

볼트로 체결된 강재 조립 합성보의 휨 거동

Flexural Behavior of Steel Composite Beam with Built-up Cross-section by Bolt Connection

김 성 보† 한 만 엽* 김 문 영** 지 태 석*** 정 경 환***
Kim, Sung-Bo Han, Man-Yop Kim, Moon-Young Ji, Tea-Sug Jung, Kyoung-Hwan
(논문접수일 : 2006년 9월 29일 ; 심사종료일 : 2007년 4월 2일)

요 지

본 논문에서는 볼트로 체결된 강재 조립 합성보의 휨거동에 대한 유한요소해석을 통하여 휨 거동 특성을 분석하였다. 두 개의 강재보가 볼트로 체결되어 횡하중을 받을 때 발생하는 볼트의 합성효과, 강판사이의 마찰특성을 고려하였다. 체결에 사용된 볼트의 갯수 및 마찰계수의 변화에 따른 변위, 휨응력 그리고 전단응력을 쉘 요소를 사용한 유한요소해석에 의해 계산하였다. 이런 결과들은 완전 비합성보, 부분 합성보와 완전 합성보의 해석치와 비교되었다. 해석결과 합성보의 거동은 강재의 마찰보다 볼트의 갯수로 표현되는 합성률에 크게 영향을 받았다. 합성률이 50~60%에 도달할 때 합성보의 거동은 완전 합성보와 유사함을 보였다.

핵심용어 : 휨 거동, 강재 조립 합성보, 완전 합성보, 완전 비합성보, 마찰, 볼트연결

Abstract

The flexural behavior of steel composite beam with built-up cross-section by bolt connection is presented in this paper. The composite effect due to bolt-connection and friction between steel plate are considered to investigate the flexural behavior of steel composite beam. The displacement, bending stresses and shear stresses according to composite rate are calculated by F.E. analysis and these results are compared to the analytical values of non interaction beam and full interaction beam. As a result of analysis, the behavior of composite beam is more dependant on the composite rate than the friction of the steel plate. When the composite rate reaches 50~60 %, the behavior of composite beam is similar to that of fully composite beam.

Keywords : flexural behavior, steel composite beam, built-up cross-section, full interaction beam, non interaction beam, friction, bolt-connection

1. 서 론

최근들어 강구조물이 대형화되면서 2개의 강재조립보가 합성적으로 작용하여 휨 모멘트와 수평 전단력에 저항할 수 있는 조립 합성보의 중요성이 더욱 대두되고 있다. 조립 합성보로 설계하면, 단일 형강만을 이용한 구조물에 비해 강성이 증대되고, 보다 큰 하중에 저항할 수 있다. 이로 인해서 강재 조립 합성보는 재료의 자중 등을 줄일 수 있고, 보의 경간이 클 때 효과적으로 이용될 수 있다.

최근 많이 이용되고 있는 합성 구조 시스템은 재료의 구성 방법과 역학적 작용 방법에 따라서 다양하게 분류할 수 있고, 이에 대한 많은 연구가 되어왔다(장승필 등, 1999; 곽효경 등, 2000; 오명호 등, 2005).

합성보의 거동은 전단연결재의 영향을 크게 받으나, 이러한 전단연결재는 강형의 강도와 마찰, 전단연결재의 재질, 직경, 높이, 배치 방법 등 매우 많은 영향인자로 인해 이론적으로 규명하기 어려우므로, 전단연결재의 거동은 주로 실험 데이터 등에 의존하여 왔다. 그러나 이러한 실험 데이터는 합성보의

† 책임저자, 정회원 · 충북대학교 토목공학과 교수
Tel: 043-261-3241 ; Fax: 043-275-2377
E-mail: sbkim@chungbuk.ac.kr

* 정회원 · 아주대학교 토목설계공학과 교수

** 정회원 · 성균관대학교 토목환경공학과 교수

*** 충북대학교 토목공학과 석사과정

• 이 논문에 대한 토론을 2007년 6월 30일까지 본 학회에 보내주시면 2007년 8월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

다양한 조건을 파악하기에는 자료가 부족한 실정이다.

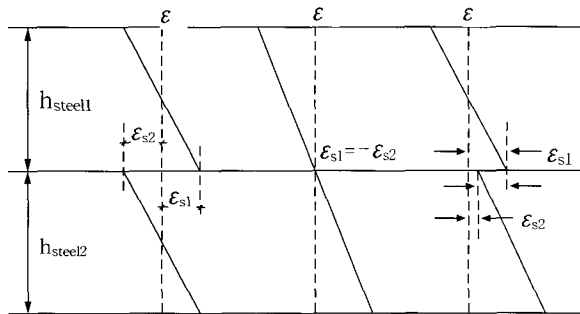
본 연구에서는 다양한 변수를 고려할 수 있는 강재 조립 합성보의 유한요소 해석 기법을 개발하고, 합성보 거동에 영향을 미치는 요소들인 전단연결재에 의한 합성률, 그리고 마찰면의 영향 등을 해석변수로 하는 합성보를 해석함으로써 합성보의 휨 거동 특성을 분석하였다.

2. 합성보의 형태와 거동

2.1 합성보의 분류

서로 다른 강성을 가진 두 부재가 일체가 되어 구조체를 형성하는 합성구조물은 여러 가지 종류가 있다. 본 절에서는 동일한 강성을 갖는 2개의 강재보가 함께 휨 모멘트와 전단력에 저항하는 합성보에 대해서 분류를 하였다. 2개의 강재보 사이의 전단연결재가 수평 전단력을 저항하는 합성보는 합성 정도에 따라 일반적으로 비합성보, 완전 합성보, 부분 합성보로 분류한다.

그림 1(a)에서 합성작용이 없는 경우에는 2개의 강재보는 각각의 중립축을 가지고 변형을 하며, 그림 1(b)에서처럼 완전 합성작용을 하는 경우는 하나의 중립축을 가지고 일체화 되어 거동한다. 그림 1(c)의 경우처럼 부분 합성작용을 하는



(a)비합성 (b)완전 합성 (c)부분합성
그림 1 Classification of composite beam

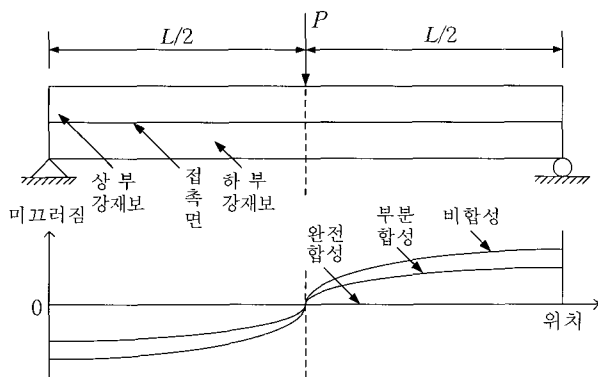


그림 2 Slip of composite beam

경우는 두 경우의 중간의 양상을 가지게 된다.

2개의 강재가 접합하는 면에서의 미끄러짐은 합성 정도에 따라 그림 2와 같이 거동한다. 강합성보의 미끄러짐은 단부에서 최대로 일어나며, 합성률이 증가함에 따라 미끄러짐의 크기는 감소하게 되고, 완전 합성이 될 때 미끄러짐은 0이 된다. 또한 보의 중앙에서의 처짐은 합성작용이 없을 때에 최대가 되고 완전 합성일 때는 최소가 된다.

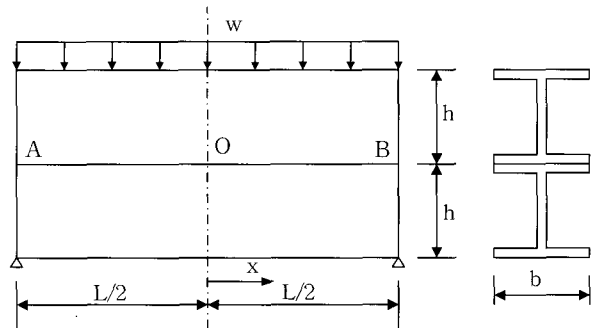
접촉면에 발생하는 미끄러짐을 저항하기 위해 수평 전단력을 전단연결재로 지지하도록 설계하며, 전단연결재의 크기와 갯수에 따라 합성률이 결정된다. 합성보의 합성률은 전단연결재의 결합정도로 나타나며, 합성보의 극한내력에 밀접한 관계를 가지고 있다.

그림 3은 등분포 하중을 받고있는 단순지지된 2개의 I형강을 나타낸 것이며, 전단연결재에 따른 완전 합성보와 완전 비합성보의 휨응력과 전단 응력의 분포형태를 보여주고 있다.

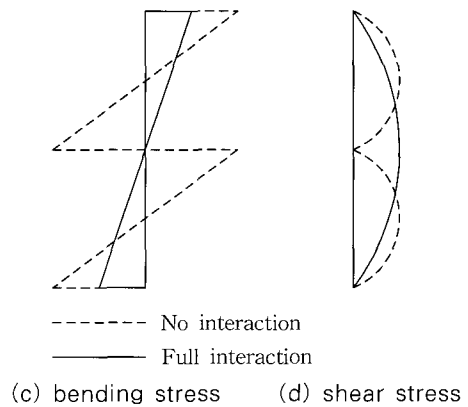
2.2 완전 비합성보

완전 비합성보는 그림 3(a)의 접촉면 AB에서 어떤 전단 연결이나 마찰도 있지 않다는 것을 가정한다. 따라서 각각의 보는 단위 길이당 외력 $w/2$ 를 받는다.

각각의 보 중앙점의 휨 모멘트는 $wL^2/16$ 이고, 응력분포



(a) elevation (b) section



(c) bending stress (d) shear stress
그림 3 Effect of shear connection

는 그림 3(c)의 점선과 같이 나타난다.

또한, 시간중양의 최외측 플랜지 연단에서 발생하는 최대 휨 응력은 식 (1)과 같다.

$$\sigma_{\max} = \frac{My_{\max}}{I} = \frac{3whL^2}{8[bh^3 - (b-t_w)(h-2t_f)^3]} \quad (1)$$

최대 전단 응력은 지점부에서 발생하며, 단면내 전단응력 분포는 그림 3(d)의 점선과 같으며 지점부 복부중양에서 발생하는 최대전단응력은 식 (2)와 같다.

$$\tau_{\max} = \frac{VQ}{Ib} = \frac{3wL[b(h-t_f)t_f/t_w + (h/2-t_f)^2]}{2[bh^3 - (b-t_w)(h-2t_f)^3]} \quad (2)$$

그림 4(a)에서 완전 비합성보의 최대 처짐은 식 (3)과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \delta &= \frac{5(w/2)L^4 \times 12}{384E[bh^3 - (b-t_w)(h-2t_f)^3]} \\ &= \frac{5wL^4}{64E[bh^3 - (b-t_w)(h-2t_f)^3]} \end{aligned} \quad (3)$$

한편, 중앙점에서 x 만큼 떨어진 곳의 휨 모멘트는 $w(L^2 - 4x^2)/16$ 이므로 단면 상하연단에서의 휨 변형도는

$$\epsilon_x = \frac{My_{\max}}{EI} = \frac{3w(L^2 - 4x^2) \times h}{8E[bh^3 - (b-t_w)(h-2t_f)^3]} \quad (4)$$

완전 비합성보에서 마찰면에서 상하플랜지의 변형도의 크기는 같고 부호만 반대이므로 미끄러짐변형도는 $2\epsilon_x$ 가 된다. 즉

$$\frac{ds}{dx} = 2\epsilon_x = \frac{3w(L^2 - 4x^2) \times h}{4E[bh^3 - (b-t_w)(h-2t_f)^3]} \quad (5)$$

좌우변을 적분하면

$$s = \frac{w(3L^2x - 4x^3) \times h}{4E[bh^3 - (b-t_w)(h-2t_f)^3]} \quad (6)$$

식 (4), (6)의 분포형상이 그림 4에 도시되어있다.

2.3 완전 합성보

완전 합성보는 그림 3(a)의 접촉면 AB가 전단 연결에 의해 완전하게 결합되는 것을 가정하며, 두 보는 일체로 거동을 하여 보의 어디서나 미끄러짐은 0이다.

일반적인 보 이론에 의하여, 보 중앙점의 휨 모멘트는 $wL^2/8$ 이며, 최대 휨응력은 식 (7)과 같다.

$$\sigma_{\max} = \frac{3whL^2}{16[bh^3 - (b-t_w)(h-2t_f)(h^2 - ht_f + t_f^2)]} \quad (7)$$

지점부 플랜지 사이에서 최대 전단응력은 식 (8)와 같다.

$$\tau_{\max} = \frac{3whL}{8b} \cdot \frac{[2bt_f + (h-2t_f)t_w]}{[bh^3 - (b-t_w)(h-2t_f)(h^2 - ht_f + t_f^2)]} \quad (8)$$

중앙점에서의 처짐은 식 (9)와 같다.

$$\delta = \frac{5wL^4}{256E[bh^3 - (b-t_w)(h-2t_f)(h^2 - ht_f + t_f^2)]} \quad (9)$$

2.4 부분 합성보

그림 5는 등분포하중을 받는 강재 조립합성보에서 시간중양에서 x 만큼 떨어진 미소요소 dx 구간의 변형상태이다. 우측첨자 '+'는 해당변수의 증분을 의미한다.

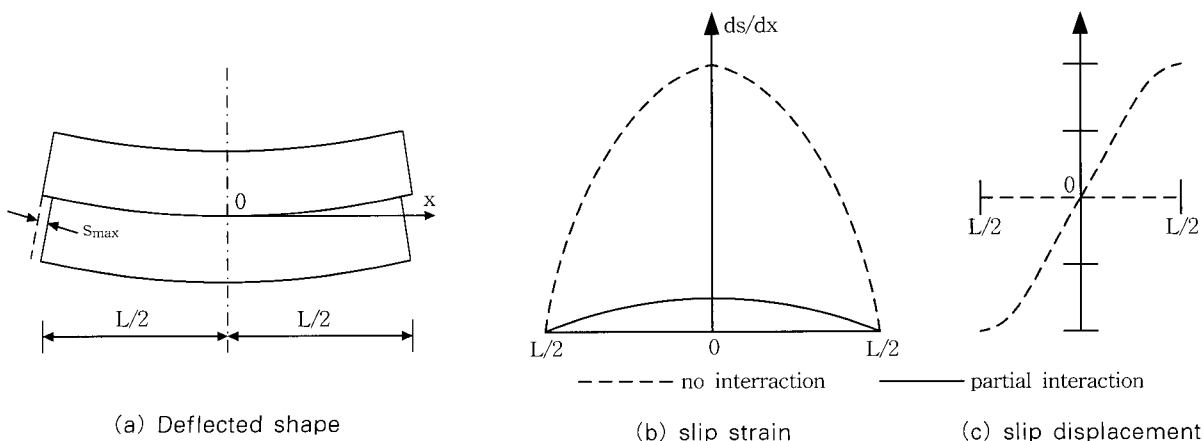


그림 4 Deflections, slip strain and slip

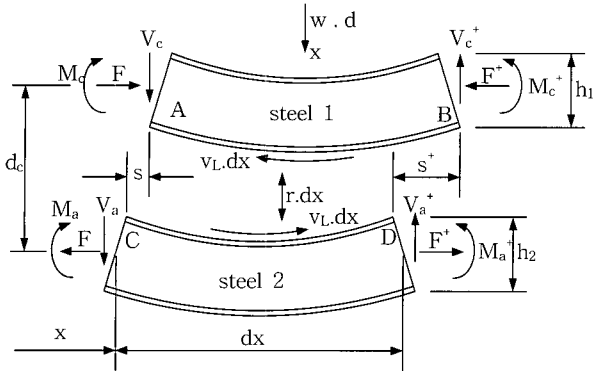


그림 5 Infinitesimal of element of partially composite beam

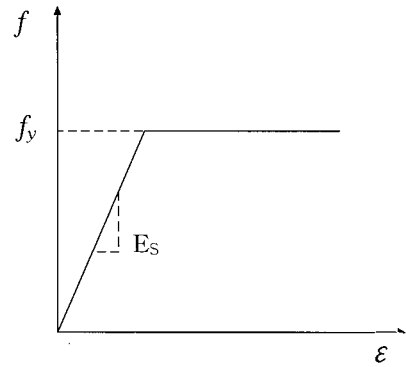


그림 6 Stress-strain curve

축력과 모멘트 및 전단력의 평형조건식은 다음과 같다.

$$\frac{dF}{dx} = -v_L \quad (10a)$$

$$\frac{dM_c}{dx} + V_c = \frac{1}{2} v_L h_1 \frac{dM_a}{dx} + V_a = \frac{1}{2} v_L h_2 \quad (10b)$$

$$V_a + V_c = wx \quad (10c)$$

두개의 보 사이에서 어떤 틈도 있지 않다면, 두 보는 같은 곡률을 가지고 있어야 한다.

$$\phi = \frac{M_a}{EI_2} = \frac{M_c}{EI_1} \quad (11)$$

또한, AB와 CD축상의 축방향 변형도는 다음과 같다.

$$\epsilon_{AB} = \frac{1}{2} h_1 \phi - \frac{F}{EA_c} \quad (12a)$$

$$\epsilon_{CD} = \frac{1}{2} h_2 \phi + \frac{F}{EA_a} \quad (12b)$$

윗식의 ϵ_{AB} 와 ϵ_{CD} 의 차이가 미끄러짐 변형도이다.

상기 평형 방정식과 적합조건식들을 이용하여 부분 합성보의 거동을 나타내는 미분 방정식을 유도할 수 있다(Johnson, 2004).

3. 유한요소 해석

합성보의 해석을 위하여 내연적 시간 적분법(Implicit Time Integration)을 이용한 범용 비선형 유한요소 해석 프로그램인 ABAQUS 5.8을 이용하여 모델링 한다. ABAQUS 프로그램은 미국의 Hibbit, Karlsson & Sorensen사의 상용 프로그램으로 비선형 유한요소법 해석에 뛰어난 기능을 가지고 있는 범용 구조해석 프로그램이다. 본 연구에서는 강제보를

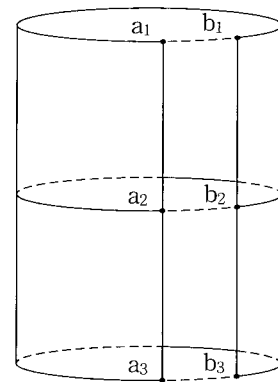


그림 7 TIE of MPC option in ABAQUS

셸요소, 전단연결재를 결합요소로 사용하여 합성보를 모델링 하였고, 항복 이후의 거동을 알아보기 위해 재료 및 기하학적 비선형 효과를 고려한다.

3.1 셸 요소 모델링

합성보의 모델은 소성 대변형을 고려한 셸 요소(S4R5)를 사용한다. 이 요소는 각 절점당 x , y , z 방향의 이동 및 회전 자유도 6개를 가지고 있다. 상·하 플랜지 및 복부는 각각 100개, 100개의 셸 요소를 사용하였고, 강제보의 플랜지와 복부의 두께는 서로 다른 요소 상수를 지정함으로써 나타내었으며, 강재의 재료특성은 그림 6에 나타내었다. 재료의 비선형성을 고려하기 위하여 소성 관련 옵션 중 PLASTIC을 사용한다.

3.2 전단연결재의 거동

전단연결재의 비선형 거동을 나타내기 위하여 ABAQUS에서 제공하는 요소(MPC)를 사용한다. 이 MPC요소중에 TIE옵션은 3차원 결합요소로서 두 개의 절점을 연결하여 구

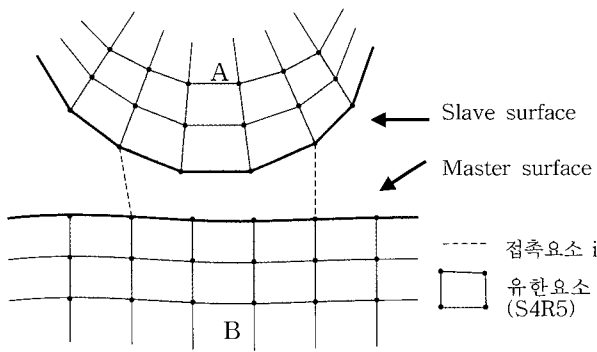


그림 8 Mechanical surface interaction with friction

성되며, 각 절점당 x, y, z 방향의 이동 및 회전의 자유도를 가진다. 그림 7은 결합요소를 도식화한 것으로두 절점간 모든 활동적인 자유도에서 대변위와 회전을 같게 만들며, 절점 사이의 강성, 마찰 등의 특성을 나타낼 수 있다.

3.3 접촉요소의 거동

수치기법 발달에 따라 유한요소법이 접촉문제의 해를 구하기 위한 주요 도구로 사용되고 일반적인 유한요소법의 정식화는 변위 자유도에 기초를두고 이루어지는 바, 접촉문제에서는 접촉영역의 변위가 불가입성 조건에 의해 제한된다. ABAQUS에서는 다음에 기술된 제한조건을 이용하여 접촉요소를 구현하고, 또 접촉요소를 이용한 방법을 모델링에 사용할 수 있도록 설정하고 있다.

접촉요소를 구성하는 절점들의 상대적인 위치에 따라 요소의 강성을 비선형적으로 보정하면서 다양한 접촉 거동을 모델링할 수 있다. 접촉요소의 강성을 보정하는 기본적인 개념은 두 영역의 간격이 떨어져 있으면 강성을 0으로 설정하고, 접촉하게 되면 강성을 큰 값으로 증가시키는 것이다. 접촉요

소를 이용한 접촉 알고리즘의 장점은 새로운 형태의 미지수나 특별한 해석 기법이 필요 없기 때문에 기존의 유한요소해석 프로그램에 쉽게 포함시켜 사용할 수 있다.

접촉요소를 사용해서 접촉 문제를 해석하는 과정을 설명하기 위하여 그림 8에 나타낸 하나의 접촉요소 i 에 대한 거동을 살펴보면 다음과 같다. 접촉요소는 두 영역 A 및 B의 상대적인 거동에 따라 길이가 증가하거나 감소하는 상태가 될 것이다. 결국 접촉요소의 길이는 두 영역 사이의 간격 d 로 정의되며, 이 값은 상수가 아니라 접촉문제의 수렴해를 구하는 반복과정에서 계속 변하는 변수가 된다.

2개의 강재보 사이의 상호 작용은 ABAQUS의 FRICTION 모델을 사용하였다. ABAQUS의 Coulomb마찰에서 마찰계수 (μ)는 모든방향에서 같다고 가정하며, 두 접촉면의 경계면을 따라 전단응력이 두 직각방향으로 작용하고 있다. 식 (13)에서와 같이 같은 전단응력으로 그 두 전단응력 구성요소를 합쳐져서 적용된다.

$$\bar{\tau} = \sqrt{\tau_1^2 + \tau_2^2} \tag{13}$$

4. 합성보의 휨거동 분석

4.1 유한요소 해석모델

합성보 거동을 해석할 때, 영향을 미치는 인자들에 대해 앞에서 제시한 모델링 방법으로 합성보를 모델링 하였다. 강재보는 SM490Y(H-350×350×12×19)형강을 사용하였으며, 형강의 제원은 Table 3.1과 같고, 판두께에 따른 항복응력은 Table 3.2와 같다. Table 3.1에서 I_{∞} 는 2개의 강재가 완전 합성 되었을 때의 단면2차 모멘트를 나타낸다.

Table 3.1 Section properties of member(H-350×350×12×19)

A[cm ²]	I_x [cm ⁴]	I_{∞} [cm ⁴]	I_y [cm ⁴]	r_x [cm]	r_y [cm]	Z[cm ³]
173.9	39,506	183,406	13,581	15.2	8.84	2300

Table 3.2 Yield stress of steel plate

강종	SS400 / SM400 / SMA41		SM490		SM490Y / M520 / SMA50			SM570 / SMA58		
강재의 판두께 (mm)	40이하	40초과 100이하	40이하	40초과 100이하	40이하	40초과 75이하	40초과 100이하	40이하	40초과 75이하	75초과 100이하
기준항복점 (kgf/cm ²)	2400	2200	3200	3000	3600	3400	3300	4600	4400	4300
허용축방향 인장응력 (kgf/cm ²)	1400	1300	1900	1750	2100	2000	1950	2600	2500	2450

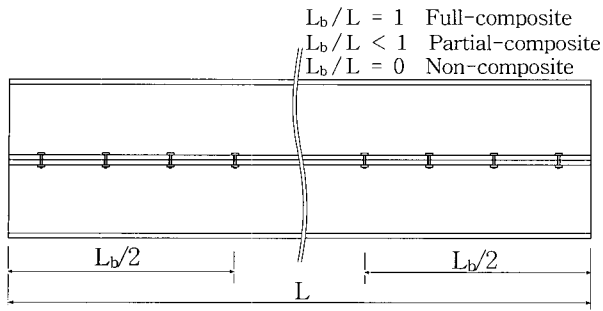
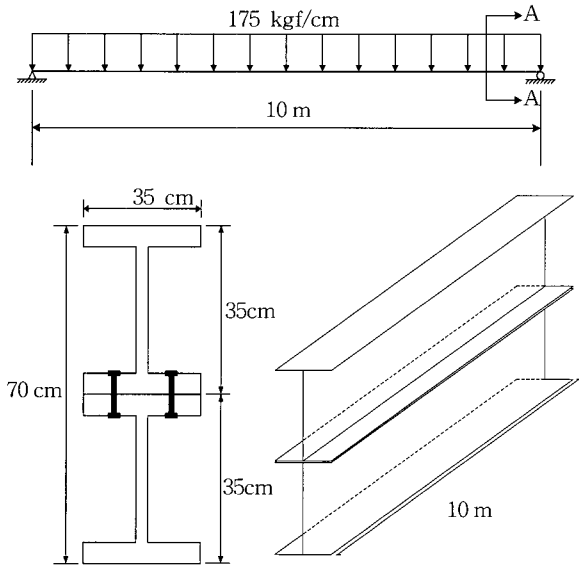


그림 9 Definition of composite rate



Double H-350×350×12×19

그림 10 Analysis model

형강의 탄성계수는 $2.1E6 \text{ kgf/cm}^2$, 마찰계수(μ)를 0.2, 0.4, 0.6, 0.8까지 변화를 주었으며, 포와송비는 0.3으로 하였다. 전단연결재는 결합요소를 사용하여 모델링하였다.

변수로는 Bolt체결에 의한 합성률과 강재사이의 마찰값(μ)으로 설정하였다. 합성률의 합성률은 그림 9와 같이 전체지간장(L)과 양 지지점으로부터 Bolt가 체결된 길이(L_b)의 비로 나타냈으며, 전체지간과 볼트의 거리비가 1일 경우를 완전 합성(Full-composite)이며, 전체지간과 볼트의 거리비가 1보다 작을 경우를 부분합성(Partial-composite), 전체지간과 볼트의 거리비가 0일때를 비합성(Non-composite)이라 하였다.

해석 모델의 치수와 형상은 그림 10과 같다.

합성률에 따른 합성률의 거동은 좌측 지지점으로부터 Bolt를 체결해 나가면서 합성률의 거동을 확인 하였다. Bolt의 초기위치는 지지점으로부터 10cm 간격을 두고, 보의 길이 방향으로 중앙점까지 20cm간격으로 모델링을 하였다.

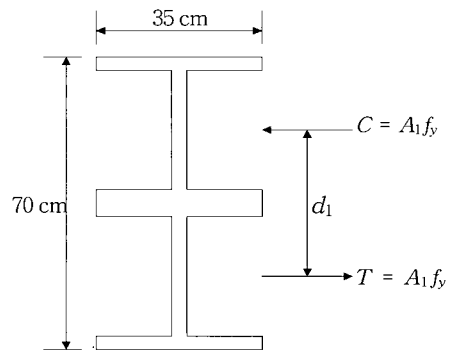


그림 11 Full interaction beam

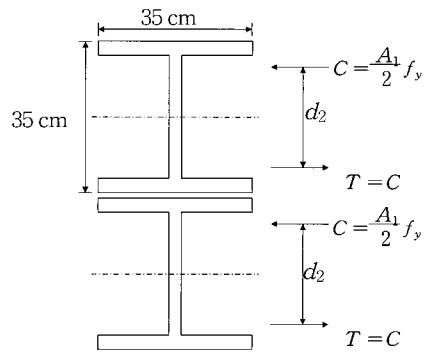


그림 12 No interaction beam

4.2 합성률의 처짐

그림 11은 일체보를 나타낸 것이며, 일체보의 중앙플렌지의 두께는 하나의 형강플렌지 두께의 두배가 되며 나머지 치수는 동일하다. 이 일체보의 극한하중은 식 (14)(15)(16)에 의해서 구해지며, 극한하중값은 185.14 kgf/cm이다.

그림 12와 같은 완전 합성률과 완전 비합성률의 해석해는 식 (19)에 의해서 구해지며, 완전 비합성의 경우에는 형강 하나의 단면 2차모멘트를 적용하였다.

그림 13은 합성률과 일체보의 유한요소해석과 이론적으로 계산된 극한하중을 나타낸다. 해석의 결과 합성률이 100%인 완전 합성률과 일체보의 해석 결과 값을 비교할 때, 초기 강성은 거의 같게 계산되었고, 항복 이후의 강성은 완전 합성률이 일체보 보다 5.6%작게 나왔으나, 극한하중은 거의 일치함을 확인할 수 있었다. 볼트의 합성률이 0%의 경우와 완전 비합성의 해석해는 마찰계수의 영향으로 약 19%의 차이를 보였다.

$$T = C = A_1 \times f_y \quad (14)$$

$$M_p = C \times h = \frac{w_p L^2}{8} \quad (15)$$

$$\therefore w_p = \frac{8f_y A_1 h}{L^2} \quad (16)$$

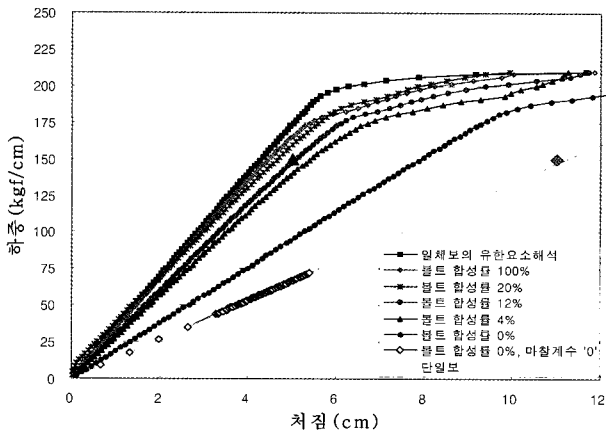


그림 13 P-δ curve

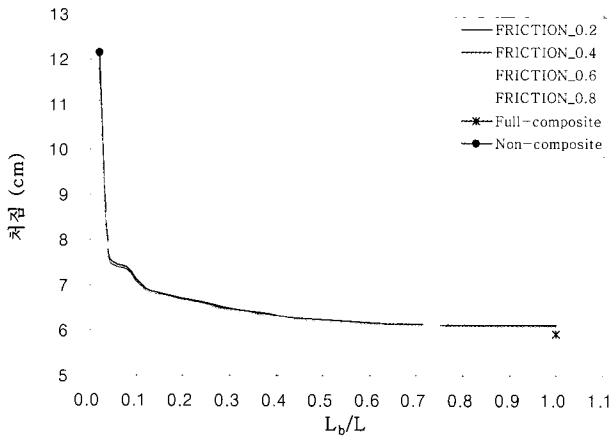


그림 14 Maximum deflection of composite beam

▲, ◆는 등분포 하중이 150 kgf/cm일 때 각각 일체보와 완전 비합성보의 이론적인 횡변위를 나타낸다. 볼트의 합성률이 0~100%사이의 유한요소해석해는 합성보 접촉면에 마찰을 고려하여 계산되었고, 마찰을 고려하지 않은 완전 비합성보의 유한요소해석은 재하하중의 50%를 넘지 못하고 수렴하였다. 이와같은 경우를 해석하기 위해서 재하하중의 반을 재하시킨 단일보로 이상화하여 유한요소해석을 수행한 결과 마찰을 고려하지 않은 완전 비합성보와 일치하는 거동을 보였으며, 이로부터 재하하중의 50%이상의 거동을 분석할 수 있었다. 이론적으로 계산된 일체보는 볼트의 합성률 12%였을 때의 유한요소해석해와 일치하였으며, 완전 비합성보는 합성보 접촉면의 마찰을 고려하지 않은 완전 비합성보와 단일보의 유한요소해석해와 거의 일치함을 보였다.

합성률의 증가에 따른 합성보 중앙점의 최대처짐을 그림 14에 나타내었다. Bolt가 체결되지 않은 비합성보의 처짐에서 합성률이 증가함에 따라 식 (6)에 의해 구해진 최대처짐에 근접함을 알 수 있으며, 해석결과 볼트가 체결됨과 동시에 처짐의 급격한 감소를 보였고, 합성률이 50 %정도에 도달하면 처짐의 변화가 거의 없음을 알 수 있다.

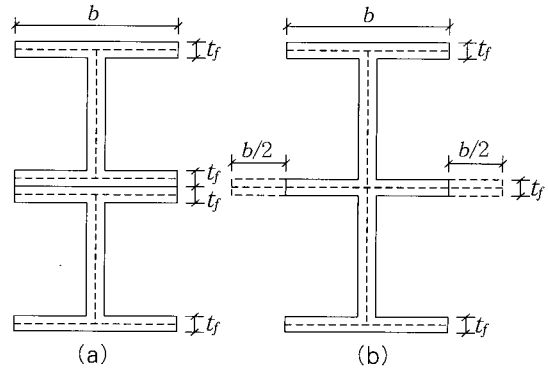


그림 15 Theoretical modeling

$$T = C = \frac{A_1}{2} \times f_y \quad (17)$$

$$M_p = 2C \times d = \frac{w_b L^2}{8} \quad (18)$$

$$\therefore w_b = \frac{8f_y A_1 d_2}{L^2} \quad (19)$$

4.3 합성보의 휨응력

합성보의 휨응력은 축방향의 L/4지점과 L/2지점에서에서 강재의 상단플랜지와 상단복부의 거동을 확인하였다. 완전 합성과 완전 비합성의 해석해는 식 (20)에 의해 구해지며, 완전 합성일 경우에는 일체보의 단면 2차모멘트를 적용하였고, 완전 비합성일 경우에는 2개의 강재가 서로 독립적인 거동을 하므로 하나의 형강의 단면 2차모멘트를 적용하였다.

$$\sigma = \frac{M}{I} \times y \quad (20)$$

그림 15(a)의 합성보는 실제의 H형강 두개를 합성한 모델이다. 하지만 유한요소해석 프로그램에서 셸 요소는 합성보가 접촉되는 중앙부분이 불가입성 조건을 무시하며 중복되어 겹쳐질 때 마찰해석이 가능하였다. 그림 15(b)는 겹쳐진 중앙부분의 합성보를 이론적인 단면 2차모멘트를 계산하기 위하여 복부 플랜지 양쪽을 b/2만큼씩 늘려 이상화한 모델링이다. 완전 합성보와 완전 비합성보의 휨응력은 이상화한 모델을 이용하여 계산 되었다. 모델별 단면 2차모멘트의 값의 차이는 표 4.1과 같다.

Table 4 1 Moment of inertia of area

	(a)	(b)
Full-composite(cm ⁴)	183,406	183,271
Non-composite(cm ⁴)	39,506	41,913

식 (20)에 의해 구해진 L/4지점의 플랜지에서의 응력은, 완전 합성($\sigma_{full-composite}$)일 경우 3,218.21 kgf/cm²이며, 완전 비합성($\sigma_{non-composite}$)일 경우에는 3,518.03 kgf/cm²의 값을 보였고, 복부에서의 응력은 완전 합성의 경우 1,609.11 kgf/cm²이며, 완전 비합성의 경우 0.0 kgf/cm²의 값을 보였다.

L/2지점의 플랜지에서의 응력은, 완전 합성일 경우 4,290.95 kgf/cm²이며, 완전 비합성일 경우에는 4,690.71 kgf/cm²의 값을 보였고, 복부에서의 응력은 완전 합성의 경우 2,145.47 kgf/cm²이며, 완전 비합성의 경우 0.0 kgf/cm²의 값을 보였다.

그림 16~19은 합성률에 따른 휨응력을 나타내며, L/4 지점 및 L/2지점의 플랜지에서의 휨응력은 그림 16 및 그림 18에서 볼 수 있듯이 Bolt가 체결됨과 동시에 휨응력이 현저하게 감소하였으며, 합성률이 50% 정도 되었을 때 완전 합성보와 거의 일치하는 거동을 나타냈다.

4.4 합성보의 전단응력

합성보의 전단응력은 축방향의 L/4지점과 지지점에서 강

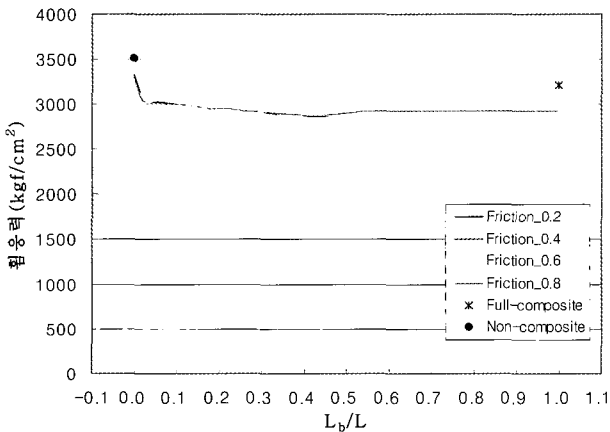


그림 16 Bending stress of flange by composite rate(L/4 region)

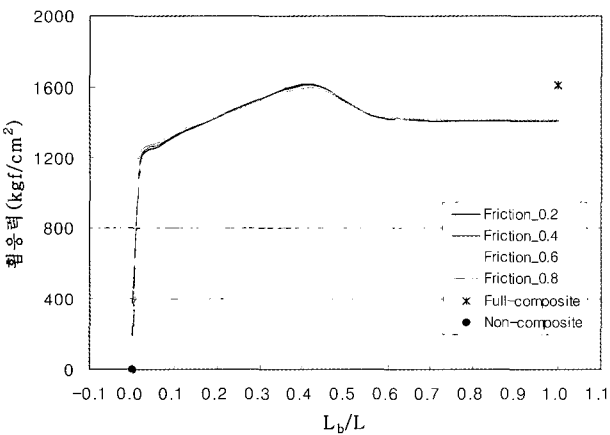


그림 17 Bending stress of web by composite rate (L/4 region)

재의 중앙플랜지와 상단복부의 거동을 확인하였다. 완전 합성과 완전 비합성의 해석하는 식 (21)에 의해 구해지며, 휨 응력과 마찬가지로 완전 합성일 경우에는 일체보의 단면 2차 모멘트를 적용하였고, 완전 비합성일 경우에는 2개의 강재가 서로 독립적인 거동을 하므로 하나의 형강의 단면 2차모멘트를 적용하였다.

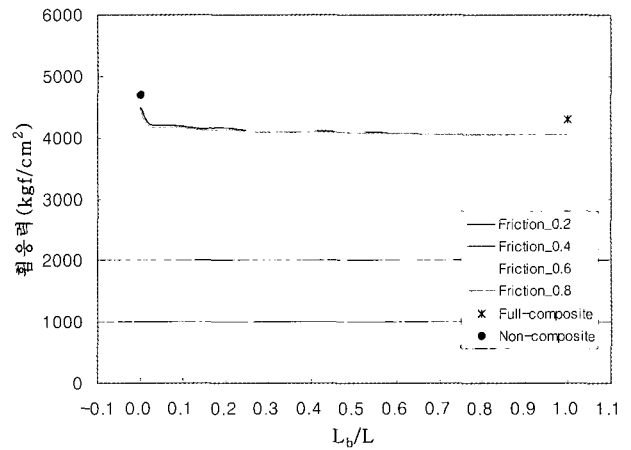


그림 18 Bending stress of flange by composite rate(L/2 region)

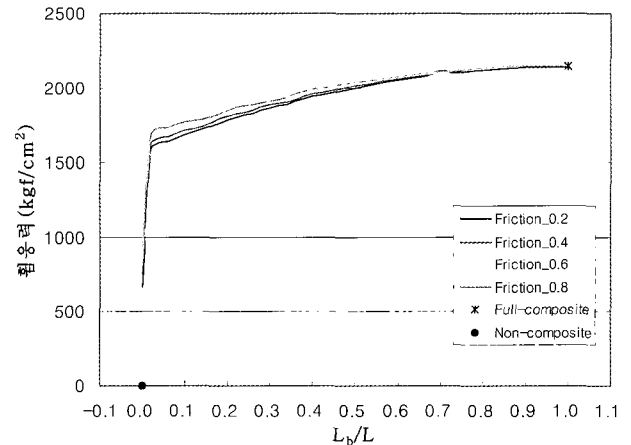


그림 19 Bending stress of web by composite rate (L/2 region)

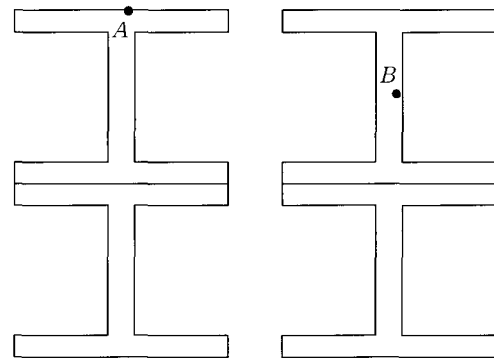


그림 20 Bending Stress check position (flange and web)

$$\tau = \frac{VQ}{Ib} \quad (21)$$

윗 식에 의하여 구해진 L/4지점의 중앙플렌지에서의 전단응력은, 완전 합성일 경우 580.36 kgf/cm²이며, 완전 비합성일 경우에는 522.83 kgf/cm²의 값을 보였고, 복부에서의 응력은 완전 합성의 경우 544.26 kgf/cm²이며, 완전 비합성의 경우 575.21 kgf/cm²의 값을 보였다.

지지점의 플렌지에서의 전단응력은, 완전 합성일 경우 1,160.72 kgf/cm²이며, 완전 비합성일 경우에는 1,045.66 kgf/cm²의 값을 보였고, 복부에서의 응력은 완전 합성의 경우 1,088.52 kgf/cm²이며, 완전 비합성의 경우 1,150.42 kgf/cm²의 값을 보였다.

L/4 지점의 플렌지에서의 전단응력은 그림 20에서 볼 수 있으며, 합성률이 50%정도 되었을 때 합성응력에 도달하였다. 복부에서의 전단응력 합성률이 40%에서 약간의 변화를 보일뿐 거의 변동이 없다.

지지점의 플렌지에서의 전단응력은 그림 22에서 볼 수 있

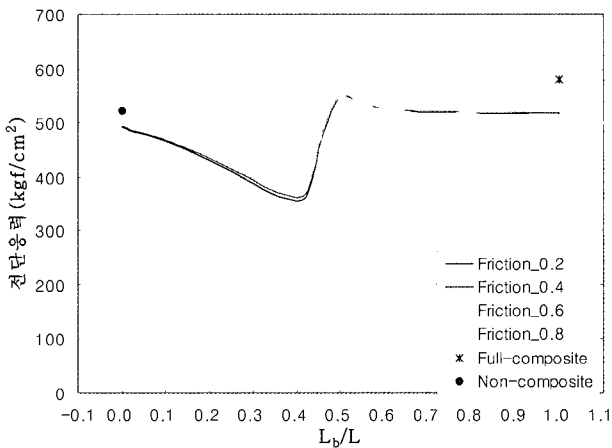


그림 21 Shear stress of flange by composite rate (L/4 region)

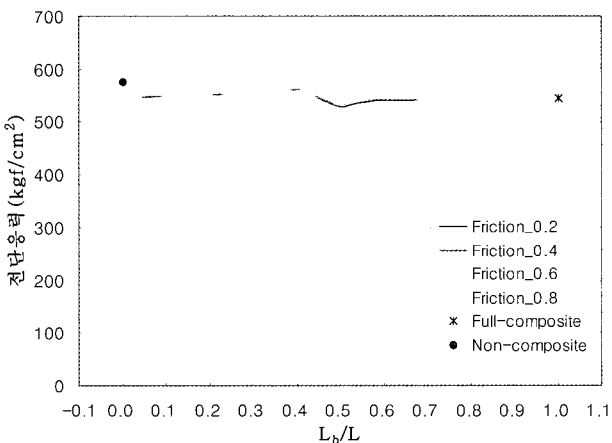


그림 22 Shear stress of web by composite rate (L/4 region)

듯이 Bolt가 체결됨과 동시에 전단응력이 급격한 증가를 보이며, 합성률이 40%정도에서는 플렌지와 복부는 합성전단응력에 도달하였다.

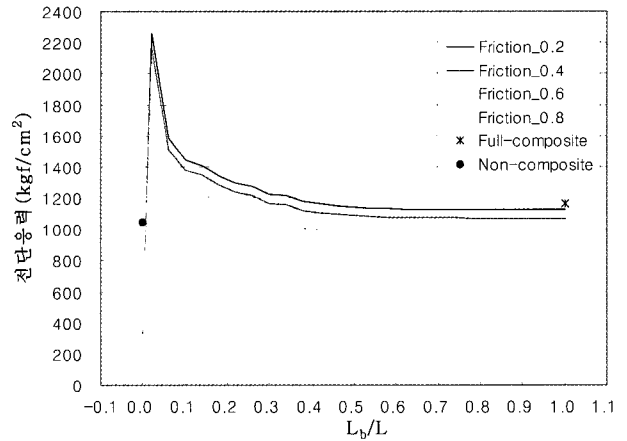


그림 23 Shear stress of flange by composite rate (support region)

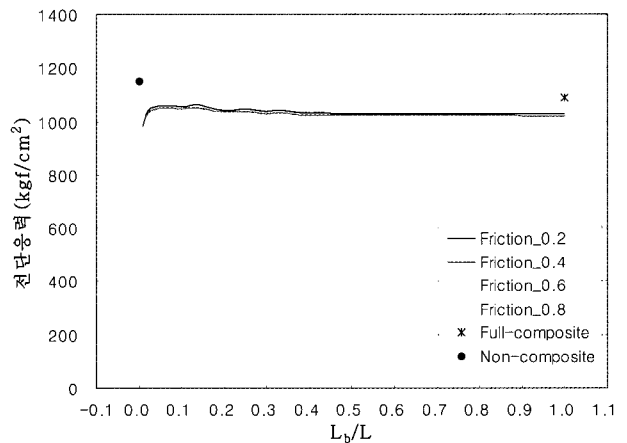


그림 24 Shear stress of web by composite rate (support region)

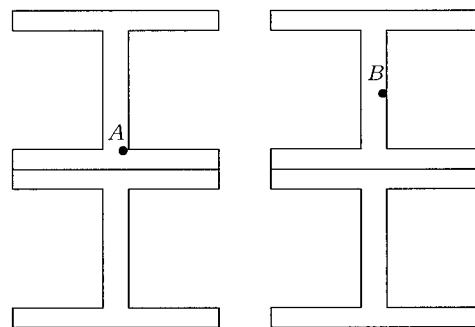


그림 25 Shear stress check position (flange and web)

5. 결 론

본 연구에서는 강재 조립 합성보의 비선형 휨거동 특성을 파악하기 위하여, 범용비선형 유한요소 프로그램을 적용하여

합성보의 합성률 및 전단연결재의 위치, 마찰값을 변수로 하여 합성보를 해석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 강재보, 전단연결재를 각각 셸 요소, 결합요소를 사용하여 모델링하였고, 강재보의 플렌지가 접촉되는 마찰면을 접촉요소를 사용하여 모델링함으로써 강재 조립 합성보의 적절한 유한요소 해석의 모델링 방법을 제시하였다.
2. 본 연구에서 제시한 유한요소 해석방법의 신뢰성을 확인하기 위하여, 완전 합성보와 일체보의 극한하중 결과 값을 비교한 결과, 초기강성과 극한하중은 일치하였으나, 완전 합성보의 경우, 외력이 극한하중의 약 85%에 도달하였을 때 부분적으로 미끄러짐 및 소성영역진입에 따른 강도 감소 효과가 나타남을 확인하였다.
3. 합성보의 합성률 0~100%로 변화시킬때 합성률에 따른 합성보의 거동 특성을 제시하였다. 그 결과 합성보의 최대처짐, 최대 휨응력, 최대 전단응력은 합성률이 50~60%일 때 완전 합성보와 유사한 거동을 보였다.
4. 강재사이의 마찰계수의 변화에 따른 합성보의 거동에서는 최대처짐의 경우 합성률이 10%이내에서 3%내의 차이를 보였고, 휨거동의 경우에는 합성률이 40%이내에서 1%의 차이를 보였다. 전단응력의 경우에는 L/4지점에서 플렌지의 전단응력은 마찰계수에 따라 5.8%의 차이가 있었고, 복부에서는 마찰력의 영향이 없음을 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 2006년 충북대학교 학술연구비 지원사업의 연구비 지원으로 수정 되었으며, 저자는 연구비 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 곽효경, 서영재** (2000) 부분 강합성보의 시간의존적 거동해석, 한국전산구조공학회논문집, pp.461~473.
- 곽효경, 서영재** (2000) 부분 강합성보의 슬립거동, 대한토목학회논문집, pp.1017~1027.
- 오명호, 장태영, 김명환, 김대중, 김상대** (2005) 비조밀 단면을 가진 SC 합성기둥의 비선형 해석, 한국강구조학회논문집, 17(74), pp.60~71.
- 장승필, 심창수, 김중희, 김영진** (1998) 프리캐스트 콘크리트 바닥판 교량의 전단연결부 설계, 한국강구조학회논문집, 10(4), pp.761~767.
- ABAQUS** (1998) *ABAQUS User's Manual, Version 5.8*, Hibbit, Karlson & Sorenson, Inc.
- Adekola, A. O.** (1968) Partial interaction between elasticity connected element of a composite beam, *Int. J. Solids and Struct.* 4, pp.1125~1135.
- Filip, C. F., Ashraf, A.** (2000) Mixed formulation of nonlinear steel-concrete composite beam element, *J. Struct. Engrg.*, ASCE, 126(3) pp.371~382.
- Johnson, R. P.** (2004) *Composite structures of steel and concrete*, Blackwell publishing.