

케이블 파단이 콘크리트사장교 동적거동에 미치는 영향

Effects of Cable Rupture on Dynamic Responses of a Concrete Cable-stayed Bridge

김 유 희¹⁾ 고 형 규²⁾ 김 재 천³⁾ 신 수 봉^{4)*}
Kim, Yu Hee Go, Hyeong Gyu Kim, Jae Cheon Shin, Soobong

Abstract

This paper aims to investigate the effects of cable rupture on the dynamic responses of concrete cable-stayed bridges in comparison with those of steel composite ones. It examines an adequate analysis method for simulating cable rupture using a time history function and evaluates the design guidelines for dynamic amplification factor (DAF). The computed DAFs from a concrete cable-stayed bridge are compared with those from a steel composite one based on the design guideline. As a conclusion, the current design guidelines for DAF may be reliable in overall but show some unstable cases despite satisfying the design guidelines, especially for concrete cable-stayed bridges.

Keywords : Cable rupture, Concrete cable-stayed bridges, Design guideline, Dynamic amplification factor

1. 서론

콘크리트사장교는 강합성사장교에 비해 도장이 필요치 않아 친환경성 및 유지관리 측면에서 유리하고, 사장 케이블의 장력으로 인해 효율적인 단면설계가 가능하므로 경제성 및 시공성이 우수하다. 또한, 사장교의 대형화 및 장기간화가 진행되면서 보강형의 축력이 커지게 되고 압축에 강한 콘크리트는 사장교 보강형의 적절한 형식으로 그 효율성이 다시 인식되고 있어 국내에서 설계 및 시공 실적이 증가하고 있다(김광수 등, 2007). 최근에는 우리나라에서 세계 최초로 초고성능 콘크리트를 사장교에 적용할 수 있는 핵심기술이 개발되어 향후 해외 교량공사 수주에서 큰 기여를 할 것으로 예상된다.

이와 같은 장점과 전망에도 불구하고 사장교는 특성상 케이블이 외부로 노출되어 있어 차량사고, 화재 혹은 지진 등 외부의 환경적 요인으로 인해 예기치 못한 상황에서 갑작스럽게 케이블이 파단될 수 있어 대형 참사로 이어질 위험성을 내포하고 있다(박용석, 2007).

따라서 사장교에서의 케이블 파단에 대한 안전성 검토는 사용자의 안전과 교량의 신뢰성 확보를 위해 매우 중

요하다. 하지만, 현재 강합성사장교에 비해 콘크리트사장교를 대상으로 한 케이블 파단에 대한 설계기준이 국내·외에 정립되어 있지 않고 강합성사장교에 대한 것을 준용하고 있기 때문에 이에 대한 검토가 필요하지만, 체계적인 연구가 미흡한 상태이다(케이블 강교량 설계지침, 2006).

본 연구에서는 강합성사장교를 대상으로 케이블 파단을 모사하는 합리적인 해석기법을 검토하고, 동적확대계수(Dynamic Amplification Factor, DAF)에 대한 설계기준을 평가한 후, 검증된 방법을 콘크리트사장교에 적용하여 그 결과를 강합성사장교에 대한 결과와 비교·분석하였다.

2. 사장교 케이블 파단 해석기법 및 설계기준

2.1 사장교 케이블 파단 해석기법

대부분의 사장교 프로젝트는 케이블의 교체 및 파단에 대한 사전 검토를 수행하여 안정성을 확보하고 있으나, 전체 케이블에 대한 검토 없이 가장 큰 영향을 줄 것으로 예측되는 몇 가지 경우에 대해서만 해석을 수행하고 있다

1) 학생회원, 인하대학교 토목공학과 박사과정
2) 학생회원, 인하대학교 토목공학과 석사과정
3) 학생회원, 인하대학교 토목공학과 박사과정
4) 정회원, 인하대학교 토목공학과 교수, 교신저자

* Corresponding author : sbshin@inha.ac.kr 032-860-7552
• 본 논문에 대한 토의를 2012년 6월 30일까지 학회로 보내주시면 2012년 7월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

(남효승 등, 2004). 그러나 케이블 파단에 대한 설계기준인 동적확대계수 계산에 대한 일정한 지침이 명확하게 제시된 것이 없기 때문에, 케이블 파단에 따른 DAF 값들은 상황에 따라 크게 변동하고 있다. 따라서 가능한 모든 케이블에 대한 파단을 검토하고, 이러한 파단에 의한 DAF 계산에 대한 명확한 지침이 제시되어야 할 필요가 있다.

2.1.1 케이블 파단의 모사방법

본 연구에서는 케이블 파단에 대한 검토 시, 설계지침에 따라서 전체 차로에 활하중을 만재하한 후 평형상태에서 케이블 장력을 구하였다. 파단을 모사하기 위해 Fig. 1과 같이 대상 케이블요소 하나를 제거하고 해당 케이블의 장력과 같은 크기의 힘을 장력 반대방향의 외력으로 작용시켜 파단을 모사하였다. 이때 외력은 Fig. 1에서와 같은 시간이력함수를 이용하여 도입하였다.

도입된 외력은 사장교의 넓은 주파수 대역에 걸쳐 작용하며, 전체 고유진동모드에 영향을 준다. 따라서 소수의 모드를 사용한 모드중첩법(Modal Superposition)을 적용할 경우 상대적으로 동적응답을 작게 평가하는 오류를 범할 수 있고, 소수 모드를 조합한 동적응답의 수렴 값을 정적응답으로 사용하는 경우 진동 폭에 비해 정적응답을 작게 평가하여 동적확대계수를 과대평가할 수 있다(Ruiz-Teran & Aparicio, 2007). 본 연구에서는 이러한 모드중첩법이 범할 수 있는 오류를 배제하기 위하여 직접적분법(Direct Integration)으로 해석을 수행하였다.

2.1.2 시간이력함수 정의

사장교의 케이블은 여러 가닥의 강선이 모여 이루어진 경우가 대부분이기 때문에 케이블이 사고로 인하여 파단될 경우, 순간적이기 보다는 순차적으로 파단이 진행된다고 가정하는 것이 현실적이다. 그러나 시간이력함수를 이용한 해석의 경우 케이블 파단이 영향을 주는 시간 간격을 0에 근접한 극히 작은 값으로 설정, 즉 순간적으로 파

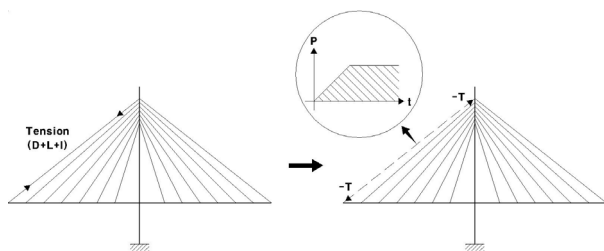


Fig. 1 Simulation of cable rupture

단이 진행된다고 가정하면, 교량의 동적거동이 과대평가되는 경향을 보일 수 있다. 이러한 경향은 동적응답의 최댓값이 동적확대계수를 결정하는 인자이기 때문에 동적확대계수를 급증시키는 원인이 된다.

따라서 본 연구에서는 Fig. 1과 같이 시간이력함수를 Ramp하중으로 정의하고, 강합성사장교인 서해대교를 대상으로 설계기준인 2.0 이하의 값을 만족시키기 위해 시간 간격을 5초로 설정하여 점진적인 파단으로 모사하였다. 이를 콘크리트사장교인 화명대교에 동일하게 적용하여 결과를 비교·분석하였다.

2.2 케이블 파단에 대한 설계기준 및 검토 변수

2.2.1 동적확대계수

현재까지 케이블 파단에 대한 동적확대계수를 이용한 안전성 평가는 강합성사장교를 중심으로 진행되어 왔다. 보강형 주거더의 축력은 전체 시스템의 지배를 받고, 전단력과 모멘트의 경우는 국부적인 하중에 민감하다. 즉, 국부파손에 대한 검토를 할 때 축력보다는 전단력이나 모멘트의 동적확대계수가 보다 더 적합한 기준이 된다.

강합성사장교의 경우, 축력의 동적확대계수는 주탑 부근을 제외하면 2.0 이하로 고려될 수 있으며, 전단력과 모멘트의 동적확대계수는 1.5~2.0로 평가될 수 있다(박용석, 2007).

동적확대계수는 Eq.(1)과 같이 동적응답의 최댓값에 대한 파단 전·후 정적응답 차이의 비로 정의한다.

$$DAF = \frac{\max(|\Delta_{Dym1}|, |\Delta_{Dym2}|)}{|\Delta_{Static}|} \quad (1)$$

Eq.(1)의 기호들은 Fig. 2에 그림으로 정의하였다.

동적응답의 최댓값은 파단 전 정적응답과 파단 후 동적응답 차이의 최댓값으로 정의한다. 즉, Fig. 2와 같이

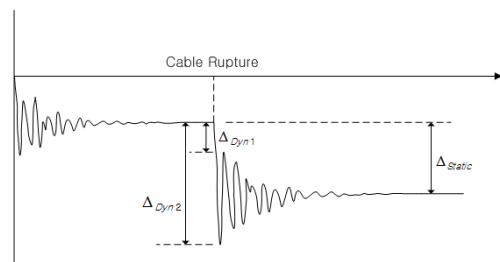


Fig. 2 Sample dynamic behavior due to cable rupture

Table 1 Design guidelines relevant to cable rupture

시방규정	하중조합	동적확대계수
케이블 강교량 설계지침(2006)	$1.0D + 0.5(L+I)$ + 케이블파단에 따른 단면력 · D : Dead Load · L : Live Load · I : Impact Factor	정해석: DAF=2.0
		동해석(비선형): DAF \geq 1.5
PTI(2001)	$1.1Dc + 1.35Dw + 0.75(LL+IM)$ + 케이블파단에 따른 단면력 · Dc : Dead Load (components and attachments) · Dw : Dead Load (wearing surface and utilities) · LL : Live Load · IM : Dynamic Load Allowance	정해석: DAF=2.0
		동해석(비선형): DAF \geq 1.5
SETRA(2002)	$0.75TS + 0.4UDL$ · TS : Tandem System · UDL : Uniformly Distributed Load	순간 파단: DAF=2.0

Δ_{Dyn1} 과 Δ_{Dyn2} 중 큰 값을 동적응답의 최댓값으로 취하였다.

한 개의 케이블이 파단되면 모델 전체에 영향을 미치지 못하고 일정 구간에서는 파단 전·후 정적응답의 차이 (Δ_{Static})가 최대 정적응답의 차이 ($\Delta_{Max.Static}$)에 비해 1% 이하의 상당히 작은 결과를 도출한다. 이러한 것이 동적확대계수를 과대평가하는 원인이 된다.

또한, 서해대교와 같은 2면 사장교의 경우에 한 면에서 한 개의 케이블이 파단되면 보강형에서 파단 전·후 정적응답 차이의 최댓값과 파단 후 최대 부재력이 같은 위치에서 발생하지만, 화명대교와 같은 1면 사장교의 경우에는 그 위치가 다르게 나타난다. 이러한 경우, 파단 전·후 정적응답 차이의 최댓값을 기준으로 동적확대계수를 산정하는 것은 합리적인 평가방법이라 할 수 없다.

이에, 본 연구에서는 36가지의 모든 파단 케이스에 대해서 파단 후 부재력의 최댓값을 기준으로 동적확대계수

를 산정하였으며, 또한 단면 설계 시 검토 대상이 되는 위치에서 즉, 보강형에서는 지점부와 경간 중앙부에서의 최대 부재력에 대해, 케이블에서는 파단 후 최대 장력이 발생하는 케이블에 대해 동적확대계수를 평가하였다.

2.2.2 설계기준

케이블 파단과 관련된 주요 시방규정의 하중조합 및 동적확대계수에 대한 기준을 Table 1에 정리하였다. 국내의 사장교와 관련된 제반 규정은 케이블 강교량 설계지침(2006)을 따르며 이는 PTI(2001)에 기초한다고 명시되어 있다.

2.2.3 케이블 파단에 의한 검토 변수

파단이 발생한 후, 보강형의 거동은 수평방향 보다는 상·하 방향으로 움직임을 보인다. 따라서 본 연구에서는 동적확대계수에 의한 검토 변수로 보강형의 축력, 전단력은 부재의 수직전단에 의한 영향, 모멘트는 보강형의 축방향의 영향과 케이블의 축력을 검토하였다.

3. 강합성사장교 케이블 파단해석

3.1 예제교량 제원 및 해석모델

본 연구에 사용된 예제교량은 서해대교로 Fig. 3과 같이 주 교량이 990m인 3경간 강합성사장교이며, H형 콘크리트 주탑의 높이는 각각 179.893m, 182.263m이다. 케이블은 2면 Semi-Harp Type으로 한 면에 72개씩 총 144본을 배치하여 정착되어 있으며, 앵커교각에 부모멘트 발생을 억제하기 위해 60m 구간을 단순교 형태로 분리하고 4개의 케이블을 앵커교각 위에 집중배치 하였다.

본 연구에서는 범용구조해석 프로그램인 MIDAS Civil

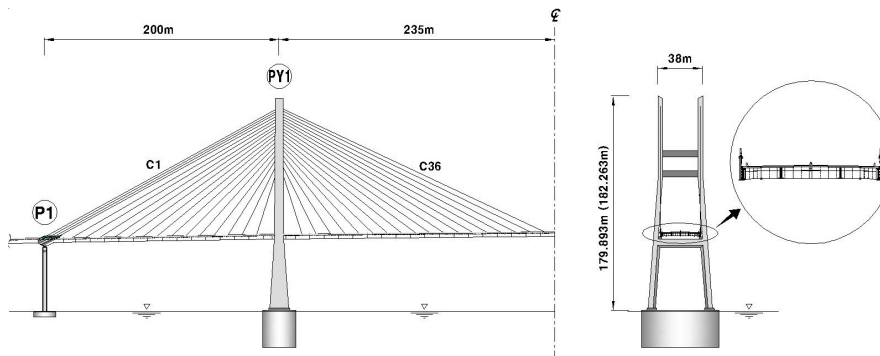


Fig. 3 Structural system of Seohae Grand Bridge

2006을 사용하여 선형 시간이력해석을 수행하였다. 60m의 단순교 구간은 케이블 파단에 의한 영향이 극히 작다고 가정하고 해석모델에서 제외시켰으며, 교축방향과 교축직각방향으로 대칭이므로 케이블 파단 케이스는 전체의 1/4인 36개의 케이블을 대상으로 수행하였다. 감쇠비는 일반적으로 사용되는 콘크리트사장교와 강사장교의 중간값인 3%로 적용하였다.

케이블은 Fig. 3과 같이 파단이 형성되는 좌측경간의 좌외측부터 케이블 1~36으로 명명하였다.

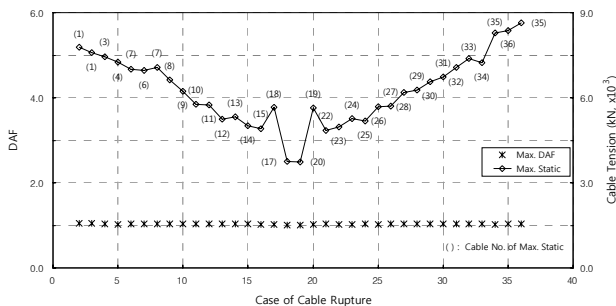
3.2 케이블 파단에 의한 동적영향 분석

3.2.1 케이블 장력에 대한 동적확대계수

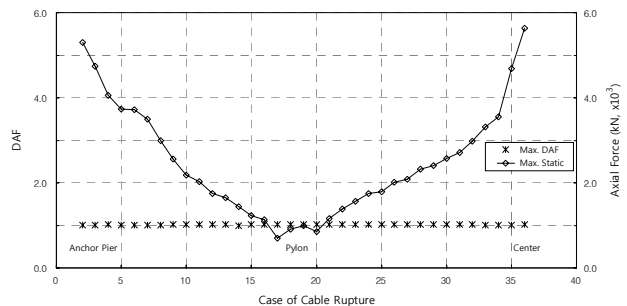
Fig. 4(a)는 파단 케이스별로 파단 후 케이블 장력의 최댓값 및 그에 따른 동적확대계수를 나타낸다.

케이블 장력의 경우, 파단 케이스별로 파단된 케이블의 바로 인접한 케이블에서 파단 후 장력의 최댓값이 발생하며, 동적확대계수는 1.0~1.1 사이의 결과를 보인다.

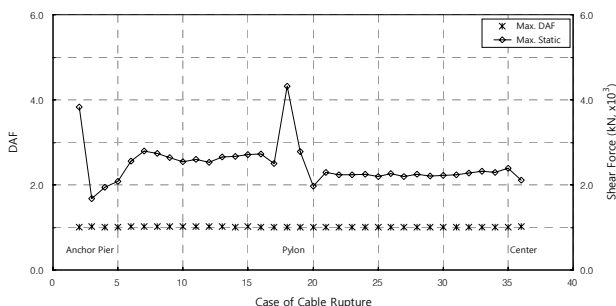
또한, Fig. 4(a)에서 보듯이 36번 케이블이 파단된 경우에 인접한 35번 케이블에서 전체 파단 케이스들 중 최대 장력이 발생하며, 그에 상응하는 동적확대계수를 산정하면 1.029의 값을 나타낸다.



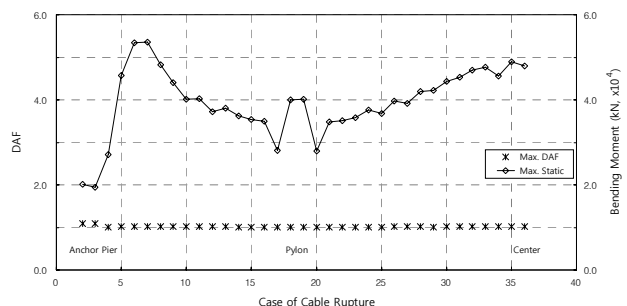
(a) DAFs and maximum cable tensions for the cable ruptures



(b) DAFs and maximum axial forces for the cable ruptures



(c) DAFs and maximum shear forces for the cable ruptures



(d) DAFs and maximum bending moments for the cable ruptures

Fig. 4 DAFs of member forces in the deck and cable tension in the cable of Seohae Grand Bridge in the plane of cable rupture

파단 반대방향의 경우, 파단에 의한 영향은 거의 없는 것으로 나타났다.

3.2.2 보강형 축력에 대한 동적확대계수

Fig. 4(b)는 파단 케이스별로 파단 후 축력의 최댓값 및 그에 따른 동적확대계수를 나타낸다.

축력의 경우, Fig. 4(b)와 같이 파단 케이스별로 파단 후 축력의 최댓값은 케이블이 파단된 위치에서 발생하며, 동적확대계수는 1.0~1.1 사이의 결과를 보인다.

전체 파단 케이스들 중 지점부인 앵커교각에서는 2번 케이블이 파단된 경우에 최대 축력이 발생하며, 경간 중앙부에서는 36번 케이블이 파단된 경우에 발생한다. 그에 따른 동적확대계수는 각각 1.027, 1.015의 값을 보인다.

파단 반대방향 보강형에서는 파단에 의한 영향은 크지 않은 것으로 나타났다.

3.2.3 보강형 전단력에 대한 동적확대계수

파단 케이스별로 파단 후 전단력의 최댓값 및 그에 상응하는 동적확대계수를 Fig. 4(c)에 제시하였다.

전단력의 경우, 케이블 장력의 경우와 마찬가지로 파단 케이스별로 파단 후 전단력의 최댓값은 파단 케이블의 바로 인접한 케이블 위치에서 발생하며, 동적확대계수는 케

이들 장력과 보강형 축력의 경우와 마찬가지로 1.0~1.1 사이의 안정적인 값을 보인다.

전단력에서의 위험단면 위치인 각 지점부에서는 Fig. 4(c)에서 보듯이 2번 케이블과 주탑에 바로 인접한 18번 케이블이 파단된 경우에 최대 전단력이 발생하며, 동적확대계수는 각각 1.010, 1.009의 값을 나타낸다.

또한, 축력의 경우와 마찬가지로 파단 반대방향의 보강형에는 파단에 의한 영향이 미미한 것으로 나타났다.

3.2.4 보강형 모멘트에 대한 동적확대계수

파단 케이스별로 파단 후 모멘트의 최댓값 및 그에 상응하는 동적확대계수를 Fig. 4(d)에 제시하였다.

모멘트의 경우, 축력과 마찬가지로 파단 케이스별로 케이블이 파단된 위치에서 파단 후 모멘트의 최댓값이 발생하며, 동적확대계수는 1.0~1.1 사이의 값을 보인다.

단면 설계 시 검토의 대상이 되는 정모멘트 및 부모멘트 위치에서의 동적확대계수를 산정하면 다음과 같다.

좌측경간 중앙부에서는 7번 케이블이 파단된 경우, 주탑 지점부에서는 19번 케이블이 파단된 경우 그리고 중앙경간 중앙부에서는 35번 케이블이 파단된 경우에 파단 후 최대 정·부모멘트가 발생하며, 그에 상응하는 동적확대계수는 각각 1.027, 1.006 및 1.015의 값을 나타낸다.

또한, 파단 반대방향의 경우도 축력과 전단력의 경우와 마찬가지로 파단에 의한 영향이 미미하였다.

4. 콘크리트사장교 케이블 파단해석

4.1 예제교량 제원 및 해석모델

본 연구에서는 콘크리트사장교의 동적영향을 분석하기 위해 화명대교를 예제교량으로 선택하였다. Fig. 5와 같이 사장교 구간은 길이가 500m인 3경간 프리스트레스

콘크리트 사장교이며, 보강형은 1 Cell PSC 박스 단면으로 되어 있다. 주탑은 1주형으로 높이는 92.400m이고, 주탑과 보강형이 강결 형식으로 되어 있다. 케이블은 72본이 1면 중앙 배치의 Semi-Harp Type으로 정착되어 있다.

강합성사장교의 예제수행과 마찬가지로 범용구조해석 프로그램인 MIDAS Civil 2006을 사용하여 선형 시간이력해석을 수행하였다. 케이블이 대칭으로 1면 배치되어 있기 때문에 총 72개의 케이블 중 1/2인 36개의 케이블을 대상으로 파단에 의한 영향을 분석하였다. 감쇠비는 일반적으로 사용되는 콘크리트사장교의 감쇠비인 5%를 적용하였다.

케이블은 Fig. 5와 같이 파단이 형성되는 좌측경간의 최외측부터 케이블 1~36으로 명명하였다.

4.2 케이블 파단에 의한 동적영향 검토

4.2.1 케이블 장력에 대한 동적확대계수

Fig. 6은 파단 케이스별로 파단 후 케이블 장력의 최댓값 및 그에 따른 동적확대계수를 나타낸다.

케이블 장력의 경우, 케이블 2번과 케이블 36번이 파단된 경우를 제외하고 파단 케이스별로 36번 케이블에서 파단 후 케이블 장력의 최댓값이 발생하며, 동적확대계수는 전체 파단 케이스들에서 설계기준인 2.0 이하의 결과를 보인다.

또한, 전체 파단 케이스들 중 최대 장력은 Fig. 6에서 보듯이 35번 케이블이 파단된 경우에 36번 케이블에서 발생하며, 그에 상응하는 동적확대계수는 1.014의 값을 나타낸다.

4.2.2 보강형 축력에 대한 동적확대계수

파단 케이스별로 파단 후 축력의 최댓값 및 그에 따른 동적확대계수를 Fig. 7에 제시하였다.

축력의 경우, 파단 케이스별로 파단 후 축력의 최댓값

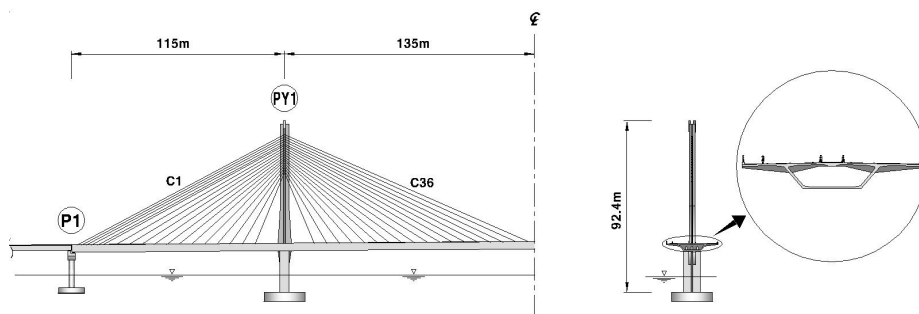


Fig. 5 Structural system of Hwamyung Grand Bridge

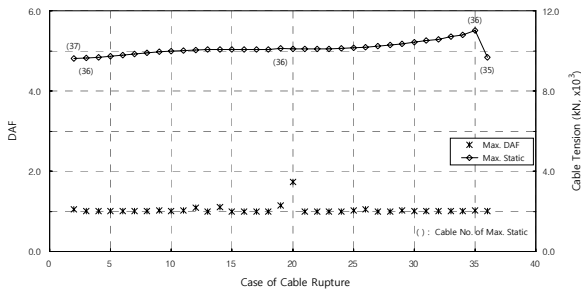


Fig. 6 DAF of cable tension in the cable of Hwamyung Grand Bridge

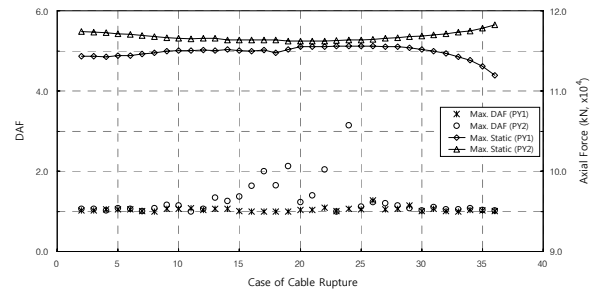
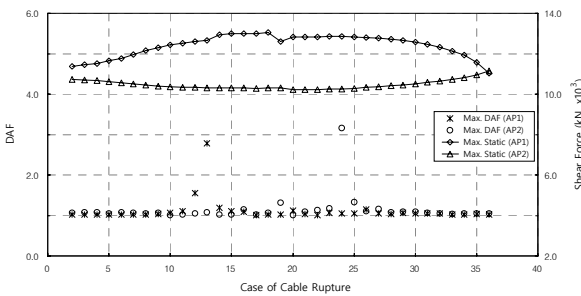
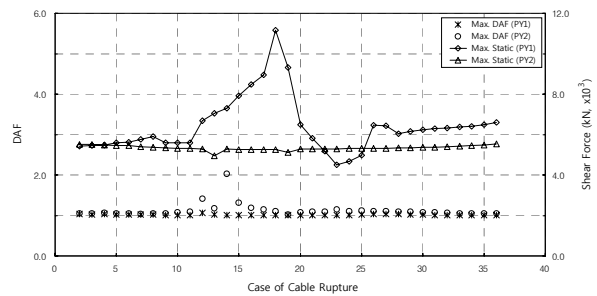


Fig. 7 DAF of axial forces in the deck of Hwamyung Grand Bridge at pylons



(a) DAFs and maximum shear forces for the cable ruptures at anchor piers



(b) DAFs and maximum shear forces for the cable ruptures at pylons

Fig. 8 DAFs of shear forces in the deck of Hwamyung Grand Bridge at supports

은 양쪽 주탑의 지점부에서 발생하며, 동적확대계수는 주탑 1(좌측 주탑)의 경우에 설계기준인 2.0 이하의 값을 만족하지만, 주탑 2(우측 주탑)의 경우에는 2.0 이상의 결과가 나타난다.

전체 파단 케이스들 중 주탑 1과 2에서 발생하는 최대 축력에 대해 동적확대계수를 산정하면 다음과 같다.

주탑 1은 26번 케이블이 파단된 경우, 주탑 2는 36번 케이블이 파단된 경우에 최대 축력이 발생하며, 그에 따른 동적확대계수는 각각 1.060, 1.021의 결과를 보인다.

4.2.3 보강형 전단력에 대한 동적확대계수

전단력에서의 위험 단면 위치한 각 지점부를 앵커교각과 주탑으로 구분해서 파단 케이스별로 파단 후 전단력의 최대값 및 그에 따른 동적확대계수를 각각 Fig. 8(a), (b)에 제시하였다.

전단력의 경우, 주탑 1에서는 동적확대계수가 설계기준인 2.0 이하의 값을 만족하지만, 앵커교각 1(좌측 교각)과 2(우측 교각) 그리고 주탑 2에서는 설계기준인 2.0 이상의 결과가 나타난다.

축력의 경우와 마찬가지로, 전체 파단 케이스들 중 각 지점부에서 발생하는 최대 전단력을 기준으로 동적확대

계수를 산정하면 다음과 같다.

앵커교각 1과 주탑 1에서는 18번 케이블이 파단된 경우에 최대 전단력이 발생하며, 그에 상응하는 동적확대계수는 각각 1.014, 1.002의 결과를 보인다. 앵커교각 2와 주탑 2에서는 36번 케이블이 파단된 경우에 최대 전단력이 발생하며, 그에 따른 동적확대계수는 각각 1.044, 1.055의 상당히 안정적인 결과를 보인다.

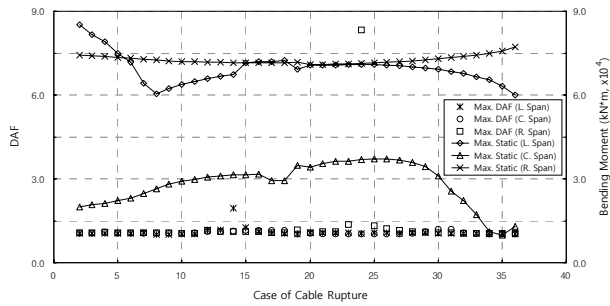
4.2.4 보강형 모멘트에 대한 동적확대계수

정모멘트 및 부모멘트가 발생하는 위치인 경간 중앙부 및 주탑 지점부에서 파단 케이스별로 파단 후 모멘트의 최대값 및 그에 따른 동적확대계수를 각각 Fig. 9(a), (b)에 제시하였다.

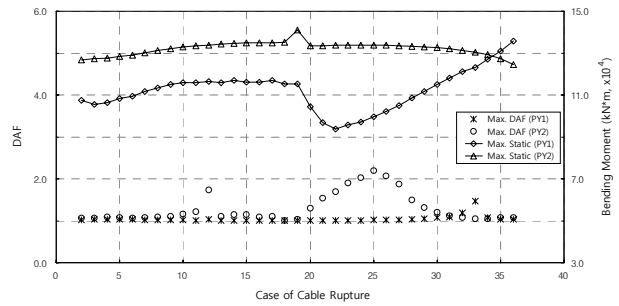
모멘트의 경우, 우측경간 중앙부 및 주탑 2 지점부를 제외한 나머지 위치에서 동적확대계수가 설계기준인 2.0 이하의 값을 만족한다.

전체 파단 케이스들 중 각 경간 중앙부 및 주탑 지점부에서 발생하는 최대 정·부모멘트를 기준으로 동적확대계수를 산정하면 다음과 같다.

경간 중앙부 중, 좌측경간에서는 Backstay 케이블인 2번 케이블이 파단된 경우, 중앙경간에서는 26번 케이블



(a) DAFs and maximum bending moments for the cable ruptures at middle of spans



(b) DAFs and maximum bending moments for the cable ruptures at pylons

Fig. 9 DAFs of bending moments in the deck of Hwamyung Grand Bridge at middle of spans and pylons

이 파단된 경우 그리고 우측경간에서는 36번 케이블이 파단된 경우에 최대 정모멘트가 발생하며, 동적확대계수는 각각 1.040, 1.024 및 1.053의 값을 보인다.

주탑 지점부 중, 주탑 1에서는 36번 케이블이 파단된 경우, 주탑 2에서는 19번 케이블이 파단된 경우에 최대 부모멘트가 발생하며, 동적확대계수는 각각 1.035, 1.031의 값을 나타낸다.

5. 서해대교와 화명대교 비교·분석

강합성사장교인 서해대교와 콘크리트사장교인 화명대교의 보강형 부재력 및 케이블 장력에 대해 계산된 동적확대계수의 범위를 Table 2에 정리하였다.

서해대교에서는 모든 결과에서 1.0~1.1 사이의 안정적인 결과를 보이거나, 화명대교의 경우는 케이블 장력을 제외하고는 위치에 따라서 2.0 이상의 결과가 나타난다.

하지만, Table 2에서 보듯이 화명대교의 경우 파단 전·후 정적응답의 차이가 최대 정적응답의 차이에 비해 1% 이하인 경우에서 동적확대계수가 2.0 이상인 결과가 나타난다. 이는, 파단에 의한 영향이 미미한 구간이라 할 수 있고 이러한 과대평가된 동적확대계수를 제외하면 서해대교에 비해 상승하는 경향은 보이거나 모든 결과에서 설계기준인 2.0 이하의 값을 만족한다.

또한, 단면 설계 시 보강형에서는 검토 대상이 되는 위치에서 파단 후 최대 부재력에 대해, 케이블에서는 파단 후 최대 장력이 발생하는 케이블에 대해 동적확대계수를 평가하면, 서해대교와 화명대교의 모든 결과에서 1.0~1.1 사이의 안정적인 결과를 보인다.

6. 결론

본 연구에서는 강합성사장교를 대상으로 케이블 파단

Table 2 DAF ranges for member forces depending on bridge types

		Seohae Grand Bridge			Hwamyung Grand Bridge			
		DAF range	Case of Max. DAF	$\Delta_{Static} / \Delta_{Max.Static}$ [%]	Locations	DAF range	Case of Max. DAF	$\Delta_{Static} / \Delta_{Max.Static}$ [%]
Deck	Axial Force	1.000 ~ 1.026	Cable 16	23.275	Pylon 1	1.000 ~ 1.269	Cable 26	3.383
					Pylon 2	1.000 ~ 3.151	Cable 24	0.356
	Shear Force	1.000 ~ 1.020	Cable 8	59.219	Anchor Pier 1	1.004 ~ 2.789	Cable 13	0.116
					Pylon 1	1.001 ~ 1.062	Cable 12	7.065
					Pylon 2	1.017 ~ 2.021	Cable 14	0.065
	Bending Moment	1.000 ~ 1.089	Cable 3	12.930	Anchor Pier 2	1.011 ~ 3.162	Cable 23	0.094
					Middle of L. Span	1.011 ~ 1.944	Cable 14	0.190
Pylon 1					1.001 ~ 1.471	Cable 33	1.643	
Middle of C. Span					1.018 ~ 1.204	Cable 30	1.781	
Cable	Cable Tension	1.000 ~ 1.045	Cable 3	68.275	Pylon 2	1.004 ~ 2.198	Cable 25	0.612
					Middle of R. Span	1.041 ~ 8.320	Cable 24	0.021
					Cable	1.000 ~ 1.733	Cable 20	0.452

에 의한 동적영향을 분석하는 해석기법을 검토한 후, 콘크리트사장교에 적용하였다. 파단에 의한 동적영향을 평가하는 설계기준인 동적확대계수를 강합성사장교와 콘크리트사장교에 대해 계산한 후, 이를 비교·분석하여 다음과 같은 결과를 도출하였다.

- (1) 사장교의 구조 형식에 따라 파단 전·후 정적응답의 차이와 파단 후 최대 부재력이 서로 상이한 위치에서 발생한다. 이에, 전체 파단 케이스별로 파단 후 부재력의 최댓값을 기준으로 하는 것이 동적확대계수를 산정하는데 있어서 보다 합리적인 방법이라 판단된다. 또한, 실제 설계상에서 단면 검토 시 고려 대상인 위치에서 파단 후 최대 부재력을 기준으로 동적확대계수를 계산하였다.
- (2) 부재력의 최댓값을 기준으로 동적확대계수를 산정하면, 서해대교의 경우에는 모든 결과에서 1.0~1.1 사이의 안정적인 결과를 보였으나 화명대교의 경우에는 설계기준인 2.0 이상인 결과가 나타난다. 하지만 화명대교의 경우, 파단에 의한 영향이 미미한 구간에서의 과대평가된 동적확대계수를 제거하면 서해대교에 비해 상승하는 경향은 보이나 설계기준인 2.0 이하의 값을 만족한다.
- (3) 실제 설계 시 검토 대상이 되는 위치에서 파단 후 최대 부재력에 대해 동적확대계수를 산정하면 서해대교와 화명대교의 모든 결과에서 1.0~1.1 사이의 안정된 값을 보였다.
- (4) 본 연구에서는 서해대교를 대상으로 설계기준인 2.0 이하의 값을 만족시키기 위해서 시간이력함수에서의 시간 간격을 5초로 설정하였으나, 향후에 이와 관련된 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.
- (5) 본 연구에서는 선형해석기법의 결과만을 정리하였

지만, 일반적으로 비선형해석을 통해 동적확대계수가 다소 작아지는 경향을 보이고 있다. 그러나 완성계 사장교의 케이블 파단으로 인한 교량의 거동을 비선형해석으로 검토해야 하는 경우는 동적 거동이 아주 커지는 경우에 한정될 것이기 때문에 본 연구와 같이 하나의 케이블이 파단되는 경우에는 고려될 필요가 없다고 판단된다.

감사의 글

본 연구는 건설기술혁신사업 초장대교량 사업단의 연구비지원(O8기술혁신E01)과 인하대학교의 지원에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

1. 김광수, 조의경, 이천수, 전홍건, 이만섭, “프리스트레스드 콘크리트 사장교(화명대교)의 설계”, 콘크리트학회지 기술기사, 제19권 5호, 2007, pp.58-61.
2. 남효승, 이완수, “장대사장교 케이블 교체 및 파단에 의한 영향 분석”, 대한토목학회 정기학술대회, 2004.
3. 대한토목학회, “케이블 강교량 설계지침”, 2006.
4. 박용석, “사장교 케이블 파단 영향 검토를 위한 동적 확대 계수에 관한 연구”, 공학석사학위논문, 서울대학교, 2007.
5. PTI, “Recommendations for Stay Cable Design”, Testing and Installation, Phoenix, AZ, 2001, pp.55-56.
6. Ruiz-Teran, A. M., Aparicio, A. C., “Dynamic amplification factors in cable-stayed structures”, Journal of Sound and Vibration, vol. 300, 2007, pp.197-216.
7. SETRA, “CIP recommendations on cable stays”, 2002, pp.176-177.

(접수일자 : 2012년 1월 5일)

(수정일자 : 2012년 3월 28일)

(심사완료일자 : 2012년 4월 3일)

요 지

본 연구는 케이블 파단이 콘크리트사장교의 동적거동에 미치는 영향을 강합성사장교에 대한 것과 비교하여 검토하는데 그 목적이 있다. 이를 위해, 강합성사장교를 대상으로 시간이력함수를 이용한 케이블 파단을 모사하는 적합한 해석기법을 검토하고, 동적확대계수를 평가하였다. 콘크리트사장교에서 계산된 동적확대계수를 설계기준을 기반으로 강합성사장교에 대한 것과 비교·검토하였다. 그 결과, 동적확대계수에 대한 현행 설계기준이 전반적으로 신뢰할 수 있는 것으로 판단되며 콘크리트사장교의 경우 동적확대계수 값이 강합성사장교에 비해 상대적으로 상승되는 경향을 보이나 설계기준을 만족한다.

핵심 용어 : 케이블 파단, 콘크리트사장교, 설계기준, 동적확대계수