

외부강선으로 보강된 PSC 교량의 시공단계별 비선형 해석

Nonlinear analysis of PSC bridge with strengthened of externally tendon Considering Construction Sequences

박재근* · 이병주** · 김문영*** · 신현목****

Park, Jae-Guen · Lee, Byeong Ju · Kim, Moon-Young · Shin, Hyun Mock

ABSTRACT

This paper presents an analytical prediction of Nonlinear characteristics of prestressed concrete bridges by strengthened of externally tendon considering the work sequence, using beam-column element based on flexibility method and tendon element. The beam-column element was developed with reinforced concrete material nonlinearities which are based on the smeared crack concept. The fiber hysteresis rule of beam column element is derived from the uniaxial constitutive relations of concrete and reinforcing steel fibers. The tendon element represent the bonded tendon and unbonded tendon behaviors. Beam-column element and tendon element was be subroutine A computer program, named RCAHFEST (Reinforced Concrete Analysis in Higher Evaluation System Technology), for the analysis of RC and PSC structures was used. The proposed numerical method for prestressed concrete structures by strengthened of externally tendon is verified by comparison with reliable experimental results.

keywords : *prestressed concrete, work sequence, fiber beam-column element, unbonded tendon element, smeared crack*

1. 서론

대부분의 PSC 교량 건설시 동시에 콘크리트의 타설과 PS 긴장재를 긴장하는 작업을 같이 할 수 없으므로 콘크리트 타설후 일정한 시간이 경과한 후 PS 긴장재를 긴장하게 된다. 또한 거더 교량에서 노후화로인해 감소된 내하력을 회복시키거나, 성능개선을 위하여 가장 빈번하게 적용되는 방법이 거더의 측면에 긴장력을 도입하는 외부강선보강공법(External Prestressing Strengthening Method)을 사용하게 된다. 이 공법은 다양한 연구를 통하여 그 효과가 분석되고 있지만, 품질관리 등을 포함한 규정이 정립되지 못하여 장기간 공용될 경우 긴장력이 소실되는등 부분적으로 문제점이 야기되고 있다. 따라서 이 연구에서는 외부강선보강을 한 PSC Beam 교량에 대하여 외부프리스트레싱 효과에 의한 교량의 거동에 미치는 영향을 해석적으로 추적하

* 성균관대학교 건설환경시스템공학과 박사후연구원 Email: parkjg@skku.edu

** 한국도로공사 도로교통기술원 과장 공학박사 Email: vante@freeway.co.kr

*** 성균관대학교 건설환경시스템공학과 교수 Email: kmye@skku.ac.kr

**** 성균관대학교 건설환경시스템공학과 교수 Email: hmshin@skku.edu

였다. 또한 외부강선을 단계적으로 파단시킴으로서 발생하는 교량은 강도 저하 및 다시 외부 보강을 하였을 경우 발생하는 강도증가 등 역학적 거동을 추정하고자 한다.

PSC 구조물중 많은 수의 구조물에 비부착된 텐던이 사용되었으며 또한 기존 콘크리트구조물의 보강에 외부 프리스트레스트공법이 사용되고 있다. 이러한 비부착된 텐던은 콘크리트와 일체로 거동하지 않기 때문에 단면의 변형도 적합조건으로 긴장재의 응력을 추정할 수 없으며 구조물의 변형에 영향을 미치지 않기 때문에 이러한 비부착 텐던을 고려할 수 있는 유한요소 프로그램의 개발이 필요하다.

이 연구는 부착 및 비부착 텐던 요소와 유연도법에 근거한 보-기둥 요소를 이용하여 시공단계별 해석을 수행하였다. 부착 및 비부착 텐던요소는 유연도법에 근거한 보-기둥요소와의 조합을 통하여 직선 및 곡선으로 배치된 부착 및 비부착 PSC 구조물의 거동을 해석적으로 콘크리트의 균열, 철근 및 텐던의 항복 및 구조물의 극한하중을 해석적으로 추정할 수 있을 것이다.

2. 비부착 텐던 모델

2.1 개요

부착 프리스트레스트 콘크리트 보의 경우 긴장재와 주변 콘크리트가 부착되어 있음으로써 외력 하에서의 긴장재의 변형률 변화량과 콘크리트의 변형률의 변화량이 동일한 반면, 비부착 프리스트레스트 콘크리트 보에서는 긴장재와 콘크리트사이에서 비부착으로 인하여 미끄러짐이 생기기 때문에 긴장재 변형률 변화와 주변 콘크리트의 변형률 변화가 다르게 된다. 텐던의 응력은 콘크리트와 긴장재가 부착되어 있지 않기 때문에 부재 전체길이의 변형을 고려해야 한다.

이 연구에서는 그림 1과 같은 비부착 텐던을 갖는 보를 그림 2와 같이 비부착 텐던 전체를 하나의 여러 절점을 갖는 텐던 요소로 표현하였다. 텐던 주변의 콘크리트를 모사하는 콘크리트 요소와 다절점 텐던 요소와의 조합을 통하여 비부착 텐던을 갖는 PSC구조물의 거동을 모사할 수 있도록 하였다(박재근, 2006).

다절점 텐던요소는 모체 요소와 공유하는 각 절점에서의 편심 및 기울기를 이용하여 텐던 요소의 강성을 구성하며 각 절점에서 텐던의 변위는 모체 요소와 동일하지만 텐던의 변형률은 다절점 텐던요소 전체의 변위를 텐던 전체의 길이로 나누어 모든 텐던요소내의 변형률을 동일하게 유지하여 비부착텐던을 모사하였다(박재근 등, 2006).

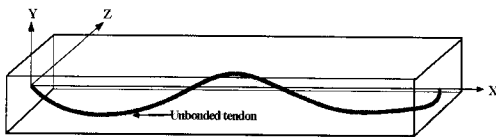


그림 1. 비부착 텐던을 갖는 PSC 보

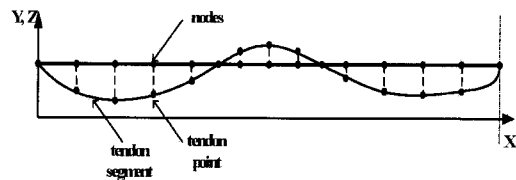


그림 2. 비부착 텐던을 갖는 PSC 보의 이상화

2.2 텐던요소

텐던요소는 변형전 텐던의 위치벡터와 변형후 텐던의 위치벡터를 이용하여 유도하였다. 텐던 요소 유도에

서 전단변형과 고차항은 무시하였으며 최종적으로 n개의 요소와 n+1개의 절점을 갖는 비부착 텐던요소의 변형률(ϵ_{ps})은 다음 식으로 계산할 수 있다.

$$\epsilon_{ps} = \frac{{}^tL - {}^0L}{{}^0L} = \frac{\sum_{k=1}^n \int_0^{i_k} \frac{A_k}{\alpha_k} dx}{\sum_{k=1}^n \int_0^{l_k} \alpha_k dx} \quad (1)$$

비부착 PSC 구조물 속의 텐던의 응력-변형률 관계는 콘크리트와 텐던사이의 마찰을 무시하면 텐던만의 응력-변형률 관계와 거의 같게 나타난다. 이 연구에서는 비부착 텐던의 재료거동을 텐던의 항복 후 거동은 일정한 변형률 경화율을 갖는 것으로 trilinear 모델을 사용하여 고려하였다.

3. 유연도법 3차원 보-기둥 요소

3.1 개요

유연도법에 근거한 보-기둥 요소는 하중이 재하되는 동안 변형 전 평면이 변형 후에도 평면을 유지한다는 가정을 전제로 하고 있다. 요소정식화는 혼합법(mixed method)를 기초로 한다. 즉 요소정식화는 요소내에서 평형을 만족하는 내력의 분포함수를 표현하는 것으로부터 적분점에서 단면변형률에 대응하는 요소형상함수를 선택한다. 유연도법에 근거한 보-기둥 요소는 다음과 같은 특징을 갖는다.

요소에서 평형조건 및 적합조건이 항상 만족된다. 평형조건은 요소 단부에서 작용하는 하중조건을 만족하는 힘보간함수로부터 적분점에서 단면력을 구함으로써 만족되고 적합조건은 각 적분점에서의 단면변형률을 요소 길이를 따라 적분하여 이에 상응하는 요소변위를 얻음으로써 만족된다. 이때 비선형 단면력-단면변형률 관계가 수립할 때까지 반복해법이 적용된다.

3.2 파이버 보-기둥 유한요소

3차원 PSC 골조 구조물의 비선형 해석을 위해 파이버기법을 사용한다. 파이버기법에서는 요소를 단면의 중심과 일치하는 하나의 선요소로써 모델링하고 요소의 단면을 여러개의 파이버들로 나눈다. 각 파이버의 변형은 변형전 평면인 단면은 변형 후에도 평면을 유지한다는 가정을 이용해서 계산할 수 있다. 요소의 축을 따라서 각각의 파이버 변형률에 상응하는 거동은 국부적인 거동을 나타내는 재료의 축방향 구성모델로부터 구할 수 있다.

이 파이버들의 거동을 적분해서 각 요소의 거동을 예측할 수 있으며 모든 요소의 거동을 조합해서 전체 구조물의 거동을 알 수 있다. 따라서 요소의 비선형 특성은 기본적으로 파이버의 응력-변형률 관계에 의존한다.

콘크리트의 해석모델은 탄소성 파괴모델을 기초해서 구축되었다(Maekawa and Okamura, 1983). 콘크리트의 역학모델은 등가응력-등가변형률 관계를 초기탄성계수, 파괴 배개변수, 등가 소성변형률의 향으로 표현한다.

콘크리트에서 비선형 거동의 첫 번째 분기점은 콘크리트에서 균열의 발생 시점이다. 균열을 정확하게 추정하는 것은 균열 발생 원인의 다양성 등으로 인해 매우 어려우나 이 연구에서는 콘크리트 인장응력만을 균

열발생기준으로 취하고 기타의 영향은 콘크리트 일축인장강도를 수정하는 것으로 고려한다.

콘크리트는 균열이 발생한 후에도 철근과 콘크리트의 부착작용에 의해서 균열면의 직각방향으로 응력의 일부분을 부담한다. 이와 같은 균열직각방향으로의 인장강성효과를 고려하기 위해서, 철근콘크리트부재의 일축인장실험을 기초로 한 실험식을 Okamura등이 균열직각방향의 인장변형률의 함수로써 제안한 부착모델을 기본적으로 적용한다. 부착모델의 적용은 균열직각방향에 대하여 적용하지를 않고 원 실험식에서와 같은 조건인 철근의 축방향에 대하여 적용하였다.

4. 비선형 유한요소해석 프로그램

이 연구에서는 철근콘크리트 평면응력요소, 그리고 경계면요소 등을 이식하여 모듈화된 비선형 유한요소 해석 프로그램 RCAHEST (Reinforced Concrete Analysis in Higher Evaluation System Technology)을 사용하였다.

RCAHEST 프로그램은 일차원, 이차원, 그리고 삼차원 요소망을 정의할 수 있고, 여러 가지 선형 및 비선형 해석 알고리즘을 갖고 있으며 해석결과와 다양한 그래픽 처리가 가능하다. 또한 선형 및 비선형 Solid 요소, 2차원 및 3차원 골조요소, 판 및 셸 요소 등을 갖추고 있으며 선형, 점탄성, 그리고 소성 등의 구성방정식을 포함하고 있다.

이 연구에서는 RCAHEST 프로그램에 추가된 박재근(2006)이 개발한 비부착 텐던요소와 유연도법에 근거한 보-기둥요소(이준희, 2000)와의 조합을 이용하여 외부강선으로 보강된 PSC 구조물을 시공단계를 고려하여 해석을 수행하였다.

5. 외부 강선으로 보강된 PSC보의 비선형 해석

해석 대상체인 교량은 고속도로에서 27년 동안 공용되었던 PSC I 거더 시험체(이병주 등, 2006)이며 하중 효과에 의한 교량의 거동을 분석하고 사용하중 및 극한하중에 대한 내하능력을 살펴보고자 한다. 또한, 인위적으로 손실을 유도하기 위하여 거더 중앙부의 PS 강선을 절단하였으며, 절단된 량만큼을 외부강선으로 보강한 다음 보강전후의 거동을 분석하여 보강효과가 얼마나 나타나는지를 실험하였다.

시험체의 형상, 하중재하 및 변위 측정지점은 그림 3과 같다. 교량의 긴장재 배치 형상은 그림 4에 나타내었다. 시험체의 길이는 26.2m이며, 기존 교량의 거더를 절삭 인양한 관계로 상부바닥판과 일체로 된 형상이다.

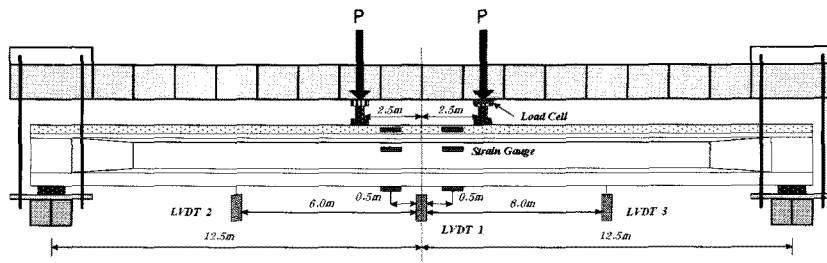


그림 3 시험체 형상, 하중재하 및 측정위치

교량 단면, 철근 및 텐던의 위치는 그림 5에 나타내었다. PS강선은 그림 5과 같이 총 6개로 구성되어 있고 단계별 시공에 의해 단부 정착부가 3단, 상부 정착부가 3단으로 구성되어 있다.

콘크리트의 압축강도는 바닥판의 경우 평균 34MPa, 기둥은 37MPa로 설계강도보다 크게 나타났으므로 구조해석시 안전측인 해석을 위하여 설계강도인 32MPa, 35MPa를 각각 사용하도록 하였다. 내부 및 외부 PS강선은 항복강도 1,352MPa, 1580MPa 이며 인장강도는 1,599MPa, 1,854MPa이다. 내부 및 외부 강선은 12φ8, 7φ12.7이며, 긴장력은 본단 760kN, 490kN이다(이병주 등, 2006).

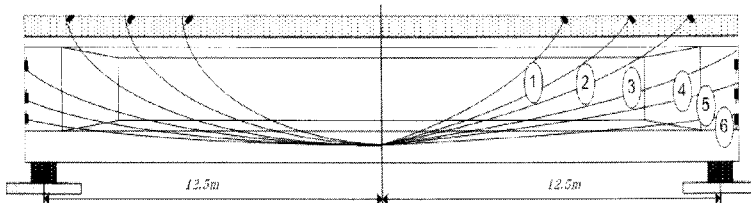


그림 4 긴장재의 배치형상

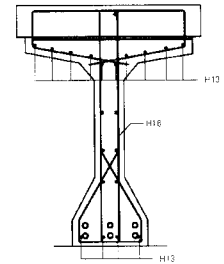


그림 5 단면형상, 철근 및 텐던 배치도

PSC 교량의 모델링은 16개의 보-기둥요소를 이용하여 PSC 거더를 모사하였으며 부착 텐던 요소를 이용하여 내부 텐던을 모델링하였다. 외부 보강 텐던은 비부착 텐던을 사용하여 모델링하였다. 해석은 실험과 같이 단계별로 수행하였다.

우선 초기 상태에서 하중재하로 인한 거동을 해석하여 그림 6에 실험결과와 비교하였다. 그 후 내부 강선 두개를 자른 후 실험결과와 비교하기 위하여 내부 강선을 제거한 후 해석한 결과를 그림 7에 나타내었다. 그 후 외부강선보강기법으로 보강한 실험결과와 해석결과를 그림 8에 나타내었다. 해석결과 부착된 텐던이 곡선으로 배치된 PSC 구조물의 거동뿐만 아니라 외부 강선에 의해 보강된 을 비부착 텐던 요소를 사용한 해석이 시험체의 거동을 잘 추적하는 것을 알 수 있으며 실험시 측정되지 못한 극한하중을 해석적으로 추적하였

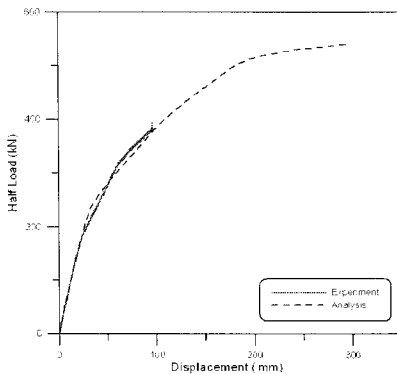


그림 6 초기상태의 해석결과

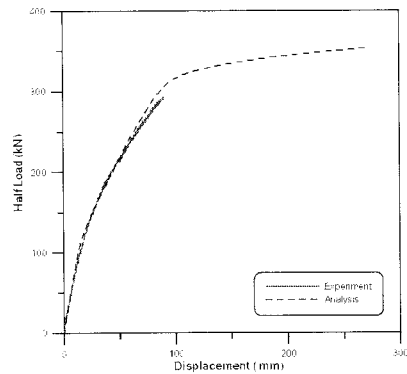


그림 7 Cutting후 중앙점 해석결과

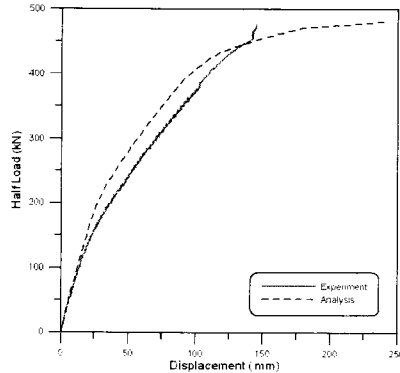


그림 8 보강후 중앙점 해석결과

다. 강선절단 전의 비선형 해석에 의한 파괴양상은 부재 중앙의 콘크리트 상단면 압축파괴이며 극한 모멘트의 크기는 $5,400\text{kN}\cdot\text{m}$ 이며 내부강선의 응력은 $1,373\text{MPa}$ 이다. 따라서 극한 모멘트가 PS 긴장재의 인장파괴가 아닌 거더 상단 콘크리트의 압축파괴에 의해서 결정된 것으로 내부강선의 f_{ps} 는 항복응력 이하임을 알 수 있다. 내부 강선 절단후 외부강선으로 보강후 극한모멘트는 $4,800\text{kN}\cdot\text{m}$ 이며 내부 강선의 응력은 $1,393\text{MPa}$, 외부강선의 응력은 $1,006\text{MPa}$ 로 각각 해석되었다. 따라서 PSC거더교는 파괴상태에 도달시 외부강선의 응력은 탄성범위내에 있음을 알 수 있다.

6. 결론

이 연구에서는 모듈화된 비선형 유한요소해석 프로그램 RCAHEST(Reinforced Concrete Analysis in Higher Evaluation System Technology)의 구성 요소 중 저자 등이 개발한 비부착 텐던 요소와 유연도법에 근거한 보-기둥요소를 이용하여 실제 건설된 PSC I 거더교의 실제 거동뿐만 아니라 내부 강선의 절단으로 인한 교량의 강성저하 및 외부상선으로 보강된 교량의 거동을 실험과 해석을 비교함으로써 개발된 프로그램의 유효성을 검증하였으며 해석결과의 분석을 통하여 파괴시 내부 및 외부강선의 응력을 검토할 수 있다.

감사의 글

본 논문은 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행한 2006년도 건설기술기반구축사업(과제번호 : 06첨단융합-E01)의 지원으로 이루어 졌음을 밝히며 지원에 감사드립니다.

참고문헌

- 박재근 (2006) 텐던이 비부착된 프리스트레스 콘크리트 구조물의 극한 거동해석, 박사학위논문, 성균관대학교
- 이병주, 신재인, 박창호, 이원태 (2006) PSI 거더교의 내·외부 프리스트레스 긴장재에 대한 구조실험, 대한 토목학회 정기학술대회, pp.2471~2474.
- 이준희 (2000) 유연도법에 의한 지진하중을 받는 3차원 R.C 골조구조물의 비선형 해석, 박사학위논문, 성균관대학교, 2000.