

비선형 FEM 해석에 기초한 PSC I형 거더교량의 내하력 평가기법에 관한 연구

Study on the Evaluation Method of Load Carrying Capacity Based on Nonlinear FEM Analysis for PSC I Typed Girder Bridge

심종성*

김규선**

문도영***

주민관****

Jongsung Sim

Kim, Gyu-Seon

Moon, Do-Young

Minkwan Ju

Abstract

The purpose of this study is to improve and modify the evaluation method of load carrying capacity for simply supported PSC I Typed girder bridge. To do this, conventional ASD(Allowable Stress Design) and USD(Ultimate Strength Design) evaluation method were initially investigated and it was evaluated that the conventional USD evaluation method may perform the load carrying capacity as conservative because it do not consider the prestressing upper-force effect of simply supported PSC I Typed girder bridge. To reasonably evaluate the load carrying capacity, the upper-force effect should be considered to the PSC I Typed girder bridge. Thus, in this study, the MUSD method was Suggested and compared to the nonlinear FEM based-load carrying capacity using the live load factor and the efficiency of the evaluation method of load carrying capacity was investigated by experimental and analytical result. In the result of this study, the suggested MUSD evaluation method showed a reasonable evaluating result for the simply supported PSC bridge. For the new technique of load carrying capacity based on the nonlinear FEM analysis, it could effectively simulate the load-deflection relationship and the load carrying capacity of the PSC I Typed girder bridge.

요 지

기존 USD 평가법은 단순지지 PSC I형 거더교량의 프리스트레싱 상향력을 간과함에 따라 내하력을 보수적으로 평가할 수 밖에 없는 것으로 판단된다. 본 연구에서는 프리스트레싱 상향력 효과가 적용된 수정 강도 설계법(MUSD)이 제안되었으며, 동일 대상교량에 대해 적용하여 기존 내하력 평가법과 비교분석하였다. 또한 활하중 계수를 이용한 비선형 FRM 해석에 의한 내하율 평가방법이 새로 제안되어 기존 실험 및 해석적인 연구와의 비교를 통해 단순지지 PSC I형 거더교량에 적용가능한 합리적인 내하력 평가방법을 제시하였다. 평가결과, 본 연구에서 제안한 MUSD 내하력 평가법은 기존 USD 평가법에 비해 단순지지 PCS I형 거더교량의 내하율을 합리적으로 평가할 수 있는 것으로 분석되었으며, 특히 비선형 유한요소 해석법에 의한 내하력 평가법은 PSC 교량구조물의 전반적인 구조거동 분석과 함께 해당 교량구조물의 내하력을 다각도로 평가할 수 있는 것으로 확인되었다.

Keywords : PSC I-typed girder bridge, MUSD evaluation method, Nonlinear FEM analysis

핵심 용어 : PSC I형 거더교량, 개선된 MUSD 평가법, 비선형 FEM 해석

* 정희원, 한양대학교 토목공학과 교수

** 정희원, 한국시설안전공단 진단 1 본부 교량실 차장

*** 고려대학교 건축사회환경공학과 BK21 계약교수

**** 정희원, 한양대학교 토목공학과 박사수료

E-mail : mkju@hanyang.ac.kr 031-418-7430

•본 논문에 대한 토의를 2008년 12월 31일까지 학회로 보내 주시면 2009년 3월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

1. 서 론

최근 건설부분에서의 인프라는 70~80년대 생산성 위주로 개발된 구조물이 주를 이루어왔으나 현재는 국토의 균형발전과 장경간 고속화도로 등의 증가로 인해 장경간 교량에 대한 효율적인 유지관리가 필요한 시점이다. 이에 대표적인 장경간 교량인 PSC 거더교량은 현장에서의 시공성 및 경제성이 확보된 교량형식이다. 장경간 PSC 거더교량에 대한 사후 유지관리를 위해서는 PSC 거더교량 구조물의 성능평가가 명확하고 합리적으로 이루어져야 한다. S. Pessiki 외(1996)는 공용수명이 28년된 프리스트레스트 실교량의 유효프리스트레싱 힘을 평가하기 위한 방법을 고안하여 프리스트레스트 실교량의 내하력 평가에 적용하고 있다. 반면, 아직까지도 현재 사용중인 내하력 판정방법이 안전도 측면에서 일관성이 결여되어 있고, 특히 현장실험에 의존한 PSC 실제 교량의 노후손상도의 합리적인 추정 및 반영방법에 있어서 그 실용성이 다소 부족함을 보이고 있다. 따라서, 합리적인 사후 유지관리를 위한 내하력 평가기준인 내하율의 합리적인 평가가 필요한 실정이다(한국시설안전공단, 1999). 일반적으로 PSC 교량의 내하율을 평가하는 방법은 허용응력 개념에 의한 평가법(ASD 평가법)과 강도설계 개념에 의한 평가법(USD 평가법)이 사용되고 있는데, 이는 PSC 교량의 중요한 구조적 특징인 사용성과 강도를 동시에 평가하기 위함이다. 한편 현재 사용되고 있는 USD 평가법의 경우, PSC 연속교에 대해서는 프리스트레싱에 의한 상향력 효과가 반영되어 있지만 일반 PSC 단순교에 있어서는 그 영향이 반영되지 않기 때문에, 이는 PSC 단순교의 강도측면에 대한 내하력을 과소평가 할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 기존에 현장재하 실험된 PSC I형 거더형식의 단순교량을 선정하여 기존 ASD 및 USD 평가법에 의해 내하율을 평가하였다. 또한 USD 평가법의 경우, 프리스트레싱에 의한 상향력 효과가 반영된 수정 MUSD 평가법을 적용하였으며, 이를 활하중 요소가 고려된 비선형 유한요소 평가법에 의한 내하율과 비교함으로써 비선형 유한요소 해석에 의한 내하율 평가에 대한 현장적용성의 합리성을 분석하고자 한다.

2. 현장 재하실험

내하력 평가방법 분석을 위해 적용된 대상 교량은 1999년 한국시설안전공단에서 수행된 교량 정밀안전진단 연구보고서 내용 중, 1971년에 준공된 서진 1 교량으로서, IC의 변경에 따라 폐교화된 교량이다. 교량형식은 DB-18의 2등급 교량이며, 경간 30m, 폭이 9.45m인 I형 4 거더로 이루어진 PSC 범교량 형식이다(Photo 1).

본 교량의 파괴실험 경간은 한국시설안전공단의 정밀안전진단 평가결과에 기초하여, 재하장치 및 안전성 확보가 가능한 구간을 선정하였다. 파괴실험을 위해 4개의 거더를 가진 교량을 중방향으로 절단하여 단일거더(1개 거더)와 복수거더(3개 거더) 교량으로 나누어 현장파괴 실험을 수행하였다. 이 중 본 연구에서는 절단된 단일거더 PSC I형 거더교량을 선정하였다(Fig. 1).



Photo 1 The PSC I-Typed girder bridge



Photo 2 Loading system

대상교량의 현장재하시 극한하중까지의 구조거동을 분석하기 위하여 교량 상부에 천공된 가력 홀을 통해 설치된 Ground Anchor를 지반에 고정한 후 유압잭을 사용하여 하중가력을 실시하였다. 이 때, 교폭방향으로 균등한 하중을 가하기 위하여 교량 상부에 침목과 H-beam을 사용하여 재하판을 구성하였고 Load Cell을 설치하여 실제 가력하중을 측정하였다. Photo 2 및 Fig. 2는 재하장치의 전경 및 개요도를 나타낸다.

3. PSC 교량의 내하력 평가

3.1 내하력 평가방법

교량 구조물의 상태평가를 위한 방법으로는 현장재하실험에 의한 방법과 내하율 공식에 의한 해석적인 방법이 주로 사용되어 왔다. 실험적인 방법의 경우, 구조물의 거동상태를 정확하게 평가할 수 있는 장점이

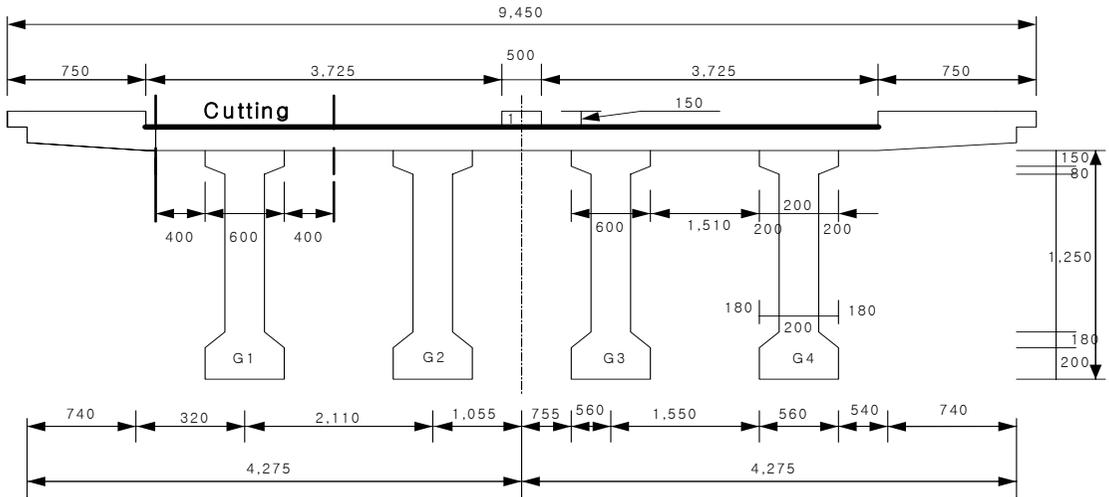


Fig. 1 Structural outline of the PSC I-Typed girder bridge

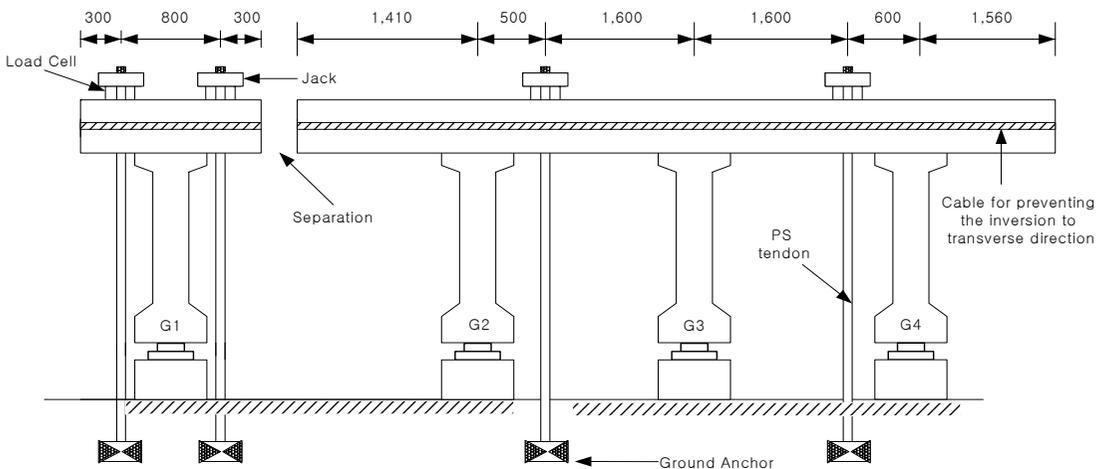


Fig. 2 Outline of loading process

있는 반면 공간적 제약 및 경제적인 문제점이 발생할 수 있는 단점이 있다. 이에 반해 해석적인 방법, 특히 전산화 유한요소법의 경우 구조물의 상태를 근사적으로 밖에는 평가할 수 없으나, 다양한 변수들의 적용을 통하여 실용적인 결과를 도출할 수 있을 뿐 아니라 실험적 방법에서와 같은 제약조건 등이 해소될 수 있으며, 현재 고도화된 전산화 시스템 환경에서는 실구조물의 거동분석을 비교적 정확하게 분석할 수 있다.

지금까지 PSC 교량 구조물의 내하력을 평가하기 위한 주된 방법으로는 해석적인 내하력 평가방법이 사용되어 왔다. 이는 ASD 평가법과 USD 평가법으로서 다음에 소개되고 있다.

㉠ 허용응력 평가법(ASD 평가법)

주로 강교에 사용되는 허용응력 설계법은 기본내하력에 보정계수를 곱한 공용내하력에 의한 공용하중으로 교량의 내하력을 산정하고 있으며, 식(1)과 같다.

$$RF = \frac{\sigma_a - \sigma_d + \sigma_p}{\sigma_{l(1+i)}} \quad (1)$$

- 여기서, σ_a = 허용응력
- σ_d = 사하중응력
- σ_p = 프리스트레싱에 의한 응력
- $\sigma_{l(1+i)}$ = 충격하중을 고려한 활하중에 의한 응력
- i = 충격계수

㉡ 강도설계 평가법(USD 평가법)

강도설계 평가법은 실제하중에 하중계수를 곱한 하중을 사용하여 평가를 실시하며 하중계산에 대한 불확실성을 고려하기 위하여 각 하중형식에 서로 다른 하중계수를 적용한다. 그 평가식은 식(2)와 같다.

$$RF = \frac{\Phi M_n - \gamma_d \cdot M_d}{\gamma_l \cdot M_{l(1+i)}} \quad (2)$$

- 여기서, Φ = 강도감소계수(0.85)
- M_n = 공칭모멘트

M_d = 사하중모멘트

$M_{l(1+i)}$ = 충격하중을 고려한 활하중모멘트

γ_d = 사하중계수

γ_l = 활하중계수

3.2 수정된 강도설계 평가법

앞서 언급한 바와 같이 PSC 연속교의 경우, 구조해석 등에 의한 방법에 의해 프리스트레싱에 의한 상향력 효과가 반영되는 반면, PSC 단순교의 경우, 프리스트레싱의 의한 상향력 효과를 고려하지 않고, 일반 RC 교량에 사용되는 USD 평가법이 그대로 적용되고 있다. 이는 강도에 대한 내하력을 다소 과소평가할 우려가 있으며, 이로 인해 해당 교량의 구조성능을 충분히 사용하지 못함으로써 사용상의 비효율적인 문제가 발생될 수 있다. 따라서 본 연구에서는 PSC 단순교의 내하력 평가시 프리스트레싱에 의한 상향력 효과가 반영된 내하력 평가식을 제안하였으며, 식(3)과 같다(주민관, 2004).

$$RF = \frac{\Phi M_n - \gamma_d \cdot M_d + M_{ps}}{\gamma_l \cdot M_{l(1+i)}} \quad (3)$$

여기서, M_{ps} = 프리스트레싱에 의한 상향력 모멘트

4. 비선형 FEM 해석

4.1 비선형 해석 재료모델

콘크리트 압축 및 인장모델의 경우, 콘크리트의 탄소성 거동에 대한 응력-변형을 관계를 비교적 정확히 묘사할 수 있는 모델이 적용되었다(E. Thorenfeldt 외 1987). 본 압축모델의 적용시 해석의 간편화를 위해 콘크리트 압축강도 41MPa 이하에서의 간략식을 적용하였으며, 식(4)는 적용된 콘크리트 압축모델식이다.

$$\frac{f_c}{f_c} = 2 \frac{\epsilon_{cf}}{\epsilon_c} - \left(\frac{\epsilon_{cf}}{\epsilon_c} \right)^2 \quad (4)$$

여기서 f_c 는 원주형 콘크리트 공시체의 압축강도이다. ϵ_c 는 최대 콘크리트 압축강도에서의 변형률로서 0.002가 적용되었으며 ϵ_{cf} 는 콘크리트의 압축변형률이다.

콘크리트 인장모델의 경우, 철근에 의한 콘크리트의 Tension Stiffening 효과를 반영하기 위하여 균열발생 후 콘크리트의 인장성능이 확보될 수 있는 인장모델이 적용되었다(K. Maekawa 외, 2003). 또한 콘크리트 압축 및 인장거동에 대한 파괴기준은 인장파괴의 경우, 일축압축에 대한 일축인장 및 이축압축의 비는 각각 0.09와 1.16이 적용되었다(D. Hibbitt, B. Karlsson and P. Sorensen, 1995). PSC 강선 모델의 경우, 뚜렷한 항복점이 없을 뿐 아니라 파괴시까지 선형거동을 보인다. 따라서 1%의 평형변형률에서의 응력으로서 정의되는 Mottock의 제안모델을 적용하였다. 항복강도의 경우, Low Relaxation을 고려하여 강도의 약 90%의 항복강도를 보이는 강선모델을 적용하였다. 콘크리트 및 PS 강선의 재료모델링의 경우, 유한요소 해석시 지나친 강성강화 현상을 제어하기 위하여 거더의 경우는 Solid로 슬래브의 경우는 Shell Element로 적용하였다. PS 강선의 경우, 콘크리트 Element내에 Layered Type으로 배근된 재료 모델로서 콘크리트와의 완전부착을 가정하여 적용하였다(H.T. Hus 외, 1991; M. Kawakami 외, 2001).

4.2 적용된 재료물성치

Table 1은 비선형 해석시 적용된 콘크리트 및 PS Tendon의 물성치를 나타내고 있다. 콘크리트의 경우, 거더와 슬래브에서의 압축강도는 현장에서의 코아강도

Table 1 Property of Concrete and PS tendon

Material	Properties
Concrete	Slab : $f_{ck} = 24MPa$, $E_c = 2.2 \times 10^4 MPa$
	Girder : $f_{ck} = 36MPa$, $E_c = 2.7 \times 10^4 MPa$
PS tendon	- Low Relaxation tendon -
	Area of 8EA is
	$4.62 \times 10^2 mm^2 \times 8 = 36.96 \times 10^2 mm^2$
	$f_{pu} = 1,550MPa$
	$f_{py} = 0.9 \times f_{pu} = 1,395MPa$ $E_s = 1.9 \times 10^5 MPa$

를 바탕으로 적용된 값이며 PS Tendon의 경우, 정밀 안전진단결과 균열개폐법에 의해 추정된 강도 값을 적용하였다(한국시설안전공단, 1999).

4.3 비선형 해석결과

Fig. 3은 비선형 해석결과를 나타내고 있다. 해석결과, 현장재하 실험 결과와 충분한 적합성을 보이는 것으로 나타났다. 해석은 현장재하 파괴실험 결과를 근거로 슬래브의 압축파괴가 발생한 시점을 극한파괴라 정의하여 해석을 종료하였다. 전반적인 거동양상은 파괴시까지 탄성거동을 보이는 것으로 나타났으며, 약 700kN 부근에서 해석값과 실험값의 차이가 발생하기 시작하였다. 이는 해석시 완전부착을 가정한 PS Tendon과는 달리, 실교량의 오랜 공용수명으로 인해 내부텐던의 부착성능이 저하되었기 때문인 것으로 판단된다.

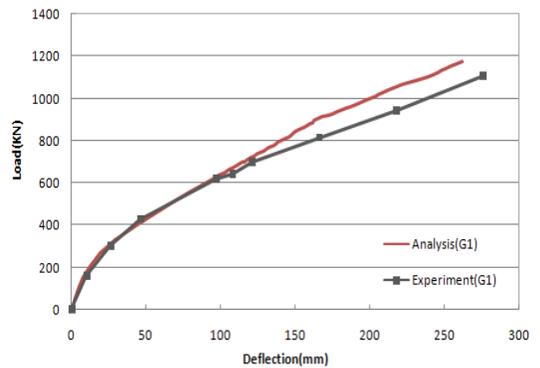


Fig. 3 Load-deflection of experiment and FEM analysis

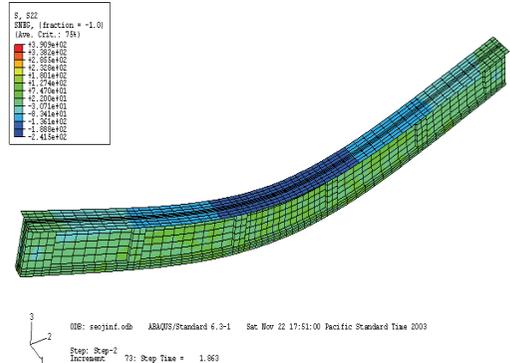


Fig. 4 Stress distribution diagram

Fig. 4는 해당교량구조물에 대한 비선형 해석 응력 분포도를 나타내고 있다. Fig. 4에서 보이는 바와 같이 압축부 슬래브에서 콘크리트의 극한 압축강도를 나타내며 압축과파 되었음을 확인할 수 있다.

5. 내하력 평가

5.1 허용응력 및 강도설계 평가법

5.1.1 허용응력 평가법(ASD 평가법)

Table 2는 해당교량에 대해 식(1)에 의한 허용응력 평가법에 의해 산정된 내하율을 나타내고 있다. 각각 상부와 하부에 대해서 평가되었으며 두 부분 모두 안전한 구조상태인 것으로 확인되었다.

5.1.2 강도설계 평가법(USD 평가법)

다음 Table 3은 식(2)에 의한 강도설계 평가법에 의해 산정된 내하율을 나타낸 표이다. 평가시 사하중과 활하중에 대해 평가되었으며 평가 결과 극한 휨 모멘트를 보이는 중앙부 하부를 기준으로 충분한 안전도를 보이는 것으로 평가되었다.

5.1.3 수정된 강도설계 평가법(MUSD 평가법)

앞서 언급한 바와 같이 PSC 단순교에 대해 프리스트레싱에 의한 상향력 효과를 기존의 강도설계 평가법

Table 2 Evaluated load carrying capacity by ASD

Classification	σ_a (MPa)	σ_d (MPa)	σ_p (MPa)	σ_t (MPa)	RF
Top	14.4	13.1	4.6	1.7	3.46
Bottom	2.9	12.3	14.6	3.9	1.31

Table 3 Evaluated load carrying capacity by USD

Classification	ΦM_n ($kN \cdot m$)	M_d ($kN \cdot m$)	$M_{(1+i)}$ ($kN \cdot m$)	RF
Bottom	9,036	3,467	1,493	1.41

Table 4 Evaluated load carrying capacity by MUSD

Classification	ΦM_n ($kN \cdot m$)	M_d ($kN \cdot m$)	$M_{(1+i)}$ ($kN \cdot m$)	M_{ps} ($kN \cdot m$)	RF
Bottom	9,036	3,467	1,493	2,450	2.17

에 수정·적용하여 내하율을 산정하였다. Table 4는 식(3)에서 제안한 프리스트레싱 효과를 반영한 내하율 산정값을 나타낸 표이다. 평가결과 기존의 강도설계 평가법에 의해 산정된 내하율보다 약 52% 향상된 내하율을 보이는 것으로 분석되었다.

5.2 비선형 유한요소 해석에 의한 내하율 평가법(α -Method)

비선형 유한요소 해석방법을 이용하여 내하율을 평가하기 위해서 다음과 같은 가정사항이 적용되었다.

1) 사하중에 대한 PSC 교량의 내하율은 전체적인 구조거동상 고려대상에서 제외한다.

2) 활하중에 대한 내하율 평가시, 유한요소 해석에서 얻어진 극한 활하중 계수에 대해 도로교 표준시방서에 의거한 활하중 계수값의 비로서 정의한다.

위의 가정사항에 대해 도로교 시방서에서 규정하는 계수하중 적용식을 표현하면 다음 식(5)와 식(6)과 같다.

$$U = 1.3D + \alpha L_{(1+i)} \quad (5)$$

$$RF = \left(\frac{\Phi \times \alpha}{\gamma} \right) L_{(1+i)} \quad (6)$$

여기서,

Φ = 하중 감소계수

α = 비선형 해석에 의한 극한과괴시의 활하중계수

γ = 활하중계수(2.15)

$L_{(1+i)}$ = 충격하중이 적용된 활하중지표

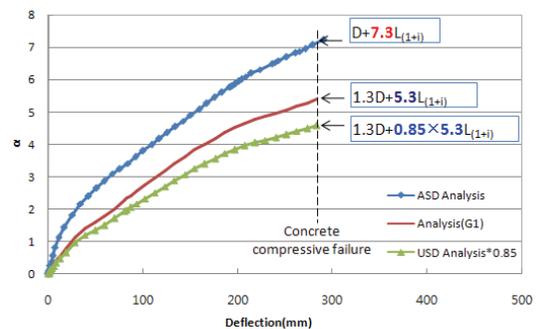


Fig. 5 Evaluation of the α -method using nonlinear FEM analysis

Fig. 5는 극한과괴시 비선형 해석에 의한 해석결과를 나타내고 있다. 각각 허용응력 개념과 강도설계 개념에 의해 비선형 해석이 수행되었으며 각 해석개념에 의한 극한 파괴상태와 이 때의 극한 활하중 계수 값은 Fig. 5에서 나타내었다.

식(7)은 허용응력 개념을 적용한 비선형 해석에 의해 얻어진 하중계수를 적용하여 평가된 내하율 값이다. 허용응력 개념에 의거한 비선형 해석시 사하중계수(1.3)는 미적용 되었으며 최종 내하율 평가시 강도감소계수의 적용 또한 배제하여 최종 평가되었다.

$$RF = \left(\frac{7.3}{2.15} \right)_{L(1+i)} = 3.39 \quad (7)$$

식(8)은 USD 평가법이 적용된 내하율 평가식을 나타내고 있다. 비선형 해석에 의한 해당 교량의 압축과괴시 극한 활하중계수는 5.3으로 평가되었으며, 이에 도로교 활하중 계수와 강도감소계수를 적용한 결과 다음과 같이 최종 평가되었다.

$$RF = \left(\frac{0.85 \times 5.3}{2.15} \right)_{L(1+i)} = 2.10 \quad (8)$$

Table 5는 본 연구에서 제안된 α -Method와 ASD 평가법에 의한 내하율 값을 비교하였다. 해석결과, α -Method에 의한 내하율 값이 기존의 ASD 평가법에 의한 값을 상당히 상회하는 것으로 나타났다.

Table 6은 α -Method와 USD 및 MUSD 방법에

Table 5 RF by α -Method and ASD method

	Evaluation Method	
	By ASD	By α -Method
RF	1.31	3.39
Error Rating	159%	

Table 6 RF by α -Method, USD and MUSD method

	Evaluation Method		
	By USD	By MUSD	By α -Method
RF	1.43	2.17	2.10
Error Rating	68%	3.3%	

에 의한 내하율 값이다. 분석결과, α -Method에 의한 값과 MUSD 평가법에 의한 내하율 값이 서로 유사한 평가결과를 나타내었다.

6. 결 론

PSC I Typed 거더교량에 대해 본 연구에서 분석 및 평가된 내하력 평가기법에 관한 결론은 다음과 같다.

- 1) 허용응력 평가법에 의한 내하력 평가결과, 대상 교량의 상부와 하부의 내하율이 적정수준을 확보하고 있음을 확인할 수 있었다. 따라서 본 연구의 대상 교량은 사용성 측면에서 충분히 안전한 것으로 분석되었다.
- 2) 기존 강도설계법에 의한 내하력 평가결과, 허용응력 평가법과 거의 유사한 결과를 나타내었다. 여기서, 소성해석법인 강도설계 평가법이 허용응력 평가법인 탄성해석법과 유사한 결과를 보인 것은 강도설계법에 의한 극한상태의 적용시 프리스트레싱에 의한 상향력 효과가 반영되지 않았기 때문인 것으로 분석되었다. 따라서 프리스트레싱에 의한 상향력 효과를 반영한 MUSD 평가법에 의한 평가가 이루어져야 함이 타당하며, 적용결과, 기존의 강도설계 평가법에 비해 강도측면에서 보다 안전성을 보인 것으로 분석되었다.
- 3) 수정된 강도설계 평가법에 의한 내하율 평가 값을 본 연구에서 제안한 비선형 FEM 해석방법에 의한 α -Method 평가법과 비교해본 결과, 오차범위 내에서 합리적인 평가 값을 보이는 것으로 나타났다. 따라서 본 연구에서 제안한 활하중 계수를 활용한 내하율 평가방법은 충분한 유효성이 확보될 수 있는 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 주민관, "PSC I형 거더교량의 내하력 평가기법에 관한 고찰", 석사학위논문, 한양대학교, 2004.
2. 한국시설안전공단, "교량 정밀안전진단 및 통과허용하중 산정기법 개선", 1999.
3. D. Hibbitt, B. Karlsson and P. Sorensen, ABAQUS Theory Manual, Version 6.3.1, USA.

-
4. H. T. Hus and W. C. Schnobrich, "Nonlinear Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Plates and Shells under Monotonic Loading", *Computer & Structure*, Vol. 38, No. 5/6, 1991, pp. 637-651.
 5. M. Kawakami and T. Ito., "Nonlinear finite element analysis of prestressed concrete members using ADINA", *Computer & Structures*, 2001, pp. 727-734.
 6. K. Maekawa, A. Pimanmas and H. Okamura, *Nonlinear Mechanics of Reinforced Concrete*, Spon Press, New York, USA, 2003.
 7. S. Pessiki, M. Kaczinski and H. H. Wescott, "Evaluation of Effective Prestress Force in 28-Year-Old Prestressed Concrete Bridge Beams", *PCI Journal*, Vol. 41, November-December, 1996, pp. 78-89.
 8. E. Thorenfeldt, A. Tomaszewicz and J.J. Jensen, "Mechanical Properties of High-Strength Concrete and Application in Design", *Proceedings of the Symposium : Utilization of High Strength Concrete*, Stavanger, Norway, 1987, pp. 149-159.

(접수일자 : 2008년 4월 16일)

(심사완료일자 : 2008년 6월 24일)