

유한요소법을 이용한 혼합구조 접합부의 비선형 해석

Nonlinear Analysis of the Connections with Reinforced Concrete Column and Steel Beam using Finite Element Method

홍 성 현*
Hong, Seong-Heon

류 천**
Ryu, Cheon

이 리 형***
Lee, Li-Hyung

요 지

본 연구에서는 철근콘크리트기둥과 철골보로 이루어진 혼합구조 접합부의 해석에 대한 유한 요소법을 이용한 해석 모델 방법을 제시하였다. 혼합구조 접합부에서 콘크리트와 강관이 접하는 접촉면은 두 접촉면 사이를 부착과 마찰의 개념으로 표현할 수 있는 주-종속 접촉 알고리즘(master-slave contact algorithm)을 이용하여 모델링하였다. 그리고, 휨응력의 지배를 받는 강관에는 비적합 모드 요소를 사용하였다. 본 연구에서의 혼합구조 특징은 보에서 기둥으로 힘의 전달을 원활히 하기 위하여 다이어프램이 사용되었고, 이러한 혼합구조 접합부 모델링 방법에 대한 타당성을 알아보기 위하여 3차원 비선형 해석을 행하여 실험결과와 비교한 결과 잘 일치하는 결과를 얻었다.

핵심용어 : 유한요소법, 비적합 모드 요소, 주-종속 접촉 알고리즘, 혼합구조

Abstract

This study presented an modeling method for the connections in mixed structure with reinforced concrete columns and steel beam using finite element method. The contacting surfaces between concrete and steel are modeled using master-slave contact algorithm and the incompatible mode elements were used in the steel tube subjected to bending. The characteristics of mixed structure was that diaphragm was used for transferring force from beam to column. The three dimensional nonlinear analysis was performed and the analytical results compared with experimental results in order to prove modeling method.

Keywords : finite element method, incompatible mode element, master-slave contact algorithm, mixed structure.

1. 서 론

최근에 건축물은 고층화, 대형화되어감에 따라 건축물의 안전성, 시공성 및 경제성을 고려한 새로운 구조형식의 개발이 요구되고 있다. 이러한 요구

에 대한 대안으로 서로 다른 종류의 구조 부재를 혼합하여 구축된 형식인 혼합구조가 많은 연구자에 의해 개발되고 있다.¹⁾ 철근 콘크리트 기둥과 철골보의 혼합 구조는 압축력에 강하고 강성이 좋은 철근콘크리트부재와 휨과 전단력에 효과적인 철골-부

* 한양대학교 대학원 공학석사

** 동부건설 기술연구원, 선임연구원

*** 정희원 · 한양대학교 건축공학부 교수, 공학박사

· 이 논문에 대한 토론을 1999년 12월 31일까지 본 학회에 보내주시면 2000년 3월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

재를 이용하여 각각 기둥과 보로서 역할을 하게 된다.

본 연구에서의 접합부 형식은 기둥과 보의 접합부에서 힘의 전달을 원활하게 하기 위하여 다이아프램을 도입하였다. 그리고 비선형 해석을 이용하여 접합부에 대한 분석을 하기에 앞서 해석 기법 확립을 목적으로 하고 있다. 해석 기법으로는 다른 종류의 구조 부재로 이루어진 접합부에 대하여 불연속 구속조건(discontinuous constraints)을 고려한 주-종속 접촉 알고리즘(master-slave contact algorithm)²⁾을 이용하여 나타내었다. 이를 위해 유한요소법을 이용한 비선형 해석 범용프로그램중 ABAQUS를 사용하여 해석하였다.

2. 모델링 및 해석 방법

2.1 접촉면의 역학적 특성

일반적으로 요소의 재료 특성을 나타내는 구성방정식은 6개의 응력 성분으로 나타내지만, 부착 문제에 관한 기존 연구³⁾를 고찰하여 보면 수직 응력과 전단 응력의 성분으로 나타내고 있다. 즉 경계면에 수직 방향의 응력과 평행 방향의 두 성분의 전단 응력만으로 강성을 평가하고 있다.

ABAQUS에서는 접촉면 문제를 모델링하기 위해 면(surfaces)과 접촉 요소(contact element)를 사용하는 두 가지 방법을 제공하며, 이러한 접촉면 문제를 해결하기 위해서 두 접촉면사이를 부착, 마찰의 개념으로 연결시킬 수 있는 주-종속 접촉 알고리즘을 사용하며 그림 1과 같은 관계를 갖고, 개념은 다음과 같이 설명할 수 있다.

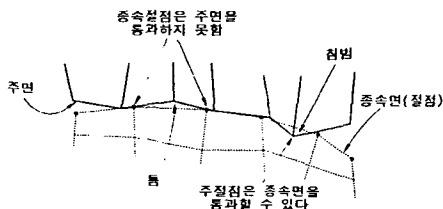


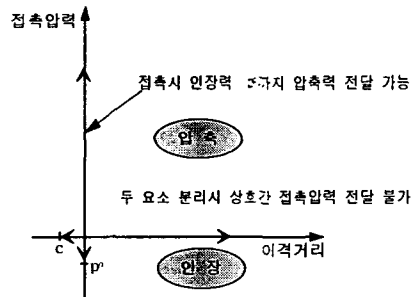
그림 1 주 표면과 종속 절점의 관계

1) 각각의 잠재적인 접촉조건은 “종속(slave)” 절점과 “주(master)” 표면의 용어로 정의된다.

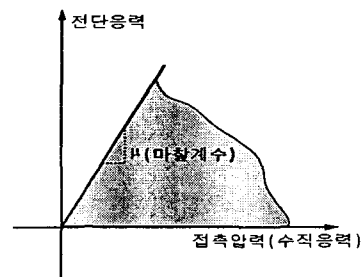
2) 종속 절점은 주 표면안으로 변형하지 못하도록 구속된다. 그러나 주 표면의 절점은 종속 표면 내로의 변형이 가능하다.

3) 접촉방향은 항상 주 표면에 수직이다.

한편, 접촉면에서의 응력 전달 관계는 그림2와 같은 접촉압력-이격거리 관계(contact pressure-clearance relationship)를 사용하고 있다. 즉, 두 접촉면 사이의 이격거리가 0인 경우에는 어떤 크기의 압축 하중도 전달이 가능하며, 상호간의 간격을 벌어지게 하려는 인장하중에 대하여도 p^0 만큼의 부착력이 저항하게 된다. 또한, c 만큼의 중첩거리 이상으로 두 개의 요소가 상호간의 중첩이 일어나지 않도록 하며, 두 개의 요소 사이에 틈이 발생하게 되면 하중의 전달이 일어나지 않게 된다. 절점에서 c 값 또는 p^0 값이 초과되면 접촉상태가 바뀌게 된다.



(a) 접촉면의 수직응력 관계



(b) 접촉면의 수평응력 관계

그림 2 접촉면의 역학적 특성

그리고, 표면이 접촉했을 때 일반적으로 경계면에 대해 수직력뿐만 아니라 전단력도 전달한다. 일

반적으로 이 두 힘 성분사이에는 접촉 물체사이에 마찰로써 알려진 관계가 있다. 그 관계는 일반적으로 물체의 경계면에서 응력의 향으로 표현된다. ABAQUS에서의 마찰 모델은 그림 2b와 같이 마찰 계수 μ 를 고려하였다

이러한 특성을 가진 주-종속 접촉 알고리즘의 흐름도를 그림 3에 나타내었다. 이 알고리즘은 각 증분(increment)의 시작시 종속 절점(slave nodes)이 접촉이나 분리상태에 있는지를 검토하여 접촉상태에 있다면 각 절점에 구속조건을 가하고, 반대로 분리상태에 있다면 구속조건을 해제한 후에 평형조건식을 검토하여 수렴과 발산을 결정한다.

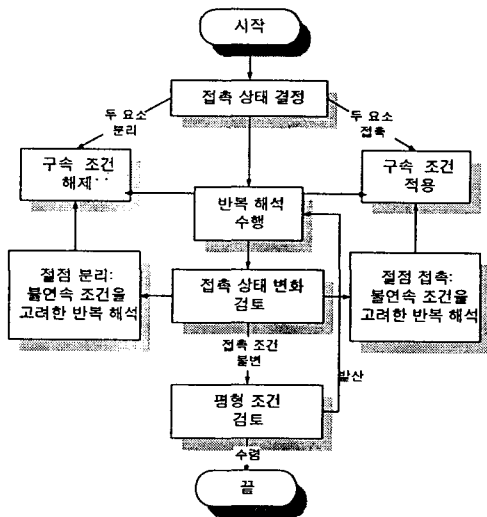


그림 3 주-종속 접촉 알고리즘의 흐름도

2.2 각형 강판

혼합구조 접합부에서 강판은 휨 응력이 지배하고 있다. 유한요소 해석에서는 휨 응력을 받는 요소는 과도하게 평가된 전단강성 때문에 거동이 갑자기 강하게 되는 shear locking 현상을 방지하기 위하여 2차 등매개 변수 요소(the second isoparametric element), 비적합 모드 요소(incompatible mode elements), 감차 적분을 이용한 선형 등매개 변수 요소(reduced integration linear isoparametric)의 사용과 같은 방법이 이용되고 있다. 이러한 요소 중 본 연구에서는 해석 시간상의 장점과 2차 등매개 변수 요소를 사용한 것 만큼 휨에 대해 잘 거동

하는 비적합 모드 요소를 사용하여 해석을 행하였다. 일반적인 1차 요소(first-order element)는 그림 4와 같이 휨을 받는 요소에 대하여 요소의 가장자리가 곡선으로 나타낼 수 없기 때문에 요소가 세분화되어야 한다. 적분점(integration points)을 통과하고 점선에서 위의 점선은 초기 길이에 비해 증가하여 인장 상태를, 밑의 점선은 감소하여 압축 상태를 나타내고 있다. 수직 성분의 점선은 미소 변위상태에 있다고 가정하여 변화가 없기 때문에 적분점에서의 수직응력은 0이 된다. 그러나 각 적분점에서의 수직성분과 수평성분은 직각을 이루다가 휨을 받으면서 각이 변하기 때문에 전단응력을 유발한다. 따라서 순수 휨변형모드가 아닌 전단변형모드로 변형을 일으키기 때문에 같은 양의 휨변형을 일으키게 하기 위하여는 더 많은 에너지를 필요로 하게 된다. 비적합 모드 요소는 그림 5와 같이 원래의 변위형태에 추가적인 변위(비적합 변위)모드를 추가하여 전단변형모드로 제약된 변위모드를 풀어 주어 실제 변위를 복원하는 것이다. 즉, 요소에 가정된 변위에 결여되어 있는 변위성분을 추가하는 것이다. 추가된 자유도의 주 효과는 휨 영향을 받았을 때 생기는 전단응력을 제거하는 것이다.^{4),5)}

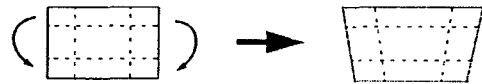


그림 4 일반적인 1차요소의 휨 변형모드

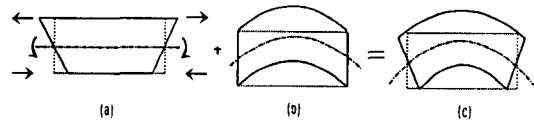


그림 5 비적합 변위 모드

2.3 강판

인장력 및 압축력의 영향을 받고 있는 플랜지, 외다이아프램과 십자형중판에 대하여 감차 적분(reduced integration)을 이용하고 8절점을 가진 3차원 선형 솔리드 요소(three dimensional linear solid element)를 사용하였다. 항복 조건식으로는 Von Mises의 항복 조건식을 이용하였다.

2.4 콘크리트

콘크리트 요소를 나타내기 위하여 8절점을 가진 3차원 선형 솔리드 요소(three dimensional linear solid element)를 이용하였다. 또한 직교이방성체로 하여 Darwin과 Pecknold⁶⁾의 모델을 이용하였고, 파괴 조건으로는 그림 6과 같은 Kupfer⁷⁾의 조건식을 이용하였다. 콘크리트의 일축 압축 응력-변형을 관계는 그림 7과 같고, 압축강도까지는 Saenz 식⁸⁾을, 최대압축응력 이후에 대해서 접합부 콘크리트의 전단보강근에 따른 구속효과를 고려한 Park⁹⁾ 모델을 이용하였다.

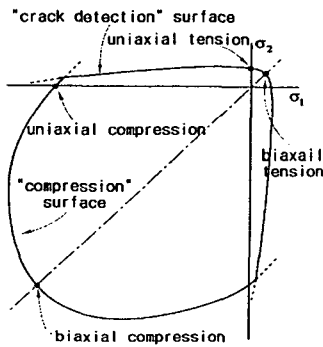
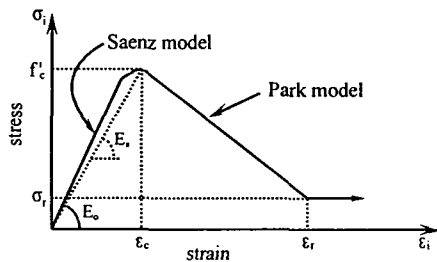


그림 6 콘크리트의 파괴조건



E_0 : 탄성초기 접선계수 E_s : 최대압축응력시 할선계수

그림 7 콘크리트의 압축 응력도-변형도 관계

콘크리트가 인장력을 받을 때는 최대압축응력의 약 7~10%까지는 선형탄성거동을 하며, 균열 발생 이후의 인장거동에 대하여는 그림 8과 같이 가정한다. 또한, 콘크리트에 균열이 발생하면, 전단강성은 감소한다. 따라서 균열이 발생한 이후의 전단강성은 저감율을 이용하여 균열이 증가하면 선형적으로 0까지 감소한다고 하였다.

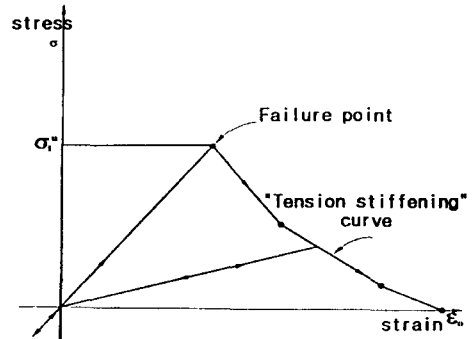


그림 8 콘크리트의 인장 응력도-변형도 관계

일반적으로 유한요소 해석은 수치해석적으로 미분방정식을 풀기 위한 방법이어서 미분 가능한 연속체에 적용될 수 있다. 그러나 철근 콘크리트에서는 균열이 발생하게 되면 연속체가 아니다. 따라서 콘크리트 균열은 거시적인(macroscopic) 분산균열 모델(smearred crack model)¹⁰⁾을 이용하여 나타내었다. 분산균열모델의 재료 모델은 평균 응력과 평균 변형을 관계로 표현되기 때문에 콘크리트에 보강근이 없을 때 요소의 형상과 크기에 따라서 다른 값을 초래한다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 파괴에너지 개념을 이용한 Hillerborg가 제안한 방법¹¹⁾을 이용하여 다음과 같은 관계식을 고려하여 인장 강화(tension stiffening)효과를 고려하였다.

$$G_f = \int \sigma_t du \quad (1)$$

$$\epsilon_o = \frac{u_o}{c} = \frac{2G_f}{c\sigma_t'} \quad (2)$$

여기서, G_f 는 파괴에너지, ϵ_o 는 콘크리트의 인장강도가 0인 지점에서의 변형률을, c 는 요소 형상에 따른 특성 길이를 나타낸다.

2.5 철근

철근은 재축방향으로만 응력이 작용하고, 압축과 인장에 대해 완전 탄소성으로 가정하여 모델링하였다.

2.6 강관과 콘크리트의 접촉면

강관과 콘크리트의 접촉면을 모델링하기 위해서

앞에서 언급한 면을 이용한 주-종속 알고리즘을 이용하여 나타내었고, 접촉면에 대한 역학적 특성은 기존 연구¹²⁾의 결과를 이용하여 마찰 계수와 부착력을 0.65와 $0.04f'_c$ 로 가정하였다.

3. 혼합구조 접합부의 비선형 해석

3.1 해석 대상 실험체

본 연구의 접합부 형식은 접합부내에서 기둥이 연속되고 보가 단절된 기둥관통형식이다. 접합부에서 보가 단절됨으로 인한 접합부에서의 내력확보와 응력전달의 문제점을 해결하기 위해 철근콘크리트 기둥과 철골 보가 만나는 접합부 부분에 각형강관을 도입하였고 보에서 전달되는 하중을 원활하게 전달하기 위해 외다이아프램으로 보강하였다. 그리고 접합부의 각형강관을 구속시켜 주는 십자형중판을 각형강관 상하에 용접하였다. 그림9는 본 연구에서의 혼합구조 접합부 형상을 나타내고 있다.

해석 대상 실험체¹³⁾로는 총 3개이며 실험체 변수로는 각형강관의 두께, 외다이아프램의 취약단면길이, 보 플랜지 두께를 변수로 하여 그림 10에 실험체의 명칭 및 상세도를, 각 실험체 제원을 표1에 나타내었다.

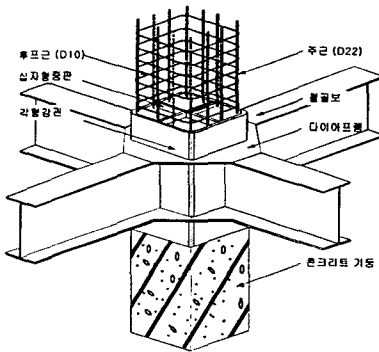


그림 9 혼합구조 접합부

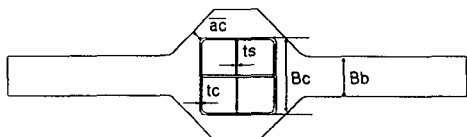


그림 10 실험체의 부분 명칭 및 상세도

전 실험체에 공통적으로 콘크리트 기둥의 높이는 기둥 상하부의 힌지를 제외하고 1440mm, 철골보의 스패는 2630mm로 계획하였다. 기둥단면은 450×450 mm로 하였다. 그리고, 그림 11은 철근콘크리트기둥의 배근상세를 보여주고 있다. 모든 실험체에 공통적으로 강관부를 제외한 콘크리트기둥에는 40mm 간격으로 총 26개의 D10 띠철근을 배근하였고, 강관속의 철근 콘크리트기둥에는 띠철근을 배근하지 않았다. 주근은 150cm길이로 12개의 D22를 배근하였다. 그림 12에 대표적으로 C1-D1-A1 실험체에 대한 설치 상황을 나타내었다.

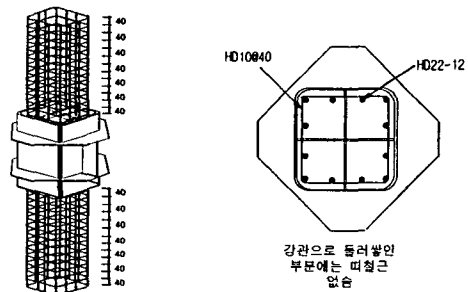


그림 11 철근 배근 상세

표 1 실험체 제원

실험체명	ac	tc	td	Bb	ts	비 고
C1-D1-A1	12	9	12	150	16	기준실험체
C1-D1-A2	24	9	12	150	16	취약단면길이변화
C1-D2-A1	9	9	9	150	16	외다이아프램 취약단면 길이 및 두께 변화

ac : 외다이아프램 취약단면 길이
 tc : 강관 두께
 td : 외다이아프램 두께
 Bb : 보플랜지 폭
 ts : 십자형 중판 두께
 단위 : mm

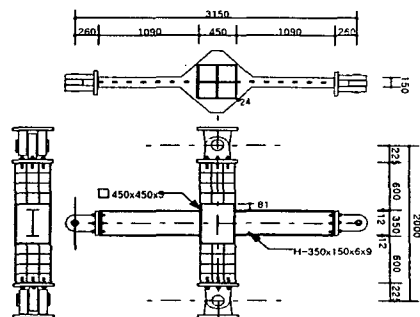


그림 12 C1-D1-A1의 실험체 형상 및 치수

실험에 사용된 강재의 재료특성과 콘크리트의 재료특성은 각각 표2와 표3에 나타내었다.

표 2 강재의 재료 성질

	탄성계수 (t/cm ²)	항복응력 (t/cm ²)	인장강도 (t/cm ²)	연신율 (%)
PL 6	2100	3.24	3.99	24.3
PL 9	2266	2.86	4.03	24.1
PL 12	1931	2.60	3.70	23.3
PL 16	1936	2.82	4.42	24.7
D10	2040	4.21	6.83	13.4
D22	1975	4.48	6.59	18.0

표 3 콘크리트의 압축강도 시험결과

설계기준강도 (kg/cm ²)	f _c (kg/cm ²)	E _c (kg/cm ²)
350	393	2.17 × 10 ⁹

3.2 경계 조건 및 요소 분할

철골보 웨브는 면내의 거동에 대한 자유도만 가지기 때문에 철골보 웨브가 면외 변형이 일어나지 않게 하기 위하여 그림 13과 같이 면외 변위 성분인 Y방향에 대한 변위자유도를 구속하였다.

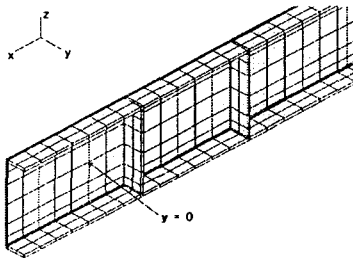


그림 13 보웨브의 경계조건

그리고, 콘크리트기둥의 상부와 하부에 대한 경계조건으로 롤러(roller)의 경계조건으로 만들기 위하여 기둥 상하부의 변위자유도인 x,y를 구속하였다. 그리고 해석 모델은 하중 및 접합부 형상의 대칭성을 고려하여 철골보의 중심선으로부터 1/2만

을 요소 분할하고 그 경계면에 대해서 대칭 경계조건을 주어 모델링하였다. 유한 요소 분할도를 그림 14에 나타내었다.

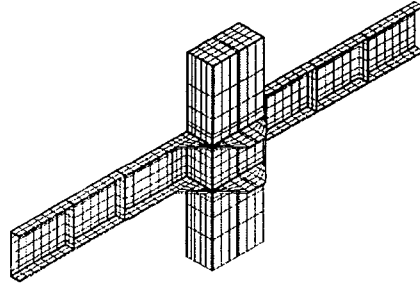


그림 14 유한 요소 분할도

한편, 연성 거동을 보이는 재료에 대해서는 stress and strain measure로써 Cauchy stress ("true" stress)와 logarithmic strain을 이용하였다. 또한, 본 혼합구조 접합부의 해석에서는 기하학적 비선형성 및 재료적 비선형성을 고려하였고 단조가력 해석하였다.

3.3 실험 결과 및 해석 결과 비교

접합부에 대한 하중-층간 변형각 관계를 실험결과와 비교한 것을 그림 15 ~ 그림 17에 나타내었다. 본 혼합구조 접합부는 외디아이프램의 항복내력을 평가하기 위해 콘크리트 기둥의 패널존(panel zone)이 항복이 일어나지 않게 계획하였기 때문에 하중-층간 변형각 관계에서 보는 바와 같이 철골보를 반복가력한 곡선과 비슷한 결과를 보이고, 각 실험체에 대한 해석결과와 실험결과는 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

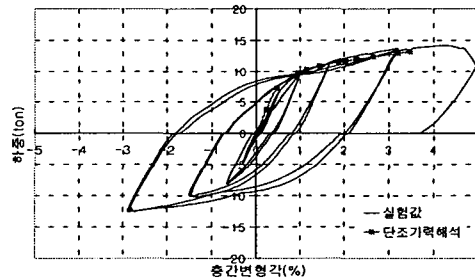


그림 15 C1-D1-A1의 하중-층간변형각 관계

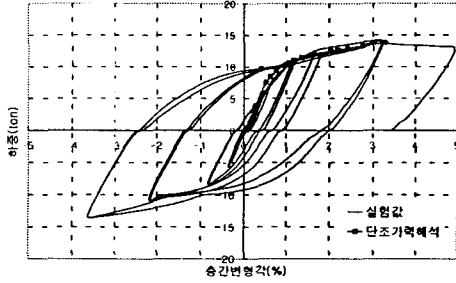


그림 16 C1-D1-A2의 하중-층간변형각 관계

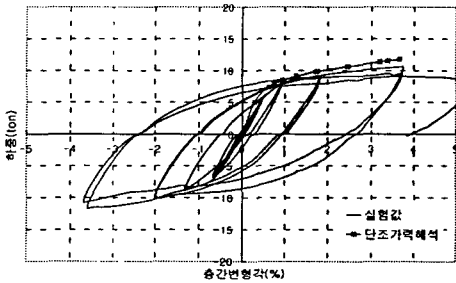


그림 17 C1-D2-A1의 하중-층간변형각 관계

3.4 하중-변형률 곡선 비교

모델링 방법의 검증으로 C1-D1-A2 실험체의 각 부재에 대한 하중-변형률 곡선을 비교하여 보았다. 변형률 측정위치는 그림 18에 굵은 선으로 나타내었다. 실험결과와 해석결과와의 비교에서 변형률의 측정위치가 실험과 해석에서 정확히 같지 않기 때문에 다소의 오차를 나타내고 있다. 변형률의 측정위치는 압축을 받고 있는 철골 보플랜지부분의 축방향(a), 인장을 받고 있는 부분에서 강관중심에서의 재축방향(b)과 강관을 둘러싸고 있는 방향(c)에서의 하중-변형률 관계를 비교하여 그림 19~그림 21에 나타내었다.

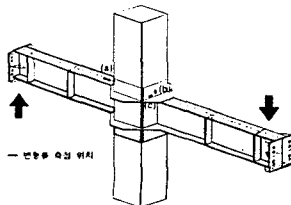


그림 18 변형률 측정 위치

각각의 하중-변형률 곡선을 살펴보면 강관 재축 방향에서 항복 이후의 내력에 있어서는 비슷한 경향을 보이고 있으나, 초기강성에 있어서 해석결과가 강하게 나오고 있음을 알 수 있다.

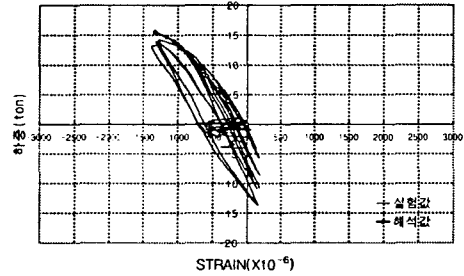


그림 19 철골 보플랜지 하중-변형률 관계

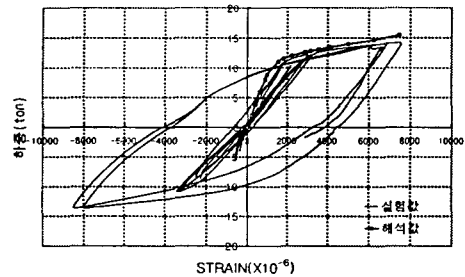


그림 20 강관 재축 방향 하중-변형률 관계

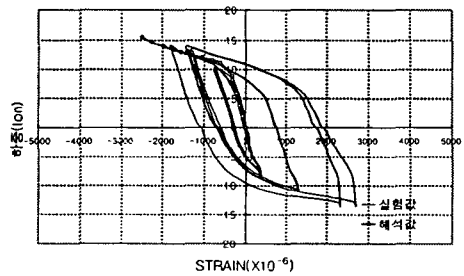


그림 21 강관 둘레 하중-변형률 관계

4. 결 론

본 연구에서는 철근콘크리트등과 철골보로 이루어진 혼합구조 접합부에 대하여 기하학적 비선형성과 재료적 비선형성을 고려한 3차원 비선형 해석

을 수행하여 그 해석적 기법을 제안하였다.

강판과 콘크리트의 서로 다른 부재로 이루어진 접촉면에 대해서 주-종속 접촉 알고리즘을 이용하여 모델링하였다. 이 알고리즘은 두 접촉 요소를 주 표면(master surfaces)과 종속면(slave surfaces)의 절점으로 각각 정의하여 주-종속면의 개폐(open-closed)거동과 응력전달관계를 잘 나타내고 있다.

또한, 힘의 지배를 받는 요소에 대해서 완전 적분(fully integration)과 1차 요소(first-order element)에서 발생할 수 있는 shear locking현상을 방지하고, 계산 비용상의 단점을 가지고 있는 2차 등매개 변수 요소의 문제점을 해결할 수 있는 비적합 모드 요소를 사용하여 해석 소요 시간을 단축하고 좋은 결과를 얻었다.

이러한 해석 기법을 이용하여 혼합구조 접합부에 대한 비선형 해석결과와 실험결과가 잘 일치함을 알 수 있었고 접합부의 응력전달기구(stress transfer mechanism)를 파악하는데 유용하게 쓰여질 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 한국과학기술재단지정 한양대학교 초대형 구조시스템 연구센터와 동부건설주식회사의 지원으로 이루어진 것으로 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. 日本建築學會構造委員會, "柱RC梁Sとする混合構造の柱梁接合部の力學的舉動に關するシソposium", 鐵骨鐵筋콘크리트構造運營委員會, 混合構造小委員會, 1994.12
2. ABAQUS/Standard User's Manual Version 5.7, Hibbit, Karlsson & Sorensen, Inc.
3. 米澤健次, 野口 博, "柱 RC・梁 Sを用いた混合構造柱梁接合部のせん斷性能に關する解析的研究", 콘크리트工學年次論文報告集, Vol.16, No.2, 1994, pp.1247~1252
4. Zienkiewicz, O.C. and Taylor, R.L., *The Finite Element Method*, 4th Ed., Vol.1, McGraw Hill, pp.304~307
5. 최창근, 유한요소해석, 1판, 집문당, 서울, 1992, pp.405~408
6. David Darwin, David A. Pecknold, "Non-linear Biaxial Stress-Strain Law for Concrete", *Journal of the Engineering Mechanics Division*, ASCE, Vol.103 No. EM2, April 1977, pp.229~241
7. Kupfer, H.B. and Gerstle, K.H. "Behavior of Concrete under Biaxial Stresses", *Journal of the Engineering Mechanics Division*, ASCE, VOL. 99, No. EM4, Aug. 1973, pp.853~866
8. Saenz, L. P., "Discussion of Equation for the Stress-Strain Curve of Concrete by Desay and Krishnan", *Journal ACI*, Vol. 61, No. 9, Sep. 1964, pp.1229~1235
9. Kent, D. C and Park, R., "Flexural Members with Confined Concrete", *ASCE*, Vol. 97, No. ST7, Jul. 1971, pp. 1969~1990
10. 岡村 甫, 前川宏一, 鐵筋コンクリートの非線型解析と構成則, 技報堂出版, 1991
11. Hillerborg, A., Modeer, M. and Petersson, P.E., "Analysis of Crack Formation and Growth in Concrete by means of Fracture Mechanics and Finite Element", *Cement and Concrete Research*, Vol. 6, No.6, 1976, pp.773~782
12. 米澤健次, 野口 博, "鋼とコンクリートからなる合成構造の付着特性に關する研究", 建築學會大會梗概集(東海), 1994年 9月, pp.1631~1632
13. 李利衡 외 5人, "기둥貫通形 鐵筋콘크리트 기둥鐵骨보의 混合構造 시스템 開發에 關한 研究", 大韓建築學會秋季學術發表大會, 제 17권 2호, 1997년 10월, pp.1193~1198
(접수일자 : 1999. 3. 10)