

# RC 띠장-철골 보 접합부의 고정도에 따른 SPS 지하복합골조 거동 해석

## Analysis of Behaviors of SPS Underground Composite Frames Considering the Rigidity of RC Wale-Steel Beam Joint

김 승 훈\*

Kim, Seung-Hun

### Abstract

In SPS system, steel beams are used as not only temporary struts supporting the wale but main flexural members of building. Previous experimental works show that RC wale-steel beam joints have some flexural rigidity. In this paper, nonlinear analysis is performed using DRAIN-2DX program to investigate the behaviors of the underground composite frames constructed with SPS system when the rigidity of RC wale-steel beam joints change. Analysis variables are the procedure of construction, magnitude of lateral forces, and flexural rigidity of the RC wale-steel beam joint with stud connector. Analysis results show the effects of joint rigidity for the yielding process of frame and the moment and deflection at the mid-span of beam.

### 요 지

SPS 공법에서 철골보는 가설상태에서 띠장을 지지하는 버팀대로 사용되며, 시공후 구조물에서 휨재의 역할을 한다. 기존 실험연구결과에서 RC 띠장-철골보 접합부는 소정의 휨강성을 갖는다고 보고하고 있다. 본 연구에서는 SPS 공법으로 시공된 지하복합골조에 대하여 RC 띠장-철골보 스티드 접합부의 고정도에 따른 거동을 평가하기 위하여 비선형 해석을 실시하였다. 해석변수는 시공단계, 횡력의 크기, RC 띠장-철골보 접합부의 고정도 등이다. 해석결과에서 골조의 항복과정, 보 중앙부 휨모멘트 및 처짐에 대한 접합부의 고정도의 영향을 보여준다.

**Keywords** : SPS System, Composite Frame, Joint Rigidity

**핵심 용어** : SPS 공법, 복합골조, 접합부 고정도

\* 정회원, LG건설(주) 기술본부 과장

E-mail : kimseunghun@empal.com 017-412-7511

• 본 논문에 대한 토의를 2004년 6월 30일까지 학회로 보내 주시면 2004년 10월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

## 1. 서론

최근 흙막이를 지지하는 버팀대(strut)를 가설재가 아닌 건물의 주구조체(기둥, 보)로 이용하는 SPS (Strut as Permanent System) 공법<sup>(1)</sup>이 개발되었다. 이 공법은 버팀대용 가시설의 설치 및 해체 작업이 필요치 않아서 획기적으로 지하공사의 공정을 줄일 수 있어 점차 사용이 확대되고 있다.

SPS 공법으로 만들어진 SPS 지하골조는 굴토 공사 시에는 철근콘크리트(RC) 띠장, 버팀대 역할을 하는 철골 보, 철골 보를 지지하는 철골 기둥 등으로 이루어진다. 지하구조공사 완료 후의 SPS 지하골조는 Fig. 1 과 같이 RC 띠장, 슬래브의 타설에 따른 합성보, 철골 철근콘크리트 기둥(SRC) 등으로 구성되어 복합구조를 형성하게 된다.

SPS 지하골조에서 RC 띠장-보 접합부는 스테드에 의해 핀 접합으로 설계된다. 하지만, 접합부가 압축력을 받는 특성상 경제적인 설계를 위하여 Fig. 2의 (a)와 같은 일반적인 핀접합 형태가 아닌 철골 보 전체 단면이 압축력에 저항하도록 Fig. 2의 (b)와 같은 접합 형태를 취하고 있다. 기존의 연구결과<sup>(2)</sup>에 의하면 이러한 스테드 접합부는 스테드의 수 및 배치형태에 따라 소정의 휨강도를 보유하게 된다. 이러한 접합부의 고정도는 구조물의 전체 거동에 영향을 미칠 것으로 예상되며 이를 고려할 경우 보다 신뢰성있고 경제적인 설계가 될 것으로 예상된다.

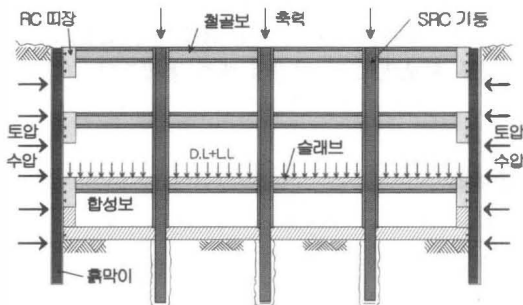


Fig. 1 SPS 지하복합골조

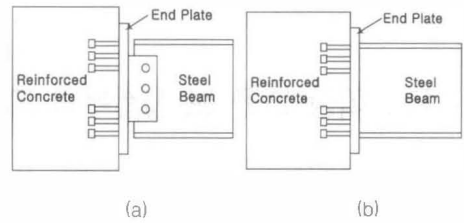


Fig. 2 철근콘크리트 부재와 철골 보의 핀접합

본 SPS 공법에 의한 지하복합골조의 경우 시공단계에 따라 하중조건 및 부재의 종류가 변화하게 되므로, 시공단계에 따라 띠장을 통하여 보에 전달되는 축력과 RC 띠장-철골 보 스테드 접합부의 거동 특성이 골조의 거동에 미치는 영향 또한 틀리므로 이에 대한 평가가 필요하다.

본 연구에서는 SPS 공법에 의한 지하복합골조를 대상으로 시공단계와 RC 띠장-철골 보 접합부의 고정도를 주요 변수로 하여 골조 해석프로그램인 DRAIN-2DX<sup>(3)</sup>로 2차원 해석을 실시하고 골조의 항복과정, RC 띠장과 접합된 철골 보의 모멘트 및 처짐 변화 등을 비교함으로써 골조의 거동에 미치는 영향을 평가한다.

## 2. 해석 개요

### 2.1 대상 구조물

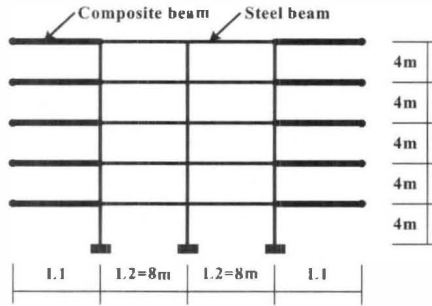
해석 대상구조물로 실제 SPS 공법으로 만들어진 사무실 구조물을 선정하였다. 대상 구조물은 지하층의 경우 RC 띠장, SRC 기둥, 합성보 등으로 구성된 복합구조이며, 지상층의 경우 RC 구조물이다. 상용 구조설계 프로그램 MIDAS GEN을 사용한 해석에 의하여 구조물을 설계하였다. 지하 철골조 및 합성부재의 설계는 한계상태설계기준<sup>(4)</sup>을 적용하였고 상부층 RC조의 설계는 콘크리트구조설계기준<sup>(5)</sup>을 적용하였다.

SPS 공법의 경우, 굴토 공사시의 가설단계와 지하 구조물이 완성된 후인 시공후 단계에 따라 부재 및 응력상황이 틀려진다. Fig. 3은 이러한 단계별 해석 대상 골조를 나타낸 것이다.

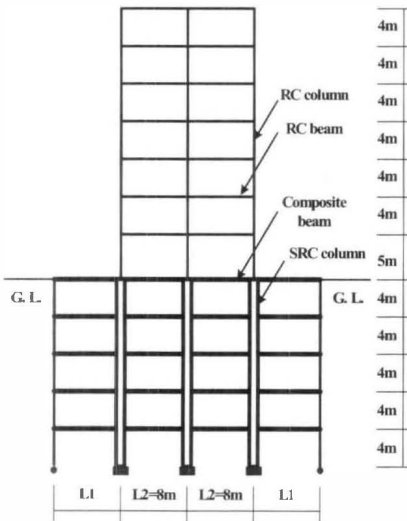
## 2.2 하중 산정

SPS 공법에서 하중 산정은 가설 단계와 시공후 단계에 따라 달라진다. 가설단계시 보에 작용하는 연직하중은 시공하중만을 고려하였다. 이러한 연직하중을 해석 프로그램에서 이상화한 분포하중으로 치환하여 적용시켰다. 토압은 Tschebotarioff의 제안에 의해 계산된 연약점성토 지반인 경우의 토압을 적용시켰으며, 압축력(토압)을 일정비로 증가시켜 골조의 비선형 거동을 평가하였다.

시공단계 이후의 보는 합성보로써 거동하게 되며, 이때의 사용하중인 고정하중과 활하중 모두가 고려된다.



(a) 가설단계의 골조



(b) 시공후 단계의 골조

Fig. 3 시공단계별 SPS 지하복합골조

해석시에는 이를 고려하여 연직하중을 점중 증가시켜 골조의 거동을 평가하였다.

## 2.3 해석 변수

RC 띠장-보 접합부의 고정도에 따른 구조물의 거동을 파악하기 위하여 접합부를 강접, 띠장접합부, 편접합부로 분류하여 해석을 수행하였다. 띠장접합부에 대해서는 실제 구조물의 접합상세를 고려하여 접합되는 합성보의 설계 휨강성의 10%, 20%, 40%의 휨강성을 가지는 스티드 접합부를 대상으로 하였다. 또한 단면의 비대칭으로 인한 구조물의 거동을 분석하기 위하여 RC 띠장과 연결된 보 부재의 길이( $L_1$ )와 내부보의 길이( $L_2$ )의 비( $L_1/L_2$ ) 변화에 따라 접합부의 고정도가 미치는 영향을 평가하기 위하여  $L_1/L_2$ 가 1, 0.75, 0.5, 0.25가 되도록  $L_1$ 을 8m, 6m, 4m, 2m로 변화시켜 해석을 수행하였다. 이 때, 합성보 길이변화에 따른 합성보 유효폭 변화를 고려하였다.

## 2.4 지점 구속 조건

기초에 대해서 지반침하에 의한 처짐이 없다고 가정하고 변위와 회전에 대하여 모두 구속하였다. 굴토공사 단계 해석시 토류벽과 띠장 사이의 경계조건은 강접일 경우 Y-방향 변위와 회전에 대하여 모두 구속하였고 힌지일 경우 Y-방향 변위만을 구속하였다. Y-방향의 구속이유는 토류벽의 수직변위가 상대적으로 적기 때문에 Y-방향에 대한 구속을 하였다. 시공후 단계에서는 지하층 외벽요소를 추가하여 해석을 수행하였다.

## 3. 접합부 및 부재 모델링

### 3.1 RC 띠장-철골보 스티드 접합부

일반적으로 Drain-2DX에서 접합부를 모델링할 때 Type 04 요소를 사용한다. RC 띠장-보 접합부의 경우 압축력이 접합부의 거동에 영향을 미치게 되지만 Type 04 요소의 경우 축력-모멘트 상관 곡선을 적용할 수 없다.

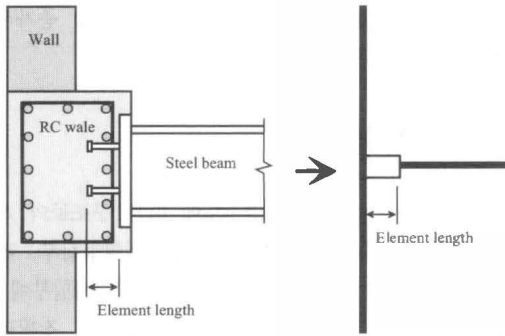


Fig. 4 RC 띠장-철골 보 접합부 모델링

따라서 본 연구에서는 Fig. 4와 같이 스티드 문힘길 이를 요소길이로 하는 이상화 부재를 가정하여 축력과 휨을 고려할 수 있는 Type 02인 Plastic hinge Beam-column element를 적용하였다.

### 3.2 철골보 및 합성보

가설단계시 버팀대로 사용되는 철골 보는 철골 기둥과 같이 P-M 상관도를 작성하여 Type 02요소로 모델링하였다. 시공후 단계에서 축력을 받는 합성보<sup>(6)</sup>는 소성중심에 대하여 비대칭 단면을 가지게 되므로 Fig. 5의 점선과 같이 P-M 상관도가 대칭이 아닌 형태가 나타나게 된다. 본 연구에서는 이러한 결과를 DRAIN-2DX에 입력하기 위하여 Fig. 5의 실선과 같이 P-M 상관도를 단순화하여 Type 02요소에 적용하였다. 이러한 단순화 과정에서 고려하지 못하는 인장력과 정모멘트를 동시에 받는 경우는 지하구조물과 같이 압축력을 받는 구조물에서 거의 발생하지 않는다.

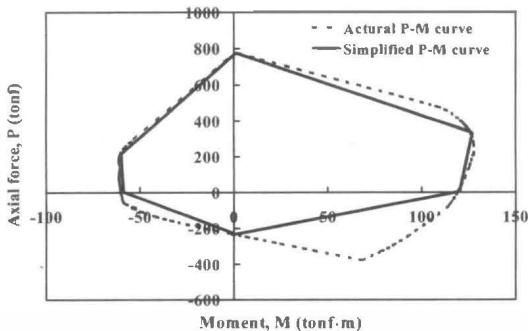


Fig. 5 합성보의 P-M 상관도

### 3.3 철골 기둥 및 SRC 기둥

가설단계시 버팀대의 지지대로 사용되는 철골 기둥과 시공후 단계의 SRC 기둥은 Type 02요소로 모델링하였다. SRC 기둥의 P-M상관도는 철골과 철근콘크리트의 P-M상관도를 작성후 단순누가시키는 방법을 이용하였다.

## 4. 가설단계 해석

### 4.1 골조의 단면 해석

SPS 공법에서는 지하굴토 공사시 주변골조에 대하여 슬래브를 미리 타설하여 작업공간으로 사용할 뿐 아니라 토압에 대한 저항부재로 적용하고 있다. 이를 고려하여 골조를 모델링한 후 단면에 관한 2차원 해석을 실시하였다. 하중 가력은 시공하중에 의한 일정한 연직하중을 재하한 후 토압을 점진적으로 증가 시켰다. 해석은 토압을 가장 많이 받는 최하층 내부 보에서 압축에 의한 항복이 발생하여 종료되었다. 이는 가설 단계에서는 철골 보에 작용하는 시공하중이 상대적으로 작아서 모멘트에 의한 항복은 발생하지 않았음을 보여준다.

### 4.2 골조의 평면 해석

가설 단계에서 지하 굴착후 외부보에 콘크리트를 타설하여 합성기둥을 하기 전까지는 철골조에 의해 토압을 저항하게 된다. 이 때 철골 보는 버팀대 역할을 하게 되며 Fig. 6(a)에서와 같이 토압 및 수압에 의한 대칭 압축력을 받는다고 가정하여 설계되어진다. 하지만 이러한 압축력은 주위 건물의 굴토 공사나 수압의 변화 등의 여러 상황에 의하여 Fig. 6(b)와 같이 비대칭 압축력이 작용할 수 있다.

이상과 같은 대칭 압축력과 비대칭 압축력을 받는 경우에 대하여 지하 골조의 평면에 대한 2차원 해석을 수행하였다. 대칭 압축력을 받을 경우 압축력에 의한 철골부재의 항복으로 해석이 종료되었으며, RC 띠장과 철골 보 접합부의 고정도 차이에 의한 효과는 미소하였다.

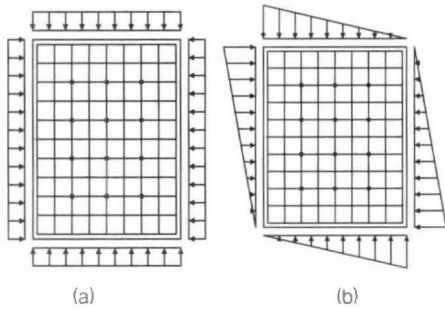


Fig. 6 가설단계시 골조 평면에 작용하는 압축력

반면에 비대칭 압축력을 받을 경우 모멘트에 의한 철골부재의 항복으로 해석이 종료되었으며, 접합부의 고정도 차이에 의한 효과가 발생하였다.

Fig. 7은 비대칭압축력을 받는 지하평면을 대상으로 RC 띠장-철골 보 접합부의 고정도에 따른 해석을 실시하여 부재 및 접합부 등에 최초로 항복이 발생할 경우의 압축력( $P_y$ )을 편 접합 시의 최초 항복 발생시의 압축력( $pinP_y$ )과 비교하여 나타낸 것이다. 접합부의 고정도는 RC 띠장-철골 보 접합부의 강성에 접합된 철골보의 강성을 나눈 것이다. Fig. 7에서 접합부의 고정도가 20% 증가할 시에 편접합시 보다 2% 정도 항복하중이 증가하는 것으로 나타났다.

## 5. 시공후 단계 해석

### 5.1 지하층 골조의 항복 발생위치 변화

Fig. 8에 외부 보와 내부 보의 비( $L_1/L_2$ )가 1인 경우( $L_1=8m$ )에 대하여 접합부의 고정도(KCONN)에 따른 부재 및 접합부의 항복 발생위치와 발생순서를 나타내었다. Fig. 8에서 지하층 구조물에 대하여 강접합인 경우 지하 1층 띠장 접합부 단부에서 항복이 가장 먼저 발생하였으나, 편접합인 경우 지하5층 SRC 기둥과 접하는 보 단부에서 먼저 항복하였다. 이로부터 RC 띠장 접합부의 강성이 적어질수록 띠장 접합부 측에서 내부 기둥측 단부로 항복이 전이되는 것을 확인할 수 있었다.  $L_1/L_2$ 의 비가 0.75, 0.50, 0.25 인 경우 역시 부재의 항복이 전이되는 경향이  $L_1/L_2$ 의 비가 1인 경우와 유사한 것으로 나타났다.

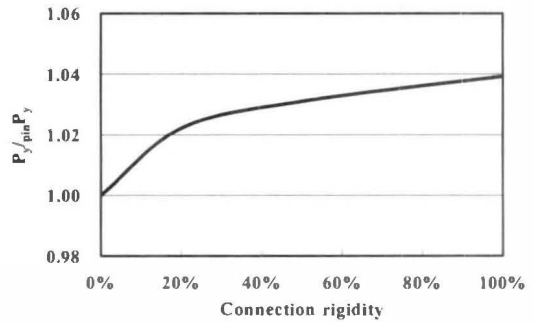
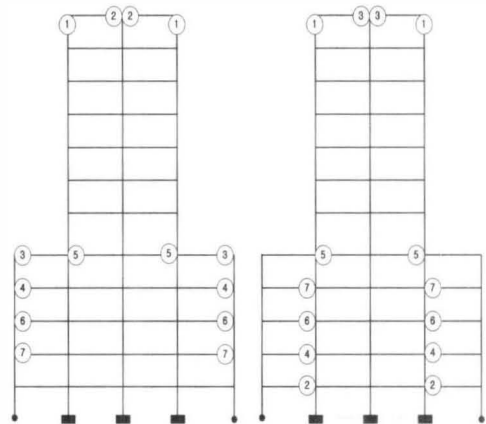
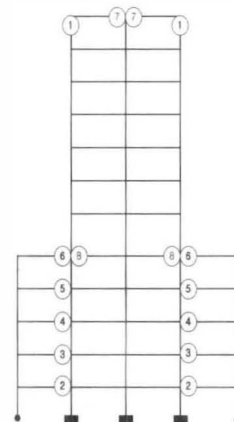


Fig. 7 접합부의 고정도에 따른 최초 항복시 하중 비교



(a) KCONN=100% (rigid) (b) KCONN=40% (semi-rigid)



(c) KCONN=0% (pin)

Fig. 8 접합부의 고정도별 부재 및 접합부의 항복과정 ( $L_1=8m$ )

## 5.2 접합부의 고정도에 따른 최초 항복하중

RC 띠장 접합부의 고정도에 따른 최초 항복 발생 시의 하중( $Q_y$ )과 핀 접합시의 최초 항복 발생 시의 하중( $pinQ_y$ ) 비를 비교하여 Fig. 9에 나타내었다. 실제 시공현장에 적용된 RC 띠장-보 접합부의 휨 강성을 평가해 보면 접합된 보 강성의 약 10%~40% 정도를 가지고 있다. 이를 기준으로 접합부 고정도를 0%, 10%, 20%, 40%, 100% 등으로 구분하여 항복하중을 평가하였다. 그림에서 보는 바와 같이 RC 띠장접합부의 고정도가 증가함에 따라 최초 항복 하중값이 점차적으로 커짐을 알 수 있다. 그러나 RC 띠장 접합부의 고정도가 40% 이상일 경우에 최초 항복한지 발생시의 하중 증가량은 미비한 것으로 나타났다.

외부 보의 길이( $L_1$ ) 변화에 따른 항복하중 비는 접합부의 고정도가 커짐에 따라 더 많은 차이를 나타내어, 외부보가 길어질수록 접합부의 고정도에 따른 영향을 많이 받는 것으로 평가되었다.

Table 1은 외부보 길이 변화에 따른  $Q_y/pinQ_y$ 의 평균값을 접합부의 고정도에 따라 비교한 것이다.

Table 1 접합부 고정도에 따른 최초 항복하중

접합부 고정도 ( $K_{CONN}$ )	최초 항복하중/ 완전핀 접합부의 최초항복하중
10%	110 %
20%	116 %
40%	120 %
100%	121 %

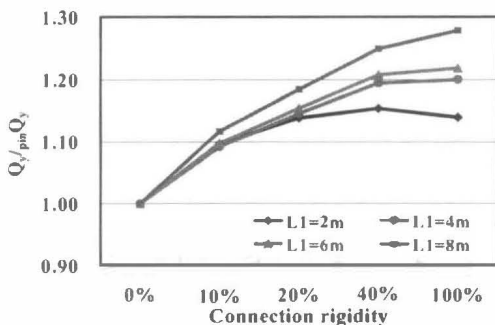


Fig. 9 접합부 고정도에 따른 최초 항복하중 비교

Table 1에서 보 강성의 10%를 고려한 접합부의 경우 핀접합시 보다 1.1배의 하중에서 최초 항복이 발생하였다. 이는 현행 해석상에서 RC 띠장 접합부의 강성을 핀 접합으로 고려한다는 것은 구조물 전체의 거동에서 10%의 내력에 관한 안전율을 가지고 있음을 반증한다.

## 5.3 접합부와 연결된 보 길이 변화에 따른 최초 항복하중

RC 띠장 접합부에 접합된 보의 길이( $L_1$ ) 변화에 따른 최초 항복 발생시 하중( $Q_y$ )을  $L_1/L_2$ 의 비가 1일 때의 최초 항복 발생시 하중( $L_1/L_2=1Q_y$ )과 비교하여 Fig. 10에 나타내었다.

접합부를 핀접합으로 할 경우 보 길이가 감소함에 따라 최초 항복 발생시 하중이 증가하였지만, 강접합으로 할 경우 보 길이가 감소함에 따라 최초 항복 하중 발생값이 감소하였다. 이는 강접합일 경우 보 길이가 작아짐에 따라 외부보의 휨 변형을 크게 구속시켜 내부 보에 모멘트가 크게 작용하기 때문인 것으로 사료된다. 이에 반해 핀접합일 경우 외부 보 및 내부 보의 휨 변형능력이 증대되어 내부 보에 발생하는 모멘트가 감소된다. Table 2는 접합부 고정도 변화에 따른  $Q_y/L_1/L_2=1Q_y$ 의 평균값을 접합부에 연결된 보 길이에 따라 비교한 것이다. 표에서 보의 길이가 감소함에 따라 최초 항복하중이 증가함을 보여준다. 이는 실제 지하구조물을 설계함에 있어서 길이비( $L_1/L_2$ )를 적게 함으로서 구조물의 안전성을 확보할 수 있음을 보여주고 있다.

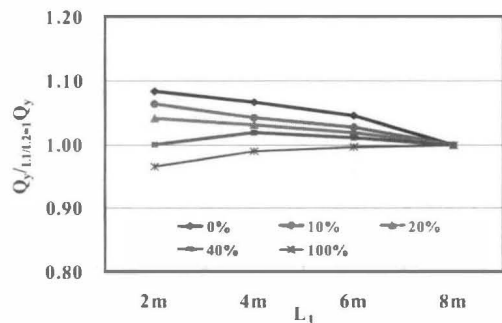


Fig. 10  $L_1$ 변화에 따른 최초 항복하중 비교

Table 2  $L_1$ 변화에 따른 최초 항복하중 비교

$L_1$	최초 항복하중/ $L_1=8m$ 일 시의 최초항복하중
6m	103 %
4m	104 %
2m	106 %

### 5.4 접합부의 고정도에 따른 중앙부 모멘트 및 처짐

#### 5.4.1 고정도에 따른 중앙부모멘트 감소 효과

RC 락장 접합부의 고정도에 따라 중앙부 모멘트 감소효과를 편 접합일 경우의 중앙부 모멘트 값을 기준으로 하여 그 감소비율 Table 3과 Fig. 11에 나타내었다. 그림과 표의 수치는 길이비( $L_1/L_2$ ) 변화 효과를 고려한 중앙부 모멘트의 평균값을 사용하였다.

탄성영역에서는 락장인접부의 중앙부 모멘트 감소효과가 접합부 강성이 증가할 수록 점차적으로 커짐을 보여 준다. 탄성영역에 비해 비탄성영역을 고려시 감소폭은 약 35%가 더 증가한 중앙부 모멘트 감소효과를 보였다. 이러한 경향은 접합부와 연결된 보 길이가 변화할 시에도 비슷하게 나타났다.

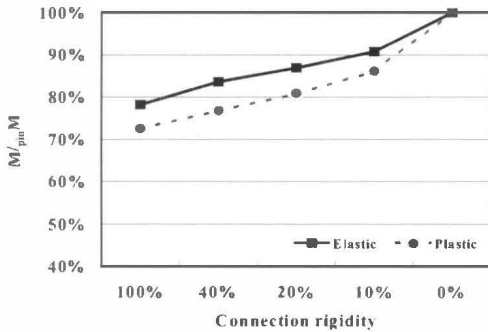


Fig. 11 접합부 고정도에 따른 중앙부 모멘트 변화( $L_1=8m$ )

Table 3 접합부의 고정도에 따른 중앙부 모멘트 감소 ( $L_1=8m$ )

접합부 고정도 ( $K_{CONN}$ )	탄성영역	비탄성영역
10%	10%	14%
20%	14%	19%
40%	17%	23%

Table 4 접합부 고정도 및 압축력에 따른 처짐변화

Connection rigidity ( $K_{CONN}$ )	0.0 $P_y$	0.4 $P_y$	0.8 $P_y$
100%	0.55	0.53	0.59
40%	0.62	0.61	0.62
20%	0.69	0.69	0.69
0%	1.00	1.00	1.00

#### 5.4.2 고정도에 따른 중앙부 처짐 감소 효과

Table 4는 접합부의 고정도가 변화할 시 접합부에 연결된 보의 중앙부 처짐을 편 접합부의 처짐과 비교하여 하중단계별로 표시한 것이다. 접합부와 연결된 보의 길이는 가장 큰 처짐이 예상되는 8m로 하였다. 축력비가 변화할 시 처짐은 접합부의 고정도에 따라 일정하게 나타났다. 이를 볼 때 시공후 단계의 해석에 있어서 축력비 변화에 따른 P- $\Delta$  효과는 크지 않는 것으로 평가되었다.

접합부 고정도에 따라 접합부와 연결된 보의 중앙부 처짐값을 편접합일 경우와 비교하여 Table 5와 Fig. 12에 나타내었다. 처짐값 역시 고정도가 클수록 감소함을 알 수 있으며, 비탄성영역에서 처짐값이 탄성영역의 처짐값보다 약 30% 이상 감소되는 것으로 평가되었다. 이러한 경향은 접합부와 연결된 보 길이가 변화할 시에도 비슷하게 나타났다.

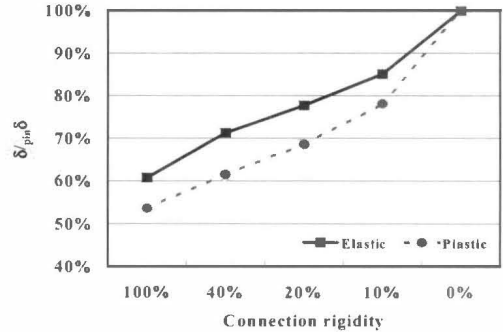


Fig. 12 접합부의 고정도에 따른 중앙부 처짐 감소 ( $L_1=8m$ )

Table 5 접합부의 고정도에 따른 중앙부 처짐 감소 ( $L_1=8m$ )

접합부 고정도 ( $K_{CONN}$ )	탄성영역	비탄성영역
10%	16 %	21 %
20%	24 %	31 %
40%	30 %	37 %

## 6. 결론

본 연구에서 SPS 공법에 의한 지하복합골조를 대상으로 RC 띠장-철골 보의 고정도에 따른 시공단계별 골조해석을 실시하였으며, 그 연구결과는 다음과 같다.

- 1) 가설단계의 골조해석에서 비대칭 축력을 받을 경우 모멘트에 의한 철골부재의 항복이 발생하였으며 접합부가 강접합일 시 편접합시에 비해 항복하중이 약 4% 증가되었다. 그리고 접합부의 고정도가 20% 이상일 시 편접합시의 항복하중에 비해 2% 이상의 하중 증가를 확보할 수 있는 것으로 나타났다.
- 2) 시공후 단계의 골조해석에서 RC 띠장 접합부가 강접일 경우 접합부에서 항복이 먼저 발생하였지만 고정도가 적어질 수록 SRC 기둥과 접하는 보 단부로 항복 발생위치가 전이됨을 확인할 수 있었다.
- 3) 시공후 단계의 골조해석에서 최초 항복 발생시 하중은 접합부의 고정도를 40%로 할 경우 편 접합일 때 보다 20% 정도 많은 항복 하중 증가치를 보였으며 그 이상의 고정도에서는 항복하중 증가율이 크게 떨어지는 것으로 나타났다.
- 4) 시공후 단계의 골조해석에서 접합부 고정도가 증가함에 따라 편 접합일 경우에 비해 중앙부 모멘트 감소와 함께 중앙부 처짐이 크게 감소하였다. 접합부의 고정도가 40%일 경우에 중앙부 모멘트와 처짐은 편접합일 경우 보다 각각 17%, 30% 정도의 감소효과를 나타내었다.

## 참고문헌

1. 삼성중공업(주), 한양대학교 초대형구조시스템연구센터, "SPS 공법의 개발 및 성능평가에 관한 연구", 2001.3.
2. 김승훈, 서수연, 이리형, "축력과 휨을 받는 스티드 접합부의 거동에 관한 연구", 대한건축학회논문집, 제17권, 제9호, 2001.
3. V. Prakash, G. H. Powell, and S. Campbell, "DRAIN-2DX : Base Program Description and User Guide" November, 1993.
4. 대한건축학회, "강구조한계상태 기준 및 해설", 2002.
5. 한국콘크리트학회, "콘크리트 구조설계기준 해설", 2003.
6. 김승훈, 고희중, 서수연, 이리형, 윤승조, "압축력을 받는 합성보의 휨거동에 관한 연구", 대한건축학회 논문집, 제 17권, 제 11호, 2001. 11, pp. 59-65.
7. 이태석, 김승훈, 서수연, 이리형, 홍원기, "스티드 볼트 접합부의 인장거동에 관한 연구", 한국콘크리트학회 논문집, 제13권, 제4호, 2001.8, pp. 321-328.
8. ACI Committee 349, "Code Requirements for Nuclear Safety Related Concrete Structures", American Concrete Institute, 1997.
9. ACI Committee 318, "Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary", American Concrete Institute, 1999.

(접수일자 : 2004년 4월 21일)