

사장교 케이블 손상 시나리오에 따른 구조 안전 수준 평가

김가영, 서동우*
한국건설기술연구원

Structural Safety Evaluation of Cable Stayed Bridge based on Cable Damage Scenarios

Ga Young Kim, Dong-Woo Seo*

Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology (KICT)

요 약 본 연구는 케이블 시스템의 손상으로 인한 케이블지지 교량의 안전 수준을 평가하여 재난 관리의 활용을 목적으로 한다. 국내에 다양한 형태의 케이블지지 교량(현수교 및 사장교)이 건설되었다. 이러한 교량은 복잡한 구조 요소와 시스템을 가지고 있기 때문에 효율적인 유지 관리가 필요하다. 케이블지지 교량은 종종 인적 또는 자연 재난에 따른 위험을 직면하기도 한다. 2015년 국내 공용중인 사장교에서 번개에 의한 케이블 화재 사고가 발생하였다. 이 사건으로 인해 케이블이 파단이 발생하였고, 교량 붕괴의 위험까지도 고려되었다. 또한 이 사고로 인해 엄청난 사회적 경제적 비용이 요구되었다. 이 사건 이후로 이러한 대형 인프라 시설물에 대한 리스크 기반의 유지관리가 요구되고 있다. 본 연구는 잠재적인 케이블 피해로 인한 교량의 안전 수준을 평가하기 위하여 수행되었고, 국내의 사장교 1개소를 선정하여 효율적이고 신속한 관리를 위한 의사결정 지원을 목표로 케이블 시스템의 손상 시나리오에 따른 교량 안전 수준을 평가하였다. 사장교의 케이블 손상 시나리오에 따른 안전 수준은 FEM 해석을 통하여 분석되었다.

Abstract This study aims to evaluate the safety for cable stayed bridge due to damages on the cable system. Many cable supported bridges, including cable stayed bridge and suspension bridge, have been built in the Korean peninsula. This requires efficient maintenance and management since this structure has complex structural components and system. This large structure also often faces risks either from manmade or natural phenomenon. In 2015 one cable-stayed bridge in South Korea had been struck by a bolt of lightning on the cables. This event had led to fire on cables. These cables had been damaged and putting the bridge at risk. This bridge was back in used after a few weeks of investigations and replacements of the cables. However, enormous social and economic expense were paid for recovery. After this event risk based management for infra structures is required by public demands. Therefore, this study was initiated and aimed to evaluate risks on the cable system due to potential damages. In this paper one cable-stayed bridge in South Korea was selected and investigated its safety based on the damage scenarios of cable system for efficient and prompt management, and for supporting decision making. FEM analysis was conducted to evaluate the safety of the bridges due to damages on the cable system.

Keywords : Bridge risk, Cable damage, Cable stayed bridge, FEA, Safety analysis

1. 서론

교량은 축력과 휨을 독립적으로 또는 합성하여 지지

하는 구조물이다. 이러한 구조적 역할을 위해 기본적인 교량의 형상은 거더교(휨), 트러스교(축력), 현수교(축력-tension), 아치교(축력-compression), 사장교(축력-tension)

본 논문은 한국건설기술연구원 주요사업(Project No. 20180009-001)으로 수행되었음.

*Corresponding Author : Dong-Woo Seo(Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology)

Tel: +82-31-995-0886 email: dwseo@kict.re.kr

Received May 2, 2018

Revised (1st June 1, 2018, 2nd June 15, 2018)

Accepted July 6, 2018

Published July 31, 2018

등으로 크게 구분할 수 있다. 이중 현수교 및 사장교는 대표적인 케이블지지 교량으로서, 교량 상부구조는 케이블과 주탑에 의해 지지된다. 이러한 케이블지지 교량의 경우 다른 교량형식에 한 응력 조정 및 배치방법을 다양하게 변화하여 외관상으로 아름답고 뛰어난 안전성을 확보할 수 있다[1].

하지만 이와 같은 케이블 지지교량의 경우, 구조적인 특성상 넓은 범위에 교량 주요 부재인 케이블이 노출되어 손상될 가능성이 크다는 단점을 지니고 있고 폭파, 충돌, 화재 등 예측하기 어려운 사고 등으로 인해 구조물 손상을 일으킬 수 있다. 교량 전체를 지지하고 있는 케이블이 손상(파단)이 발생하는 경우 교량이 붕괴되지 않더라도 공용중인 교량에 치명적인 상황을 일으킬 수 있다 [1].

일례로 지난 2015년 서해대교(사장교)의 주탑에 연결된 케이블에 화재가 발생하여 전체 144개의 사장케이블 중 1개가 완전 파단되고 2개가 부분적으로 손상되는 사고가 발생하였다. 이로 인해 수많은 시민들이 우회도로를 이용하는 불편을 겪었고 인명사고까지 발생하는 초유의 사태로 이어졌었다[2].

현재 케이블 강교량 설계지침(2006)[3], PTI(2001) [4] 등 국내외 케이블 교량 설계기준에서 케이블 교량 설계시 케이블 교체 및 파단에 대한 검토를 하도록 규정하고 있지만, 이는 강교에 국한되어 콘크리트교에 대한 설계기준은 정립되어 있지 않다.

본 연구에서는 대표적 케이블 지지교량인 사장교의 케이블 파단 시나리오에 따른 교량의 안전성 수준에 대한 영향을 평가하고, 그 결과는 신속한 재난대응을 위한 기초자료로 활용하고자 한다.

2. 해석 방법

2.1 케이블 손상 해석기법

본 연구에서는 설계단계에서 검토되는 단일 케이블 파단에 대한 안전성 확보 여부뿐만 아니라, 케이블 손상이 인접한 케이블에 연쇄적인 손상을 일으켜 전체 구조계의 안정성을 장담하지 못하는 경우에 대한 검토를 수행하였다.

본 연구에서는 케이블 파단을 모사하기 위해 하나의 케이블 요소를 제거하고 해당 케이블 장력과 같은 크기

의 힘을 장력 반대방향의 외력으로 작용시켜 파단을 모사하였다[5]. 이때, 케이블 파단에 따른 동적효과를 구현하기 위해 국내의 설계기준을 비교 검토 후 우리나라 실정에 맞는 동적확대계수를 적용하여 검토를 진행하였다.

2.2 동적확대계수 적용

케이블의 손상으로 인한 동적하중은 해당 하중을 정적으로 가해 구한 정적 응답에 동적 확대 계수를 곱한 등가 정적 하중을 사용하여 고려한다. 따라서 동적 확대 계수에 따라 케이블 손상에 따른 영향 검토하중의 크기가 결정되어지므로 동적 확대 효과를 과소 또는 과대하게 평가하면 구조물 안전을 보장할 수 없거나 비경제적인 설계가 된다[1,5,6].

동적 확대 계수(DAF : Dynamic Amplification Factor)는 아래 식과 같이 동적응답의 최대값에 대한 정적응답의 차이의 비로 정의한다.

$$DAF = \frac{\max[|\Delta_{Dyn1}|, |\Delta_{Dyn2}|]}{|\Delta_{Static}|} \quad (1)$$

여기서, 동적응답의 최대값은 케이블의 손상 전 정적응답과 파단 후 동적 응답 차이의 최대값으로 정의한다. 즉, Fig. 1과 같이 손상 후 동적응답의 최대값은 Δ_{Dyn1} 과 Δ_{Dyn2} 중 큰 값으로 한다.

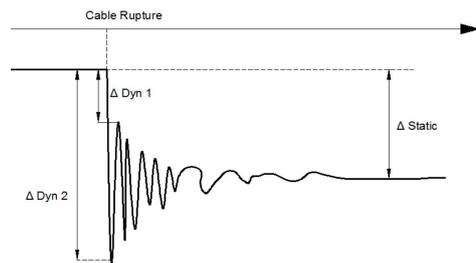


Fig. 1. Dynamic behavior example due to cable rupture[5]

현재 교량의 케이블 손상에 의한 영향을 고려한 연구는 체계적으로 확립되어있지 않은 상태로 분석되지만, 설계기준에서는 동적 확대 계수를 산정하고, 계수가 일정한 값을 초과하지 않도록 규정하고 있다. 이러한 동적 확대 계수는 케이블 손상을 모사한 동적해석 수행을 통해 구해야 하지만, 일관성을 유지하면서 신뢰성 높은 동

적 확대 계수를 구하는 방법은 아직 명확하게 제시되지 못하고 있는 실정이다[1,5,6].

케이블 손상에 대한 설계기준 분석 결과 주요 설계 지침에서는 동적 확대 계수를 2.0으로 사용하도록 하고 있다[3,4,6]. 따라서 본 연구에서는 케이블 손상에 의한 동적 효과를 고려하기 위한 동적 확대 계수(DAF)를 2.0으로 적용하고 케이블의 허용응력을 50% 할증한 값으로 검토를 하였다. 추후 동적 확대 계수에 대한 연구가 충분히 이루어지고 일관성과 신뢰성이 확보될 수 있다고 판단된다면 재검토를 통해 케이블 손상에 대한 안정성 검토를 수행하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

2.3 해석 소프트웨어

현재 토목분야에서 사용 중인 해석 프로그램에서는 케이블 손상에 대한 모델링을 위해서 사용자가 모든 상황에 대해 예측하고 모델링을 구현해주어야 한다. 본 연구의 케이블 손상에 따른 해석을 위해 Midas Civil을 사용하였다[8].

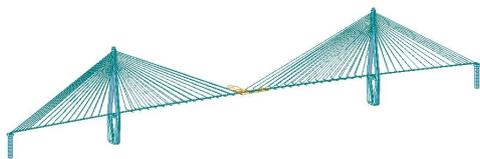


Fig. 2. Cable stayed bridge model[8]

3. 손상 시나리오 구성 및 해석 결과

3.1 대상 교량 및 해석 모델

대표적 케이블 지지교량인 사장교는 보강형의 자중 및 보강형에 작용하는 주요한 수직하중들이 보강형을 1차적으로 지지하는 케이블에 의해 주탑으로 전이된 후 지반으로 전달되는 메커니즘을 갖고 있다[9]. 본 연구에서 대상으로 한 사장교는 상판 좌우에 각각 2쌍의 케이블로 지탱하는 일반적인 방식과는 달리 좌우의 케이블을 1쌍으로 줄이고 중앙에 1쌍을 설치하여 3쌍의 케이블이 상판을 지탱하게 하는 ‘3면배치(3-way) 케이블 공법’을 사용한 것이 특징이다.

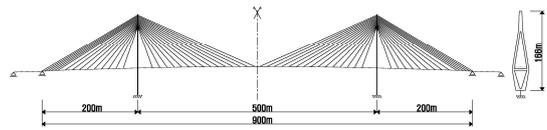


Fig. 3. Cable arrangement of bridge model

본 연구의 주요 목적은 케이블 손상이 교량의 주요 구성요소인 케이블 시스템에 미치는 영향을 검토하는 것으로 공용중인 사장교 1개소를 대상으로 수행하였다. 전체 계에서 선형해석에 의한 중첩의 원리를 사용하여 손상에 의한 효과를 고려하였으므로 구성요소의 비선형성은 고려되지 않았다. 케이블은 Truss 요소로 모델링하였다. 대상교량에 대한 모델링 시 준공도서를 참고하여 단면특성 및 재료 물성치를 적용하였으며 2면 케이블의 정착위치 또한 이를 참고하여 설정하였다.

합리적인 하중분포상태 및 정확한 케이블 손상에 대한 모사를 위해 3차원 입체모델을 구현하였으며, 실제 교량의 완전한 모사가 가능하도록 정확한 물성치의 반영 및 부재간의 연결, 주탑부 가로보와 기둥부의 중첩되는 부분에 이격거리 부여를 위해 Midas Civil의 Beam end off-set 기능을 사용하여 모사하였다.

설계활하중은 DB-24 및 DL-24로 적용했으며 해석 모델의 기하 및 재료 물성치는 Table 1~2와 같다.

Table 1. Material properties of bridge model

| Girder | Steel type | SM520 |
|--------|----------------------|--------------------------------------|
| Cable | Spec. | BS-5896 Super Grade(diameter:15.7mm) |
| | Tensile strength | $f_{pu} = 180 \text{ kgf/mm}^2$ 이상 |
| | Yielding Strength | $f_{py} = 160 \text{ kgf/mm}^2$ 이상 |
| Pylon | Compressive Strength | $f_{ck} = 400 \text{ kgf/cm}^2$ |

Table 2. Geometry and material properties of simulation model

| | Girder | Pylon | Cable |
|-------------------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| E (kN/m ²) | 2.1×10^8 | 2.7×10^7 | 2.0×10^8 |
| A (m ²) | 1.11 | 29.8 | 0.008 |
| I (m ⁴) | 1.26 | 263.3 | - |
| γ (kN/m ³) | 78.5 | 24.52 | 78.5 |
| F _y (MN/m ²) | 210.0 | 16.0 | 1800 |

대상교량은 교축방향과 교축직각방향으로 대칭이므로 케이블의 손상 케이스는 전체 120개의 케이블의 1/4인 30개의 케이블을 대상으로 수행하였다. 케이블은 Fig. 4와 같이 손상이 예상되는 좌측경간의 최외측부터 케이블 C1~C30으로 명명하였다.

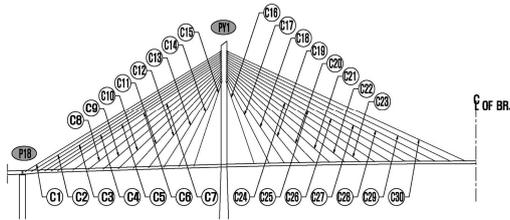
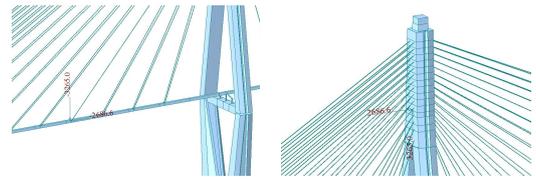


Fig. 4. Cable arrangement of analysis model

3.2 케이블 손상 시나리오 구성

본 연구에서는 손상이 발생하지 않은 상태(Healthy state)와 두 개의 손상 시나리오를 사용하여 케이블 손상에 따른 교량의 안전 수준을 분석하였다.



(a) Single cable damage at deck (b) Single cable damage at pylon

Fig. 5. Single cable damage case (example)

첫 번째 손상시나리오는 C1~C30 케이블 중 단일 케이블이 파단되는 경우이며 Fig. 5와 같이 해석모델을 모사하였다. 두 번째 시나리오는 고정하중과 활하중에 의한 장력이 가장 큰 케이블과 인접한 케이블 한 개 이상이 동시에 손상되어 교량에 영향을 주는 경우로 가정하였다. 케이블 손상 후 인접 케이블의 장력이 허용 값을 초과하여 연속적으로 손상된다고 가정하여 그 중 가장 불리한 것으로 판단되는 Worst-case를 도출하였다.

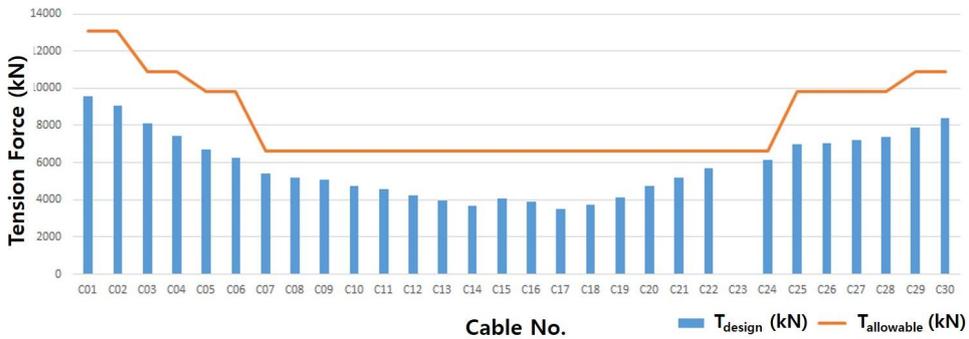


Fig. 5. Analysis result: Single cable rupture

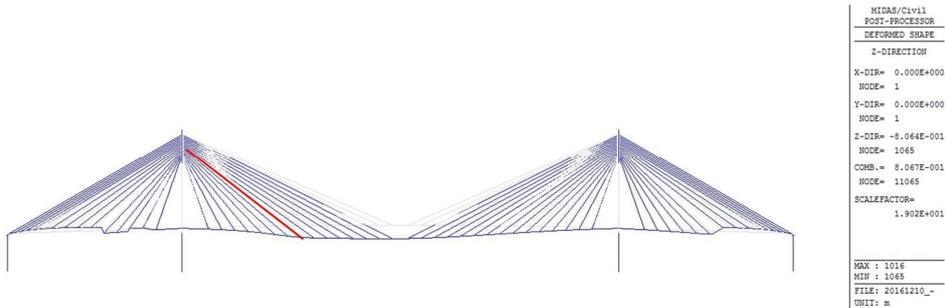


Fig. 6. Deflection shape after cable C23 rupture

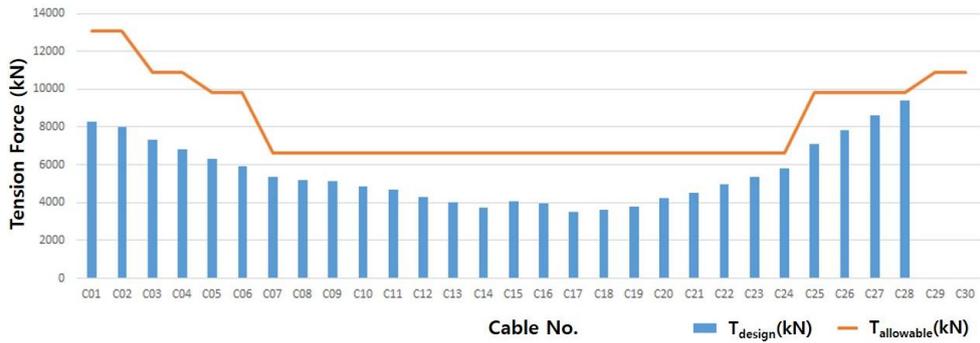


Fig. 7. Analysis result: multi (two) cable rupture

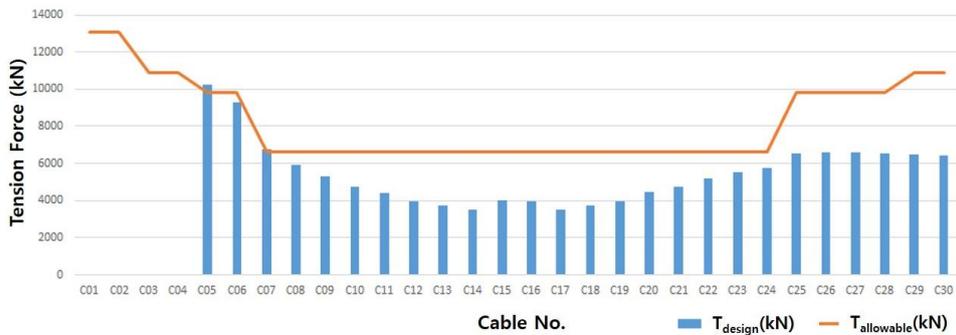


Fig. 8. Analysis result: multi (four) cable rupture

3.3 손상 시나리오에 따른 구조해석 결과

본 절에서는 케이블 손상 시나리오에 따른 케이블 구조 안전성을 FEM 해석을 통하여 분석하였다.

케이블의 손상으로 인한 단선 시 완성계 사장교의 변형 및 내력의 변화 등 정역학적 거동변화를 분석하였다. 케이블의 손상조건은 측 경간 최외측 케이블부터 중앙경간의 중앙부 케이블까지(C1~C30) 하나의 케이블이 단선될 경우에 대해서 각각 고려하였고 이에 따른 케이블의 장력변화 분석하였다.

단일 케이블 단선의 경우 장력 배분에 의한 인접 케이블의 장력이 모두 허용치 이내로 확인되어 교량의 안전성이 확보되는 것을 확인하였다. 설계장력과 허용장력의 비가 가장 작아 가장 큰 위험성을 도래할만한 케이블인 C24에 인접한 C23 케이블 파단시에도 안전성이 확보되었으며 그 결과는 Fig. 5와 같다.

Fig. 6은 중앙경간을 지지하는 케이블의 손상시 전체 구조계의 변형 형상을 나타낸다. 케이블 손상 시 케이블이 지지하고 있던 구간 및 일부 구간에 국부적인 처짐

및 변형이 발생한다. 주탑에 가까운 케이블일수록 전체 구조계에 미치는 영향이 작고 주탑에서 먼 케이블일수록 주탑의 수평변형에 영향을 크게 미쳐 전체 구조계에 큰 영향을 주는 것을 확인할 수 있다.

두 개 케이블이 동시에 파단된 경우를 분석한 결과 모든 경우에서 안전성이 확보되는 것을 확인할 수 있었다. Fig. 7은 그 중 중앙경간부 케이블 C29, C30이 동시에 파단된 경우의 해석 결과이다. 중앙경간부의 케이블 C29와 C30의 다중 손상 시에 손상 케이블이 지지하고 있던 하중이 인접한 케이블들에 전이됨에 따라 인접 케이블의 장력이 증가하였지만 모두 허용장력 이내로 평가되어 케이블 C29와 C30의 다중 손상 시에도 타 케이블의 안정성에는 문제가 없는 것으로 평가되었다.

발생가능성은 매우 낮지만 화재, 테러 등과 같은 극단적인 상황에 의해 케이블이 연쇄적인 손상을 입는다고 가정을 하여 측경간부의 케이블 C01~C04가 동시에 손상을 입는 경우를 검토하였다. Fig. 6과 같이 인접한 케이블 C05와 케이블 C07이 분담해야할 장력이 허용장력

을 초과하게 되어 안정성을 확보하지 못하게 된다. 또한 케이블 C06도 허용장력에 매우 근접하게 되어 실제 해당 상황이 발생하게 된다면 측경간부를 지지하는 케이블의 절반정도를 잃게 되어 교량의 붕괴까지 이를 수도 있을 것으로 보인다.

4. 결론

본 연구에서는 특수교(사장교, 현수교)의 케이블 시스템에 발생 가능한 재난 상황에 대비하기 위하여 케이블 손상 시나리오를 가정하고 그에 따른 교량의 안전성 확보 여부를 확인하기 위하여 수행하였다. 또한, 케이블 손상 시 동적 효과를 구현하기 위한 방법으로 국내외 설계 기준들을 검토하여 본 연구에 적합한 동적확대계수(DAF)를 2.0으로 산출하여 적용하였다.

케이블 손상 시나리오로 단일 케이블의 파단되는 경우 두 개 케이블이 동시에 파단된 경우를 선정하여 분석하였으며, 교량의 안전성이 확보되지 않는 시점을 확인하였다.

케이블 손상의 영향은 가장 장력이 크고 수평 배치 각도가 작으며 주탑 최상단에 정착한 케이블이 전체 구조물의 변형을 초래하나 구조 안전성에는 영향이 없는 것을 확인하였다. 단일 손상 해석결과, 측경간의 최외측 케이블 및 중앙지간 중앙부를 지지하는 케이블의 손상은 주탑의 수평방향 변형을 유발하였다. 주탑에 가까운 내측 케이블의 손상에서는 국부적인 처짐 및 내력의 변화가 있으나 전체 구조물의 변형 및 내력은 큰 변화가 없었다.

두 개 이상의 케이블이 손상되는 상황을 가정한 시나리오에서는 해당 케이블의 단일 손상 시보다 큰 변형 및 내력의 변화를 보였지만 그 유형 및 양상은 단일 손상과 유사한 특징을 보였다. 하지만 4개 이상이 파단되는 경우에는 교량의 안전성이 확보되지 않은 것으로 평가되었다.

본 연구결과에 따르면 케이블의 손상 개수에 따라 교량 통제의 수준을 결정할 수 있고, 전면 통제에 따른 막대한 경제적 손실에 대비 할 수 있을 것으로 판단된다. 케이블 교량의 관심 및 수요를 고려하면 앞으로 준공할 교량뿐만 아니라 기 준공된 교량에 대해 유지관리 및 보강 차원에서 케이블 손상에 관한 검토가 이루어져야 할

것으로 보인다.

케이블 파단 사고로 인한 안전문제뿐만 아니라 경제적 손실이 막대하기 때문에 파단 시나리오에 따른 교량 안전 수준을 DB화하고, 손상 케이블의 급속 교체를 위한 케이블 수급 전략 수립 등을 수립하여 유지관리에 활용한다면 신속한 대응이 가능할 것으로 판단된다.

또한, 이를 위하여 케이블의 다중 손상에 대한 명확한 기준과 동적 영향에 따른 동적 확대 계수의 적용, 그리고 케이블 손상 시 고려해야 할 마찰계수 적용 등에 관한 추가적인 연구 및 검토가 필요할 것으로 사료된다.

References

- [1] H. H. Na, Y. H. Kim, S. Shin, "Analytical Method to Determine the Dynamic Amplification Factor due to Hanger Cable Rupture of Suspension Bridges", *Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea*, Vol.18, No.6, pp.301-308, 2014.
DOI: <https://dx.doi.org/10.5000/EESK.2014.18.6.301>
- [2] H. Gil, J. H. Hur, H. Kwon, "Cable Fire due to Lightning and Repair of Seohae Bridge", *Korean Society of Civil Engineers Magazine*, Vol.64, No.7, pp. 2016.
- [3] Korean Society of Civil Engineers, Design Guidelines for Steel Cable-Supported Bridges, Korean Society of Civil Engineers, 2006.
- [4] PTI(Post-Tensioning Institute), "PTI DC45.1-12: Recommendations for Stay Cable Design, Testing and Installation", 4th ed., Arizona: PTI, Phoenix, 2001.
- [5] Y. H. Kim, H. G. Go, J. C. Kim, S. Shin, "Effects of Cable Rupture on Dynamic Responses of a Concrete Cable-stayed Bridge", *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, Vol.16, No.3, pp.84-91, 2012.
DOI: <https://dx.doi.org/10.11112/jksmi.2012.16.3.084>
- [6] Y. Park, "A Study on the Dynamic Amplification Factor for the Evaluation of Cable Loss Effect in a Cable-Stayed Bridge", Thesis of Master's Degree, Seoul National University, 2007.
- [7] Korean Society of Civil Engineers, Korean Highway Bridge Design Code, Korean Society of Civil Engineers, 2008.
- [8] MIDAS, Midas Civil [Internet]. MIDAS, c2018[cited 2018 Jan. 8], Available From: <http://kor.midasuser.com/civil/> (accessed Jan. 8, 2018)
- [9] S. J. Kim, J. H. Choi, D. H. Won, T. H. Han, Y. J. Kang, "Change of Static Behavior and Ultimate Capacity of Steel Cable-stayed Bridges after Cable Failure", *Journal of Korean Society of Steel Construction*, Vol.23, No.6, pp.747-761, 2011.
UCI: <https://uci.or.kr/G704-000475.2011.23.6.010>

김 가 영(Ga Young Kim)

[정회원]



- 2012년 2월 : 충북대학교 구조시스템공학과 (공학석사)
- 2016년 8월 : 충북대학교 토목시스템공학과 (공학박사)
- 2016년 7월 ~ 현재 : 한국건설기술연구원 박사후연구원

<관심분야>

내풍공학, 자연재해, 구조물 유지관리

서 동 우(Dong-Woo Seo)

[정회원]



- 2008년 5월 : Bucknell Univ. 토목환경공학과 (구조공학 석사)
- 2013년 2월 : Northeastern Univ. 토목환경공학과 (구조공학 박사)
- 2013년 3월 ~ 현재 : 한국건설기술연구원 수석연구원

<관심분야>

내풍공학, 구조물 유지관리, 구조물 SHM