

탄소성 대변형 해석을 이용한 콘크리트 충전강관(CFT) 기둥의 극한강도에 관한 해석적 연구

An Analytical Investigation on the Ultimate Strength of Concrete-Filled Steel Tube Columns using Elasto-Plastic Large Deformation Analysis

장 갑 철* 장 경 호**
Jang, Gab-Chul Chang, Kyong-Ho

요 약

교량의 교각과 같은 원형기둥구조물의 성능과 강도를 향상시키기 위해 최근 콘크리트 충전강관(CFT: concrete-filled steel tube)의 적용이 점차 증가하고 있다. 이러한 콘크리트 충전강관 구조물의 정확한 소성설계를 위해서는 사용된 재료인 강재 및 콘크리트의 대변형 거동을 구현할 수 있는 소성모델이 필요하다. 본 연구에서는 사용강재의 실험을 통하여 제안된 소성모델을 적용한 탄소성 대변형 해석을 개발하였으며 콘크리트 충전강관 기둥 해석과 실험 결과에 비교하여 그 정도 및 타당성을 검증하였다. 그리고 개발된 프로그램을 이용하여 콘크리트 충전강관 기둥의 초기처짐이 극한강도에 미치는 영향 및 상관관계를 명확히 파악하였다.

Abstract

Recently, to improve performance and strength of circular steel columns, application of concrete-filled steel tube(CFT) type are gradually increased. To accurately predict the plastic design of concrete-filled steel tube columns, a plasticity model is required which can be describe large deformation behavior of concretes and steels. In this study, elastic-plastic large deformation analysis is developed by using the plasticity model of structural steels, and accurate and validity of the developed program is verified by comparing between the experiment and the analysis for concrete-filled steel tube column. In concrete-filled steel tube columns, influence of initial deflection on ultimate strength behavior is investigated by using developed program.

키워드 : 탄소성 대변형 해석, 극한강도, 콘크리트 충전강관 기둥, 소성모델, 초기처짐

Keywords : *Elasto-plastic large deformation analysis, Ultimate strength, Concrete-filled steel tube column, Plasticity model, Initial deflection*

1. 서 론

최근 도심지내에서 늘어나는 교통량을 해결하기 위해서 도시 고속도로, 고가도로 및 교량의 건설이 급속히 증가하고 있다. 이러한 도심지내 구조물의 토지 이용률 및 성능을 향상하기 위한 방안으로 중공 및 충전형식의 구조물 건설이 점차 증가하고 있다. 콘크리트 충전강관(CFT; concrete-filled steel tube)

구조물은 강관 내부를 콘크리트로 채우는 방법으로 기둥의 단면을 증가시키지 않고도 부재내력을 증가시킬 수 있는 장점이 있다. 또한 강관과 콘크리트의 상호합성작용으로 각 부재의 강도를 단순히 누가한 것 이상의 내력을 발휘하며 이러한 강성증대 외 시공성 향상 및 공기단축등 경제적 측면에서도 유리한 장점을 가지고 있다. 이러한 구조적, 경제적 장점으로 인하여 콘크리트 충전강관 구조물은 토목구조물 뿐만 아닌 건축물에서도 다양하게 적용되고 있다.¹⁾

콘크리트 충전강관 구조에 관한 연구는 국내·외에서 다양하게 진행되어 왔다. 국내의 경우 1990년대 들어 본격적으로 연구가 진행되어 왔으며 최근

* 정회원 · (주)현대기술개발, 공학박사

** 교신저자, 정회원 · 중앙대학교 건설환경공학과, 교수
Tel : 02-820-5337 Fax : 02-823-5337
E-mail : changkor@cau.ac.kr

설계기준 및 시공지침 등 실용화에 대한 기술적 연구가 진행되어 왔다.^{2,3)} 콘크리트 충전강관 구조의 정확한 소성설계를 위해서는 사용된 재료인 강재 및 콘크리트가 대변형 거동특성을 고려할 수 있는 소성모델이 필요하다. 그러나 이와 같은 재료의 소성모델을 이용한 콘크리트 충전강관 기둥의 강도특성에 관한 연구는 아직 미진하다.

본 연구에서는 콘크리트 충전강관 구조물의 정밀한 해석을 위해 저자가 제안한 구조용 강재의 소성모델을 적용한 탄소성 대변형 해석을 개발하였다. 적용된 강재의 소성모델은 사용강재의 실험에 기초하여 제안되었으며 구조물 실험과의 비교 및 기문헌을 통하여 검증하였다.⁴⁻⁷⁾ 그리고 개발된 해석기법을 이용하여 콘크리트 충전강관 기둥의 초기처짐에 따른 수치해석을 수행하였다. 해석결과를 통하여 초기처짐에 따른 콘크리트 충전강관 기둥의 극한강도의 변화를 명확히 파악하였다.

2. 제안소성모델을 적용한 탄소성 대변형 해석의 정식화

본 연구에 사용된 탄소성 대변형 유한요소해석 프로그램은 임의 형상의 평면골조에 외력이 작용하는 경우 유한변위이론을 적용하여 탄소성 대변형 해석을 가능하게 하였다. 프레임요소를 사용하며 각 면요소의 일축 응력-변형률 관계는 재료비선형성을 구현하기 위해 강재의 반복소성모델을 적용하였다. 그리고 단면력은 각 면요소의 응력성분을 수치적분하여 계산하였다.

2.1 변형률-변위 관계

일반적으로 강구조물은 소성거동시 대변형 거동을 보인다. 본 연구에서는 이러한 구조물의 기하학적 비선형성 및 대변형 거동을 정확히 구현을 위해 유한변위이론에 기초하여 2차원 프레임요소에서 변위-변형률 관계를 식(1)과 같이 정식화하였다.^{8,9)}

$$\begin{aligned} \epsilon_x &= \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{1}{2} \left\{ \left(\frac{\partial U}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial W}{\partial x} \right)^2 \right\} \\ \epsilon_z &= \frac{\partial U}{\partial z} + \frac{1}{2} \left\{ \left(\frac{\partial U}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial W}{\partial z} \right)^2 \right\} \end{aligned} \quad (1)$$

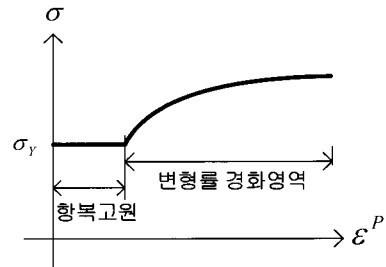
$$\gamma_{xz} = \frac{\partial W}{\partial x} + \frac{\partial U}{\partial z} + \frac{1}{2} \left\{ \left(\frac{\partial U}{\partial x} \right) \left(\frac{\partial U}{\partial z} \right) + \left(\frac{\partial W}{\partial x} \right) \left(\frac{\partial W}{\partial z} \right) \right\}$$

여기서 U, W 는 2차원 x, z 국부좌표계상 프레임 요소의 변위장을 나타낸다.

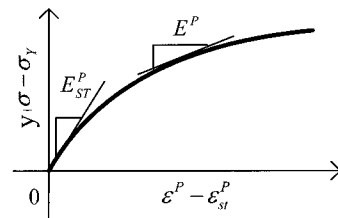
2.2 응력-변형률 관계

본 연구에서는 요소 내 응력산정을 위해 일축응력상태에서 사용재료인 콘크리트와 강재의 소성모델을 적용하였으며 적용된 각각의 모델은 <그림 1>과 같다.

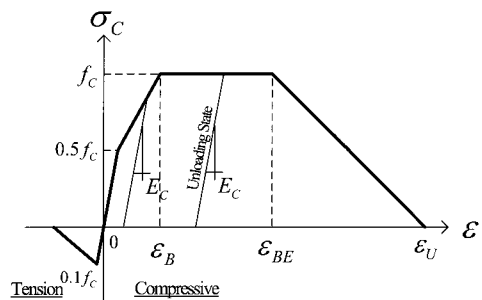
<그림 1(a),(b)>는 강재의 소성모델을 보이고 있다. 사용강재의 실험에 기초하여 제안되었으며 응력-변형률 관계의 비선형성을 구현하기 위해 로그함수를 적용하였으며 식(2)와 같이 제안하였다.



(a) 강재의 소성모델



(a) 변형률 경화영역에서의 강재모델



(b) 콘크리트 모델

<그림 1> 강재 및 콘크리트의 소성모델

$$E^P = E_{st}^P + \beta \cdot \ln\left(1 + \frac{x}{\alpha}\right) \quad (2)$$

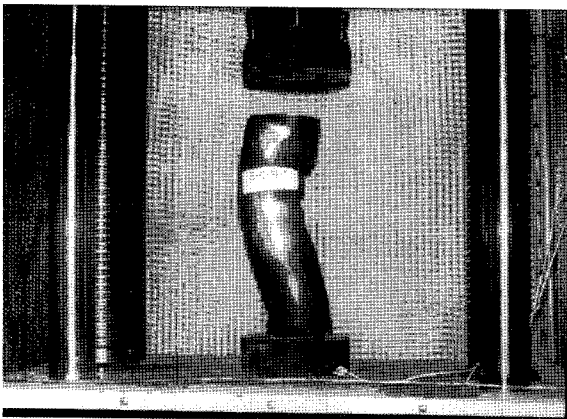
여기서, E^P 및 E_{st}^P 는 소성계수 및 초기소성계수를 나타내며 α 및 β 는 강재의 실험에서 얻어진 재료상수이다.

<그림 1(c)>는 콘크리트의 소성모델을 나타내고 있다. 본 연구에 사용된 콘크리트 모델은 탄소성영역을 실험을 통하여 각각 구분하여 선형적으로 표현하였다. 여기서 $\epsilon_{B'}$, ϵ_{BE} 및 ϵ_U 탄성, 소성영역을 구분하는 변형률 값이며 본 연구에서는 0.002, 0.005, 0.13을 각각 적용하였다.

2.3 개발 프로그램의 검증

유한변위이론에 기초하여 정식화된 변형률-변위 관계와 강재 및 콘크리트의 소성모델을 적용한 탄소성 대변형 해석프로그램을 개발하였다. 그리고 개발된 유한요소프로그램의 타당성 및 정도를 검증하기 위해 실제 콘크리트 충전강관 기둥의 압축실험과 비교하였다.

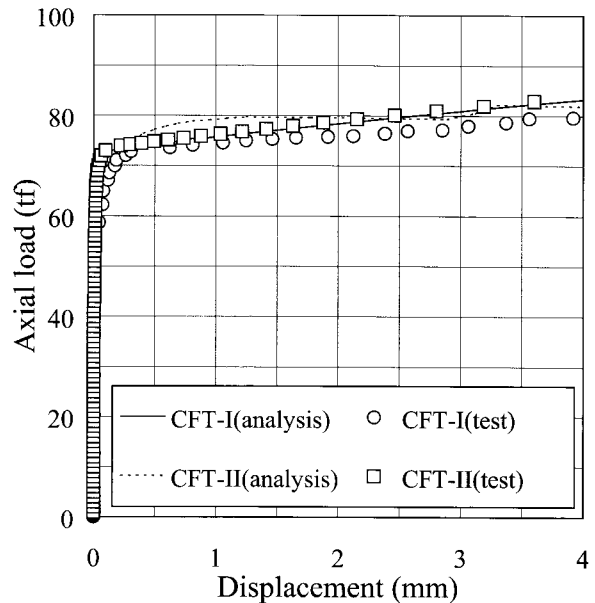
실험 및 해석모델은 <표 1>에 보인바와 같이 두께



<그림 2> 콘크리트 충전 강관의 실험 전경

<표 1> 해석모델의 분류

Parameters	Models	
	CFT-I	CFT-II
concrete strength(MPa)	21	30
diameter(mm)	89	89
height(mm)	300	300
thickness(mm)	5	5
steel grade	SM400	SM400



<그림 3> 해석 및 실험결과의 비교

5mm, 높이 300mm, 외경 89mm인 콘크리트 충전강관 모델이다. 이때의 적용된 강재는 SM400이다. 콘크리트 강도는 각각 21, 30 MPa로 산정하여 해석 및 실험을 수행하였다. 콘크리트강도에 따른 모델분류는 <표 1>에 보인바와 같다. 실험과 비교를 위한 수치해석시 실험과 동일하게 기둥상부에서 하중을 재하하였으며 실험과 동일한 조건의 경계조건을 적용하였다.

<그림 3>은 콘크리트 충전강관기둥을 해석 및 실험결과인 하중-변위곡선을 비교하고 있다. 비교결과 개발된 탄소성 대변형 해석을 이용한 해석결과의 하중-변위 곡선이 실험적 오차범위 내에서 실험결과와 잘 일치하고 있음을 보이고 있다. 즉, 본 연구에서 개발한 탄소성 대변형 해석프로그램이 외력을 받는 콘크리트 충전강관의 비선형거동을 정확히 예측할 수 있음을 보이고 있다.

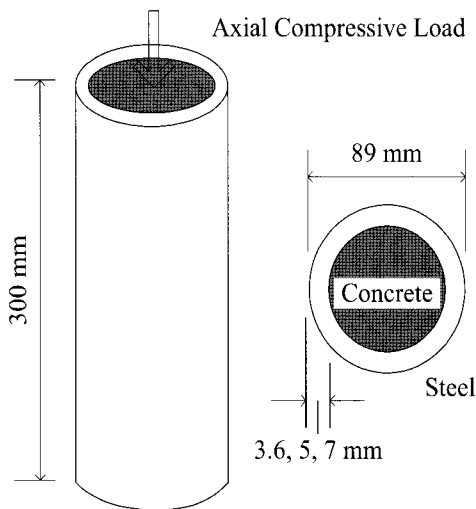
3. 초기처짐이 콘크리트 충전강관 기둥 극한강도에 미치는 영향

3.1 해석모델 및 조건

해석모델은 <그림 4>에 보이는 바와 같이 높이 300mm, 외경 89mm인 콘크리트 충전강관 기둥이

<표 2> 해석모델의 분류

Models	외경-초기처짐비	강재 강도 (MPa)	콘크리트 강도 (MPa)	외경 (mm)	높이 (mm)
InD/t-0.01	0.01	240	30	89	300
InD/t-0.02	0.02				
InD/t-0.04	0.04				
InD/t-0.08	0.08				
InD/t-0.10	0.10				



<그림 4> 해석모델의 제원 및 하중조건

다. 사용된 강종은 SM400이며 강재 및 콘크리트의 강도는 <표 2>에 나타내었다. <표 2>는 본 연구에서 적용된 해석모델을 분류하고 있다. 해석모델은 초기 처짐에 따라 <표 2>에 같이 분류하였으며 이때 강관의 두께는 <그림 4>에 보이는 바와 같이 3.6mm, 5mm, 7mm로 각각 산정하여 해석을 수행하였다.

하중은 <그림 4>에 보이는 바와 같이 콘크리트 충전강관 기둥의 상부에서 축방향으로 작용하는 것으로 산정하였으며 이때 경계조건은 해석모델의 임계상태를 구현하기 위해 기둥하부를 고정하였다.

수치해석은 개발된 탄소성 유한변위 해석프로그램을 이용하여 해석을 수행하였으며 그 결과는 다음과 같다.

3.2 해석결과 및 고찰

<그림 5(a),(b),(c)>는 해석결과인 하중-변위 곡선을 보이고 있다. 해석결과 두께가 증가할수록 콘크리트 충전강관 기둥의 내하력도 점차 증가함을 보

이고 있다. 그리고 모든 모델에서 외경-초기처짐 비, 즉 초기처짐이 점차 증가함에 따라 콘크리트 충전강관 기둥의 내하력도 점차 감소함을 보이고 있다.

위 결과를 기하학적 특성에 따라 명확히 파악하기 위해 외경-두께비(D/t), 강재-콘크리트 단면적비(As/Ac) 및 세장비로 각각 구분하여 극한강도의 분포를 파악하였으며 그 결과는 다음과 같다.

3.3 형상비에 따른 극한강도 분포

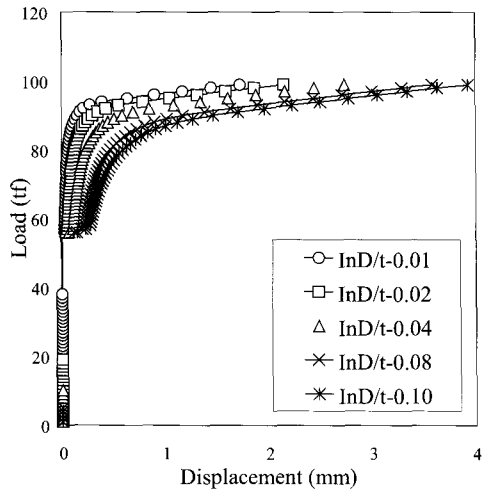
기하학적 특성에 따라 콘크리트 충전강관 기둥의 강도특성을 명확히 파악하기 위해 외경-두께비(D/t), 강재-콘크리트 단면적비(As/Ac) 및 세장비(λ)로 각각 구분 고찰하였으며 그 결과는 다음과 같다.

<그림 6(a)>는 외경-두께비(D/t)에 따른 콘크리트 충전강관의 극한강도 분포를 보이고 있다.

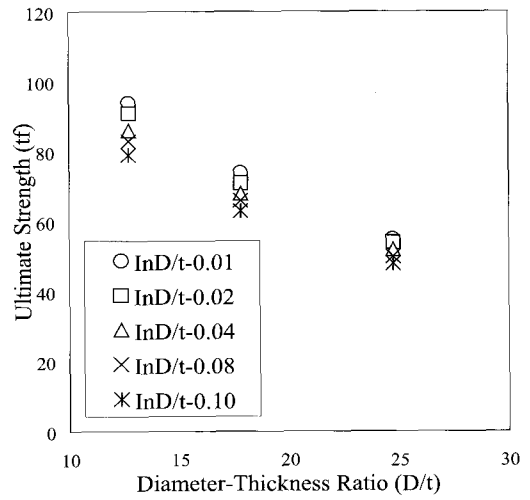
해석결과 D/t비가 증가함에 따라 즉, 외경이 증가함에 따라 극한강도가 선형적으로 감소함을 알 수 있다. 이와 같은 결과는 D/t비가 클수록 점차 증가하며 초기처짐의 영향으로 인한 극한강도 저감효과가 증가함을 보이고 있다.

<그림 6(b)>는 세장비(λ)에 따른 콘크리트 충전강관의 극한강도의 변화를 보이고 있다. 해석결과 세장비가 점차 증가함에 따라 극한강도는 점차 감소하고 있음을 알 수 있다. 이는 세장비가 증가할수록 초기 처짐에 의한 강도저하 현상이 심화됨을 보이고 있다.

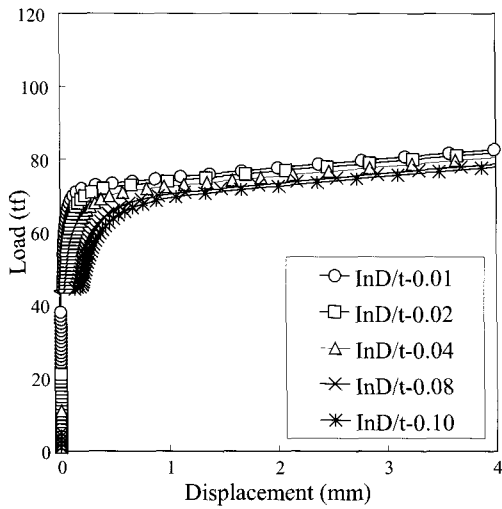
<그림 6(c)>는 강재의 단면적과 콘크리트의 단면적 비(As/Ac)에 따른 콘크리트 충전강관의 극한강도 분포를 보이고 있다. 해석결과 As/Ac의 비가 증가할수록 즉, 강재의 단면적이 증가할수록 극한강도는 점차 증가함을 알 수 있다. 이와 같은 결과는 초기처짐 발생시 콘크리트 보다는 강재에 의해 극한강도가 지배됨을 알 수 있다.



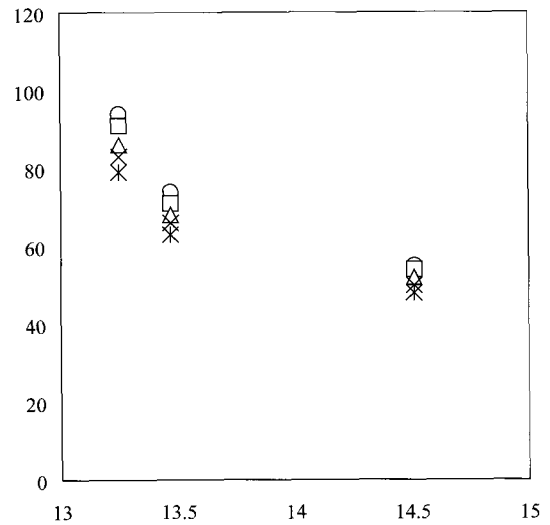
(a) D=7mm



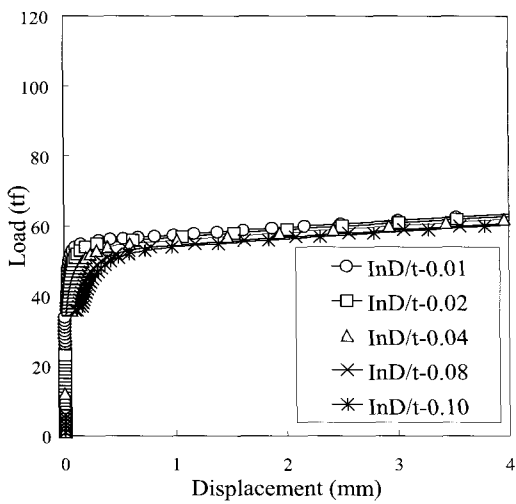
(a) 외경-두께비(D/t)



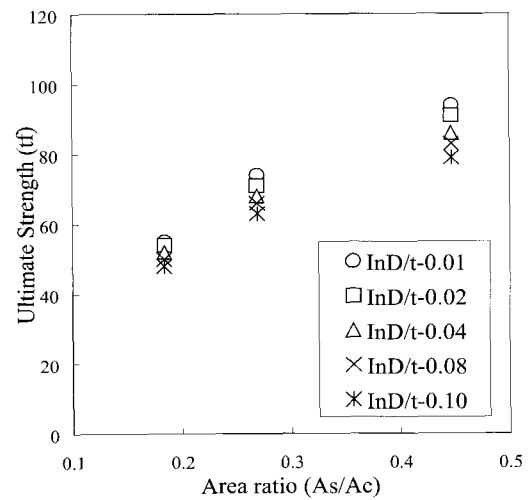
(b) D=5mm



(b) 세장비(λ)



(c) D=3.6mm



(c) 강재-콘크리트의 단면적 비(A_s/A_c)

〈그림 5〉 하중-변위 곡선

〈그림 6〉 형상비에 따른 극한강도 변화

4. 결 론

본 연구에서는 저자가 개발한 구조용 강재의 소성모델을 적용한 탄소성 대변형 해석을 이용하여 콘크리트 충전강관 기둥의 초기처짐에 따른 수치해석을 수행하였다. 해석결과를 통하여 초기처짐에 따른 콘크리트 충전강관 기둥의 극한강도의 변화를 형상비에 따라 명확히 파악하였으며 그 결과는 다음과 같다.

1. 두께가 증가할수록 콘크리트 충전강관 기둥의 내하력도 점차 증가하였으며 초기처짐이 점차 증가함에 따라 콘크리트 충전강관 기둥의 내하력은 점차 감소하였다.
2. 외경-두께비(D/t)가 증가함에 따라 즉, 외경이 증가함에 따라 극한강도가 선형적으로 감소하였으며 D/t비가 클수록 점차 증가하며 초기처짐의 영향으로 인한 극한강도 저감효과가 증가함을 알 수 있었다.
3. 세장비(λ)가 점차 증가함에 따라 극한강도도 감소하였으며 초기처짐에 의한 강도저하 현상이 심화되었다.
4. 강재-콘크리트의 단면적비(A_s/A_c)비가 증가할수록 즉, 강재의 단면적이 증가할수록 극한강도는 점차 증가하였다.
5. 이와 같은 결과는 콘크리트 충전강관 기둥의 극한강도가 콘크리트 보다는 강재에 의해 지배됨을 보이고 있다.

참고문헌

1. 장경호, 박도현, 소장현, 전정일, "콘크리트 충전 원형강관의 초기처짐이 내하력에 미치는 영향" 2000년도 학술발표회논문집(I), 2000, pp.665-668
2. 이명재, "콘크리트 충전 각형강관 기둥재의 최대 내력", 한국강구조학회 논문 제9권 제3호, 한국강구조학회, 1997, pp.391-400
3. 박정민, 김화중, "축압축력을 받는 콘크리트 충전 강관 기둥의 거동특성에 관한 실험적 연구", 한국강구조학회 논문집 제7권 제4호, 한국강구조학

회, 1995, pp.151-164

4. 장경호, 장갑철, "반복하중을 받는 강관 이음부의 응력 및 변형거동에 관한 연구", 대한토목학회는 문집 제 25권 제 2A호. 2005.
5. 장경호, 장갑철, "강재의 소성이력 구성식의 정식화와 반복하중을 받는 원형강교각의 변형성능 평가", 대한토목학회논문집 제 24권 제 6-A호, 2004.
6. 장경호, 장갑철, 이은택, "SM570강재의 반복소성모델의 정식화 및 3차원 탄소성 유한요소적용에 관한 연구", 한국지진공학회 논문집, 제8권, 제1호, 2004, pp.59-65
7. 장갑철, 강재의 정·동적 반복소성모델의 정식화 및 해석기법의 개발. 박사학위논문, 중앙대학교, 2005.
8. J. R. Vinson, "The Behavior of Sandwich Structures of Isotropic and Composite Materials", Lancaster-Basel, USA, 1999.
9. Ahmad, B. M. Irons, O. C. Zienkiewicz, "Analysis of Thick and Thin Shell Structures by Curved Finite Elements", Int. J. Num. Meth. Engng, Vol. 2, 1970, pp 419-451.