

충전원형강관기둥에서 콘크리트와 강관의 부착응력에 관한 해석적 연구

An analytic study on the bond stress between concrete and steel tube in CFT tublar column

강 주 원* 박 성 무** 김 윤 태***
Kang, Joo-Won Park, Sung-Moo Kim, Youn-Tae

요 약

건축물이 고층화, 대형화 되어감에 따라 기둥이 부담해야할 내구성이 커진다. 이런 요구로 인하여 콘크리트 충전강관기둥의 형식을 개발하게 되었고, 역학적 거동을 규명하기 위해 연구가 이루어지고 있다.

본 연구는 실험에서 규명하기 힘든 콘크리트코어와 원형강관의 두 이질재료간의 접촉면에서의 상호작용에 대한 해석적 연구로써 비선형 해석프로그램인 ABAQUS/Standard Version 5.8을 이용하여 쉬어코넥트의 부착형태 및 위치에 따른 부착응력을 비교하고, 접촉면에 대한 역학적 특성을 나타낼 수 있는 모델링기법, 해석기법에 대하여 제시하고, 역학적 특성을 규명하고자 한다.

Abstract

An analytic study on the bond stress between steel tube and concrete in concrete filled steel(CFT) tublar column is presented in this paper. Recently buildings need members which are enhanced durability and ductility. Concrete filled tublar column system is proposed as alternative plan. In this paper, ABAQUS/Standard Version 5.8 which is identified as usefulness for finite element analysis and has various element library is used. The variables in this study are the location and type of shear-connector. The modeling on contact problem practiced by Contact Pair and Contact Pressure method. In the step of physical bond, it is practiced by Change friction option. After yielding of models, analytic results is less than that of experimental results.

키워드 : 부착응력, 원형강관기둥, 쉬어코넥트, 접촉면, 유한요소해석

Keywords : Bond Stress, CFT Tublar Column, Shear-connector, Contact Pair, Contact Pressure, Finite Element Analysis

1. 서 론

건축물은 고층화, 대형화 되어감에 따라 건축물의 안전한 지지를 위해 기둥이 부담해야 하는 하중이 증가하고, 하중을 지지하기 위해 기둥의 면적이 늘어날 수밖에 없게 되었다. 이는 실내공간 활용에 있어 효율성이 낮아 근래에는 기둥 단면적을 최소화 하면서 RC기둥만으로는 불가능했던 고층화와 대스판화에 적극 대응할 수 있는 새로운 구조시스템의 개발이 필요하게 되었다.

이에 철골과 콘크리트의 장점을 최대한 발휘할 수 있는 복합구조개발로 콘크리트 충전 강관이 개발되었다.

그러나 합성구조 시스템이 효과적이기 위해서는 일체로 거동하여야 하나 콘크리트와 강관은 소요 강도를 내기 전에 부착면의 탈락이 먼저 발생하고 그 거동은 명확하게 규명되어 있지 않은 상태로 부착면의 응력 거동에 대하여 계속적인 실험과 해석이 이루어져왔다.

따라서 본 연구에서는 실험에서 규명하기 힘든 콘크리트 코어와 강관의 두 이질 재료의 상호작용에 대한 연구의 일부분으로써, 그 중에서 강관에 부착될 shear-connector 부착형태나 위치에 따라 변화되는 부착응력을 비교하고 유한요소해석을 통해 이질

* 정희원, 영남대학교 건축학부 교수
Tel : 053-810-2429 E-mail : kangj@yumail.ac.kr

** 정희원, 영남대학교 건축학부 교수
E-mail : smpark@yu.ac.kr

*** 영남대학교 건축공학과 박사수료
E-mail : arlabyu@hanmail.net

재료간의 접촉면에 대한 역학적 특성을 나타낼 수 있는 적절한 모델링 기법을 제시하고 응력 분포를 분석하여 적절한 해석 기법을 제시하고자 한다.

본 연구는 충전원형강관기둥의 비선형 거동해석을 위해 유한요소 해석 프로그램인 ABAQUS Version 5.8 패키지를 사용하여 수행하였다. 본 해석은 콘크리트와 강관의 접촉면에서의 적절한 해석기법을 제시하기 위하여 기존 연구를 통하여 콘크리트와 강관의 부착면에 대한 모델링 방법 및 특성을 분석하고, 해석모델에서 주의할 점을 파악한다. 또한 요소의 특성을 고찰하고, 각 부재 특성을 잘 나타내는 요소를 선택하여 3차원 해석을 수행하였다.

2. 실험

2.1 시험체 계획

본 실험에 시험체는 다음 <표 2-1>과 같다.

<표 2-1> 해석대상 시험체 계획표

시험체명	강관			콘크리트강도 (MPa)	D/t비	shear-connector				
	치수 (mm)	두께 (mm)	길이 (mm)			형태	개수	위치	지름 (mm)	강도
CS-O	φ-318.6	7	1350	24	45.5	무	-	-	-	-
CS-L1						관통형	2	상	10	일반볼트
CS-L2							2	하		
CO-O						무	-	-	-	-
CC-L1						단속형	4	상	10	일반볼트
CC-L2							4	하		

C S-L
 └─shear-connector 위치 (1: 상부, 2: 하부)
 └─shear-connector 형태 (S: 관통형, C: 단속형)
 └─Circular Column

2.2 시험체의 주요 변수

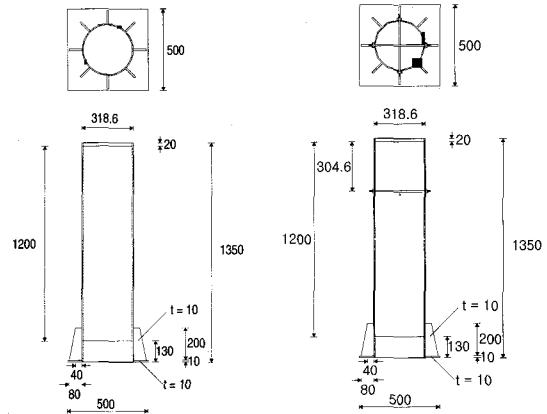
콘크리트 충전 원형 강관기둥 시험체의 주요 변수는 다음과 같다.

- ① shear-connector의 형태 - 관통형, 단속형
- ② shear-connector의 위치 - 상부, 하부

2.3 해석대상 시험체

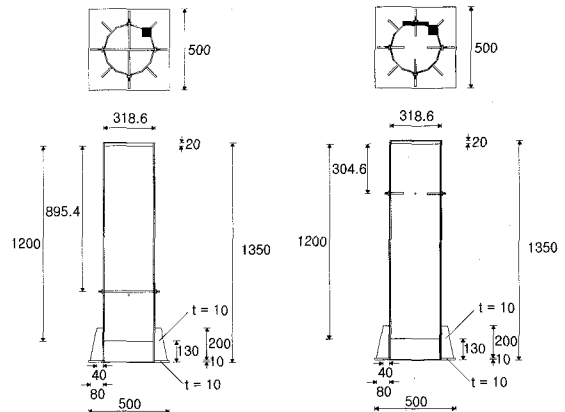
시험체의 기둥은 원형 강관을 사용하여 콘크리트

를 충전하였다. shear-connector의 형태에 따라 단속형과 관통형으로 나뉘지고 두 가지 모두 강관을 뚫고 단속형의 경우는 볼트를 끼워 용접하고 관통형의 경우는 볼트를 관통시키고 너트를 양쪽으로 조인 후 용접하였다.



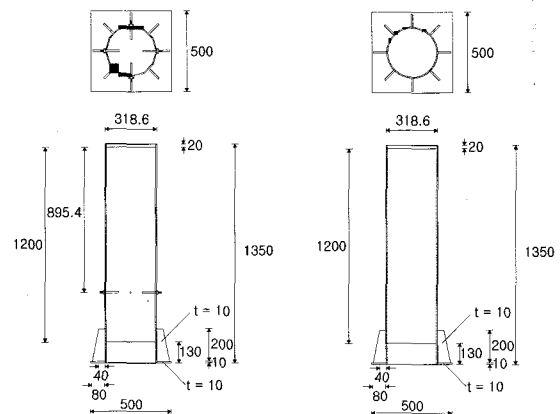
<그림 2-1> CS-O

<그림 2-2> CS-L1



<그림 2-3> CS-L2

<그림 2-4> CC-O



<그림 2-5> CC-L1

<그림 2-6> CC-L2

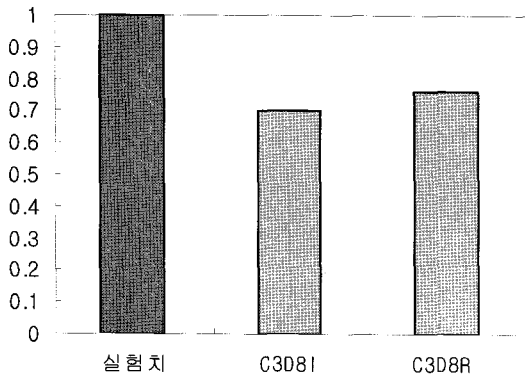
3. 충전강관의 유한요소해석

3.1 유한요소해석 모델링

3.1.1 콘크리트와 강관의 모델링

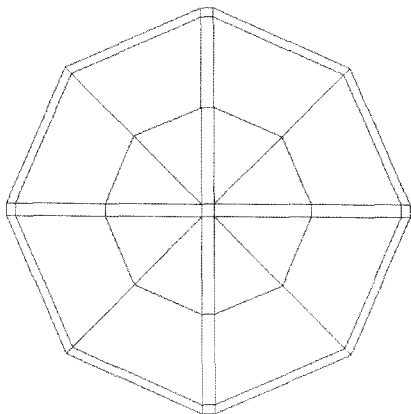
ABAQUS에서 제공하는 Solid 요소로서 보와 기둥 형태에 따라 모델링에 적합한 육면체는 HEX8요소 중 C3D8I / C3D8R요소가 있다.

본 해석 시험체에 적합한 요소검정을 위해 압축부재에 대하여 해석을 수행하였으며 결과는 다음과 같다.



<그림 3-1> 압축부재 요소 비교

선행해석에 따른 요소검정을 통해 본 해석에 적합하다고 판단되는 C3D8R, C3D6 요소를 이용하여 아래의 그림과 같이 콘크리트 및 강관을 모델링 하였다.



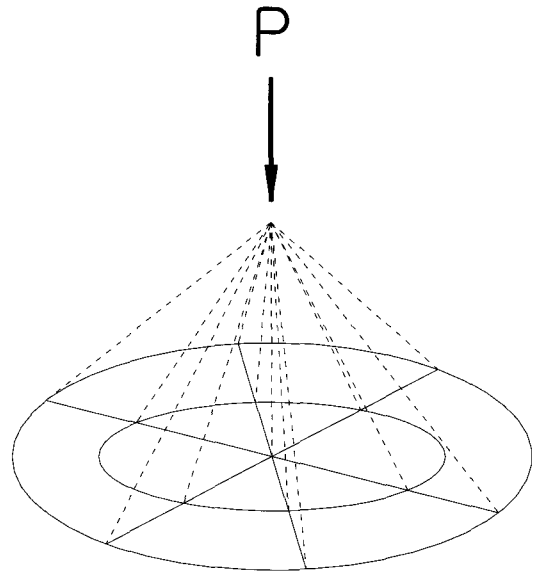
<그림 3-2> 콘크리트 및 강관 모델링

3.1.2 접촉면 모델링

ABAQUS가 제공하는 Contact 요소는 접촉면의부착형식, 접촉면에서 Slip의 유무 따라 직접적 요소(Surface Element)와 간접적 요소(Interface Element)로 나누어진다. 본 해석에서는 화학적 부착 및 물리적 부착을 고려하여야 하고 접촉면에서 Slip이 발생하므로 Contact거동을 직접 전달하는 Surface Element를 이용하여 Contact Pair Option에 의해 한 점에 두 개의 절점을 부여하여 접촉면을 모델링 하였다.

3.1.3 가력점

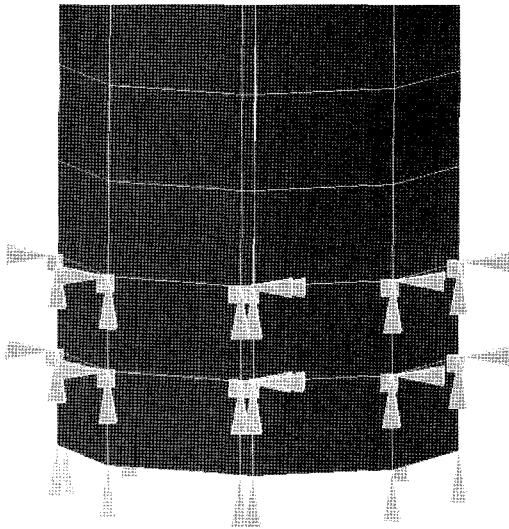
해석 시험체의 가력조건은 콘크리트 상부에 등분포 하중이 작용하도록 실험과 동일하게 적용하였으며 ABAQUS에서 제공하는 다중절점구속법을(Mult-Point Constraints)이용하였으며, 개념은 아래의 그림과 같다.



<그림 3-3> MPC 개념

3.1.4 경계조건(Boundary Condition)

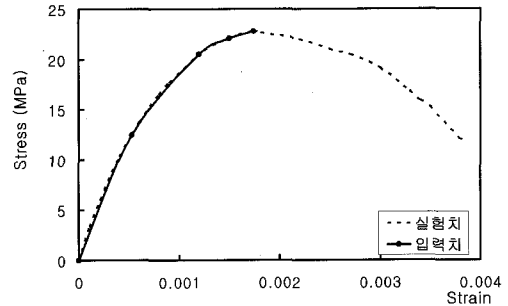
시험체에서는 실험을 수행하기 위해 강관하부에 콘크리트 슬립을 위해 Air Gap을 주고 또한 이부분의 강관의 국부좌굴을 방지하기 위한 스티프너가 있다. 해석에서 강관의 국부좌굴을 방지하고, 콘크리트의 순수 Slip량과 접촉면에서의 응력변화를 확인할 수 있도록 아래의 그림과 같이 수정된 경계조건을 적용하였다.



<그림 3-4> 경계조건

<표 3-1> 콘크리트 압축강도 실험결과

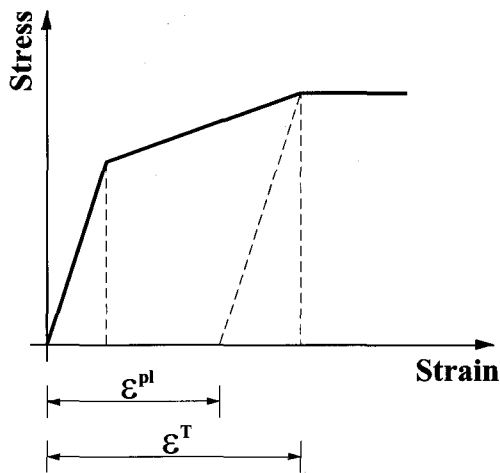
설계기준강도 (MPa)	f_{ck} (MPa)	E_c (MPa)	골재최대치수 (mm)	슬럼프 (mm)
24	22.8	2.4×10^4	25	150



<그림 3-6> 콘크리트의 응력-변형도 관계

3.2 비선형 해석을 위한 재료입력

재료의 물성값은 해석의 결과에 미치는 영향이 아주 크다. ABAQUS에서 제공하는 물성값 입력방법은 아래의 그림과 같고, 본 해석에서도 아래의 그림에서 나타내는 개념을 적용하여 물성값을 입력하였다.



$$\epsilon^{pl} = \epsilon^t - \epsilon^{el} = \epsilon^t - \sigma/E$$

ϵ^{pl} : plastic stain

ϵ^t : total true strain

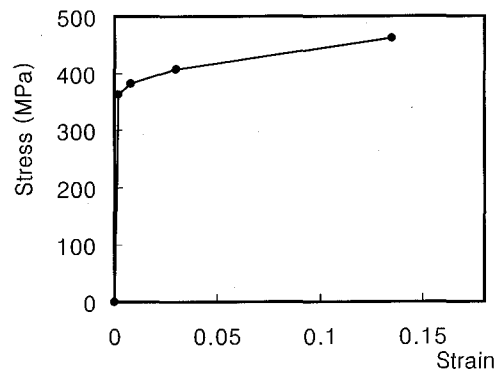
ϵ^{el} : elastic strain

<그림 3-5> 재료의 응력-변형도 관계

해석을 위한 재료의 물성치는 실험에 사용되었던 값을 적용하여 입력하였으며 아래와 같다.

<표 3-2> 강관강재의 인장강도 시험결과

재질	σ_y (항복점) (MPa)	σ_u (인장강도) (MPa)	σ_y / σ_u (항복비)	ϵ_y (항복변형률)
SPSR400	378	416	0.91	$1,923 \times 10^6$



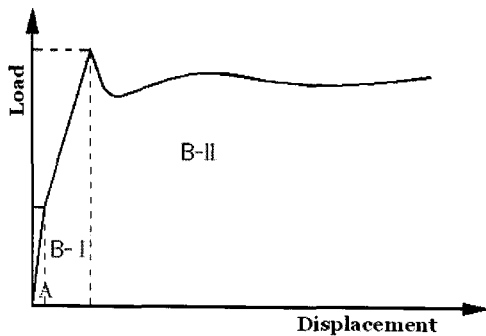
<그림 3-7> 강재의 응력-변형도 관계

3.3 접촉면의 해석기법

본 해석에서는 이질 재료간의 접촉면에 대한 다양한 Contact요소를 어떻게 적용시키느냐에 가장 주안점을 둔다. ABAQUS에서 제공하는 Contact요소 중 Surface Element는 마찰계수 값에 의해 화학적, 물리적 부착을 표현 할 수 있고, 또한 접촉면에서의 Slip이 허용된다. 따라서 Surface Element를 사용하여 접촉면모델링을 하였다.

위에서 언급한 Contact요소를 이용한 해석기법의

개념은 다음과 같다.



<그림 3-8> 시험체의 해석기법

<표 3-3> 해석기법

	합성구간	Full Interaction		Partial Interaction
분류		A	B-I	B-II
Step		Step 1	Step 2	Step 3
Load		Contact Pressure	Direct Load	Top Load-1

Step1

완전합성효과를 발휘하는 화학적 부착 구간
마찰계수 $\mu=1$

Step2

표면상태에 따른 화학적 부착구간
마찰계수 $\mu=1$

Step3

물리적 부착구간
마찰계수 $\mu=0.5$

4. 해석결과 및 분석

4.1 해석결과

<표 4-1> 해석결과

시험체	관통형			단속형		
	CS-O	CS-L1	CS-L2	CC-O	CC-L1	CC-L2
L	1350					
l	1200					
P_u (kN)	317	339	325	317	369	329
μ_u (MPa)	0.285	0.302	0.289	0.282	0.328	0.293
δ_u (mm)	0.55	0.51	0.36	0.55	0.5	0.63
P_{su} (kN)	-	335	291	-	326	305
δ_{su} (mm)	-	10.2	29.1	-	9.39	10.5

L : 강관의 길이

l : 콘크리트와 강관의 부착길이

P_u : 부착항복시 하중

μ_u : 부착항복시 응력

δ_u : 부착항복시 변위

P_{su} : shear-connector 항복시 하중

δ_{su} : shear-connector 항복시 변위

4.2 실험결과와 비교고찰

실험에 대한 해석결과의 비교치는 <표 4-2>에 나타나 있다. 화학적 부착구간(Step1) 및 표면상태에 따른 화학적 부착구간(Step2)에서는 부착항복 하중에 대한 오차는 시험체별로 0.27~3.46%의 분포를 나타내고, 부착항복시의 응력에 대한 오차는 0.3~6.42%의 분포로 실험결과에 근접하는 결과를 얻을 수 있었다. 해석결과와 실험결과의 비교그래프 <그림 4-1>~<그림 4-5>를 보면 위의 결과를 확인 할 수 있다.

물리적 부착구간(Step3)에서의 실험결과는 하중이 급격히 감소하고 감소한 만큼 다시 증가하는 경향을 보이고 있으나, 해석결과는 하중의 감소가 적고 하중의 감소만큼 다시 증가하기 전에 해석이 조기 종료되었다. 이는 shear-connector와 콘크리트가 접합되는 부분에 응력집중현상으로 인한 조기 종료라고 판단된다.

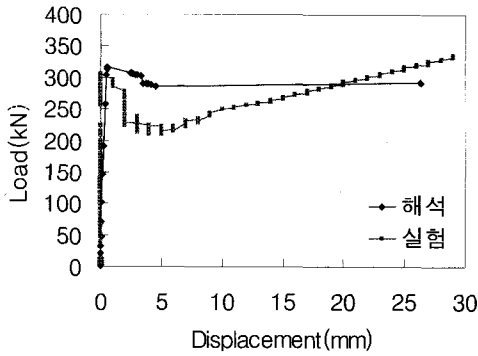
<표 4-2> 실험치와 비교

시험체	관통형			단속형			
	CS-O	CS-L1	CS-L2	CC-O	CC-L1	CC-L2	
P_u (kN)	실험	306.4	347.1	318.8	306.4	368.0	326.6
	해석	317	339	325	317	369	329
	오차 (%)	+3.46	-2.33	+1.94	+3.46	+0.27	+0.73
μ_u (MPa)	실험	0.265	0.31	0.282	0.265	0.329	0.294
	해석	0.282	0.302	0.289	0.282	0.328	0.293
	오차 (%)	+6.42	-2.65	+2.48	+6.42	-0.3	-0.34
P_{su} (kN)	실험	-	340.2	308.3	-	351.3	334.3
	해석	-	335.0	291.0	-	326.0	305.0
	오차 (%)	-	-1.53	-5.61	-	-7.2	-8.76

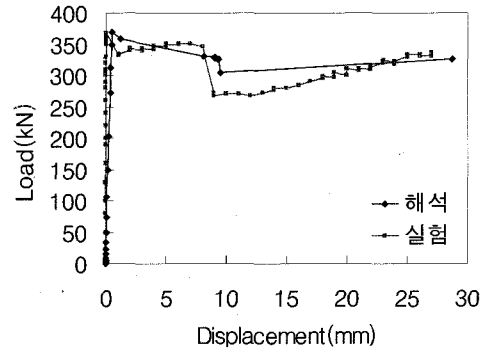
P_u : 부착항복시 하중

μ_u : 부착항복시 응력

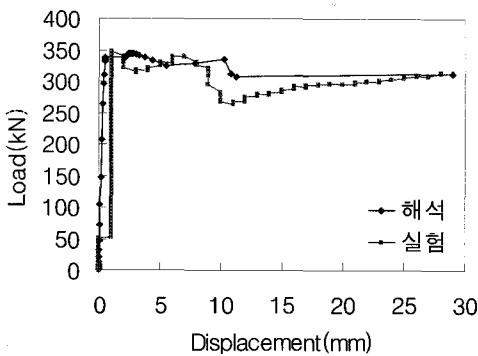
P_{su} : shear-connector 항복시 하중



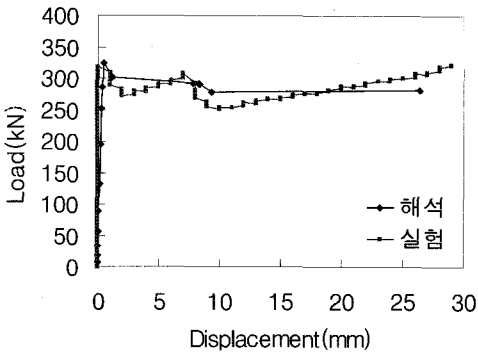
<그림 4-1> CS-O (CC-O) 비교



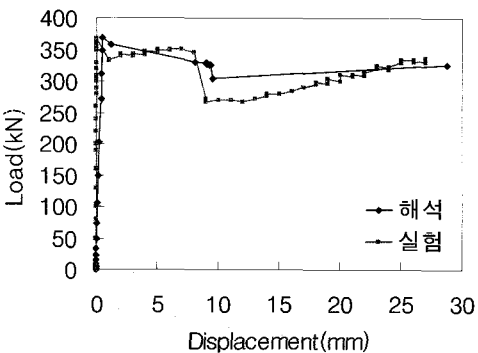
<그림 4-5> CC-L2 비교



<그림 4-2> CS-L1 비교



<그림 4-3> CS-L2 비교



<그림 4-4> CC-L1 비교

5. 결 론

본 연구는 ABAQUS/Standard 5.8 패키지를 이용하여 콘크리트 충전 원형강관 기둥의 두 이질 재료 사이의 항복 전 즉, 화학적 부착, 항복 후

Shear-connector에 의한 물리적 부착에 대한 실험에서 규명하기 힘든 부착응력에 대하여 해석을 통하여 규명하고자 하였다.

기존 연구 자료들을 보완하고 문제점을 제시하기 위해 여러 가지 방법으로 해석을 시도하였으며 해석의 결과 다음의 결론을 얻었다.

1. 콘크리트와 강관의 두 이질재료의 접촉면의 모델링은 화학적, 물리적 부착의 고려가 가능한 Surface Element의 CONTACT PAIR를 사용하여 Contact Pressure를 가력하는 방법이 가장 적절한 것으로 나타났다.

2. 적당한 Contact Pressure의 값을 찾기 위해 각 해석모델에 대하여 반복해석 결과 다음의 값을 얻을 수 있었다. CS-O(CC-O)-0.3, CS-L1-0.33, CS-L2-0.35, CC-L1-0.35, CC-L2-0.32Mpa

3. 하중단계별 부착응력의 변화에 대응하기 위해 본 해석에서는 Step1(화학적 부착 구간)-마찰계수 $\mu=1$, Step2(표면상태에 따른 화학적 부착구간)-마찰계수 $\mu=1$, Step3(물리적 부착구간)-마찰계수 $\mu=0.5$ 로 해석을 실시 하였다.

4. 해석결과와 실험결과의 비교그래프에서 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다. 화학적 부착구간(Step1) 및 표면상태에 따른 화학적 부착구간(Step2)에서는 해석결과가 실험결과에 근접하는 것을 알

수 있다. 그러나 물리적 부착구간(Step3)에서는 다소 차이가 있음을 알 수 있었다.

5. 물리적 부착구간에서는 콘크리트와 shear-connector의 접촉면, 콘크리트와 강관의 표면의 마찰에 의해서 부착응력이 결정된다. 따라서 부착응력 항복 후의 콘크리트와 강관의 표면상태에 따른 적합한 마찰계수의 값 및 해석의 조기종료에 대한 문제점 개선을 위한 연구가 더 필요하다고 본다.

참고문헌

1. Deric, J. Oehlers and Mark A. Bradford, "Composite Steel and Concrete Structural Members", PERGAMON, 1995
2. M. Shams and M. A.Saadeghvaziri, "Nonlinear response of concrete-filled steel tubular columns under axial loading", ACI Structural Journal, Vol.96, No.6, 1999, p.1009-1017
3. M. Ala Saadeghvaziri and Mohammad Shams, "Nonlinear modeling and evaluation of concrete-filled steeltubular columns", ABAQUS Users' Conference, Milan, Italy, June 1997
4. H. Shakir-Khalil, "Pushout strength of concrete-filled steel hollow sections", The Structural Engineer, Vol.71, No.13, 1993 p.230-233
5. Charles W. Roeder, "Composite action in concrete filled tubes", Journal ofStructural Engineering, Vol.125, No.5, p.477-484
6. M. Tomii, K. Yoshimura and Y. Morishita, "A method of improving bond strength between steel tube and concrete core cast in square and octagonal steel tubular columns", Transactions of the Japan concrete institute, Vol.2, [IV -16], 1980
7. Y. Morishita, M. Tomii and K. Yoshimura, "Experimental studies on bond strength in concrete filled circular steel tubular columns subjected to axial loads", Transactions of the Japan concrete institute, [V -12]
8. Y. Morishita, M. Tomii and K. Yoshimura, "Experimental studies on bond strength in concrete filled square and steel tubular columns subjected to axial loads", Transactions of the Japan concrete institute, [V -13]
9. 김영환, "콘크리트 충전 각형강관의 부착 응력에 관한 해석적 연구", 영남대학교 석사학위논문, 2000. 12
10. 김대회, "충전각형강관기둥에서 콘크리트와 강관의 부착응력에 관한 해석적연구", 영남대학교 석사학위논문, 2001. 12