

사장교 케이블 최적 장력 보정에 관한 연구 A Study for Finding Optimized Cable Forces of Cable Stayed Bridge

박대용 Park, Dae-Yong*[†]

(Received January 5, 2012 ; Revised January 24, 2012 ; Accepted February 6, 2012)

ABSTRACT

During construction of the cable-stayed bridge, not only shape of deck and pylon but also cable forces are main factors for geometry control. Especially, geometry control of deck must be controlled for adjusting design value of vertical and lateral alignment as well as closing of key segment. Also, both the deck level error and cable force error occur necessarily during the construction stage in cable stayed bridge. The errors are caused by different of material properties and computer modeling, and construction mistake, and so on. These causes bring about that the forces of cable and the displacement of deck show different tendency from the theoretical values. Therefore, these errors must necessarily be adjusted and can be improved through adjustment of cable length. In this study, a new optimization tool is proposed to adjust the errors of the second Dolsan cable-stayed bridge.

요 지

사장교의 시공에 있어서 보강형과 주탑의 형상 및 케이블 장력은 형상관리시 주요한 관리 항목이다. 특히 보강형의 형상은 Keg Segment의 원활한 폐합뿐만 아니라 계획된 종단 및 횡단 선형을 구현하기 위해 필수적으로 관리되어야 한다. 사장교에서 단계별 시공을 진행함에 따라 보강형 레벨과 케이블 장력 오차는 피할 수 없으며, 이러한 오차는 크게 재료 물성치와 모델링상의 오차, 제작 및 시공에 의해 발생하는 오차 등으로 나눌 수 있다. 이러한 오차로 인해 케이블의 장력과 구조물의 처짐 또는 변위가 이론적인 해석값과 다르게 나타나며, 이에 대한 보정은 케이블의 길이 조정으로 수행하게 된다. 본 연구에서는 제2돌산대교에서 사용된 오차를 보정하는 새로운 최적화 기법을 소개하고자 한다.

Key Words: Cable stayed bridge(사장교), Geometry control(형상관리), Deck level error(보강형 레벨 오차), Cable forceerror(케이블 장력 오차)

1. 서 론

사장교를 시공함에 있어 보강형과 주탑의 형상 및 케이블 장력은 형상관리시 매우 중요한 관리 항목이다. 특히 보강형의 형상은 Keg Segment의 원활한 폐합뿐만 아니라 계획된 종단 및 횡단 선형을 구현하기 위해 필수적으로 관리되어야 한다. 사장교에서 단계별 시공을 진행함에 따라 보강형 레벨과 케이블 장력 오차는 피할 수 없으며, 이러한 오차는 크게 재료 물성치와 모델링상의 오차, 제작 및 시공에 의해 발생하는 오차 등으로 나눌 수 있다. 이러한 오차로 인해 케이블의 장력과 구조물의 처짐 또는 변위가 이론상으로 해석한 값과 다른 경향을 나타내며, 이러한 오차는 케이블의 길이 조정함으로써 개선할 수 있다. 사장교 시공중 발생한 오차는 해당 케이블을 가설할 때 수정하는 방법과, 다수의 케이블이 설치된 이후 전체 케이블의 길이를 조정하는 방법으로 보정할 수 있다.

특히 제2돌산대교와 같이 콘크리트 현장타설로 보강형이 시공되는 경우 시공이 진행됨에 따라 발생하는

시간의존적 재료 특성(Creep 및 건조수축)은 설계상의 가정과 일치 할 수 없으며 이러한 영향으로 인해 케이블 장력 및 보강형 캠버 또한 시공단계해석상에서 가정된 값과 다른 경향을 보이게 된다. 또한 해석상 가정한 콘크리트 중량 및 케이블 도입 장력등은 시공오차 등으로 인해 이론값과 다른 값을 가지게 되며 시공 완료시까지 계속 누적된다.

따라서 제2돌산대교에서는 시공중 발생한 장력 및 보강형 형상오차를 여러 차례 보정하였으며 형상오차 보정을 위해 최적화 기법을 도입하고 Excel에서 제공하는 별도의 프로그램을 사용하여 오차보정 프로그램을 개발하였다. 본 연구에서는 중앙경간 Keg Segment 폐합전 PY2층의 케이블 및 보강형 형상오차 보정에 관한 내용을 소개하고자 한다.

제2돌산대교에 대해 간략히 소개하면 464m(주경간 230m)의 Edge Girder형식의 국내 최초 콘크리트 사장교로, Multi Strand 방식으로 설계되었으며 2010년 11월에 중앙경간이 폐합되었고 2011년 6월 교량의 주요 공정을 모두 완료 하였다. 그림 1은 제2돌산대교의 간략

*† 정회원·대림산업 기술개발원 특수교량팀 과장, 교신저자(dyPark@daelim.co.kr)

한 경간구성을 나타내며 그림 2는 제2돌산대교의 대표적인 보강형 단면도를 나타내었다. 그림 3은 2011년 12월 제2돌산대교의 전경을 나타내었다.

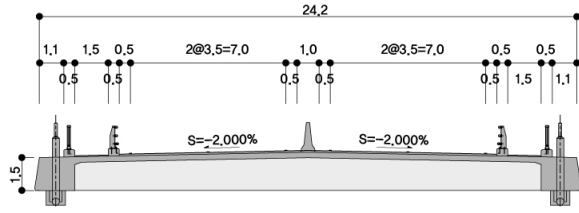


Fig. 2 제2돌산대교 보강형 단면도 (단위 : m)

2. 오차보정 최적화

2.1 영향행렬 (Influence Matrix)

사장교에서 케이블의 길이 조정을 통하여 전체 케이블 및 보강형과 주탑 형상에 대한 오차보정을 실시하게 될 경우, 오차를 보정하고자 하는 해당 구조계에서 개개의 케이블의 길이변화에 따른 장력, 또는 보강형 및 주탑 변위 형상에 대한 영향이 필요하며, 이를 행렬의 형태로 정리하여 활용하게 된다. 영향행렬은 해당 케이블이 단위길이로 줄었을 경우 오차를 보정하고자 하는 위치에서의 케이블 장력, 보강형 변위, 주탑변위를 산출하여 구성하게 된다.

2.2 최적화 방법

사장교 오차보정은 대상으로 하는 케이블장력과 보강형 및 주탑 변위 등의 개수가 조정변수인 케이블의 개수보다 많으므로 정해를 구하는 것이 아니라 목적함수를 최소화하는 기법으로 해결하게 된다. 목적함수는 조서경(2002), 임덕기(2009) 등이 제안한 함수들이 있으며, 본 연구에서는 인천대교 등에 적용된 동일한 목적함수 식 (1)을 적용하였으며 식 (2)와 같이 보강형 변위, 케이블 장력, 케이블 무응력장에 대해 제한조건을 부여하였다.

또한 오차 보정 최적화를 위해 인천대교의 경우에는 별도의 프로그램을 작성하였으나 여기서는 그림 4와 같이 엑셀에서 제공하는 Premium Solver의 해찾기 기능을 사용하였다. 엑셀에서 제공하는 기본 기능중 해찾기 프로그램은 식 (2)의 제한조건에 대해 개수 제한이 있어 별도로 Risk Premium Solver(Ver. 9.5) 별도로 구매하여 최적화를 수행하였다. 엑셀에서 제공하는 최적화 기법은 매우 편리할 뿐만아니라 수렴속도가 빠르며 누구나 쉽게 적용할 수 있는 장점이 있다.

$$\text{Min } \Pi = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^{n_m} \left(\frac{T_j^{\text{Target}} - T_j^{\text{Actual}}}{\alpha_j \cdot (T_{j \max} - T_{j \min})} \right)^2 + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{n_m} \left(\frac{u_i^{\text{Target}} - u_i^{\text{Actual}}}{\beta_i \cdot (u_{i \max} - u_{i \min})} \right)^2 \quad (1)$$

$$\text{subject to } u_{i \min} \leq u_i^{\text{Actual}} \leq u_{i \max}$$

$$\text{subject to } T_{j \min} \leq T_j^{\text{Actual}} \leq T_{j \max}$$

$$\text{subject to } \Delta L_{0 \min} \leq \Delta L_0 \leq \Delta L_{0 \max} \quad (2)$$

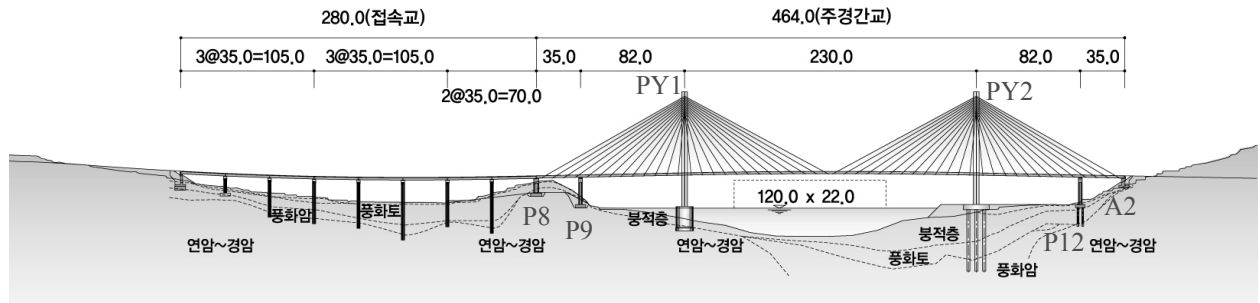


Fig. 1 제2돌산대교 경간구성 (단위 : m)



Fig. 3 제2돌산대교 전경 (2011. 12)

여기서, T_j^{Target} 은 케이블 목표장력, T_j^{Actual} 은 케이블에 실제 도입된 장력, T_{jMax} 는 케이블 장력오차를 최대값, T_{jMin} 은 케이블 장력오차를 최소값, α_j 는 케이블 장력 조정을 위한 가중치 값, u_i^{Target} 은 보강형 목표변위, u_i^{Actual} 은 보강형 실제변위, u_{iMax} 는 보강형 오차 최대값, u_{iMin} 은 보강형 오차 최소값, β_j 는 보강형 레벨 조정을 위한 가중치, ΔL_0 는 무응력장 변화값, $\Delta L_{0_{min}}$ 은 무응력장 변화 최소값, $\Delta L_{0_{max}}$ 는 무응력장 변화 최대값이다. 식 (1)에서 케이블 장력과 보강형 형상오차를 50%씩 균등하게 조정하기 위해 케이블 장력과 보강형 형상오차에 1/2을 곱하였으며 보정하고자 하는 목표가 케이블 장력일 경우에는 가중치 α_j 의 값을 낮게 설정하여 가중치를 부여하고 보정하고자 하는 목표가 보강형 형상이라면 가중치 β_j 의 값을 낮게 설정하여 가중치를 설정하면 된다. 각 현장에서 요구되는 수준에 따라 엔지니어가 판단하여 가중치를 설정하여야 하며 목표로 하는 오차범위를 만족하도록 여러 번의 반복과정을 거쳐야 한다.

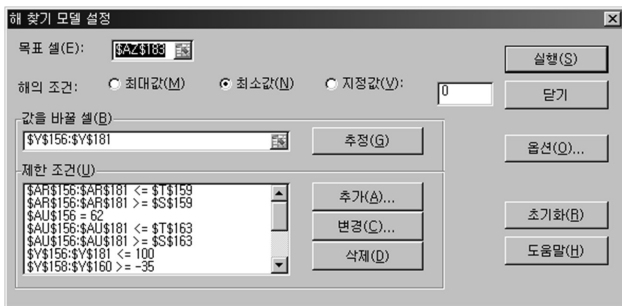


Fig. 4 Excel에서 제공하는 해찾기 프로그램

3. 제2돌산대교의 오차보정 예

제2돌산대교의 경우 교량 시공은 2기의 Form Traveler를 사용하여 PY1측의 보강형 시공을 완료한 후 Form Traveler를 이동하여 PY2측의 보강형을 시공하였으며, 중앙경간이 폐합되기 전 PY2의 전체 케이블에 대한 오차보정을 수행하였다.

표 1은 제2돌산대교의 PY2측 케이블 및 보강형에 대한 오차보정 과정을 나타낸 것이며 1~4단계까지 필요한 Input data를 입력하고 나면 5~7단계는 Excel Premium Solver를 통해 자동 계산된다. 7단계에서 설정한 오차범위 내로 수렴하지 않는 경우도 많이 발생하며 오차 범위 내로 수렴하지 않을 경우 4단계에서 설정한 오차의 제약조건을 적절히 변경하여야 하며 결정된 케이블 길이 변화량에 대해 현장에서 수행가능 여부 또한 적절히 판단하여야 한다.

그림 5는 제2돌산대교의 PY2 측 전체 보강형에 대하여 오차보정을 위한 관리기준치 및 현장 제약조건을 나타낸다. 관리기준치와 제약조건을 만족하는 범위에서 케이블 조정량을 산정하도록 하였으며, 몇가지 Case Study를 수행하였고 그 결과는 그림 6과 같다.

그림 6에서는 장력 및 변위 동시 수렴(Case 1), 측경간 케이블 조정량 “0” + Destressing 최소(Case 2), 측경간 조정량 “0” (Case 3)의 세가지 경우에 대한 최적화 수행 결과를 보여주고 있으며 현장에서 각 경우에 대해 최적으로 수행할 수 있는 Case 3을 선택하였다. 또한 Case 3을 선택한 중요 원인은 Destressing을 하지 않기 위함이다. MS-Cable 가설의 경우 Stressing시에는 한가닥씩 긴장함으로 인해 소형화된 Jack을 사용하는 장점이 있지만 Destressing을 할 경우에는 wedge가 물린 부분이 정착구 앞쪽으로 갈 경우 피로성능저하등의 문제로 인해 wedge를 빼고 한가닥씩 Destressing할 수 없게 설계기준(PTI, 2000 & FIB, 2005)에서 규정하고 있다. 따라서 MS-Cable에서는 Mutil-Jack을 사용하여 정착구에 설치된 Ring-nut을 돌려 도입된 장력을 줄이는

Table 1 제2돌산대교 오차 보정 과정

순서	내용
1. 구조물 현황 측량	▶ PY2측 전체 케이블 장력 측정 : Lift-off Test 수행 ▶ 케이블 위치의 보강형 Level 측량
2. 영향매트릭스 산정	▶ 각 케이블 길이가 -1.0m 줄어들때 각 케이블의 장력 변화량 산정 ▶ 각 케이블 길이가 -1.0m 줄어들때 각 지점별 보강형의 연직변위 변화량 산정
3. 목표장력 및 보강형 Level 입력	▶ 시공단계해석에서 산정된 목표로 하는 단계에서의 목표장력 및 보강형 Level 입력
4. 케이블 장력 및 보강형 Level 오차 허용치 설정	▶ 케이블 장력 오차 허용치 : -5% ~ 5% ▶ 보강형 Level 오차 허용치 : -50mm ~ +50mm
5. 식 (1)의 목적함수 계산	▶ 목적함수가 최소값이 되도록 수렴
6. 케이블 조정량 계산	▶ 무응력장 길이 조정량 계산 (Restressing 및 Destressing 량 모두 계산)
7. 케이블 장력 및 보강형 Level 오차 계산 및 수렴도 Check	▶ 허용 오차 이내로 수렴되지 않으면 허용오차 범위를 재조정후 5, 6, 7 과정 반복

Destressing 과정을 거쳐야 한다. 이러한 Destressing 과정은 많은 시간소요가 필요하며 위험한 작업이므로 가능한 케이블 장력 조정시 Destressing을 피해야 한다.

그림 7은 PY2측 케이블 26개중 10개에 대하여 장력 조정을 수행한 결과이며 목표장력과 실측장력과의 차이를 나타낸 것이다. CM13에서 최대 오차 4.9%가 발생하였으며 장력조정을 수행한 모든 케이블에 대해 표 1에서 설정한 오차범위 이내로 만족하였다. PTI (2000) 및 FIB bulletin 30 (2005)에서는 최종 장력에 대하여 목표장력 대비 $\pm 5\%$ 의 오차를 허용하고 있다.

4. 결론

본 연구에서는 사장교의 오차보정에 있어 별도의 프로그램을 작성하지 않고 최적화를 위한 제약조건의 적용 편리성 및 수렴도가 빠른 Excel Premium Solver를 사용하여 제2돌산대교 현장에 적용한 예를 소개하였다. 제약조건을 다르게 설정한 3가지 경우에 대한 Case Study를 수행하였으며 현장 여건을 반영하여 최적의 작업으로 오차를 보정할 수 있는 방법을 선택하였다. 오차 보정 후 PY2측 케이블 장력은 목표장력의 98~104% 수준으로 허용치인 95~105% 조건을 만족하는 것으로 나타났으며, 보강형의 Level도 관리기준치인 $\pm 50\text{mm}$ 조건을 만족하는 것으로 나타났다.

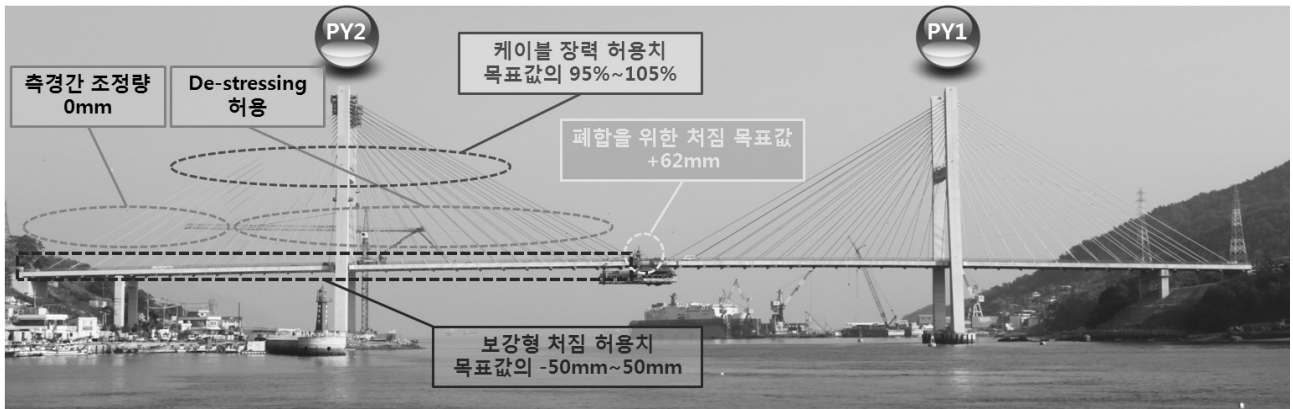


Fig. 5 PY2 측 전체 보강형에 대한 오차보정을 위한 관리기준치 및 현장 제약조건

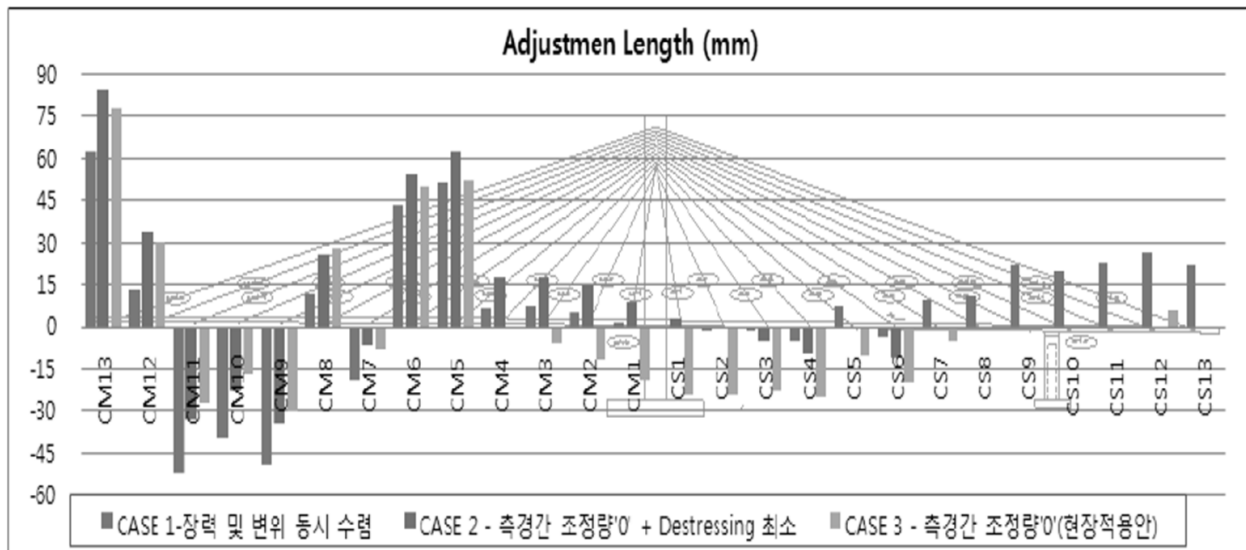


Fig. 6 PY2측 Case 별 오차 보정량 (단위 : mm)

본 연구는 콘크리트 보강형 사장교에 적용하였으나 강합성 사장교인 경우에도 충분히 적용가능하며 시공 중 발생한 형상오차 조정뿐만아니라 설계단계에서 주탑, 케이블 장력 및 보강형 단면력 분포의 최적화가 필요한 경우에도 매우 유용하게 적용될 수 있을 것이다.

9. Tanaka, H., Kamei, M., Kaneyoshi, M. (1987) Cable Tension Adjustment by Structural System Identification, *Proceedings of International Conference on Cable Stayed Bridges*, Bangkok Thailand, 18-20 November, pp.856-868.

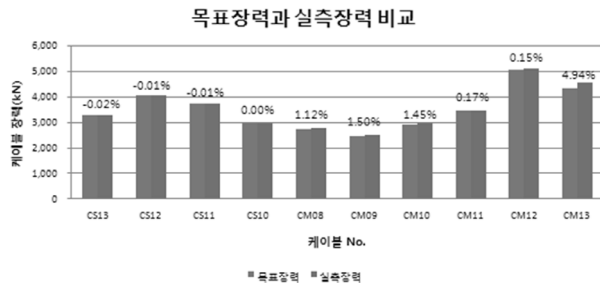


Fig. 7 PY2측 오차 보정후 케이블 장력 오차 분포

참고 문헌

1. 임덕기(2009) 사장교 시공중 오차 보정 시스템 개발 및 현장적용사례연구, 한국강구조학회학술대회 발표집, pp.105-108.
2. 조서경(2002) 사장교 쉐일레버 가설공법에서의 형상관리, 대한토목학회논문집, 제50권 제12호, pp.621-625.
3. Furukawa, K., Sugimoto, H., Egusa, T., Inoue, K. and Yamada, Y. (1987) Studies on Optimization of Cable Prestressing for Cable-Stayed Bridges, *Proceedings of International Conference on Cable-Stayed Bridges*, Bangkok, Thailand, pp.723-734.
4. Furuta H., Kanei M., Kanyyoshi M., Tanaka H. (1993) Optimum cable tension adjustment using fuzzy mathematical programming, *Proceeding of 2nd International Symposium on Uncertainty Modeling and Analysis*, IEEE, pp.506-513.
5. FIB bulletin 30 (2005) *Acceptance of stay cable systems using prestressing steels*, International Federation for Structural Concrete: Switzerland.
6. K. Jung, H.S. Lee (2008) Development of Geometry Control System for Cable-Stayed Bridges and Application to the Incheon Bridge, *Bridge Maintenance, Safety, Management, Health Monitoring and Informatics*, pp. 3431-3438
7. Kaneyoshi M., Tanaka H., Kamei M., Furuta H. (1990) New system identification technique using fuzzy regression analysis, *Proceeding of 1st International Symposium on Uncertainty Modeling and Analysis*, IEEE, pp.528-533.
8. PTI (2000) *Recommendations for stay cable design, testing and installation*, Post-Tensioning Institute: Phoenix, Arizona.