

외부후긴장 보강공법이 판형교의 거동에 미치는 영향

An Effect of the Behavior of Steel Plate Girder bridge with Applying External Post-Tensioning Method

민 낙 기* 성 덕 룡** 김 은 겜*** 이 희 업**** 박 용 곁*****
Min, Rak-Ki Sung, Deok-Yong Kim, Eun-Kyun Lee, Hee-Up Park, Yong-Gul

ABSTRACT

In strengthening structure, the external post-tensioning method which secure clearness in the structure analysis process is adopted to bridge as well as architecture structure.

Therefore, the major objective of this study is to investigate the effects and application of external post-tensioning method for steel plate girder bridge. It analyzed the mechanical behaviors of steel plate girder bridge with applying external post-tensioning on the finite element analysis and laboratory test for the dynamic characteristics. As a result, the reinforcement of steel plate girder bridge the external post-tensioning method are obviously effective for the response which is non-reinforced. The analytical and experimental study are carried out to investigate the post-tension force decrease stress and deflection on steel plate girder bridge for serviceability. It is investigated that the change degree of natural frequency is very low with applying the external post-tensioning method. The servicing steel plate girder bridge with external post-tensioning is the reasonable reinforcement measures which could be secured the stability of dynamic behavior and increase a dropped durability.

1. 서 론

철도공사 통계자료에 따르면 전국에 총 2,626개의 철도교가 분포되어 있으며, 그 중에서 무도상 판형교가 차지하는 비율은 46.8% (1,192개소)로 파악되었다. 이와 같이 높은 비율을 차지하고 있는 국내 강철도 판형교의 상당부분은 1930~1940년대에 부설되어 노후화되어 있으며, 도상이 없이 거더에 침목이 직결되는 형태로 유도상 교량과는 달리 차량의 주행하중이 교량에 직접 전달되는 특성을 가지고 있다. 그리고 유도상 형식에 비하여 상부구조의 질량이 상대적으로 작기 때문에 사하중에 의한 발생응력은 작지만 동적처짐 및 응력, 진동 등 동적영향이 크게 작용하며 경간길이, 열차의 종류, 주행특성 등에 따라 응답이 민감하게 나타나는 특성을 가진다. 또한 다른 형식의 교량과 달리 수직진동과 수평진동이 거의 비슷한 크기로 발생하는 이상 진동현상이 나타나고 있어 교량의 손상축진 및 승차감에 영향을 미치게 된다.

* 서울산업대학교 철도전문대학원 철도건설공학과 석사과정, (주)VSL Korea 전무이사, 정회원

** 서울산업대학교 철도전문대학원 철도건설공학과 박사과정, 정회원

*** 서울산업대학교 토목공학과 교수, 정회원

**** 한국철도기술연구원 철도구조물연구팀 팀장, 정회원

***** 서울산업대학교 철도전문대학원 철도건설공학과 교수, 공학박사, 정회원

이러한 상황에서 대두될 수 있는 교량의 신설은 유지관리 및 안정성면에서 그 효과가 확실하겠지만 교량 건설에 소요되는 직접비용과 시공기간 중의 우회선로의 건설에 따른 막대한 재원이 필요하게 되어 신중하게 검토되어야 한다.

현재 국내에서 사용되고 있는 강교량의 보강방법에는 강판덧댐, 탄소 및 유리섬유 부착공법, 교각증설 공법, 외부 후긴장재를 이용한 보강공법 등이 있다.

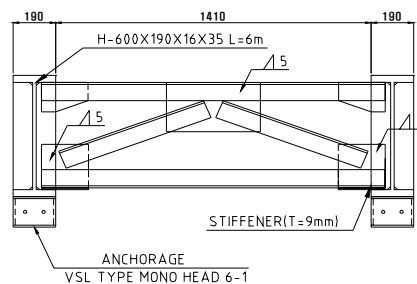
강판덧댐이나 탄소 및 유리섬유 부착공법은 실제 시공에 있어서 기존의 구조물과의 일체거동 여부가 문제가 되고 있으며 교각증설공법은 추가적으로 발생하는 부모멘트부의 처리가 용이하지 않고 비용이 많이 소요되는 단점들을 가지고 있어 공용중인 교량의 보강공법으로는 적당하지 않다.

하지만 외부 후긴장재를 이용한 보강공법은 설계에 수반되는 구조해석이 비교적 명확하고 교량 구조물 뿐만아니라 건축구조물 등의 적용범위가 매우 넓은 보강방법으로 알려져 왔다. 하지만 도로교와는 하중조건 및 구조가 상이한 강철도 관형교에 대한 적용사례는 전무하며 이에 대한 더 많은 연구가 필요한 실정이다.

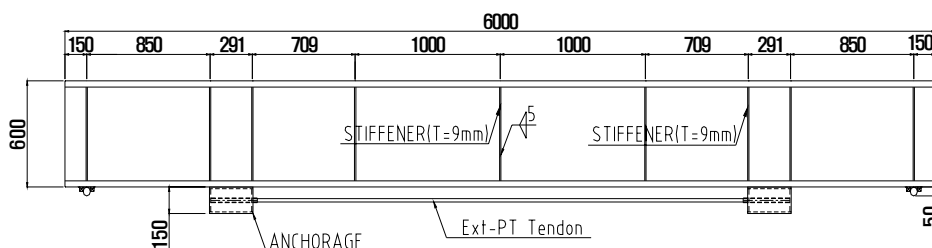
따라서 본 연구에서는 외부 후긴장 공법 적용에 따른 강철도 관형교의 거동과 보강 효과를 연구하기 위하여 긴장력 도입 과정에 따른 외부 후긴장 보강이 강철도 관형교의 거동에 미치는 영향을 파악하기 위해 무도상 관형교 시험체에 변형율계이지와 변위계를 설치하였다. 또한, 본 연구에서 제시한 정착단 상세와 설치 방법의 합리성을 파악하기 위해 정착단이 설치된 주형 하부플랜지와 복부보강재의 거동 분석을 하였다.

2. 실험개요

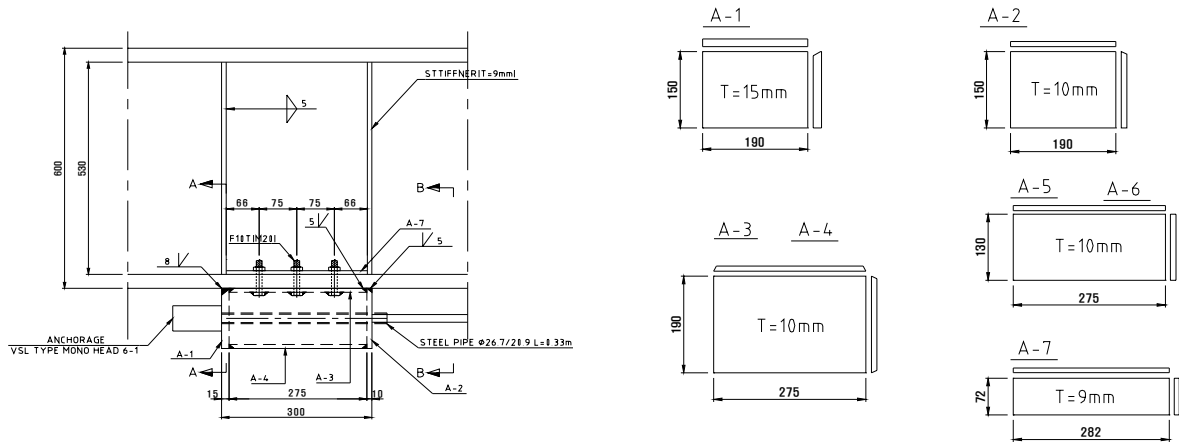
본 연구에서는 시험체 설계에 있어서 실험여건 등을 감안하여 Fig. 1과 같이 설계하중 LS-22의 경간 길이 6m인 무도상 시험체를 제작하였으며, 시험체 주요 제원은 Table 1과 같다. 외부후긴장 보강은 Centre hole jack (ZEP-2FJ) 2대를 동시에 사용하여 각각의 강연선에 대한 긴장력의 차이를 최소화하였으며 펌프식 유압조절장치를 이용하여 단계별 긴장을 수행하였다. 긴장재는 Fig. 1과 같이 시험체의 주형 하부플랜지에 직선 배치하여 프리스트레스 잭 (Prestressing Jack) 으로 긴장하였다. 또한, 정착단의 부착은 하부 플랜지에 고장력 볼트로 체결하여 연결하였다. 긴장시 사용한 PS 강연선의 제원 및 물리적 성질을 Table 2에 나타내었으며, 하중재하는 0~550kN까지 50kN씩 증가시켜가며 정적재하 실험을 수행하였다. Fig. 2는 변형율 계이지 및 변위계 부착위치도이다.



(a) 단면도



(b) 측면도



(c) 정착단 측면도 및 단면제원
Fig. 1 무도상 시험편의 단면 제원

Table 1. 단면 제원

구 분	단면 치수(mm)
거더 중심간격 (D)	1,600
복 부 관(H×t)	600×16
상부플랜지 (B×t)	190×35
하부플랜지 (B×t)	190×35
보 강 재	90×9
브레이싱	90×90×10

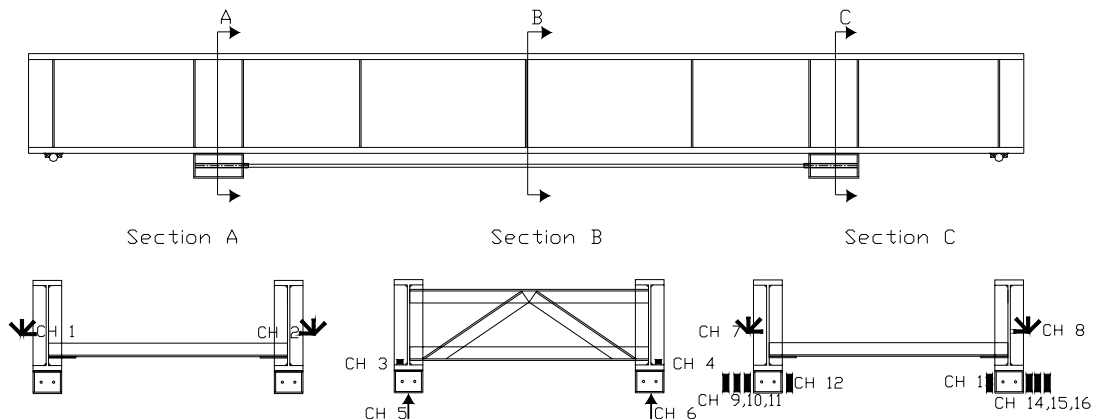


Fig. 2. 변형을 게이지 및 변위계 부착위치도

Table 2. PS 강연선의 제원 및 물리적 성질

공칭 단면적 (mm ²)	인장하중 (kN)	0.2%영구연신율에 대한 하중 (kN)	연신율 (%)	릴랙세이션 (%)	
				N	L
138.7	266이상	226이상	3.5이상	8.0이하	2.5이하

3. 유한요소해석

3.1 모델링

본 연구의 유한요소해석은 실험체의 합리성을 분석하고 긴장 과정 및 긴장 후 외부 하중작용에 따른 시험체의 거동 영향인자에 대한 해석적 연구를 수행하기 위하여 각각의 시험체에 대하여 정적 유한요소

해석을 수행하였다. Fig. 3과 같이 범용프로그램인 LUSAS 13.7를 이용하여 3차원 유한요소해석을 실시하였다.

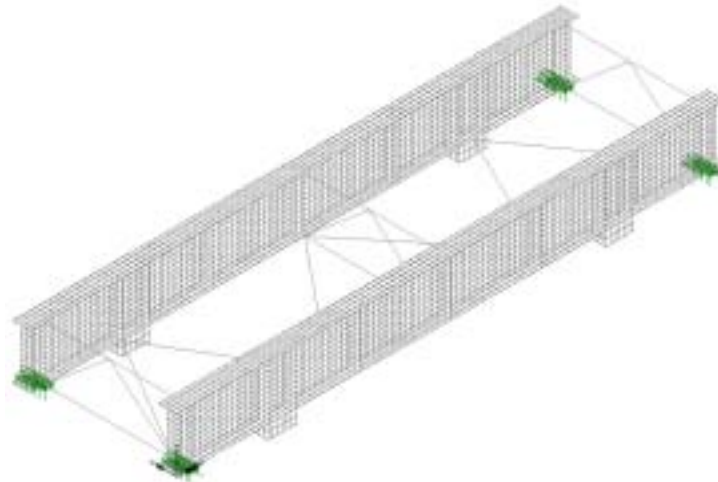


Fig. 3 유한요소해석 모델링

Fig. 2의 시험체에 대한 유한요소해석 모델에서 플레이트 거더 부분은 4절점 Shell요소를 사용하였으며, 종리브와 브레이싱은 Frame요소를 사용하여 모델링하였다. 또한, 실제 시험체에서의 정착단과 주형의 하부플랜지는 일체가 아닌 고장력볼트만에 의해서만 강결되어 있는 점을 고려하여 정착단과 정착단 주형 하부플랜지의 볼트 구멍 주위의 일정 면적만으로 강결시켰다.

일반적으로 외부후긴장 과정에서 긴장력에 따른 예상 도입 응력을 다음 식 (1)을 이용하여 계산한다.

$$f = \frac{P}{A} \pm \frac{Pe}{I} y \quad \text{식 (1)}$$

식 (1)에서 P는 적용 긴장력, A는 합성 단면적, I는 합성단면 2차모멘트, e는 합성보 중립축에서 긴장재까지의 수직거리, y는 중립축에서 합성보 상·하단까지의 거리이다. 시험체에서 거더당 외부 후 긴장력 9.8 kN을 적용할 경우 예상되는 지간 중앙부 하부 플랜지 도입 압축응력을 정리하면 Table 4와 같다.

Table 4. 중앙 하부 플랜지 압축 응력 (긴장력 : 거더당 9.8kN)

구 분	총 자중(kN)	재료역학개념 ⁽¹⁾ (MPa)	유한요소 해석 (MPa)	$\left(\frac{(1)}{(2)} \times 100\right)$ (%)
무도상 시험체	23.4	1.28	1.34	95.5

Table 4에서 보이는 것과 같이 재료역학개념에 의한 결과가 유한요소해석의 결과와 5%미만의 오차범위를 보이는 것으로 나타났다.

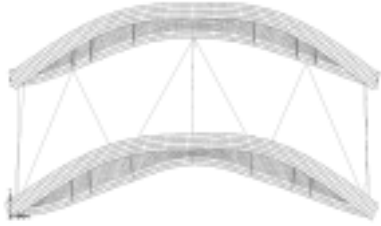

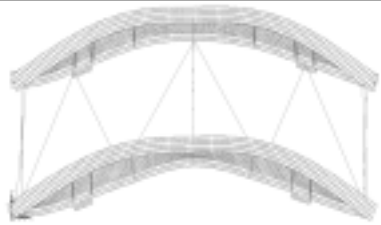

외부 후긴장 보강 공법 적용에 따른 정·동적거동 분석에 있어서 본 연구에서는 전술한 바와 같이 유한요소해석을 수행하였으며, 그에 따른 예상 거동을 분석하였다.

3.2 고유진동수 검토

기존 강철도 판형교에 정착단을 설치함으로써 증가하는 질량에 대한 영향을 알아보기 위해 고유치 해석에 의한 고유진동수를 구하였다. Fig 4는 고유치 해석결과 얻어진 모드형상을 나타낸 것이다.

모드형상을 비교해본 결과, 무도상 관형교의 경우에는 상부구조의 질량 및 횡방향 강성이 작기 때문에 횡방향 모드가 1차 모드로 나타났으며 2차 모드는 횡방향 비틀림 모드로 나타났다. 유한요소해석 결과 무도상 관형교의 1차 모드 고유진동수는 25.48Hz, 직선보강을 한 무도상 관형교의 경우에는 25.45Hz로 나타났으며 2차 모드에서는 보강을 한 관형교의 고유진동수가 0.11Hz 크게 나타났다. 따라서 외부 후진장 보강이 고유진동수 변화에 미치는 영향은 극히 미비한 것으로 나타났다.

Table 5. 무도상 관형교의 고유치 해석

무도상		
	Mode I : 25.48 Hz	Mode II : 42.80 Hz
무도상 + 보강		
	Mode I : 25.45 Hz	Mode II : 42.91 Hz

4. 실험 결과 및 분석

4.1 정적 응력 및 변위 검토 결과

변형율계이지 ch 3으로부터 400kN의 하중재하시 무도상 관형교의 하부플랜지 응력은 42MPa로 나타났으며, 직선보강시 응력은 18MPa로 나타났다. 이에 따라 주형 하부플랜지의 허용응력의 18%만큼의 긴장력 도입시 무보강 시험체의 경우보다 약 50%정도 감소됨을 알 수 있었으며, 무도상 시험체 중앙의 변위를 비교해본 결과 직선보강시가 무보강시보다 적게 나타났다.

무도상 관형교 시험체의 중앙부 하부플랜지의 응력 및 변위를 측정한 결과를 Fig 5~6에 나타내었다.

Fig 5. 중앙 하부플랜지 응력 (긴장력: 207.15kN)

Fig 6. 중앙 하부플랜지 변위 (긴장력: 207.15kN)

4.2 정착단이 설치된 주형의 복부 검토 결과

외부 후 긴장력 도입에 따른 전단부의 거동을 분석하기 위해 로젯게이지를 Fig 2와 같이 설치하였다. 실험 결과, 긴장 과정에서 수직 변형이 거의 발생하지 않는 것으로 나타나고 있으며 사인장 변형이 상대적으로 높은 것으로 분석되었으나, 전체적으로 정착단 주변의 주형 복부에는 긴장 과정에서 높지 않은 변형이 발생하는 것으로 나타났다. 또한, 최대 긴장력 276.2kN 작용시 전단응력은 26.25MPa이었으며, 유한요소해석에 의한 전단응력은 29.4MPa로 분석되었다.

(a) 긴장력에 따른 전단부 검토

(b) 외부하중에 따른 전단부 검토

Fig 7. 전단부 거동

4.4 정착단 검토 결과

외부 후긴장에 있어서 일차적으로 높은 긴장력을 받는 부분은 정착단으로서 정착단과 고장력 볼트로 연결된 주형 하부플랜지는 볼트구멍에 의한 단면적 감소와 추가적인 외력에 의해 볼트구멍 주변에 높은 국부 응력이 발생한다는 것이 기존 연구에서 발표되었다.⁽⁶⁾ 따라서, 본 연구에서는 긴장력 도입에 따른 정착단 주형 하부플랜지의 거동을 분석하기 위하여 Fig 1 (c)와 Fig 2에서와 같이 볼트구멍으로 인한 단면 감소로 높은 집중응력의 발생이 예상되는 부분에 변형률 게이지를 설치하여 측정하였다. 또한, 유한요소해석모델을 이용하여 긴장력 증가에 따른 정착단 주형 하부플랜지의 교축방향 응력을 분석하였으며, 그 결과를 Fig 8에 나타내었다.

Fig 9 (a)의 실험결과를 보면, 동일 교축방향 위치임에도 긴장력의 증가에 따라 변형률게이지 ch 9~11번의 차이가 증가하고 있는 것으로 나타났으며 주형 중앙부에 가까운 변형률 게이지에서 응력이 더

크게 나타났다. 이는 긴장력을 더욱 증가시킬 경우 확연히 차이가 날 것이며 실제 시공에 있어서 이러한 거동을 고려하여야 할 것이며 볼트 구멍에 의한 부분적 응력집중 및 정착단과 주형 하부플랜지의 볼트 연결에 의한 복합적인 거동에 대한 연구가 필요할 것으로 판단된다. 또한, Fig 9 (b)의 분석결과, 일정한 긴장력하에서 정적재하시험을 하였을 경우 정착단 하부플랜지의 응력변화가 일정하게 증가하지만 초기 변형율의 차이에 의해 부위별 발생응력에 차이가 나타나는 것으로 분석된다.

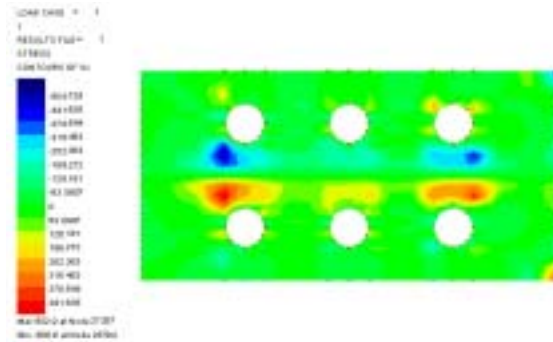
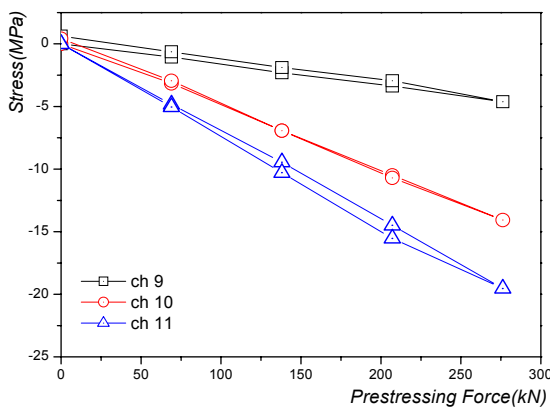
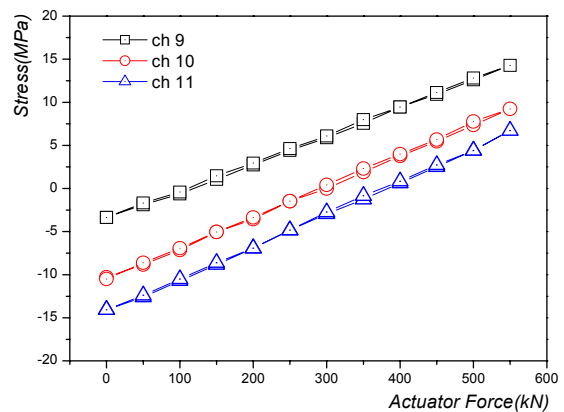


Fig 8. 정착단 주형 하부플랜지 해석 결과 (긴장력: 9.8kN)



(a) 긴장력에 따른 정착단 검토



(b) 외부하중에 따른 정착단 검토 (긴장력 200kN)

Fig 9. 정착단 주형 하부플랜지 검토 결과

6. 결론

본 연구는 외부 후긴장 보강이 강철도 관형교의 거동 변화에 미치는 영향을 실험 및 해석적으로 분석하였으며, 연구 결과를 정리하면 다음과 같다.

- (1) 무도상 관형교 유한요소해석 결과, 외부 후긴장 보강이 고유진동수의 변화에 미치는 영향은 매우 작은 것으로 분석되었다.
- (2) 무도상 관형교에 외부 후긴장 보강공법의 적용은 주형 중앙부 하부플랜지의 응력 및 처짐에 대한 뚜렷한 보강효과가 있는 것으로 분석되었다.
- (3) 정적 재하시험에 의한 각 부재의 응력검토 결과, 외부 후긴장 보강공법은 무도상 관형교의 주요 부재에 미치는 영향이 미소한 것으로 분석되었다.
- (4) 본 연구에서 사용한 정착단과 주형의 연결방식은 긴장력 도입에 따른 불균형적인 미끄러짐 현상 등에 의해 하부플랜지의 동일 교축방향 위치에서 편향된 응력이 발생하는 것으로 나타났으며 이에 대한 추가 연구가 있어야 할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 한국철도기술연구원 (2002), 판형교의 보수보강 및 유도상화 기술 개발
2. 박용걸 (2000), 외부 후긴장 공법의 적용에 따른 공용중인 판형교 거동의 실험적 연구, 토목학회 학술집
3. 박용걸, 박영훈, 강덕만 (2002), 합성형교의 외부 후 긴장력 횡분배 거동에 대한 실험 및 해석적 연구, 대한토목학회논문집, 제 22권, 6-A호, pp 1469-1479.
4. 백범렬 (2001), 외부 후긴장에 따른 합성보 거동에 대한 실험적연구
5. 박영훈, 박용걸, 전준창 “외부 후 직선긴장 보강공법적용에 따른 합성형의 동적거동” 대한토목학회 논문집, 2003
6. Hamid Saadatmanesh, Pedro Albrecht “Experimental Study of Prestressed Composite Beams”, ASCE, Vol. 115, No. 9, 1989, pp. 2348~2363.
7. Baidar Bakht, and Leslie G. Jaeger : Bridge Analysis Simplified, Mcgraw-Hill Book, 1985, pp 1-149, 159-196.
8. E. C. Hambly : Bridge Deck Behavior, E&PN SPON, 1991, pp 1-221.
9. Robert D. Cook : Finite Element Modelling for Stress Analysis, John Willy & Sons, Inc., 1994. pp. 1-40, 105-144.
10. M. S. Troitsky, D. Dc, “Prestressed Steel Bridge Theory and Design” VNR, 1990
11. 최정열 (2004), 강철도교에 대한 외부 후긴장 보강공법의 적용에 관한 연구
12. 박용걸, 최정열, 강덕만 (2005) 강철도교에 대한 외부 후긴장 보강공법의 적용에 관한 연구, 한국강구조학회 학술대회논문집, 제16권 1호, pp486-491
13. 오지택, 김현민, 박찬 (2003), 무도상판형교의 횡방향 동적거동특성 분석을 위한 실험적 연구, 한국철도학회 추계학술대회
14. 오지택, 최진유, 김현민 (2002), 무도상판형교의 고유진동특성에 관한 연구, 한국철도학회 추계학술대회