

진동법을 이용한 사장교 시공단계별 케이블 장력관리

Cable Tension Force Management Using Vibration Method at Cable Stayed Bridge Construction Stages

박 연 수*

Park, Yeon-Soo

전 동 호**

Cheon, Dong-Ho

전 양 배**

Cheon, Yang-Bae

강 경 구***

Kang, Kyoung-Koo

Abstract

Design and construction of long-span bridge are recently increasing by development of computer technology. Specially, cable stayed bridge and suspension bridge having cable component are representative of long-span bridge may do. Therefore, this paper a present a methodology for cable tension force monitoring in cable-stayed bridge under construction using acceleration data acquired by the vibration method. To improve accuracy construction, all stay cables are measured, according to 4-step construction stage and change of temperature.

요 지

최근 컴퓨터 기술의 발달로 장대교량의 설계 및 시공이 증가하고 있다. 특히 케이블 요소를 갖는 사장교와 현수교는 장대교량을 대표한다 할 수 있을 것이다. 따라서 본 논문에서는 사장교로 시공중인 제2진도대교에 대하여 시공단계별로 전체케이블에 대한 장력을 측정하여 시공오차 등에 따른 장력보정값을 현장에서 즉시 제시하여 시공정밀도를 향상하고자 하였다. 이에 적용된 장력측정방법은 간접법인 가속도센서를 이용한 진동법을 적용하였다.

직접법에 비해 비교적 간편한 간접인 진동법을 통하여 보다 쉽게 장력을 추정할 수 있었으며, 시공의 정밀도를 향상시키기 위하여 전체 케이블을 4가지 시공단계별로 장력변화량을 모니터링하여 케이블 가설시 시공오차에 대한 장력보정값을 현장에서 제시하였다. 또한, 최종장력값을 설계값과 비교한 결과 간접법을 이용한 장력값과 유사한 것을 알 수 있었다. 그리고 온도 변화에 따른 케이블의 장력변화를 추후 유지관리 계획시 관리한계치 설정에 참고자료로 활용할 수 있도록 장력변화를 파악하였다.

Keywords : Cable Stayed Bridge, Vibration Method, Cable Tension Force Monitoring System

핵심 용어 : 사장교, 진동법, 케이블장력계측시스템

* 정회원, 전남대학교 토목공학과 교수

** 전남대학교 토목공학과 박사과정

*** (주)에이티맥스 대표이사

E-mail: muzero@hanmail.net, 016-475-1334

• 본 논문에 대한 토의를 2005년 12월 31일까지 학회로 보내 주시면 2006년 4월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

Table 1 가속도계 사양

계측센서	항 목	사양
1축 가속도계	모 델	8312A2
	형 식	Capacitive Type
	측정범위	0.03 ~ 300 Hz
	Range	±2g
	사용온도	-40 ~ 85℃
	제조회사	kistler (미국)



Fig. 5 계측센서 및 케이블 부착모습

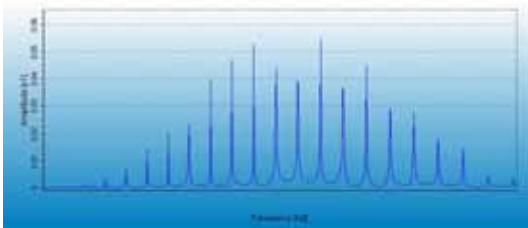


Fig. 6 FFT 해석을 통한 결과 예

로의 변환이 수집에 해당되면, 이는 주로 데이터 수집 장치의 기능과 성능에 좌우된다.^{(3),(4)}

그러나 구조물의 형태, 측정치의 종류, 모니터링의 목적에 따라 증폭률, 수집빈도, 기간이 달라져야 하며, 하드웨어의 고유 노이즈, 환경 노이즈 등을 감안한 필터링 알고리즘의 선택이 고려되어야 한다.⁽⁵⁾

Fig. 6는 필터링이 완료된 상태의 FFT해석 결과의 예를 보여주고 있다. x축은 주파수(Hz), y축은 크기(Amp.)로 나타내어진다. 이 때의 최대치들이 바로 고유진동수가 되는데, 주기가 가장 긴 즉 주파수가 가장 낮은 최대치가 1차 고유진동수가 되며, 주파수가 커짐에 따라 각각의 최대치값들이 각 차수별의 고유진동수가 된다.

3.2.3 케이블제원

본 연구에서 수행한 각 케이블에 대한 제원은 Table 2과 같다.

3.3 시공단계별 케이블장력

케이블의 시공단계별 장력은 Fig. 7와 같이 시간영역에서의 신호를 측정하여 Fig. 8과 같이 주파수영역

Table 2 케이블 제원

Cable No.	φ7×	Area (m ²)	단위하중 (tonf/m)	탄성계수 (tonf/m ²)	케이블 단면도			
JC1	151	0.005811	0.0476	2.0E+07				
JC2								
JC3								
JC4								
JC5								
JC6								
JC7	73	0.002809	0.0231		2.0E+07			
JC8								
JC9								
JC10	109	0.004195	0.0347			2.0E+07		
JC11								
JC12								
JC13								
JC14	139	0.005349	0.0439				2.0E+07	
JC15								

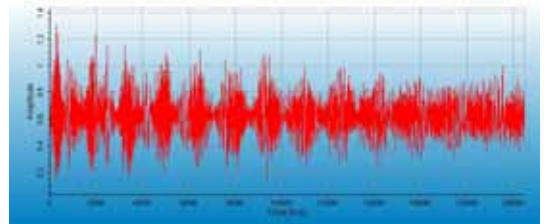


Fig. 7 시간영역 진동가속도

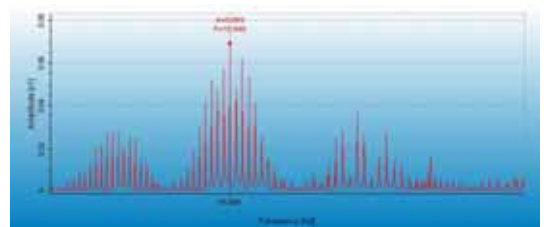


Fig. 8 주파수영역 고유진동수

으로의 FFT변환을 통해 각 차수별 고유진동수를 추출하였다. 그리고 마지막으로 Fig. 2에 나타난 바와 같이 장력산출프로그램을 통해 최종적으로 긴장 후 정차이 끝난 케이블에 인입된 장력을 산출하였다.

시공단계별 장력측정결과는 Table 3에 나타난 바와 같다.

4. 케이블 장력측정 결과분석

4.1 시공단계별 케이블 장력변화

본 연구에 대상이 되는 사장교의 시공은 크게 4단계로 분류된다. 첫째는 보강형인양을 위한 데릭크레인의 이동, 둘째는 데릭크레인을 이용한 보강형 인양 및

Table 3 시공단계별 장력측정결과

공정별 시공단계	장력측정결과(tonf)	
	JC 6	JC 7
케이블 6, 7번 긴장	92.4	81.7
	JC 5	JC 8
케이블 5, 8번 긴장	93.4	76.2
	케이블 9번 긴장	84.1
케이블 4번 긴장	88.8	
케이블 10번 긴장	102.8	
케이블 11번 긴장	111.8	
케이블 3번 긴장	125.9	
케이블 3번 추가긴장	144.6	
케이블 6번 추가긴장	181.1	
케이블 12번 긴장	136.9	
케이블 2번 긴장	179.1	
케이블 13번 긴장	173.0	
케이블 4번 추가긴장	229.8	
케이블 14번 긴장	163.4	
케이블 5번 추가긴장	275.6	
케이블 6번 2차 추가긴장	223.8	
케이블 1번 긴장	223.9	
케이블 15번 긴장	185.7	
케이블 3번 추가긴장	211.5	
케이블 3번, 15번 추가긴장	JC 3	JC 15
	229.1	201.7
케이블 14번 추가긴장	174.1	
폐합		

Table 4 Key Seg 접합후 케이블 장력측정결과

케이블 번호	장력측정결과(tonf)	
	Key Seg 접합직후	데릭퇴장 및 불평등하중제거후
JC1	221.4	179.2
JC2	212.6	174.6
JC3	232.6	193.1
JC4	206.7	171.9
JC5	239.1	236.5
JC6	232.9	252.9
JC7	62.4	59.0
JC8	56.7	52.8
JC9	68.6	63.8
JC10	92.1	77.3
JC11	105.1	83.9
JC12	125.4	101.7
JC13	136.0	115.4
JC14	170.4	148.5
JC15	202.9	185.8

거치, 셋째는 거치 후 용접, 넷째는 케이블 설치 및 긴장으로 나타낼 수 있다. 따라서 케이블 설치후 위의 용접공정을 뺀 나머지 공정에서 기존에 설치된 케이블의 장력은 변화하게 된다. 이러한 장력변화를 Fig. 9 및 Fig. 10, Table 5와 Table 6에 나타난 바와 같이 주공정인 케이블 인장력 도입공정에 따른 각 케이블의 장력변화를 나타내었다. 최초 케이블 장력 도입 후 90tonf 가량의 데릭크레인 무게로 인하여 장력변화가 발생한다.

인접케이블인 7번 케이블의 경우 실측값은 81.7tonf에서 116.7tonf으로 증가하여 약 42.8%의 장력증가를 보이며, 설계값은 84.6tonf에서 97.8tonf으로 약 15.6%의 변화를 보인다. 또한 측정간의 6번케이블의 장력변화는 실측값의 경우 92.4tonf에서 109.4tonf으로 증가하여 약 18.4%가 증가를 하며, 해석값의 경우 105.6tonf에서 115.2tonf으로 약 9.1% 증가한다. 이렇게 실측값의 변화량과 해석값의 변화량차이는 시공오차에 의한 변수를 포함하지 못하여 발생하는 것으로 보이며, 시공단계별로 실측값을 통한 역해석으로 지속적인 구조물 안전도를 평가하였다.

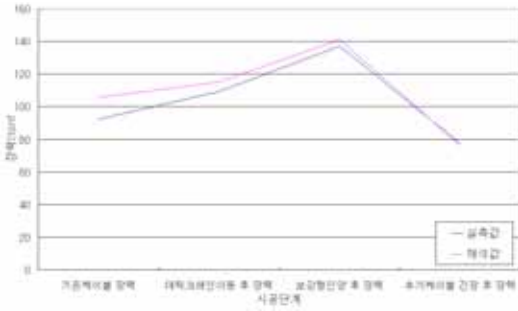


Fig. 9 6번 케이블의 시공단계별 장력변화

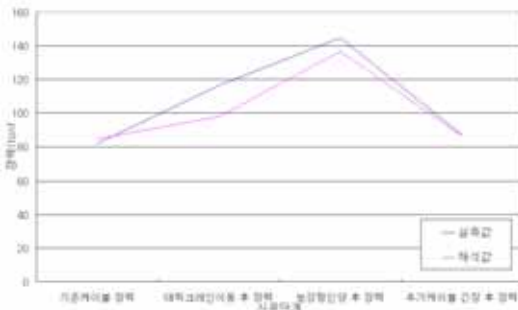


Fig. 10 7번 케이블의 시공단계별 장력변화

데크크레인 이동 후의 공정인 보강형 인양에 따른 장력증가는 데크크레인이 위치하는 7번케이블의 경우 실측값이 116.7tonf에서 145.0tonf으로 24.3%의 장력증가가 나타났으며, 해석값은 97.8tonf에서 136.8tonf으로 약 39.9% 증가하였다. 또한 측경간의 6번케이블의 경우는 109.4tonf에서 137.2tonf으로 25.4%의 장력증가가 나타났으며, 해석값은 115.2tonf에서 141.1tonf으로 약 22.5%로 증가하였다. 추가 케이블긴장 이외의 시공단계에 있어 데크크레인 이동에 따른 장력변화는 데크크레인이 이동해 위치하는 7번케이블이 측경간의 6번 케이블의 장력변화보다 약 24.4% 더 크게 장력변화가 일어났으며, 해석값 또한 동일함을 확인할 수 있었다.

반면, 8번 보강형 인양후, 5번과 8번 케이블의 긴장에 따른 장력변화는 6번 케이블과 7번 케이블 모두 실측값과 해석값이 유사한 값을 나타내었는데, 이는 보강형 가설에 따른 구조적 안정상태를 나타내고 있는 것으로 사료된다. 따라서 데크크레인을 이용한 보강형

Table 5 6번케이블 시공단계별 장력변화

6번 케이블	시공단계별 장력변화			
	기초케이블 장력	데크크레인이 동 후 장력	보강형인양 후 장력	추가케이블 긴장 후 장력
실측값	92.4	109.4	137.2	77.3
해석값	105.6	115.2	141.1	75.9

Table 6 7번케이블 시공단계별 장력변화

7번 케이블	시공단계별 장력변화			
	기초케이블 장력	데크크레인이 동 후 장력	보강형인양 후 장력	추가케이블 긴장 후 장력
실측값	81.7	116.7	145.0	86.8
해석값	84.6	97.8	136.8	86.2

인양방법으로 사강교를 시공할때에는 케이블에 장력을 도입하는 단계도 중요하지만, 그 전 단계인 데크크레인의 이동 및 보강형 인양에 있어서도 케이블의 장력 변화에 미치는 영향이 크므로, 데크크레인의 이동이나 보강형 인양을 하는 시공공정에 있어 좀더 세심한 주의가 필요한 것으로 사료된다.

4.2 최종케이블장력값과 설계값의 비교 · 분석

15번 케이블 설치 후 선형관리를 통해 Key Seg 접합이 이루어 진다. 중앙부 Key Seg접합후에는 완성계의 거동을 하게 되고, 추가적으로 진행되는 부가작업에 따른 장력의 변화는 크게 나타나지 않는다. 장력 변화가 이루어지는 시기는 추후에 케이블에 추가사하중 및 댐퍼설치에 따른 유효길이의 변화 등으로 미세하게 변화 할 것이다. Key seg 접합후의 실제 장력값과 해석값의 비교를 통해 각 케이블에 걸려 있는 최종도입장력에 대해 두 값사이의 추세를 보면 다음과 같다.

Table 7은 Key Seg접합후의 값을 실측값과 해석값, 오차의 순으로 정리한 것이다. Table 7에 나타낸 바와 같이 실측값과 해석값의 오차는 2~28tonf으로 나타났으며, 케이블 길이가 다른 케이블에 비해 비교

Table 7 각 케이블 시공 후 장력측정결과

장력값 Cable No.	실측값 (tonf)	해석값 (tonf)	오차값 (tonf)	오차량 (%)
JC1	179	162	17	9.5
JC2	175	161	14	8.0
JC3	193	167	26	13.5
JC4	172	169	3	1.7
JC5	237	228	9	3.8
JC6	253	248	5	2.0
JC7	59	57	2	3.4
JC8	53	50	3	5.7
JC9	64	62	2	3.1
JC10	77	70	7	9.1
JC11	84	81	3	3.6
JC12	102	100	2	2.0
JC13	115	113	2	1.8
JC14	149	130	19	12.8
JC15	186	158	28	15.1

적 긴 JC1~JC3과 JC14, JC15에서 오차가 가장 크게 발생하였다. 또한 Fig. 11에 나타난 바와 같이 실측값과 해석값의 다소간의 오차는 있으나, 추세선의 경향이 큰 차이를 보이지 않고 유사한 형태를 나타내는 것을 알 수 있다. 이는 진동법을 이용하여 시공중에 케이블장력값을 도출하고 이를 바탕으로 시공중 선형관리가 가능함을 나타낸 다고 할 수 있겠다.

4.3 온도에 따른 케이블의 장력변화

본 연구에 대상이 되는 사장교는 형식이 보강형 및 주탑의 재질이 강교이므로, 콘크리트 재질에 비해 온도에 의한 영향이 크다고 할 수 있다. 그리고 케이블 또한 온도에 영향을 많이 받으므로, 온도변화에 따른 장력변화를 알아 볼 필요가 있다. 이에 케이블 설치하는 시간때인 새벽과 하루중 온도가 가장 많이 올라가는 오후 2시에서 3시사이에 케이블 장력값을 측정하여 온도 변화에 따른 영향을 알아보았다.

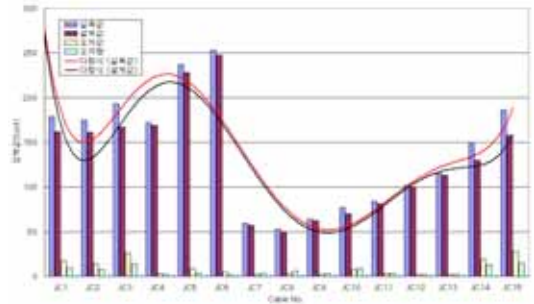


Fig. 11 실측값과 해석값의 경향비교

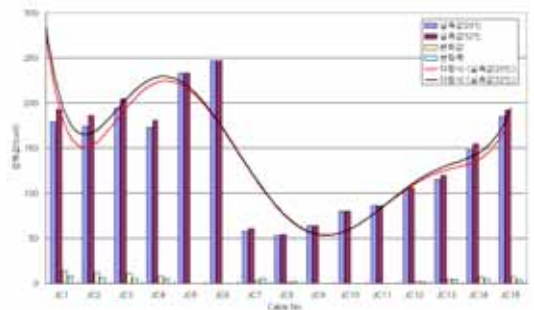


Fig. 12 온도차에 의한 장력변화

Fig. 12 및 Table 8은 온도 변화에 따른 장력변화를 나타내었다. Table 8과 같이 측정시간의 온도는 새벽의 온도가 20℃, 오후측정시간의 온도는 32℃로 약 12℃의 차이가 났다. 12℃의 차이에 의한 장력의 변화는 단순히 대기 온도차에 의한 케이블의 단독적인 변화가 아닌 주형과 주탑의 온도차에 의한 변화 요인과 케이블 자체의 온도변화에 의한 변화요인과 관계가 있다고 할 수 있을 것이다. 따라서 온도변화에 의한 장력변화에 대하여 좀더 정밀한 방법을 통하여 대기온도변화 뿐만아니라 주형과 주탑의 온도변화, 케이블 자체의 온도변화에 의한 장력변화를 관찰하여 케이블의 장력관리에 이용해야 할 것으로 판단된다. 온도변화에 의한 케이블의 장력변화는 0~14tonf으로 나타났으며, 중앙경간의 케이블 보다는 측경간의 JC1~JC4에서 다른 케이블에 비해 비교적 큰 장력변화를 나타냈으나, 온도변화에 의한 장력변화는 그렇게 크지 않은 것으로 나타났다.

Table 8 온도차에 의한 장력측정결과

Cable No.	장력값	실측값 (tonf)	실측값 (tonf)	변화값 (tonf)	변화폭 (%)
		20℃	32℃		
JC1		179	193	14	7.8
JC2		174	186	12	6.9
JC3		194	205	11	5.7
JC4		173	181	8	4.6
JC5		238	238	0	0
JC6		254	254	0	0
JC7		58	61	3	5.2
JC8		53	54	1	1.9
JC9		64	64	0	0
JC10		80	80	0	0
JC11		86	86	0	0
JC12		104	106	2	1.9
JC13		115	120	5	4.3
JC14		148	155	7	4.7
JC15		185	192	7	3.8

5. 결론

본 연구에서는 시공중인 사장교의 케이블 장력을 진동법을 이용한 간접법으로 측정하였으며, 시공공정별 케이블의 장력변화와 온도차에 의한 케이블의 장력변화를 분석하였다. 본 연구에서 얻어진 결론은 다음과 같다.

- 1) 시공단계에서 진동법을 이용하여 케이블의 장력을 보다 간편하고, 비교적 정확한 장력관리가 가능한 것으로 판단된다.
- 2) 주요 시공단계별로 케이블의 장력변화를 모니터링 함으로서, 선형관리를 위한 단계별 설계값과 비교

분석이 가능하며, 이를 통하여 시공정밀도를 향상시킬 수 있었다.

- 3) 대기온도의 변화에 따라 최대 14tonf의 장력변화량을 나타내므로, 향후 유지관리 계획시 필요한 관리기준치 설정은 이러한 온도변화에 따른 장력변화량을 고려하여 설정해야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 논문은 2004년도 전남대학교 특별연구사업비에 의하여 지원되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 김상효, 이상호, 최수일, 여동훈, “진동법을 이용한 케이블의 장력측정기법과 계측환경의 영향분석,” 연세대학교 산업기술연구소 논문집, 제2권 제29집, 1997, pp.143-150.
2. Hiroshi Zui, Tohru Shinke & Yoshio Namita, “Practical Formulas for Estimation of Cable Tension by Vibration Method,” Journal of Structure Eng., ASCE, Vol. 122, No.6, June 1996, pp.651-656.
3. Tanaka, H., Kamei, M., & Kaneyoshi, M., “Cable Tension Adjustment by Structural System Identification,” *Cable-Stayed Bridges Experiences & Practice*, Vol. 2, Nov. 1987, pp. 856-866.
4. Randall, R. B., *Frequency Analysis*, Bruel & Kjaer Korea Ltd., 1987.
5. Irvine, H.M., *Cable Structures*, MIT Press, Cambridge, Mass, 1981.
6. Irvine, H.M. & Caughey., “The linear theory of free vibration of a suspended cable.” Proc. Royal Soc., London, England, Series A, vol. 341., 1974

(접수일자 : 2004년 11월 12일)