

재료 비선형을 고려한 PSC I형 거더교의 내하력평가 기법에 관한 고찰

A Study on the Evaluation Methods of the Load-Carrying Capacity of PSC I Type Girder Considering Material Nonlinear

심종성^{*} 김규선^{**} 문도영^{***} 주민관^{****}
Sim, Jong-Sung Kim, Gyu-Seon Moon, Do-Young Ju, Min-Gwan

ABSTRACT

Nowadays, It has adapted both Ultimate Strength Design(USD) and Allowable Stress Design(ASD) Method evaluating load-carrying capacity of PSC I Type Girder Bridge. But it has confused because the each method has brought some different results.

This study shows some results of loading test of the PSC I type Girder Bridge and analyzed the structural behavior by FEM analysis considering material nonlinear. Parametric study of effective prestress of post tendon is performed and compared to results of loading test.

1. 서론

최근 들어 도시의 복잡화와 유동인구의 증가로 인해 기존 교량에 설계된 차량 하중이 대형화 및 다양화함에 따라 교량에 심각한 손상을 주고 있다. 이에 대해 기존 교량의 유지관리 측면상 교량의 손상도를 정량적으로 평가하기 위해 내하력 측면에서의 연구가 활발히 진행되고 있다. 현재 대표적으로 사용되고 있는 내하력 평가는 크게 두 가지로 나뉘어진다. 즉, 강구조물에 주로 사용되는 허용응력 설계법(ASD)과 RC 구조물에 주로 적용되는 강도설계법(USD)이 현재 범용적으로 사용되는 내하력 평가방법이다. 반면 PSC 구조물에 대한 내하력 평가는 상기 서술된 각각의 평가방법을 혼용하고 있으며, 일반적으로 사용성 측면에서의 평가로 허용응력법에 의한 평가를 적용하고, 안전도 측면에서의 평가는 강도설계법에 의한 평가를 적용하고 있어 기술자가 PSC 거더의 내하력 평가시 평가결과에 대한 혼란을 유발하고 있다. 따라서 본 논문에서는 재료비선형 및 기하비선형을 고려한 FEM 모델을 적용하여 PSC 구조물의 실제적인 거동을 모사하였으며, 해석결과를 한국시설안전기술공단에서 수행한 실교량 파괴실험 및 내하력평가 결과와 비교·검증하였다. 또한 검증된 모델을 토대로 PSC 거더의 내하력에 가장 큰 영향을 미치는 인자인 유효프리스트레스(P_e)의 변화에 따른 영

* 정회원, 한양대학교 토목·환경공학과 교수

** 정회원, 한국 시설안전기술공단 교량 2실 차장

*** 정회원, 한양대학교 토목·환경공학과 박사과정

**** 정회원, 한양대학교 토목·환경공학과 석사과정

향을 고찰하였다. 또한 비선형 해석결과를 토대로 한 대상 교량의 내하력 평가방안을 제시하였으며, 그 결과를 기존의 허용응력설계법 및 강도설계법에 의한 내하력 평가결과와 비교·검토하였다.

2. PSC 구조물의 내하력 평가

PSC 구조물의 내하력을 결정하는 주요한 인자인 유효 프리스트레스의 양을 산정하는 방법의 합리성이 내하력 평가에 있어서 매우 중요하다. 그러나 이는 시공상의 조건이나 콘크리트의 건조수축, 크리프 등에 따라 변화하기 때문에 정확한 값을 구하기는 어려운 실정이다.

다음은 PSC 내하력 평가에 대표적으로 사용되는 내하율(R.F) 평가식을 나타내었다.

① 강도설계법(USD)

$$R.F = \frac{\phi M_n - \gamma \cdot M_d}{\gamma_l \cdot M_{(l+i)}}$$

② 허용응력 설계법(ASD)

$$R.F = \frac{\sigma_a - \sigma_d + \sigma_p}{\sigma_{(l+i)}}$$

본 절에서는 PSC I형 교량의 비선형 해석을 검증하기 위하여 한국 시설안전기술공단에서 수행한 바 있는 「교량 정밀안전진단 및 통과허용하중 산정기법 개선」의 과업중 교량의 파괴시험 및 내하력 평가결과를 인용하였으며 그 결과를 다음과 같이 정리하였다.

대상교량은 2차선 PSC I형 교량으로 6경간, 길이 180m(6@30)의 교량이다. 내하력 평가를 위하여 차량 재하시험을 실시한 후, 대상교량의 내하력 검증을 위하여 극한강도까지의 파괴시험을 수행하였다. 파괴시험은 최외측 거더 1개소를 대상교량으로부터 분리하여 수행하였으며, 비파괴 검사 등을 획득된 재료의 역학적 성능은 다음의 표 1.과 같다.

표 1. 사용된 재료의 역학적 물성치

구분	탄성계수 kgf/cm^2	압축강도 kgf/cm^2	항복강도 kgf/cm^2	비고
콘크리트	2.8×10^6	350	-	-
텐던	2.0×10^6	-	13,500	$\phi 12.7mm \times 12$ 선
철근	-	-	3,000	D16

다음의 그림 1.은 유압재과 앵커를 이용한 현장재하시험 전경을 나타내고 있으며, 다음의 표 2.는 대상교량의 허용응력설계법 및 강도설계법 개념에 기초한 내하력 평가결과를 나타내고 있다.

표 2. 대상교량의 휨내하율

(a) 허용응력설계법(kgf/cm^2)

구분	σ_a	σ_d	σ_p	$\sigma_{(l+i)}$	R. F.	
외측 주형	상 연	144.0	130.89	46.27	17.12	3.46
	하 연	28.5	123.21	145.56	38.78	1.31

(b) 강도설계법(kgf/cm^2)

구분	ϕM_n	M_d	$M_{(l+i)}$	R. F.
외측주형	903.62	346.68	149.32	1.42

3. 비선형해석 재료모델 및 개요

본 해석에 사용된 비선형 재료모델은 다음과 같다.

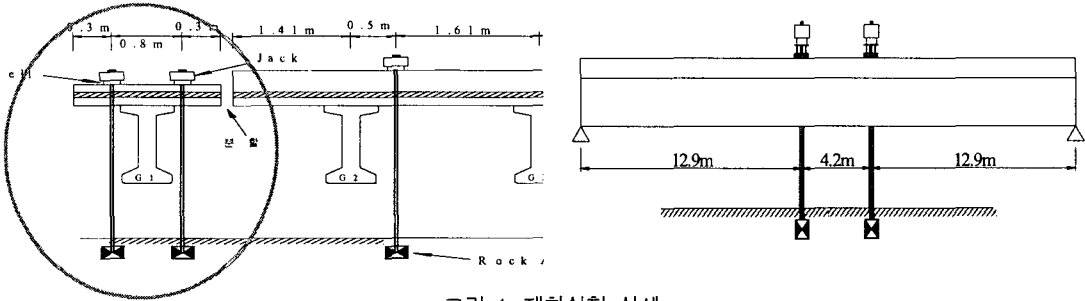


그림 1. 재하실험 상세

1) 콘크리트

일반적으로 분산균열모델을 구조물의 하중-처짐관계를 예측하는데 적절한 것으로 알려져 있으므로, 본 연구에서는 대상교량의 비선형해석시 콘크리트의 균열모델은 분산균열모델을 적용하도록 한다.

본 연구에서는 고강도 콘크리트의 압축응력-변형률의 변화를 적절히 표현할 수 있는 그림 2.와 같이 Thorenfeldt et. al이 제안한 압축응력-변형률선도(식1 참조)를 이용하여 콘크리트의 비선형 거동을 모델링 하였다. 또한 콘크리트의 인장응력-변형률 관계에서 최대인장응력에 대한 변형률은 휨 상태에서 대략 0.00014~0.0002사이의 값을 나타내며, 일반적으로 균열발생전까지는 인장응력이 선형증가하나 균열이 발생한 후에는 잔류인장응력을 고려하여 지수형태의 응력-변형률관계로 나타난다. 본 연구에서는 균열단면에서의 휨거동을 파악하고자 Scanlon 및 Scordelis 등이 제안한 그림 3.과 같은 bilinear 형태의 응력-변형률 선도를 적용하였다.

2) 긴장재

본 연구에서는 PS강재의 응력-변형률관계를 표현하기 위하여 약 1% 내외의 실제적인 응력-변형률 곡선을 모델링할 수 있는 Ramberg-Osgood함수를 이용하여 Mattock가 제안한 식(2)를 사용하였다.

(그림 4. 참조)

3) 해석개요

본 해석은 범용구조해석 프로그램인 ABAQUS를 사용하였으며, 해석에 사용된 각 재료의 물성치는 상기한 표 1.의 값을 사용하였다. 본 해석은 고정하중단계, 프리스트레스 도입단계, 활하중 단계로 총 3단계로 나누어 해석하였으며, 바닥판 및 거더는 모두 Solid로, PS강재는 Solid Element(콘크리트)내에서 Layered 개념의 Rebar로 모델링 하였으며 대상교량의 잔존내하력을 평가하기 위해서 모든 프리스트레스 손실이 발생한 PS강재의 유효프리스트레스력을 균열개폐법에 의하여 조사된 값(6,113kgf/cm²)을 사용하여 Rebar의 Initial prestress로 고려한 후 비선형 해석을 수행하였다. 다음의 그림 5.는 대상교량의 유한요소모델을 나타내고 있다.

$$\frac{f_c'}{f_c} = \frac{n \left(\frac{\epsilon_c'}{\epsilon_c} \right)}{n - 1 + \left(\frac{\epsilon_c'}{\epsilon_c} \right)^{n \cdot k}} \dots \dots \dots \text{(식 1)}$$

f_c' = 콘크리트의 최대압축응력
 ϵ_c' = f_c' 가 f_c 에 도달할 때의 변형율(0.00213사용)
 n = 곡선적합계수(본과업에서 3.20사용)
 k = 최고점 후의 응력 감소계수(1.34 사용)

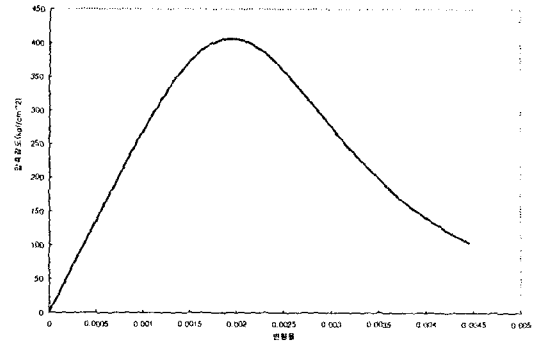


그림 2. 콘크리트의 압축응력-변형율선도

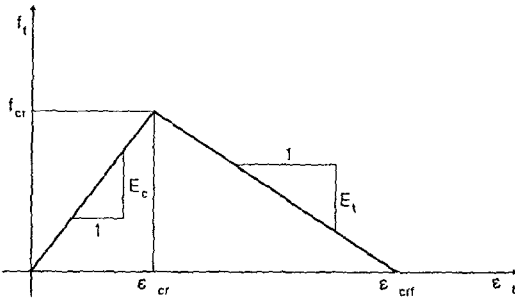


그림 3. 콘크리트의 인장응력-변형율선도

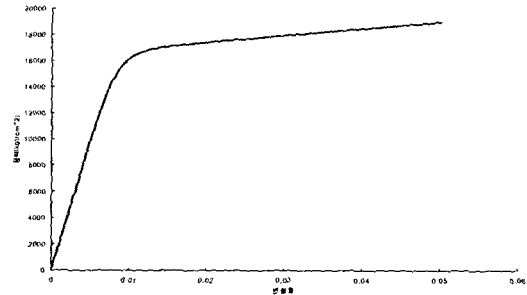


그림 4. 적용된 PS강재 응력-변형율 선도

$$f_p = \epsilon_p \cdot E_p \left[Q + \frac{1-Q}{(1+\epsilon^{*p})} \right] \leq f_{pu} \dots \dots \text{(식 2)}$$

$$\epsilon^* = \frac{\epsilon_p E_p}{K f_{py}}, \quad Q = \frac{f_{pu} - K f_{py}}{\epsilon_{pu} E_p - K \epsilon_{py}} \quad (Q=0.027)$$

K, R = 계수 ($K=1.04, R=6.5998$)
 f_{py} = PS강재의 항복응력 ($16,000 \text{ kgf/cm}^2$)
 f_{pu} = PS강재의 극한응력 ($19,000 \text{ kgf/cm}^2$)
 E_p = PS강재의 탄성계수 ($2.0 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$)
 ϵ_{pu} = PS강재가 극한 항복강도에 도달했을 때의 변형율

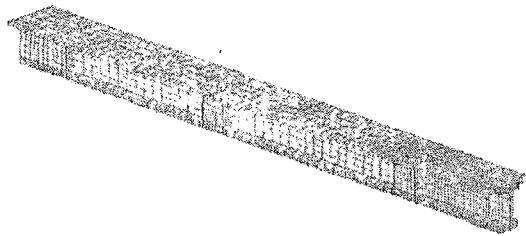


그림 5. 대상교량의 유한요소 모델

4) 비선형 해석결과 및 유효프리스트레스의 변화에 대한 영향 고찰

PSC 구조물의 파괴시까지의 거동은 크게 3단계로 1단계는 콘크리트에 초기균열이 발생하기까지이며, 2단계는 철근의 항복단계, 3단계는 PS 강재의 항복단계로 구분된다. 본 해석 결과 하중-변위곡선은 다음의 그림 6.에 파괴시험결과와 비교하여 나타내었다. 본 해석모델에서는 철근을 고려하지 않았으므로 철근의 항복에 의한 변위의 증가는 뚜렷하게 볼 수 없다. 균열하중 전·후의 모든 하중단계에서 실험결과가 해석결과 보다 큰 것을 알 수 있다. 이와 같은 해석과 실험과의 차이의 원인은 대상 교량의 콘크리트의 열화상태, PS 강재의 완전부착여부에 대한 고려 등에 기인한 것으로 사료된다.

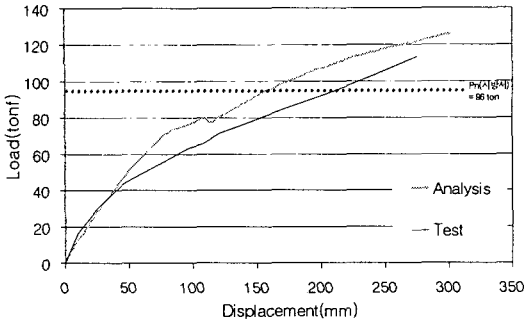


그림 6. 파괴시험의 하중-변위 곡선 및 해석결과

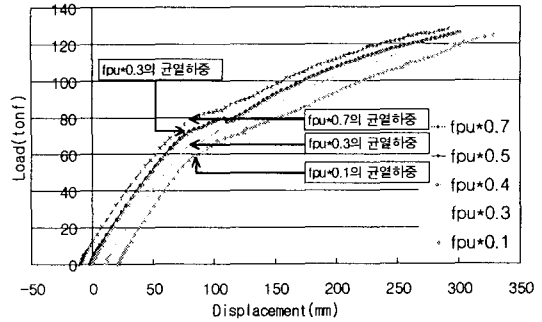


그림 7. 유효프리스트레스의 변화에 따른 하중-변위 곡선

그림 7.은 본 해석모델의 유효긴장력의 변화에 대한 영향을 고찰하기 위하여 PS강재의 도입인장력을 강재 극한응력의 0.1, 0.3, 0.5, 0.7로 하였을때의 극한하중까지의 하중-변위곡선을 나타내고 있다. 유효긴장력이 $1,550\text{kgf/cm}^2$ 인 경우 1.5cm의 하향 처짐이 발생하는 것으로 나타났다. 해석결과 유효긴장력의 크기가 클수록 균열하중은 크게 나타났으며, 극한강도 및 처짐은 큰 차이가 없는 것을 알 수 있다. 따라서 사용하중상태인 초기하중단계에서는 유효긴장력이 변화함에 따라 균열하중의 변화가 큰 것으로 나타나 허용응력설계법에 의한 내하력평가의 경우 사용성 평가에 유효한 것을 알 수 있다.

그러나 강도설계법에 의한 내하력 평가시 유효프리스트레스의 변화는 내하력에 영향을 미치지 않는 것을 알 수 있다. 따라서 허용응력법에 의한 내하력 평가시 유효 프리스트레스력을 합리적으로 산정하는 것이 평가방법의 신뢰도에 크게 영향을 미친다는 것을 알 수 있다.

4. 비선형 해석 결과를 토대로 한 내하력 평가

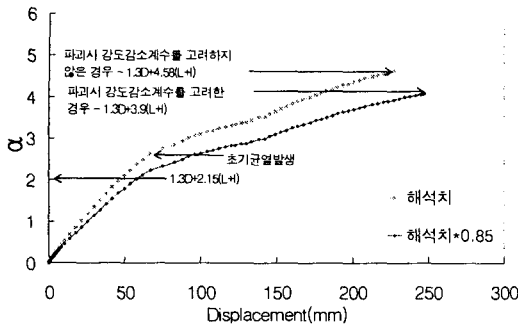
본 장에서는 상기한 바와 같은 재료비선형을 고려한 유한요소 모델을 토대로 내하력 평가를 수행하였다. 적용된 재료비선형 모델은 언급한 바와 같으며, 하중계수를 고려한 재하하중은 고정하중의 경우 도로교 설계기준에서 제시한 하중계수 1.3을 고려하여 프로그램에서 처리하였으며, 활하중의 경우 3절의 내하력 평가시 적용된 절대 최대휨모멘트 발생위치에 충격계수를 고려하여 DB-18의 설계활하중을 적용하였다.

비선형해석의 경우 탄성해석과는 달리 하중의 크기에 따라 구조물의 거동이 다르게 나타난다. 따라서 본 해석시 사용된 하중조합은 다음의 (식 3)에 나타난 도로교 설계기준의 계수상태 하중조합을 바탕으로 하중계수를 파라미터 α 로 설정하고, α 값을 0부터 수렴성이 허용하는 범위내에서 증가시켜 가면서 파괴가 발생할 때까지 해석을 수행하였다.

$$1.3D + \alpha(L+I) \quad \text{식(3)}$$

다음의 그림 8.에는 계수 α 의 증가에 따른 α -처짐선도를 나타내었다. 그림 8.의 처짐은 유효긴장력에 의한 상향처짐 상태를 0으로 설정하여 나타내고 있다. 그림에 제시된 결과는 이론적인 값으로서 안전을 고려한 실제 설계강도는 강도감소계수를 적용하여 시공, 재료상의 오류로 인한 안전율을 고려할 필요가 있다. 따라서, 대상 교량의 파괴모드는 휨파괴이므로 강도감소계수인 0.85를 적용하여 비선

형 해석을 토대로 한 PSC I형 거더의 내하력을 평가하였다. 상기 2절의 강도설계법의 내하력 평가식을 본 해석과 연관시켜 검토해보면 현재 대상 거더의 내하력은 다음과 같다.



$$RF = \frac{\phi \cdot a \cdot (L+I)}{\gamma_l \cdot L(1+i)} = \frac{0.85 \cdot 4.58 \cdot (L+I)}{2.15 \cdot (L+I)} = 1.81$$

그림 8. 강도감소계수가 고려된 하중-변위관계

따라서 비선형 해석을 토대로 산정된 대상교량의 내하율은 1.81로써 탄성해석에 의한 강도설계법의 1.42보다 크게 산정되었다. 강도설계법의 내하율이 본 해석보다 작게 산정되는 것은 강도설계법의 경우, PS강재의 상향력(uplifting force)에 의한 외력의 감쇄효과를 고려하지 않고 있으나, 본 해석의 경우 이와 같은 상향력에 의한 외력의 감쇄효과가 고려되어 있으며, PS 강재의 경화 및 콘크리트의 인장기여도 등이 복합적으로 고려되었기 때문인 것으로 판단된다.

5. 결 론

- 1) PSC I형 교량의 비선형 해석 결과를 토대로 내하력에 영향을 미치는 주요인자인 유효프리스트레스의 영향을 검토하였다. 검토결과 유효 프리스트레스의 변화는 허용응력법에 의한 내하력 평가결과에는 크게 영향을 주었으나, 강도설계법에 의한 내하력 평가결과에는 영향을 주지 않는 것으로 조사되었다.
- 2) 따라서 PSC 거더의 사용성 평가에 적용되는 허용응력법에 의한 내하력 평가시 PS 긴장재의 유효 프리스트레스를 합리적으로 산정하는 것이 평가기법의 신뢰성 확보에 매우 중요한 인자임을 확인하였다.
- 3) 도로교 설계기준의 계수상태 하중조합을 바탕으로 한 활하중계수를 비선형 해석 파라미터, a를 적용한 내하력 평가를 수행하였으며 이를 강도설계법에 기초한 내하력평가 결과와 비교하였다. 평가결과에 따르면 강도설계법에 의한 내하력 평가결과 보다 안전측의 내하율을 나타내었으며, 이와 같은 결과는 콘크리트의 인장기여도와 PS 강재의 경화영향 및 상향력에 의한 외력의 감쇄효과에 기인한 것으로 사료된다.

참고문헌

1. “교량 정밀안전진단 및 통과허용하중 산정기법 개선”, 한국 시설안전기술공단, 1999.
2. Zihia Shi와 3인(2001.). “A separate method for evaluating the ultimate load-carrying capacity of aging and renovated sewage structures.”, construction and building material 15, pp.271~282.
3. ABAQUS MANUAL V.5.8.8
4. Edward G. Nawy, “Prestressed Concrete : A Fundamental Approach”, Prentice-Hall Inc.