

크로스 브릿지 간격에 따른 캐워크 시스템의 비틀림 거동 평가

이 호¹ · 김호경^{2*} · 김기남³

¹박사과정, 서울대학교, 건설환경공학부, ²교수, 서울대학교, 건설환경공학부, ³차장, 현대건설(주), 초장대교량팀

Evaluation of Torsional Behaviour for the Catwalk System on A Suspension Bridge by Cross Bridge Interval

Lee, Ho¹, Kim, Ho Kyung^{2*}, Kim, Gi Nam³

¹Ph.D., Student, Department of Civil and Environmental Engineering, Seoul National University, Seoul, 151-744, Korea

²Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Seoul National University, Seoul, 151-744, Korea

³Deputy General Manager, Hyundai Institute of Construction Technology, Yongin-si, Gyeonggi-do, 446-912, Korea

Abstract - This study was conducted for the torsional behavior of catwalk system which is a temporary structure on a suspension bridge. The torsional deformation of the catwalk structure has a significant effect on the workability and safety of workers during main cable erection. For this reason, the torsional deformation of catwalk is controlled to be acceptable levels below by adjusting the cross bridge interval in design stage. This study analyzed the effect of separation between cross bridge associated with twist safety of catwalk system. For the analytical approach, a detailed analysis model was created including cross bridge. Both wind load within the wind velocity range that allows the construction and eccentric load of Prefabricated Parallel Wire Strand were analyzed by analysis model. Result of study shows that separation between cross bridges has a significant effect on the torsional behavior of the catwalk.

Keywords - Suspension bridge, Catwalk, Cross bridge

1. 서론

국내에서 다수의 장경간 현수교가 가설 중에 있다. 현수교 주케이블 가설을 위해 설치하는 임시 구조물인 캐워크 시스템은 가설 중 가설 장비와 작업원의 이동로로 이용된다. 또한 캐워크 가설 형상은 주케이블 형상관리의 품질을 확보하는 데 중요한 요소이다. 따라서 캐워크 시스템의 안전성 확보 및 구조 거동에 대한 평가 연구가 필요하다. 캐워크는 주케이블이 가설 되기 전까지 자체 강성만으로 하중에 저항해야 하기 때문에 바람에 의해 큰 변형을 일으킬 수 있다. 바

람에 의한 캐워크의 안전성과 관련한 연구로는 Zheng *et al.*^[1]의 캐워크 시스템에 대한 3차원 풍동실험과 수치해석을 수행하여 풍하중에 대한 안전성을 검토한 연구와 Kwon *et al.*^[2]의 2차원 풍동실험을 통한 캐워크 시스템의 동적 특성 분석, 베퍼팅 해석에 의한 응답 평가 및 가설 중 수평변위를 저감하는 방안에 관한 연구가 있다.

현수교의 주요 부재인 주케이블 가설법^[3]에는 케이블 소선을 Spinning wheel에 의해 왕복 인출하여 일정한 본수를 가설 후 원형으로 묶어 케이블을 만드는 Air Spinning(AS) 방법과 공장에서 미리 만들어진 소선 다발을 현장에서 인출하여 가설하는 Prefabricated Parallel Wire Strand(PPWS) 방법이 있다. 국내에서는 AS방법으로 시공되었거나 가설 중인 교량이 대부분이나 몇몇 현수교에서 PPWS방법이 시도되고 있다. 캐워크 시스템은 케이블 소선 몇 가닥으로 지지되는 구조형태로 인해 횡방향 및 비틀림 변형에 취약하다. 편심 위치에서 Parallel Wire Strand(PWS)를 끌어올려 주케이블을 가설하는 PPWS방법은 PWS의 편심 하중에 의해

Note.-Discussion open until February 28, 2016. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on March 3, 2015; revised May 30, 2015; approved on June 2, 2015.

Copyright © 2015 by Korean Society of Steel Construction

*Corresponding author.

Tel. +82-2-880-7365 Fax. +82-2-873-2684

E-mail. hokyungk@snu.ac.kr

비틀림 변형이 발생한다. 이러한 변형이 일정 수준을 넘는 경우 가설 중 PWS가 이동경로를 벗어나게 되어 작업성을 저해하는 문제를 발생시킬 수 있다. 또한 주케이블 가설 작업 중 바람에 상시 노출되어 있는 캐워크 구조물은 풍하중에 의해 횡방향 변형과 비틀림 변형이 발생하게 된다. 이러한 캐워크의 비틀림에 의한 문제를 해결하기 위해서 캐워크 사이에 일정 간격으로 크로스 브릿지를 설치하여 비틀림 변형을 일정 수준이하가 되도록 하는 방법과 캐워크 바닥판의 양외측에 보강용 로프를 걸어 바닥판의 비틀림 강성을 향상시키는 방법이 적용되고 있다.

이 연구에서는 PPWS 방법에 의한 주케이블 가설 시 가설 스트랜드의 경로 이탈등의 작업성을 저해하는 캐워크의 비틀림 변형 억제책 중 하나인 크로스 브릿지의 효과를 분석하였다. 해석적 접근을 위해 한 개의 크로스 브릿지를 포함한 상세 부분해석 모델을 작성하였다. 작성된 해석 모델에 PWS에 의한 편심하중과 주케이블 가설 작업이 가능한 풍속 범위의 풍하중을 고려하여 크로스 브릿지 설치에 따른 효과와 설치 간격에 따른 비틀림 거동을 분석하였다.

이 연구를 통해서 크로스 브릿지의 설치간격이 캐워크 시스템의 비틀림 변형에 미치는 영향을 분석하였다.

2. 캐워크 해석 모델

2.1 대상 구조물

캐워크 시스템 거동분석을 위한 대상 교량은 1,800m급 단경간 현수교를 대상으로 하였다. 대상교량은 Fig. 1에 나타나 있는 것과 같이 최대 192m 간격으로 중앙경간에 5개소, 측경간에 각각 1개소에 배치하는 것으로 고려되었다. 캐워크 시스템은 폭 3.69m, 높이 1.3m, 단위 길이당 0.95kN/m의 중량을 갖는다. Table 1은 중량 집계 상세를 나타낸다.

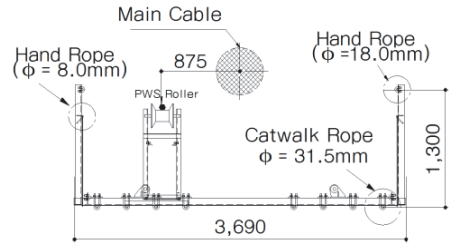


Fig. 2. Detailed section of the catwalk system (Unit: mm)

Table 1. Summary of dead load

Items	Weight(kN/m)
Rope	0.430
Floor	0.432
PWS roller	0.039
Electric equipment	0.049
Total	0.950

캐워크의 주요 구성^[4]은 캐워크 로프 8가닥(φ31.5mm), 상단 핸드 로프 2가닥(φ 18mm), 중단 핸드 로프 2가닥(φ 8mm), Connection 로프 2가닥(φ14mm), 메시망, 나무발판과 핸드 로프 post 등이다. 메시망의 충실률은 바닥판 16%, 측면부 10%로 설계되었다. 상세 단면은 Fig. 2와 같다.

해석 프로그램은 In-house 프로그램인 SNUSUS를 활용하였다. 캐워크의 주요 구성 요소인 케이블은 탄성현수선 요소를 적용하여 모델링 하였다. Fig. 3에 크로스 브릿지의 주요 구성 요소 및 상세를 나타냈다. 크로스 브릿지는 3차원 Beam 요소로 모델링하여 해석에 반영하였다. 캐워크 시스템의 모델링 시 기본 가정은 크로스 브릿지가 설치된 위치에서 캐워크의 비틀림 변형은 발생하지 않는다는 가정을 토대로 주경간중 중앙부에서 1개의 크로스 브릿지를 포함한 384m의 상세 부분 해석 모델을 Fig. 4에 나타냈다. 작성된 해석 모델을 이용하여 PWS의 편심하중과 풍하중에 의한 크로스 브릿지 간격별 영향을 평가하였다.

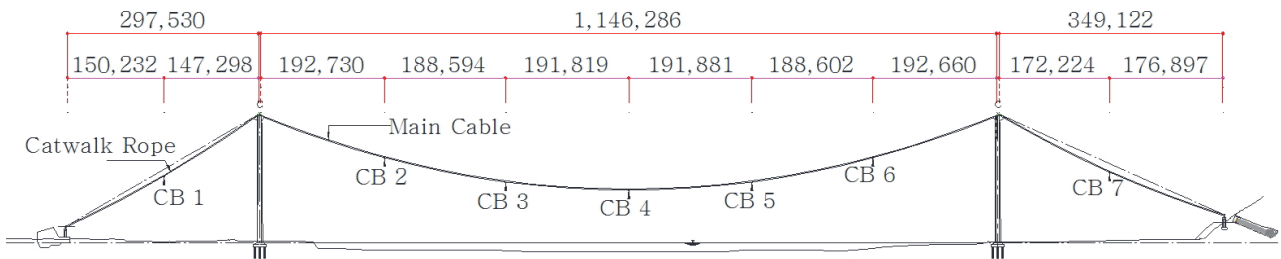


Fig. 1. Layout of the catwalk (unit: mm)

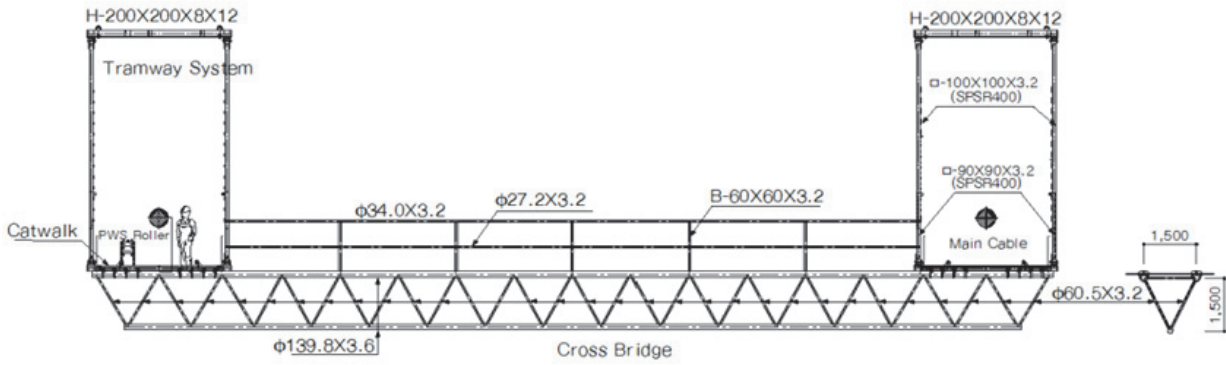


Fig. 3. Layout of the cross bridge (unit: mm)

2.2 PWS 편심 하중에 의한 비틀림 거동 분석

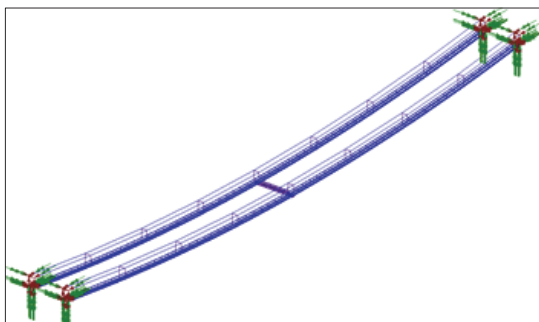
대상교량은 주케이블 가설 시 PPWS방법을 채택하고 있다. 위의 방법으로 주케이블을 가설하게 되면 PWS가 캐리어에 의해 운반되는 과정에서 Fig. 2에 나타난 것처럼 캐워크 중심으로부터 0.875m의 편심 위치에 놓이게 되며 이로 인해 캐워크에 비틀림 변형이 발생하게 된다.

캐워크 바닥판의 과도한 비틀림 변형은 주케이블 가설을 위한 가설 스트랜드의 운반시 이동경로를 벗어나게 하는 등의 작업성에 문제를 유발하게 된다. 따라서 PWS의 편심 하

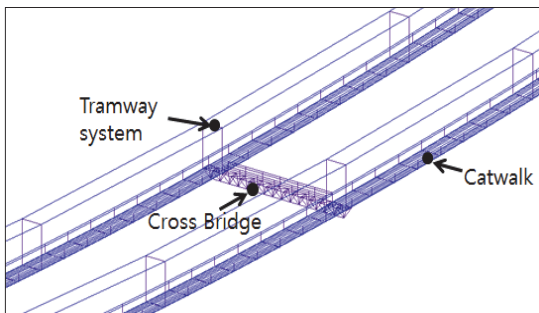
중에 의한 캐워크 바닥판의 비틀림 거동의 수준을 평가하는 것이 필요하며, 이를 위해 직경 5.4mm 소선 127개로 구성되는 하나의 PWS를 고려하여 해석을 수행하였다. 해석에 고려된 PWS의 단위길이당 하중은 0.224kN/m이다.

캐워크 바닥판의 비틀림 거동을 분석하기에 앞서 상세 부분 모델의 적합성을 검증하였다. 크로스 브릿지 설치위치에서 캐워크의 비틀림 변형은 발생하지 않는다는 기본가정이 성립함을 확인하는 것으로 해석모델의 적합성을 검증하였다. 이를 위해 크로스 브릿지 설치간격 192m를 고려한 추가의 해석모델을 작성하여 양끝단을 고정 지지점으로 하여 상세 부분모델 과 응답을 비교하였다.

두 해석 모델의 캐워크 바닥판 비틀림 응답 비교 결과가 동일함을 Fig. 5의 결과로부터 확인하였다. 이로부터 크로스 브릿지는 캐워크의 비틀림 거동에 대해 지점 역할을 하는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 크로스 브릿지 설치 위치에서 캐워크의 비틀림 변형이 발생하지 않는다는 가정이 성립함을 확인하였고, 이로부터 상세 부분 모델을 활용하여 크로스 브릿지의 설치 간격에 따른 캐워크 시스템의 비틀림 거동 분석이 가능하다는 것도 확인하였다.



(a) Full finite element model



(b) Local view of finite element model

Fig. 4. Analysis model of the catwalk system

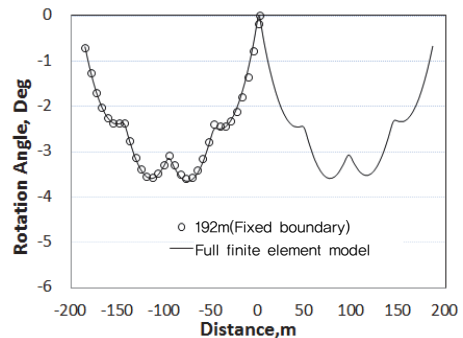


Fig. 5. Verification of analysis model

2.2.1 크로스 브릿지 설치에 따른 효과 분석

크로스 브릿지의 효과를 분석하기 위해서 192m 간격의 크로스 브릿지 해석모델과 크로스 브릿지가 미설치된 해석 모델을 사용하여 캣워크 중심으로부터 0.875m 편심 위치에 PWS 하중을 재하하여 영향을 분석하였다.

캣워크 바닥판의 비틀림 변형은 Fig. 6에서 확인 할 수 있듯이 크로스 브릿지를 192m 간격으로 설치한 경우 최대 3.6°, 크로스 브릿지를 미설치한 경우 최대 11°의 각 변화를 일으켰다. 결론적으로 크로스 브릿지가 캣워크의 비틀림 변형을 억제하는 효과가 있음을 확인할 수 있다.

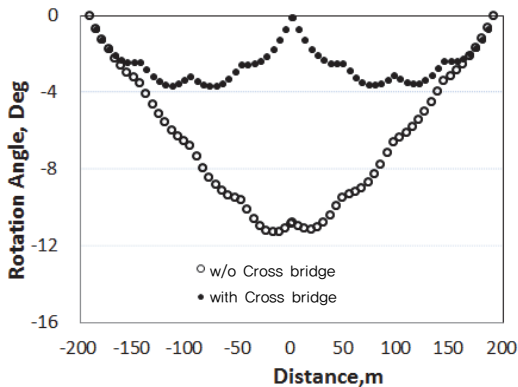


Fig. 6. Effect of cross bridge

2.2.2 크로스 브릿지 설치 간격에 따른 영향 분석

크로스 브릿지가 캣워크 바닥판의 비틀림 거동에 대해 지점 역할을 한다는 특성을 이용하여 크로스 브릿지 설치 간격에 따른 비틀림 변형을 검토하였다.

크로스 브릿지 간격에 따른 영향 검토는 48m~384m까지 48m 간격으로 총 8 CASE를 고려하였다.

PWS 편심하중이 작용할 때 크로스 브릿지 설치 간격이 증가함에 따라 캣워크 바닥판의 비틀림 변형이 비선형적으로 커짐을 확인하였다. 캣워크 바닥판의 비틀림 변형은 1.3°~11°의 비틀림각 변화가 발생할 수 있음을 Fig. 7의 결과로부터 확인하였다.

따라서 주케이블 가설 시 PPWS방식을 적용할 경우의 캣워크 설계에는 크로스 브릿지 설치 간격에 따라 캣워크 바닥판의 비틀림 변형이 비선형적으로 증가한다는 특성을 반영할 필요가 있다. 대상 구조계의 경우 가설엔지니어의 경험에 근거한 캣워크 바닥판의 허용 비틀림각 4°를 기준으로 볼 때 크로스 브릿지의 최대 설치 간격은 192m임을 확인하였다.

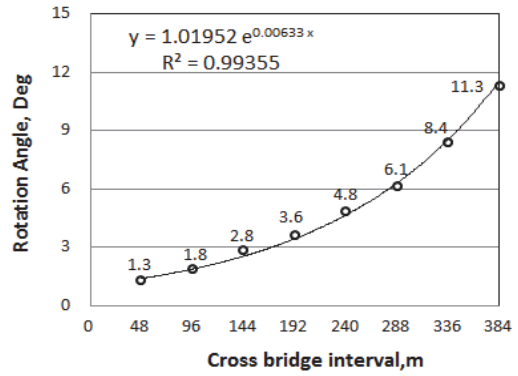


Fig. 7. Effect of the cross bridge interval

2.3 풍하중에 의한 비틀림 거동 분석

2.3.1 2차원 풍동실험에 의한 정적 공기력계수 측정

풍하중 산정에 앞서 2차원 풍동실험을 수행하여 캣워크의 정적 공기력 계수를 측정하였다. 풍동실험은 서울대학교 소형풍동에서 수행하였다.

2차원 캣워크 실험 모형은 축소율 1/15을 적용하여 제작하였으며 Fig. 8과 같다.

모형 제작 시 메시망에 의한 바닥판과 측면의 충실률은 측

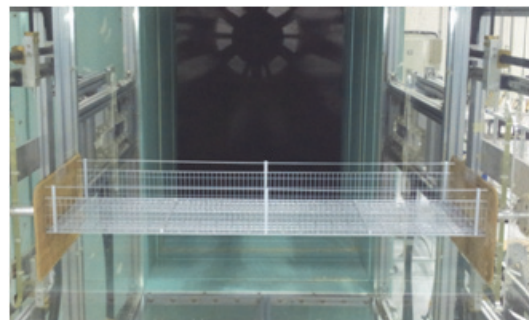


Fig. 8. Catwalk model in the wind tunnel

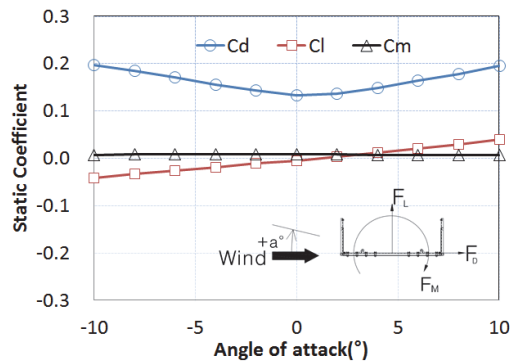


Fig. 9. Static coefficients versus angle of attack

소용을 고려하여 제작하기에 어려움이 있어 축소율을 무시하고 바닥판 16%, 측면부 10%의 충실률만 일치하도록 모형을 제작하였다.

정적 공기력 계수 측정을 위한 풍동실험은 등류에서 15m/s 풍속으로 2° 간격, -10°~10° 사이를 측정하였다.

풍동실험으로부터 측정된 공기력 계수 결과를 표 B로 무차원화하여 Fig. 9에 나타내었다. 영각 0°에서 C_D (항력계수)=0.134, C_L (양력계수)=-0.005, C_M (피칭모멘트계수)=0.008이다.

2.3.2 정적 공기력계수에 의한 비틀림 거동 분석

풍동실험에서 측정된 캐워크 시스템의 정적 공기력 계수들이 캐워크 바닥판의 비틀림 거동에 어떤 영향을 주는지 확인하기 위해 식 (1)를 활용하여 거스트 풍하중^[5]을 산정하고 정적해석을 수행하였다.

풍하중 산정 시 거스트 계수는 설계사례를 토대로 1.3을 적용하였다. 풍하중 산정 시 고려된 검토 풍속은 설계사례를 참고하여 가설 작업이 가능할 것으로 판단되는 풍속 15m/s를 고려하였다. 정적해석은 192m의 캐워크 시스템을 모델링하여 양단을 고정지지점으로 한 해석모델을 적용하였다.

$$\begin{aligned}
 F_D &= 5 \times 10^{-7} \times \rho \times V_d^2 \times C_D \times B \times G & (1) \\
 F_L &= 5 \times 10^{-7} \times \rho \times V_d^2 \times C_L \times B \times G \\
 F_M &= 5 \times 10^{-7} \times \rho \times V_d^2 \times C_M \times B^2 \times G
 \end{aligned}$$

여기서 $\rho=1.25\text{kg/m}^3$, Gust factor(G)=1.3, 폭(B)=3.69m이며, F_D 는 Drag Force, F_L 는 Lift Force, F_M 은 Pitching Moment Force를 의미한다.

풍하중은 구조부재별 높이를 고려하여 산정하였으며 기준고도에서의 풍하중 강도를 Table 2에 나타냈다.

정적 공기력 계수에 의한 캐워크 바닥판의 비틀림 변형 분석 결과 Fig. 10로부터 항력의 경우 1.4°, 피칭모멘트 하중에 의해 0.4° 발생함을 확인하였다. 항력에 의해 발생된 비틀림 변형은 횡방향 풍하중에 의한 강제거동에 의한 것이며 피칭모멘트에 의해 발생하는 비틀림은 상대적으로 작음을

Table 2. Summary of wind load on catwalk

Item	Force
Drag force (kN/m)	0.852
Lift force (kN/m)	-0.031
Pitching Moment (kN·m/m)	0.187

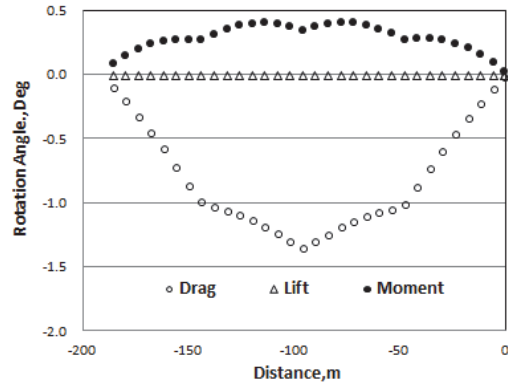


Fig. 10. Effect of the Static aerodynamic coefficients

확인하였다. Fig. 10에서 항력과 피칭모멘트 하중에 의한 비틀림각 변화의 방향이 반대 방향인 이유는 Fig. 9의 정적 공기력 계수 부호로부터 확인 할 수 있다. 즉 대상교량의 경우 피칭 모멘트 하중은 항력에 의한 비틀림 변형을 감소시키는 방향으로 작용한다고 볼 수 있다.

반면 바람에 의한 양력은 캐워크의 비틀림 변형에 영향이 없음을 확인할 수 있었다. 이는 캐워크 시스템이 로프와 메시망으로 구성되는 단면형상으로 연직 풍에 대해 저항하는 면이 작기 때문에 캐워크 바닥판의 변형에 영향이 거의 없는 것으로 보인다.

2.3.3 풍하중 작용 시 크로스 브릿지 간격에 따른 비틀림 거동 분석

가설 중 풍하중이 캐워크에 작용할 때 크로스 브릿지 간격에 따른 구조 거동을 평가하였다. 검토 풍속은 가설 엔지니어들의 경험에 근거한 가설가능 풍속인 15m/s의 풍속을 기준으로 크로스 브릿지 설치간격을 증가시켜 가며 영향을 평가하였다.

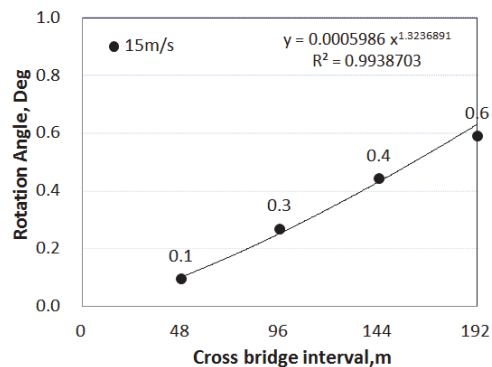


Fig. 11. Effect of the cross bridge interval under wind load

Fig. 11의 결과로부터 주케이블 시공이 가능한 풍속 영역인 15m/s 이내에서는 바람에 의한 캐워크 시스템의 비틀림 변형이 1.0°보다 작다는 것을 확인할 수 있었다.

3. 결론

이 연구는 현수교 주케이블 가설을 위한 가설 구조물인 캐워크의 비틀림 거동에 영향을 주는 크로스 브릿지에 대하여 검토를 수행한 것이다. 상세 부분 모델을 이용한 해석적 방법을 적용하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 캐워크 바닥판의 비틀림 거동 분석은 부분 상세 모델을 이용하여 분석이 가능함을 확인하였다.
- (2) 크로스 브릿지는 캐워크의 비틀림 거동을 억제하는 효과가 있음을 확인하였다.
- (3) PWS의 편심재하 하중에 의한 캐워크 시스템의 비틀림 거동을 분석한 결과 크로스 브릿지 설치 간격에 따라 캐워크의 비틀림 거동은 비선형적으로 증가함을 확인하였다.
- (4) 대상 교량은 주케이블 시공이 가능한 풍속 15m/s 이내 영역에서는 풍하중에 의한 캐워크 시스템의 비틀림 변형 각이 1.0°보다 작은 수준임을 확인하였다.

감사의 글

이 연구는 초장대교량사업단 제1핵심과제를 통하여 지원된 국토해양부 건설기술혁신사업(08기술혁신E01)의 개발 기술을 부분적으로 활용하여 수행되었습니다. 자료제공 등 현수교 가설엔지니어링 연구수행을 위해 기술적 도움을 준 현대건설 연구원께도 감사드립니다.

참고문헌(References)

- [1] Zheng, S., Liao, H., and Li, Y. (2007) Stability of Suspension Bridge Catwalks Under a Wind Load, *Wind and Structures*, Techno-Press, Vol.10, No.4, pp.367-382.
- [2] Kwon, S.-D., Lee, H., Lee, S., and Kim, J. (2013) Mitigating the Effect of Wind on Suspension Bridge Catwalks, *Journal of Bridge Engineering*, American Society of Civil Engineers, Vol.18, No.7, pp.624-632.
- [3] 최현석, 김재홍(2008) 현수교 주케이블의 시공방법, 한국강구조학회지, 한국강구조학회, 제20권, 제2호, pp.79-86.
- Chio, H.-S., and Kim, J.-H. (2008) Construction Method of Main Cable for Suspension Bridges, *Magazine of the Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.20, No. 2, pp.79-86 (in Korean).
- [4] Consortium of ENVICO, YCC and NTB. (2012) *Ulsan Grand Bridge Project, 3rd Interim Report*, Consortium of ENVICO, YCC and NTB, Korea (in Korean).
- [5] 대한토목학회(2006) 케이블강교량설계지침. Korean Society of Civil Engineers (2006) *Design Guidelines for Cable-Supported Steel Bridges*, Korea (in Korean).

요 약 : 현수교 주케이블 가설을 위한 임시 구조물인 캐워크의 비틀림 거동에 대해 연구를 수행하였다. 캐워크의 비틀림 변형은 작업원의 안전성과 작업성에 중요한 영향을 미친다. 이러한 이유로 설계단계에서는 크로스 브릿지의 간격을 조정하여 캐워크의 비틀림 변형이 일정 수준이하가 되도록 고려하고 있다. 이 연구에서는 캐워크의 비틀림 안전성과 관련된 크로스 브릿지의 설치 간격에 따른 영향을 분석하였다. 해석적 접근을 위해 크로스 브릿지를 포함한 상세 부분해석 모델을 작성하였다. 작성된 해석모델을 이용하여 크로스 브릿지 설치 간격에 따른 영향을 Prefabricated Parallel Wire Strand의 편심하중과 가설이 가능한 풍속 영역에서의 풍하중에 대해 검토를 수행하였다. 검토 결과 크로스 브릿지의 설치 간격이 캐워크의 비틀림 거동에 큰 영향을 줌을 확인하였으며, 검토 대상 교량의 캐워크는 비틀림 변형에 대해 안전성을 확보하고 있는 것으로 확인되었다.

핵심용어 : 현수교, 캐워크, 크로스 브릿지
