

V자형 배치 외부강선을 이용한 PSC I거더교의 보강 효과

백승철¹, 송재호^{2*}, 김행배³, 김석수⁴

Reinforcement Effects using V Type External Strands on PSC I Girder Bridges

Seung-Chul Back¹, Jae-Ho Song^{2*}, Haeng-Bae Kim³, Suk-Su Kim⁴

Abstract: This study intended to analyze reinforcement effects of PSC I girder bridges to which prestresses are introduced using V type of external strands. So that series of bridge loading tests are carried out on existing PSC I girder bridge for the cases of before-reinforcement and reinforcement. The measured results from tests being analyzed and compared with the ones from MIDAS structural analyzing program, the reinforcing effects of the reinforcement system adopted in this study were investigated. It is found out that when the V type systems are applied to the bridge girders, the slope of load distribution factor curves become lower improving soundness of bridge upper structure. And also it is confirmed that the reinforcement system in this study can be taken as helpful for improvement of both flexural and shear ability of PSC I girder bridges, as well as dynamic behavior. Furthermore it is found when the elastic pads are applied to the system, dynamic reinforcing effects are maximized.

Keywords: PSC I girder bridges, Loading tests, MIDAS, Elastic pad, Flexural and shear ability, Dynamic behavior

1. 서 론

1.1 연구의 배경 및 목적

1960년대 이후 시공된 국내의 많은 교량들은 오랜 시간이 경과하여 노후화되고, 설계 당시와는 다른 하중이 작용하여 구조물 자체의 내하력이 상당히 저하된 것들이 많은 실정이다. 특히 경제성장에 따라 통행량이 급증하면서 통과하중의 증가 현상이 노후화된 기존 구조물의 내하력을 손상시키는 주원인이 되고 있다. 이러한 배경에서 볼 때 보수보강 재료 및 공법의 개발은 이러한 사회 간접자본을 보호하여 사용성을 연장시켜 줄 뿐만 아니라, 보수보강 구조물에 대한 불신을 해소시켜 공공시설에 대한 안전이라는 신뢰성을 확보할 수 있다는 공공성 차원에서 볼 때 극히 중요하다.

국내에서는 PSC I거더교에 대한 보강 방안의 하나로서 거더에 외부강선을 거치하여 프리스트레스를 도입하므로써 거더의 휨강성을 증대시켜서 교량 상부구조 전체의 내하력을

향상시키는 보강방법이 널리 시행되고 있다. 외부강선을 이용한 PSC I거더교의 보강방법은 거더 단면의 치수를 증가시키지 않고 보강이 이루어지게 되고, 강선의 선형이 단순하여 보강 시공이 간편하고, PSC I거더교의 신설 시 수반되는 텐던 그라우팅 등의 문제점이 존재하지 않으며, 강선이 노출되어 있으므로 보강 시공 후 구조물의 사용 중에도 보강된 강선의 상태를 손쉽게 파악할 수 있는 장점을 가지고 있다.

본 연구에서는 PSC I거더교에 대한 외부강선을 이용한 보강 방법의 효용성을 파악하기 위하여 실제로 공용 중인 교량을 연구대상으로 선정하여, 대상교량에 외부강선을 이용한 프리스트레스 도입을 통한 보강장치를 시공하였다. 대상교량의 보강 전 후에 하중재하시험을 수행한 후 측정된 실험결과를 분석하여 보강의 효과를 파악하고자 한다. 또한 대상교량에 대한 구조해석도 병행하여 이론치와 실험결과와의 비교분석을 통하여 외부강선을 이용한 보강방법이 PSC I거더교의 거동 및 부재의 단면력에 미치는 영향을 분석하는데 연구의 목적을 둔다.

1.2 연구의 동향

외부강선을 이용한 거더의 보강은 강선의 배치 형태 및 거더에 장착하는 단부 정착장치와 관련이 크다고 알려져 있다. 거더에 대하여 보다 효율적인 보강 방식을 위한 연구가 다양하게 이루어져 왔다.

Regan(1967)은 “Simple Strain Method”의 제안을 통하여

¹정회원, (주)동일기술공사 상무

²정회원, 금오공과대학교 토목공학과 교수, 교신저자

³정회원, 금오공과대학교 토목공학과 박사과정

⁴정회원, 금오공과대학교 토목공학과 박사과정

*Corresponding author: jhsong@kumoh.ac.kr

Professor, Dept. of Civil Eng., Kumoh National Institute of Technology(KIT), Gumi, Gyeongbuk 39177, Korea

•본 논문에 대한 토의를 2016년 6월 1일까지 학회로 보내주시면 2016년 7월 호에 토론결과를 게재하겠습니다.

응력이 선형 분포한다고 가정하고 연결부 응력의 불연속성을 배제한 외부 강선으로 보강된 교량의 해석을 시도하였다(Regan and Krahl, 1967). Ayyub et al.(1990)은 텐던의 종류와 형태를 달리하여 보강한 보에 대한 실험을 수행하였다. 연구의 결과 스트랜드를 강선으로 사용하고 절곡배치를 하는 것이 보강의 효과에 있어 유리함을 확인하였다(Ayyub et al., 1990).

국내에서도 최근 노후화된 콘크리트 거더 교량의 보강방안으로서 또한 교량 내하력 증진의 방안으로서의 외부강선을 이용한 프리스트레싱 공법이 적용되고 있으며 이에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다.

Han(2002)은 외부강선을 사용한 프리스트레스 보강공법의 실제 시공된 사례분석을 통하여 정착부의 전단지지방식과 지압지지방식의 장단점 및 효율성을 분석하였다(Han and Kim, 2002).

Park(2005)는 외부강선으로 보강된 PSC 교량에 대한 파단 실험을 수행하였는데, 외부강선을 단계적으로 절단하면서 교량의 거동을 파악함으로써 외부 프리스트레스에 의한 보강의 효과를 평가하였다(Park, 2005).

Lee(2006)는 인양홀에 외부강선 정착장치를 설치하여 보강한 PSC 거더의 거동을 분석함으로써 기존의 전단지지방식과 지압지지방식 등과의 비교분석을 통하여 인양홀을 이용한 정착장치 방식이 구조적으로 유리함을 확인하였다(Lee et al., 2006). 또한 2007년에는 인양홀을 이용한 외부강선 보강방법이 적용된 철근콘크리트 보에 대한 하중재하 실험을 수행함으로써 보강의 효율성을 확인하였다(Lee, 2007).

Choi(2007)는 외부강선으로 보강된 연속 강합성교에 대한 내하율 산정 연구를 통해 역학적 거동 특성에 대한 분석이 이루어졌다. 또한 이론 해석 및 FEM 해석을 통하여 긴장재의 배치 형상에 따른 구조적 효율성에 대한 비교 연구를 행하였다(Choi et al., 2007).

그러나 앞서의 연구들은 주로 이론해석이나 실내 모형실험을 통하여 보강효과를 검증한 것들이 대부분으로서 수행된 연구는 적지 않지만 실제 공용중인 PSC I 거더교에서 재하실험을 통하여 보강효과를 검토한 연구는 찾아보기 힘든 실정이다. PSC I 거더교에 대하여 외부강선을 이용한 보강을 하게 되면 휨 성능뿐만 아니라 전단성능의 상승도 기대할 수 있어 구조적, 경제적으로 효과를 극대화할 수 있다. 현재 국내에서 적용하고 있는 PSC I 거더교에 대한 보강으로서 인양홀을 이용한 정착방법이 유력하게 적용되고 있으나, 외부강선의 배치방식으로서 다양한 타입이 혼재되어 시공되고 있으며, 외부강선 배치방식의 효율성에 대한 분석도 이루어져 있지 않은 상황이다. 현재 국내에서 적용되는 외부강선 배치방식은 일자형이 가장 많이 적용되어 왔으나 최근에는 V자형 배치방식이 보다 효율적인 방식인 것으로 인식되며 적용이 확

대되고 있는 추세이다. V자형 배치방식은 보의 지간 중앙점에서 프리스트레스에 의한 상향력을 제공하게 됨에 따라 지간 중앙점의 처짐을 감소시키는 효과를 유발하여 일자형 배치방식에 비하여 구조적으로 유리한 것으로 알려져 있다. 따라서 본 연구에서는 현재 적용되고 있는 V자형 배치방식의 효율성을 분석하기 위하여 현재 공용중인 PSC I 거더교에 대하여 보강을 수행한 후 보강의 효율성을 분석 검토하고자 한다.

1.3 연구 방법 및 범위

현재 국내에서 적용되고 있는 교량의 보강에 대한 다양한 공법들은 개별교량의 특성이나 손상상황과 무관하게 시공되는 경우가 많아 각종 보강공법들의 효율성 및 적용성에 대한 평가가 중요한 시점이라 할 수 있다.

국내에서는 PSC I 거더교의 보강방안으로서 외부강선 프리스트레싱을 통한 보강이 많이 적용되어 노후 교량의 보강이 이루어지고 있으며, 공용 내하력의 증진도 시도하고 있다. 또한 현재 국내에서 적용되는 외부강선 배치 방식으로는 일자형 배치, V자형 배치, U자형 배치 등이 있다. 종래에는 국내에서 일자형배치 방식이 많이 적용되어 왔으나, 최근에는 V자형 배치방식이 보다 효율적인 방식인 것으로 인식되며, 적용이 확대되는 추세이다. 외부강선을 V자형 배치를 하여 보강하게 되면 새들을 통하여 보의 중앙부에서 상향력이 가해지는 효과를 가져오기 때문에 보강효율이 우수한 것으로 알려져 있다. 따라서 본 연구에서는 V자형 배치의 보강 효율성을 분석하기 위하여 공용 중인 PSC I 거더교에 V자형 배치 방식의 외부강선 보강을 적용한 후, 재하실험을 통한 구조적 거동을 분석한다.

앞서 연구의 동향에서 서술된 바와 같이 국내·외적으로 다양한 형식의 보강 효과를 분석한 연구는 이미 상당수가 있다. 그러나 수행된 대부분의 연구는 이론적인 내용으로 한정되어 있거나, 실험적으로 이루어지더라도 실험실내에서 개별 실험체 시편에 대한 실험거동 연구에 한정되어 있어 실제 교량의 거동이라고는 보기 어려운 상황이다. 따라서 본 연구에서는 현재 공용중인 교량에 대하여 외부강선 프리스트레싱을 통하여 보강한 PSC I 거더교에 대한 재하실험을 수행하고, 측정된 자료를 통하여 보강의 효율성을 분석한다. 또한 현재 국내에서 널리 사용되고 있는 범용 구조해석 프로그램인 MIDAS-CIVIL을 적용함으로써 이론치와 실험치와의 비교분석을 실시하여 V자형 배치방식 보강의 효율성을 검증한다.

특히 본 연구에서는 정착장치에 탄성패드를 적용할 경우 동적 보강의 효과를 분석하기 위하여 V자형 외부강선 배치방식 및 V자형+탄성패드 방식을 적용하고, PSC I 거더교에서의 교량의 휨성능, 전단성능 개선효과 및 동적 거동 증진효과에 대한 평가가 수행되었다.

1.4 외부강선 보강의 개요

외부강선을 이용한 보강은 PC강재를 사용하여 프리스트레스를 도입함으로써 거더에 압축력을 주어 내하력을 증대시키는 보강공법이다(Hwang, 2004).

본 연구에서는 PSC거더 제작 시의 거치용홀인 인양홀을 이용하여 정착부를 설치하는 방식을 채택하였다. 인양홀에 정착부를 설치하는 방식은 교량의 거더 및 가로보 등의 기존 상부구조의 손상을 최소화할 수 있어서 국내에서 널리 적용하고 있는 방식이다. 외부강선을 이용하여 거더를 보강하게 될 때, 외부강선의 배치방식은 보강의 효과에 있어 상당히 중요하다(Naaman, 1990).

본 연구에서의 채택한 외부강선의 배치방식은 국내에서 많이 사용되고 있는 V자형 외부강선 배치방식 및 V자형+탄성패드 방식을 채택하였다. V자형+탄성패드 방식이란 V자형 외부강선 배치를 취함과 동시에 정착구에 탄성패드를 장착시키는 방식을 말한다. 인양홀과 정착단 및 새들의 모습은 Fig. 1, Fig. 2, Fig. 3과 같다.



Fig. 1 Lifting hole



Fig. 2 Anchorage



Fig. 3 Saddle

2. 재하실험

2.1 재하실험 대상 교량 및 측정센서

본 연구에서 교량 재하실험을 실시하고자 하는 교량은 일선교로서, 국도33호선 상에 가설된 PSC I거더교이다. 가설 당시 DB-18로 설계 시공된 교량으로서, 1966년도에 준공이 되어 현재까지 공용중에 있어 노후화로 인한 성능개선이 요구되는 상황이다. 본 연구에서는 일선교의 1개 경간에서 V자형 보강공법, V자형+탄성패드 보강공법을 적용하고 보강 전 및 보강 후의 정적 및 동적 재하실험을 수행하였으며, 실험결과를 바탕으로 보강의 효과를 분석하고 검증하였다.

Fig. 4는 재하실험 시 거더에 부착된 센서의 위치를 나타낸다.

또한 본 연구에서 정착구 및 새들에 적용한 탄성패드는 교량 및 암거 등에서 완충을 목적으로 일반적으로 사용하는 것과 동일한 탄성패드로서 내구성, 내후성, 내저온성이 우수하다고 알려져 있다. 본 연구에서의 정착구에 장착된 탄성패드의 제원은 22 cm×20 cm×2.5 cm이며, 새들부에 장착된 탄성패드의 제원은 52 cm×46 cm×2 cm이다.

2.2 재하차량

본 실험에서 사용한 재하차량의 제원은 Table 1과 같다.

2.3 재하방법

본 연구에서의 재하실험은 정적 및 동적 실험을 병행하였

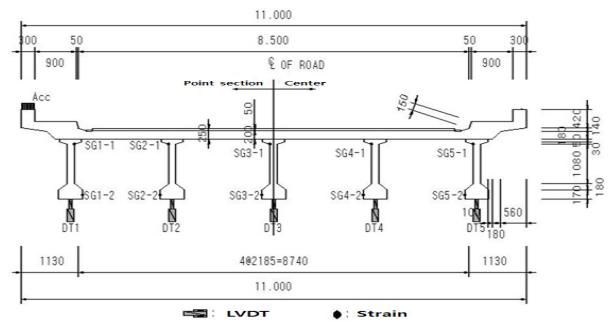


Fig. 4. Location of measuring gauge

Table 1 Dimension and weight of vehicle

Experiment vehicle	Data			
	front wheel (m)	rear wheel (m)	1-2 axles (m)	2-3 axles (m)
	2.050	1.850	3.200	1.300
150 kN dump truck	gross weight (kN)	first axle weight (kN)	second axle weight (kN)	third axle weight (kN)
	244.0	79.5	82.0	82.5

Table 2 Method of loading

	Load Case	Purpose of Load	Loading Position
Static Load	1	Generation of maximum bending moment at the exterior girder	Center
	2	Generation of maximum bending moment at the interior girder	Center
	3	Generation of maximum shear force at the exterior girder	End
	4	Generation of maximum shear force at the interior girder	End
Dynamic Load	Go through the interior girder with increasing the speed from 10 to 60 km/h(increase every 10 km/h)		

으며, 재하방법은 Table 2와 같다.

정적재하실험에 있어서는 재하차량을 재하 경우에 따라 적합한 위치에 정지시키고 차량 엔진을 정지시킨 후 매 0.1초마다 데이터를 측정하여 총 1분 동안의 데이터를 확보하였다. 정적재하실험에서는 정적하중이 재하된 상태에서 거더의 처짐 및 변형율을 측정하며, 동적재하실험에 있어서는 재하차량을 시속 10 km/h부터 10 km/h씩 증가시켜 시속 60 km/h까지 총 6가지 재하경우로써 내측거더 위를 통과시켜 처짐 및 변형률을 측정하였다.

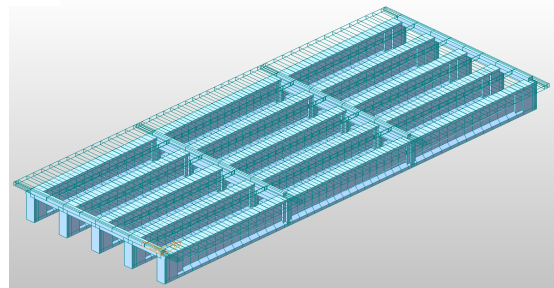
3. 재하실험 결과 분석

3.1 구조해석

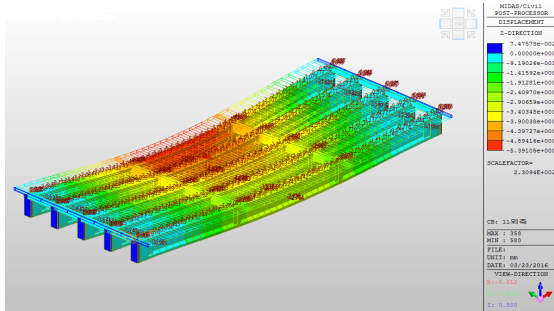
구조해석은 재하실험으로 얻은 수치자료와 더불어 구조물의 내하력을 평가하는 중요한 수단이다.

본 연구의 대상인 일선교는 준공 후 50년이 경과된 PSC I거더교로서, 장기재령으로 인한 콘크리트 열화 및 프리스트레스의 감소가 우려되는 교량이다. 본 연구의 실험 시 Schmidt 햄머 강도시험을 통하여 측정된 거더 콘크리트의 평균 강도는 36.3MPa로서 설계시의 콘크리트 압축강도 35.0 MPa 보다 낮아지지 않은 점으로 볼 때 거더 콘크리트는 별다른 열화를 보이지 않는 것으로 판단된다. 그러나 장기재령으로 인한 프리스트레스의 손실이 진행되어 교량의 성능저하가 우려됨에 따라, 감소된 프리스트레스를 산정하였다. 프리스트레스는 콘크리트의 크리프와 건조수축 및 PS강재의 릴랙세이션으로 말미암아 시간의 경과와 더불어 감소한다.

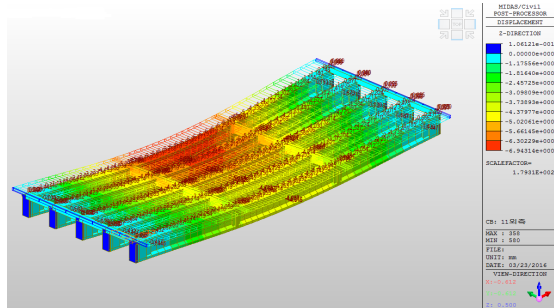
본 연구에서는 프리스트레스 감소를 계산하는 근사해법 (Shin, 2007)을 적용한 결과 유효율이 75.7%로 산정되어, 장



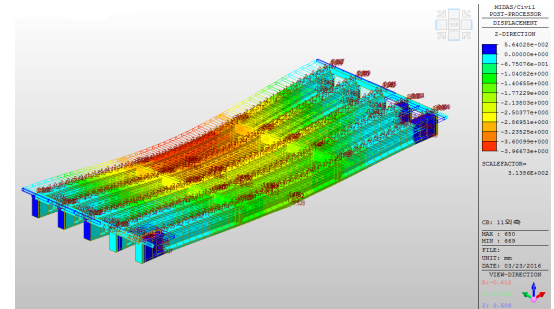
(a) Structural model



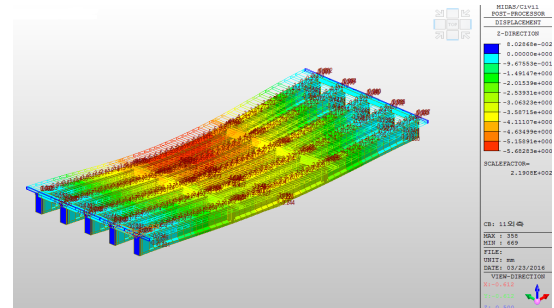
(b) Unreinforced(Effectiveness Ratio 100%)



(c) Unreinforced(Effectiveness Ratio 75.7%)



(d) Reinforced(Effectiveness Ratio 100%)



(e) Reinforced(Effectiveness Ratio 75.7%)

Fig. 5 Structural analysis results

Table 3 Maximum of girder deflection (Unit : mm)

Type of Girder	Exterior Girder		Interior Girder	
Effectiveness ratio(%)	75.7%	100%	75.7%	100%
Deflection before reinforcement(mm)	6.94	5.39	6.85	5.31
Deflection after reinforcement(mm)	5.68	3.97	5.72	4.00

기재령에 따른 프리스트레스 감소가 상당히 진행된 것으로 판단되었다. 이에 따라 각 재하 경우 별로 거더의 프리스트레스 감소를 고려하지 않은 경우(유효율 100%)와 고려한 경우에 대하여 각각 구조해석을 수행하였다. Fig. 5는 일선교 상부 구조에 대한 구조모델, 재하 경우 1일 때 보강 전 및 보강 후에 대하여 유효율 100%일 때와 75.7%일 때의 구조해석 결과(처짐)을 보여주고 있다. Table 3는 재하 경우 1, 2에서 거더의 최대 처짐을 나타내고 있다.

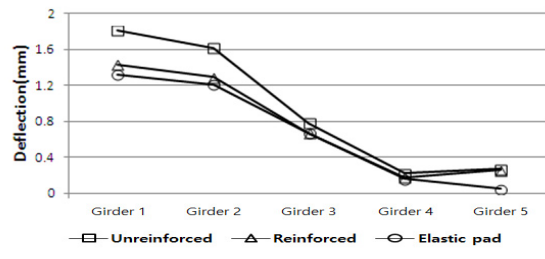
Table 3에서 프리스트레스 손실을 고려하게 되면 고려하지 않았을 때 보다 처짐이 외측 거더에서는 28.0~43.0% 증가하며, 내측 거더는 처짐이 29.0~43.0%가 증가함을 볼 수가 있어, 재령이 오래된 노후교량에서는 거더 프리스트레스의 손실을 고려한 구조해석을 행하여야만 비로서 실제 교량의 상태를 반영한 정확한 거동해석이 됨을 알 수 있다.

3.2 재하실험 결과

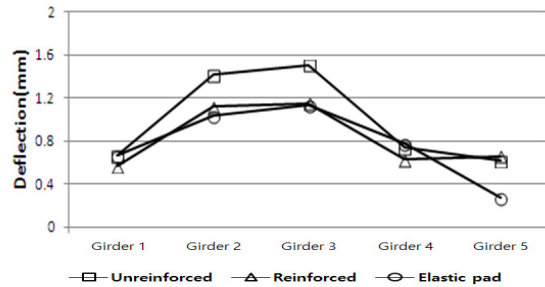
3.2.1 정적 재하실험 결과

3.2.1.1 처짐

정적 재하실험 결과로서 측정된 거더 지간 중앙점에서의 처짐은 Fig. 6와 같다. Load Case 1은 외측거더 G1에 대하여 최대 휨모멘트를 유발시키기 위한 재하경우이고, Load Case 2는 내측거더 G3에 대하여 최대 휨모멘트를 유발시키기 위한 재하경우이다. 그림에서 Unreinforced는 보강 전, Reinforced는 외부강선 장착 보강 후를 나타내며, Elastic pad는 정착구에 탄성패드를 도입한 상황에서 외부강선 장착 보강 후를 뜻한다. Fig. 6에서 보는 바와 같이 보강 후에 전반적으로 각 거더에서 현저한 처짐의 감소가 일어남을 볼 수가 있다. Load Case 1에서는 G1에서의 최대 처짐이 보강 전에는 1.81 mm로 측정되었으나, 보강 후에는 1.43 mm, 탄성패드 도입 후에는 1.32 mm로 측정되어 보강 후 21.0%, 탄성패드 도입 후 27.1%의 처짐 감소가 일어났다. 또한 Load Case 2에서는 보강 전에는 최대처짐이 G3에서 1.51 mm로 측정되었으나, 보강 후에는 최대처짐이 G3에서 1.15 mm, 탄성패드 도입 후에는 1.13 mm로 측정되어 보강 후 23.8%, 탄성패드 도입 후 25.2%의 처짐 감소가 이루어진 것을 확인할 수 있었다.



(a) Load Case 1



(b) Load Case 2

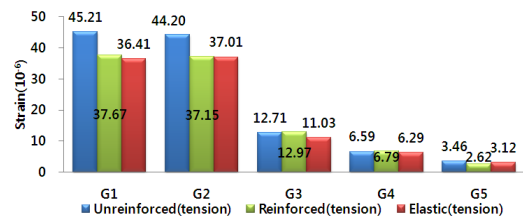
Fig. 6 Deflection of girder

3.1.1.2 변형률

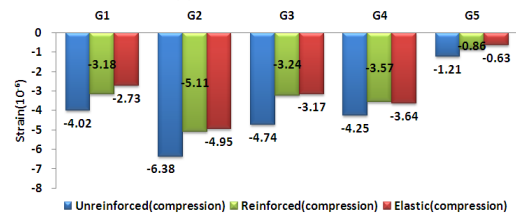
정적하중 재하에 따른 외부강선 보강과 탄성패드의 도입에 따른 변형률을 비교해 보았다. 재하 경우별 변형률은 Figs. 7~10과 같다.

그림에서 보는 바와 같이 각각의 거더에서 보강 후에 변형률이 감소하는 현상을 확인할 수 있었다.

Fig. 7의 (a), (b)는 Load Case 1의 인장측과 압축측 변형률을 나타낸 것이다. 인장측 변형률은 G1에서 보강 전보다 보강 후 16.7%, 탄성패드 도입 후 19.5%의 감소율을 보인다. 압축측 변형률은 G1에서 보강 전보다 보강 후 20.9%, 탄성패드 도입 후 32.1%의 감소율을 보인다.

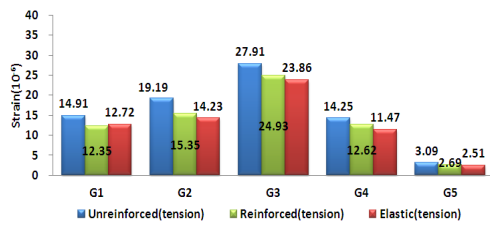


(a) Strain of tension

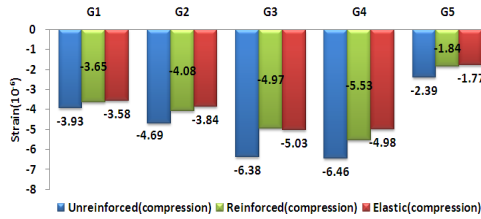


(b) Strain of compression

Fig. 7 Load Case 1



(a) Strain of tension



(b) Strain of compression

Fig. 8 Load Case 2

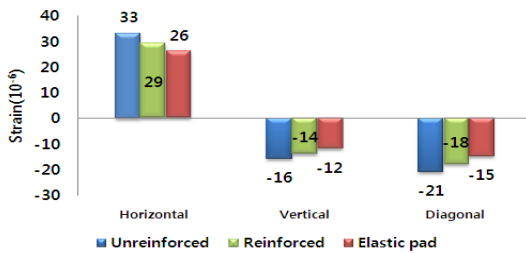


Fig. 9 Load Case 3

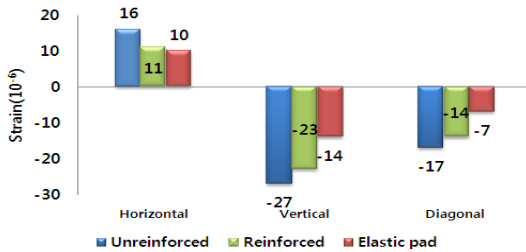


Fig. 10 Load Case 4

Fig. 8의 (a), (b)는 Load Case 2의 인장축과 압축축 변형률을 나타낸 것이다. 인장축 변형률은 G3에서 보강 전 보다 보강 후 10.7%, 탄성패드 도입 후 14.5%의 감소율을 보인다. 압축축 변형률은 G3에서 보강 전보다 보강 후 22.1%, 탄성패드 도입 후 21.2%의 감소율을 보인다.

Fig. 9는 Load Case 3에서 외측거더 G1의 최대전단력을 유발시키는 경우로서 거더 단부의 복부판에 설치된 스트레인 게이지의 변형률을 나타낸 것이다. 또한 Fig. 10은 Load Case 4에서 내측거더 G3의 최대전단력을 유발시키는 경우이다.

Fig. 9와 Fig. 10에서 보는 바와 같이 보강 전에 비해 보강 후 및 탄성패드 도입 보강 후에 변형률의 감소가 일어남을 볼 수가 있다.

3.2.2 휨성능 분석

3.2.2.1 처짐 분석

Table 4에서의 이론 처짐이란 MIDAS-CIVIL을 이용한 구조해석의 결과로서 도출된 장기재령하의 일선교에 있어 프리스트레스 손실을 반영하여, 유효율 75.7%를 적용한 처짐을 말한다.

Load Case 1의 외측거더 G1에서의 이론 처짐의 경우 보강 전보다 보강 후에는 43.0%의 처짐 감소를 보이며, 실측 처짐은 보강 전보다 보강 후에 20.9%의 처짐 감소를 보인다. 또한 Load Case 2의 내측거더 G3에서의 계산 처짐의 경우 보강 후에는 43.0%의 처짐 감소를 보이며, 실측 처짐은 보강 후에 23.8%의 처짐 감소를 보인다.

상기의 사실을 통해 외부강선을 이용한 프리스트레싱 보강을 통하여 장기재령하의 PSC I거더교에 있어 거더 처짐의 감소 효과가 크게 발휘되는 것으로 확인되었다.

3.2.2.2 횡방향 하중분배계수

교량의 건전성을 평가함에 있어서 활하중에 대한 거더의 횡방향 하중분배계수는 상당히 중요한 지표가 된다. 또한 Korean Highway Bridge Design Code(2010), AASHTO Specification(2010), AASHTO LRFD Specification(2012) 등에서도 별도의 기준을 두어 교량 설계 시에 하중분배계수를 적용하도록 하고 있으며, Tonias(2007)은 상기 미국의 2개 시방서 기준 적용상의 문제점을 지적하고 있다.

Ghosn et al.(1986)은 강성이 같은 거더로 구성되어 있는 거더교의 경우에 대하여 실측 변형률의 비로서 하중분배계수를 산정할 수 있는 방법을 제시하였다.

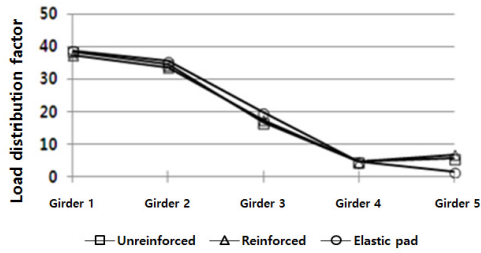
거더교에서의 하중분배계수를 구하는 방법은 식 (1)과 같다.

$$GDF_i = \frac{M_i}{\sum_{j=1}^k M_j} = \frac{ES_i \varepsilon_i}{\sum_{j=1}^k ES_j \varepsilon_j} = \frac{\frac{S_i}{S_l} \varepsilon_i}{\sum_{j=1}^k \frac{S_j}{S_l} \varepsilon_j} = \frac{\varepsilon_i \omega_i}{\sum_{j=1}^k \varepsilon_j \omega_j} \quad (1)$$

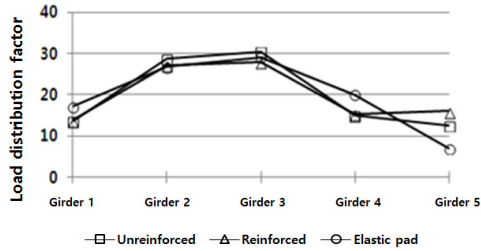
여기서 $M_i = i$ 번째 거더의 휨모멘트, E = 탄성계수, $S_i = i$

Table 4 Comparison of max deflection (Unit : mm)

Classification	Load Case 1(G1)		Load Case 2(G3)	
	Analytical deflection	Measured deflection	Analytical deflection	Measured deflection
Before reinforcement	1.68	1.81	1.55	1.51
After reinforcement	0.95	1.43	0.87	1.15
Deflection reduction ratio(%)	43.0	20.9	43.0	23.8



(a) Load Case 1



(b) Load Case 2

Fig 11. Load distribution factor

번째 거더의 단면계수, $S_i =$ 내측 거더의 단면계수, $\varepsilon_i = i$ 번째 거더의 최대 변형률, $w_i = i$ 번째 거더와 내측거더와의 단면계수 비율, 그리고 $k =$ 거더의 수이다.

본 연구에서는 재하실험에서 측정된 처짐을 이용하여 횡방향 하중분배계수를 계산하였다. Fig. 11은 Load Case 1과 Load Case 2에 대한 횡방향 하중분배계수를 나타내고 있다. Fig. 11에서 보는 바와 같이 보강 전보다 보강 후, 탄성패드 도입 후에 횡방향 하중분배계수의 곡선이 점차적으로 완만해지는 것을 알 수가 있으며, 이는 보강 후와 탄성패드 도입 후에 재하하중이 전체 거더에 고루 분포됨을 의미하고, 보강을 통하여 상부 구조의 건전성이 증진되어 가고 있는 상황인 것으로 분석된다.

3.2.3 전단성능 분석

본 연구의 정적재하실험 중 Load Case 3에서는 외측거더 G1, Load Case 4에서는 내측거더 G3에 최대전단력이 유발하도록 트럭을 재하 하였다. 따라서 거더 복부판에 설치된 스트

Table 5 Principal strain and maximum shear strain of $G_1 \times 10^{-6}$

Status of reinforcement	ϵ_x	ϵ_y	γ_{xy}	ϵ_1	ϵ_2	γ_{max}
Before reinforcement	33	-16	-59	33	-16	49
After reinforcement	29	-14	-51	29	-14	43

Table 6 Principal strain and maximum shear strain of $G_3 \times 10^{-6}$

Status of reinforcement	ϵ_x	ϵ_y	γ_{xy}	ϵ_1	ϵ_2	γ_{max}
Before reinforcement	16	-27	-23	16	-27	43
After reinforcement	11	-23	-16	11	-23	34

레인게이지를 통해 측정된 변형률 및 이를 토대로 계산된 주 변형률, 최대전단변형률은 Table 5 및 Table 6과 같다.

Table 5과 Table 6에서 보듯이 최대주변형률은 보강 후 12.1~31.2%, 최소주변형률은 12.5%~14.8% 감소하였고, 최대전단변형률은 12.2%~20.9%가 감소하여, 외부강선 보강으로 인한 거더의 전단성능 증진 효과를 볼 수가 있었다.

따라서 외부강선을 이용한 보강방법이 기존 PSC I거더의 전단능력 향상에 도움을 준다는 것을 확인할 수 있었다.

3.2.4 동적 재하실험 결과

동적 재하실험은 내측거더 G2와 G3에서 최대 처짐이 유발될 수 있도록 재하차량의 차륜축이 G2와 G3상을 통과하도록 하였다. Fig. 12은 동적 재하실험의 결과로서 재하속도별 내측거더 G2와 G3의 처짐을 나타낸 것이다. Fig. 12에서 보는 바와 같이 G2보다는 G3에서 전반적으로 재하차량의 주행속도별 동적처짐이 크게 나타나, G3가 동적거동에 민감한 것으로 나타났다.

따라서 G3를 중심으로 동적거동을 분석해 보면 재하차량의 주행속도별로 약간씩 차이가 나지만 보강 전보다 보강 후가 최대동적처짐이 20.0~26.4% 작게 나타났으며, 탄성패드를 적용한 보강에서는 28.7~32.4% 작게 나타났다. 따라서 외부강선으로 PSC I거더교를 보강하는 경우 동적거동에 영향을 주어 최대동적처짐을 감소시킴을 확인하였고, 특히 탄성패드를 적용하게 되면 동적 안정성을 더욱 증진할 수 있게 됨을 알 수 있었다.

동적재하실험에서 측정된 최대 처짐을 사용하여 실측 충격계수를 산정할 수가 있다. 실측충격계수는 주행속도별로 동적 응답곡선 $D_{dyn(max)}$ 와 정적 응답곡선 $D_{sta(max)}$ 을 비교하여 산출하며, 식 (2)와 식 (3)에 의해 실측 충격계수를 구한다.

$$DLF = \frac{D_{dyn(max)}}{D_{sta(max)}} \quad (2)$$

$$i = DLF - 1 \quad (3)$$

여기에서 DLF는 동적충격율(dynamic load factor), i 는 충격계수(impact factor)를 의미한다.

도로교 설계기준에 제시된 식에 의한 값은 $0.231 \left(= \frac{15}{40+25} \right)$ 이며, 속도별 실측 충격계수를 Fig. 13에 나타내었다. Fig. 13에서 볼 때 외측거더 G1, 내측거더 G2 및 G3에서 실측 충격계수는 전반적으로 이론 충격계수보다 하회하는 것으로 나타났으며 또한, 보강 전 실측 충격계수와 보강 후 실측 충격계수, 탄성패드 도입 후 실측 충격계수는 차이가 나타남을 볼 수 있

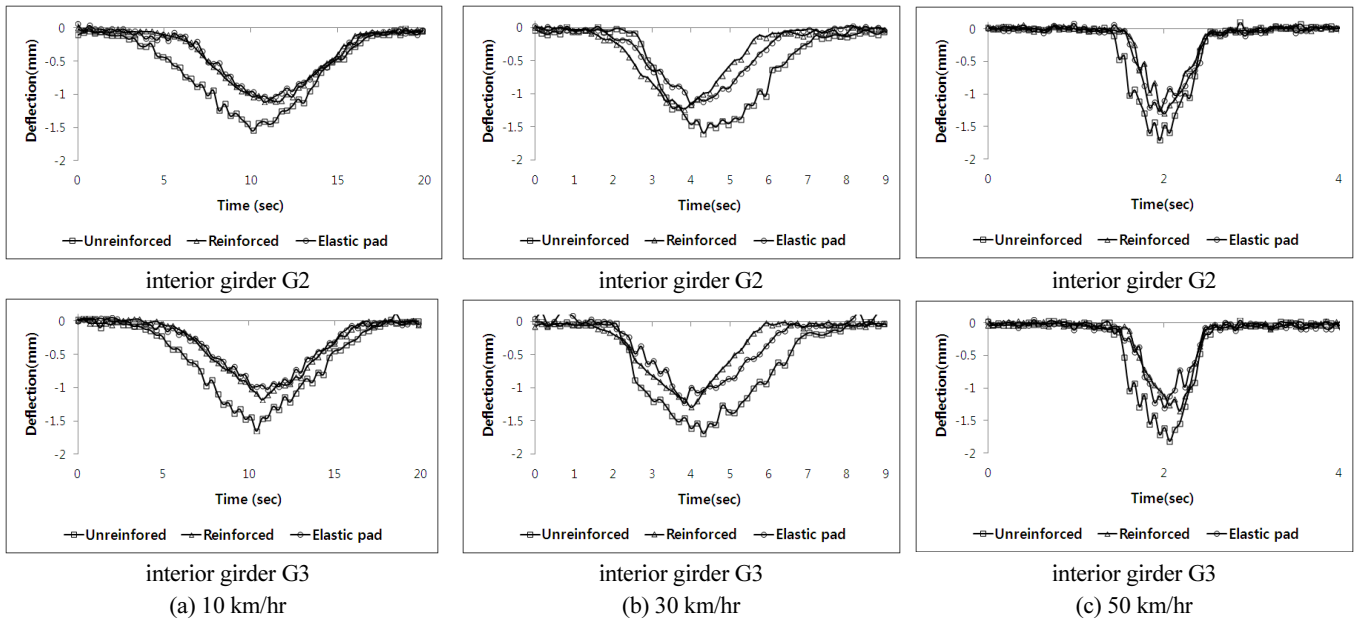


Fig. 12 Dynamic deflection

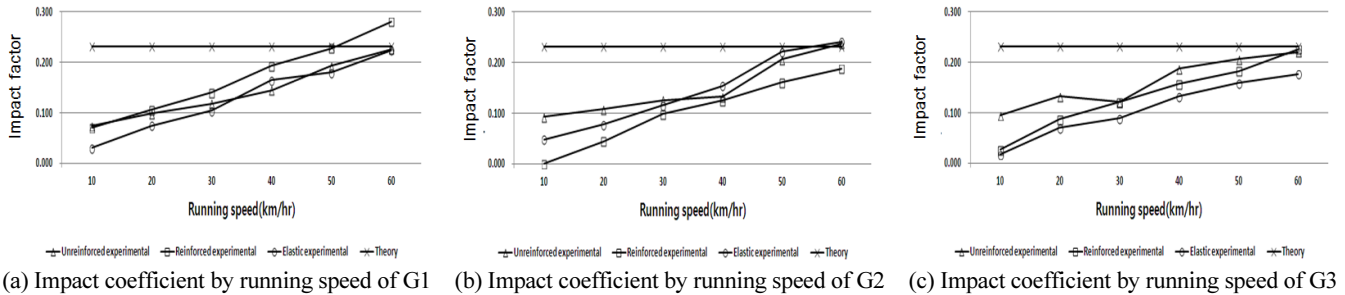


Fig. 13. Impact factor

으며, 탄성패드를 도입한 경우 실측 충격계수가 상당한 폭으로 감소함을 볼 수가 있다.

따라서 외부강선과 탄성패드 도입을 이용한 보강이 PSC I 거더교의 동적 구조 안정성 증진에 크게 도움을 주는 것으로 확인되었다.

4. 결론

본 연구에서는 실제 공용 중인 PSC I 거더교를 대상으로 외부 강선을 이용한 보강 전과 보강 후에 교량 재하실험을 실시하여 수집된 데이터를 분석하고 평가하여 보강효과를 분석하였으며, Midas-Civil(2012) 구조해석 프로그램을 이용한 구조해석 결과와도 비교하였다.

본 연구에서 얻은 결과를 정리하면 다음과 같다.

1) 장기재령 상태의 PSC I 거더 교량의 구조해석에서는 거더

프리스트레스 손실을 고려한 구조해석을 행하여야 실제 교량상태를 반영한 정확한 해석이 될 수 있다는 것을 확인하였다.

- 2) 정적재하실험의 결과 거더의 지간 중앙점에서의 처짐 과 변형률은 보강 전보다 보강 후에 현저히 감소하였으며, 처짐의 경우 보강을 통하여 21~24% 감소효과를 확인할 수 있었다.
- 3) 재하실험 결과를 바탕으로 구한 횡방향 하중분배계수의 분포를 볼 때, 전체적으로 보강 전보다 보강 후에 횡방향 하중분배계수의 곡선이 완만해져 재하하중이 전체 거더에 고루 분포됨을 볼 수 있었으며, 보강을 통하여 상부구조의 건전성이 증진된 결과로 판단된다.
- 4) 외부강선을 이용한 보강 후 최대전단변형률이 12.2~20.9% 감소하여 보강을 통하여 거더의 전단성능 향상 효과를 확인할 수 있었다.
- 5) 동적재하실험 결과를 통하여 보강 후 거더의 최대동적처짐이 20~26% 감소하는 효과를 확인하였고, 탄성패드를

적용하면 동적 보강효과가 더욱 극대화된다는 것을 확인하였다.

- 6) PSC I거더교에서 외부강선을 이용한 보강을 할 경우 거더의 휨성능 및 전단성능 향상에 기여한다는 것을 확인하였으며, 동적 안정성에도 크게 기여한다는 사실을 알 수 있었다.

감사의 글

이 연구는 금오공과대학교 학술연구비에 의하여 지원된 논문입니다.

References

1. AASHTO LRFD Bridge Design Specifications, 2012, pp.4-26-40.
2. AASHTO Standard Specifications for Highway Bridges, 2010, 32-35.
3. Antoine Naaman, "External Prestressing in Bridge", American Concrete Institute, SP-120 1990.7, 458.
4. Choi, D. H., Kim, Y. S., Kim, E. J., Choi, D. I., (2007), Determination of Rating Factor with Increment of Tendon Force for Continuous Steel-concrete Composite Bridges Strengthened by External Tendons, *Journal of The Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 11(1), 139-144.8.
5. Ghosn, M., Moses, F., and Gobieski, J., "Evaluation of Steel Bridges Using In-Service Testing" Transportation Research Record No. 1072, TRB, Washington, D.C., 1986, pp.71-78.
6. Han, M.Y., Kim, S.W., (2002), An Experimental study of External Prestress Strengthening Method for continuous Bridges, *Journal*

of Advanced Mineral Aggregate Composites, 7, 133-141.

7. Hwang, H.J., Bridge Engineering, Dongmyeong Publishing Co., 2004, pp.480.
8. Korean Highway Bridge Design Code, The Korea Road Association, 2010, pp.127.
9. Lee, B.J., (2007), (An) Experimental Study on Reinforcing Effect of PSC I Girder Bridge Strengthened by External Prestressing, Thesis of doctor of engineering in Sungkyunkwan University, 2007, pp.195.
10. Lee, B.J., Shin, J.I., Park, C.H., Lee, W.T., (2006), Experimental Study of PSC I Girder Bridge Cutting Internal Tendons and Retrofitting External Tendons, *Journal Of The Korean Society Of Civil Engineers*, 10, 2472-2475.
11. Park, C.H., Lee, B.J., Lee, W.T., Ku, B.S., (2005), Evaluation of Reinforcement Effect of Deteriorated PSC Beam through Cutting Its External Tendons, *Journal of The Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 9(3), 178-186.
12. Regan, R.S. and Krahl, N.W. (1967), Behavior of Prestressed Composite Beams, *Journal of the Structural Division*, ASCE, 93(12), 87-108.
13. Saadatmannedh, H., Albercht, P., and Ayyub, B.M., (1989a), Analytical Study of Prestressed Composite Beams, *Journal of the Structural Engineering*, ASCE, 115(9), 2364-2381.
14. Shin, H.M., Prestressed Concrete, Dongmyeong Publishing Co., 2008, pp.112-117.
15. Tonnias, D.E., and Zhao, J.J., Bridge Engineering, McGraw Hill, 2007, pp.128-137.

Received : 12/29/2015

Revised : 03/09/2016

Accepted : 04/11/2016

요 지 : 본 연구에서는 PSC I거더교에 대한 외부강선을 이용한 보강 방법 중 V자형 보강방식의 효율성을 검증하기 위하여 공용중인 교량을 대상으로 보강장치를 시공하여 보강효과를 분석하였다. 따라서 PSC I거더교의 보강 전과 후 각각의 경우에 대하여 정적 및 동적 재하실험을 실시하였다. 그리고 재하실험에서 측정된 결과를 면밀히 분석하고, 구조해석을 통해 얻은 결과와도 비교분석하여 외부 프리스트레스 도입을 통한 보강효과를 검증하였다.

본 연구에서 외부강선을 이용한 보강방법을 적용하여 보강효과를 검토한 결과, 본 연구에서의 V자형 외부강선 보강방법을 적용할 때 횡방향 하중분배계수 곡선이 완만해져 상부구조의 건전성이 증진됨을 알 수 있었으며, PSC I거더교의 휨 성능 및 전단 성능개선뿐만 아니라 동적구조거동에도 크게 도움을 줄 수 있는 것으로 판단되고, 본 연구에서의 탄성패드를 적용할 때 동적보강효과가 극대화 된다는 것을 확인하였다.

핵심용어 : PSC I 거더, 재하실험, 구조해석프로그램 MIDAS CIVIL, 탄성패드, 휨성능 및 전단성능, 동적구조거동