

라이즈비를 고려한 닐센아치교의 형상 거동에 관한 연구 The Study on Shape Behavior of Nielsen Arch Bridge Considering Rise Ratio

박순웅¹, 박문호^{2*}, 김진규³, 노우혁⁴, 조성욱⁵, 류지영⁶
Soon-Eung Park¹, Moon-Ho Park^{2*}, Jin-Kyu Kim³, Woo-Hyuk Roh⁴
Seong-Uk Cho⁵, Ji-Young Ryu⁶

<Abstract>

Recently, bridges have been momenttous as not only regarding function but also concerning aesthetics. However, when beauty is considered in the bridge, it is also essential that stability and economics be considered. Besides, when considering stability, an arch bridge is one of the most stable structures. The most important element is a rise ratio when regarding beauty and economics of arch bridges. The effect of dead load and DB24 load have been considered to decide proper rise ratio. Therefore, in this study, examined the value of moment, displacement and member forces, in the variation of the rise ratio of arch bridges. The most optimum shape of Nielsen arch bridges has determined by analyzing member forces, moments and displacement with parameters of rise ratio and angle of vertical members. By comparison between values, the hanger types have been also considered to derive the optimum shape of Nielsen arch bridge.

Keywords : Nielsen arch, Bridge, Rise ratio, Geometric analysis, Optimum shape

1. 서 론

최근 교량은 기능성과 사용성의 문제뿐만 아니라 미관과 균형미가 중요시되는 주변 경관과의 조화가 사회적으로 요구되는 추세에 있다. 하지만, 미관을 고려한 설계에서 필수적으로 고려되어야 하는 문제가 안정성과 경제성이며, 안정성 측면에서 볼 때 아치교량은 가장 안전한

구조 형식중의 하나이다. 아치교량은 구조물의 독특한 곡선의 아름다움과 부재 내에 압축력만 발생케 하는 아치 구조의 성질을 이용하여 하중에 의한 수평반력을 효과적으로 분배 할 수 있어 최근 중앙경간이 70~200m 이상 요구되는 장대교량에서 주변지역 환경과의 조화측면에서 많이 설계·시공되고 있는 추세이다.

아치교량의 미관과 경제성을 고려할 때 가장 중요한 요소가 라이즈 비이다. 이러한 라이즈

¹정회원, 영남이공대학 토목과, 겸임교수, 工博

²교신저자, 경북대학교 토목공학과, 교수, 工博

E-mail : parkmh@knu.ac.kr

³정회원, 영남이공대학 토목과 교수, 工博

⁴삼성엔지니어링, 과장

⁵소방방재청, 박사과정

⁶구미시청, 박사과정

¹Adjunct Professor Dept. of Civil Eng, Ph.D., Yeungnam College of Science & Technology

²Corresponding Author, Professor Dept. of Civil Eng, Ph.D., Kyungpook National University

³Professor Dept. of Civil Eng, PhD

⁴Section Manager, Samsung Engineering

⁵Doctor's Course, National Emergency Management Agency

⁶Doctor's Course, Gumi City Hall, Dept. of trade& investem

비를 결정하는데 있어 대부분 자중에 의한 영향만을 고려하고 있고, 아직까지 아치타입 교량의 라이즈 비 선정에 있어 그 결정인자에 대한 명확한 기준과 영향검토가 이루어지고 있지 않은 실정이다.

본 연구에서는 닐센아치교의 최적형상을 결정하기 위하여 아치의 구조거동 특성을 결정하는 가장 지배적인 요소인 라이즈 비를 변화시키면서 자중과 차량하중(DB-24)에 대해 정적해석을 수행하여 최적형상을 결정하였다.

2. 닐센아치교

2.1 개요

닐센 아치교는 로제식 아치교의 복재를 중복 사재로 하여 전체적인 강성을 크게 한다는 형식이다. 사재의 경사, 경사각을 적당하게 산정하면 사재는 인장력에 대해서만 설계할 수 있어 사재로서 케이블을 사용할 수 있으며 미관이 우수하게 된다. 사재가 아치교의 전단변형에 크게 기여하기 때문에 이동하중에 의한 처짐변동이 작은 구조물에 적합하나, 구조 역학적으로는 고차의 부정정 구조물이므로 구조해석 작업이 대단히 복잡하다. 국내의 대표적 시공 예로는 서강대교가 있다. Fig. 1은 닐센아치교를 나타내고 있다.

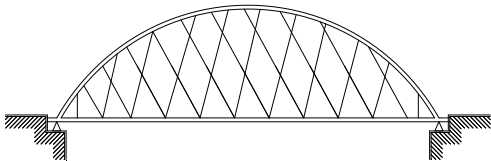


Fig. 1. Nielsen arch bridge.

닐센 아치교는 아치리브, 보강형, 케이블이 주부재이며 케이블의 인장력에 의해 아치리브는 압축력을 보강형은 인장력을 지지하게 되며, 케이블은 자중에 의하여 생기는 처짐에 의하여 하중-변위 관계가 비선형으로 되며 구조물의 큰 변형에 의하여 전체 구조로서의 기하학적 비선형성을 갖는다.

2.2 아치의 역학적 특성

Fig.2는 기본적인 아치축선을 나타내고 있다.

아치에 수직방향 등분포하중 w 를 재하시키면, 지점에서 수직반력 V 와 수평반력 H 가 발생하며, 이 합력 R 은 Fig.2와 같은 방향으로 작용한다. 한편, 지점 이외의 임의 단면에서 내력으로 전단력 Q 가 발생하고, 이 전단력 Q 와 수평반력 H 와의 합력 N 이 발생한다. 아치 리브 전 구간에 대한 합력 N 의 궤적을 압력선이라 부르고 이 압력선과 아치 축선을 일치시키면 아치는 압축력만을 받는다.

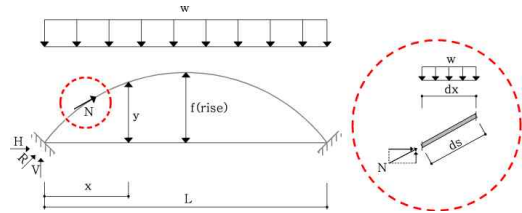


Fig. 2. The trace of Arch Axis.

그러므로 압력선의 궤적을 구하기 위하여 Fig.2와 같이 아치리브의 축방향 미소요소 dx 에 대하여 힘의 평형을 고려한다. 수평방향 평형식 $\Sigma H=0$ 와 수직방향 평형식 $\Sigma V=0$ 를 정리하면 식 (1), 식(2)와 같다.

$$d(N\cos\phi) = 0 \quad (1)$$

$$d(N\sin\phi) + wdx = 0 \quad (2)$$

여기서, ϕ 는 미소요소의 축방향과 수평방향 이루는 각이다. 식 (1)을 적분하면 식 (3)과 같다.

$$N\cos\phi = \text{const.} = H_d \quad (3)$$

미소요소의 기하학적 조건 $\tan\phi = dy/dx$ 를 적용하면 식 (4)~식 (8) 들을 얻을 수 있다.

$$d(N\sin\phi) = -w dx \quad (4)$$

$$\frac{d}{dx}(N\cos\phi) = -w \quad (5)$$

$$\frac{d}{dx}\left(\frac{N\sin\phi}{N\cos\phi}\right) = -\frac{w}{H_d} \quad (6)$$

$$\frac{d}{dx}\tan\phi = -\frac{w}{H_d} \quad (7)$$

$$\frac{d^2y}{dx^2} = -\frac{w}{H_d} \quad (8)$$

식 (8)을 x 에 대하여 두 번 적분하면 식 (9)와 같다.

$$y = -\frac{1}{2} \frac{w}{H_d} x^2 + C_1x + C_2 \quad (9)$$

여기서, 적분상수 C_1 과 C_2 를 구하기 위하여 $x=0$ 및 $x=l$ 에서 아치 축선의 종거가 $y=0$ 이 되는 경우의 경계 조건을 식 (9)에 적용하여 적분상수를 결정하면, 아치 축선의 y 는 식 (10)과 같다.

$$y = \frac{wx}{2H_d}(L-x) \quad (10)$$

앞에서 언급한 것처럼 등분포하중 w 에 의해 아치리브에 휨모멘트가 생기지 않는 축선 y 를 결정하기 위하여 경간중앙 $x=L/2$ 에서 휨모멘트 $M_{L/2}$ 는 식 (11)과 같다.

$$M_{L/2} = M_0 - H_d f = \frac{wl^2}{8} - H_d f = 0 \quad (11)$$

아치에 작용하는 수평분 H_d 는 식 (12)와 같이 나타낼 수 있다.

$$H_d = \frac{wL^2}{8f} \quad (12)$$

따라서, 식 (12)를 식 (10)에 대입하면 최종적인 아치 축선 y 는 식 (13)과 같다.

$$y = \frac{4f}{L^2}x(L-x) \quad (13)$$

여기서, f 는 아치 라이즈이다.

3. 해석예제 모델링

본 논문에 사용되어진 교량은 폭 33.8m 연장 158m의 더블 와렌 트러스 형식의 교량이다. 하중은 부재들이 가지고 있는 자중과, 활하중 DB-24 하중을 적용하였으며, 주부재인 아치리

브와 보강형에는 SM520, 강상판에는 SM520 그리고 부부재에서는 SM400을 사용하였다. 아치리브와 보강형을 연결하는 강선으로는 110mm의 지름을 가진 아연도금된 선들로 이루어진 부재를 사용하였고 교량의 상판으로는 200mm 두께를 가진 철근 콘크리트를 사용하였다.

3.1 행어 배치 형식별 모델링

행어 배치형식별 검토를 위해, 아치교의 행어를 수직으로 배치하는 수직배치, 케이블의 간격을 일정하게 유지하는 싱글와렌트러스, 그리고 케이블의 배치각도를 일정하게 유지하는 방식인 더블와렌트러스 케이블 배치형식을 Fig.3~Fig.5로 모델링 하였다.

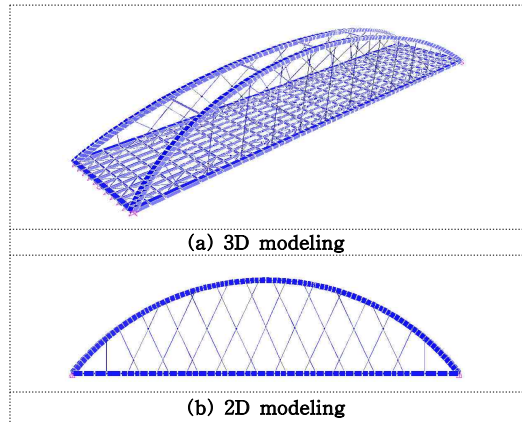


Fig. 3. Double warren truss.

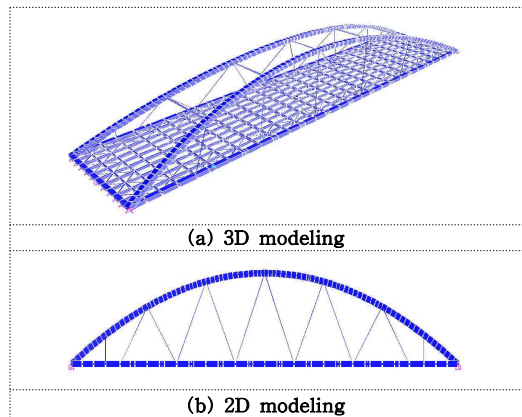


Fig. 4. Single warren truss.

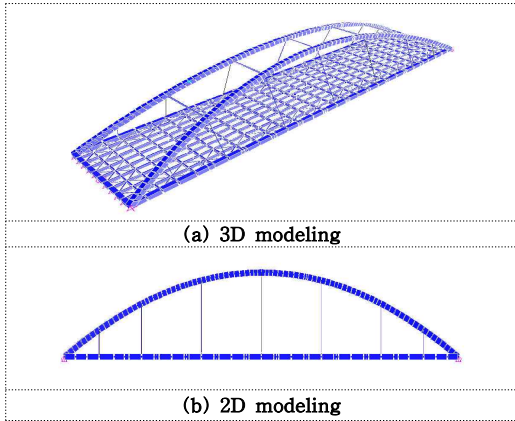


Fig. 5. Vertical warren truss.

3.2 라이즈비의 변화에 따른 모델링

아치교량의 라이즈 비($f=h/L$)란 아치의 높이 (h)와 지간(L)의 비를 말하며, 본 연구에서는 라이즈 비가 널센아치교의 거동에 미치는 영향을 검토하기 위하여, 라이즈 비를 1/4~1/10의 5가지 Type으로 변화시켰다. Fig.6~Fig.10로 모델링 하였다.

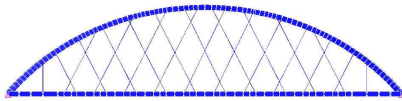


Fig. 6. Rise ratio 1/4.

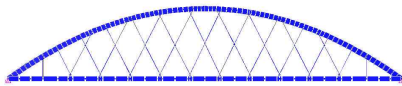


Fig. 7. Rise ratio 1/5.



Fig. 8. Rise ratio 1/6.



Fig. 9. Rise ratio 1/7.



Fig. 10. Rise ratio 1/10.

3.3 아치리브의 경사각에 따른 모델링

아치리브 및 강선의 기울어진 각도에 따라 단면력과 처짐을 비교하기 위해 각각 라이즈 비 변화를 준 상태에서 경사각 또한 6°, 12°, 18°로 변화를 주었다. Fig.11~Fig.13로 모델링 하였다.

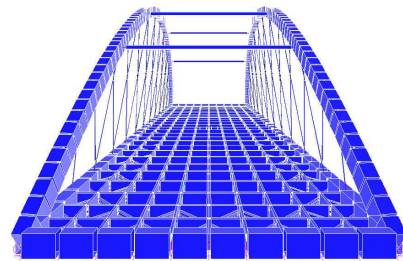


Fig. 11. Skew Angle 6° .

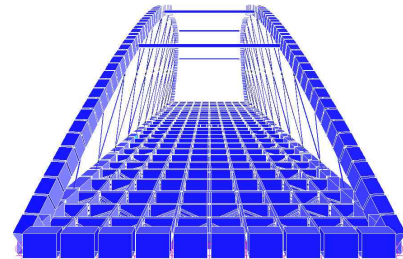


Fig. 12. Skew Angle 12°.

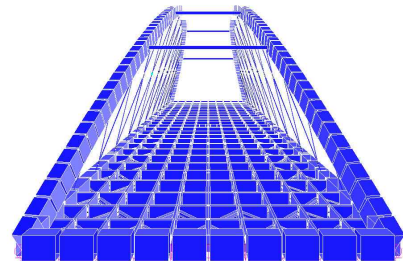


Fig. 13. Skew Angle 18°

4. 결과 고찰

4.1 행어 배치 형식별 해석결과

케이블 배치 형식을 일정한 라이브 비 1/5에서 케이블에 작용하는 인장력 및 보강형과 아치리브에 작용하는 단면력 및 처짐을 비교하여 가장 적절한 행어의 배치형식을 결정하기 위해 수행하였다.

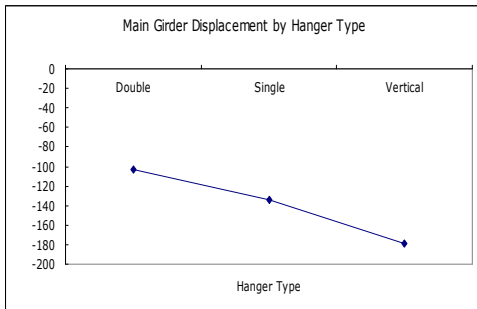


Fig. 14. Main girder displacement by hanger type.

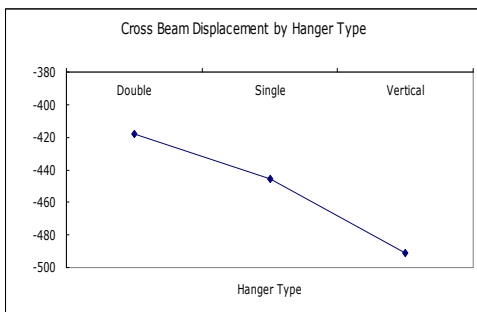


Fig. 15. Cross beam displacement by hanger type.

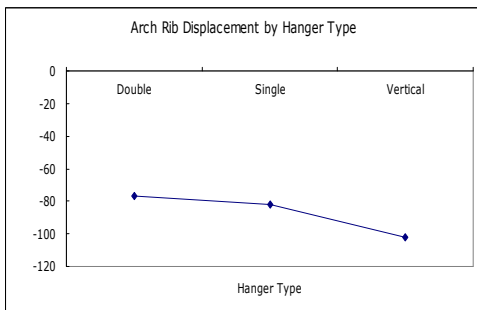


Fig. 16. Arch Rib Displacement by Hanger Type.

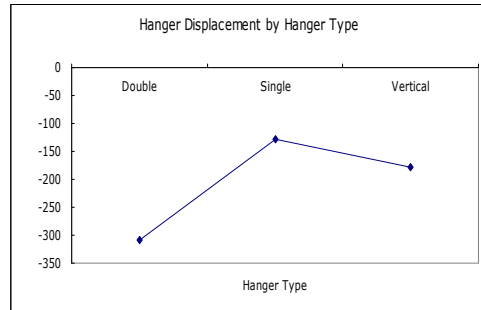


Fig. 17. Hanger displacement by hanger type.

Fig.14~Fig.17의 결과에서 보강형과 아치리브에서 최대변위값은 더블와렌트리스 구조에서 가장 작게 나타났으며, 인장력을 받고 있는 행어에서는 더블와렌트리스의 행어가 싱글와렌트리스, 연직와렌트리스 보다 더 작은 변위를 보였다.

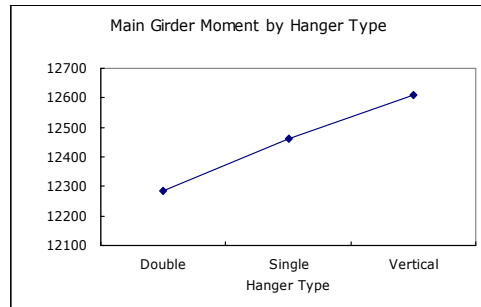


Fig. 18. Main girder moment by hanger type.

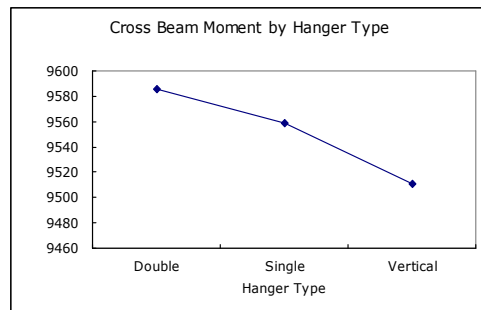


Fig. 19. Cross beam moment by hanger type.

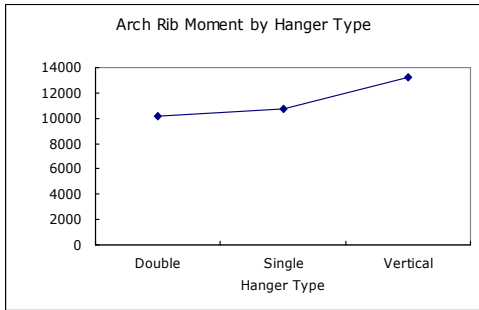


Fig. 20. Arch Rib Moment by Hanger Type.

최대 모멘트의 결과를 살펴보면 더블와렌트러스 형식의 배치가 아치리브 및 보강형에 대해 가장 작은 단면력을 발생시킴을 알 수 있다. 또한, 장력분포의 경우 케이블 개수가 적은 연직배치는 케이블의 하중 부담률이 증가하여 단면이 큰 케이블을 필요로 하게 되고 싱글와렌트러스 형식의 경우 이러한 문제를 어느 정도 해결하나, 더블와렌트러스 보다는 매우 불리할 것으로 판단된다. 따라서 부재력이 다른 형식에 비해 적고 장력분포의 편차가 적은 더블와렌트러스 형식의 닐센아치교가 다른 케이블 배치 형식보다 유리한 것으로 나타났다.

4.2 경사각 변화에 따른 해석결과

보강형과 아치리브는 라이즈 비가 감소함에 따라 보강형의 변위가 증가하였으며, 라이브 비 1/4에서 경사각 6°로 모델링한 구조가 가장 유리한 것으로 나타났다.

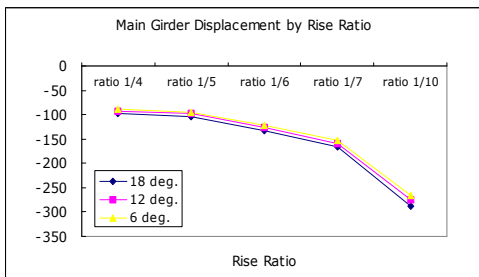


Fig. 21. Main girder displacement by rise ratio.

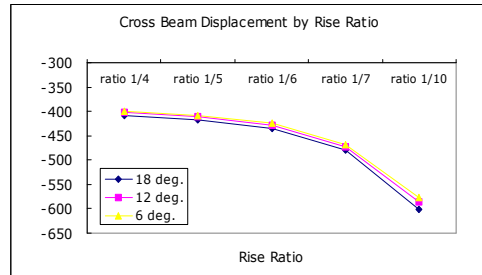


Fig. 22. Cross beam displacement by rise ratio.

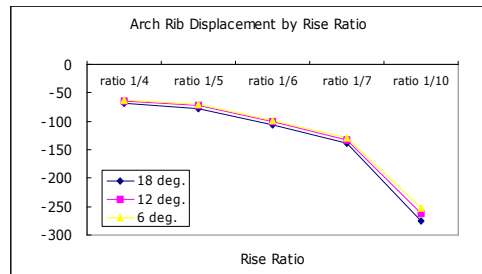


Fig. 23. Arch rib displacement by rise ratio.

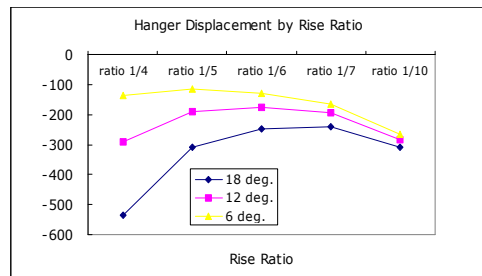


Fig. 24. Hanger displacement by rise ratio.

Fig.25~Fig.27는 경사각에 따른 보강형과 아치리브의 최대 모멘트를 각각 나타내었다. 각각 라이즈비가 작아질수록 부재에 작용하는 모멘트 값이 작아졌고, 보강형의 경우 1/6, 아치리브는 1/5에서 최적값을 찾을 수 있었다. 아치리브의 경우 라이즈 비가 작아질수록 부재에 작용하는 모멘트 값이 작아졌는데 이는 라이즈비가 작아질수록 구조물 자체의 중량도 감소하기 때문이라고 판단된다.

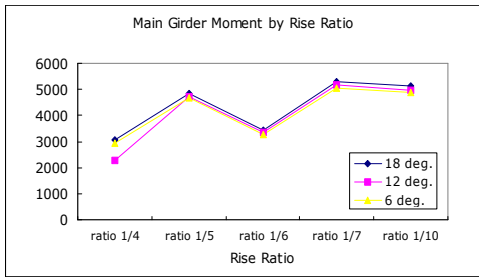


Fig. 25. Main girder moment by rise ratio.

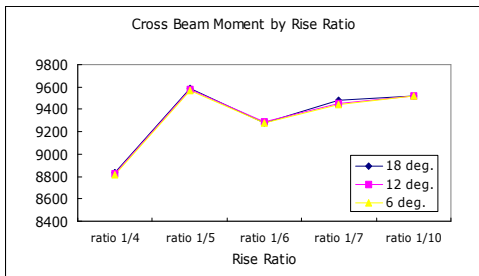


Fig. 26. Cross beam moment by rise ratio.

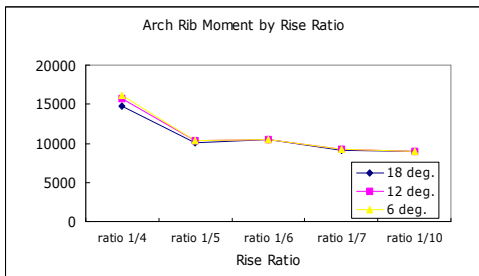


Fig. 27. Arch beam moment by rise ratio.

5. 결론

본 연구에서는 닐센아치교의 형상 거동을 연구하고자, 케이블 배치 형식과 라이즈비 및 아치리브의 경사각에 대해 변화를 주어 최적의 형상을 찾기 위해 구조해석을 수행하여 각각의 경우에 따른 결과를 비교 검토 하였다.

1. 아치교의 행어를 수직으로 배치하는 수직 배치, 케이블의 간격을 일정하게 유지하는 싱글와렌트러스, 그리고 케이블의 배치각도를 일정하게 유지하는 방식인 더블 와렌

트러스 케이블 배치 형식을 일정한 라이즈비 1/5 를 유지시킨 상태에서 케이블에 작용하는 인장력 및 보강형에 작용하는 단면력 및 처짐을 비교하여 가장 적절한 행어의 배치형식을 결정하였다. 구조해석 결과, 행어에 작용하는 인장력은 더블와렌트러스 구조가 싱글와렌트러스 구조와 연직와렌트러스 구조보다 각각 42.13%, 26.06%로 상대적으로 유리하였다. 행어에 작용하는 인장력 뿐만 아니라, 아치교의 주부재라고 수 있는 보강형의 변위값도 더블와렌트러스 구조가 다른 형식보다 77.2%, 93.9% 정도로 유리하게 나타났다. 장력분포의 경우 케이블 개수가 적은 연직배치는 케이블의 하중부담률이 증가하여 단면이 큰 케이블을 필요로 하게 되고 싱글와렌트러스 형식의 경우 이러한 문제를 어느 정도 해결하나, 더블와렌트러스 보다는 불리한 것으로 나타났다. 따라서 발생 부재력이 다른 형식에 비해 적고 장력분포의 편차가 적은 더블와렌트러스 형식이 닐센아치교의 구조에서 다른 케이블 배치 형식보다 유리하였다.

2. 아치리브의 경사각 변화에 따른 최적 라이즈비의 검토에 있어, 보강형과 아치리브의 변위는 라이즈비 1/4에서 다른 라이즈비를 가진 모델 보다 94.47% 변위가 작게 나왔다. 행어의 인장력에서는 경사각별 차이는 미비하나, 라이즈비에 대해 심한 편차를 보였다. 최적의 라이즈비는 1/5 이고, 그때의 인장력은 다른 라이즈비를 가진 모델들과 비교하여 74.98% 감소한 것으로 나타났다. 아치리브의 경우 라이즈비가 작아질수록 부재에 작용하는 모멘트 값이 작아졌는데, 이는 라이즈비가 작아질수록 구조물 자체의 중량도 감소하기 때문이라고 판단된다.

3. 경관의 형상화 및 좌굴 안전성과 관련하여 아치리브의 경사각을 검토하였다. 6°, 12° 및 18°로 경사각을 변화시키면서, 경간과

단면효율을 검토하였다. 보강형과 아치리브에서 경사각이 증가함에 따라 부재에 발생하는 변위값과 부재력은 증가하였다. 하지만 그 편차는 1.80% ~ 8.34% 정도로 미비하였다. 경사각이 증가함에 따라 부재에 생하는 부재력과 변위값은 증가하나, 경사각 18° 이내에서는 그 차이가 크지 않으므로, 경관성, 좌굴안정성 및 시방서의 규정 등에 어긋나지 않는 범위 내에서 경사각을 주는 것이 교량의 미관상 좋다고 판단된다.

참 고 문 헌

- 1) 도로교 설계기준, *대한토목학회*,(2003)
- 2) 공민식, 김동영, 손석호, *한국강구조학회논문집*, **17, 6**, 537, (2005)
- 3) 허은미, 최지훈, 조병철, 이용재, *한국강구조학회논문집*, **14, 2**, 319, (2002)
- 4) 김용희, 이윤영, 이영재, *대한토목학회학술발표회논문집*, pp.1~5(2001)
- 5) 장은하, *랭거아치교의 Rise-Span 비의 최적화*, 건국대학교 석사학위논문(2001)

(접수:2010.06.11, 수정:2010.07.22, 게재 확정:2010.08.20)