

2차효과를 고려한 강사장교의 개선된 좌굴해석

An Improved Stability Design of Steel Cable-Stayed Bridges using Second-Order Effect

경 용 수* · 김 남 일** · 이 준 석*** · 김 문 영****

Kyung, Yong-Soo · Kim, Nam-Il · Lee, Jun-Sok · Kim, Moon-Young

ABSTRACT

Practical stability design method of main members of cable-stayed bridges is proposed and discussed through a design example. For this purpose, initial tensions of stay cables and axial forces of main members are firstly determined using initial shaping analysis of bridges under dead loads. And then the effective buckling length using system elastic/inelastic buckling analysis and bending moments considering $P-\delta-\Delta$ effect by second-order elastic analysis are calculated for main girder and pylon members subjected to both axial forces and moments, respectively. Particularly, load combinations of dead and live loads, in which maximum load effects due to live loads are obtained, are taken into account and effects of live loads on effective buckling lengths are investigated.

Keywords: cable-stayed bridge, initial shaping analysis, second-order elastic analysis, stability design, system buckling analysis, effective buckling length

1. 서 론

본 연구에서는 축방향력 및 휨모멘트를 동시에 받는 강사장교 주요부재의 유효좌굴길이를 효과적으로 산정할 수 있는 시스템 좌굴 고유치해석법과 2차 탄성해석법을 나타내었다. 앞선연구(김 등(2005a, b))에서 제안한 방법에 기초하여 활하중의 영향을 고려한 강사장교 주형, 주탑의 실용적인 좌굴설계 방법을 제안한다. 이 설계법의 타당성을 검증하기 위하여 고정하중과 활하중을 동시에 받는 강사장교의 고정하중에 의한 시스템 탄성/비탄성 유효길이를 결정하고 이를 이용하여 좌굴안정성검토를 행한다. 본 연구에서 제시되는 주요점은 다음과 같다.

1. 사장교 주요부재의 유효좌굴길이는 “시스템 탄성/비탄성 좌굴해석으로 구한 두 개의 좌굴길이 중에서 작은 값”을 취한다는 설계기준(안)을 새로이 제안한다.
2. 고정하중만을 고려한 경우에 대한 주형과 주탑의 유효좌굴길이 특성을 조사한다.

* 성균관대학교 건설환경시스템공학과 박사과정 E-mail: sosory@dreamwiz.com)

** 성균관대학교 건설환경연구소 연구교수 E-mail: kni8501@dreamwiz.com

*** 성균관대학교 건설환경시스템공학과 박사과정 E-mail: junsok73@yahoo.co.kr

**** 정희원, 성균관대학교 건설환경시스템공학과 교수 E-mail: kimye@skku.ac.kr

3. 고정하중에 의한 휨모멘트는 초기치해석으로 구하고 활하중에 의한 휨모멘트는 2차 탄성해석법과 축력에 의한 증폭계수를 적용하는 방법으로 각각 구하고 두 가지 결과를 비교, 분석한다. 아울러 f_{E_y} 산정 시 유효좌굴길이 적용의 문제점을 지적한다.

4. 최종적으로 활하중을 고려한 경우에 도로교 설계기준의 압축과 휨을 동시에 받는 좌굴 안정성식의 압축응력성분과 휨응력성분에 미치는 영향을 종합적으로 조사, 분석한다.

2. 사장교 시스템의 탄성/비탄성 좌굴해석 및 2차 탄성해석법

초기치해석을 통하여 고정하중을 받는 사장교의 케이블장력과 주요부재의 축방향력 P_i 를 산정하면 다음과 같이 사장교의 시스템 탄성좌굴해석을 수행할 수 있다.

$$K_e U = \lambda K_g U \tag{1a}$$

$$\text{여기서} \quad K_g = \sum_i k_{g_i}(P_i + \Delta P_i) \tag{1b}$$

K_e, K_g = 각각 시스템의 탄성 및 기하강성행렬; λ = 좌굴파라미터; k_{g_i} = i 번째 부재의 기하강성행렬; ΔP_i = 활하중에 의한 축방향력 변화; U = 절점변위벡터이다. K_e 는 고정하중과 평형을 이루는 케이블장력과 주형, 주탑의 축력을 사용하여 산정하므로, 고정하중에 좌굴파라미터의 임계값 λ_{cr} 을 곱한 하중이 전체 시스템의 좌굴을 일으키는 하중수준을 나타내는 것을 의미한다. 활하중을 고려하는 경우는 이를 고려한 축방향력에 근거하여 기하강성행렬을 산정한다.

식 (1)의 첫 번째 좌굴하중을 이용하여 주요부재의 유효좌굴길이를 산정할 수 있다. 이러한 탄성좌굴 해석법은 유효좌굴길이 산정 시 소성거동의 영향이 고려되지 않는다는 단점을 가지고 있다. 실제 기둥부재들은 중간주 또는 단주에 해당하는 경우에도 구조전체가 선형탄성 거동한다고 가정하고 있다. 그래서 전체 구조물의 붕괴 시 변형형상은 좌굴모우드와 차이가 나기 마련이다. 이는 탄소성거동이 유효좌굴길이 산정에 영향을 준다는 것을 의미한다.

본 장에서는 시스템 좌굴고유치해석을 반복적으로 적용하여 개별부재에 대한 기둥의 기준 내하력곡선에서 점선탄성계수 E_i 와 유효좌굴길이를 산출하는 비탄성 좌굴고유치 해석법과 2차 탄성해석법을 간략히 제시한다.

2.1 비탄성좌굴 고유치해석기법을 이용한 유효좌굴길이 산정법

일반적으로 라멘구조의 기둥 부재는 대부분 중간주의 세장비를 갖는다. 사장교 주요부재의 경우에도 중간주로 거동할 가능성이 많기 때문에 비탄성 좌굴거동을 고려한 시스템좌굴해석을 수행할 필요가 있다. Iwasaki(2001)과 경 등(2005)의 문헌을 참조하여 사장교의 비탄성 좌굴해석법에 대한 구체적인 계산절차는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

단계 1: 케이블지지교량의 고정하중에 대한 초기형상 해석을 통한 케이블 장력, 주형 및 주탑의 축방향력을 산정한다.

단계 2: 이때의 탄성강도행렬 K_e 및 기하강도 행렬 K_g 을 이용하여 고유치 해석을 수행한다. 고유치해석에서 최소고유치 $\lambda = \lambda_{cr}$ 을 구해 각 부재의 좌굴하중 $P_{cr,i} = \lambda_{cr}(P_i + \Delta P_i)$, 좌굴응력 $f_{cr,i}$ 를 계산한다.

$$\det | K_e(E_{t,i}) + \lambda K_g(P_i + \Delta P_i) | = 0 \tag{2}$$

단계 3: 각 부재의 유효좌굴길이 $L_{e,i} = K_i L_i = \pi \sqrt{\frac{E_{t,i} I_i}{P_{cr,i}}}$ 에 의해 산출하고 대응하는 극한강도 $f_{u,i}$ 를 기둥의 도로교 설계기준 내하력곡선식 (3)을 이용하여 계산한다.

$$\begin{aligned} \bar{f} &= \frac{f_{u,i}}{f_y} = 1.0 & \bar{\lambda} &\leq 0.2 \\ &= 1.109 - 0.545 \bar{\lambda} & 0.2 < \bar{\lambda} &\leq 1.0 \\ &= 1.0 / (0.773 + \lambda^2) & \bar{\lambda} > 1.0 \end{aligned} \quad (3a-c)$$

여기서, $\bar{\lambda} = \frac{\lambda}{\lambda_0} = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{f_y}{E} \left(\frac{L_{e,i}}{r} \right)}$ 이다.

단계 4: 전 단계의 $E_{t,i}^0$ 를 이용해 $E_{t,i} = \frac{f_{u,i}}{f_{cr,i}} E_{t,i}^0$ 에 의해 $E_{t,i}$ 를 구한다. 이때 수렴조건

$$\left| \frac{(E_{t,i} - E_{t,i}^0)}{E_{t,i}^0} \right| \leq \epsilon$$

수렴하지 않은 단계 2로 되돌아가 수렴할 때까지 반복계산한다.

2.2 2차 탄성해석

고정하중에 대한 사장교의 초기치해석의 경우는 기하학적 비선형해석을 적용하기 때문에 *P-Delta* 효과를 정확히 고려한 휨모멘트 분포를 얻을 수 있다. 그러나 활하중에 대한 응답을 정확히 산정하기 위해서는 좌굴 안정식에서 휨모멘트 증폭계수를 이용하거나 이 절에서 제시되는 2차 탄성해석법을 적용한다. 활하중을 받는 사장교의 2차 탄성해석은 다음 식으로 수행할 수 있다.

$$[K_e(E) + K_g(P_i)] \Delta U = \Delta F_{live} \quad (4)$$

여기서 ΔU , ΔF_{live} = 각각 절점중분변위, 등가 활하중벡터를 나타낸다.

일반적으로 증폭계수 $1/(1 - f_c/f_{E_y})$ 를 사용하는 경우에 f_{E_y} 산정 시 유효좌굴길이는 시스템좌굴해석의 결과를 사용하기 마련이다. 그러나 이는 그림 1에서 보는 바와 같이 유효좌굴길이가 주형의 케이블 정착 구간보다 훨씬 길어지는 경향을 보이기 때문에 실제 *P-Delta* 효과보다 과장되게 산정되는 결과를 가져올 수 있다. 즉, 그림 1의 사장교 주형의 i 번째 케이블 정착부 구간에 대하여 *P-Delta* 효과를 생각한다. 이 구간의 실제길이는 L_i 이지만 유효좌굴길이는 KL_i 이고, 고정하중에 의한 축방향력은 P_i 로 나타낸다. 이때

P_i 에 의한 휨모멘트의 실제 증폭크기는 그림 1에서 분명히 $P_i \delta$ 이지만 좌굴안정식의 증폭계수를 사용하는 경우에는 $P_i \Delta$ 로 과대하게 증가하는 것을 볼 수 있다.

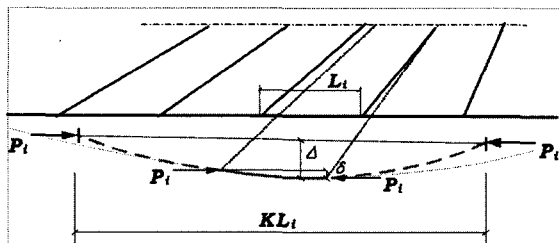


그림 1 사장교 주형에 발생하는 휨모멘트 증폭효과 개념도

3. 사장교 주요부재의 개선된 좌굴안정성 검토법

초기치해석을 이용하여 케이블 장력과 주요부재의 부재력(축방향력)을 산정하고, 이를 이용하여 3절의 케이블교량의 고유치 해석과 이를 이용한 시스템 좌굴하중과 케이블교량 주요부재의 유효좌굴길이를 산정한다. 사장교와 같은 케이블 지지교량의 주형과 주탑은 축방향력과 휨모멘트를 동시에 받기 때문에, 이러한 보-기둥부재의 안정성 검토식을 나타내는 식은 아래의 식 (5)을 적용하여 좌굴안정성을 검토할 것을 제안한다.

$$\frac{f_c}{f_{cuz}} + \frac{f_{bcy}^*}{f_{bcy}} + \frac{f_{bcz}^*}{f_{bcz}} \leq 1 \quad (5)$$

여기서 f_{cuz}^* : 시스템 탄성 및 비탄성 좌굴해석을 수행하여 산정한 두 유효좌굴길이 중에서 작은 값을 취하여 구한 허용압축응력이다. f_{bcy}^*, f_{bcz}^* : 각각 강축(y축) 및 약축(z축) 둘레에 작용하는 휨모멘트에 의한 휨 압축응력(kgf/cm^2)이며, 축방향력에 대한 부가적인 휨모멘트의 증폭효과를 정확히 고려할 수 있는 2차 탄성 해석법(second-order elastic analysis)으로 산정한다.

일반적으로 축력만을 고려한 시스템 좌굴해석법을 적용하는 경우에 상대적으로 강성이 작거나 압축력이 크게 작용하는 부재일수록 유효좌굴길이가 작아져서 허용압축응력은 증가하고, 반면에 강성이 크고 상대적으로 작은 압축력을 받는 부재는 좌굴길이가 커져서 허용응력이 감소하는 좌굴거동특성을 보인다. 특히 탄성좌굴해석에 비하여 비탄성좌굴해석을 적용하면 그 경향이 더욱 두드러진다.

한편 LRFD-AISC(2002)에서는 소성축력($=A_s\sigma_y$)의 1/3 이상의 압축력이 작용하는 기둥에 대해서는 비탄성효과를 고려하여 소위 강도감소계수를 도입하여 강성을 저하시켜서 유효좌굴길이를 산정하는 설계규정을 삽입하였다. 이는 결과적으로 압축력이 크게 작용하는 기둥의 유효좌굴길이를 감소시켜 허용압축응력을 증가 시킴으로써 보다 경제적인 설계를 유도하고 있다. 본 연구에서도 이와 유사한 이유로, 원칙적으로 시스템 탄성좌굴해석으로 유효좌굴길이를 구하지만 비탄성좌굴해석이 가능한 경우에는 두 유효좌굴길이 중에 작은 값을 사용하는 설계규정(안)을 제안하였다.

4. 사장교 수치예제

본 장에서는 고정하중과 활하중을 받는 사장교의 수치예제를 제시한다. 먼저 고정하중만 작용하는 경우에 사장교 초기치해석을 수행하고 휨모멘트를 구한다. 이때 함께 얻어지는 케이블장력과 축방향력을 사용하여 탄성 및 비탄성좌굴 고유치해석법을 수행하고 유효좌굴길이를 산정한다. 그리고 활하중에 대한 포락선 및 활하중 재하방법을 결정하기 위한 영향선을 얻는다. 마지막으로 DL 하중에 대하여 선형탄성해석 및 2차 탄성해석을 실시하고 활하중에 대한 축방향력과 휨모멘트를 계산한다. 유효좌굴길이에 미치는 활하중의 영향을 조사하기 위하여 고정하중과 활하중에 대한 축방향력을 사용하여 시스템 좌굴해석을 행한다. 또한 DL 하중에 대하여 선형탄성해석에 의한 휨모멘트 값과 증폭계수를 곱한 값 그리고 2차 탄성해석에 의한 휨모멘트 결과를 제시하고 비교, 분석한다. 마지막으로 사장교 주형, 주탑의 주요부재에 대하여 기존의 검토식과 개선된 좌굴안정성 검토(안)식을 적용하고 종합적인 비교, 검토결과를 제시한다.

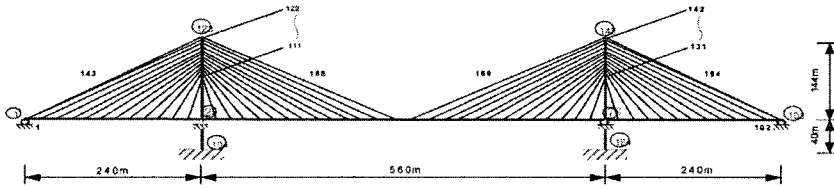
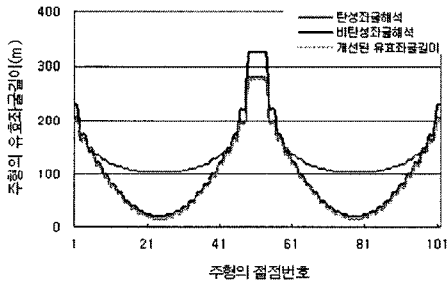


그림 2. 2차원 사장교의 모델링

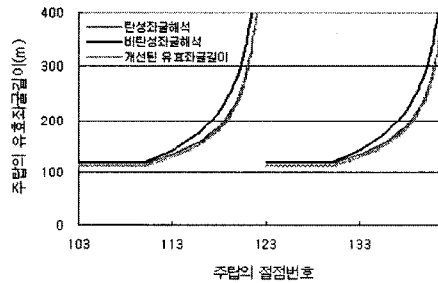
표 1. 사장교 구조해석 모델의 부재번호

부재번호	케이블부재	축경간	중앙경간	주탑
	143-168 ; 169-194	1-24 ; 79-102	25-78	103-122 ; 123-142

4.1 사장교 주요부재의 유효좌굴길이



(a) 주형부재의 유효좌굴길이



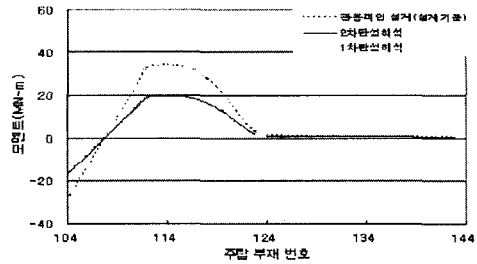
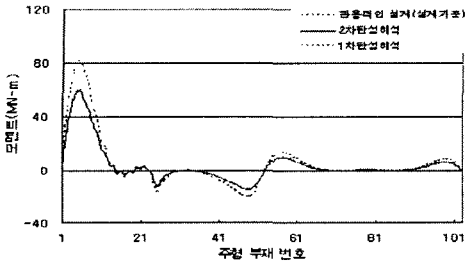
(b) 주탑부재의 유효좌굴길이

그림 3. 고정하중에 대한 탄성 및 비탄성좌굴 고유치해석을 이용한 유효좌굴길이

그림 3은 고정하중 만을 재하하였을 경우의 유효길이를 나타낸다. 그림에서 보면, 축압축력이 큰 주탑 부근의 주형부재는 탄성좌굴해석의 결과가 비탄성좌굴해석의 결과보다 큰 유효좌굴길이를 나타내며, 상대적으로 축압축력이 작은 교량 중앙지간의 중앙이나 교량의 진입부 주형부재는 유효좌굴길이가 상대적으로 짧아 짐을 알 수 있다. 또한 축압축력이 큰 주탑하부는 유효좌굴길이의 변화가 거의 없는 반면에, 축압축력이 작은 주탑상부의 부재는 비탄성좌굴해석의 유효좌굴길이가 길어지는 결과를 보였다. 아울러 본 연구에서 제안한 유효좌굴길이는 두 좌굴길이 중에서 작은 값을 취한다.

4.2 활하중에 대한 사장교의 2차 탄성해석

활하중에 대한 다양한 경우를 이용하여 제안한 좌굴안정성을 보였지만, 지면상 본 연구에서는 축경간 절점 5에 최대 정모멘트가 발생하는 경우만을 이용하여 좌굴안정성 평가를 하였다.



(b) 활하중에 의한 주형의 휨모멘트 분포

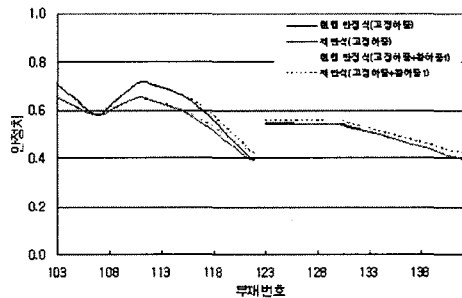
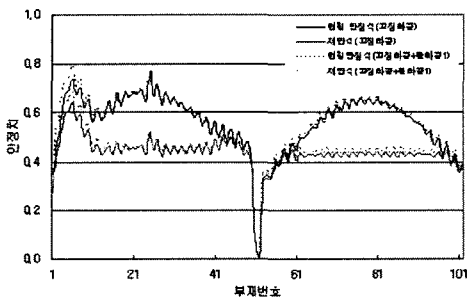
(c) 활하중에 의한 주탑의 휨모멘트 분포

그림 4. 측경간 절점 5에 최대 정모멘트가 발생하는 DL 하중재하(활하중1) 및 활하중에 의한 휨모멘트 분포

그림 4a는 주형부재 중에서 최대 정모멘트 및 부모멘트가 동시에 발생하는 절점 5의 휨모멘트 영향선 및 최대 하중효과가 발생하는 DL 하중재하 방법을 보여준다. 그림 4b와 4c는 DL 하중재하 방법에 따라 하중을 재하하고 주형 및 주탑에 발생하는 1차(선형) 탄성해석 및 2차 탄성해석에 의한 휨모멘트 분포 그리고 1차탄성해석에 증폭계수를 곱한 휨모멘트 결과를 나타낸다. 그림에서 보듯이 1차 탄성해석과 2차 탄성해석 결과의 차이는 매우 작은 반면에 1차 탄성해석결과에 증폭계수를 곱한 값은 큰 차이를 보이고 있다. 이는 2.2절에서 언급한 바와 같이 도로교설계기준에 사용된 좌굴안정성에서 *P-Delta* 효과를 나타내는 증폭계수는 안전측의 결과를 주지만 케이블에 의하여 탄성지지되는 사장교 주형, 주탑의 경우에 지나치게 과대평가되는 결과를 가져오기 때문에 가능한 2차 탄성해석법을 적용할 필요가 있다.

4.3 활하중의 영향을 고려한 사장교 주요부재의 안정성 평가

본 절에서는 4.1, 4.2절에서 제시한 유효좌굴길이와 활하중에 의한 휨모멘트 결과를 토대로 활하중조합에 대하여 현행 좌굴안정성 검토식과 개선된 좌굴안정성 검토(안)식을 비교, 분석하였다. 이때 고정하중에 의해 구한 유효좌굴길이와 활하중을 추가했을 경우의 유효좌굴길이를 적용한 결과를 이용하였다.



(a) 활하중을 재하시킨 후의 주형에 대한 좌굴안정값

(b) 활하중을 재하시킨 후의 주탑에 대한 좌굴안정값

그림 5 활하중에 의한 주형 및 주탑의 안정성 평가

표 2 활하중에 의한 주형 및 주탑의 안정성 평가

구분		현행안정식			제안식			비고
		압축	휨	Σ	압축	휨	Σ	
주형	측면부 최대	0.40 (0.36)	0.40 (0.38)	0.80 (0.74)	0.40 (0.35)	0.29 (0.29)	0.69 (0.65)	OK
	주탑부 주위 (주형의 최대 압축부)	0.64 (0.63)	0.13 (0.13)	0.77 (0.76)	0.42 (0.42)	0.09 (0.09)	0.51 (0.51)	OK
주탑	주탑 허부	0.57 (0.57)	0.14 (0.14)	0.71 (0.71)	0.57 (0.57)	0.08 (0.08)	0.65 (0.65)	OK
	주탑 상부	0.56 (0.56)	0.15 (0.15)	0.71 (0.71)	0.56 (0.55)	0.09 (0.09)	0.65 (0.64)	OK

그림 5a, b는 각각 고정하중과 고정하중+활하중을 재하하여 유효좌굴길이를 산정한 후, 이를 주형 및 주탑의 현행 및 개선된 좌굴안정성 검토식에 의해 검토한 결과를 그래프로 나타내고 있다. 일반적으로 도로교설계기준(2005)에 있는 현행안정성 검토식의 경우, 탄성좌굴 고유치해석을 이용하여 구한 유효좌굴길이를 사용하였고, 개선된 좌굴안정성 검토(안)식은 탄성 및 비탄성좌굴 고유치해석을 이용하여 구한 유효좌굴길이 중 작은 값을 사용하였다. 따라서 현행 안정성 검토식에서는 고정하중을 이용한 유효좌굴길이와 고정하중+활하중1식에서 그래프를 살펴보면, 현행 안정성 검토식보다 개선된 안정성 검토(안)이 안정측으로 나음을 알 수 있다. 이는 크게 두가지 측면으로 고려된다.

첫째, 고정하중과 고정하중+활하중을 재하할때의 시스템좌굴 고유치해석에 의한 유효좌굴길이의 차이이다. 압축부의 경우, 측면부에서는 좌굴길이의 선택중 탄성좌굴 고유치해석 결과에 의해 발생한 유효좌굴길이를 선택하였기 때문에 현행 안정성 검토식과 개선된 안정성 검토(안)의 압축부의 차이가 발생하지 않았지만, 주탑부 최대 축압축력이 발생하는 부분에서의 유효좌굴길이는 현행식의 경우 탄성좌굴 고유치해석결과인 102.76m를 사용하였고, 개선식의 경우 비탄성좌굴 고유치해석 결과인 23.57m사용함으로써, f_{crit} 의 값의 차이가 발생하게 된다.

둘째, 활하중에 의해 발생하는 2차해석의 정확한 모멘트의 계산이다. 휨부의 경우, 측면부에서는 모멘트가 집중으로 발생함으로 인해 현행식에서 모멘트 증폭계수 $1/(1-f_c/f_{E_y})$ 가 과다값을 갖게 되므로 인해 휨부의 큰값을 유발하게 됨을 알 수 있다. 주탑의 경우에는 고정하중과 고정하중+활하중에 의한 탄성 및 비탄성좌굴 고유치해석결과와 유효좌굴길이를 살펴보면, 전체적으로 탄성결과에 의한 고유치해석결과가 더 작게 발생함을 알 수 있다. 또한 현행식에서의 모멘트 증폭계수 $1/(1-f_c/f_{E_y})$ 의 사용으로 인하여 현행식의 휨부분이 과다한 값을 갖게 되고, 2차해석에 의해 구한 개선식의 경우가 좀더 안정측으로 계산됨을 알 수 있다.

따라서, 그림 5a, b를 보면, 전체적으로 개선된 좌굴안정성 검토(안)식의 경우가 현행 좌굴안정성 검토식의 결과보다 안정적으로 나타나 있음을 알 수 있다. 특히 유효좌굴길이를 결정할 때, 탄성 및 비탄성좌굴 고유치해석을 이용하여 구한 유효좌굴길이 중 작은 값을 사용함으로써 보다 경제적인 설계가 가능하리라 판단된다.

5. 결 론

현재 사장교의 안정성 평가는 도로교 설계기준(대한민국, 2005)에 나와 있는 안정성 평가식에 근거하여 설계하고 있다. 기존의 도로교 설계기준에 사용되는 안정성평가에 관한 식에서 $1/(1-f_c/f_{E_y})$ 부분은 임의적으로 P-Delta 효과를 나타내는 부분이다. 이 효과를 탄성 및 비탄성좌굴 고유치해석을 이용한 최적화된

유효좌굴길이와 2차탄성해석을 설계에 반영하였을 때 기존의 방법보다 효과적인 부재안정성 검토를 행할 수 있다. 또한 P - Δ 효과를 포함하는 식에 대하여 보다 정확하게 고려하여 안정성평가를 수행하였을 때, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 고정하중과 고정하중+활하중을 재하시켰을 경우, 유효좌굴길이의 변화에서 활하중이 직접적으로 재하된 부분에서는 유효좌굴길이가 커짐을 보이나, 활하중이 재하된 부분과 멀리 떨어진 부분에서는 고정하중에 의한 유효좌굴길이가 커짐을 알 수 있었다.
2. 휨모멘트가 크게 발생하는 부분에서는 현행식의 경우 주형 및 주탑의 활하중에 의해 증폭계수를 이용하여 개선식의 경우에는 증폭된 모멘트를 이용한 2차해석의 결과를 이용하므로 인하여 좌굴 안정성해석식의 휨부에서의 개선식이 더 작게 발생한다.
- 3 특히 주형 및 주탑의 활하중에 의해 발생하는 모멘트 증폭에 있어서 개선된 좌굴해석식의 경우, 2차 탄성해석의 결과를 사용함으로써 개선된 좌굴해석식이 합리적인 설계가 가능하리라 판단된다.

감사의 글

이 연구는 교량설계핵심기술연구단을 통하여 지원된 건설교통부 건설핵심기술연구개발사업에 의하여 수행되었습니다. 연구 지원에 감사드립니다.

참고문헌

- 경용수, 김문영, 장승필 (2005) 비탄성좌굴 고유치해석법을 이용한 케이블 지지교량의 유효좌굴길이 산정, 대한토목학회논문집, 제 25권, 제 4A호, pp.627-636
- 김문영, 송주영, 경용수, 김남일 (2005a) 탄성좌굴 고유치 및 2차 탄성해석법을 이용한 평면강철프레임의 개선된 좌굴설계법, 전산구조공학회논문집, 제 18권, 제 2호, pp159-168
- 김문영, 송주영, 경용수 (2005b) 탄성 및 비탄성 좌굴 고유치해석을 이용한 강뼈대구조의 유효좌굴길이, 전산구조공학회논문집, 제 18권, 제 2호, pp.169-179
- 대한토목학회 (2005) IV. 케이블 강교량 설계지침 작성 연구
- 한국도로교통협회 (2005) 도로교설계기준
- Iwasaki, H., Nogami, K., Nagai, M. (2001) Precision of Method for evaluation load-carrying capacity of long-span cable-stayed bridges and its ultimate strength check, *IABSE conference Seoul 2001*. IABSE, reports 84 110-117