

# 시공단계가 고려된 스트레스 리본 교량의 해석 모델

윤경민<sup>1</sup>, 김기동<sup>2</sup>, 이진옥<sup>1</sup>, 임남형<sup>\*</sup>  
<sup>1</sup>충남대학교 토목공학과, <sup>2</sup>공주대학교 토목공학과

## Analysis Model of the Stress Ribbon Bridge considering the Construction Stage

Kyung-Min Yun<sup>1</sup>, Kee-Dong Kim<sup>2</sup>, Chin-Ok Lee<sup>1</sup>, Nam-Hyoung Lim<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Civil Engineering, Chungnam National University

<sup>2</sup>Department of Civil Engineering, Kongju National University

**요약** 스트레스 리본 교량(Stress Ribbon Bridge)이란 두께가 얇은 상부구조(바닥판)가 특정한 현수 형태(catenary type)로 유지되고 긴장된 바닥판(Post-tensioned deck)이 하중에 의해 역 아치(Reverse arch) 거동을 보이는 PSC 구조물이다. 현재 스트레스 리본 교량의 경우 국외에서 자연과미를 최소화 하고 아름다운 구조로 인식되어 차도교, 보도교 등에 활발하게 이용되고 있으나 국내에서는 이와 관련된 연구가 매우 미흡한 실정이다. 본 연구에서 시공단계가 고려된 스트레스 리본교량의 비선형, 시간의존적 해석이 고려된 모델을 정립하는데 목적이 있다. 정립된 모델을 이용하여 시공단계에 따른 단면력을 이론에 의한 수치와 비교하여 그 타당성을 입증하였으며, 시공단계에 따른 교량의 거동을 분석하였다.

**Abstract** A stress ribbon bridge is a PSC structure that behaves as a reverse arch structure due to post-tensioned thin deck of the catenary type. In foreign countries, the stress ribbon bridge is recognized as the minimum destruction of nature and beautiful bridge, and has many construction examples as pedestrian and car bridges. On the other hand, there have been few studies in Korea. In this study, the FE Analysis model was established for different construction stages considering the nonlinear and time-dependent behaviors. The FE model was verified by a comparison with the numerical results and the behavior was analyzed for the different construction stages.

**Key Words** : Stress ribbon bridge, PSC, reverse arch, FE analysis

## 1. 서론

스트레스 리본 교량은 바닥판의 두께가 상대적으로 얇고 현수케이블이 매립되는 타정식교량이다. 이러한 구조적 특성에 의하여 모멘트는 크게 감소되며, 하중은 바닥판의 인장력으로 주로 저항하기 때문에 60m~150m의 경간에 대해서 효율적으로 적용할 수 있다. 현재 미국, 유럽 및 일본 등에서는 자연훼손을 최소화 하는 아름다운 구조로 인식되어 도로교, 보도교 등에 활발하게 이용되고 있다. 그러나 국내에서는 이와 관련된 연구가 매우 미흡한 실정으로 설계방법과 시공기술에 관한 정보와 이해

가 부족하여 현재까지 국내에 적용 되지 않고 있는 교량 형식으로 분류된다. 본 연구에서 스트레스 리본교량의 국내 도입을 위한 기초연구로 범용 FE프로그램인 DIANA[1]를 이용하여 시공단계가 고려된 스트레스 리본교량의 해석 모델을 제안하고자 한다.

## 2. 시공단계를 고려한 해석모델

### 2.1 시공 단계

Fig. 1은 스트레스 리본 교량의 상부구조의 설계 순서

본 연구는 국토교통부 국토교통기술촉진연구사업(11기술혁신B01)의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

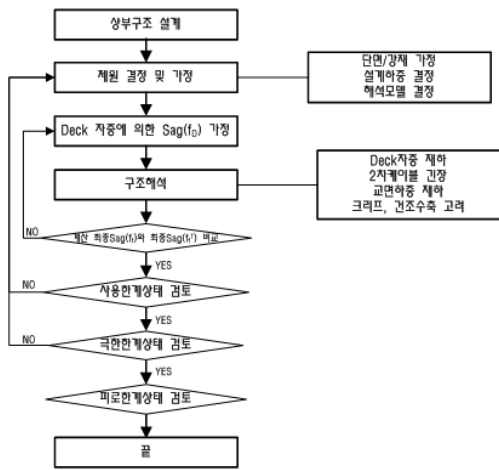
\*Corresponding Author : Nam-Hyoung Lim(Chungnam National Univ.)

Tel: +82-42-821-7005 email: [nhrim@cnu.ac.kr](mailto:nhrim@cnu.ac.kr)

Received October 27, 2014

Revised November 5, 2014

Accepted November 6, 2014



[Fig. 1] Flow chart of superstructure of stress ribbon bridge

를 나타낸다. 목표로 하는 새그의 설정은 케이블 수, 교대에 작용하는 수평력과 그라운드앵커 수, 진동, 배수계획 등에 많은 영향을 미치기 때문에 주요설계인자이며, 최초새그( $f_D$ )에서 긴장제(2차케이블)의 긴장, 교면하중, 크리프 및 건조수축이 순차적으로 고려되어 최종새그( $f_f^T$ )에 도달한다. 최종새그가 목표새그와 동일하게 도출된 이후, 한계상태 검토를 통하여 상부구조의 설계가 완성된다.

스트레스 리본 교량의 시공 단계는 다음의 6단계로 이루어진다. 각 단계에 대한 상세도는 Fig. 2와 같다.

(1) 교대 및 그라운드 앵커 시공

: 스트레스 리본 교량을 시공하기 위해서 먼저 양단에 교대를 설치하고 그라운드 앵커를 시공한다. 그라운드 앵커는 상부구조에서 발생하는 수평반력을 지지하는 역할을 한다.

(2) 1차 케이블(지지 케이블) 시공

: 프리캐스트 콘크리트 바닥판을 가설하기 위한 지지 케이블을 설치한다. 바닥판 가설후 초기 새그( $f_D$ )를 유지할 수 있도록 케이블 긴장이 필요하다.

(3) 바닥판 패널 가설 및 일체화 시공

: 미리 제작된 콘크리트 바닥판을 지간의 중앙부터 1차 케이블에 하나씩 가설하며, 이후 분리된 바닥판을 일체화 시킨다.

(4) 바닥판-교대 접속부 시공

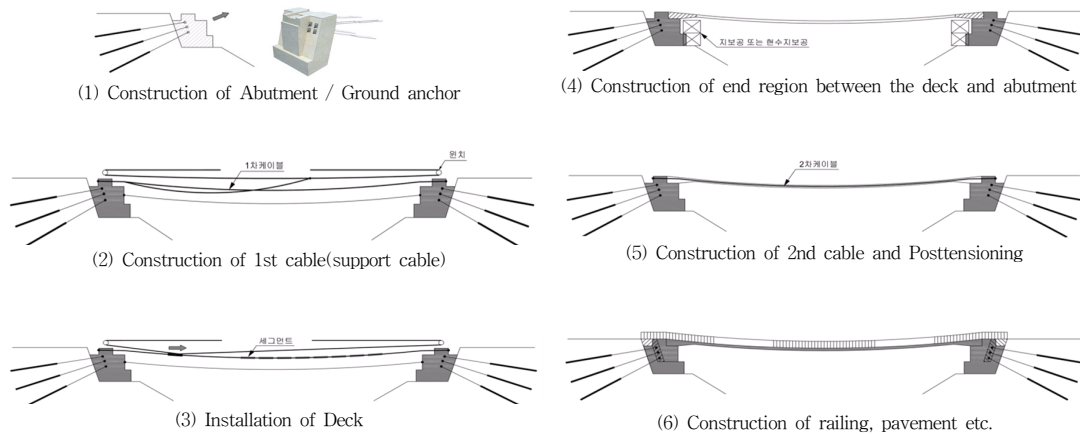
: 바닥판 가설 이후 현장 콘크리트를 타설하여 접속부를 시공하고 1차 케이블(지지케이블)과 바닥판을 일체화 한다.

(5) 2차 케이블 시공 및 긴장

: 2차케이블을 설치하고 긴장력을 가하여 바닥판에 프리스트레스를 도입한다. 긴장 후 그라우팅을 하여 2차케이블과 바닥판을 일체화 시킨다.

(6) 부대시설 시공(포장, 난간 등)

: 포장과 난간 등 부대시설을 가설하여 교량을 완성한다.



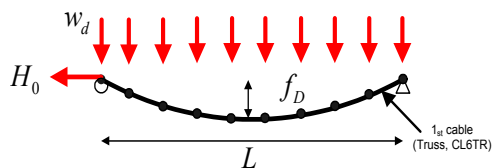
[Fig. 2] Construction stage of stress ribbon bridge

## 2.2 시공단계를 고려한 해석모델

스트레스 리본교량 해석 시 시공 단계에 따라 응력상태가 지속적으로 변하므로 시공 단계별 하중의 중첩원리가 적용되지 않는다. 따라서 시공단계가 고려된 해석이 필수적이다.[2] 상부구조 설계 절차를 이용하여 실제 시공사와 유사한 해석 모델을 구현하기 위해 범용유한요소 해석 프로그램 DIANA(9.4)[1]을 사용하였다. 스트레스 리본 교량은 휨강성이 매우 작기 때문에 휨에 대한 변형을 자유로이 모사할 수 있는 3절점 요소를 사용하였다. 1차케이블은 3절점 트러스요소(CL6TR)를 적용하였으며, 콘크리트 바닥판은 3절점 빔요소(CL9BE)를 적용하였다. 2차케이블은 긴장력 재하의 역할을 하며 빔요소의 node를 공유하는 Bar요소를 적용하였다. 2.1절에서 언급한 스트레스 리본 교량의 시공단계를 고려한 유한요소해석 모델 구축의 상세단계는 다음과 같다.

### (1) 1차 케이블 설치 및 초기 새그 설정

최초 지지케이블(1차케이블)에 콘크리트 바닥판 거치시 케이블이 바닥판의 자중에 저항하며, 바닥판 패널에는 내력이 발생하지 않는다. 1차 케이블을 설치하고 케이블에 거치되는 바닥판 패널의 자중에 의해 발생하는 케이블 중앙지점의 새그발생량을 설계 시 가정했던 초기 새그와 일치시키기 위해 다음과 같은 기법을 적용하였다. 실제 시공 시 지간장의 변화가 없는 양단 Hinge에 가까운 조건에서 바닥판이 거치되지만, 양단 힌지의 해석모델을 이용하여 원하는 새그를 맞출 시 케이블의 초기장력이 고려되어야하며 많은 시행착오가 필요하다. 그러므로 해석의 편리성을 도모하고 결과의 오차를 최소화하기 위하여 케이블 이론을 바탕으로 한 Roller-Hinge의 경계조건을 적용하였으며, Eq 1을 이용하여 원하는 초기 새그와 수평력을 시행착오 없이 얻을 수 있다. Fig. 3은 초기형상을 모델링하기 위해 재하된 수평력( $H_0$ ), 자중( $w_d$ )을 나타낸다.



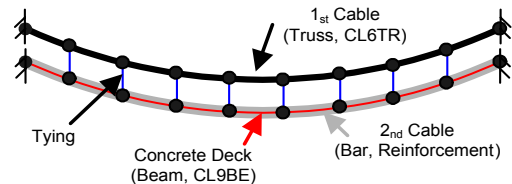
[Fig. 3] Modeling for initial shape

$$H_0 = \frac{w_d \times L^2}{8 \times F_D} \quad (1)$$

여기서,  $w_d$  : 바닥판의 사하중(N/m)  
 $F_D$  : 지간 중앙의 초기 새그(m)  
 $H_0$  : 1차 케이블 수평력(N)  
 $L$  : 지간의 길이(m)

### (2) 바닥판 및 2차 케이블 설치

본 단계에서는 (1)단계에서 초기형상이 모델링된 1차 케이블에 콘크리트 바닥판을 설치하고 바닥판 내부에 2차 케이블을 설치하는 것을 모델링한다. 바닥판은 3절점 빔요소인 CL9BE를 사용하여 1차 케이블의 초기형상 좌표에 모델링하였다. 또한 2차 케이블은 Bar요소인 Reinforcement를 사용하여 바닥판 요소를 따라 모델링하였다. 1차 케이블(CL6TL)과 바닥판(CL6BE)의 일체화된 거동을 모사하기 위하여 병진거동을 일치화시키는 ‘Tying’ option을 사용하였다. 즉, 1차 케이블과 바닥판의 거동을 일체화 시켰다. Fig. 4는 1차케이블, 바닥판 그리고 2차케이블의 설치가 완료된 모델을 나타낸다.

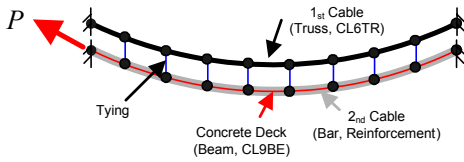


[Fig. 4] Modeling for concrete deck and 2nd cable

### (3) 2차케이블 긴장

(2)단계에서 Bar 요소로 모델링 된 2차 케이블에 긴장력을 도입한다. 긴장력 도입 시 다음과 같은 2가지 방법을 적용할 수 있다. Fig. 5는 긴장력 도입 모델을 나타낸다.

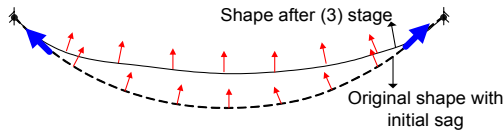
- 평균긴장력 도입방법( $P_{av}$ ) : 손실이 고려된 이론적 긴장력으로 일반적으로 설계에서는 마찰에 의한 손실, 탄성변형에 의한 손실, 정착구활동에 의한 손실을 고려하여 평균긴장력을 산정하고 Bar 요소에 도입한다.
- 초기긴장력도입 방법( $P_0$ ) : 실제 초기긴장력을 도입하여 해석상 손실을 고려한다.



[Fig. 5] Introduction of prestressing

초기 긴장력을 도입하여 해석에서 손실을 고려할 경우 마찰에 의한 손실, 정착구 활동에 의한 손실은 SHEAR, WOBBLE, RETLEN option을 사용하여 곡률마찰계수, 파상마찰계수, 정착장치 활동량을 고려할 수 있으며, 탄성변형에 의한 손실은 긴장 후 Bonding option을 사용하여 순차적으로 고려가 가능하다.

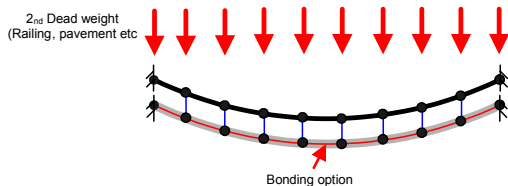
2차케이블에 긴장력이 도입되면 Fig. 6와 같이 새그가 상승하게 되며, 그에 따라 바닥판에는 압축력이 발생된다.



[Fig. 6] Behavior of arch structure with posttension

(4) 2차 사하중

교면하중으로 포장 및 난간설치에 의한 추가 사하중 재하 단계이다. 실제 시공은 2차케이블에 프리스트레스 도입 후 그라우팅을 하고, 포장 및 난간 등 각종 부대시설을 설치한다. 이를 모사하기 위하여 바닥판 요소와 2차케이블 요소를 Bonding option을 통해 일체화 시킨 후 Fig. 7과 같이 하중으로 재하한다.



[Fig. 7] 2nd Dead load

(5) 크리프, 건조수축

시공중 스트레스 리본교량은 경계조건의 변화, 현장타설, 포스트텐션 적용 등 여러 재령의 구조부재들이 결합

되며, 점진적으로 콘크리트에 하중이 재하된다. 따라서 구조물의 가설중 또는 시공 후의 콘크리트 크리프와 건조수축이 주의 깊게 고려되어야한다. 건조수축과 크리프로 인한 콘크리트의 변형은 시멘트, 골재의 유형, 기후, 부재의 크기 그리고 재하시간 등에 따라 변한다. 국내에서는 콘크리트 구조물의 설계 시 크리프/건조수축을 고려하기 위하여 CEB-FIP Code를 사용하며, 본 연구에서도 동일하게 고려하였다. 크리프 및 건조수축의 영향을 고려하기 위해 DIANA 프로그램 내의 CEB-FIP Model을 사용하였으며, 시간에 따라 고려된 변형률함수는 Eq 2, 3과 같다.[3]

(a) 건조수축

$$\epsilon_{sh}(t, t_s) = \epsilon_{sho} \beta_s(t - t_s) \tag{2}$$

여기서,  $\epsilon_{sh}(t, t_s)$ 는 건조수축의 시작시간  $t_s$ 와 외기에 노출된 콘크리트 재력시간  $t$ 사이에 일어나는 콘크리트의 축방향 전체 건조수축 변형률을 나타내며,  $\epsilon_{sho}$ ,  $\beta_s(t - t_s)$ 는 각각 콘크리트의 기본 건조수축 변형률과 부재의 유효두께의 함수를 나타낸다.

(b) 크리프변형률

$$\epsilon_{cc}(t, t') = \frac{f_c(t')}{E_{ci}} \varphi(t, t') \tag{3}$$

여기서  $\epsilon_{cc}(t, t')$ 는  $t'$ 와  $t$ 시간 사이에서 크리프에 의한 변형률을 나타내며,  $f_c(t')$ 는 시간  $t'$ 에서 작용응력,  $E_{ci}$ 는 콘크리트의 초기집선탄성계수,  $\varphi(t, t')$ 는 크리프 계수를 나타낸다.

3. 해석모델 검증

모델의 타당성을 위하여 Diego et al.[4]등이 제시한 모델과 동일한 조건을 이용하여 해석을 수행하였으며, 결과를 비교하였다.



**(3) 2차 사하중과 크리프 영향**

2차 사하중과 크리프는 Diego et al.[4]등과 동일하게 고려하였다.

**3.3 해석 결과**

시공단계에 따른 해석결과와의 비교를 위하여 다음의 2가지 하중상태에 대해 결과를 비교하였다.

- 바닥판 자중+긴장력 도입+2차 사하중
- 바닥판 자중+긴장력 도입+2차 사하중+크리프

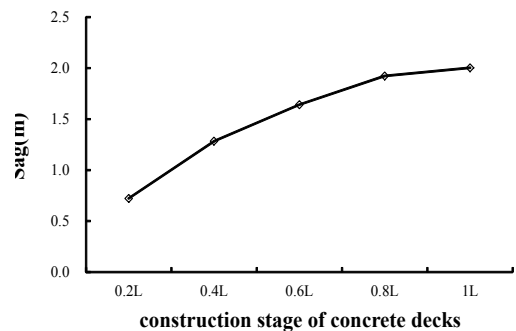
Table 2, Table 3은 새그, 수평반력, 단부에서의 휨모멘트, 시간 중앙부에서의 휨모멘트를 비교한 것이다. 이로부터 본 연구에서 제시한 유한요소 해석모델이 타당함을 알 수 있다.

**4. 시공단계별 거동**

시공단계에 따른 교량의 거동을 살펴보기 위하여 교량의 새그 및 부재의 응력변화를 분석하였다. Fig. 10은 Fig. 9와 같은 바닥판 재하 순서에 따른 시간 중앙의 새그를 나타낸다. 콘크리트 바닥판의 재하길이가 증가할수록 새그의 증가량은 작게 나타났다.

Fig. 11는 시공 단계에 따른 스트레스 리본 교량의 거동을 나타낸다. (a)는 시공단계별 최대 새그를 나타낸다. 콘크리트 바닥판 설치 시 최대 새그가 발생하며, 2차 케

이블에 긴장력 재하 후 새그가 크게 줄어들고, 크리프에 의해 최종 새그에 도달함을 알 수 있다. (b)는 시공단계별 시간 중앙 1차케이블의 응력변화를 나타낸다. 콘크리트 바닥판 가설 시 최대인장응력이 발생하였으며, 2차 케이블의 긴장력 재하에 따라 압축응력이 유발되어 인장응력이 감소하게 되며, 이후 시공단계에는 영향을 크게 받지 않는 것으로 분석되었다. (c)는 시공단계별 2차케이블의 응력변화를 나타낸다. 긴장 시 인장응력이 발생하였으며, 시공단계에 따라 최대 5.5%이내의 응력변화로 시공단계에 따른 변화량은 매우 작은 것으로 분석되었다. (d)는 시공단계별 콘크리트 바닥판의 중립축에서의 응력변화를 나타낸다. 2차 케이블 긴장 시 최대 압축응력이 발생하였으며, 이후 시공단계에 따라 인장응력이 추가 발생되어 결국 크리프 단계에서는 긴장 시 발생한 압축응력의 약 60%정도가 손실되는 것으로 판단된다.



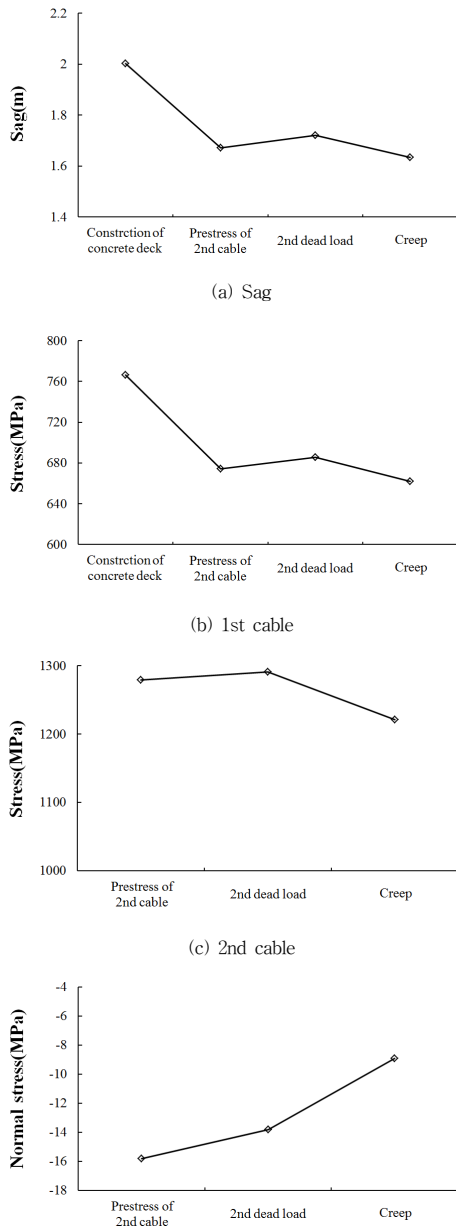
[Fig. 10] Deformed shape with the construction stage of concrete

[Table 2] Sag and reaction force

Load	Sag(m)			Reaction force at abutment(kN)		
	Diego et al.	This study	ERROR(%)	Diego et al.	This study	ERROR(%)
Prestress+ 2nd Dead load	1.72	1.72	0.12	15,896	15,889	0.04
Prestress+ 2nd Dead load+Creep	1.47	1.46	1.15	13,226	13,009	1.64

[Table 3] Bending moment of concrete deck

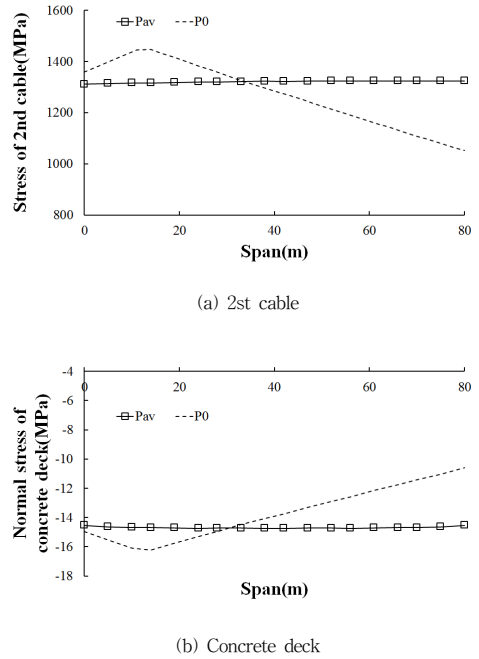
Load	Bending moment(Support area, kNm)			Bending moment(Center of span, kNm)		
	Diego et al.	This study	ERROR(%)	Diego et al.	This study	ERROR(%)
Prestress+ 2nd Dead load	1,006.9	997.2	0.96	-116.7	-117.2	0.43
Prestress+ 2nd Dead load+Creep	1,147.5	1130	1.53	-63.2	-69.8	10.49



[Fig. 11] Behaviour of stress ribbon bridge according to construction stage

Fig. 12는 긴장력 손실을 미리 고려한 평균긴장력을 재하한 경우( $P_{av}$  방법)와 초기긴장력을 재하하여 해석 내에서 손실을 고려한 경우( $P_0$  방법)에 대해 2차케이블의 응력(a)과 바닥판의 중립축에서의 범선응력(b)을 비교한 그래프이다.  $P_{av}$  방법에 의해서는 2차 케이블과 바닥판에 발생하는 응력이 전 기간에 걸쳐 균일하게 발생하였으나

$P_0$  방의 경우에는 그림 12와 같이 불균일한 거동이 나타났으며, 최대 응력을 비교하면 약 11% 정도  $P_0$  방법이 크게 평가되었다. 그러므로 2차 케이블의 긴장에 따른 거동 해석 시  $P_0$  방법이 타당할 것으로 판단된다.



[Fig. 12] Comparison between  $P_{av}$  and  $P_0$  method

#### 4. 결론

본 연구에서는 스트레스 리본 교량의 시공단계가 고려된 유한요소 해석 모델을 정립하고, 그 타당성을 검증하였다. 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 지지케이블(1차케이블)의 설치 후 콘크리트 바닥판의 가설과 접합 및 연결부 현장타설, 부대시설 시공 및 크리프 등 시공단계가 고려된 유한요소 해석 모델을 정립하였다.
- 2) 지지케이블에 콘크리트 바닥판의 가설로 인한 최초 새그로부터 시공단계에 따른 여러 하중에 의한 최종새그를 일련의 해석을 통해 산출 가능하다.
- 3) 시공단계에 따른 모든 부재들의 단면력과 응력을 정량적으로 평가하여 최대 응력이 발생하는 시공 단계를 파악할 수 있다.



4) 2차케이블의 긴장력 제하에 따른 거동분석을 위해서는  $P_0$  방법이 타당할 것으로 판단된다.

### References

- [1] Jonna Manie, Wijtze Pieter Kikstra, "DIANA User's Manual-Material Library, Concrete and Mansony Analysis, Element Library", 2011.
- [2] Strasky, J. "Stress ribbon and cable-supported pedestrian bridges", 2006.
- [3] Comit E, Euro-International Du B, "Ceb-Fib Model Code 1990:Design Code", 1993.
- [4] Codo del Arco, D. and Aparicio, A. C. "Analytical and Numerical Static Analysis of Stress Ribbon Bridges, Vol. 6, pp. 234-241, 2001.

### 윤 경 민(Kyung-Min Yun) [정회원]



- 2009년 2월 : 충남대학교 토목공학과 (공학사)
- 2012년 2월 : 충남대학교 대학원 토목공학과 (공학석사)
- 2012년 3월 ~ 현재 : 충남대학교 토목공학과 박사과정

<관심분야>  
구조공학, 궤도공학

### 이 진 옥(Chin-Ok Lee) [정회원]



- 1980년 2월 : 충남대학교 토목공학과 (공학사)
- 1982년 2월 : 충남대학교 대학원토목공학과 (공학석사)
- 1993년 8월 : 고려대학교 대학원토목공학과 (공학박사)
- 1994년 3월 ~ 현재 : 충남대학교 토목공학과 교수

<관심분야>  
구조공학, 내진공학

### 임 남 형(Nam-Hyoung Lim) [정회원]



- 1996년 2월 : 고려대학교 대학원 토목환경공학과 (공학석사)
- 2001년 8월 : 고려대학교 대학원 토목환경공학과 (공학박사)
- 2003년 7월 ~ 2005년 3월 : 한국철도기술연구원 선임연구원
- 2005년 4월 ~ 현재 : 충남대학교 토목공학과 교수

<관심분야>  
구조공학, 강구조, 궤도공학

### 김 기 동(Kee-Dong Kim) [정회원]



- 1985년 2월 : 고려대학교 토목공학과 (공학사)
- 1989년 2월 : 오클라호마 주립대 토목구조전공 (공학석사)
- 1995년 5월 : 텍사스주립대 (오스틴) 토목구조전공 (공학박사)
- 1997년 10월 ~ 현재 : 공주대학교 건설환경공학부 교수

<관심분야>  
구조공학, 내진공학, 교량공학