네트형 외부 긴장재에 의한 슬래브교 보강 실험

An Experimental Study About a Net-Type External Prestress Strengthening Method for Slab Bridges

한 만 엽¹⁾

Han, Man Yop

강 태 현²⁾

Kang, Tae Heon

최 석 환^{3)*}

Choi, Sok Hwan

Abstract

Large portion of the domestic bridges are slab bridges reflecting the geographical characteristic of the country, where exists lots of inclines and small winding brooks. Many of the slab bridges are damaged and superannuated as they become obsolete. Deterioration is accelerated when the traffic density becomes large and heavy vehicles pass frequently. A strengthening method for deteriorated slab bridges was studied in this work. The examined net-type strengthening method uses both longitudinal and transverse prestressing for strengthening. In this way, the deflection at the center of the slab can be better controlled, and consequently, the slab is more efficiently strengthened. Three slab specimens were fabricated for the experimental test and subjected to three different loading conditions, and the load bearing capacities and deflections of slabs were examined. Flexural stiffness of slabs increased by 30.7~107.3%, and deflection of slabs decreased by 27.6~52.2% after net-type strengthening. The net-type prestressing is efficient to the strengthening for the center of a slab, and its efficiency is also valid under eccentric loadings. Since extra prestress forces can be added in the future, if necessary, the net-type strengthening system is advantageous for the maintenance and repair of slab bridges.

Keywords : External prestress strengthening, Slab bridge, Net-type strengthening

1. 서 론

국내 교량의 90% 이상이 콘크리트 교량이며, 또한 콘크리트 교량의 대부분은 슬래브교와 라멘교다. 슬래브교는 개소 비율로는 40% 이상, 연장비율로는 20% 이상을 차지한다(건설교통부, 2004). 슬래브교는 단지간의 소형 교량에 적합한 형식으로 국내의 지형적 특성으로 인해서 경간이 짧은 교량이 많기 때문이다. 또한 슬래브교는 3등급 교량이 많기 때문에 중차량의 비중이 증가하면서 균열과 처짐 등 사용성 측면에서 문제가 생기는 경우가 많아서, 보강대상 교량의 많은 부분을 슬래브교가 차지한다.

RC 슬래브교에 적용할 수 있는 보강 공법으로는 바닥판 재시공 공법, 부착식 보강 공법, 외부 긴장재 도입 공법 등이 있다(권영진 등, 1999; 구현본 등, 2002; 안원호 등, 1999; 정원용 등, 2004; 박경식 등, 2009; 최세휴 등, 2010). 바닥판 재시공 공법은 기존 노후 교량의 바닥

판을 완전히 제거한 후 고강도 콘크리트 등으로 보강하는 공법으로써, 일부 사용되고는 있으나 재시공으로 인한 인력, 공사시간, 공사비 등으로 인한 경제적이 부담이 크고, 또한 차량을 완전히 통제해야 하기 때문에 널리 사용되지 못하고 있다. 강판이나 고강도 섬유재료를 부착하는 부착식 보강공법은 많이 사용되었으나, 사용재료의 품질 보장, 시공 품질의 확보, 그리고 유지 관리의 어려움으로 인해서 보강 효과 및 내구성을 충분히 보장하기 어려운 면이 있다. 거더교에 주로 적용되는 외부 긴장재 보강 공법은 거더의 측면에 정착장치를 설치하여 긴장재를 긴장하는 방식이다(Antoine and John, 1990; 최동호 등, 2008). 슬래브교에서는 슬래브교의 하단에 앵커볼트나 앵커키를 이용하여 정착장치를 설치하고, 긴장재로 긴장하여 보강하는 방법을 많이 사용하고 있다. 그러나 정착 장치에 작용하는 긴장력을 앵커 볼트만으로 받아주는 경우에는 앵커 볼트가 많이 필요하고, 또한 정착장치의 크기가 증가

1) 정회원, 아주대학교 환경건설교통공학부 교수

2) 정회원, 아주대학교 환경건설교통공학부 박사과정

3) 정회원, 국민대학교 건설시스템공학부 부교수

* Corresponding author : shchoi@kookmin.ac.kr 02-910-4648

• 본 논문에 대한 토의를 2011년 10월 31일까지 학회로 보내주시면 2011년 11월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

하여 외형상 미관이 나쁘다. 앵커키를 이용한 정착장치는 앵커키를 사용하여 앵커 볼트의 수를 줄여 정착장치의 크기가 작아지나 시공이 어렵다는 단점이 있다.

슬래브교의 보강에는 PSC 거더교에 적용하듯이 종방향 절곡 긴장재를 이용한 보강법이 종종 사용된다(박창호 등, 2003). 이러한 외부 긴장재를 이용한 보강법이 효율적이기는 하나 개선되어야 하는 면이 많다. 먼저 슬래브의 단부에 보강용 정착장치를 설치하는 것이 용이하지 않은 구조가 많다. 두 번째로는, 측면에 외부 긴장재를 정착하여 보강하는 방법을 많이 사용하는데, 상향 반력이 슬래브의 가장자리 부분에 작용하기 때문에 슬래브의 폭이 넓은 경우에는 중앙부에서의 보강효과가 많이 떨어진다는 것이다. 마지막으로 슬래브교가 적용되는 교량은 대부분 교하 공간이 큰 경우가 많지 않기 때문에, 외부 긴장재와 정착장치가 들어갈 공간이 충분하지 못해서 시공에 어려움이 많다. 이러한 단점을 개선하여 네트형 슬래브교 외부 긴장재 보강법을 제안하였으며, 초보적인 실험도 수행되었다(한만엽과 황태규, 2002, 2003). 초기 실험은 실내에서 수행하여야 했기 때문에 공간적 제약으로 인해서 부재의 크기(1.2m × 2.4m)도 작았고, 실험 진행도 미숙하여, 체계적으로 결과를 분석하지 못하였다. 본 논문에서는 이를 개선하여 부재의 크기를 2.4m × 3.6m로 키우고 완성도가 높은 실험을 수행하였다. 본 논문에서는 네트형(net-type) 외부 긴장재 보강공법을 이용하면 슬래브 중앙부에서도 측면부와 동등 혹은 그 이상의 수준으로 보강이 이루어진다는 것을 슬래브 실험 및 결과 분석을 통하여 검증하였다.

2. 네트형 외부 긴장재 보강 공법

종방향 프리스트레싱을 이용한 기존의 외부 긴장재 보강 방법은 폭이 넓은 슬래브교의 중앙부가 직접 보강되지 않는다. 따라서 중앙부의 처짐을 제어하기 위해서는 정착장치 및 정착부에 큰 하중을 도입해야 하기 때문에, 이로 인해서 정착장치 위치에 국부적인 응력집중이 크게 발생하게 된다. 네트형 외부 긴장재 보강법에서는 종방향으로 슬래브의 양 측면에 긴장재를 절곡 배치하여 긴장하고, 아울러 측면 중앙에 정착장치를 설치하여 하면에서도 횡방향으로 긴장력을 도입하여 종·횡 양방향 모두 보강한다(Fig. 1). 단부 정착장치는 슬래브의 모서리에 씌우는 형상을 도입하여 앵커볼트 보다는 단부 콘크리트의 지압

Fig. 1 Net-type external prestressing strengthening method

Fig. 2 Strengthening concept of longitudinally prestressed slab

으로 대부분의 긴장력을 지지하게 하였다. 이런 구조는 종방향 긴장작업도 슬래브 옆면에서 수행할 수 있기 때문에 슬래브 단부에 별도의 공간이 필요하지 않아 시공성이 높다.

교축에 직각 방향인 횡방향으로 긴장재를 배치해서 그 방향으로 부모멘트를 도입하여, 슬래브 중앙부의 처짐을 직접적으로 보강한다. 기존의 거더교에서 사용하는 방법대로 종방향 외부 긴장재만으로 보강을 하면, 배치된 긴장재의 절곡부에 상향력(P_1)이 작용하면서 슬래브의 측면이 윗방향으로 변위를 일으킨다(Fig. 2). 이러한 방법으로 보강하는 것은 폭이 넓은 슬래브의 경우에는 슬래브 중앙부에서의 보강효과가 적다.

반면에 긴장재를 슬래브 하면에 횡방향으로 직선 배치하여 보강하는 경우는, 슬래브의 측면 단부에 압축력이

Fig. 3 Strengthening concept of transversely prestressed slab

Fig. 4 Strengthening concept of two-way(net-type) prestressed slab

가해지면서 횡방향으로 부모멘트를 도입하게 된다(Fig. 3). 이 보강방법은 측면을 기준으로 한 중앙부에서의 상대적인 처짐을 보강하는 효과는 있으나, 차량 진행 방향을 기준으로 한 전체 슬래브의 보강에는 효과는 적다.

따라서 종방향 및 횡방향 긴장재를 이용한 네트형 보강은, 슬래브의 전체 폭에 대하여 고른 보강 효과를 얻을 수 있다(Fig. 4). 이렇게 보강한 슬래브는 외부 하중을 상쇄하는 방향으로 부모멘트를 발생시키게 된다.

종방향 및 횡방향 외부 긴장재를 이용한 네트형 보강의 장점으로 다음을 들 수 있다. 첫째, 네트형 외부 긴장재 보강공법은 외부 긴장재를 사용하여 안정된 부착 구조를 가지고 있기 때문에 부착식 공법에서 발생할 수 있는 보강재 탈락의 문제를 해결할 수 있다. 둘째, 외부 긴장재의 큰 긴장력을 앵커키가 대부분 받아주는 구조이므로 슬래브마다 앵커키의 크기 및 삽입깊이를 설계해서 용이하게 적용할 수 있다. 앵커키 정착 장치는 외부 긴장재의 긴장력을 앵커키가 받아줌으로서 앵커볼트의 수가 현저히 줄어들어 정착장치의 크기가 상당히 작아진다. 따라서 작은 크기로 큰 긴장력을 받을 수 있기 때문에 매우 효율적이고 경제적인 방법이라 할 수 있다. 셋째, 종방향 정착장치는 상부에 그리고 횡방향 정착장치는 하부에 설치되므로 서로 상쇄되는 모멘트를 가지게되므로 정착장치가 효율적으로 사용될 수 있다

기존 구조물에 대한 보강은 설계 오류에 대한 보강, 시공 오차에 대한 보강, 혹은 손상된 교량에 대한 보강 등도

있을 수 있겠지만, 현재의 논문은 내하력을 증가시켜야 하는 경우에 대한 보강이다. 외부 긴장재를 사용해서 보강하는 경우, 먼저 교량의 내하력을 평가하고, 구조해석을 통하여 보강해야 할 모멘트를 산출한다. 교량의 내하력은 슬래브교의 노후 정도에 따라서 결정된다.

$$\phi(M_n' - M_n) = \phi M_{rep} = \gamma(M_l^T - M_l^P) \quad (1)$$

여기서, M_n , M_n' 은 각각 부재의 보강 전후 공칭 모멘트이고, M_{rep} 는 보강 모멘트, γ 는 활하중에 대한 하중계수, M_l^T 는 목표 활하중 모멘트, M_l^P 는 현재 활하중 모멘트이다. 소요 보강 모멘트를 식 (1)을 사용하여 산출한 후, 중립축을 다시 산정하고, 강선의 소요 긴장력 P_{ps} 를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\frac{1}{2}bx^2 - n_1A_s(d-x) - n_2A_p(d_p-x) = 0 \quad (2)$$

$$z = d_p - \frac{x}{3} \quad (3)$$

$$P_{ps} = \frac{M_{rep}}{z} \quad (4)$$

여기서, b 는 슬래브 폭, x 는 상단에서 중립축까지의 거리, d 는 인장철근의 유효깊이, d_p 는 강선의 유효깊이, n_1 은 철근과 콘크리트의 탄성계수비, n_2 는 강선과 콘크리트의 탄성계수비, A_s 는 철근의 단면적, A_p 는 강선의 단면적이다. 횡방향 프리스트레싱은 폭이 넓은 슬래브에서 중앙부에서의 처짐이 옆면 단부에서의 처짐 보다 더 크게 발생하면서 보강효과가 떨어지는 것을 방지하는 역할을 수행한다.

3. 슬래브 보강 검증 실험

실험은 슬래브 외부강선 보강 개념을 검증하기 위해서 실시하였다. 특히 횡방향 긴장의 효과가 발현되는지 확인하고, 보강법을 실제 슬래브교에 적용했을 때 발생할 수 있는 잠재적인 문제점을 점검하기 위하여 수행하였다. 본 실험을 위해서 슬래브교에 적용 가능한 별도의 정착장치를 제작하였으며, 설계하중과 균열하중 및 내하력, 처짐과 철근 변형률 등 구조적인 거동을 계측하고 분석하였다. 이렇게 계측된 결과를 계산값과 비교함으로써 네트형

슬래브 외부강선 보강 공법의 효과 및 개념의 타당성을 점검하였다

3.1 실험체 제작

네트형 보강법에 대한 실험적 검증을 위해서 3개의 실험체를 제작하였다. 실험체의 크기는 가용할 수 있는 장비의 규모를 고려하여, 길이 3.6m, 폭 2.4m, 두께 0.2m로 정하였다. 실험체에서 종방향 인장철근으로는 D16을 14@160mm으로, 그리고 압축철근으로는 7@320mm으로 일정하게 배근하였고 피복두께는 30mm였다. 또한 횡방향 철근은 300mm 간격을 기본으로 하여 Fig. 5처럼 배근하였다. 콘크리트의 압축강도는 성능이 저하된 슬래브를 모사하기 위하여 비교적 낮은 강도(17MPa)의 콘크리트를 사용하여 제작하였다. 사용 재료는 Table 1에 정리하였다.

Fig. 5 Reinforcement in a slab specimen

Table 1 Properties of reinforcing and prestressing steels

Slab	Unit weight	23 kN/m ³
	Strength	17MPa
	Elastic modulus	21,856MPa
Prestressing strands	Type	SWPC7B
	Nominal diameter	12.7mm
	Nominal area	98.7mm ²
	Ultimate strength	1,894MPa
	Yield strength	1,610MPa
	Elastic modulus	195GPa
Reinforcing steel	Type	SD400
	Nominal diameter	15.9mm
	Yield strength	400MPa
	Elastic modulus	200GPa

3.2 재하장치 및 재하 방법

마이크로파일(Micropiles)을 가력 빔을 통과시켜 고정시킨 후, 실험체와 재하 프레임 사이에 실린더와 로드셀을 설치하여 하중을 재하 하였다(Fig. 6, 7). 1,000kN 용량의 실린더를 사용하였고, 실린더와 슬래브 사이에 국부 파괴를 방지하고 하중을 균등하게 분포시키기 위해 H형강과 고무패드를 설치하였다. 앵커볼트의 인발파괴를 줄일 수 있는 형태의 정착장치를 기존의 연구에서 채택하였다(한만엽 등, 2001a, 2001b; 한만엽과 이상열, 2001, 김형규 외, 2002). 정착장치의 각 부재는 허용응력설계

(a) plan view of prestressing steels

(b) Anchorage brackets with load cells used for the experiment

(c) Longitudinal anchorage bracket for a field application

Fig. 6 Location of anchorage brackets and prestressing steels

Fig. 7 View of the experimental setup

법을 이용하여 검토하였고, 앵커볼트의 인발하중 및 콘크리트의 지압응력도 만족하도록 하였다. 실제 슬래브교에 적용할 때는 단부에 공간이 없으므로 Fig. 6c처럼 부재의 옆면에서 종방향 긴장을 수행하도록 브래킷을 제작해야 한다. 본 실험에서는 로드셀을 설치하여 하중을 측정해야 하므로 부재의 단부에 ‘ㄷ’형 채널(Channel)을 설치하고, 채널과 부재 단부 사이에 로드셀을 설치하였다. 단부에서 유압잭을 이용하여 가력하고 정착 하였다. 횡방향 긴장은 중앙부 정착장치에 뚫은 구멍에 긴장재를 삽입하고 콘을 설치하여 유압잭을 이용하여 정착 하였다(Fig. 6b). 슬래브의 단순지지 지점간 거리는 3.2m였다.

Table 2는 실험 시편에 적용한 각 방향 긴장력의 크기, 편심의 크기 등이다. 항복하중 계산은 인장철근이 항복할 때를 기준으로 한다. 콘크리트의 거동은 약간 비선형을 보이는 부분이 있기는 하겠지만 압축영역 전체 단면력의 크기를 고려하면 선형으로 가정할 수 있다. 슬래브의 종방향 항복하중은 선형거동을 가정하여 계산할 수 있다.

Table 2 Input values for strengthening

Direction	Input factors	Values
Longitudinal direction	P_t	150 kN
	e_{t1}	52 mm
	e_{t2}	78 mm
	θ	4.13°
	Concentrated transverse load	21.6 kN
	Negative moment at center	-11.7 kN-m
	End moment	7.8 kN-m
Transverse direction	P_t	60 kN
	e_t	117 mm
	Negative moment	-7.0 kN-m

Table 3 Loading and unloading sequence

Loading sequence		Load (kN)	Loading speed (kN/min)	Others
1st loading	Loading	0~190	10	Load up to $1.1P_y$, 190kN
	Unloading	190~0	30	
Prestressing for strengthening	Longitudinal direction	0~150	10	10kN was pre_applied at the beginning
	Transverse direction	0~60	10	5kN was pre_applied at the beginning
2nd loading	Loading	0~250	10	Load up to $1.4P_y$, 250kN
	Unloading	250~0	30	

자중을 제외한 실험 하중만을 기준으로 했을 때, 항복하중은 199.1kN이다.

재하 순서는 1차 재하에서 190kN을 가한 후 하중을 제거하였다. 긴장 방법은 종방향으로 10kN을 먼저 가한 후, 횡방향으로 5kN을 가하였다. 이어서 종방향으로 150kN까지 가한 후, 다시 횡방향으로 60kN까지 가한다. 이어서 2차 재하가 이루어진다(Table 3).

세 가지 서로 다른 재하방법을 선택하여 재하 위치에 따른 보강효과의 효율성을 변형 및 처짐을 통해서 파악하였다(Fig. 8); 1) 슬래브 중앙부에 집중하중을 재하하는 경우(Load Case C), 2) 슬래브 중앙에서 횡방향으로 1/4 위치에 집중하중을 편심 재하하는 경우(Load Case E), 3) 슬래브 중앙에서 횡방향으로 선형재하하는 경우(Load Case L). Load Case L은 3개의 가력장치를 일렬로 동시에 사용하여 재하하였다.

Fig. 8 Cases of experimental loading

Fig. 9 Locations of displacement transducers

Fig. 10 Locations of strain gages

$$M_{cr} = \frac{f_r}{y_t} I_g$$

$$P_{cr} = \frac{4M_{cr}}{l}$$

3.3 계측 및 실험 수행

슬래브의 처짐을 계측하기 위해서 변위계를 설치하였고(Fig. 9), 철근의 변형률을 측정하기 위해서 하부의 종방향 및 횡방향 철근, 그리고 상부 압축철근에 각각 변형률게이지를 부착하였다(Fig. 10).

4. 실험결과 분석

슬래브 중앙점에서 측정한, 보강 전후의 하중-처짐 관계는 Fig. 11과 같다. 보강 후 실시한 2차 재하 실험에서는 세 가지 하중조건 모두에서 1차 재하 실험에서보다 강성이 크고, 항복하중도 증가하는 보강효과를 확인할 수 있었다. 강성은 선형거동 부분만을 이용해서 회귀분석을 실시하여 구하였으며, 휨강성의 증가량은 각 하중조건에서 각각 37%, 31%, 107%에 달하였다.

슬래브의 균열하중(cracking load) P_{cr} 은 파괴계수(modulus of rupture) $f_r = 0.63 \sqrt{f_{ck}}$ 로 두고 다음과 같이 계산할 수 있다.

여기서 f_{ck} 는 콘크리트의 설계기준강도, M_{cr} 은 중앙에서의 균열모멘트, y_t 는 중립축에서 하단까지의 거리, I_g 는 비균열 단면의 단면2차모멘트, l 은 지간이다. 실험 수행시 자중은 이미 반영된 상태이므로 이를 재하되는 하중에 더하여 균열하중을 계산한다. 균열하중은 36.8kN으로 계산되는데 이는 실험에서 초기선형거동의 끝나는 부분과 거의 일치한다. 재하 조건 중에 Load Case L은 상대적으로 부드럽지 못한 실험결과를 보이는데, 이는 선재하를 위해서 여러 대의 재하장치를 동시에 이용해야 하는 어려움이 있었기 때문으로 보인다. 휨강성이 비선형적으로 급격하게 감소하는 시점을 기준으로 판단한 항복하중은 1차 재하와 2차 재하 사이에 Load Case C 및 E에서 각각 41%, 49% 정도 증가하였다.

첫 번째 재하 실험에 대해서, 종방향으로 1방향 거동을 가정하고, 하중-처짐 곡선을 예측해서 실험 결과치와 비교하였다(Fig. 12). 균열이 발생한 이후는 유효단면2차모멘트, I_e 의 계산에서 각 하중단계마다 하중의 크기를 고려하여 계산하였다.

유효단면2차모멘트는 다음과 같이 표현된다.

(a) Load Case C

(b) Load Case E

(c) Load Case L

Fig. 11 Load-deflection curves at the center of the slab (L6)

$$I_e = \left(\frac{M_{cr}}{M_a} \right)^3 I_g + \left[1 - \left(\frac{M_{cr}}{M_a} \right)^3 \right] I_{cr} \quad (5)$$

여기서 M_a 는 가해지는 모멘트이고, M_{cr} 은 균열모멘트이다. I_g 는 비균열 단면의 단면2차모멘트, I_{cr} 은 균열단

(a) L6

(b) L7

Fig. 12 Load-deflection comparison for the 1st loading (Load Case C)

면의 단면2차모멘트이다. 실험시 자중이 작용한 이후의 집중 활하중을 기준으로 처짐이 예측되었으므로, 자중으로 인한 처짐을 제외하고 비교하였다. 유효단면2차모멘트를 이용한 처짐 예측은 인장철근이 항복하기 전까지는 실험결과와 상당히 근사한 결과를 보였다.

중앙점에 재하한 경우(Load Case C)는 슬래브에 편심이 작용하지 않으므로 1방향 휨이라 할만한 거동을 보인다는 것을 Fig. 13, 14에서 확인할 수 있다.

하중이 슬래브에 편심 재하되는 경우의 보강효과를 판단하기 위해서 Load Case E, L을 실험하였다(Fig. 15, 16). 처짐을 보면 지간 방향으로서는 Load Case C와 같은 휨거동을 보이며, 횡방향으로는 편심때문에 재하측에서 가장 큰 처짐을 보인다.

1차 재하와 2차 재하 사이에 처짐의 변화량을 하중 단계별로 비교하였는데, 하중이 커질수록 처짐 감소율도 증

(a) 1st loading

(b) 2nd loading

Fig. 13 Load-deflection curves through Lc (Load Case C)

(a) 1st loading

(b) 2nd loading

Fig. 14 Load-deflection curves through Sc (Load Case C)

(a) 1st loading

(b) 2nd loading

Fig. 15 Load-deflection curves through Lc (Load Case E)

(a) 1st loading

(b) 2nd loading

Fig. 16 Load-deflection curves through Sc (Load Case E)

Fig. 17 Reduction ratio of deflections at the center

가하였다(Fig. 17). 1차 재하에서 가한 최고 하중 190kN을 기준으로 비교하면, 감소율이 28% (Load Case C), 36% (Load Case E)에 달한다.

종방향 및 횡방향 보강 프리스트레싱으로 인한 솟음의 크기를 측정하고, 종방향 프리스트레싱으로 인한 솟음 부분을 해석치와 비교하였다. 솟음량은 공액보법 혹은 모멘트면적법을 이용해서 계산한다. 종방향 긴장으로 인한 중앙점 솟음은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\Delta_l = \frac{3e_{l1}e_{l2}^2 + 2e_{l2}^3 - e_{l1}^3}{(e_{l1} + e_{l2})^2} \cdot \frac{P_l \cdot l^2}{24E_c I_{cr}} \quad (6)$$

여기서, e_{l1} 은 단부에서의 긴장재의 편심, e_{l2} 는 중앙에서의 긴장재의 편심, P_l 은 긴장력의 크기, l 은 지간, E_c

는 탄성계수, I_{cr} 은 균열단면2차모멘트이다. 종방향 단부를 고정해서 실험을 수행했기 때문에 종방향으로 긴장하면, 종방향인 Lc 방향으로 양단에 고정되고 가운데가 솟음을 보이지만 횡방향인 Sc방향으로는 전 단면이 같은 방향으로 솟음을 보인다. 횡방향으로 긴장력을 가하면 횡방향으로 가해진 부의 휨모멘트로 인해서 가운데에서 솟음이 발생한다(Fig. 19b).

양단 지지점을 기준으로 계산한 종방향 솟음은 Load Case C에 한하여 실제 실험과 유사한 결과를 보였다(Fig. 18). 그러나 1차 재하에서 가한 하중의 종류에 따라서 솟음량에서 차이가 많은 편이었다. 1차 재하에서 항복하중 이상의 하중을 가하였기 때문에, 부모멘트가 가해지는 보강 긴장 하에서의 슬래브의 거동에 영향을 많이 준 것으로 판단된다. 횡방향 솟음의 경우는 계산과 실험에서 지지점 방향이 서로 다르므로, 횡방향 긴장으로 인한 솟음은 1방향 거동이라기 보다는 가운데가 볼록하게 올라가는 2방향 거동을 보였다(Fig. 19). 이러한 솟음 거동은 Load Case E, L에서도 유사한 형태를 보였다(Fig. 20~23).

횡방향 긴장으로 인한 효과는 횡방향 철근의 변형거동에도 영향을 미친다. 슬래브 하면의 횡방향 철근의 변형률을 보면, 1차 재하보다 2차 재하에서 인장변형률이 감소하는 것을 볼 수 있다(Fig. 24). 이것은 횡방향 긴장으로 인해서 단면에 압축력이 증가하면서 하중에 대한 인장 변형 및 균열 발생이 늦어지기 때문이다.

종방향 긴장으로 인한 종방향 철근의 변형률을 보면, 하부 철근에서의 압축변형률이 증가하면서, 아울러 상부 철근에서도, 휨모멘트만 고려하면 발생할 수도 있는 인장

(a) Longitudinal camber profile (Lc)

(b) Transverse camber profile (Sc)

Fig. 18 Camber resulting from longitudinal prestress (Load Case C)

(a) Longitudinal camber profile (Lc)

(b) Transverse camber profile (Sc)

Fig. 19 Camber resulting from transverse prestress (Load Case C)

(a) Longitudinal camber profile (Lc)

(b) Transverse camber profile (Sc)

Fig. 20 Camber resulting from longitudinal prestress (Load Case E)

(a) Longitudinal camber profile (Lc)

(b) Transverse camber profile (Sc)

Fig. 21 Camber resulting from transverse prestress (Load Case E)

(a) Longitudinal camber profile (Lc)

(b) Transverse camber profile (Sc)

Fig. 22 Camber resulting from longitudinal prestress (Load Case L)

(a) Longitudinal camber profile (Lc)

(b) Transverse camber profile (Sc)

Fig. 23 Camber resulting from transverse prestress (Load Case L)

(a) Longitudinal direction

(b) Transverse direction

Fig. 24 Strains at bottom reinforcing steels (Load Case C)

(a) Longitudinal prestressing

(b) Transverse prestressing

Fig. 25 Response to the prestressing (Load Case C)

변형률이 프리스트레싱으로 인한 압축변형률과 상쇄되면서 압축을 나타내는 것을 볼 수 있다(Fig. 25a). 횡방향 긴장으로 인한 횡방향 철근의 변형률에서도 슬래브 중앙부가 가장 큰 변형률을 나타내는 2방향 거동을 보였다(Fig. 25b).

5. 결론

국내 교량의 대부분이 콘크리트 교량이고 그 중에서도 슬래브교가 차지하는 비중이 매우 높다. 따라서 본 연구에서는 노후한 슬래브교를 보강하는 방법의 하나로서 종방향 및 횡방향 외부 긴장재를 동시에 도입하여 네트형으로 슬래브를 보강하는 방법을 제안하였다. 비교적 간단하게 횡방향 외부 긴장을 추가로 도입함으로써, 종방향 긴

장재만으로는 보강하기 어려웠던 슬래브 중앙부의 처짐을 효율적으로 보강할 수 있었다. 외부 긴장재 보강의 특성상 필요시 추후 재긴장하는 것이 가능하므로, 추가적인 보강이 가능하며, 또한 외부에서 보강 상태를 확인 할 수 있기 때문에 시공 이후의 사후 관리가 용이할 것이다.

본 연구의 결론은 다음과 같이 정리할 수 있다.

- (1) 종방향 및 횡방향 양방향으로 배치된 네트형 외부 긴장재를 이용하여 슬래브교를 보강하였으며, 사용 실험체를 기준으로, 보강 후 휨강성의 증가량은 30.7 ~ 107.3%에 달하였다.
- (2) 횡방향 솟음, 횡방향 철근의 변형률을 기준으로 횡방향 긴장으로 인한 보강효과를 파악할 수 있었으며, 네트형 보강 전후 처짐의 감소율이, 1차 재하 최고치

190kN을 기준으로 비교했을 경우, 27.6~52.2%에 달할 정도로 보강이 효율적이다.

- (3) 슬래브의 초기 1차 재하 거동은 유효단면2차모멘트를 이용한 간단한 계산을 통해서도 비교적 정확하게 거동을 예측할 수 있었다.
- (4) 종방향 긴장에 의해서 슬래브는 1방향 휨거동을 한다. 횡방향 긴장으로 인한 슬래브의 솟음은, 종방향 양단 지지부를 고정된 실험체의 형상 및 슬래브의 형상비의 영향을 받기 때문에 1방향 거동이 아니라 2방향 거동을 보인다.
- (5) 중앙에 집중되는 하중 뿐아니라 편기 재하되는 하중에 대해서도 유사한 보강효과가 있음을 확인하였다.
- (6) 기존의 앵커볼트를 통해서 고정하던 방식은 과도한 볼트의 사용으로 인해서 대상 교량에 손상을 줄 수 있고, 앵커 볼트에서 인발 파괴가 일어날 수 있다. 네트형 외부 긴장재 보강공법에 사용된 정착장치는 정착장치에 미치는 힘을 분산시킬 수 있어, 정착장치에서 발생하는 문제점을 경감시킬 수 있다.

추가적인 연구를 통해서 슬래브 내의 균열 생성과 관련된 비선형적인 강성저하를 2방향 거동해석에 합리적으로 반영할 수 있는 수치해석적 방법을 개발하여 슬래브 중앙에서의 보강효과를 정량화하는 것이 필요하다. 또한 슬래브의 폭이 매우 큰 경우나 종방향/횡방향 비에 따른 보강 효과의 차이 등에 관해서도 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

2011년 국민대학교 교내연구비 지원에 감사를 드린다.

참고문헌

1. 건설교통부, 전국 교량현황 조서, 2004.
2. 구현본, 이정우, 정광희, 정연주, 김병석, “강판 및 탄소섬유쉬트를 이용한 중공슬래브교의 보강 효과에 관한 실험 연구”, 한국콘크리트학회 봄 학술발표회 논문집, 2002, pp.787-792.
3. 권영진, 최준현, 조성현, “노후화된 교량 구조물의 내구성 및 내하력 향상을 위한 보수·보강공사”, 한국콘크리트학회 논문집, 제11권 제5호, 1999, pp.66-72.
4. 김형규, 양동석, 박선규,곽수현, “자켓-받침형 정착장치를 이용한 외부 긴장재 보강 효과의 실험적 연구”, 한국콘크리트학회 가을학술발표회 논문집, 제14권 제2호, 2002, pp.457-462.
5. 박경식, 최세휴, “외부 프리스트레싱을 이용한 RC 중공슬래브교의 최적보강”, 구조물진단학회지, 제13권 제6호, 2009, pp.204-211.
6. 박승범, 방명석, 홍석주, “외부긴장재를 이용한 프리스트레스트 콘크리트 거더교의 성능평가”, 한국콘크리트학회 가을학술발표회 논문집, 1999, pp.685-688.
7. 박창호, 이병주, 구본성, “PSC 교량의 외부 긴장재 보강효과에 관한 실험 연구”, 대한토목학회 정기학술대회 논문집, 2003, pp.1430-1434.
8. 안원호, “콘크리트 교량의 보수·보강방법의 표준화”, 건설교통부 시설안전관리공단, pp.9-277.
9. 정원용, 한만엽, 김동백, “외부 프리스트레싱을 이용한 보강공법”, 한국콘크리트학회지, 제16권 제1호, 2004, pp.65-73.
10. 최동호, 나호성, 이진호, “외부긴장재로 보강된 강합성보의 극한거동에 대한 실험적 연구”, 구조물진단학회지, 제12권 제6호, 2008, pp.63-70.
11. 최세휴, 박경식, “ μ -GA에 의한 RC 중공슬래브교의 최적보강”, 제14권 제4호, 2010, pp.169-178.
12. 한만엽, 백승덕, “보강재의 부착방법에 따른 물리적 거동 특성에 관한 연구”, 한국콘크리트학회 봄학술발표회 논문집, 제11권 제1호, 1999, pp.727-732.
13. 한만엽, 백승덕, “연속교의 외부 긴장재 보강에 관한 연구”, 대한토목학회 학술발표회 논문집, 2000, pp.41-44.
14. 한만엽, 백승덕, “외부 긴장재 보강의 체계적 분류 연구”, 한국콘크리트학회 봄 학술발표회 논문집, 제14권 제1호, 2002, pp.411-416.
15. 한만엽, 이상열, “슬래브교 외부 강성 보강용 정착구 개발”, 한국콘크리트학회 봄학술발표회 논문집, 제13권 제1호, 2001, pp.93-98.
16. 한만엽, 이재형, 이상열, “외부프리스트레스 보강 공법에 사용되는 인장형 단부 브래킷의 개발 연구”, 대한토목학회 논문집, 제21권 제5-A호, 2001a, pp.611-618.
17. 한만엽, 정문연, 이상열, “외부 긴장재 보강용 압축형 단부 브래킷의 거동 연구”, 대한토목학회 논문집, 제21권 제6-A호, 2001b, pp.815-823.
18. 한만엽, 황태정, “네트형 슬래브교 외부 긴장재 보강 공법 연구”, 한국콘크리트학회 가을학술발표회 논문집, 제14권 제2호, 2002, pp.475-480.
19. 한만엽, 황태정, “네트형 슬래브교 외부 긴장재 보강공법의 실험적 연구”, 한국콘크리트학회 가을학술발표회 논문집, 제15권 제2호, 2003, pp.363-366.
20. Antoine Naaman and John Breen, “External Prestressing in Bridges”, American Concrete Institute, SP120, 1990.
21. J. Eibl, “On some external prestressing bridge in germany”, FIP, 1990.

(접수일자 : 2011년 2월 15일)

(1차 수정일자 : 2011년 5월 24일)

(2차 수정일자 : 2011년 7월 7일)

(심사완료일자 : 2011년 7월 29일)

요 지

국내의 지형 특성으로 인해서 교량의 많은 부분이 슬래브교 형식이다. 차량이 대형화하고 교통량이 증가하면서 노후 슬래브교의 보강이 필요한 경우가 많다. 본 연구에서는 노후화된 슬래브교를 효과적으로 보강할 수 있는 외부 긴장재 보강공법을 제안하였다. 종방향 및 횡방향 외부 프리스트레싱을 이용한 네트형 보강법은 슬래브 중앙부의 처짐을 효과적으로 보강할 수 있는 방법이며, 하부공간을 침해하지 않으므로 실제 적용성이 뛰어나다. 실험을 통해서 제안한 보강법으로 인해서 향상되는 내하력의 크기를 검증하였다. 실험에서는 세 가지 서로 다른 하중조건에 대하여 처짐 및 변형률을 계측하여 보강의 효과를 비교, 분석하였다. 네트형 긴장재 보강 전후의 휨강성의 증가량은 재하 종류별로 30.7~107.3% 증가하였다. 보강 전후 처짐의 감소율은 27.6~52.2%에 달하였다. 종방향 및 횡방향 프리스트레싱으로 인한 네트형 보강법은 슬래브교의 중앙부 보강에 매우 효과적이며, 중앙에 집중되는 하중 뿐만 아니라 편기 재하되는 하중에 대해서도 유사한 보강효과가 있다. 또한 네트형 보강법은 필요에 따라 재긴장이 가능하므로 유지보수 및 사용성 측면에서 장점이라 할 수 있다.

핵심 용어 : 외부 긴장재 프리스트레싱, 슬래브교, 네트형 보강