

횡하중을 받는 철골구조물에서 합성보의 강성과 강도

Stiffness and Strength of Composite Beams in Steel Building Structures under Lateral Loading

이 승 준*
Lee, Seung Joon

요 약

철골 건축 구조물이 횡하중을 받을 때 합성보의 거동에 대한 연구가 수행되었다. 실험으로부터 얻어진 결과와 수치해석에 의한 결과를 이용하여 합성보의 강성과 연결부에서의 강도를 위한 수학적 모델이 연결부의 상세를 고려하여 개발되었다. 또한 캔틸레버 합성보의 skeleton 곡선과 hysteresis 곡선을 위한 해석모델이 제시되었다. 탄성보와 부재내의 비탄성 변형이 응집된 양 단부스프링으로 구성된 단일요소모델에 의한 합성보 요소가 컴퓨터 프로그램, DRAIN-2D에 포함되었으며, 해석결과는 실험결과의 비교를 통해 검증되었다.

Abstract

The behavior of composite beams in steel building structures subjected to lateral loading is studied. Mathematical models for the stiffness of composite beams and the strength at the connections, which are dependent on details of the connections are developed based on the previous experimental results and the results from numerical analyses. Analytical models for the skeleton and hysteresis curves of cantilever composite beams are also presented. A single component model for the composite beam, consisting of elastic beam and the end springs at which all the inelastic deformations within a member are lumped, is implemented into the computer program, DRAIN-2D. And a comparison of analytical results is made with the experimental results.

1. 서론

내진을 위한 건축구조물은 두 기본적인 설계 요구조건을 만족하면서 설계되어야 한다. 첫째는, 그 구조물이 중규모의 지진에 대하여 그 피해가

건물이 다시 사용될 수 있을 정도내로 제한되어야 한다. 이것은 건축물의 수평하중에 대한 수평 변위가 제한된 범위내에 있어야 하고 구조부재(Structural Element)의 피해가 방지되어야 함을 의미한다. 이 설계조건은 모든 구조부재의 강성(Stiff-

* 정회원, 학술이사, 아주대학교 건축학과 조교수, 공학박사
※ 이 논문은 1988년 아주대학교 교내 학술연구비에 의해 연구되었음.

□ 이 논문에 대한 토론을 1990년 6월 30일까지 본학회에 보내주시면 1990년 12월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

ness)과 강도(Strength)를 충분히 크게 함으로써 만족된다. 둘째는, 그 구조물이 대규모의 지진에 대하여도 인명의 피해를 일으키지 않도록 파괴에 이르지 않아야 한다. 이것은 구조물이 강도와 더불어 충분히 큰 변형에 견딜 수 있어야 하고, 지진에 의한 에너지를 많이 흡수하고 소산시킬 수 있는 능력을 지녀야 함을 의미하며, 구조부재 뿐만 아니라 비구조부재(Non-Structural Element)의 내진에 대한 특성을 잘 이용하여 조화된 설계를 함으로써 만족될 수 있다.

지난 30여년 동안 건축구조물의 지진에 대한 거동은 많이 연구되어 왔으며 구조물의 안전성을 높이는 데 큰 발전을 이루어 왔다. 건축구조물을 구성하는 구조부재 뿐만 아니라 골조의 지진에 대한 특성 및 거동에 대하여 실험적인 연구와 이론적인 해석을 통한 연구에 의해 보다 깊이 이해할 수 있게 되었다. 철근 콘크리트구조와 철골구조의 거동을 연구하였고 최근에는 혼합구조물(Mixed Structure)의 내진특성에 대한 관심이 매우 크다. 2차원적인 골조의 거동에 대한 연구에서 3차원 구조물의 거동에 대한 연구 또한 크게 진척되고 있다. 이렇게 얻어진 연구결과는 실제 건축물 설계를 위한 설계기준을 변화시켜 왔다. 미국의 UBC(Uniform Building Code) 88은 이러한 연구결과를 잘 반영하고 있다.

그러나 단지 내진설계 기준에 따른 구조설계는 만족할 만한 내진설계라고 할 수 없다. 건축 구조물의 훌륭한 내진설계를 할려면 지진하중에 구조물이 어떻게 거동할 것인가를 깊이있게 이해하여야 한다. 구조부재의 훌륭한 설계는 취성적인 거동보다는 연성이 큰 거동의 형태로 부재가 그 극한상태에 도달하도록 설계하는 것이다. 마찬가지로, 훌륭한 구조 시스템의 설계는 구조물이 충분한 소성 변형을 일으킬 수 있고, 많은 에너지를 소산시킬 수 있도록 부재의 소성화 순서를 결정하고 이에 맞추어 부재강도를 설계하는 것이다. 이렇게 미리 결정된 순서대로 구조물의 소성화가 일어나도록 설계하면 구조물의 거동 및 해석에 대한 불확실성을 줄일 수 있다. 미래에 일어날 지진의 강도 및 진동수는 매우 불확실하다. 내진설계의 주요 목적의 하나는 불확실성을 가능한 한 줄이는데 있다. 구조 시스템이 지진에 대해 설계에서 예

측된 대로 거동할 수 있다면 복잡한 거동을 정확하게 해석할 수 있는 것보다 중요하다.

미리 결정된 소성화의 순서에 따라 설계하면 일부 부재는 나머지 부재보다 약하게 설계된다(예를 들면, 기둥보다 보를 약하게 설계한다). 그러나, 현행 설계 기준에 따르면 부재의 강도는 실제 지진보다 훨씬 작은 내진설계 하중에 의해 생기는 부재력을 만족하도록 설계되고, 항복이 일어날 확률은 모든 부재에 거의 같게 된다.⁶⁾ 만일, 항복이 일어나는 부재나 단면의 위치를 정확하게 알 수 있다면 부재에 생기는 부재력 뿐만 아니라 변형의 크기에 대한 불확실성을 줄일 수 있고, 구조시스템의 지진에 대한 거동을 보다 정확하게 예측할 수 있게 된다. 훌륭한 내진설계는 이렇게 부재의 강성 뿐만 아니라 강도에 대해 정확한 이해가 필요하다.

현행 중층 또는 고층의 건축 구조물은 철골을 사용하여 많이 설계되고 있다. 그런데 이러한 철골구조물은 콘크리트를 어느 형태로든 포함하고 있다. 콘크리트 슬라브는 가장 대표적인 것이다. 철골 보위에 설치되는 콘크리트 슬라브는 경제적인 바닥판 구조물에 대한 필요성, 공사기간의 단축, 장스팬의 요구 등에 의해 합성보의 형태로 발달되어 왔다. 콘크리트 슬라브와 철골보가 전단 연결재(Shear Connector)에 의해 일체감을 갖게 된다. 비교적 최근에 발전된 합성보의 형태는 바닥강판(Metal Deck)을 이용하는 것이다. 현재 사용되고 있는 설계기준에는 콘크리트 슬라브와 철골보로 이루어진 합성보의 설계에 대한 기준이 있다. 그러나 이 기준은 건축구조물이 횡하중을 받을 때 합성보의 설계를 위한 적절한 설계 지침을 주지 못하고 있다. 이러한 경우에 구조기술자는 개인의 판단에 크게 의존하게 된다.

그림1은 콘크리트-철골 합성보로 구성된 모멘트 저항 철골조이다. 지진과 같이 수직하중보다 횡하중의 영향이 클 때 합성보의 한쪽 부분은 양의 모멘트(콘크리트 슬라브에 압축응력이 생김)를 받게 되고 다른쪽 부분은 음의 모멘트가 생기며, 이 때 합성보의 강성과 강도는 철골보만의 단면에 의하지도 않고 설계기준에 의한 콘크리트 유효폭을 갖는 합성보의 단면에 의하지도 않는다. 특히 합성보와 기둥의 접합부(Joint)에서 합성보의 강도

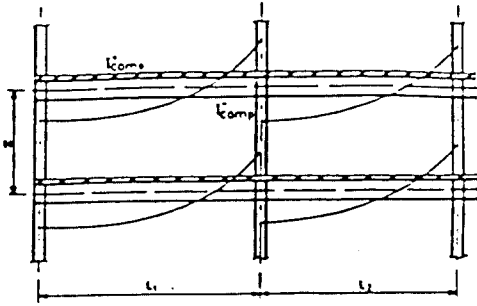


그림1. 횡하중시 합성 슬라브가 있는 철골조

에 대한 정확한 이해는 훌륭한 내진설계를 위해 꼭 필요하다. 본 연구에서는 합성보의 강성과 강도를 보다 정확히 이해할 수 있도록 과거 실험에 의해 얻어진 결과와 수치해석을 통해 이것에 관련된 변수들과의 관계를 조사, 연구하였다. 연구대상 구조물은 여러 형태의 콘크리트와 철골의 합성부재 중에서 철근 콘크리트 슬라브가 철골보 위에 전단 연결재에 의해 일체를 이룬 합성보의 형태를 선택하였고 이 합성보와 철골 기둥과의 접합 형태에 국한하였다.

2. 합성보의 탄성, 비탄성 거동

1950년대 초기 이후 합성보의 거동에 관한 연구는 계속되어 왔다.¹⁰⁾ 실험적인 연구와 이론적인 해석의 방법에 의해 합성보의 탄성, 비탄성 거동에 대한 이해의 깊이가 깊어졌다. 대상 구조물은 단순 지지된 합성보가 대부분이었으며 2-스팬 이상의 연속보에 대한 연구도 수행되었고 연구결과는 설계 기준에 적용되었다. 이러한 연구는 1970년대에 합성보-기둥의 접합부에서의 합성보의 연결부(Connection)의 거동을 대상으로 이어졌다.²³⁾¹⁰⁾ 합성보의 연결부의 강도와 강성의 특성을 이해하기 위한 연구는 주로 실험적인 방법에 의해 이루어졌다. 양의 모멘트를 받을 때 합성보의 연결부의 거동에 관한 지식을 얻는 것이 연구 목적이었으며 외부 접합부와 내부 접합부를 대상으로 실험을 하였다. 최근에는 지진을 고려한 반복하중을 받는 연결부의 거동에 대한 연구가 활발하게 수행되었다.^{5) 6)}

그림2는 합성보-기둥 접합부의 강도와 강성특성에 관한 연구를 위한 대표적인 실험체를 나타낸

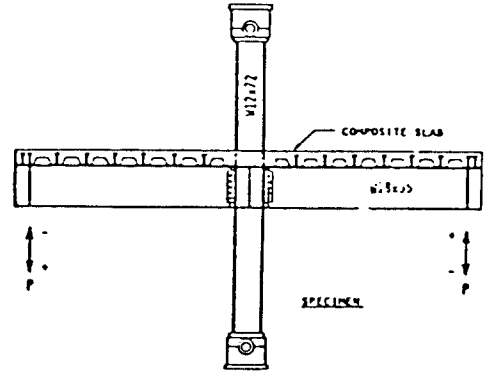


그림2. 합성보-기둥 접합부의 실험체

다. 캔틸레버 철골보 위에 철근 콘크리트가 전단 연결재에 의해 합성보를 이루고 이 합성보는 철골 기둥에 연결되어 있으며 합성보 단부에 수직하중을 가함으로써 횡하중을 받는 건축 구조물의 합성보에 생기는 부재력을 시뮬레이션 한다. 합성보는 기둥과 용접 또는 볼트에 의해 연결되었고 기둥에서 가로 방향의 보의 영향을 고려한 실험이 되도록 설계되었다. 콘크리트 슬라브와 철골 기둥의 접촉부에서 상호작용이 합성보 연결부의 강도와 강성에 미치는 영향이 중점적으로 연구되어 왔으며 실험결과는 연결부의 거동은 그 상세에 매우 의존하고 있음을 나타내었다.

그림3은 합성보의 탄성, 비탄성 단위 모멘트-부재회전각 곡선을 나타낸다. 실험결과는 철근 콘크리트 슬라브와 철골보의 합성작용에 의해 강도와 강성이 크게 증가되었음을 보여준다. 강성은 콘크리트 슬라브의 유효폭의 크기와 합성작용의 정도에 의해 좌우된다. 비교적 작은 응력상태에서는 슬라브의 유효폭이 크며 응력이 콘크리트 강도에 가까이 접근하면 유효폭은 점점 작아지게 된다. 그러나, 합성보의 접선강성(Tangent Stiffness)은 철골보 하부 플랜지가 항복점 강도에 이를 때까지 거의 일정하게 유지됨을 보여준다. 합성보 연결부의 극한강도는 콘크리트 슬라브의 두께에 따라 증가하며 콘크리트 슬라브 전체폭보다는 콘크리트 슬라브와 접하고 있는 기둥의 플랜지²³⁾¹⁰⁾ 폭이 크게 영향을 주는 변수임을 보여 주었다.

이러한 실험결과와 현행 사용되고 있는 설계기준에 의한 합성보의 강도와 강성과의 차이는 현행 설계기준에 의한 강도와 강성이 단순지지된 합성

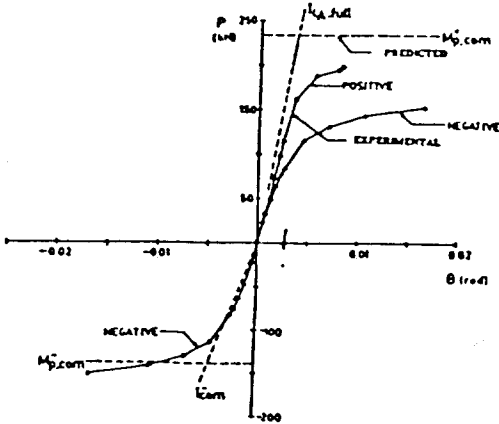


그림3. 합성보의 단부모멘트-부재회전각 곡선

보에 수직 하중이 가해졌을 때만을 고려한 연구결과로부터 얻어졌기 때문이다.

3. 합성보의 해석 모델

강한 지진이 발생하면 건축구조물은 탄성범위를 벗어나 거동하리라고 예측되는데 비탄성 변형은 구조물내의 일부 부재력이 큰 부분에 집중적으로 일어나게 된다. 그리고 지진하중에 대한 그 구조물의 거동을 정확하게 예측하는 것은 이러한 부분의 Hysteresis 거동을 나타내는 신뢰성이 큰 해석모델을 개발하는 것에 달려 있다고 할 수 있다. 그러므로 부재력이 큰 부분이 극한상태에 이를 때까지의 Hysteresis 거동에 영향을 주는 변수들을 구별하고, 또한 거동을 좌우하는 응력(또는 변형)상태를 고려하여 해석 모델을 개발해야 한다. 하지만, 많은 자유도를 갖는 구조시스템의 해석을 위해 사용될려면 가능한 한 간단한 형태로 구조부재의 거동을 잘 나타내는 모델이 필요하다.

3.1 Restoring Force 특성

휨하중을 받는 건축구조물에서의 구조부재로서 합성보의 힘-변형 관계를 모델화하는 것은 매우 어려운 일이다. 탄성과 비탄성 범위에서 합성보 연결부의 거동은 콘크리트 슬라브의 응력상태에 크게 영향을 받는데, 콘크리트 슬라브에서 응력의 변화는 또한 접합부의 상세에 크게 좌우되기 때문에 모델화가 더욱 어렵다. 합성보에서 콘크리트

슬라브의 유효폭은 탄성 및 비탄성범위에서 합성보의 모멘트가 변화함에 따라 계속 변화한다. 이러한 현상은 모델을 개발하는데 응력-변형을 관계 또는 모멘트-곡률 관계로 부터 시작하더라도 그 결과의 정확성을 보장할 수 없음을 말해 준다. 오히려 다층 건축구조물의 해석을 위해 실험에서 얻은 결과에 근거를 두고 간단한 형태의 모델을 개발하는 것도 가능할 수 있다. 이 연구에서는 그동안 합성보에 대한 실험결과를 세밀하게 분석한 후 이에 근거하여 합성보를 양의 모멘트 영역과 음의 모멘트 영역으로 나누어 각각 Bilinear 모델을 개발하고자 한다.

이러한 모델화를 위한 합성보의 특성을 요약하면 아래와 같다.

- (1) 휨강성과 항복점 강도는 양의 모멘트와 음의 모멘트를 받을 때 각각 다르게 정의된다.
- (2) 합성보의 탄성 강성을 결정하기 위한 콘크리트의 유효폭은 콘크리트가 탄성범위에 있을 때의 등가 유효폭(Equivalent Uniform Effective Width)으로 가정하고 접합부의 상세에 따라 달리 결정된다.
- (3) 콘크리트의 강도는 무시된다.
- (4) 합성보의 Hysteresis Loops는 안정되어 있고 반복적이다.
- (5) 콘크리트 슬라브와 기둥과의 틈 또는 콘크리트 균열이 열리고 닫힘에 따라 Hysteresis Loop은 핀칭(Pinching)을 나타낸다.

3.2 탄성 강성

3.2.1 슬라브의 유효폭

합성보의 콘크리트 슬라브에는 축방향력에 의한 면내응력(In-plane stress)과 휨 모멘트에 의한 휨응력이 생기는데 응력의 분포상태를 해석하기 위하여 과거에 이용된 이론적인 해석법이나 유한차분법을 실제 문제의 해석에 적용하기에는 단부조건의 복잡성 때문에 어렵다. 이 연구에서는 합성보의 탄성 강성을 산정하는데 필요한 콘크리트 슬라브의 유효폭을 해석하기 위하여 유한요소법에 의한 프로그램인 SAP을 사용하였는데, 유한요소법은 단부 조건의 복잡성과 관계없이 작은 요소를 이용하면 보다 정확한 해석을 할 수 있기 때문이다. 그림4는 유한요소해석을 위한 합성보의 이

상화(Discretization)를 보여준다. 슬라브의 면내응력과 휨응력을 얻기위하여 Thin Plate Element를 이용하였으며 철골보는 그 중심축에 보요소로 나타내었다.

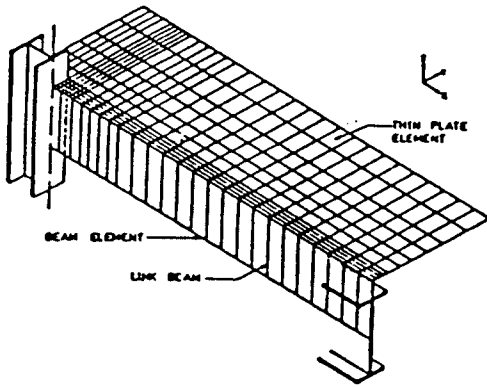


그림4. 합성보의 유한 요소 이상화

슬라브의 유효폭(B_{eff})을 슬라브내에 분포된 면내응력에 의해 산정하면,

$$B_{eff} = \int_{-B/2}^{B/2} \frac{\sigma_x}{(\sigma_x)_{max}} dy \quad (1)$$

이 되며, σ_x 는 보의 방향으로의 면내응력이며 $(\sigma_x)_{max}$ 는 철골보의 위치에서 응력의 최대값이다. 그림5는 이 해석에 의해 얻어진 합성보의 유효폭이다. 모멘트가 큰 단부에서 작은 유효폭을 나타내며 중앙부에서 유효폭이 커짐을 볼 수 있다. 탄성 T형보 이론에 의한 과거 연구 결과에 의하면 B_{eff} 는 슬라브의 폭(B)과 길이(L)의 비례인 형상비(B/L), 하중의 종류, 단부조건 등에 의해 복잡하게

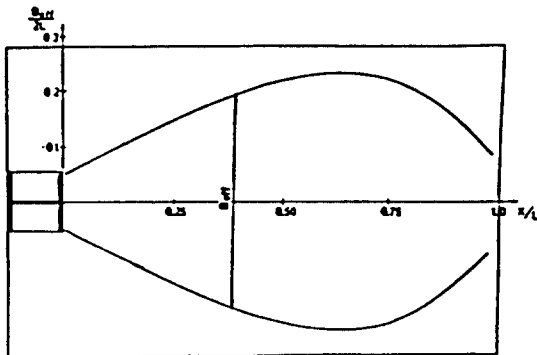


그림5. 합성보의 슬라브의 유효폭

결정되는데 이 연구에서는 지진하중에 의한 모멘트의 분포상태하에서 접합부의 상세에 의한 영향을 고려하여 다음의 변수에 의한 유효폭의 변화를 해석하였다.

- 형상비(B/L)
- 기둥 플랜지의 폭(C_1)
- 가로방향보의 비틀림 강성(K)

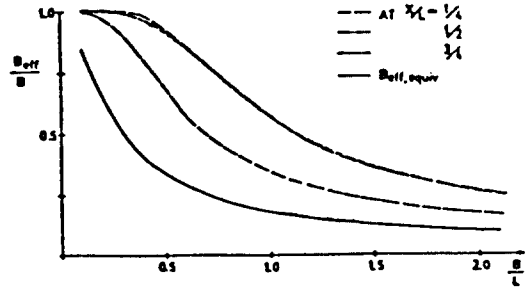


그림6. 형상비(B/L)와 유효폭의 관계

형상비

그림6은 슬라브의 유효폭(B_{eff})과 형상비(B/L)의 관계를 보여준다. 기둥의 플랜지 폭이 없는 경우($C_1=0$)이며 식(1)에 의해 계산되었다. 기둥으로부터의 거리 $L/4$, $L/2$ 과 $3L/4$ 의 단면에서의 슬라브의 유효폭이 점선으로 나타나 있다. $B_{eff, equiv}$ 로 표시된 실선은 캔디레버 보의 단부에서 같은 크기의 처짐이 생기는 합성보의 등가 유효폭을 나타내며 양의 모멘트를 받는 합성 슬라브의 길이(L)에 대하여,

$$B_{eff}/L = 0.2 \quad (2)$$

로 나타낼 수 있다.

기둥 플랜지의 폭(C_1)

양의 모멘트를 받는 합성보의 단부에서 콘크리트 슬라브와 기둥은 접촉하는데, 이때 접촉면적의 폭에 따라 슬라브의 유효폭은 증가한다. 유한요소 해석을 한 결과 유효폭의 증가(ΔB_{eff})는 거의 일정하게 C_1 만큼 늘어난다. 즉,

$$\Delta B_{eff} = C_1 \quad (3)$$

가로방향보의 비틀림 강성(K_t)

합성보와 기둥의 접합부에서 모멘트의 전달은 슬라브와 기둥의 접촉과 철골보에 의해 일어나며 일부는 가로방향보의 비틀림작용에 의해 일어난다. 그런데 우리가 사용하고 있는 철골보의 비틀림강성은 매우 작으며 유한요소 해석을 한 결과, 가로방향보에 의한 슬라브의 유효폭의 증가는 다음과 같다.

$$\Delta B_{eff} = \frac{4 K_t G}{t_c E_c d_c^2} \quad (4)$$

위식에서 K_t 는 가로방향보의 비틀림 강성, t_c 는 슬라브의 두께, d_c 는 슬라브와 철골보의 중심거리이다. 이 해석에 의하면 가로방향보의 영향은 매우 작아 무시될 수 있었다.

3.2.2 부분 합성작용

합성보의 실험결과를 보면 비록 작용하중이 작을 때라도 콘크리트 슬라브와 철골보 사이에 미끄러움이 일어나 합성보의 탄성 강성은 감소를 하게 된다. 과거에 부분 합성 작용을 연구하는데 전단 연결재의 강성이 슬라브와 철골보 사이에 등분포된 상태로 가정하고 탄성 또는 비탄성 해석을 하였다. 그러나 해석결과와 실험결과는 차이를 보였으며 실제 설계에 적용하기에도 어려움이 많아 AISC Specification에서는 실험결과에 의해 얻어진 설계 규준이 제시되어 있다. 부분 합성작용의 영향은 연구가 더욱 필요하며 AISC의 식에 의하여 탄성 강성을 감소시킬 수 있다.

3.3 합성보의 극한강도

양의 모멘트를 받을 때 합성보의 설계 극한강도는 하한치 이론(Lower Bound Theorem)에 의해 계산된다. 다만, 극한강도에 도달하였을 때 콘크리트 슬라브의 크기와 슬라브내의 극한 압축응력을 알아야 한다. 현재 사용하고 있는 AISC의 합성보의 강도는 콘크리트 강도를 f_c' 으로 하고 하한치 이론에 의해 계산된다.

합성보의 연결부에는 콘크리트 슬라브내에 보다 복잡한 상태의 응력이 생긴다. 전단 연결재와 기둥 및 철골보에 의한 구속에 의해 다축 응력

(Multiaxial Stress)이 발생하면 콘크리트의 강도는 다축응력의 구속상태에 따라 매우 민감하게 증가하기 때문에 합성보의 극한강도는 강도에 직접 영향을 주는 콘크리트 슬라브의 크기와 콘크리트내에 발생하는 실제응력에 근거하여 계산되어야 한다. 또한 내진설계 및 해석을 위해서는 하한치 이론에 의하기 보다는 평균적인 강도를 산정하는 것이 바람직하다.

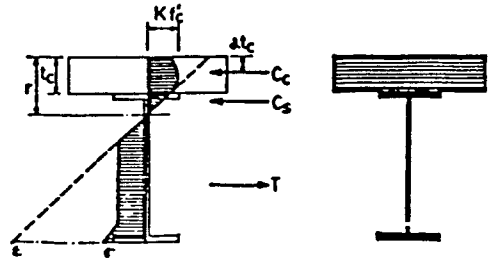


그림7. 합성보의 극한강도시 응력과 변형률

이 연구에서는 과거에 행하여진 실험결과를 이용하여 합성보 연결부가 극한강도에 도달하였을 때 슬라브내에 발생한 최대응력을 추정하고 이에 따라 구조해석 및 설계를 위한 강도의 계산식을 제시하고자 한다. 그림7은 극한 강도시 합성보 연결부의 응력 분포상태를 나타낸다. 중립축이 철골보 내에 위치하며 콘크리트는 다축응력으로 강도가 증가된 상태(Kf_c')를 나타낸다. 이 해석을 위하여 단면은 그림7과 같이 여러단으로 나뉘어지고 강재(Steel)와 콘크리트의 응력-변형률 관계가 그림8에 있다. 강재의 응력-변형률 관계는 탄성-소성-변형경화 영역으로 구성되어 있고 콘크리트의 증가된 강도와 이에 따른 변형률의 증가를 나타내는 응력-변형률 관계식은 Darwin¹⁾이 제시된 이축응력(Biaxial Stress)하에서 주응력 방향의 응력-변형률 관계식을 이용하였다.

그림7에서 휨 모멘트를 받는 합성보의 평형 방정식은

$$C_c + C_s = T \quad (5)$$

이며 이 식으로부터 단면의 곡률이 가정되면 반복법에 의해 중립축의 위치가 구해진다. 이때의 휨 모멘트는

$$M = C_c r_c + C_s r_s + T r_s \quad (6)$$

가 된다. 위식에서 r_c , r_s 와 r_s 는 중립축으로부터 C_c , C_s 와 T 까지의 거리이다. 곡률을 점차 크게 하면서 위와 같은 계산을 계속하게 되면 실험에 의해 얻어진 최대 모멘트와 일치하게 되고 이 때의 Kf'_c 값을 구할 수 있다. 표1은 합성보의 실험으로부터 얻어진 휨모멘트와 위의 해석으로부터 얻어진 K 값을 보여준다. K 값의 평균치는 1.501임을 알 수 있다.

표1. K와 βK 의 산정

실험체	단면	슬라브 두께 (mm)	극한 모멘트 (KN-M)	K	βK
A1	W12×27	101.6	384.5	1.57	1.49
A2	W12×27	101.6	371.8	1.48	1.41
B1	W12×27	101.6	369.9	1.45	1.37
B2	W12×27	101.6	372.2	1.46	1.38
C1	W12×27	101.6	387.8	1.44	1.30
C2	W12×27	101.6	383.5	1.41	1.28
D1	W12×27	101.6	395.2	1.48	1.33
D2	W12×27	101.6	400.9	1.51	1.36
E1	W12×27	63.5	352.0	1.44	1.41
E2	W12×27	63.5	341.1	1.36	1.33
F1	W12×27	63.5	347.8	1.40	1.37
F2	W12×27	63.5	356.5	1.47	1.44
G1	W12×27	101.6	411.3	1.47	1.27
H1	W16×40	101.6	698.0	1.51	1.47
H2	W16×40	101.6	692.0	1.49	1.45
B44	W12×27	101.6	451.3	1.69	1.53
B64	W12×27	101.6	454.0	1.68	1.51
B84	W12×27	101.6	438.9	1.78	1.68
J1	W16×40	101.6	556.1	1.38	1.26
J2	W16×40	101.6	575.3	1.44	1.31
C11	W10×19	88.9	164.6	1.57	1.53
C12	W10×19	88.9	173.7	1.52	1.46
JA1	W33×152	120.0	3427.	1.52	1.47
Average				1.501	1.41

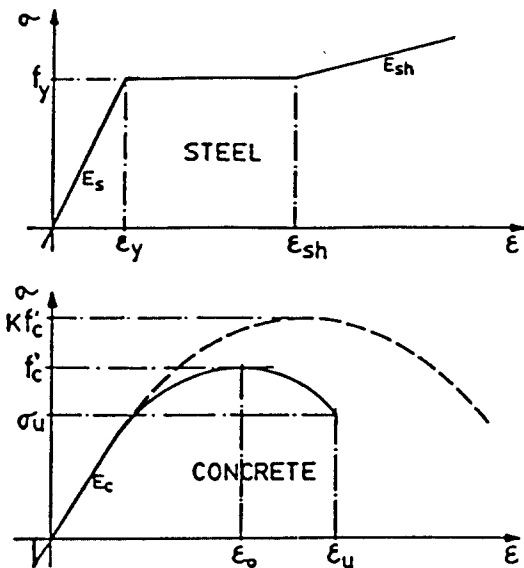


그림8. 강재와 콘크리트의 재료 성질

합성보가 최대 모멘트에 도달했을 때, 콘크리트 압축력, C_c 에 의한 휨 모멘트, M_c 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.(그림9)

$$M_c = C_c (r - \alpha t_c) \quad (7)$$

여기에서 C_c 는 $\beta K f'_c C_1 t_c$ 로 나타낼 수 있으며, 그림9에서 보여주듯이 β 는 압축응력의 분포를 등가 직사각형 형태로 가정했을 때의 상수이고 r 와 αt_c 도 그림에 나타나 있다. 식(7)은 콘크리트 슬라브의 두께, t_c 와 중립축의 위치, r 의 비례로 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$M_c = K f'_c C_1 t_c r \{\beta(1 - \alpha\lambda)\} \quad (8)$$

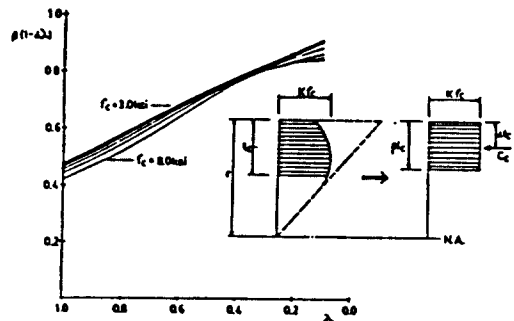


그림9. $\beta(1 - \alpha\lambda)$ 와 λ 의 관계

여기에서 $\lambda = t_c/r$ 이며, $\{\beta(1 - \alpha\lambda)\}$ 의 값을 다음의 범위 내에서 구해 본 결과,

$$210 < f'_c < 560 \text{ kg/cm}^2$$

$$0.1 < \lambda < 1.0$$

으로서 그림9와 같은 결과를 얻었으며 $|\beta(1 - \alpha\lambda)|$ 는 0.93(1 - 0.5 λ)로 근사될 수 있다. 즉 모멘트, M_c 는

$$M_c = 0.93 K f'_c C_t t_c r (1 - 0.5 \lambda) \quad (9)$$

또는

$$M_c = 1.4 f'_c C_t t_c (r - 0.5 t_c) \quad (10)$$

이 된다. 따라서 극한강도시 철근이 항복응력에 도달했다고 가정하면 단면의 평형방정식은

$$A_s f_y = 2 A_{sc} f_y + 1.4 f'_c C_t t_c + A_r f_{yr} \quad (11)$$

이 되며 이 식으로부터 중립축의 위치를 찾을 수 있다. 위 식에서 A_{sc} 는 압축응력을 받는 철골의 단면이고, A_r 과 f_{yr} 은 철근의 단면과 항복응력이다. 그러므로, 합성보의 연결부의 극한모멘트는

$$M_u^+ = 1.4 f'_c C_t t_c (r - 0.5 t_c) + 2 A_{sc} f_y r_c + A_s f_{yr} r_s + A_r f_{yr} r_r \quad (12)$$

이 된다. 식(12)에서 r_c 는 압축응력상태에 있는 철골보의 단면중심으로부터, r_s 와 r_r 은 철골보와 철근의 단면중심으로부터 합성보의 중립축까지의 거리가 된다.

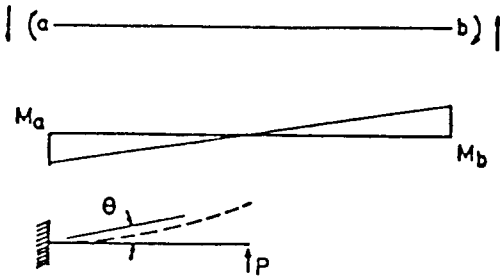


그림10. 합성보의 캔티레버 유사성

3.4 Skeleton과 Hysteresis 곡선

횡하중에 의하여 합성보는 양의 모멘트와 음의 모멘트 영역으로 나뉘는데 각 영역에서의 합성보의 거동은 그림 10과 같이 캔티레버 합성보의 단부모멘트-부재회전각 관계로서 나타낼 수 있다. 그림 11은 캔티레버 합성보의 단부모멘트-부재회전각 관계를 Bilinear 모델화한 Skeleton 곡선이

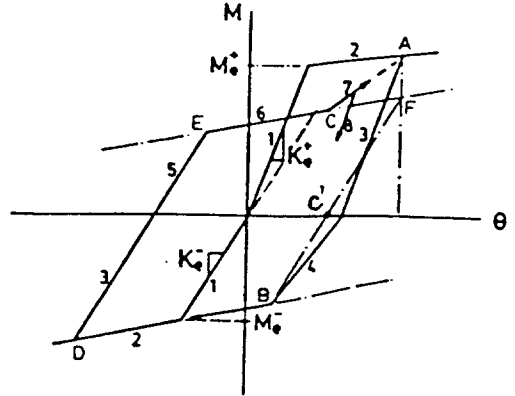


그림11. 캔티레버 합성보의 Hysteresis 곡선

다. 음의 모멘트 영역에서 콘크리트 슬라브의 인장강도는 무시되며 철골보와 철근만의 단면으로 합성보의 탄성강성과 탄성한계 모멘트(Elastic Limit Moment), M_e^- 를 산정하며 M_e^- 는 소성모멘트의 값이 된다. 탄성한계 모멘트를 넘으면 변형경화(Strain Hardening) 강성, K_{sh}^- 으로 표시되며 실험 결과를 분석하여 보면

$$K_{sh}^- = 0.050 K_e^- \quad (13)$$

로 나타낼 수 있다.

양의 모멘트 영역에서 합성보의 거동을 Bilinear로 모델화하면, 탄성강성, K_e^+ 는 앞절에서 정하여진 슬라브의 유효폭과 부분 합성 작용을 고려하여 산정되며, 변형경화 강성, K_{sh}^+ 와 탄성 한계 강도, M_e^+ 에서 교차하게 된다. 그런데 M_e^+ 는 부재회전각이 매우 큰 상태에서 도달하게 되는 합성보의 극한 모멘트, M_u 나 또는 철골보의 플랜지에 항복이 일어나는, M_u^+ 로 나타낼 수 없다. 표1에 있는 실험결과와 단부모멘트-부재회전각 곡선을 세밀하게 조사하여 본 결과

$$M_e^+ = 0.9 M_u^+ \quad (14)$$

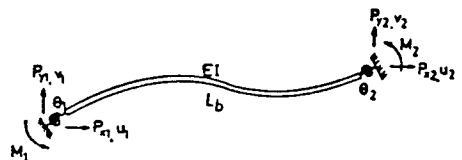


그림12. 보의 단일 요소 모델

의 값으로 정할 수 있음을 알 수 있었고, 이때 K_{st} 는

$$K_{st} = 0.025 K_e \quad (15)$$

의 값에 근사했다.

Hysteresis 곡선은 Skeleton의 곡선에 근거하여 이루어진다. 그림11 과 같이 양의 모멘트에서 비탄성 변형이 일어났을 때 제하(Unloading)강성은 K_e 와 같고, 곡선 BDEF는 M_e 와 K_e 에 의한 Hysteresis 에 따르며, 균열등의 단함에 따른 편칭을 나타내는 C점은 C'와 같게 된다.

4. 합성골조의 비탄성 해석

합성골조의 비탄성 거동을 해석하기 위하여 구조물의 동적해석 컴퓨터프로그램인, DRAIN-2D⁸⁾를 사용하였다. 정적 반복하중을 고려하여 이 프로그램을 수정하였으며 앞 장에서 개발된 해석 모델을 포함시켰다.

4.1 단일 요소 모델(Single Component Model)

합성보의 강성 매트릭스를 구성하는데 단일 요소 모델이 이용되었다. 이 모델은 그림12 와 같이 탄성보와 양단에 위치한 두 스프링으로 구성되어 있으며, 합성보내의 탄성변형은 탄성보에 의해 나타나며 모든 비탄성 변형은 두 스프링에 의해 응집된 상태로 가정된다. 따라서, 이 두 스프링의 특성을 추정하기 위하여 합성보내의 모멘트 분포를 미리 알아야 한다. 부재의 한쪽 단부에서의 회전은 다른쪽 단부의 회전과 함께 일어나며, 하중과 곡률의 분포상태에 의해 결정된다. 이 연구에서 스프링의 특성은 합성보의 중앙에 반곡점이 있는 것으로 가정하여 결정된다. 즉 합성보 스패의 1/2 인 캔틸레버 보의 비탄성 거동을 나타내며 그 hysteresis loops는 앞 장에서 얻어진 결과에 따른다. 이 가정에 의한 스프링의 모델은 반곡점의 이동에 따른 영향을 고려하지 않기 때문에 실제거동과 차이가 있게 된다. 그러나 실험결과를 보면 합성보의 변형이 단부에 집중적으로 일어나기 때문에 위 가정에 의한 오차는 크지 않으리라 생각된다.

그림13 과 같이 탄성보에는 양단부에 모멘트가 작용하고 이에 따라 반곡점에서 두 부분으로 나뉘게 된다. 두 부분은 서로 다른 강성을 갖게되며 이 합성보의 강성 매트릭스는 반곡점에서 나뉘어진 두 부재의 강성 매트릭스를 static condensation에 의해 합함으로써 얻어진다. 이 식은 역 매트릭스인 유연도 매트릭스로 바뀌며, 마지막으로 두 단부에 있는 스프링의 강성, K_s 이 식(16)과 같이 합쳐지게 된다.

$$\begin{Bmatrix} \theta_i \\ \theta \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} f_{ii} + 1/K_{s_i} & f_{ij} \\ f_{ji} & f_{jj} + 1/K_{s_j} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} M_i \\ M_j \end{Bmatrix} \quad (16)$$

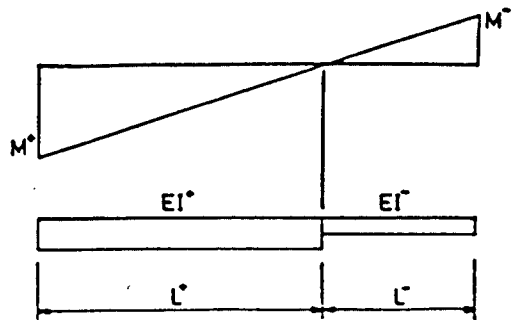


그림13. 합성보의 비대칭 단면

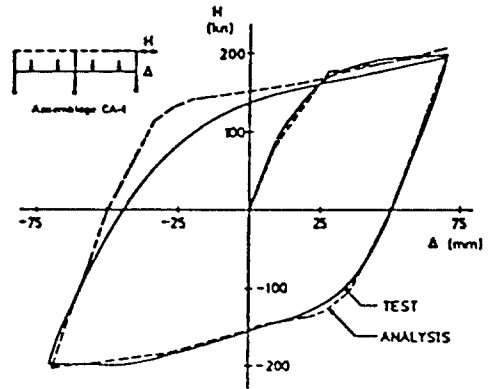


그림14. 실험결과와 해석결과와의 비교

합성보의 강성 매트릭스는 매 단계마다 다시 산정되며 구조물의 해석을 하는데 많은 컴퓨터 계산 시간이 걸린다.

합성 슬라브가 있는 철골조에 대한 실험결과⁹⁾는 매우 드물다. 그림14 는 실험이 이루어진 1층 골조에 대한 해석결과와 실험결과를 비교한 것이다. 정적 반복 하중에 대한 비탄성 해석이 수행되었다. 보에 가해진 집중하중에 의한 반곡점의 위치와 이

에 따른 탄성보의 강성을 산정하기 위하여 프로그램의 수정이 필요하였으며 횡하중은 실험에서와 같이 작용되었다. 보다 많은 실험결과와 비교를 할 수 없었으나 이 비교로 부터 합성보의 모델을 이용한 해석이 정확하게 되었음을 볼 수 있다.

5. 결론

횡하중을 받는 철골조에서 합성보의 탄성, 비탄성 거동을 보다 정확하게 해석하기 위한 연구가 수행되었다. 합성보의 강성과 강도를 위한 식이 제시되었으며 해석 모델을 개발하고 컴퓨터 프로그램에 이용되어 실험결과와 비교되었다. 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 합성보의 강성에 대한 합성 슬라브의 영향은 매우 크며, 형상비, 기둥과의 접촉면의 폭과 가로방향 보의 비틀림 강성을 고려하여 산정된다.
- (2) 기둥과의 연결부에서 합성보의 탄성한계강도는 콘크리트의 강도를 $1.4 f'_c$ 으로 하고 기둥과의 접촉면적을 갖는 단면에 의해 산정된다.
- (3) 합성보의 거동은 탄성 한계 강도로 구분되는 bilinear 해석 모델에 의해 나타낼 수 있으며, 이 때 탄성 한계 강도는 극한강도의 0.9배가 된다.
- (4) 탄성보와 비탄성 변형을 나타내는 단부 스프링으로 구성된 단일 요소 모델에 의한 합성보의 해석 모델은 그 거동을 잘 나타내었다.

참 고 문 헌

1. Galambos, T. V., et al., "Probability-Based Load Criteria: Assessment of Current Design Practice", J. of the Structural Div., ASCE, V. 108, ST5, May 1982.
2. Daniels, J. H., et al., "Behavior of Composite Beam-to-Column Joints", J. of Structural Div., ASCE, V. 96, ST3, Mar., 1970.
3. Du Plessis, D. P. and Daniels, J. H., "Strength of Composite Beam-to-Column Connections", Fritz Eng. Lab. Report No. 374. 3, Lehigh Univ., Bethlehem, Pa. Nov., 1973.
4. Du Plessis, D. P. and Daniels, J. H., "Experiments on Composite Beams under Positive End Moments", Fritz Eng. Lab. Report No. 374. 2, Lehigh Univ., Bethlehem, Pa, June, 1972.
5. Kato, B., "Cyclic Loading Tests of Composite Beam-to-Column Subassemblages", Report of Lab. for Steel Structure, the Department of Architecture, Faculty of Eng., Univ. of Tokyo, 1982.
6. Lee, S.-J., and Lu, L.-W., "Cyclic Tests of Full-Scale Composite Joint Subassemblages" J. of Structural Engineering, ASCE, V. 115, ST8, Aug., 1989.
7. Darwin, D. and Pechnold, D. A., "Nonlinear Biaxial Stress-Strain Law for Concrete", J. of Engineering Mechanics Div., ASCE, V. 103, EM2, April, 1977.
8. Kannan, A. E. and Powel, G. H., "DRAIN-2D: A General Purpose Computer Program for Dynamic Analysis of Inelastic Plane Structures", Univ. of California, Berkeley, 1973.
9. Lu, L.-W., Slutter, R. G. and Yen, B. T. "Research on Composite Structures for Building and Bridges Applications", Developments in Composite and Mixed Construction Systems, Gihodo Shuppan Co., 1980.
10. Iyengar, H. S., "Composite or Mixed Steel-Concrete Construction for Buildings", ASCE, New York, 1977.

(접수일자 : 1989. 10. 7)