

장대 아치교 행어 파단에 의한 동적 해석

Dynamic Analysis of Long-span Arch Bridge by Fracturing Hangers

임 성 순^{1)*} 공 민 식²⁾ 유 이 슬³⁾
Yhim, Sung Soon Kong, Min Sik Yoo, Yi Seul

Abstract

Recently, various evaluations concerning structural stability under construction step and completely constructed step have been executed during a Long-span Arch Bridge designing procedure. However, the breakage of cable-hangers of arched bridge in unexpected accident or periodic cable-replacement has not been considered. Therefore, the purpose of this study is that analyzing structural safety of arched bridge when the cable-hangers being fractured by that reasons. Dynamic analysis are performed by idealizing impact load to three types of impact functions as fracturing the cables. Consequently, when the hangers are fractured, the maximum tensile force by dynamic analysis is larger than those by static analysis. Therefore, the dynamic analysis is demanded to accurately obtain the responses for the structural stability with a realistic impact loading model in the breakage and replacement of cable hangers of long-span arched bridge. Moreover, the analysis method and results in this study can be used to basic criteria in design.

Keywords : Long-span Arch Bridge, Hanger Fracture, Structural Stability, Impact Load

1. 서론

장대 아치교는 중량을 최소화하기 위하여 중량에 비해 큰 인장강도를 갖는 케이블 부재를 사용하고 있다. 케이블 부재는 큰 인장강도를 갖고 있으나 부재의 수직방향으로 재하 되는 하중에 대하여 대변위를 발생시키는 기하학적 비선형 특성이 있다. 케이블 부재를 사용하고 있는 장대 아치교의 설계 시 시공단계와 완성단계에서 발생할 수 있는 구조안전성 문제를 검토하고 있으나 케이블 부재의 손실에 대한 구조안전성 평가는 매우 미흡한 실정이다. 따라서 노후 된 케이블 행어 교체나 케이블과 차량의 충돌로 인한 케이블 행어 파단 시 장대 아치교의 응답을 분석하여 극한상황에서도 안전성을 확보할 수 있도록 동적 특성이 고려된 연구가 필요하다.

아치교에 대한 동적 특성 연구는 국외에서 Thakkar (1973)와 Dusseau(1982)가 상로식 아치교에 대하여 2차원 응답스펙트럼 해석을 수행하여 아치 구조물에 대한 안전성과 동적 특성을 파악하였다. 또한 국내에서는 황대원(1986)이 차량 주행속도 변화에 따른 아치교의 동적 응답을 비교하여 동적 특성을 연구하였다.

본 연구는 행어 파단 시 장대 아치교의 구조안전성을 분석하였다. 이를 위해 행어 파단에 따른 하중을 충격함수로 이상화하여 동적 해석을 수행하였다. 또한 기하학적 비선형성을 고려한 정적 해석을 통하여 행어가 제거된 구조물에 대하여 행어 파단에 따른 부재력의 재분배를 분석하였다.

2. 해석 이론

2.1 충격하중에 의한 동적 응답

Fig. 1과 같이 시간에 따라 변하는 하중 $F(\tau)$ 가 미소 시간 $d\tau$ 동안 질량 m 에 가해진다면 뉴턴의 운동법칙으로부터 식(1)과 같은 운동량 방정식을 얻을 수 있다. 여기서, $F(\tau)d\tau$ 는 충격량을 의미하며 dv 는 증분 된 속도를 의미하며 시간 τ 에서 질량 m 의 초기속도로 간주할 수 있다. 비감쇠 단자유도계에서 시간에 따른 질량 m 의 처짐 $y(t)$ 는 식(2)와 같이 나타낼 수 있으며 y_0 는 초기 변위, v_0 는 초기속도를 의미하며 ω 는 고유진동수, T 는 고유주기를 의미한다.

1) 정회원, 서울시립대학교 토목공학과 교수
2) 정회원, (주)다산건설컨트 구조부 과장, 공학박사
3) 학생회원, 서울시립대학교 토목공학과 석사과정

* Corresponding author : yhimss@uos.ac.kr 02-2210-2535

• 본 논문에 대한 토의를 2010년 4월 30일까지 학회로 보내주시면 2010년 7월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

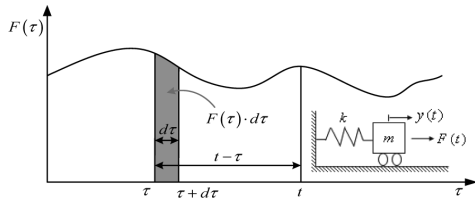


Fig. 1 Impulsive load

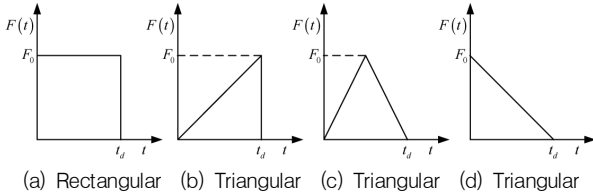


Fig. 2 Distribution of impulsive load model

$$mdv = F(\tau)d\tau \quad (1)$$

$$y(t) = y_0 \cos \omega t + \frac{v_0}{\omega} \sin \omega t, \quad \omega = \sqrt{\frac{k}{m}} = \frac{2\pi}{T} \quad (2)$$

식(2)에서 초기변위 $y_0 = 0$, 초기속도 $v_0 = dv$ 를 적용하고 0에서 t 까지 적분하면 시간 t 에서 하중 $F(\tau)$ 에 의한 처짐 $y(t)$ 를 식(3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$y(t) = \frac{1}{m\omega} \int_0^t F(\tau) \sin \omega(t-\tau) d\tau \quad (3)$$

식(3)과 같은 적분을 Duhamel적분이라고 하며 초기변위와 초기속도를 도입하면 비감쇠 단자유도계의 전체 변위를 식(4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$y(t) = y_0 \cos \omega t + \frac{v_0}{\omega} \sin \omega t + \frac{1}{m\omega} \int_0^t F(\tau) \sin \omega(t-\tau) d\tau \quad (4)$$

일반적으로 충격하중은 Fig. 2에 나타난 하중과 같이 시간에 따른 함수로 표현할 수 있으며 하중이 가해지는 시간 t_d 에 따라 충격량이 다르기 때문에 동적 응답의 차이가 발생한다. 따라서 각 하중이 가해지는 시간 t_d 에 따른 동적 응답을 다음과 같이 산정하였다.

먼저 Fig. 2(a)의 사각형분포를 나타내는 하중에 대한 동적 응답을 산정하기 위해 구간 $\tau \leq t_d$ 와 $\tau > t_d$ 로 구분하였다. 구간 $\tau \leq t_d$ 에서 $F(\tau)$ 는 식(5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$F(\tau) = F_0 \quad (5)$$

초기응답이 없는 것으로 가정하고 식(4)를 정리하면 식

(6)과 같이 정적 응답에 대한 동적 응답을 얻을 수 있다.

$$y(t) = \frac{F_0}{k} (1 - \cos \omega t) = y_{st} (1 - \cos \omega t) \quad (6)$$

따라서 시간 t_d 에서의 처짐 y_d 과 속도 v_d 는 식(7)과 나타낼 수 있다.

$$y_d = \frac{F_0}{k} (1 - \cos \omega t_d), \quad v_d = \frac{F_0}{k} \omega \sin \omega t_d \quad (7)$$

구간 $t > t_d$ 에서는 $F(\tau) = 0$ 인 자유진동구간으로서 식(2)를 적용할 수 있다. 여기서 초기변위 $y_0 = y_d$, 초기속도 $v_0 = v_d$, 시간 $t = t - t_d$ 를 적용하면 식(8)과 같이 동적 응답을 얻을 수 있다.

$$y(t) = \frac{F_0}{k} (1 - \cos \omega t_d) \cos \omega(t - t_d) + \frac{F_0}{k} \sin \omega t_d \sin \omega(t - t_d) \quad (8a)$$

$$y(t) = \frac{F_0}{k} \{ \cos \omega(t - t_d) - \cos \omega t \} = y_{st} \{ \cos \omega(t - t_d) - \cos \omega t \} \quad (8b)$$

그러므로 정적 응답에 대한 동적 응답의 비율인 동적 하중계수(DLF, Dynamic Load Factor)는 식(9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$DLF = 1 - \cos \omega t = 1 - \cos 2\pi \frac{t}{T}, \quad t \leq t_d \quad (9b)$$

$$DLF = \cos \omega(t - t_d) - \cos \omega t = \cos 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{t_d}{T} \right) - \cos 2\pi \frac{t}{T}, \quad t \geq t_d \quad (9b)$$

위와 같은 방법으로 Fig. 2(b)의 직각삼각형 하중에 대한 동적 하중계수를 나타내면 식(10)와 같다. Fig. 2(c)의 삼각형 하중에 대한 동적 하중계수는 식(11), Fig. 2(d)의 삼각형 하중에 대한 동적 하중계수는 식(12)과 같이 나타낼 수 있으며 식(10)~(12)에서 t_d 에 따른 최대 동적 하중계수는 Fig. 3과 같다.

$$DLF = \frac{t}{t_d} - \frac{T}{2\pi t_d} \sin 2\pi \frac{t}{T}, \quad t \leq t_d \quad (10a)$$

$$DLF = \cos 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{t_d}{T} \right) + \frac{T}{2\pi t_d} \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{t_d}{T} \right) - \frac{T}{2\pi t_d} \sin 2\pi \frac{t}{T}, \quad t \geq t_d \quad (10b)$$

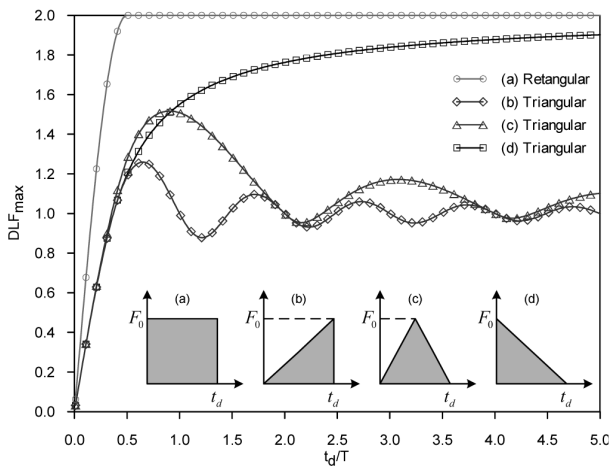


Fig. 3 Distribution of dynamic load factors

$$DLF = 2 \left(\frac{t}{t_d} - \frac{T}{2\pi t_d} \sin 2\pi \frac{t}{T} \right), t \leq t_d/2 \quad (11a)$$

$$DLF = 2 \left[1 - \frac{t}{t_d} + \frac{T}{2\pi t_d} \left\{ 2 \sin \frac{2\pi}{T} \left(t - \frac{t_d}{2} \right) \right. \right. \\ \left. \left. - \sin 2\pi \frac{t}{T} \right\} \right] \quad (11b)$$

$$t_d/2 \leq t \leq t_d$$

$$DLF = 2 \left[\frac{T}{2\pi t_d} \left\{ 2 \sin \frac{2\pi}{T} \left(t - \frac{t_d}{2} \right) - \sin \frac{2\pi}{T} \right. \right. \\ \left. \left. (t - t_d) - \sin 2\pi \frac{t}{T} \right\} \right] \quad (11c)$$

$$t \geq t_d$$

$$DLF = 1 - \cos 2\pi \frac{t}{T} + \frac{\sin(2\pi t/T)}{2\pi t_d/T} \\ - \frac{t}{t_d}, t \leq t_d \quad (12a)$$

$$DLF = \frac{1}{2\pi t_d/T} \left\{ \sin \frac{2\pi t}{T} - \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{t_d}{T} \right) \right\} \\ - \cos 2\pi \frac{t}{T}, t_d/2 \geq t_d \quad (12b)$$

Fig. 3에 의하면 작용하는 하중이 (a)의 사각형함수와 (d)의 삼각형함수의 형태일 경우 t_d 가 증가할수록 2에 수렴하는 것을 알 수 있다. 특히 사각형 함수일 경우 t_d/T 가 0.5에서부터 2로 동일한 것을 볼 수 있다. 또한 (b)와 (c)의 삼각형함수의 형태는 t_d 가 증가할수록 1에 수렴하고 있으나 최대 DLF는 각각 약 1.5와 1.3정도인 것을 볼 수 있다. 따라서 이상화된 충격하중의 종류와 하중 작용시간 t_d 에 따라 동적 응답이 다르게 나타나는 것을 알 수 있다.

3. 수치 예제 및 결과

3.1 해석 모델 및 고유치해석

본 연구의 해석모델은 Fig. 4와 같이 주경간이 180m이고 측경간이 71.5m인 중로 아치교로서 한 면에 13개의 케이블 행어가 아치 리브와 보강 거더를 연결하고 있는 구조물이다. 총 26개의 케이블 행어는 좌우대칭, 전후대칭으로 배치되어 있으며 케이블 파단에 의한 단면응력 변화가 크도록 한 면의 케이블 파단을 고려하였다. 각 케이블 행어는 Fig. 4와 같이 일련번호 H1~H13으로 나타내었고 구조물의 대칭성을 고려하여 케이블 행어 H1~H7의 파단만을 고려하였다.

본 연구는 아치교의 동적 특성을 파악하기 위해 구조물 고유의 특성을 확인하기 위해 고유치 해석을 수행하였다. 그 결과 Fig. 5와 같이 1차 진동모드는 아치리브 수평

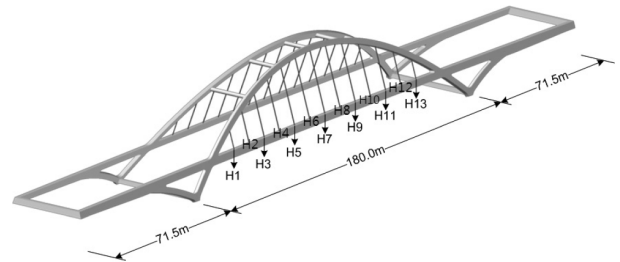


Fig. 4 Arch bridge model

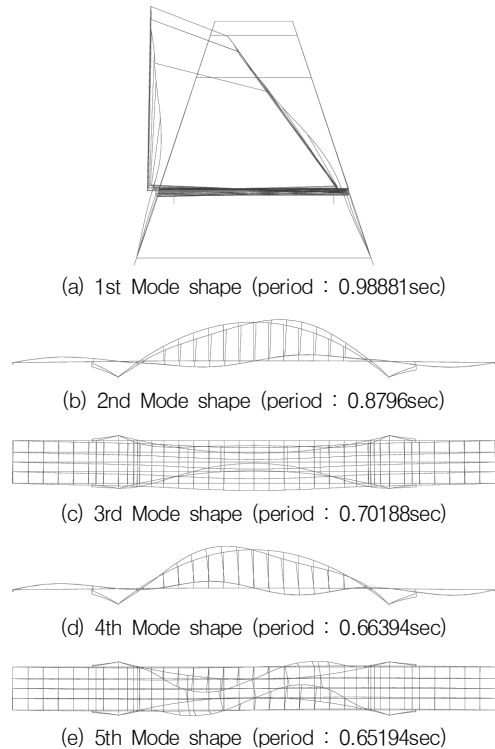


Fig. 5 Mode shapes

진동모드, 2차 진동모드는 비대칭 수직진동모드를 나타내었다.

고유치 해석을 바탕으로 행어파단에 의한 구조물의 거동을 살펴보기 위해 Fig. 6과 같이 먼저 파단된 행어를 제거한 구조물의 정적 비선형 해석을 수행하였다. 이후 행어에 작용하고 있는 장력을 반대로 구조물에 집중하중을 압축력으로 작용시켰다. 구조물에 추가적으로 작용하는 집중하중 P 는 정적하중, 사각형 동적하중, 직각삼각형 동적하중과 삼각형 동적하중으로 각각 구분하여 작용시켰으며 그 결과를 비교·분석하였다.

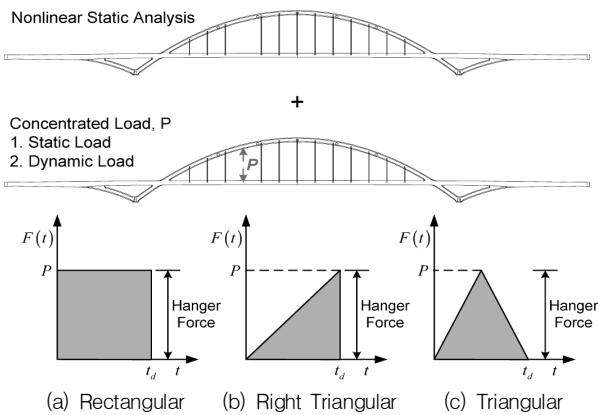


Fig. 6 Dynamic load models when a hanger is broken

앞 절에서 언급한 것과 같이 동적 응답은 하중의 종류뿐만 아니라 작용 시간 t_d 에 의해서도 다르게 나타난다. 따라서 본 연구는 Fig. 6을 참고하여 구조물의 1차진동모드 주기를 하중 작용 시간 t_d 로 적용하였다. 또한 전체 행어 장력은 정적 비선형 해석에 의해 발생하는 장력과 행어 파단에 따른 추가적인 집중하중 P 에 의한 장력을 합하여 산정하였다.

3.2 동적응답

3.2.1 케이블 행어 1개소 파단에 의한 동적응답

케이블 행어 1개소 파단에 따른 행어의 장력은 Table 1~4와 같다. Table 1은 추가적인 집중하중 P 를 정적 하중으로 고려한 해석 결과를 나타낸 것이며 Table 2~4는 추가적인 집중하중 P 를 동적 하중으로 고려한 해석 결과를 나타낸 것이다. Table 1~4에 Bold체로 표시한 수치는 최대 행어 장력을 의미하며 Fig. 7에 나타내었다. Table 1~4와 Fig. 7에 의하면 각 행어의 최대 장력은 인접 행어가 파단된 경우에 발생하는 것을 볼 수 있으며 파단된 행어와 멀어질수록 행어 장력이 감소하는 것을 알 수 있다. 즉 행어의 파단으로 인한 하중의 재분배는 인접한 행어에 가장 크게 영향을 미치는 것으로 판단된다. 추가적인 집중하중 P 에 의해 최대 행어 장력은 행어 H3이

Table 1 Tensile force by static load P when a hanger is broken

| | | H1 [kN] | H2[kN] | H3 [kN] | H4 [kN] | H5 [kN] | H6 [kN] | H7 [kN] |
|--------|------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| No Cut | | 667.288 | 946.732 | 863.239 | 849.291 | 840.756 | 851.142 | 848.338 |
| H1 Cut | Nonlinear | - | 1149.472 | 909.944 | 847.052 | 832.863 | 846.636 | 846.648 |
| | Additional | - | 202.744 | 46.698 | -2.241 | -7.892 | -4.506 | -1.690 |
| | Total | - | 1352.216 | 956.642 | 844.811 | 824.971 | 842.129 | 844.958 |
| H2 Cut | Nonlinear | 1051.234 | - | 1240.138 | 935.730 | 833.940 | 832.585 | 837.235 |
| | Additional | 383.973 | - | 376.905 | 86.416 | -6.822 | -18.554 | -11.101 |
| | Total | 1435.207 | - | 1617.044 | 1022.146 | 827.117 | 814.031 | 826.134 |
| H3 Cut | Nonlinear | 765.958 | 1366.934 | - | 1186.288 | 927.876 | 847.077 | 830.440 |
| | Additional | 98.688 | 420.223 | - | 337.010 | 87.101 | -4.071 | -17.895 |
| | Total | 864.645 | 1787.156 | - | 1523.298 | 1014.976 | 843.006 | 812.545 |
| H4 Cut | Nonlinear | 661.840 | 1055.987 | 1245.551 | - | 1179.928 | 945.277 | 847.302 |
| | Additional | -5.440 | 109.264 | 382.331 | - | 339.186 | 94.114 | -1.039 |
| | Total | 656.400 | 1165.252 | 1627.882 | - | 1519.115 | 1039.391 | 846.263 |
| H5 Cut | Nonlinear | 646.741 | 937.207 | 969.273 | 1213.465 | - | 1189.476 | 948.913 |
| | Additional | -20.545 | -9.515 | 106.038 | 364.192 | - | 338.346 | 100.562 |
| | Total | 626.196 | 927.691 | 1075.311 | 1577.657 | - | 1527.822 | 1049.475 |
| H6 Cut | Nonlinear | 654.609 | 919.529 | 857.770 | 956.619 | 1200.294 | - | 1194.650 |
| | Additional | -12.682 | -27.201 | -5.463 | 107.325 | 359.560 | - | 346.327 |
| | Total | 641.927 | 892.328 | 852.307 | 1063.944 | 1559.854 | - | 1540.977 |
| H7 Cut | Nonlinear | 662.225 | 930.101 | 839.641 | 847.947 | 948.377 | 1199.983 | - |
| | Additional | -5.069 | -16.636 | -23.593 | -1.337 | 107.619 | 348.854 | - |
| | Total | 657.156 | 913.465 | 816.048 | 846.611 | 1055.996 | 1548.837 | - |

Table 2 Tensile force by rectangular dynamic load P when a hanger is broken

| | | H1 [kN] | H2[kN] | H3[kN] | H4 [kN] | H5 [kN] | H6 [kN] | H7 [kN] |
|--------|------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| No Cut | | 667.288 | 946.732 | 863.239 | 849.291 | 840.756 | 851.142 | 848.338 |
| H1 Cut | Nonlinear | – | 1149.472 | 909.944 | 847.052 | 832.863 | 846.636 | 846.648 |
| | Additional | – | 334.438 | 113.460 | 31.732 | 33.377 | 30.501 | 25.804 |
| | Total | – | 1483.910 | 1023.404 | 878.784 | 866.240 | 877.136 | 872.452 |
| H2 Cut | Nonlinear | 1051.234 | – | 1240.138 | 935.730 | 833.940 | 832.585 | 837.235 |
| | Additional | 596.357 | – | 617.810 | 175.933 | 44.383 | 58.246 | 59.382 |
| | Total | 1647.591 | – | 1857.948 | 1111.663 | 878.323 | 890.831 | 896.618 |
| H3 Cut | Nonlinear | 765.958 | 1366.934 | – | 1186.288 | 927.876 | 847.077 | 830.440 |
| | Additional | 214.866 | 671.289 | – | 503.229 | 145.689 | 35.343 | 52.224 |
| | Total | 980.824 | 2038.223 | – | 1689.517 | 1073.564 | 882.420 | 882.664 |
| H4 Cut | Nonlinear | 661.840 | 1055.987 | 1245.551 | – | 1179.928 | 945.277 | 847.302 |
| | Additional | 59.563 | 218.551 | 567.858 | – | 510.735 | 157.471 | 39.004 |
| | Total | 721.403 | 1274.539 | 1813.409 | – | 1690.664 | 1102.748 | 886.306 |
| H5 Cut | Nonlinear | 646.741 | 937.207 | 969.273 | 1213.465 | – | 1189.476 | 948.913 |
| | Additional | 70.633 | 61.301 | 174.970 | 543.297 | – | 502.011 | 161.000 |
| | Total | 717.374 | 998.507 | 1144.242 | 1756.762 | – | 1691.488 | 1109.914 |
| H6 Cut | Nonlinear | 654.609 | 919.529 | 857.770 | 956.619 | 1200.294 | – | 1194.650 |
| | Additional | 72.711 | 85.045 | 45.142 | 177.445 | 530.056 | – | 509.719 |
| | Total | 727.320 | 1004.574 | 902.912 | 1134.064 | 1730.350 | – | 1704.368 |
| H7 Cut | Nonlinear | 662.225 | 930.101 | 839.641 | 847.947 | 948.377 | 1199.983 | – |
| | Additional | 57.683 | 85.024 | 61.684 | 44.080 | 171.390 | 512.726 | – |
| | Total | 719.908 | 1015.125 | 901.325 | 892.028 | 1119.767 | 1712.708 | – |

Table 3 Tensile force by right triangle dynamic load P when a hanger is broken

| | | H1 [kN] | H2[kN] | H3[kN] | H4 [kN] | H5 [kN] | H6 [kN] | H7 [kN] |
|--------|------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| No Cut | | 667.288 | 946.732 | 863.239 | 849.291 | 840.756 | 851.142 | 848.338 |
| H1 Cut | Nonlinear | – | 1149.472 | 909.944 | 847.052 | 832.863 | 846.636 | 846.648 |
| | Additional | – | 202.203 | 53.273 | 33.099 | 34.757 | 32.312 | 25.440 |
| | Total | – | 1351.675 | 963.217 | 880.151 | 867.620 | 878.948 | 872.088 |
| H2 Cut | Nonlinear | 1051.234 | – | 1240.138 | 935.730 | 833.940 | 832.585 | 837.235 |
| | Additional | 383.406 | – | 376.613 | 95.842 | 51.392 | 63.076 | 66.533 |
| | Total | 1434.640 | – | 1616.752 | 1031.572 | 885.332 | 895.661 | 903.768 |
| H3 Cut | Nonlinear | 765.958 | 1366.934 | – | 1186.288 | 927.876 | 847.077 | 830.440 |
| | Additional | 111.010 | 420.049 | – | 336.934 | 93.311 | 41.416 | 57.837 |
| | Total | 876.967 | 1786.983 | – | 1523.222 | 1021.187 | 888.493 | 888.277 |
| H4 Cut | Nonlinear | 661.840 | 1055.987 | 1245.551 | – | 1179.928 | 945.277 | 847.302 |
| | Additional | 67.688 | 121.353 | 382.087 | – | 338.873 | 102.241 | 44.902 |
| | Total | 729.528 | 1177.341 | 1627.637 | – | 1518.801 | 1047.518 | 892.205 |
| H5 Cut | Nonlinear | 646.741 | 937.207 | 969.273 | 1213.465 | – | 1189.476 | 948.913 |
| | Additional | 74.899 | 68.844 | 113.423 | 363.727 | – | 337.883 | 106.167 |
| | Total | 721.640 | 1006.050 | 1082.696 | 1577.192 | – | 1527.360 | 1055.080 |
| H6 Cut | Nonlinear | 654.609 | 919.529 | 857.770 | 956.619 | 1200.294 | – | 1194.650 |
| | Additional | 75.032 | 88.073 | 53.434 | 116.526 | 358.783 | – | 345.495 |
| | Total | 729.641 | 1007.602 | 911.204 | 1073.145 | 1559.078 | – | 1540.144 |
| H7 Cut | Nonlinear | 662.225 | 930.101 | 839.641 | 847.947 | 948.377 | 1199.983 | – |
| | Additional | 61.957 | 94.292 | 73.016 | 51.052 | 113.507 | 347.802 | – |
| | Total | 724.181 | 1024.393 | 912.657 | 899.000 | 1061.884 | 1547.785 | – |

Table 4 Tensile force by triangular dynamic load P when a hanger is broken

| | | H1 [kN] | H2 [kN] | H3 [kN] | H4 [kN] | H5 [kN] | H6 [kN] | H7 [kN] |
|--------|------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| No Cut | | 667.288 | 946.732 | 863.239 | 849.291 | 840.756 | 851.142 | 848.338 |
| H1 Cut | Nonlinear | - | 1149.472 | 909.944 | 847.052 | 832.863 | 846.636 | 846.648 |
| | Additional | - | 207.044 | 49.684 | 1.623 | 1.278 | 1.137 | 2.544 |
| | Total | - | 1356.516 | 959.628 | 848.675 | 834.142 | 847.773 | 849.192 |
| H2 Cut | Nonlinear | 1051.234 | - | 1240.138 | 935.730 | 833.940 | 832.585 | 837.235 |
| | Additional | 392.832 | - | 385.633 | 90.756 | 2.837 | 2.942 | 3.048 |
| | Total | 1444.066 | - | 1625.771 | 1026.486 | 836.777 | 835.527 | 840.284 |
| H3 Cut | Nonlinear | 765.958 | 1366.934 | - | 1186.288 | 927.876 | 847.077 | 830.440 |
| | Additional | 104.756 | 430.666 | - | 345.072 | 91.101 | 4.035 | 3.037 |
| | Total | 870.714 | 1797.600 | - | 1531.360 | 1018.977 | 851.112 | 833.477 |
| H4 Cut | Nonlinear | 661.840 | 1055.987 | 1245.551 | - | 1179.928 | 945.277 | 847.302 |
| | Additional | 2.385 | 115.222 | 391.125 | - | 347.382 | 99.328 | 6.931 |
| | Total | 664.225 | 1171.210 | 1636.676 | - | 1527.310 | 1044.605 | 854.233 |
| H5 Cut | Nonlinear | 646.741 | 937.207 | 969.273 | 1213.465 | - | 1189.476 | 948.913 |
| | Additional | 3.112 | 4.147 | 110.555 | 372.300 | - | 346.085 | 106.252 |
| | Total | 649.853 | 941.353 | 1079.828 | 1585.766 | - | 1535.561 | 1055.165 |
| H6 Cut | Nonlinear | 654.609 | 919.529 | 857.770 | 956.619 | 1200.294 | - | 1194.650 |
| | Additional | 2.333 | 3.923 | 4.806 | 112.700 | 366.595 | - | 353.522 |
| | Total | 656.942 | 923.452 | 862.576 | 1069.319 | 1566.889 | - | 1548.172 |
| H7 Cut | Nonlinear | 662.225 | 930.101 | 839.641 | 847.947 | 948.377 | 1199.983 | - |
| | Additional | 4.689 | 3.480 | 3.180 | 7.550 | 112.911 | 355.503 | - |
| | Total | 666.914 | 933.581 | 842.821 | 855.497 | 1061.288 | 1555.486 | - |

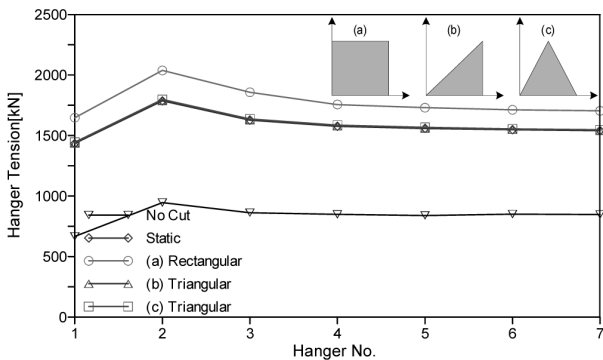


Fig. 7 Maximum tensile force when a hanger is broken

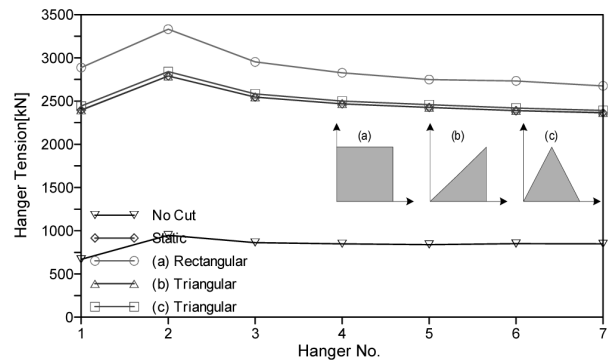


Fig. 8 Maximum tensile force when 2 hangers are broken

파단 된 모델의 행어 H2에서 발생하였다. 이는 해석대상 구조물의 1차 수직진동모드가 비대칭 모드이므로 구조물의 중앙의 행어보다 1/4지점에 설치된 행어가 구조물의 수직거동에 영향을 크게 미치기 때문이다.

행어 1개소 파단 시 행어 H2의 최대 장력은 집중하중 P 를 사각형 동적 하중으로 재하 시 나타났으며 정적 하중의 결과보다 약 1.6배정도 크게 발생한 것을 알 수 있다. 또한 전체 행어 장력은 파단 된 행어를 제거한 구조물의 장력을 합하여 정적 하중의 경우 1787kN, 사각형 동적 하중의 경우 2038kN으로 약 1.15배, 파단 전 행어 장력 946kN의 약 2.15배 정도 크게 나타났다. 케이블 행어를 사용한 장대 아치교 해석 시 장력증가에 가장 큰 영향을 미치는 사각형 동적 하중을 고려한 해석이 구조안전성

을 가장 많이 확보할 수 있을 것으로 판단된다.

3.2.2 케이블 행어 2개소 파단에 의한 동적응답

케이블 행어 1개소 파단에 의한 동적응답에서와 같이 추가적인 집중하중 P 를 정적 하중과 동적하중으로 고려하여 해석한 결과 케이블 행어 2개소 파단에 따른 행어의 최대 장력은 Fig. 8과 같다. 이때 H1~H2, H2~H3의 순으로 행어를 파단 시켜 행어의 장력을 산정하였다.

행어 1개소 파단 된 구조물과 유사한 경향으로 각 행어의 최대 장력은 인접 행어가 파단 된 경우에 발생하는 것을 볼 수 있으며 행어와 멀어질수록 행어 장력이 감소하는 것을 알 수 있다. 추가적인 집중하중 P 에 의해 최대 행어의 장력은 행어 H3~H4가 파단 된 모델의 행어 H2

Table 5 Tensile force of the second hanger when two hangers are broken

| | | H2 [kN] |
|-----------------|------------|----------|
| No Cut | | 946.732 |
| Static | Nonlinear | 1868.273 |
| | Additional | 921.437 |
| | Total | 2789.710 |
| Rectangular (a) | Nonlinear | 1868.273 |
| | Additional | 1462.898 |
| | Total | 3331.171 |
| Triangular (b) | Nonlinear | 1868.273 |
| | Additional | 920.339 |
| | Total | 2788.611 |
| Triangular (c) | Nonlinear | 1868.273 |
| | Additional | 971.964 |
| | Total | 2840.237 |

에서 발생하였다. 이는 해석대상 구조물의 1차 수직진동 모드가 비대칭 모드이므로 구조물의 중앙의 행어보다 1/4지점에 설치된 행어가 구조물의 수직거동에 영향을 크게 미치기 때문이다.

Table 5와 같이 행어 2개소 파단 시 행어 H2의 최대 장력은 집중하중 P 를 사각형 동적 하중으로 재하 시 나타났으며 정적 하중의 결과보다 약 1.6배정도 크게 발생한 것을 알 수 있다. 또한 전체 행어 장력은 파단된 행어를 제거한 구조물의 장력 1868kN을 합하여 정적 하중의 경우 2789kN, 사각형 동적 하중의 경우 3331kN으로 1.2배, 파단 전 행어 장력 946kN의 3.5배, 행어 1개소 파단 시 최대 행어 장력 2038kN의 1.6배 정도 크게 나타났다. 이와 같은 결과는 케이블 행어 1개소 파단에 의한 동적응답에서와 같은 경향을 보여주고 있다.

3.2.3 케이블 행어 3개소 파단에 의한 동적응답

케이블 행어 1개소 및 2개소 파단에 의한 동적응답에서와 같이 추가적인 집중하중 P 를 정적 하중과 동적 하중으로 고려하여 해석한 결과 케이블 행어 2개소 파단에 따른 행어의 최대 장력은 Fig. 9와 같다. 이때 H1~H3, H2~H4의 순으로 행어를 파단 시켜 행어의 장력을 산정하였다.

행어 1개소 및 2개소 파단된 구조물과 유사한 경향으로 각 행어의 최대 장력은 인접 행어가 파단된 경우에 발생하는 것을 볼 수 있으며 행어와 멀어질수록 행어 장력이 감소하는 것을 알 수 있다. 추가적인 집중하중 P 에 의해 최대 행어의 장력은 행어 H3~H5가 파단된 모델의 행어 H2에서 발생하였다. 이는 해석대상 구조물의 1차 수직진동모드가 비대칭 모드이므로 구조물의 중앙의 행어보다 1/4지점에 설치된 행어가 구조물의 수직거동에 영향을 크게 미치기 때문이며 때문이다.

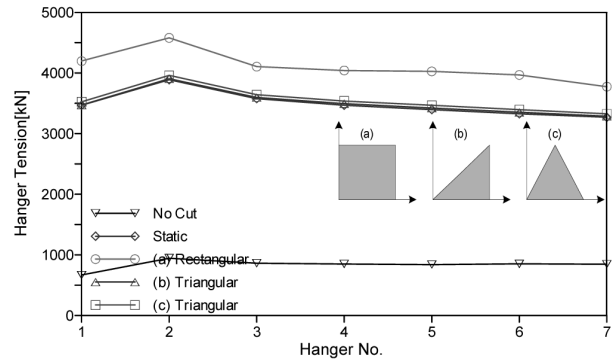


Fig. 9 Maximum tensile force when 3 hangers are broken

Table 6 Tensile force of the second hanger when 3 hangers are broken

| | | H2 [kN] |
|-----------------|------------|----------|
| No Cut | | 946.732 |
| Static | Nonlinear | 2419.689 |
| | Additional | 1471.957 |
| | Total | 3891.645 |
| Rectangular (a) | Nonlinear | 2419.689 |
| | Additional | 2160.817 |
| | Total | 4580.505 |
| Triangular (b) | Nonlinear | 2419.689 |
| | Additional | 1487.179 |
| | Total | 3906.868 |
| Triangular (c) | Nonlinear | 2419.689 |
| | Additional | 1540.757 |
| | Total | 3960.446 |

Table 6과 같이 행어 3개소 파단 시 행어 H2의 최대 장력은 집중하중 P 를 사각형 동적 하중으로 재하 시 나타났으며 정적 하중의 결과보다 약 1.5배정도 크게 발생한 것을 알 수 있다. 또한 전체 행어 장력은 파단된 행어를 제거한 구조물의 장력 2419kN을 합하여 정적 하중의 경우 3891kN, 사각형 동적 하중의 경우 4580kN으로 약 1.2배, 파단 전 행어 장력 946kN의 약 5배, 행어 1개소 파단 시 최대 행어 장력 2038kN의 약 2.3배, 행어 2개소 파단 시 최대 행어 장력 3331kN의 약 1.4배정도 크게 나타났다. 이와 같은 결과는 케이블 행어 1개소 및 2개소 파단에 의한 동적응답에서와 같은 경향을 보여주고 있다.

4. 결론

본 연구는 케이블 행어 파단에 따른 장대 아치교의 동적 거동을 분석하였으며 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 행어가 파단 되었을 경우 각 행어의 최대 장력은 파단된 행어와 인접한 행어에서 발생하는 것으로 나타났다.

며 파단으로 인한 하중의 재분배는 인접한 행어에 가장 크게 영향을 미치는 것으로 확인하였다. 따라서 파단 가능성이 있는 케이블과 인접한 케이블에 안전성을 높일 수 있는 설계 방안이 필요한 것으로 판단된다.

2) 보강거더의 1/4지점에서 행어가 파단 되었을 경우 근접한 행어의 축력이 가장 크게 증가하였다. 이는 해석 대상 구조물의 첫 번째 수직모드 형상이 비대칭 모드이므로 구조물 중앙의 행어보다 1/4지점에 설치된 행어가 구조물의 수직거동에 크게 영향을 미치기 때문이다.

3) 행어 파단에 따른 케이블 장력은 정적 하중에서 보다 동적 하중에서 크게 나타났으며, 동적 하중 재하 모델 중에서 사각형하중이 가장 큰 동적응답을 나타내었다.

4) 행어 파단 시 증가되는 행어의 장력은 동적 해석결과가 정적 해석 결과보다 약 1.5배 정도 크게 발생하는 것으로 나타났으며 각 행어의 전체 장력 또한 동적 해석의 결과가 정적 해석 시 보다 약 1.2배 이상 크게 나타났다.

이와 같은 결과로부터 행어 파단 시 주변 케이블의 장력증가로 인하여 연쇄적인 파단이 예상되므로 장대 아치교의 구조안전성을 확보하기 위해 행어 파단에 따른 충격하중을 동적 하중으로 고려한 해석이 필요하다. 또한 행어가 파단 됨에 따라 구조계가 변하게 되므로 정적 비선형 해석을 통하여 부재력의 재분배를 분석하여 구조물의 안전성을 확보해야 한다.

1. 공민식, 안찬혁, 임성순, “초기길이 수정법(ULMM)을 이용한 케이블 장력 결정에 관한 연구”. 구조물진단학회 논문집, 제 12권, 2호, 2008, pp.113-120.
2. 공민식, 임성순, “이동하중을 받는 구조물에 대한 시간영역과 주파수영역에서의 동적 해석”, 구조물진단학회 논문집, 제11 권 제3호, 2007, pp.87-94.
3. 임성순, 김동용, 손석호, 공민식, “이동하중을 받는 다중아치와 일반아치의 동적거동 분석”, 한국강구조학회 논문집, 제17 권 제5호, 2005, pp.537-547.
4. 황대원, “차량의 주행속도에 따른 아치교량의 동적 응답에 관한 연구”, 1986, 서울대학교 석사학위논문.
5. Austin, W. J. and Ross, T. J., “Elastic buckling of arches under symmetrical loading”, Journal of the Structural Division, ASCE 102, 1976, pp.1085-1095.
6. Cheng, J. and Jiang, J. J., “Ultimate behavior of long-span steel arch bridges”, Structural Eng and Mech, Vol.14, No.3, 2002, pp.331-343.
7. Dusseau, R. A., “Seismic Analysis of Two Steel Deck Arch Bridges”, MichiganState Univ, 1982.
8. Harrison, H., “In-plane stability of parabolic of arches”, Journal of the Structural Division, ASCE 108, 1982, pp. 195-205.
9. Thakkar, S. K., Arya, A. S., “Dynamic Response of Arches under Seismic Forces”, Proceeding of the 5th world Conference on Earthquake Engineering, Rome, 1973.

(접수일자 : 2009년 10월 8일)
(심사완료일자 : 2009년 12월 17일)

요 지

장대 아치교 설계 시 시공단계와 완성단계에서 발생할 수 있는 문제에 대하여 검토하고 있으나 케이블 손상에 대한 구조안전성 평가는 매우 미흡한 실정이다. 따라서 본 연구는 공용 중 충돌사고로 인한 행어 파단 시 교량의 구조안전성을 분석하는 것을 연구 목적으로 한다. 이를 위하여 행어 파단에 따른 하중을 충격함수로 이상화하여 동적 해석을 수행하였다. 행어가 파단 되었을 경우 각 행어의 최대 장력은 파단 된 행어와 인접한 행어에서 발생한 것으로 나타났으며 정적 하중보다 동적 하중에서 크게 나타났다. 그러므로 장대 아치교의 구조안전성을 확보하기 위해 행어 파단에 따른 충격하중을 동적 하중으로 고려한 해석이 필요하다. 또한 본 연구의 해석 방법 및 결과는 이후 아치교 설계 시 참고자료로 활용될 수 있다.

핵심 용어 : 장대 아치교, 행어 파단, 구조안전성, 충격하중