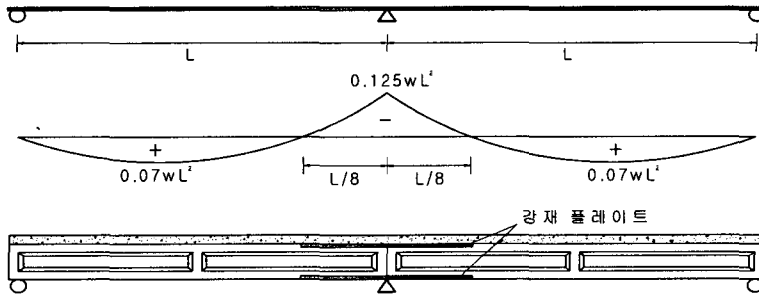


그림 3. 2경간 연속교의 모멘트도 및 강재 플레이트 매설도

상기 <그림 3>과 같이 강성 보강을 위한 부모멘트 구간에 강재 플레이트를 매설하게 되면 <그림 2>와 같은 연결부의 단점도 보완할 수 있는 장점을 추가로 가진다.

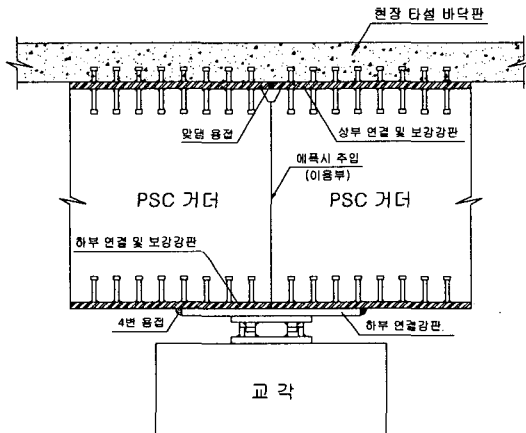


그림 4. 보강강판을 이용한 연속 PSC 거더교의 연결부 상세도

<그림 4>의 연결 방법은 <그림 2>의 연결 방법에서 PSC 거더의 상부플랜지에 매설된 다량의 연결 철근 대신에 강재 플레이트로 대체한 것임을 알 수 있다. 이 방법은 UDPSC 공법과 같이 상승 및 하강을 통하여 바닥판에 압축력을 도입하는 공법으로 부모멘트 구간의 일부분의 상하부에 보강강판을 매설하여 거더의 연결을 용이하게 하고 부모멘트 구간의 거더의 강성을 크게 하여 부모멘트 구간의 바닥판 및 거더에 발생하는 응력을 감소시키는 방법이다.

보강강판을 이용한 연속 PSC 거더교의 시공방법은 <그림 5>와 같다. 연속교의 시스템 특성상 합성 후 내측지점부의 바닥판 콘크리트에 발생하는 인장력은 내측지점의 상승 및 하강을 이용하여 압축력을 도입시킨다. <그림 5 (a)>는 제작된 PSC 거더를 교대 및 교각상에 거치시킨 후 <그림 4>와 같이 거더와 거더를 내측지점에서 완전히 연결하는 공정에 대한 것이다. 이때 거더의 거치는 교대 및 교각의 교좌장치가 완전히 설치된 뒤에 실시한다. <그림 5 (b)>는 내측지점을 상승시키는 공정에 대한 것으로서 PSC 거더와 거더를 완전히 연결한 후 작업이 이루어지며 PSC 거더의 제작 후 거치시까지 거더의 하부플랜지 콘크리트에서 발생하는 압축력의 손실과 추후 내측지점의 하강시 하부플랜지 콘크리트에서 발생하는 인장력에 대응하는 압축력을 도입시키기 위함이다. 이때의 상승량은 PSC 거더의 하부플랜지 콘크리트와 이에 매설한 보강강판이 허용압축응력을 초과하지 않고, 상부플랜지 콘크리트 및 이에 매설한 보강강판이 허용인장응력을 초과하지 않

는 범위에서 결정된다. <그림 5 (c)>는 상승이 완료된 후 바닥판 콘크리트를 타설하는 과정이며 <그림 5 (d)>에서 하강작업을 통하여 추후에 2차 고정하중 및 활하중에 의해 발생하는 응력에 대응하기 위하여 부모멘트구간의 바닥판에 압축력을 도입시키는 과정이다.

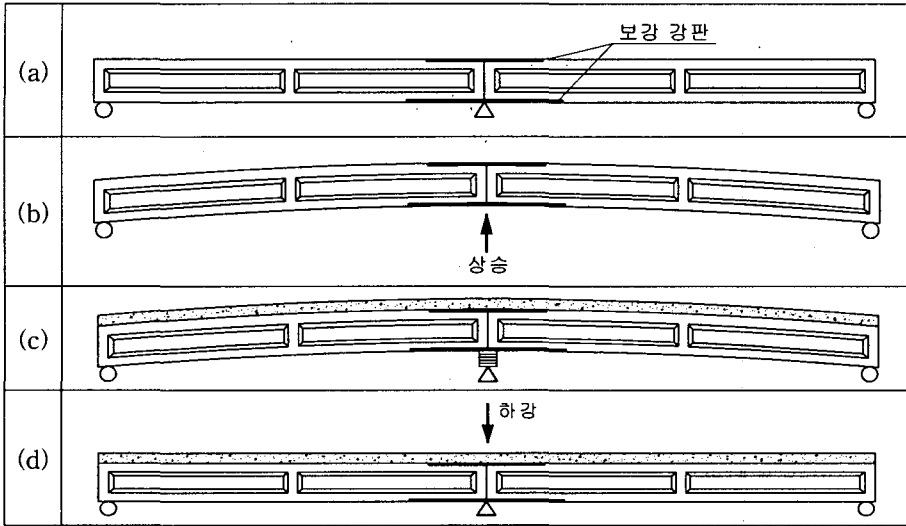


그림 5. 보강강판을 이용한 2경간 연속 PSC 거더교의 시공순서

4. 연결부의 거동 실험

4.1 실험 방법

보강강판을 이용한 연속 PSC 거더교에 적용된 연결부에서 가장 주목해야 할 점은 PSC 거더와 상부 보강강판과의 합성문제이다. 기존의 연결방법은 연결철근이 PSC 거더의 상부플랜지에 일정 피복두께를 가지고 매설되어 있어 그의 합성 작용은 의심할 여지가 없으나 이 논문에서의 연결방법은 보강강판을 PSC 거더의 상부플랜지에 얹어 놓는 형태로 스테드만에 의해서 합성을 시켜야 함으로 그의 합성 작용을 실험에 의해 검증해 볼 필요가 있다.

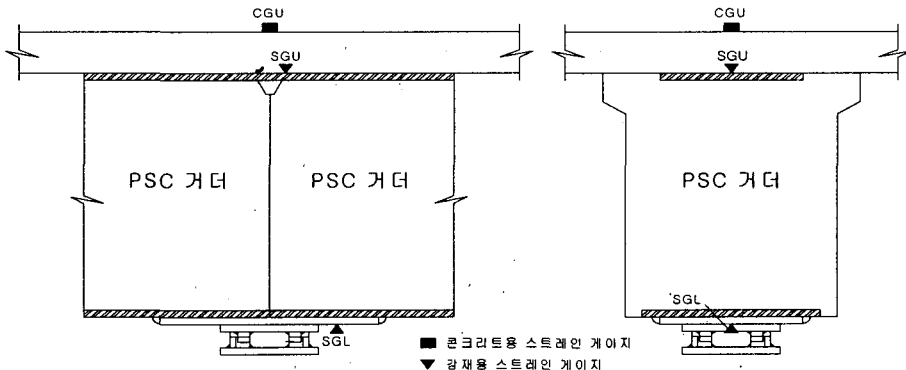


그림 6. 보강강판을 이용한 연결부 실험 게이지 부착위치

이 논문에서는 제시된 연결방법이 적용된 전남 광양시에 위치한 38m 2경간 연속교(L=2@38=76m)인 흑룡교의 연결부에 대해 <그림 6> 과 같이 계측용 스트레인 게이지를 부착하고 시공 중 변형률을 측정하여 이론치와의 비교를 통해 그 합성 효과를 검증하였다. <그림 7>은 시험 과정 사진을 보여준다.

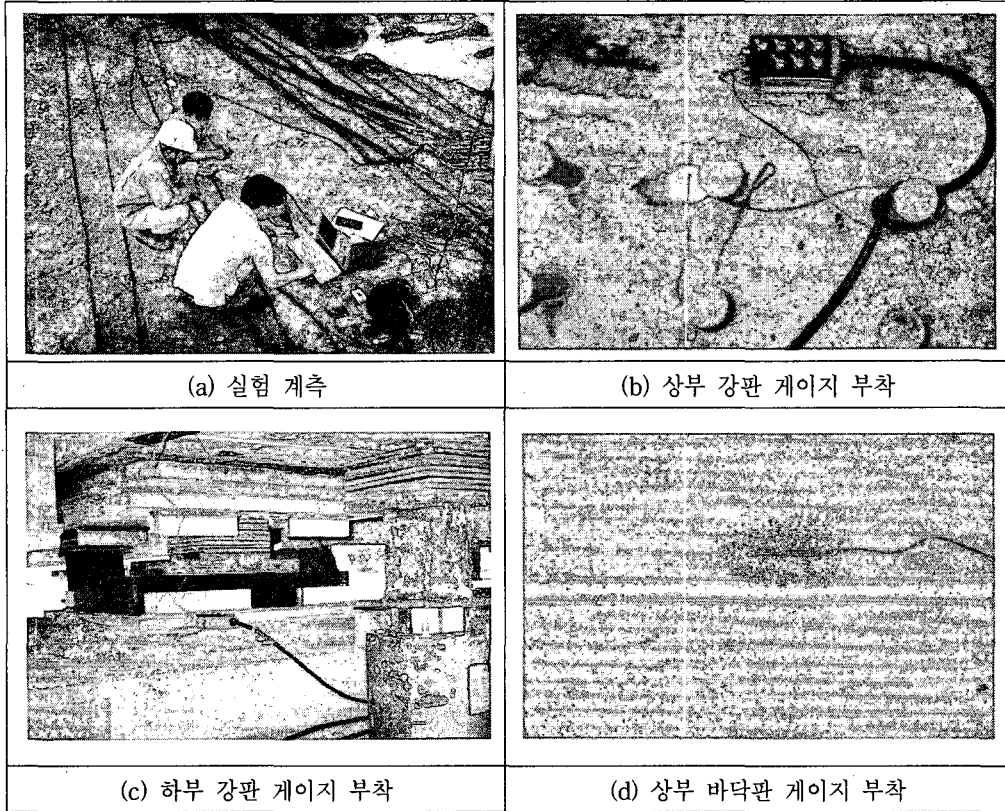


그림 7. 보강강판을 이용한 연속 PSC 거더교의 연결부 실험

변형률의 계측은 연결부에 가장 큰 부담이 작용하는 내측지점의 상승시와 하강시에 실시하였다. 즉, 상부 및 하부 보강강판에 의해 연결된 거더는 교량의 공용 중 발생할 수 있는 인장응력 및 압축응력을 내측지점의 상승과 하강으로 사전 재하시험을 거치게 되므로 거더의 안전성을 미리 검사할 수 있기 때문이다.

<표 1>은 사용된 실험장비 목록을 보여준다.

표 1. 현장실험 장비

실험장비	규격	사용목적
Data Logger	UCAM 70A 30-Channel	Data 획득
Steel Strain Gage	5mm	보강강판변형률 측정
Concrete Strain Gage	80mm	바닥판변형률 측정
유압잭	Stroke 100m/m, 100ton	외측 지점 상승

4.2 실험결과

현장실험에 의한 측정 결과를 <표 2>에 나타내었다. <표 2>에서 알 수 있듯이 내측지점의 상승 및 바닥판과의 합성 후 하강시의 강판 및 바닥판 콘크리트에서 발생하는 변형률이 현장 실험이라는 불리한 여건에서도 이론치와 최대 약 8.6%의 오차를 보여 PSC 거더와 강판은 충분한 합성이 이루어진 것으로 판단된다.

표 2. 후룡교 계측 변형률

시공단계	게이지	변형률		
		이론치	실측치	비율(%)
상승시 (120mm)	SGU	254.4	252.2	99.1
	SGL	-93.0	-85.0	91.4
하강시 (150mm)	CGU	-190.3	-182.0	95.6
	SGL	158.5	146.4	92.4

5. 보강강판을 이용한 연속 PSC 거더교의 제안단면

연결부를 이 논문에서 제시한 방법으로 연속 PSC 거더교에 적용한 제안 단면은 플로리다주 정부의 주도로 개발되어 형고를 줄이는 대신에 상부플랜지의 폭을 넓혀 주로 프리텐션 공법을 위해 만들어진 FDOT 단면을 다소 변형하여 적용하였다. 이에 각 지간 길이에 따른 표준단면을 <그림 8>에, <표 3>에 각 지간 길이에 따른 형고를 현재 한국도로공사에서 적용하고 있는 표준단면과 기존의 철근 연결 방법으로 제안된 단면과 비교하여 제시하였다. 매개변수해석은 실제 시공과정을 고려하여 상용프로그램인 SAP2000을 이용하여 격자해석 모델로 시행하였으며 각 2경간 및 3경간에서 지간길이별로 해석하였다.

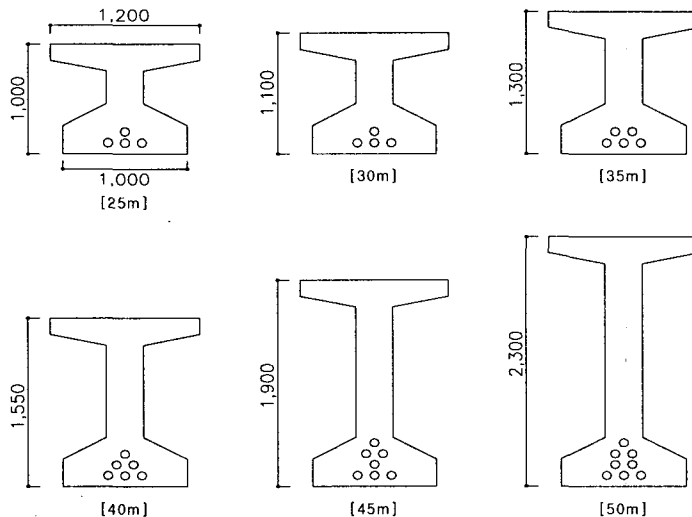


그림 8. 보강강판을 이용한 연속 PSC 거더교의 제안단면(단위:m)

표 3. 보강강판을 이용한 연속 PSC 거더교의 지간별 제안 표준형고(단위:m)

지간	보강강판 표준형고	철근연결 표준형고	도로공사 표준형고
20	0.80	0.90	
25	1.00	1.10	1.75
30	1.10	1.30	2.00
35	1.30	1.50	2.30
40	1.55	1.80	
45	1.90	2.20	
50	2.30	2.50	

6. 결론

이 연구에서는 보강강판을 이용한 연속 PSC 거더교를 개발하고 현장실험을 통하여 연결부의 거동을 분석하였다. 그리고 매개변수 해석을 통하여 지간별 형고를 제안하였다.

1. 현장실험 결과 이론치와 최대 약 8.6%의 오차를 보여 보강강판을 이용한 연속 PSC 거더교의 연결부의 연속화가 유지되고 있음을 예상할 수 있다.
2. 매개변수 해석을 통하여 제안된 지간별 형고는 철근연결 표준형고에 대하여 최대 15%의 형고감소효과를 보이고 도로공사 표준형고에 대해서는 최대 45%의 형고감소 효과를 보이고 있다. 따라서 개발된 보강강판을 이용한 연속 PSC 거더교는 신설 교량의 접속고 및 형하공간의 제약으로 낮은 형고의 합성형고에 대한 설계 및 시공이 필요한 경우에 효과적이다.

참고문헌

1. Allouche, Frez N. Green, Mark F., and Soudki, Khaled A. and Scordelis A. "Tendon stress in continuous unbonded prestressed concrete members." Journal of the Prestressed Concrete Institute, Vol.43, 1998, pp.86~93.
2. Meir, Joseffa V., and Ramirez, Julio A. "Alternative to the current AASHTO standard bridge sections." Journal of the Prestressed Concrete Institute, Vol.42, 1997, pp.56~66.
3. Robert J. Peterman and Julio A. Ramirez "Restraint Moments in Bridges with Full-Span Prestressed Concrete Form Panels." Journal of the Prestressed Concrete Institute, Vol.43, No 1, Jan.-Feb. 1998, pp.54~73.
4. ACI Committee 435, "Deflections of Prestressed Concrete Members." American Concrete Institute, 1989, Detroit.
5. 정영도, "2경간 연속 P.S.C 합성거더의 연결부 거동", 공학석사 학위논문, 2003. 인하대학교
6. 한국건설기술연구원, "프리캐스트 PS 콘크리트 교량의 설계에 관한 연구", 1992.
7. 신현목, "프리스트레스트 콘크리트", 1992. 동명사