Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection
Vol. 22, No. 2, March 2018, pp.001-007
https://doi.org/10.11112/jksmi.2018.22.2.001
pISSN 2234-6937
eISSN 2287-6979

국내 현수교량의 케이블 밴드볼트 축력관리 및 검토사례

박시현[1*], 정우영[2], 김현우[3], 유동우[4]

A Case Study on Axial Forces of Cable-band Bolts in Domestic Suspension Bridge

Si-Hyun Park[1*], Woo-Young Jung[2], Hyun-Woo Kim[3], Dong-Woo You[4]

Abstract: Suspension bridge cables made of high strength steel wires require periodical maintenance in accordance with the axial force of cable-band bolts, since the bolts in suspension bridges can undergo tension decrease due to creep of cable wires, bolt relaxation, load fluctuation, and cable re-arrangement, etc. Consequently, this study is aimed at investigating and subsequently evaluating the critical factors with respect to the bolt tension-decrease phenomenon in SR suspension bridge in Korea, based on field monitoring, theoretical studies, and field record management works. From the observation, it is interesting to note that the decrease in the bolt tension force is typically accompanied by plastic deformation of the zinc plating layers in the cable wires. In addition, a framework corresponding to generic methodologies to characterize the deformation in terms of the bolt tension-decrease and long-term history management has been developed in this exploratory study.

Keywords: Cable-band bolts, Creep of cable wire, Bolts axial force, Maintenance

1. 서 론

최근 국내에서는 대표적인 장대교량 형식중 하나인 현수교의 설계 및 시공이 늘어나면서, 장대교량의 갯수 및 주경간의 연장이 길어지고 있다. 대표적인 국내 현수교량으로는 광안대교, 소록대교, 이순신대교 등이 있으며, 이들 교량은 국내 기술력의 자립도 및 세계적 수준의 교량기술력 확보를 증명하는 척도로도 평가된다.

현재까지 국내에서는 케이블의 소재 시험 및 적용, 국부상세해석 및 케이블 정착구 설계 등과 관련된 설계 및 시공 중심의 업무가 이루어져 왔으며, 유지관리 관련 기술은 미흡한 실정이라고 볼 수 있다. 특히, 유지관리와 관련된 매뉴얼 및 지침 등이 아직 체계화 되지 못하고 있으며, 현수교의 케이블 밴드의 볼트 축력에 대한 이론적인 검토가 거의 이루어지지 않은 것으로 파악되었다. 현수교량에서는 케이블 밴드내면과 주케이블 소선간의 마찰력을 이용하여 밴드의 활동(Slip)에 저항하게 되는데, 이는 밴드의 볼트체결에 의해 유지되고 있다. 그러나 체결 후 시간이 경과함에 따라 최소 볼트 출력보다 감소하게 되므로, 교량 관리자는 주기적으로 케이블밴드가 주케이블에서 미끄러지지 않도록 볼트의 축력관리에 만전을 기하여야 하며 이에 대한 역학적 특성도 함께 파악해둘 필요가 있다.

본 연구에서는 현수교의 핵심부재중 하나인 케이블밴드의 고장력볼트 축력감소에 대해서 그 원인 및 감소량 등에 대하여 현장측정 및 이론적 검토, 안전율 검토, 장기적인 이력관리 등을 수행한 것이다.

2. 대상교량 및 케이블밴드

대상교량은 전라남도 고흥군 도양읍 녹동항에서 소록도를 연결하는 교량으로 총 연장 1,160 m(현수교 : 470 m, 접속교 : 690 m), 폭 11.7 m의 왕복 2차선 교량이다.

연구 대상교량은 세계 2번째(국내최초) 모노 케이블 자정식 현수교로서, 국내 기존의 현수교(영종대교, 광안대교, 서해대교)의 설계·시공기술을 바탕으로 순수 국내 기술진에 의해 설계되었으며 국내 케이블교량의 기술력을 향상시킨 새로운 이정표가 되는 교량이라 할 수 있다(Part et al., 2003). 교량의 주요현황은 Table 1과 같으며, 현수교 종단면 및 전경사진은 Fig. 1과 같다.

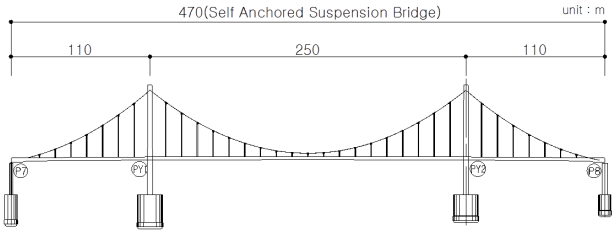
교량의 현수 주케이블은 PPWS(Prefabricated Parallel Wire

[1]정회원, 한국시설안전공단 특수교관리센터 여수사무소 소장, 교신저자
[2]정회원, 강릉원주대학교 토목공학과 교수
[3]정회원, 한국시설안전공단 특수교관리센터 여수사무소 직원
[4]정회원, 한국시설안전공단 특수교관리센터 센터장
***Corresponding author:** parksh@kistec.or.kr
LOBMAC- Local Office, 3617-7, Dolsan-eup, Yeosu, Jeonnam, 59768, Korea
•본 논문에 대한 토의를 2018년 4월 1일까지 학회로 보내주시면 2018년 5월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

Copyright Ⓒ 2018 by The Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0)which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Table 1 Synopsis of SR Bridge

Type	Mono cable self-anchored suspension bridge, Steel Box Girder	Construction Completion Date	Jan. 2009
Length	Total L = 1,160 m Suspension Bridge =110+250+110 m Connection Bridge =70+6@77.5+2@77.5 m	Main Cable	PWS Wire (14 Strands)
Width	B=11.7 m, 2 lanes	Hanger Rope	33 NEW-PWS (dia. 300 mm)



(a) Configuration of the SR bridge

(b) Suspension bridge (c) Connection bridge

Fig. 1 Configuration and foreground images

Strand)공법으로 시공되었다. 이 방법은 AS(Air Spinning)공법에 비하여 작업이 빠르고 품질관리가 용이하며, 상대적으로 가설장비가 간단하고 작업인력 소모가 작은 특징이 있다.

케이블은 Ø6.59 mm Wire 127개를 하나의 Strand로 구성한 후 14개의 Strand로 주케이블을 구성하고 있으며, 허용장력은 약 3,900 tonf이다. 행어로프 및 케이블밴드는 주케이블과 보강거더를 연결하고 보강거더로부터 하중을 주케이블로 전달하는 역할을 수행한다. 행어로프는 주케이블과 동일한 PWS 케이블로 직경 Ø5.0, Wire 151개 또는 187개로 구성되어 있으며, 허용장력은 각각 약 210 tonf 및 260 tonf 이다.

한편, 케이블밴드는 구조가 단순하고 상대적으로 2차 휨응력이 작은 핀방식(Fig. 2 참조)이 적용되었으며, 보강거더와의 연결에서도 핀방식이 적용되었다. 케이블밴드는 총 33개소 설치되었으며, 주케이블 소선의 배열고정을 위한 단밴드는 주케이블 시·종점부와 주탑 상부 새들 위치에 각각 6개소 설치되어 있다.

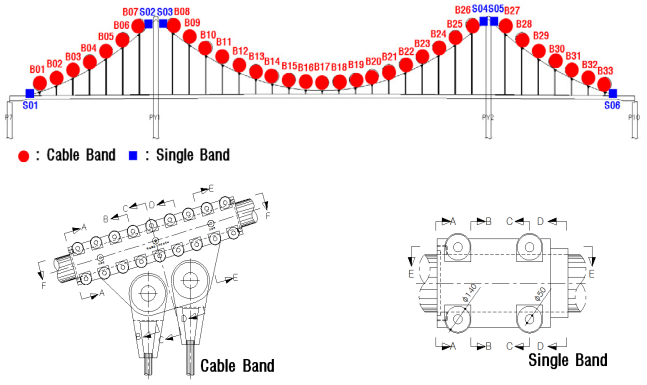


Fig. 2 Typical cable band in Sorok bridge

케이블밴드 설치 간격은 구조적 안전성과 경관성 등을 고려하여 12.5 m의 등간격으로 배치하였으며, 설치위치는 Fig. 2와 같다. 또한 케이블밴드 고정을 위한 밴드볼트는 각 밴드당 14~22개로 구성되어 있다.

3. 케이블밴드 볼트축력 측정 및 검토

3.1 케이블밴드 볼트축력 측정 사례

케이블 밴드볼트에 도입된 축력을 측정하는 방법으로는 초음파를 이용하는 측정법, 공진주파수를 이용한 측정법, 볼트 길이변화를 이용한 측정법, 유압잭을 이용한 직접 측정법 등이 있다(Kim et al., 2008).

한편, 국내의 케이블밴드 볼트축력에 대한 유지관리 사례로는 2007년 영종대교에서의 축력측정시험이 있다(NAI, 2007). 시험결과, 준공 3년후 약 45%의 축력 감소가 보고되었으며, 축력 재도입 실시 이후 다시 3년 경과시점에서 약 30% 정도 감소되어 2차 볼트축력 재도입을 실시한 바 있다. 또한 2003년 준공된 광안대교에서도 볼트축력 측정을 실시한 사례가 있으며, 일정한 비율로 감소되는 것으로 나타났다(BIC, 2010). 이 두 교량의 축력측정은 유압잭을 이용한 직접측정법이 적용되었다.

국외 사례의 경우, 일본은 공용중인 6개 교량에 대한 볼트 축력 변화를 검토 분석하였으며(Kim et al., 2008; Taylor & Francis, 2006), 검토결과 500일 및 1000일 경과한 시점에서 각각 25~35% 및 35~40% 감소하는 것으로 나타났다. 그러나 축력 재도입 이후의 500일 및 1000일 경과시점에서는 15~20% 및 20~25% 감소함에 따라 축력 재도입을 실시한 이후의 감소량의 변화를 보고하고 있다.

3.2 유압잭을 이용한 볼트축력 감소량 측정

케이블 밴드볼트에 대상 교량의 케이블밴드 볼트의 축력측정 및 축력재도입은 2013년 9월부터 약 2개월간 케이블밴드 33개소에 대하여 실시되었다. 먼저, 유압장비를 이용하여 준공당시의 도입축력에 비하여 잔류축력을 측정하고 감소량을 파악하였다. 현장측정은 특수차량을 이용하여 축력측정 장비, 축력 재도입 장비, 안전장비 등을 작업대에 설치하고 작업공간을 확보한 후 Fig. 3과 같이 볼트 축력측정 및 재도입 작업을 실시하게 된다.

대상교량은 2009년 1월에 준공되어 약 4.5년이 경과한 후 케이블밴드 볼트의 잔류축력을 측정하게 되었다. Fig. 4는 케이블밴드에 설치된 각각의 볼트에 대한 평균 잔류 축력 측정

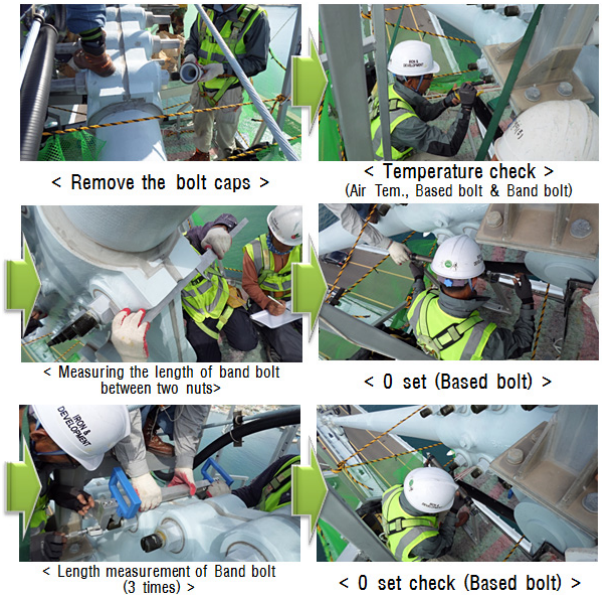


Fig. 3 Site works for axial forces

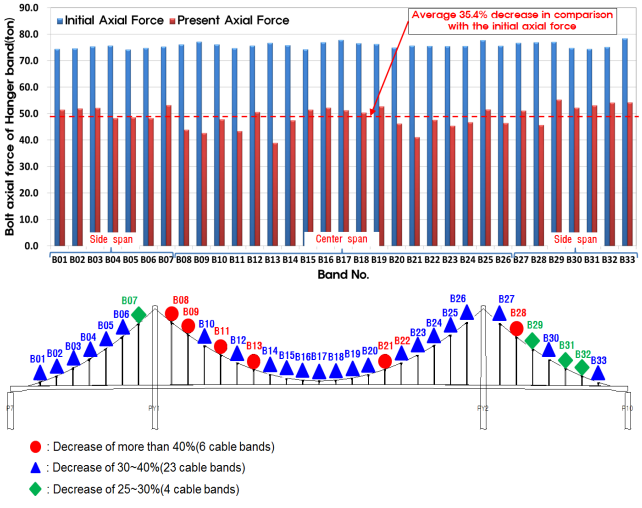


Fig. 4 Axial forces of cable-band before retightening

결과를 정리한 것으로서, 초기 축력대비 40%이상 감소한 케이블밴드는 6개소(18%), 30~40%는 23개소(70%), 25~30%는 4개소(12%)로 각각 나타났다. 33개 밴드의 전체 평균 감소량은 35.4%이며, 이는 3.1절에서 언급한 영종대교보다는 축력 감소량이 낮게 나타났다.

3.3 볼트축력 감소원인 및 이론적 검토

케이블밴드의 볼트축력 감소는 하나의 원인보다는 복합적인 요인에 의해 발생한다. 케이블밴드의 축력감소 현상은 교량에 직접적인 영향을 줄 수 있고 장기적으로 방치할 경우에는 행어밴드의 미끄러짐, 주케이블의 수명 단축, 행어로프의 파단, 보강거더의 처짐 등에 의하여 교량 안전성 저하로 이어질 수 있기 때문에 주기적인 관리와 축력재도입이 반드시 필요하다.

케이블밴드의 볼트 축력감소에 대한 다양한 요인은 Table 2와 같이 정리할 수 있다. 이 중에서 고장력 밴드볼트의 릴렉세이션에 의한 축력감소는 대체로 2~5% 정도(Jang et al., 1998; Jung et al., 2008)로 알려져 있기 때문에, 실제 소록대교에서 발생한 35% 이상의 축력감소의 원인으로 설명하기에는 한계가 있다. 시간경과와 더불어 발생하는 축력감소 원인중에는 주케이블 소선의 아연도금층에 대한 크리프 변형(Moriyama et al., 2008)이 지적되고 있으며, 아연도금층이 케이블장력과 밴드의 압축력에 의해 도금층이 변형되면서 주케이블 전체의 직경이 감소되는 것으로 알려져 있다. 따라서 본 연구에서는 SR대교에 사용된 케이블밴드 볼트축력의 감소에 미치는 소선 아연도금층의 크리프 변형에 대해 이론적인 검토를 다음과 같이 수행하였다.

먼저, SR대교 케이블 소선에 사용된 아연은 강재인 소선보다 탄성계수가 50% 정도 작으며, 재료특성상 재결정 온도가 소선의 경우는 350~450°C인데 비하여, 아연은 15~50°C의 특성을 나타낸다. 따라서 완성단계의 현수교는 정·동적 재하하중에 의하여 소선의 아연도금층에서 크리프가 지속적으로 발생 가능하며, 이에 따라 주케이블 단면의 감소가 유발될 수 있다.

Table 2 Force decrease factor in cable band bolts

No.	Force decrease factors
①	Relaxation of high-strength bolts
②	Section changes of main cable due to stresss increment
③	Deformation of cable band
④	Cable re-arrangement due to load fluctuation
⑤	Deformation of squeezing types
⑥	Expansion by temperature differences between cable band and main cable
⑦	Creep deformation of the zinc plating layer of cable wires

실제 SR대교에 사용된 아연도금층의 두께는 다음과 같이 계산된다. 먼저, SR대교 소선의 아연도금량은 300 g/m^2(상당 도금두께 0.043 mm)가 사용되었다 (MOLT, 2008 ; Dongbu Steel, 2013). 주케이블내의 소선직경은 Ø=6.59 mm이기 때문에, 이 소선에 대한 아연도금층 두께는 0.086 mm이며, 직경 300 mm 주케이블은 케이블내에 소선이 일렬로 배치된 것으로 가정(실제는 일렬배열이 아니기 때문에 도금층 두께는 더 두꺼워짐)할 경우 아연 도금층은 300/6.59×0.086 = 3.9 mm가 되어 최소 4 mm 이상의 아연도금층이 형성되어 있는 것으로 추정할 수 있다.

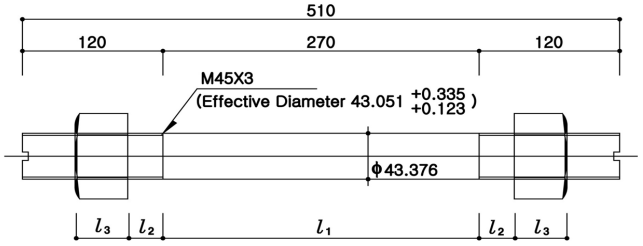


Fig. 5 Cable Band Bolt

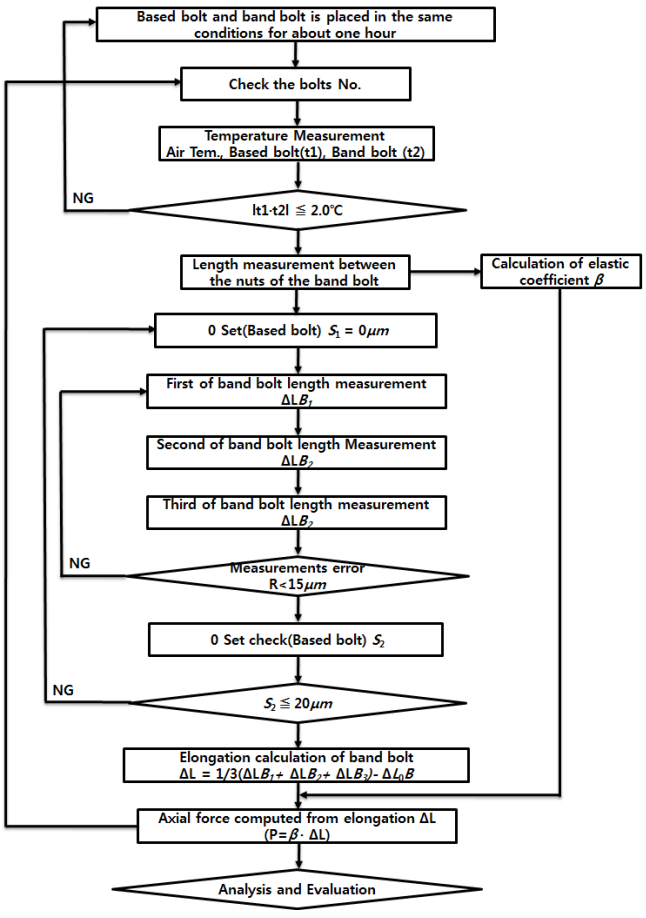


Fig. 6 Flow chart for axial force measurement

한편, 케이블 밴드볼트의 축력 재도입량을 파악하기 위해서, 기준봉을 활용한 볼트 길이변화 측정법(Hayashi and Hirano, 1993)을 적용하였다. 연구대상 교량에 사용된 밴드볼트는 제작시 단부에 Fig. 5와 같은 홈을 설치하여 볼트 길이변화를 측정하여, 유지관리에 활용토록 하고 있다. 따라서 볼트축력 관리를 위해 초음파법 등의 방법을 적용할 수 없는 한계가 있다. 볼트 길이 변화를 정밀하게 측정하기 위해서는 기준봉(현장에 사용된 볼트와 동일한 강봉으로 현장측정시 기준으로 활용)과 정밀 마이크로미터기를 이용하였으며, 이를 축력변환 공식에 대입함으로써 재도입축력을 산정할 수 있게 된다. 이때, 측정오차 최소화 및 정밀성 향상을 위해서 기준봉과 측정볼트의 온도차를 ±2°C 이내로 유지하였으며, 3회 반복 측정 및 기준봉의 초기 측정과 측정 완료 후 허용오차를 15μm 이내로 제한하였다. 기준봉을 활용한 측정 흐름은 Fig. 6(Kim et al., 2008)과 같다.

볼트축력(P)과 길이변화량(ΔL)과의 관계는 역학적으로 다음과 같이 표현된다(Hayashi and Hirano, 1993).

$$P = \beta \times \Delta L \tag{1}$$

여기서, $\beta \approx E/(l_1/A + 2l_2/A_e + l_3/A_e)$: 볼트의 스프링계수에 해당

l_1, l_2, l_3 : 볼트의 부분별 길이

$A,\ A_e$: 볼트의 부분별 단면적

E : 볼트의 탄성계수

$\Delta L = L - Lo(mm)$

Lo : 초기볼트의 길이

$L = Los + \Delta LB(avg)(mm)$: 볼트측정길이

Los : 기준봉의 무응력시의 길이(mm)

$\Delta LB(avg) = (\Delta LB1 + \Delta LB2 + \Delta LB3)/3(\mu m)$: 3회 측정 평균변화량

β값은 상기의 식에서 알 수 있는 바와 같이, 두 개의 너트 사이의 간격($l_1 + 2l_2$)에 의해 달라지며, 케이블 설치 시 사용된 볼트에 대해 실내시험을 실시하여 직접적으로 구해지는 값이다.

대상 교량의 볼트축력 재도입시에 실시하는 볼트 재조임 추정량은 식 (2)를 이용하여 다음과 같이 산정할 수 있다.

$$35\%\text{의 볼트축력 감소량}(N/mm^2) = \sigma_y \times 0.75 \times 0.35 \tag{2}$$

여기서, $\sigma_y \times 0.75$: 볼트의 최대 도입응력은 항복응력의 75%까지만 사용(MOLT, 2008)

σ_y : 케이블 볼트의 항복응력(700 N/mm^2)

볼트축력의 감소량 35%는 3.2절에 나타낸 바와 같이 잔류축력 측정을 통해 사전에 파악한 값이다. 식 (2)를 토대로 35%의 축력감소량을 해당 응력으로 환산 가능하다. 교량의 케이블볼트는 항복응력(σ_y) 700 N/mm^{2}가 사용됨에 따라 35%의 축력 감소는 184 N/mm^{2}의 응력에 해당되며, 볼트의 탄성계수 200 GPa을 고려할 경우 920 με의 변형률에 해당된다. 따라서 볼트의 축력 감소로 인해 케이블밴드 볼트가 원래길이 510 mm에 대해 약 0.1%에 해당하는 0.5 mm 정도를 재긴장 시켜(주케이블의 직경이 아연도금층의 크리프 변형으로 인해 그만큼 줄어들었음을 의미) 이 변화량만큼 재조임을 실시하여야 함을 의미한다.

따라서 교량에 사용된 밴드볼트의 나사산 피치 간격 3 mm를 고려할 경우, 0.5 mm의 재긴장량은 밴드볼트 강봉의 너트를 약 60° 회전시켜야 함을 추정할 수 있으며, 실제 현장에서의 재조임 작업시에 이를 확인하였다. 이를 토대로 현수교의 케이블밴드 볼트축력 감소의 원인으로 주케이블 소선에 시공된 아연도금층의 크리프 변형이 크게 기인함을 확인할 수 있었다.

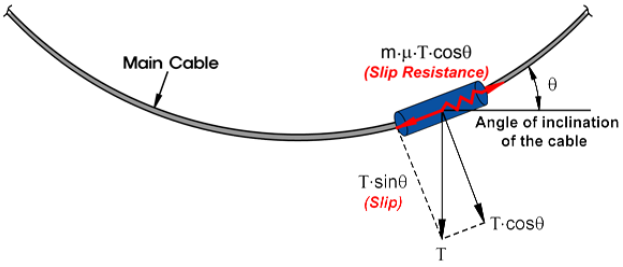
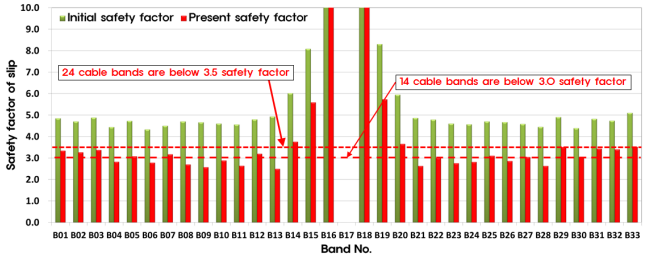
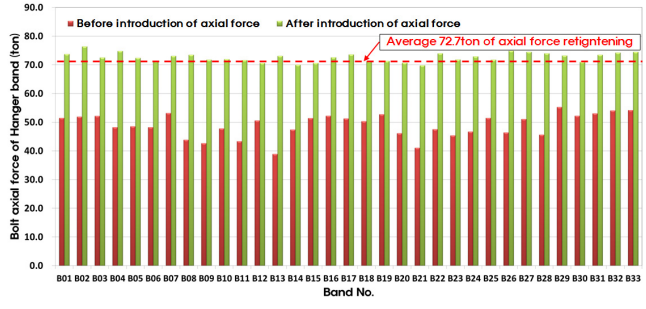


Fig. 7 Schematic forces diagram for main cable



(a) Safety factor of cable-band before retightening



(b) Axial forces of cable-band bolts after retightening

Fig. 8 Safety factor and axial forces of cable-band

3.4 볼트축력 안전율 검토

일반적으로 케이블밴드의 설계는 밴드 구조체 응력검토 및 체결볼트의 응력 검토를 바탕으로 밴드의 활동(Slip)에 대한 검토를 수행하게 되는데, 국내 도로교 설계기준(KRA, 2010)에서는 케이블밴드의 안전율(F)을 3.5로 규정하고 있다.

본 연구에서는 케이블밴드의 활동 안전율을 Fig. 7과 같이 활동력과 활동저항력의 비로 표현하여 검토하였으며, 이에 대한 안전율은 식 (3)을 적용하였다. 또한, 내압 분포상태에 관계하는 계수(m)는 밴드와 케이블 사이의 원주방향 마찰계수(μ)를 고려하여 식 (4)와 같이 구하였다(JRA, 1967).

$$F = \frac{\text{저항력}}{\text{활동력}} = \frac{m\cdot\mu\cdot T\cdot\cos\theta}{T\cdot\sin\theta} = \frac{m\cdot\mu\cdot(nA\cdot\sigma_e)}{T\cdot\sin\theta} \tag{3}$$

$$m = \frac{2}{\mu}\left(1 - e^{-\frac{\pi}{2}\mu}\right) \tag{4}$$

여기서, T : 행어에 걸리는 장력
m : 밴드의 내압분포계수
μ : 마찰계수(현수교설계시 0.15적용)
n : 볼트의 소요 본수
A : 볼트의 유효단면적
σ_e : 볼트의 체결응력

Fig. 8(a)는, 측정 잔류 축력에 대하여 식 (3)을 적용하여 활동 안전율로 표시한 것이다. 활동 안전율 3.5 이하의 케이블밴드를 확인한 결과, 총 33개소 중 24개소로 나타나 약 73%에 이르고 있다.

한편, Fig. 8(b)는 볼트축력 재도입 후의 측정결과이다. 축력 재도입전 평균 49.0 tonf의 잔류축력을 보였으나, 재도입 후에는 평균 72.7 tonf를 확보하여 활동 안전율 4.0이상인 것으로 나타났다.

4. 장기이력 관련 사례

장기적인 케이블밴드의 볼트 축력 이력관리를 위해서는 케이블밴드의 경사, 경과일수, 축력재도입 시기 등을 고려하여 주기적인 측정을 수행하여야 한다. 따라서 측정 작업의 효율성 및 안전성을 고려하여 모든 케이블밴드의 축력 측정보다는 대표 케이블밴드 7개소(B08, 11, 15, 17, 19, 23 및 26)에서

각 밴드당 볼트 2~3개소에 대하여 이력관리를 수행하고 있으며, 측정 시기는 현재까지 재도입 완료 후 3회에 걸쳐 축력 감소를 측정하였다.

Fig. 9는 축력 재도입 완료 후 각각 37일, 95일 및 331일 후의 축력값을 보여주고 있다. 37일 경과 후에는 재도입 축력대비 평균 90.1%의 잔류 축력을 보였으며, 95일 경과 후에는 87.7%, 331일 경과 후에는 86.4%로 각각 나타났다. 또한 Fig. 10은 본 연구대상 교량의 이력 결과를 국외 사례(Kim et al., 2008; Taylor & Francis, 2006)와 비교한 것으로서, 일본에 위치한 6개 현수교 케이블밴드의 축력변화를 나타낸 것으로 시공 완료 후(after completion) 및 재도입 후(after retightening)와 함께 비교되도록 하였다.

검토결과, 일본 Kanmon교 및 Kita bisanseto교의 1차 재도입 완료 후의 결과와 유사한 경향임을 확인할 수 있다. 이러한 검토결과를 토대로 준공후 축력감소량 보다 1차 재긴장 이후의 감소량이 상대적으로 더 줄어든 것을 확인할 수 있었으며, 이를 통해 2차 재긴장 시점 및 긴장량을 모니터링할 수 있을 것으로 판단된다.

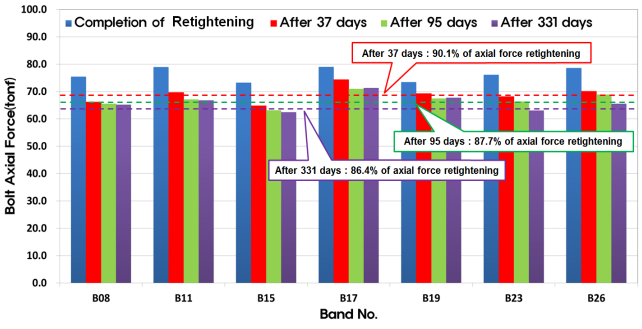


Fig. 9 Long-term history management(after 37, 95, 331 days)

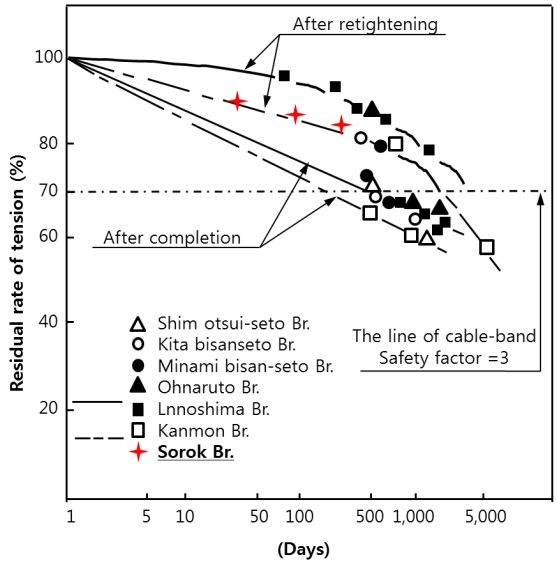


Fig. 10 Comparison of residual tension rate in cable bolts

5. 결 론

현수교의 케이블밴드는 주케이블에 하중을 전달하기 위한 주요 부재로써 볼트축력 감소에 따른 지속적인 관리 및 축력 재도입이 필요하나, 국내에서는 케이블밴드 볼트축력의 재도입 사례와 연구들이 부족하여 유지관리시 많은 어려움과 시행착오 등이 반복되어 기술축적에 한계가 있다. 따라서 본 연구에서는 케이블밴드의 효율적인 유지관리를 위해 볼트축력의 감소 원인을 분석하고, 축력 재도입량에 대한 이론적 방법을 체계적으로 수립하였다. 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 대상교량은 준공이후 약 4.5년 경과한 시점에서 케이블밴드 볼트의 잔류축력은 평균 49.0 tonf으로 초기 축력대비 평균 35.4% 감소된 것으로 측정되었으며, 40%이상 감소된 케이블밴드 볼트도 전체 33개소 중 6개소(18%)에 이르는 것으로 나타났다.
2) 도로교설계기준에서 제안하고 있는 케이블밴드의 활동안전율 3.5를 기준으로 할 때, 볼트축력 재도입 전의 케이블밴드의 안전율은 총 33개소 중 24개소(73%)에서 기준 이하로 나타났다.
3) 볼트축력 감소량을 토대로 축력 재도입 조임량을 아연도금층의 크리프 변형을 고려하여 이론적으로 분석한 결과, 볼트 강봉을 약 0.5 mm(각도로는 약 60° 회전)정도 재조임이 필요한 것으로 나타났으며, 실제 현장 시공시에 이를 확인하였다. 이를 통해, 케이블밴드 볼트축력 감소는 주케이블 소선에 사용된 아연도금층의 크리프 변형이 큰 영향을 미치는 것으로 확인되었다.
4) 볼트 축력 재도입 완료 후의 평균 볼트축력은 72.7 tonf으로 케이블밴드의 활동안전율 4.0 이상을 확보하고 있는 것으로 나타났다. 볼트축력 재도입 후 3차(331일)에 걸친 이력관리 결과, 볼트축력 재도입 후의 볼트축력 감소량은 교량 준공 후의 감소량보다 상대적으로 더 작아지는 경향을 확인할 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 2014년도 한국연구재단 일반연구자 지원사업(과제번호 2014R1A1A2058244)으로 이루어진 것으로 연구비 지원에 감사드립니다.

References

BIC(Busan Infrstructure Corporation (2010), Axial force Tests for Cable-band Bolts in Gwangan Grand Bridge.

Dongbu Steel (2013), Galvanized Steel Iron Catalog.

Hayashi, Y., and Hirano, S. (1993), In-situ Tension Control for Cable Clamp Bolts of Suspension Bridges, *Jb-honshi*, Honshi-kibou, 17(65), 17-23 (in Japanese).

Jang, D. I., Lee, S. Y., and Kim, D. J. (1998), An Experimental Studies on the Relaxation and Slip Behavior of Coated Joints Fastened with High Tension Bolts, *Proceeding of Annual Conference*, KSCE(Korean Society of Civil Engineering), 441-444 (in Korean).

Jung, W. T., Park, Y. H., and Whang, K. S. (2008), Relaxation Test of KICT Tendons, *Proceeding of Annual Conference*, KSCE(Korean Society of Civil Engineering), 1504-1507 (in Korean).

JRA(Japan Road Association) (1967), Specifications for Highway Bridges, *Part II Steel Bridges*, 719-722.

Kim, G. S., Lee, S. C., and Kim, H. G. (2008), Damage, Repair and Reinforcement for Cable-stayed Bridges, *Infrastructure Safety*, KISTEC(Korea Infrastructure Safety and Technology Corporation), 31, 6-67 (in Korean).

KRA(Korean Road Association) (2010), Specifications for Road Bridges.

MOLT(Ministry of Land and Transportation) (2008), Geogum Grand Bridge(Phase I) Structural & Hydraulic Calculation Sheet Part II, 874.

Moriyama, A., Yamada, I., and Yokoi, Y. (2008), Slip Safety Evaluation for Cable Band Bolts on Suspension Bridges, *Proceeding of 63rd Annual Conference*, JSCE(Japanese Society of Civil Engineering), 1(63), 125-126 (in Japanese).

NAI(New Airport Hiway) (2007), 2nd Axial Force Retightening and Test Results in Youngjong Grand Bridge.

Park, S. Y., Joo, C. Y., and Yoon, T. S. (2003), Cable Design of Self-Anchored Suspension Bridge(Sorok Bridge), *Proceeding of Annual Conference*, KSCE(Korean Society of Civil Engineering), 5478-5483 (in Korean).

Taylor & Francis (2006), Bridge Management : Inspection, maintenance, assessment and repair, 658-661.

Received : 03/03/2017

Revised : 02/27/2018

Accepted : 03/05/2017

요 지 : 현수교 주 케이블은 케이블 밴드의 볼트 축력에 대한 정기적인 유지 관리가 매우 중요하다. 현수교 케이블 밴드의 볼트 축력은 시간이 경과함에 따라 케이블 소선의 크리프 현상, 볼트의 릴렉세이션, 하중 변동, 케이블 소선의 재배열 등으로 인해 축력 감소 현상이 발생하게 된다. 본 연구에서는 국내 현수 교량(SR대교)의 케이블 밴드가 시간이 경과하면서 발생하는 축력 감소 현상에 대해 그 원인 및 감소량 등에 대한 현장 측정 및 이론적 검토, 안전율 검토, 장기적인 이력 관리 등을 수행하였다. 그 결과, 케이블 밴드 볼트 축력 감소는 주 케이블 소선에 사용된 아연 도금층의 소성 변형에 크게 영향받는 것을 확인하였으며, 이에 대한 이론적 체계 및 장기 이력 관리에 대한 적용성을 확립하였다.

핵심용어 : 케이블 밴드 볼트, 케이블 소선의 크리프, 볼트 축력, 유지관리