



부모멘트부의 효율성을 고려한 외부강선으로 보강된 콘크리트 거더 연속교의 거동

한만엽¹⁾ · 조병두¹⁾ · 전세진^{1)*}

¹⁾아주대학교 건설시스템공학과

Structural Behavior of Concrete Girder Continuous Bridges Strengthened with External Tendons Considering the Efficiency at Negative Moment Region

Man-Yop Han,¹⁾ Byeong-Du Cho,¹⁾ and Se-Jin Jeon^{1)*}

¹⁾Dept. of Civil Systems Engineering, Ajou University, Suwon 443-749, Korea

ABSTRACT An effective method was proposed in this study which can improve the strengthening effect of continuous girder bridges by external tendons. The improvement of the proposed strengthening method in comparison with conventional methods was analyzed by applying equivalent load concept. In order to verify the strengthening effect, the enhancement of load-carrying capacity achieved by external prestressing was investigated through the test of continuous beams that were or were not strengthened by the external prestressing. The continuous beams were fabricated by making the deck slab continuous according to general construction practice of an actual concrete girder bridge. The test results showed that the deflections and strains of the strengthened beam were significantly reduced when comparing with those of the non-strengthened beam for the same level of external loads, and the stiffness of the member increased by strengthening. In particular, it was verified that the proposed method can effectively reduce the tensile stresses of the deck caused by negative moment at the intermediate supports of a continuous bridge.

Keywords : external prestressing tendon, strengthening method, continuous bridge, concrete girder, equivalent load concept

1. 서 론

다경간 콘크리트 거더교는 주행성 등을 향상시킬 목적으로 경간과 경간 사이의 중간 지점부를 연속화시키는 경우가 많다.^{1,2)} 이러한 연속화는 크게 거더와 바닥판 모두를 연속화시킨 경우 및 바닥판만을 연속화시킨 경우로 나눌 수 있다. 거더의 연속화를 구현하기 위한 몇가지 방법이 사용되고 있으나, 한 예로 연속화되는 거더들을 관통하는 연속 텐던을 배치하고 인접한 2개 거더 사이의 공간에 철근 이음을 두고 현장타설 콘크리트로 충전하는 등 기술적으로 어려운 작업을 수반하는 경우도 많다. 한편 시공 편의를 위하여 바닥판 부분만 연속화시킨 경우 중간 지점부 상단에서 발생하는 과도한 인장응력 때문에 바닥판에 균열이 발생하여 교량의 내구성, 유지관리 등

에 불리한 영향을 미친 사례가 보고되고 있다.^{1,3)} 이러한 중간 지점부 바닥판의 열화 현상에 대처하기 위한 여러 가지 방안들이 제시되어 왔지만, 그 중에서도 외부강선을 이용한 지점부의 보강은 유력한 방법 중 하나로 인식되어 왔다. 외부강선 보강 공법은 노후된 교량의 보강이나 설계활하중 증가에 따른 기존 교량의 내하력 향상을 위하여 빈번히 적용되어 왔으며 강교량 및 콘크리트교량, 또는 단순교 및 연속교 모두에 대해 신속하고 경제적인 보강 방법으로 인식되어 왔다. 그간 콘크리트 거더교의 외부강선 보강 효과에 대한 이론 및 실험적 연구, 외부강선으로 보강된 콘크리트 거더교의 해석 알고리즘 개발, 효율적인 외부강선 정착장치의 개발 연구 등이 국내외에서 수행되어 왔으며 자세한 사항은 2.1절에서 분석하였다.

그러나 국내에서 수행되었던 기존 관련 연구는 대부분 단순교에 관한 것이었으므로,^{4,6)} 이 연구에서는 콘크리트 거더 연속교의 효율적인 외부강선 보강 방법에 대해 고찰해 보았다. 기존 사례를 살펴보면 연속교임에도 불구하고 단순교의 외부강선 보강 시와 유사하게 강선을 배치하여 보강에 따른 효율성이 저하되거나 중간 지점부에

*Corresponding author E-mail : conc@ajou.ac.kr

Received April 18, 2013, Revised July 24, 2013,

Accepted July 27, 2013

©2013 by Korea Concrete Institute

오히려 불리한 효과를 발생시키는 경우가 있었다. 또한 일부 공법에서는 비록 연속교의 전 경간에 걸친 연속 강선을 긴장하는 등 연속교의 구조적 특징을 반영하여 보강했지만, 중간 지점부에서 요구되는 프리스트레스를 기준으로 강선을 긴장한 관계로 거더의 경간 중앙부에는 필요 이상으로 과도한 프리스트레스가 도입되는 문제점도 발견된다.^{7,8)}

이와 같은 문제점을 해결하기 위하여 효율적인 외부강선 보강을 위한 강선의 배치 형태, 정착구로서의 브라켓의 활용 및 실제 필요한 보강량 산정을 위한 실험 및 해석적 연구가 선행된 바 있다.^{9,10)} 이 연구에서는 이러한 선행 연구를 더욱 발전시켜 연속교 지점부의 부모멘트에 의한 바닥판의 과도한 인장응력을 효율적으로 제어할 수 있는 개선된 외부강선 보강 공법을 제안하였다. 제안된 공법의 타당성을 실험을 통하여 검증해 보고자 T형 단면을 가진 축소모델로 총길이 6.8 m의 2경간 연속교 2개를 제작하였으며, 이 때 실 교량에서 빈번히 사용되는 시공법과 동일하게 바닥판을 연속화시켰다. 이러한 실험체에 대한 실험을 통하여 외부강선 보강에 따른 처짐 및 변형의 감소 효과를 고찰하고 내하력 향상 효과를 파악해 보았다.

2. 연속교의 외부강선 보강

2.1 기존 연구

이 절에서는 기존 연구 동향을 몇가지 기준으로 분류하여 보았다. 먼저 외부강선으로 보강된 콘크리트 보의 거동을 몇가지 변수를 가지고 실험적으로 살펴본 연구가 있었다.^{4,6,11,12)} 앞서 언급하였듯 이러한 기존 실험은 주로 단순교가 주류를 이루고 있다는 한계점이 있으나, 참고문헌 12는 국내에서는 드물게 연속교를 다루었다는 차별점이 있다. 한편 외부강선이 배치된 콘크리트 보의 거동은 일반적인 내부 텐던이 배치된 경우와 큰 차이가 있으므로 이를 올바르게 해석할 수 있는 합리적인 알고리즘을 개발하려는 연구가 이루어졌다.¹³⁻¹⁵⁾ 일부 연구에서는 노후화되거나 내하력 증진이 필요한 실 교량을 외부강선으로 보강하고 그 거동을 관찰하였다.¹⁶⁻¹⁹⁾ 이러한 사례 분석 또한 단순교의 경우가 많지만 참고문헌 19는 연속교의 보강 사례를 다루었다는 특징이 있다. 마지막으로 일부 연구에서는 기존 방법보다 향상된 외부강선 보강 공법을 제안하고자 하였으며,^{20,21)} 특히 참고문헌 21에서는 외부강선을 부분적으로 이용한 효율적인 연속화 기법을 제안하였다.

2.2 제안된 시스템

연속교의 외부강선 보강 장치의 구성은 일반적으로 Fig. 1(a) 또는 (b)와 같으며, 이 중 일부 장치는 단순교의

외부강선 보강에 사용되는 장치를 준용할 수 있다. 여기에서 새들(saddle)은 각 경간 중앙부에서 외력에 의한 정모멘트에 대응하여 상향력을 작용시키기 위해 설치하는 것이고, 디비에이터(deviator)는 중간 지점부 부근에서 강선의 방향을 전환시키는 역할을 한다. 정착장치(anchorage)는 외부강선을 정착하기 위한 것이며, 만약 거더 단부에 위치할 경우 단부 정착장치가 된다. 이러한 외부강선용 정착장치는 마찰지지, 지압지지, 전단지지, 복합지지 방식 등으로 분류할 수도 있다. 외부강선은 일반적으로 코팅하거나 튜브로 둘러싸서 외부 손상으로부터 보호하는 것이 바람직하다.

일반적으로 연속교에서는 경간 중앙부보다 중간 지점부에서 더 큰 휨모멘트가 발생하게 된다. 예를 들어 한 경간의 길이가 l 인 2경간 연속교에 w 의 크기를 가진 등분포하중이 작용할 경우 중간 지점부에서는 $-wl^2/8$ 의 부모멘트가 발생하는 반면 경간 중앙부에서는 $9wl^2/128$ 의 정모멘트가 발생한다. 즉, 대략적으로 중간 지점부에서는 경간 중앙부보다 2배에 가까운 크기의 휨모멘트가 발생한다. 따라서 이러한 부모멘트를 일부 상쇄하여 교량을 보강하고자 연속교 전 경간에 걸쳐 외부강선을 배치할 경우 경간 중앙부에는 과도한 프리스트레스가 도입될 우려가 있다.^{7,8)}

따라서 이 연구에서는 이러한 기존 외부강선 보강 공법의 단점을 개선할 수 있는 시스템을 제안하였다. 연속교의 외부강선 보강 시 가장 중요한 사항은 중간 지점부의 부모멘트에 효과적으로 대응할 수 있는 방안을 도출해 내는 것이라는 점에 착안하여 Fig. 1(c)와 같은 시스템을 도출하였다. 기존에는 Fig. 1(a)³⁾ 또는 Fig. 1(b)와 같은 방식이 많이 사용되었는데, Fig. 1(a)는 단순교의 보강 시와 동일한 방법을 적용한 것으로서 뒤의 등가하중개념에 의한 분석에서 보듯 중간 지점부의 거더나 바닥판에 불리한 영향을 유발할 우려가 있다. 한편 Fig. 1(b)는 비록

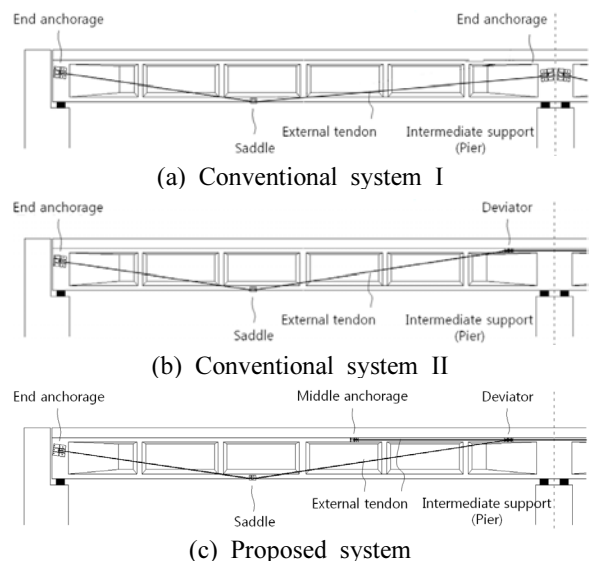


Fig. 1 Strengthening scheme of a continuous bridge with external tendons

연속 강선을 배치하여 중간 지점부의 보강도 함께 고려하는 등 연속교의 특징을 반영하기는 하였으나, 경간 중앙부 보강을 기준으로 긴장력을 산정할 경우 중간 지점부의 보강 효과가 미흡할 우려가 있다. 반대로 중간 지점부 보강을 고려하여 긴장력을 도입하면 경간 중앙부에 과도한 긴장력이 도입될 가능성이 있다. 한편 Fig. 1(c)의 제안된 시스템은 Fig. 1(b)의 기존 시스템과 비교할 때 단부 정착장치 이외에 중간 지점부에 추가적인 프리스트레스를 효율적으로 도입하기 위해 필요한 중간 정착장치가 배치된다는 큰 차이점이 있다. 이 경우 전 경간에 걸친 외부강선에는 경간 중앙부의 정모멘트를 목표량만큼 상쇄할 정도의 프리스트레스만을 가하고, 중간 지점부에는 부모멘트의 목표 상쇄량 대비 부족한 만큼의 추가 외부강선을 배치하여 긴장한 후 중간 정착장치에 정착한다는 것이 주요 착안점이다.

경제성 측면에서 제안된 시스템을 기존 시스템과 비교하자면 정착장치 또는 디비에이터, 그리고 강연선이 추가로 필요하거나 강연선의 추가적인 긴장 작업이 필요할 수도 있으므로 시공비가 다소 증가하는 측면은 있지만, 구조적 효율성의 증진을 통해 이를 상쇄할 수 있다고 생각된다.

제안된 시스템을 다시 나타내면 Fig. 2(a)와 같다. 이는 교량 전체 길이에 걸쳐 절곡되어 배치된 강선 1과는 별도로 중간 지점부에 직선 형태의 강선 2를 추가 배치한 것이다. 만약 Fig. 2(a)의 강선 1 및 2의 긴장력이 동일하다면 Fig. 2(b)와 같이 강선 배치를 바꾸어도 Fig. 2(a)와 동일한 외부강선 보강 효과를 산출할 수 있다. Fig. 2(b)는 강선 1 및 2가 중간 지점을 기준으로 서로 대칭이 되도록 배치한 것이다. 강선 1 및 2의 긴장력이 동일하다고 가정할 때 Fig. 2의 두가지 경우 모두 중간 지점부에는 기타 부분에 비해 2배의 긴장력이 도입되어 연속교의 중간 지점부 부모멘트에 적극적으로 대응할 수 있다는 장점이 있다. 한편 Fig. 2(b)와 비교할 때 Fig. 2(a)는 직선 형태의 강선 2의 긴장력을 강선 1과는 별도로 조절할 수 있으므로 중간 지점부에 도입되는 긴장력을 임의로 조절 가능하다는 차이점이 있다. 이 연구에서는 Fig. 2(b)의 형태를 취하였다.

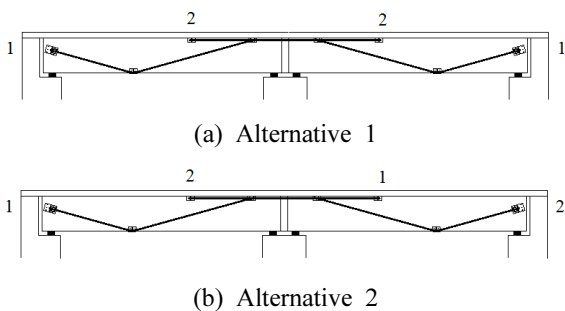


Fig. 2 Arrangement of external tendons for strengthening of a continuous bridge (proposed system)

2.3 외부강선 보강 설계이론

교량의 외부강선 보강을 실시할 경우 적절한 보강량을 결정하기 위해서는 먼저 교량의 내하력이 평가되어야 하며, 그러한 평가 결과 및 구조해석을 통하여 보강 모멘트를 산출하여야 한다.^{22,23)} 기존 구조물을 보강하는 이유는 매우 다양하며 이를 종류별로 분류하면 설계오류나 시공 오차에 대한 보강, 설계활하중 증가 등에 따른 내하력 증진을 위한 보강, 손상된 교량의 내하력 회복을 위한 보강 등으로 구분할 수 있다.

힘에 대한 내하력 회복 내지 증진을 위하여 교량을 보강하는 경우, 강도설계법에 의하면 다음과 같은 식으로 주요 단면의 소요 보강 모멘트를 구할 수 있다.

$$\phi(M_n^B + M_{rep}) \geq M_u \quad (1)$$

여기서, M_n^B 는 보강 전 내하력이 저하되어 있는 부재의 공칭휨강도이며, M_{rep} 는 보강 모멘트를 의미한다. 또한 ϕ 는 강도감소계수, M_u 는 계수하중에 의한 휨모멘트이다. 식 (1)로 계산된 소요 보강 모멘트를 구현할 수 있도록 외부강선을 배치하고 소정의 긴장력을 도입하게 된다.

2.4 외부강선의 긴장력 산출

강선이 절곡배치된 정모멘트 구간, 즉, 새들 부위를 기준으로 할 때 소요 긴장력은 식 (2)와 같은 상향력 계산식을 통해 산출할 수 있다. 즉, 상향력 U 는 Fig. 3과 같이 양방향 긴장력의 수직분력의 합으로 나타낼 수 있다.

$$U = P(\sin\theta_1 + \sin\theta_2) \quad (2)$$

뒤에서 언급하듯 외부강선으로 보강되지 않은 연속보 실험체의 실험에서 얻은 최대하중(380 kN)에 대하여 26%의 내하력 향상을 목표로 할 경우 상향력은 약 100 kN이 필요하므로 외부강선 보강 시 절곡된 강선의 긴장력 P 는 식 (2)에서 158 kN으로 계산된다. 이 때 강선은 보의 양쪽 측면에 배치되므로 한쪽 측면에 배치된 강선의 긴장력은 79 kN이 된다. Fig. 2(b)와 같은 시스템을 적용할 때 중간 지점부에서는 강선이 2점으로 겹쳐져 있는 관계로

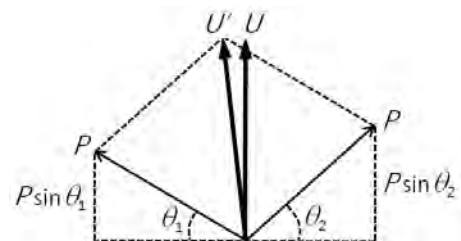


Fig. 3 Upward force exerted at a harped point of an external tendon

2배의 긴장력인 316 kN이 도입되게 된다. 이 연구에서는 외부강선으로 직경 12.7 mm의 SWPC 7B 강연선 4가닥을 사용하여 소정의 긴장력을 도입하였다.

2.5 등가하중개념을 통한 분석

프리스트레스트콘크리트 구조물을 해석할 때 유용한 방법 중의 하나가 하중평형개념 또는 등가하중개념이다.²⁴⁻²⁷⁾ 이는 프리스트레스트의 효과를 외력으로 치환하여 다루는 것으로서, 그 효과를 일목요연하게 살펴볼 수 있다는 장점이 있다. 등가하중은 긴장재의 절곡부나 정착부에서 발생하는 집중하중 및 곡선부에서 발생하는 분포하중으로 분류할 수 있다. Fig. 4는 Fig. 1의 각각을 등가하중시스템으로 치환한 것이다. Fig. 2에서 강선 1 및 2의 긴장력이 동일할 경우 Fig. 2(a) 및 2(b)는 동일한 등가하중시스템인 Fig. 4(c)를 산출하게 된다. 정착부의 등가집중하중은 그 크기가 긴장력과 동일하고 강선의 축방향을 향하게 되며, 강선 절곡부의 등가집중하중은 Fig. 3과 같은 합력의 크기 및 방향을 따르게 된다.

Fig. 4(a)와 같은 기존 시스템의 결정적인 단점은 등가 집중하중 C가 발생한다는 데에 있다. 이는 중간 지점부에서 연속화되어 있는 거더 또는 바닥판을 양쪽으로 잡아당겨 과도한 인장응력을 발생시킬 여지가 있어 연속교에서는 지양해야 할 보강 방법이다. Fig. 4(b)의 기존 시스템은 제안된 시스템인 Fig. 4(c)와 비교할 때 중간 지점부에 추가의 보강 효과를 주는 등가집중하중 E가 작용하지 않는다는 단점이 있다.

Fig. 4(b) 및 4(c)에서 등가집중하중 B는 각 경간에서 하향으로 작용하는 자중을 포함한 고정하중 및 활하중을 일부 상쇄하는 효과를 가지며, 특히 뒤에서 언급할 본 실험과 같이 경간 중앙부에 하향의 집중하중 형태로 작용

하는 외력을 상쇄하는 데 효과적이다. 이를 통해 경간 중앙부의 정모멘트와 더불어 중간 지점부의 부모멘트를 동시에 감소시킬 수 있다. 2.4절에서 분석하였듯, 이 실험체에서 하중 B는 그 수직성분이 약 100 kN이 되는 것을 목표로 하였다. Fig. 4(b) 및 4(c)의 등가집중하중 D는 디비에이터에서 강선이 절곡되는 각도를 작게 함으로써 그 크기를 작게 조절할 수 있다. D의 성분 중 수평성분은 중간 지점부에 압축응력을 작용시켜 유리하지만, 수직성분은 중간 지점부에 부모멘트를 작용시켜 불리하다. 한편 등가집중하중 E는 Fig. 4(b)의 기존 시스템에는 없고 Fig. 4(c)와 같이 제안된 시스템에서 추가된 것으로서, 이러한 하중 E가 중간 지점부의 부모멘트 및 이것이 유발하는 바닥판 슬래브의 인장응력에 대해 추가적인 저항 능력을 주고 있음을 알 수 있다. 즉, 중간 정착장치 위치에 작용하는 하중 E는 Fig. 5와 같은 T형 단면의 도심보다 위에 작용하고 있다. 따라서 하중 E는 단면의 도심에 작용하는 등가집중하중 및 등가의 정모멘트로 치환할 수 있으므로, 중간 지점부의 부모멘트 중 일부가 이러한 정모멘트에 의해 상쇄되고 나머지 부모멘트에 의한 바닥판의 인장응력 또한 이러한 등가집중하중에 의한 압축응력에 의해 상당부분 상쇄될 수 있음을 알 수 있다. 이처럼 하중 E를 치환한 등가집중하중은 158 kN의 압축력이며, 단면 도심으로부터의 편심을 고려할 때 등가 정모멘트는 17 kN·m로 계산된다. 한편 부재 전 경간에 걸쳐 양단의 등가집중하중 A의 수평성분에 의한 압축력이 작용하여 부재의 축방향 인장응력을 감소시켜 준다는 점은 Fig. 4에 제시된 모든 시스템에서 공통된 사항이다.

상기와 같은 등가하중개념을 Fig. 4(b) 및 4(c)에 적용하여 구조해석을 실시해보면 외부강선 보강에 의해 중간 지점부 바닥판에 도입되는 압축응력은 제안된 시스템이 기존 시스템보다 37% 정도 증가하므로, 외력 작용 시 제안된 시스템이 바닥판의 균열 방지에 좀 더 효과적임을 알 수 있다.

이처럼 등가하중개념을 통하여 제안된 외부강선 보강 시스템의 효과를 좀 더 명확하게 분석할 수 있다.

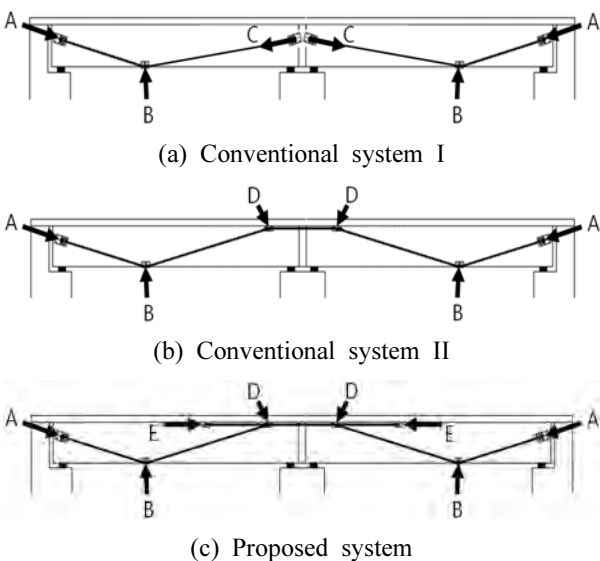


Fig. 4 Equivalent load system by strengthening with external tendons

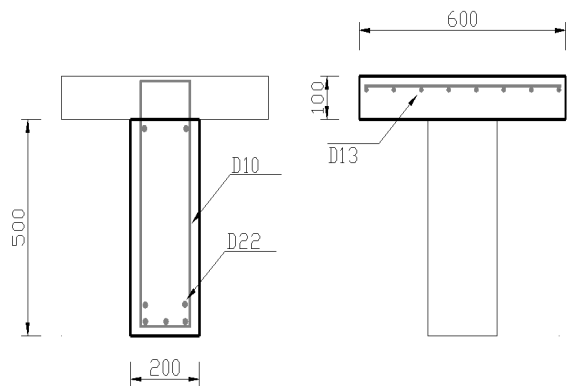


Fig. 5 Section and reinforcement arrangement of the test specimen (unit: mm)

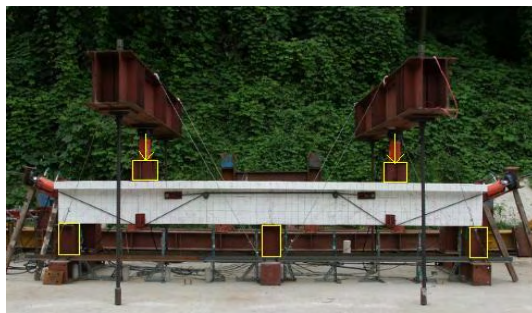
3. 외부강선 보강 검증실험

3.1 실험 개요

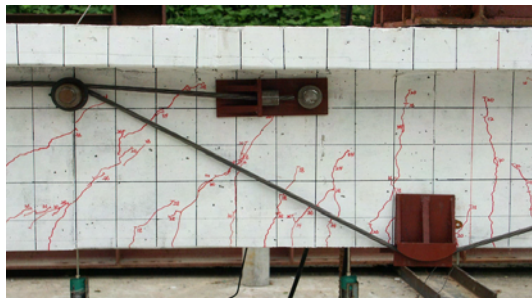
이 연구에서는 총길이 6.8m의 2경간 연속보 휨실험을 통하여 연속보의 내하력을 파악한 후 연속보의 외부강선 보강 실험을 통해 보강과 무보강에 따른 내하력 차이를 비교하였다.

제작된 실험체는 콘크리트 거더 및 바닥판 슬래브로 구성된 합성거더이다. 콘크리트 설계기준강도는 27 MPa, 철근 항복강도는 400 MPa이며, 단면 제원 및 배근도는 Fig. 5와 같다.

Fig. 6은 외부강선으로 보강된 연속보 실험체 및 하중



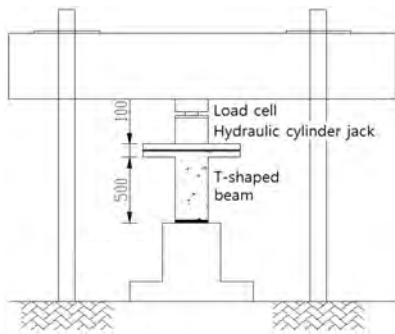
(a) Complete view



(b) Deviator, middle anchorage and saddle



(c) Arrangement of external tendons and loading points



(d) Loading system

Fig. 6 Test specimen and loading system (unit: mm)

재하 장치를 보여주고 있다. 단부 정착장치는 Fig. 1, 2 및 4와 같이 거더 측면에 부착할 수도 있지만, 실험 시에는 편의를 위하여 Fig. 6과 같이 거더 단부에 설치하였다. 다만 실 구조물에서 교대와 거더 단부 사이의 간격이 비교적 좁을 경우 이 실험에서와 같이 거더 단부에 단부 정착장치를 설치하고 긴장작업을 실시하기는 어려울 것으로 판단된다. Fig. 6(b)는 실험체에서 디비에이터, 중간 정착장치, 새들의 모습을 확대하여 보여주고 있다. 외부강선 보강 실험에 사용된 정착장치는 실험체의 크기와 강선 긴장력에 부합하도록 별도로 제작되었다. Fig. 6(c)에서 보듯이 강선 1 및 2를 연속보의 양단에서 각각 긴장하였으므로, 강선 1 및 2가 겹쳐지는 중간 지점부 부근의 일부 구간에는 2배의 긴장력이 도입될 수 있다는 장점이 있다. Fig. 6(d)와 같이 실린더 형상의 유압잭으로 하중을 가하면서 로드셀로 하중값을 측정하였다.

3.2 실험 순서

실험은 외부강선으로 보강되지 않은 연속보 실험 후 외부강선으로 보강된 연속보 실험 순으로 진행되었다. 보강 실험에서는 보강되지 않은 연속보 실험에서 얻은 최대하중까지 실험체를 가력한 후 하중을 제거하고, 외부강선을 긴장하여 보강한 후 다시 최대하중까지 재가력하여 무보강 시와 보강 시의 측정값들을 서로 비교하였다. 여기에서 최대하중은 이 실험에서 사용한 가력 장치의 용량상 가능한 최대의 하중을 의미한다. 이 때 강선의 긴장력은 앞서 실시한 계산에 근거하여 80 kN까지 도입하였다.

3.3 계측 계획

이 실험의 계측기 설치 현황은 Fig. 7과 같다. 실험체의 처짐을 계측하기 위하여 연속보의 한 경간에 LVDT (Linear Variable Differential Transformer) 5개씩 총 10개를 배치하였고, 실험체의 최대 정·부모멘트가 발생하는 위치에 배근된 인장철근에는 변형률 게이지를 각각 2개씩 총 6개 부착하여 보강에 따른 효과를 계측할 수 있도록 하였다. 한편, 강선에 도입되는 긴장력은 Fig. 8과 같이 T-채널 형태의 단부 정착장치와 실린더 유압잭 사이에 로드셀을 설치하여 측정하였다.

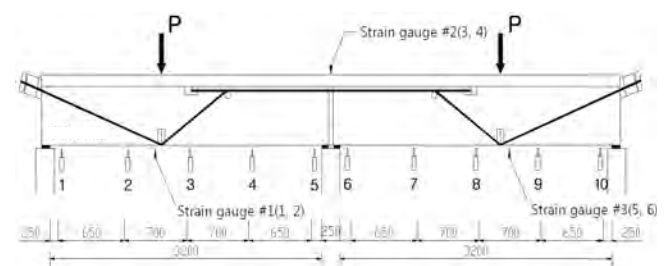


Fig. 7 Measurement of deflection and strain (unit: mm)



Fig. 8 End anchorage and measurement of prestressing force using a load cell

4. 실험 결과 및 분석

4.1 연속보 실험

Fig. 9는 하중 단계별로 연속보의 처짐 형상을 보여주고 있다. 휨균열이 진전해 감에 따라 각 경간에 300 kN이 작용하는 시점 이후 경간 중앙부에서 큰 폭으로 처짐이 증가함을 알 수 있으며, 최대 9 mm의 처짐이 발생하였다. 실제의 처짐 측정값은 이보다 컸지만 지점에 가까운 위치에서 발생한 처짐은 실험체의 지점으로 사용된 두께 18 mm의 탄성고무판이 압축되면서 발생한 것으로 판단되므로 이러한 오차를 보정한 결과이다. 즉, Fig. 7에서 지점부에 설치된 LVDT들에서 측정된 처짐값들을 평균한 후 이를 실제 계측된 처짐값에서 빼 줌으로써 보정을 실시하였다. 이는 이상적인 지점에서는 처짐이 발생하지 않는다는 점을 반영하기 위함이다.

Fig. 10은 연속보의 경간 중앙부 인장철근의 하중-변형률 곡선이다. 게이지 1, 2번은 150 kN, 게이지 5, 6번은 90 kN 부근에서 꺾이는 형상을 볼 수 있다. 이는 균열에 따른 콘크리트 단면 손실로 철근이 부담해야 하는 응력이 증가하는 데 기인한 것이다. 최대하중에서의 변형률은 각각 1582 $\mu\epsilon$ 과 1642 $\mu\epsilon$ 으로 아직 철근의 항복변형률에는 이르지 않은 값이다. Fig. 11은 중간 지점부의 바닥판에 배근된 인장철근의 하중-변형률 곡선이다. 120 kN 내외의 하중에서 곡선이 꺾여서 그 이후 변형률이 좀 더 급속히 증가함을 알 수 있다. 최대하중에서의 변형률은 1554 $\mu\epsilon$ 으로 역시 항복에 이르지 않는 것으로 나타났다.

한편 Fig. 10 및 11에서는 실험값과 이론값을 비교해 보았다. 여기에서 이론값은 보 이론 및 선형탄성해석으로 구한 것으로, I_g 로 표시한 직선은 균열이 발생하지 않은 상태에서 총단면으로 구한 단면2차모멘트로부터 유도한 것이고, I_{cr} 로 표시한 것은 인장을 받는 콘크리트를 무시한 균열환산단면2차모멘트에서 유도한 것이다.²⁸⁾ 이를 살펴보면 점선으로 표시한 일정한 하중 수준까지는 실험값이 비균열단면을 가정한 이론값과 유사한 경향을 보이다가 그 이상 하중이 증가하면 조금씩 균열단면에 의한 이론값과 가까워지는 경향을 보인다. 여기에서 콘크리트의 균열은 경간 중앙부의 경우 보 하부의 균열을, 중간

지점부의 경우 바닥판의 균열을 의미한다. 하지만 이론값과 실험값의 차이를 발생시키는 요인들이 있으며 그 중 하나는 보 이론으로 단면력, 즉 휨모멘트를 산정할 때 2개의 경간이 완전 연속인 것으로 가정하였지만 실제로는 바닥판만이 연속이므로 단면력에 차이가 발생할 수 있다는 점이다. 이 때 실제 거동이 단순보와 연속보의 중간 거동이라고 본다면 예를 들어 경간 중앙부의 휨모멘

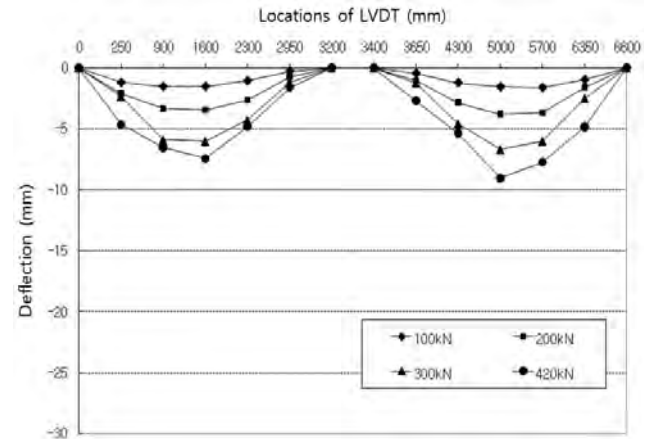


Fig. 9 Deflections of the continuous beam in each load step

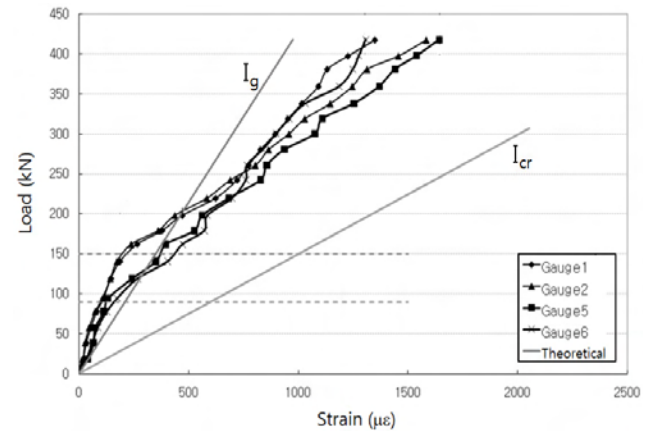


Fig. 10 Load-strain relationship of main reinforcements at mid-span (strain gauges #1 and #3)

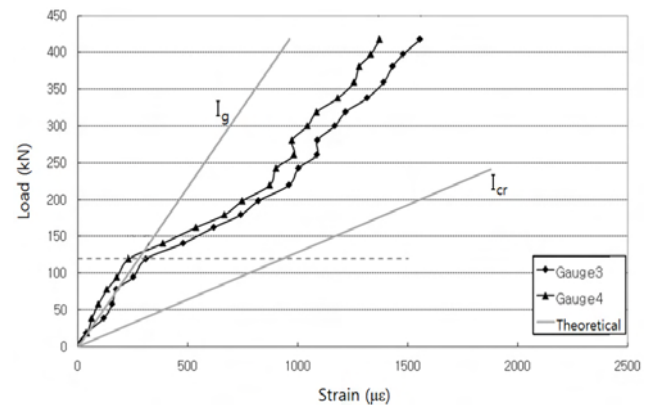


Fig. 11 Load-strain relationship of main reinforcements at intermediate support (strain gauge #2)

트 및 이에 따른 변형률은 연속보 계산에 의한 이론값보다 크게 발생할 수 있다.

4.2 연속보의 외부강선 보강 실험

Fig. 12는 실험 순서에 따른 경간 중앙부에서의 하중-처짐 곡선을 나타낸 것이다. 무보강 실험체에서 각 경간에 380 kN만큼 하중재하 시 약 19 mm의 최대처짐이 발생하였고, 하중 제거 이후에도 약 8.5 mm의 잔류 처짐이 발생하였으며, 그 후 실시한 외부강선의 긴장이 유발하는 솟음(camber)에 의해 처짐이 4.2 mm로 감소하였다. 이는 탄성고무판에 의한 처짐 오차를 보정하지 않은 측정값이다. Fig. 12에서 수직축의 (-)부분은 하중 작용방향과 반대 방향으로 작용하는 긴장에 의한 상향력(Fig. 4의 등가하중 B의 수직방향 성분)을 나타내고 있으며, 강선당 80 kN의 긴장력이 발생시키는 상향력에 의해 처짐이 감소하는 상황을 보여주고 있다. 외부강선 보강 후 다시 380 kN만큼 하중재하 시 최대처짐은 11.8 mm로 무보강 시와 비교하여 처짐이 약 38% 감소하였음을 알 수 있다. 여기에서 380 kN은 로드셀에서 읽은 하중값을 의미하며, 이 중 100 kN은 긴장에 의한 상향력을 상쇄하는 부분이고 나머지 280 kN은 추가적으로 증가한 하중을 의미한다. 여기에서 상향력 효과는 2.4절 및 2.5절에서 등가하중 개념에 근거하여 정량적으로 산정한 바 있다. 유압잭의 용량 제한으로 인해 외부강선 보강 전·후 모두 380 kN 정도까지만 재하를 실시하였다. 하지만, 만약 하중 가력에 제한이 없었다면 외부강선 보강 후에도 적어도 외부강선 보강 전에 도달했었던 Fig. 12에서의 하중값까지는 도달할 수 있으므로, 이는 결국 외부강선 긴장에 의한 상향력 효과만큼의 내하력이 증가될 수 있음을 의미한다.

Fig. 13은 Fig. 12의 그래프에서 하중을 제거하는 단계를 제외하고 외부강선 긴장 전, 중, 후의 그래프를 평행이동하여 원점부터 나타낸 그래프이다. 기울기 차이를 비교분석해 보면 외부강선 보강을 통해 부재의 강성도가 약 160% 정도 증가했음을 확인할 수 있다. 이는 외부강선의 강성도가 기존 콘크리트 단면의 강성도에 더해진 결과로 볼 수 있다. Fig. 14는 같은 크기의 최대하중인

380 kN에 대하여 지점부의 탄성고무판에 의한 처짐을 보정한 부재의 처짐 형상으로, 보강 후 최대처짐이 보강 전에 비해 약 7 mm 정도 감소하였음을 알 수 있다. 부재의 강성도는 단면적이나 단면2차모멘트와 같은 단면상수 및 탄성계수와 관련되어 있다. 구조해석 이론상 강성도가 큰 부재는 강성도가 작은 부재와 비교할 때 같은 하중에 대해 처짐, 변형률 및 응력이 감소하므로 더 큰 하중을 지지할 수 있다. 따라서 부재의 강성도가 커진다는 것은 내하력 증진 효과가 있다는 사실과 무관하지 않다. 즉, 외부강선 보강 후에는 외부강선 보강에 의한 등가하중, 즉 상향력 효과 이외에도 이러한 강성도 증가 효과까지 더해지

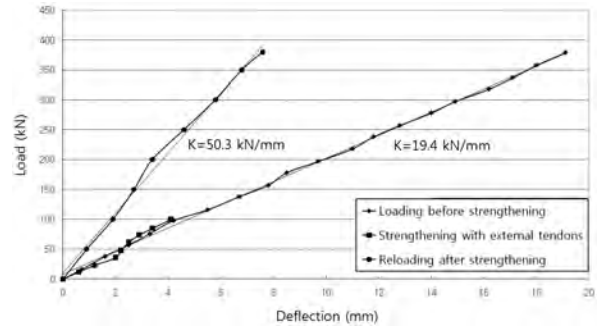


Fig. 13 Comparison of stiffness before and after strengthening with external tendons

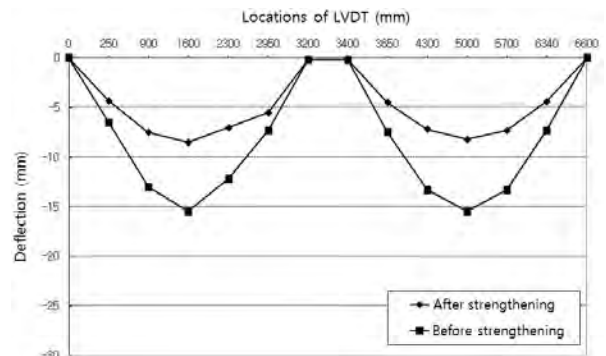


Fig. 14 Comparison of deflection before and after strengthening with external tendons

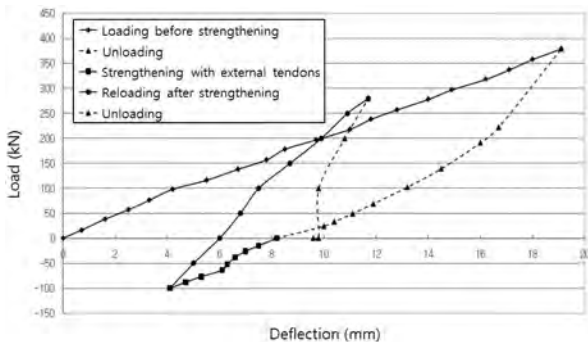


Fig. 12 Load-deflection relationship before and after strengthening with external tendons (LVDT 8)

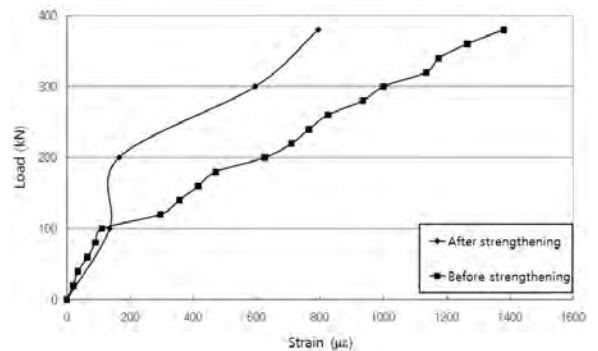


Fig. 15 Comparison of load-strain relationship of main reinforcements at mid-span before and after strengthening with external tendons (strain gauge #1)

로 내하력 증진 효과가 더욱 커져서 유리한 측면이 있다.

Fig. 15에서는 경간 중앙부의 인장철근에 대하여 보강 전·후 하중재하 시 변형률 계측값을 비교하였다. 보강 전과 보강 후의 그래프 표시값은 같은 위치의 두 게이지의 평균값을 사용하였다. 약 100 kN의 하중재하 시부터 외부강선 긴장에 의한 경간 중앙부의 보강 효과가 명확히 나타남을 볼 수 있다. 보강 전·후 최대하중에서의 변형률 차이는 약 600 $\mu\epsilon$ 으로 약 42%의 변형률 감소 효과가 있었다. Fig. 16은 중간 지점부 바닥판의 인장철근에 대하여 보강 전·후 하중재하 시 변형률 계측값의 평균값을 비교한 것이다. 약 100 kN에서부터 외부강선 보강 효과가 본격적으로 나타난 경간 중앙부와는 달리 하중재하 초기부터 지속적으로 변형률이 감소되는 등 보강 효과가 나타나고 있음을 알 수 있다. 이는 제안된 연속교 외부강선 보강 공법의 특성상 중간 지점부 부근에는 경간 중앙부에 비해 2배의 긴장력이 작용하기 때문으로, 제안된 공법은 연속교에서 가장 문제가 되는 중간 지점부의 내하력 저하에 대해 효과적으로 대처할 수 있는 방법임을 알 수 있다.

이상의 분석 결과를 두고 볼 때 외부강선 보강으로 인해 무보강 시와 비교하면 부재의 강성도가 크게 증가함과 동시에 처짐이나 변형률이 대폭 감소하는 효과를 얻을 수 있었다. 즉, 제안된 연속교의 외부강선 보강 공법은 실 교량에 적용하였을 때 소정의 보강 효과를 충분히 거둘 수 있을 것으로 판단된다.

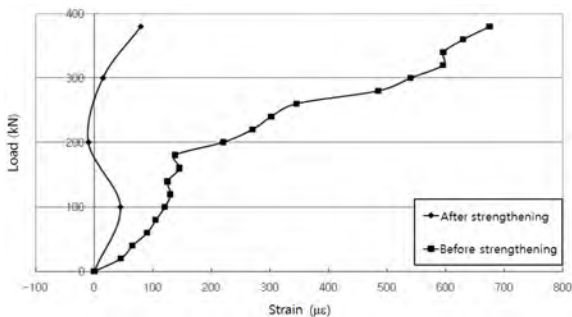


Fig. 16 Comparison of load-strain relationship of main reinforcements at intermediate support before and after strengthening with external tendons (strain gauge #2)

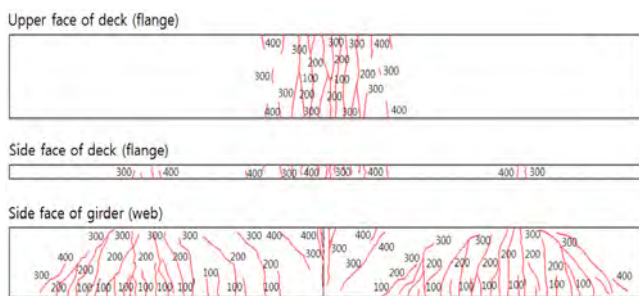


Fig. 17 Crack pattern of the continuous beam in each load step (unit: kN)

4.3 균열발생 양상

바닥판 부분을 연속화시킨 2경간 연속보 실험체의 균열 발생 양상은 Fig. 17과 같다. 초기균열은 90 kN에 경간 중앙부에서 휨균열의 형태로 발생하였다. 유사한 하중에서 중간 지점부 바닥판 상면에서도 휨균열이 발생하였으며 이러한 균열은 하중 증가에 따라 양쪽 경간 방향으로 진전되었다. 160 kN 재하 시 기존 경간 내의 휨균열은 보 높이의 중간까지 진전되었으며, 양단 지점부 부근에서도 전단에 의한 사인장균열이 발생하기 시작하였다. 300 kN 재하 시 경간 내의 휨균열은 보의 전 높이에 걸쳐 진전되었고, 지점부에서 시작된 사인장균열 또한 더욱 증가하였다. 한편, 400 kN 하중재하 시부터는 중간 지점부 부근에서도 사인장균열이 발달하였다. 중간 지점부 바닥판 상면에서 발생한 균열은 보와 보 사이의 접합면을 따라 하부로 진전되었으며 이는 바닥판을 연속화시킨 교량에서는 이 부분이 취약부가 될 수 있음을 의미한다.

한편 외부강선으로 보강한 2경간 연속보 실험체의 균열 발생 양상은 보강 이전에 재하 시에는 Fig. 17의 연속보 무보강 실험체와 같은 양상을 보였다. 외부강선 긴장 시에는 솟음이 발생하면서 경간 중앙부에서 기존에 발생한 일부 휨균열은 균열폭이 작아지며 닫히는 현상을 보였다. 또한 중간 지점부에 집중적으로 도입된 긴장력에 의해 중간 지점부 바닥판의 균열 또한 닫히는 현상을 관찰할 수 있었다. 외부강선 보강 후 재가력 시 기존의 균열이 더 이상 벌어지거나 새로운 균열이 발생하지는 않았다. 만약 외부강선 보강 후의 균열 발생 양상만을 따로 나타낸다면 Fig. 17과 같이 외부강선 보강 전에 발생한 각 균열의 해당 하중과 비교할 때 등가하중개념에 의한 상향력 효과인 약 100 kN씩 증가된 하중에서 해당 균열이 발생했을 것으로 판단된다. 특히, 중간 지점부 바닥판은 외부강선에 의해 집중적으로 보강된 관계로 만약 보강 실험체가 파괴에 도달할 때까지 재하하더라도 중간 지점부보다는 경간 중앙부에서 파괴가 선행될 것으로 예상할 수 있다. 이처럼 균열 발생 양상의 비교분석을 통해서도 외부강선 긴장을 통한 보강 효과를 파악해 볼 수 있다.

5. 결 론

이 연구에서는 교량의 내하력 향상을 위한 유력한 보강 기법인 외부강선 긴장의 효과를 실험적으로 검증해 보았다. 연속교의 경간 중앙 정모멘트부 및 중간 지점 위치 부모멘트부의 내하력을 동시에 효과적으로 증진시킬 수 있는 외부강선 배치 방법을 고안하여 적용하였다. 이를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) 일반적으로 연속교에서의 취약부는 설계하중 작용 시 경간 중앙보다 더 큰 휨모멘트가 발생하는 중간 지점부이다. 특히 거더교의 경우 시공 편의상 중간 지점부에서 콘크리트 바닥판 슬래브만을 연속화하

는 경우가 많으므로 이 부분이 취약부가 될 가능성이 더욱 크다. 이 연구에서 제안된 외부강선 배치 및 보강 방법은 경간 중앙과 비교할 때 중간 지점부에 2배의 긴장력을 도입할 수 있어 효과적이다.

- 2) 제안된 외부강선 보강 공법을 적용한 경우 이를 적용하지 않았을 때와 비교할 때 동일한 하중 크기에서 처짐 감소 효과가 38% 정도로 뛰어난 것으로 나타났다, 철근에 발생하는 변형률도 경간 중앙부 철근의 경우 42%만큼 대폭 감소되었다. 특히 중간 지점부 바닥판 철근의 변형률 감소 현상은 더욱 두드러졌다. 이는 외부강선이 부재의 강성도를 높임과 동시에 하중의 일정 부분을 분담하기 때문으로, 제안된 외부강선 배치 방식이 연속교의 내하력 증진에 효과적임을 의미한다. 이 실험에 의하면 대략적으로 경간 중앙부에서는 외부강선 배치에 의한 상향력 효과만큼 교량의 내하력 증진 효과가 있고, 중간 지점부에서는 그 이상의 효과가 있는 것으로 판단된다.
- 3) 연속보를 휨균열과 전단사인장균열이 다수 발생하는 하중 단계까지 재하한 후 하중을 제거한 상태에서 외부강선 보강 및 긴장을 실시하고 다시 동일한 하중 단계까지 재하한 결과 기존 균열이 진전되거나 새로운 균열이 발생되지 않았음을 확인하였다. 이처럼 균열 발생 양상을 통해서도 외부강선 보강 효과를 확인할 수 있었다.
- 4) 외부강선 보강 공법은 여러 가지 교량 보강 공법 중에서도 신속히 적용 가능하고 경제적인 공법으로 알려져 있다. 필요 시 강선 재긴장을 통해 추가 보강이 가능하고, 외부에서도 보강 상태를 쉽게 확인할 수 있으므로 사후 관리가 용이하다는 장점도 있다. 외부강선 보강 공법의 내하력 향상 효과를 실험적으로 검증한 이 연구는 외부강선 보강 공법의 확산 및 실용화에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

1. Expressway and Transportation Research Institute, *A Study on the Continuation Method of Precast Prestressed Concrete Girder Bridges*, Expressway and Transportation Research Institute, Korea, 1999, 193 pp.
2. Geren, K. L. and Tadros, M. K., "The NU Precast/Prestressed Concrete Bridge I-Girder Series," *PCI Journal*, Vol. 39, No. 3, 1994, pp. 26-38.
3. Sun, C. H., Lee, J. S., and Kim, I. H., "A Study on the Continuation Effect of the PC Beam Bridge Reinforced by Span-Jointing of Slab," *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, Vol. 6, No. 4, 2002, pp. 225-232.
4. Yoo, S. W., Yang, I. H., and Suh, J. I., "Experiment of Flexural Behavior of Prestressed Concrete Beams with External Tendons According to Tendon Area and Tendon

- Force," *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 21, No. 4, 2009, pp. 513-521.
5. Lee, B. J., Park, J. G., Kim, M. Y., Shin, H. M., and Park, C. H., "Experimental Study on Flexural Behavior of PSC I Girder and the Effect of External Prestressing," *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 19, No. 6, 2007, pp. 755-762.
6. Korea Infrastructure Safety and Technology Corporation (KISTEC), *Development of Methods of Evaluation of Prestressing Force and Assessment of Load-Carrying Capacity of the Bridges Strengthened with External Tendons*, KISTEC, Korea, 2007, 238 pp.
7. McConell, V. P., "Bridge Column Retrofit : Hybond Unifabric," *High Performance Composites*, 1993, pp. 19-20.
8. American Concrete Institute(ACI), *External Prestressing in Bridges*, SP-120, Naaman, A. and Breen, J., Eds., ACI, Michigan, U. S., 1990, 458 pp.
9. Han, M. Y. and Lee, S. W., "Analysis of Strengthening Amount of External Tendon Strengthening Method," *Proceedings of Korean Society of Civil Engineers Annual Convention*, Korea, 2004, pp. 4766-4771.
10. Han, M. Y., Lee, J. H., and Lee, S. Y., "A Study on Development of Tensile End Bracket for External Prestressing Methods," *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 21, No. 5A, 2001, pp. 611-618.
11. Tan, K. H. and Ng, C. K., "Effects of Deviators and Tendon Configuration on Behavior of Externally Prestressed Beams," *ACI Structural Journal*, Vol. 94, No. 1, 1997, pp. 13-22.
12. Shin, J. W., *An Experimental Study of External Prestress Strengthening Method for Continuous Bridges*, Master's Thesis, Ajou University, Korea, 2007, 108 pp.
13. Kwak, H. G., Son, J. K., Kim, S. Y., and Park, Y. H., "Development of Analysis Program for PSC Beams with Unbonded External Tendons," *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 26, No. 2A, 2006, pp. 247-260.
14. Park, J. G., Lee, B. J., Kim, M. Y., and Shin, H. M., "Analytical Method on PSC I Girder with Strengthening of External Tendon," *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 20, No. 6, 2008, pp. 697-704.
15. Choi, K. C. and Lee, J. S., "Nonlinear Analysis of PSC Girders with External Tendons," *Journal of the Computational Structural Engineering Institute of Korea*, Vol. 23, No. 3, 2010, pp. 303-314.
16. Crozier, A. C., "Strengthening a Fifty-Year-Old Viaduct," *Concrete*, Vol. 8, No. 7, 1974, pp. 22-25.
17. Moreau, P. and Muller, J., "Strengthening by Means of Additional Prestressing of the Pont de Givors," *Annales de L'Institut Technique du Batiment et des Travaux*, No. 411, 1983, pp. 105-109.
18. Schuebiger, E. and Wachter, H. R., "Utilization of Prestressing for the Restoration of the Swiss Railway Overpass near Lachen," *Schweizersche Bauzeitung*, Vol. 73, No. 31, 1955, pp. 475-478.
19. Vernigora, E., Marcil, J. R. M., Slater, W. M., and Aiken, R. V., "Bridge Rehabilitation and Strengthening by Continuous

- Post-Tensioning,” *PCI Journal*, Vol. 14, No. 2, 1969, pp. 88-104.
20. Virlogeux, M., “External Prestressing,” *Annales de L'Institut Technique du Batiment et des Travaux*, No. 420, 1983, pp. 115-124.
 21. Tadros, M. K., Fidence, J. A., Einea, A., and Holdsworth, S., “A New Technique to Create Continuity in Prestressed Concrete Members,” *PCI Journal*, Vol. 38, No. 5, 1993, pp. 30-37.
 22. Korea Road and Transportation Association (KRTA), *Standard Specifications for Highway Bridges*, KRTA, Korea, 2013, 420 pp.
 23. American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), *Standard Specifications for Highway Bridges*, 17th Ed., AASHTO, Washington, D. C., U. S., 2002, 829 pp.
 24. Shin, H. M., *Prestressed Concrete*, 10th Ed., Dongmyungsa, Korea, 2008, 504 pp.
 25. Lin, T. Y., “Load Balancing Method for Design and Analysis of Prestressed Concrete Structures,” *ACI Journal*, Vol. 60, No. 6, 1963, pp. 719-742.
 26. Lin, T. Y. and Burns, N. H., *Design of Prestressed Concrete Structures*, 3rd Ed., John Wiley and Sons, New York, U. S., 1981, 646 pp.
 27. Oh, B. H. and Jeon, S. J., “Limitations and Realistic Application of Equivalent Load Methods in Pre-Stressed Concrete Structures,” *Magazine of Concrete Research*, Vol. 54, No. 3, 2002, pp. 223-231.
 28. Shin, H. M. and Lee, J. H., *Reinforced Concrete*, 11th Ed., Dongmyungsa, Korea, 2013, 707 pp.

요 약 이 연구에서는 연속 거더교의 외부강선 보강 효과를 극대화할 수 있는 효율적인 방법을 도출하였다. 등가하중개념을 적용하여 기존 방법 대비 제안된 보강 방법의 개선점을 명확히 분석하였다. 보강 효과의 검증을 위해 연속보의 외부강선 보강 실험을 실시하여 외부강선에 의한 내하력 향상 효과를 고찰하였다. 연속보 실험체는 콘크리트 거더 연속교의 일반적인 시공법과 동일하게 바닥판 슬래브 부분만을 연속화하여 제작하였다. 실험 결과 동일한 크기의 외력이 작용할 때 외부강선이 보강된 실험체는 보강되지 않은 실험체에 비해 처짐이나 변형률이 대폭 감소하는 경향을 보였으며, 부재의 강성도 또한 증가하였다. 특히 제안된 방법은 연속교 중간 지점부의 부모멘트에 의한 바닥판의 인장응력을 효과적으로 감소시킬 수 있음이 확인되었다.

핵심용어 : 외부강선, 보강 공법, 연속교, 콘크리트 거더, 등가하중개념