

외부 프리스트레싱을 이용한 RC 중공슬래브교의 최적보강

Optimal Strengthening in RC Hollow Slab Bridges Using External Prestressing

박 경 식*

Park, Kyung-Sik

최 세 휴**

Choi, Se-Hyu

Abstract

In this study, the optimal method is applied to strengthening of RC hollow slab bridges using external prestressing. The Queen-post and King-post shapes are considered to find the effective tendon configurations. In order to achieve the objective rating factor, the optimal configurations and tendon forces are obtained by using the Sequential Unconstrained Minimization Technique (SUMT). The object function for optimal strengthening is constituted with the dimensionless function of material costs. The constraints are formulated by design specification and the rating factor. The validity of this study is presented by the analysis of the results of strengthening of the RC hollow slab bridges.

요 지

본 연구에서는 RC 중공슬래브 교량의 내하력을 향상시키기 위해 외부 프리스트레싱을 이용한 보강방법을 제시하였다. 효과적인 보강을 위해 Queen-post 형식과 King-post 형식이 고려되었으며, 축차무제약 최소화 기법(SUMT)를 이용하여 목표 내하율을 달성하기 위한 최적의 형상과 긴장력을 구하였다. 최적보강을 위한 목적함수는 재료비용을 무차원화한 비용함수로 구성하였으며, 제약조건은 시방서 규정과 내하율을 고려하여 형성하였다. RC 중공슬래브 교량의 보강을 실행한 후 그 결과를 분석하여 제안된 방법의 타당성을 제시하였다.

Keywords : External prestressing, RC hollow slab bridge, Optimal strengthening

핵심 용어 : 외부 프리스트레싱, RC 중공슬래브교, 최적보강

* 정회원, 경북대학교 건축토목공학부 박사과정

** 정회원, 경북대학교 건축토목공학부 조교수, 교신저자

E-mail : shchoi@knu.ac.kr 053-950-7582

• 본 논문에 대한 토의를 2009년 12월 31일까지 학회로 보내주시면 2010년 3월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

1. 서론

RC 중공슬래브교는 슬래브교의 단면에 원형 중공을 설치함으로써 슬래브교의 장점을 살리고 지간이 길어질 때 자중이 증대되는 슬래브교의 단점을 최소화한 교량 형식으로 국내에서는 1990년대에 많이 건설되었다. 그러나 20여년이 지난 현재 대부분의 중공 슬래브교는 안전성과 사용성이 약화되어 있어 이들을 보강하기 위한 연구가 필요한 실정이다.

중공슬래브교의 보강에는 주로 강판 접착공법과 복합재료의 부착을 통한 보강공법이 많이 적용되어 왔다. 강판 접착공법은 강판의 과도한 자중에 따른 시공성 문제와 부식 및 박리 같은 내구성 문제로 적용성에 많은 제약을 받고 있다. 또한, 탄소섬유, 유리섬유 등의 복합재료를 보강면에 부착하는 공법은 현장 여건, 시공 상태 및 시공자의 기능 수준 등에 따라 보강효과가 현저히 차이가 나므로 실험실에서 수행한 보강효과를 기대하기가 어렵고 교량 하부 부착에 따른 추후 균열 및 안전성 검사에도 어려움이 예상된다(한국건설기술연구원, 2001).

최근 외부 프리스트레싱을 이용한 보강공법이 많이 연구되고 있다. 특히 Saadatmanesh 등(1989 a,b)은 외부 긴장재로 보강된 강합성보의 해석적 연구와 실험적 연구를 통해 외부 프리스트레싱을 적용하기 위한 기준을 제안하였으며, Troitsky 등(1989)은 외부 긴장력 도입에 의한 강합성보 지간의 응력 분포 및 긴장력 증가량의 수치적인 해석 방법을 제시하고 실험을 통해 검증하였다. 최동호 등(2005)은 단경간 강합성 교량에 대한 보강을 위해 외부 긴장재 배치에 따른 긴장재의 초기 긴장력과 긴장재 수를 결정하는 방법을 제시하였고, 최근에는 외부 긴장재로 보강된 단순 강합성보에 대한 파괴 실험을 수행하였다(최동호 등, 2008). 외부 프리스트레싱을 이용한 방법은 실용적이고 경제적이며 구조물의 탄성 거동 범위를 증대시키고, 극한하중의 증가와 파괴 및 파괴강도를 향상시키는 장점을 가지고 있다. 이러한 이유로 외부 프리스트레싱을 이용한 보강공법이 실무에서도 많이 적용되고 있다.

기존의 외부 프리스트레싱 보강에 대한 연구는 주로 강교 또는 강합성 거더교의 내하력 향상에 집중

되어 있으며, 중공슬래브교에서의 외부 프리스트레싱 보강에 대한 연구는 미흡한 실정이다. 외부 프리스트레싱을 이용한 보강설계는 긴장재의 배치형상 및 긴장력 등의 변수가 서로 밀접하게 관련되어 있으므로 효과적인 보강을 위해서는 이들에 대한 충분한 검토가 이루어져야한다.

따라서 본 연구에서는 외부 프리스트레싱을 이용한 RC 중공슬래브교의 최적보강 기법을 개발하고자 한다. 최적화 기법으로는 축차무제약 최소화 기법(SUMT)을 이용하였으며, 목적함수로는 재료비용을 무차원화한 비용함수를 사용하였다. 최적결과를 분석하여 본 연구의 타당성을 제시하였다.

2. 최적화 문제 형식

2.1 설계 변수

외부 프리스트레싱을 이용한 RC 중공슬래브교의 보강을 위하여 Fig. 1과 같이 편향재의 배치 수에 따라 편향재가 2개 있는 경우(Queen-post), 편향재가 1개 있는 경우(King-post) 그리고 편향재가 없는 경우로 대분하여 최적의 정착위치, 편향재의 위치와 높이, 긴장력의 크기를 산정하였다. 긴장재 배치형상에 따른 설계변수를 Table 1에 나타내었다. Fig. 1에서 편심거리(e)는 중공슬래브 바닥면에서 중립축까지 거리이며, 정착높이(d_1)는 60mm로 가정하였다.

Table 1 배치형상에 따른 설계변수

구분	설계변수	기호설명
Queen-post	$X_1 = L_1$	L_1 = 정착위치(mm) T = 긴장력(kN) d_2 = 편향재 높이(mm) t = 편향재 두께(mm) L_2 = 편향재 위치(mm)
	$X_2 = T$	
$X_3 = d_2$		
$X_4 = t$		
$X_5 = L_2$		
King-post	$X_1 = L_1$	L_1 = 정착위치(mm) T = 긴장력(kN) d_2 = 편향재 높이(mm) t = 편향재 두께(mm) L_2 = 편향재 위치(mm)
	$X_2 = T$	
$X_3 = d_2$		
$X_4 = t$		
편향재가 없는 경우	$X_1 = L_1$	
	$X_2 = T$	

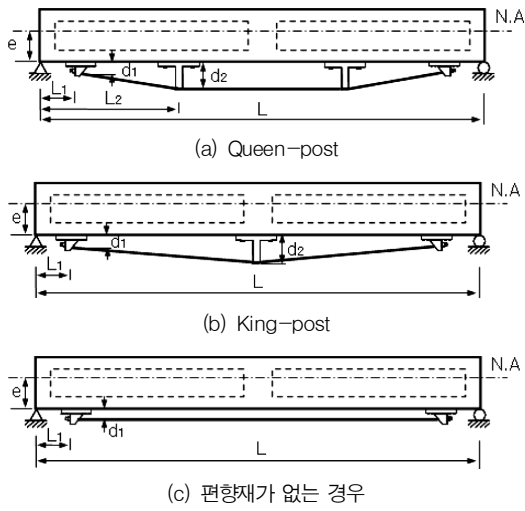


Fig. 1 긴장재 배치형상

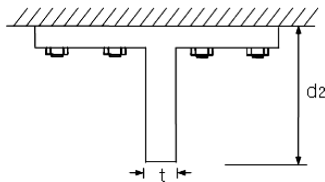


Fig. 2 편향재 단면

2.2 목적함수 형성

본 연구에서는 긴장재 배치형상에 따른 보강효과를 비교하기 위해서 식(1)과 같이 편향재와 긴장재의 재료비를 무차원화한 비용함수를 목적함수로 사용하였으며 각 배치형상에 따른 목적함수를 Table 2에 나타내었다.

$$OBJ = C_r A_d L_d + A_p L_p \quad (1)$$

여기서, C_r : 편향재와 긴장재 가격비

A_d : 편향재 면적 ($= d_2 t$)

L_d : 편향재 폭

A_p : 긴장재 면적 ($= \frac{T}{0.7 f_{pu}}$)

T : 긴장력

f_{pu} : 긴장재의 인장강도

L_p : 긴장재 길이

실제 보강시 정착구의 가격, 설치비용 등 여러 가지 사항들이 고려되어야 하나 본 연구에서는 중공슬래브교의 보강을 위한 최적형상과 위치 등을 구하는 것이 주요 목적이므로 정착에 대한 비용은 모두 동일하다고 가정하였다.

2.3 제약조건

철근콘크리트 교량의 공용내하율은 식(2)와 같다 (한국시설안전기술공단, 2006).

$$RF = \frac{\phi M_n - 1.3 M_D}{2.15 M_L (1+i)} \times K \quad (2)$$

여기서, ϕM_n : 극한저항모멘트

M_D : 사하중모멘트

M_L : 설계활하중모멘트

i : 충격계수

K : 내하율 보정계수

Saadatmanesh 등(1989c)은 강합성보에서 외부

Table 2 배치형상에 따른 목적함수

구분	목적함수	설계변수
Queen-post	$OBJ = 2C_r X_3 X_4 L_d + \frac{X_2}{0.7 f_{pu}} (2\sqrt{(X_5 - X_1)^2 + (X_3 - d_1)^2} + L - 2X_5)$	X_1 : 정착위치, L_1 X_2 : 긴장력, T X_3 : 편향재 높이, d_2 X_4 : 편향재 두께, t X_5 : 편향재 위치, L_2
King-post	$OBJ = C_r X_3 X_4 L_d + \frac{2X_2}{0.7 f_{pu}} \sqrt{(\frac{L}{2} - X_1)^2 + (X_3 - d_1)^2}$	
편향재가 없는 경우	$OBJ = \frac{X_2}{0.7 f_{pu}} (L - 2X_1)$	

긴장재를 통한 보강이 이루어질 때 사하중에 의한 응력이 긴장력에 의한 응력만큼 감소되는 것을 고려하여 보강후 기본 내하율을 평가하였다. 본 연구에서는 외부 프리스트레싱을 이용한 RC 중공슬래브교

의 보강시 사하중에 의한 모멘트가 외부 프리스트레싱에 의한 부모멘트만큼 감소되는 것을 고려하여 보강후 공용내하율 평가식을 식(3)과 같이 정식화하였다.

Table 3 설계제약조건

구분	설계제약조건		기호설명
Queen-post	편향재 압축력	$G(1) = f_a L_d X_4 - \frac{X_2(X_3 - d_1)}{\sqrt{(X_5 - X_1)^2 + (X_3 - d_1)^2}} \geq 0$	X_1 : 정착위치 L_1 (mm) X_2 : 긴장력, T (kN) X_3 : 편향재 높이, d_2 (mm) X_4 : 편향재 두께, t (mm) X_5 : 편향재 위치, L_2 (mm)
	내하율	$G(2)_j = \frac{\phi M_{nj} - 1.3(M_{Dj} - M_{Tj})}{2.15 M_{Lj}(1+i)} - \frac{RF_{required}}{K} \geq 0$ <p>여기서, $0 \leq x_j < X_1$ 일 경우 $M_{Tj} = 0$ $X_1 \leq x_j < X_5$ 일 경우 $M_{Tj} = \frac{X_2(X_5 - X_1)}{\sqrt{(X_5 - X_1)^2 + (X_3 - d_1)^2}} \left(\left(\frac{X_3 - d_1}{X_5 - X_1} \right) (x - X_1) + (e + d_1) \right)$ $X_5 \leq x_j \leq \frac{L}{2}$ 일 경우 $M_{Tj} = X_5(e + X_3)$</p>	
	설계 변수	$50 \leq X_1 \leq \frac{L}{2}, 0 \leq X_2 \leq 1000, 50 \leq X_3 \leq 300, 0 \leq X_4 \leq 40, 100 \leq X_5 \leq \frac{L}{2}$	
King-post	편향재 압축력	$G(1) = f_a L_d X_4 - \frac{2X_2(X_3 - d_1)}{\sqrt{\left(\frac{L}{2} - X_1\right)^2 + (X_3 - d_1)^2}} \geq 0$	ϕM_{nj} : j단면에서 설계휨강도 M_{Dj} : j단면에서 사하중모멘트 M_{Lj} : j단면에서 활하중모멘트 M_{Tj} : j단면에서 프리스트레싱에 의한 모멘트 i : 충격계수 $RF_{required}$: 목표 내하율 K : 내하율 보정계수 f_a : 허용압축응력 L_d : 편향재 폭(=100mm) x_j : 단부에서 j단면까지 거리
	내하율	$G(2)_j = \frac{\phi M_{nj} - 1.3(M_{Dj} - M_{Tj})}{2.15 M_{Lj}(1+i)} - \frac{RF_{required}}{K} \geq 0$ <p>여기서, $0 \leq x_j < X_1$ 일 경우 $M_{Tj} = 0$ $X_1 \leq x_j \leq \frac{L}{2}$ 일 경우 $M_{Tj} = \frac{X_2 \left(\frac{L}{2} - X_1 \right)}{\sqrt{\left(\frac{L}{2} - X_1\right)^2 + (X_3 - d_1)^2}} \left(\left(\frac{X_3 - d_1}{\frac{L}{2} - X_1} \right) (x - X_1) + (e + d_1) \right)$</p>	
	설계 변수	$50 \leq X_1 \leq \frac{L}{2}, 0 \leq X_2 \leq 1000, 50 \leq X_3 \leq 300, 0 \leq X_4 \leq 40$	
편향재 없는 경우	내하율	$G(1)_j = \frac{\phi M_{nj} - 1.3(M_{Dj} - M_{Tj})}{2.15 M_{Lj}(1+i)} - \frac{RF_{required}}{K} \geq 0$ <p>여기서, $0 \leq x_j < X_1$ 일 경우 $M_{Tj} = 0$ $X_1 \leq x_j \leq \frac{L}{2}$ 일 경우 $M_{Tj} = X_2(e + d_1)$</p>	
	설계 변수	$50 \leq X_1 \leq \frac{L}{2}, 0 \leq X_2 \leq 1000$	

$$RF' = \frac{\phi M_n - 1.3(M_D - M_T)}{2.15M_L(1+i)} \times K \quad (3)$$

여기서, M_T 는 외부 프리스트레싱에 의해 단면에 발생하는 모멘트이다. 본 연구에서는 보강후 공용내하를 평가식과 도로교설계기준(2005)을 참고로 긴장재 배치형상에 따른 제약조건식들을 정식화하여 Table 3에 나타내었다.

2.4 최적화 기법

본 연구에서는 최적화 기법으로 축차무제약 최소화 기법(SUMT)을 사용하였다. SUMT는 일련의 벌칙 parameter를 이용하여 제약 문제를 무제약 문제로 변환하여 최적해를 구하는 수치해석적인 방법으로서 설계변수들의 초기값에서 제약조건들의 만족도가 높아지도록 설계변수와 목적함수의 값을 반복적으로 개선시키게 된다. 따라서 개선된 설계점을 얻기 위한 방향탐색과 이동거리를 정하는 일이 중요하다. 이를 위해 본 연구에서는 수정된 뉴턴-랩슨방법을 통해 이계 미분값을 이용하여 설계방향을 탐색하였으며, 선택된 방향에서 탐사거리를 정하기 위해서는 황금분할법을 적용하였다.

3. 예제 및 결과 분석

3.1 RC 중공슬래브교의 최적보강

본 연구의 내용을 검증하기 위하여 지간길이가 16m인 보강 대상 RC 중공슬래브교를 선정하여 Fig. 3에 나타내었으며 보강을 위한 일반 조건은 Table 4에 나타내었다. 중공슬래브교의 휨강도와 중립축의 위치를 계산하기 위해 Fig. 4와 같이 중공슬래브교의 단면을 가상 T형 단면으로 환산하여 계산하였다.

강도 감소를 고려한 단위폭당 휨강도는 1853.8 kNm, 중공슬래브 바닥면에서 중립축까지 거리(e)는 1.0654m로 계산되었다. 또한, 사하중모멘트(M_D)가 최대인 위치(8.0m)에서의 설계모멘트(M_u)는 1943.9 kNm로 계산되었으며, 활하중모멘트(M_L)가 최대인

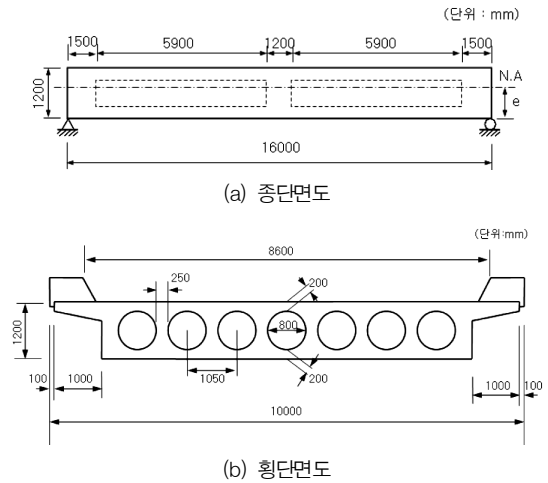


Fig. 3 RC 중공슬래브교

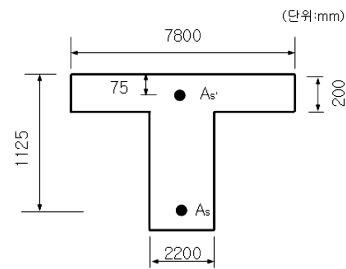


Fig. 4 RC 중공슬래브교의 가상 T형 환산단면

Table 4 RC중공슬래브교 보강설계 조건

구분	설계조건	
재료	콘크리트	$f_{ck} = 21 \text{ MPa}$ $E_c = 21538 \text{ MPa}$
	철근	$f_y = 400 \text{ MPa}$ $E_s = 200000 \text{ MPa}$
	긴장재 (SWPC 7B)	인장강도 = 1860 MPa
	편향재 (SS400)	항복응력 = 235 MPa 탄성계수 = 206000 MPa
	편향재와 긴장재 가격비 $C_r = 0.01$	
철근량	$A_s = 39829\text{mm}^2$, $A_s' = 12848^2$	
하중	단위폭당 사하중 : 23.48 kN/m, 유효폭을 고려한 단위폭당 DB24하중 $P_f = 13.91 \text{ kN}$ $P_r = 55.65 \text{ kN}$	

위치(7.3m)에서의 설계모멘트(M_u)는 1946.9 kNm로 계산되었다. 하지만, 설계모멘트(M_u)의 최대값은 1950.0 kNm로서 지점으로부터 7.592m 떨어진 곳에서 발생되었다. 재하시험을 통해 산정된 보정계수값($K=0.8$)과 식(2)를 이용하여 최대설계모멘트가 발생하는 단면의 공용내하율을 평가한 결과 공용내하율이 0.721로 계산되어 보강이 필요한 것으로 판명되었다.

본 연구에서는 보강 전 공용내하율이 0.721인 RC 중공슬래브교를 설계자가 요구하는 목표내하율을 만족하도록 긴장재 배치 형상에 따라 최적화를 수행하

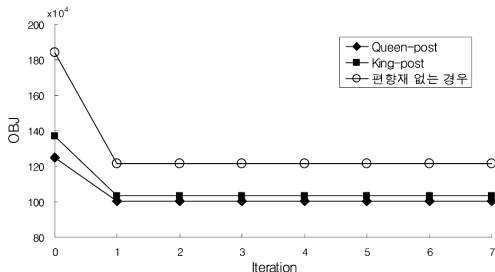


Fig. 5 중공슬래브교 목적함수의 수렴

Table 5 중공슬래브교 설계변수의 최적값

설계변수	Queen-post	King-post	편향재 없는 경우
정착위치(mm)	4593	4593	4593
긴장력(kN)	190.2	196.6	232.5
편향재높이(mm)	300	300	-
편향재두께(mm)	9.1	11.1	-
편향재위치(mm)	7357	8000	-
목적함수	1004438.0	1035025.5	1216846.4

Table 6 설계모멘트와 보강전·후 내하율

위치(m)	0	1.6	3.2	4.593	4.8	6.4	7.592	8	8.408	9.6	11.2	11.457	12.8	14.4	16	
M_D (kNm)	0.0	270.5	480.9	615.0	631.1	721.3	749.4	751.4	749.4	721.3	631.1	566.4	480.9	270.5	0.0	
M_L (kNm)	0.0	145.2	250.4	309.3	315.5	352.3	357.9	354.8	357.9	352.3	315.5	289.2	250.4	145.2	0.0	
M_u (kNm)	0.0	747.6	1307.8	1642.8	1680.7	1898.0	1950.0	1943.9	1950.0	1898.0	1680.7	1642.8	1307.8	747.6	0.0	
RF	보강전	-	3.03	1.32	1.00	0.96	0.76	0.721	0.73	0.721	0.76	0.96	1.00	1.32	3.03	-
	Queen-post	-	3.03	1.44	1.00	1.22	1.03	1.00	1.01	1.00	1.03	1.22	1.00	1.44	3.03	-
	King-post	-	3.03	1.44	1.00	1.23	1.03	1.00	1.02	1.00	1.03	1.23	1.00	1.44	3.03	-
	편향재없을때	-	3.03	1.44	1.00	1.28	1.05	1.00	1.01	1.00	1.05	1.28	1.00	1.44	3.03	-

였다. 설계자가 요구하는 목표내하율을 1.0으로 가정하여 긴장재 배치 형상별 목적함수의 수렴양상을 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 5에서 보는 바와 같이 최적해의 수렴성이 양호함을 알 수 있었다.

긴장재 배치형상별 목적함수값과 설계변수를 Table 5에 나타내었다. Table 5에서 보는 바와 같이 Queen-post의 목적함수 값은 1,004,438로서 King-post의 목적함수 값 보다는 3.0%, 편향재가 없는 경우의 목적함수 값 보다는 21.1% 더 경제적임을 알 수 있었다. 또한, Queen-post의 긴장력은 190.2kN으로서 King-post의 긴장력 보다는 3.4%, 편향재가 없는 경우의 긴장력 보다는 22.2% 낮게 나왔다. 따라서, 긴장재의 배치형상 중 Queen-post 방법이 가장 효과적인 보강 형상임을 알 수 있었다.

Table 5에서 최적설계 결과로 나타난 정착구의 위치는 세 형상 모두 4.593m를 나타내고 있다. 이 위치는 Table 6를 통해 보강전 교량의 내하율이 1.0보다 작아지기 시작하는 위치임을 알 수 있다. 결국 SUMT로 찾은 최적의 정착부 위치는 교량의 내하율이 1.0보다 작아지기 바로 직전이 되는 것을 알 수 있었다. 최대설계모멘트가 발생하는 위치인 7.592m 지점과 8.408m지점에서 보강전 내하율이 0.721에서 보강후 1.0으로 내하율이 향상됨을 알 수 있었다. 따라서, 본 연구에서 제안한 방법이 보강이 필요한 구간에서만 보강효과가 있음을 알 수 있었다.

3.2 정착부의 위치변화

정착부 위치가 보강에 기여하는 효과를 살펴보기 위하여 Queen-post 보강방법에서 정착단의 위치

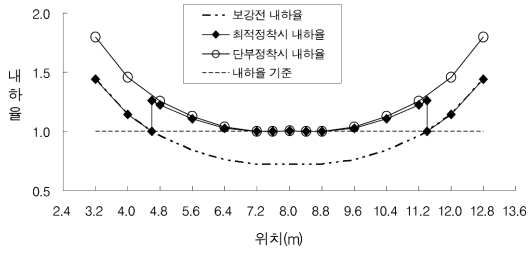


Fig. 6 보강전·후 내하율

Table 7 정착부 위치에 따른 변화

정착단 구분	최적정착시	단부정착시
정착위치(mm)	4593	0
긴장력(kN)	190.2	190.2
편향계높이(mm)	300	300
편향계두께(mm)	9.1	6.4
편향계위치(mm)	7358	7592
목적함수	1004438	2342976

를 설계변수로 취급한 최적정착의 경우와 정착단의 위치를 단부로 고정한 단부정착의 경우에 대하여 보강전후의 내하율 형상을 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 6에서 보는 바와 같이 최적정착의 경우 보강전 내하율이 1.0보다 작은 구간 즉 보강이 필요한 구간에서만 외부 프리스트레싱에 의해 내하율이 증가되는 것을 알 수 있었다. 그러나 정착부의 위치를 단부로 고정한 단부정착의 경우 내하율이 교량 전구간에 걸쳐 증가함으로서 보강이 필요없는 구간에서도 보강됨을 알 수 있었다. 즉 단부정착을 통해 보강이 이루어지는 경우는 보강이 필요 없는 부분에서도 내하율을 증가시켜 Table 7에서 보는 바와 같이 목적함수 값이 2,342,976로서 최적정착의 경우보다 133% 정도 비용이 더 증가함을 알 수 있었다.

3.3 시간길이의 변화

긴장재의 배치형상별 시간 길이의 변화에 따른 목적함수의 변화를 Fig. 7에 나타내었다. Fig. 7에서 보는 바와 같이 편향재가 없는 경우 시간 길이가 증가할수록 목적함수 값의 증가속도가 더 크게 나타났으며 이를 통해 시간 길이가 길수록 Queen-post가

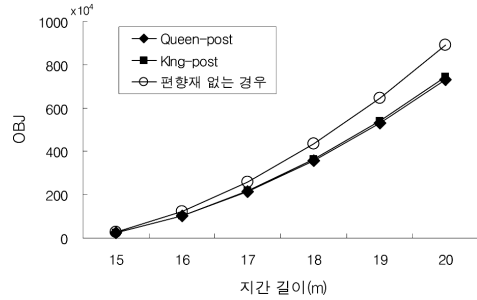


Fig. 7 시간길이에 따른 목적함수 변화

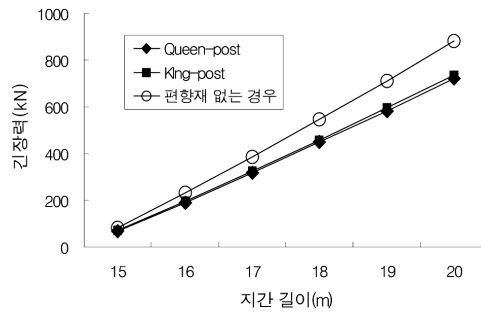


Fig. 8 시간길이에 따른 긴장력 변화

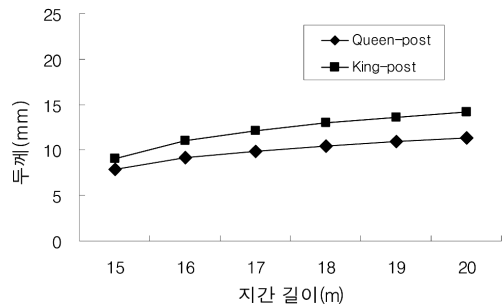


Fig. 9 시간길이에 따른 편향재 두께 변화

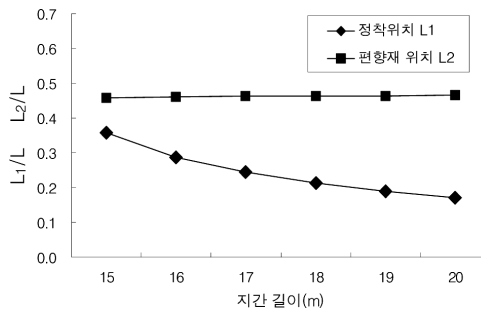


Fig. 10 Queen-post에서 시간길이에 따른 위치 변화

더 경제적인 형상이 되는 것을 알 수 있었다. 지간 길이에 따른 긴장력의 변화를 Fig. 8에 나타내었다. 편향재가 없는 경우 소요 긴장력이 더 커진다는 것을 알 수 있었다.

또한, Queen-post와 King-post 형상에서 지간 길이 변화에 따른 편향재 두께의 변화를 Fig 9에 나타내었다. King-post 형상의 경우 1개의 편향재가 긴장재의 축력을 받게 되므로 편향재 두께가 더 두꺼워진다는 것을 알 수 있었다. Fig. 10에서는 Queen-post형상에서 지간 길이에 따른 정착 위치 및 편향재 위치를 지간길이에 대한 비율로 나타내었다. Fig. 10에서 보는 바와 같이 지간 길이가 증가할수록 정착구의 위치는 단부 쪽으로 이동하고 편향재의 위치는 0.46L 위치에서 형성되는 것을 알 수 있었다. 이는 지간 길이 증가에 따라 휨강도를 초과하는 설계모멘트의 영역이 증가함으로서 보강해야 할 영역이 증가되기 때문인 것으로 파악된다.

4. 결 론

본 연구에서는 외부 프리스트레싱을 이용하여 RC 중공슬래브교의 보강을 위한 긴장재 배치형상별 최적의 정착부의 위치, 편향재의 위치 및 높이, 긴장력을 산출하였으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 제안된 방법은 RC 중공슬래브교의 목표내하율을 만족하는 외부 프리스트레싱을 위한 최적의 정착부의 위치, 편향재의 위치 및 높이, 긴장력을 최적화 기법을 통하여 산출할 수 있음을 알 수 있었다.

(2) Queen-post 보강방법은 King-post 보강방법보다 3.0%, 편향재가 없는 보강방법 보다 21.1% 정도 더 경제적임을 알 수 있었다. 또한, Queen-post 보강방법은 King-post 보다 3.4%, 편향재가 없는 경우 보다 22.2% 정도 낮은 긴장력으로 보강할 수 있음을 알 수 있었다.

(3) Queen-post 보강방법에서 최적정착의 경우는 단부정착에 비해 57%정도 더 경제적임을 알 수 있었으며, 지간길이가 길어질 경우에도 편향재가 없는 경우에 비해 Queen-post 보강방법이 경제적임을 알 수 있었다.

참고문헌

1. 건설교통부, “도로교설계기준”, 2005.
2. 최동호, 나호성, 이진호, “외부긴장재로 보강된 강합성부의 극한거동에 대한 실험적 연구”, 한국구조물진단학회지, 제12권, 제6호, 2008, pp63-70.
3. 최동호, 정상환, 유동민, “외부 긴장재로 보강된 강합성부의 내하율 산정식을 이용한 초기 긴장력 결정,” 한국강구조학회논문집, 제17권, 제5호, 2005, pp.527-536.
4. 한국건설기술연구원, “교량의 설계 및 시공지침 작성 연구 최종보고서”, 건설교통부, 2001.
5. 한국시설안전기술공단, “교량 내하력 평가 매뉴얼”, 2006.
6. Saadatmanesh, H., Albrecht, P. and Ayyub, B.M., “Analytical Study of Prestressed Composite Beams,” Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol.115, No.9, 1989a, pp. 2364-2381.
7. Saadatmanesh, H., Albrecht, P. and Ayyub, B.M., “Experimental Study of Prestressed Composite Beams,” Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol.115, No.9, 1989b, pp. 2348-2363.
8. Saadatmanesh, H., Albrecht, P. and Ayyub, B.M., “Guidelines for Flexural Design of Prestressed Composite Beams,” Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol.115, No.11, 1989c, pp. 2944-2961.
9. Troitsky, M. S., Zielinski, Z. A. and Nouraeyan, A., “Pre-Tensioned and Post-Tensioned Composite Girders,” Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol.115, No.12, 1989, pp. 3142-3153.

(접수일자 : 2009년 8월 17일)

(심사완료일자 : 2009년 10월 29일)