

# 합성구조체의 경계면 슬립이 거동과 성능에 미치는 영향

## Effects of Slip for Interface on Behavior and Capacity in Hybrid Structure

정연주\*      정광회\*\*      김병석\*\*\*  
Jeong, Youn Ju      Jung, Kwang Hoe      Kim, Byung Suk

### ABSTRACT

This paper presents a nonlinear analysis technique with slip, the effects of slip modulus and composite action by shear connector on behavior and capacity in composite structure of sandwich system. As a results of this study, it proved that the slip modulus, in case of shear behavior, seldom influence load-resistance capacity such as yield and ultimate load, but in case of flexural behavior, it appropriately influence load-resistance capacity because of stress redistribution by slip. In case of flexural behavior, analysis result for perfect-composite results in over-estimation and perfect-slip results in under-estimation on behavior and capacity. Therefore, it is desirable to model steel-concrete interface with partial-composite. The effects of slip on behavior and capacity are less in case of positive composite than loosely composite, and it proved that composite action by shear connector improve the load-resistance capacity of this system.

### 1. 서론

복합구조체는 서로 다른 두 재료를 이용하여 하나의 단면을 형성하는 구조형식으로, 재료의 효율적인 사용은 물론 일반적인 철근콘크리트 구조물이나 강-구조물에 비해 상대적으로 큰 하중저항성을 갖게 되어 최근 많은 분야에서 적용과 시도가 이루어지고 있다. 복합구조체의 장점은 설계자가 구조체의 시공 조건, 주위 환경 및 사용목적에 가장 적합한 구조형식을 선택할 수 있고 독창적인 구조도 만들어 낼 수 있다는 점이다. 여기에는 이를 뒷받침할 이론적·실험적 연구가 필수적이며 시공성·경제성도 충분히 고려되어야 한다. 또한 강과 콘크리트의 합성을 향상시키기 위한 연구도 병행되어야 한다.

SCSS(steel-concrete-steel sandwich) 또는 DSC(double skin composite) 구조체로 알려져 있는 샌드위치식 복합구조체(그림 1)는 강과 콘크리트를 이용한 합성구조체로, 외부강판, 다이아프램, 충전 콘크리트 그리고 전단연결재로 구성된다. 본 구조체는 셀 구조형식에 의해 강-콘크리트 경계면의 슬립이 억제되지만 완전한 합성구조체는 아니므로 강-콘크리트 경계면에서의 슬립을 고려한 해석기법이 필요하다. 또한 전단연결재는 강-콘크

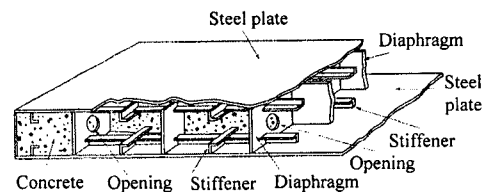


그림 1 샌드위치식 복합구조체

\* 정희원, 한국건설기술연구원 선임연구원  
\*\* 정희원, 한국건설기술연구원 연구원  
\*\*\* 정희원, 한국건설기술연구원 수석연구원

리트 경계면에서의 슬립을 억제하는 역할을 하여 합성효과와 밀접한 관련이 있지만, 전단연결재의 설치에 따른 시공비용 및 기간 측면에서 불리한 요인으로 작용하므로 전단연결재의 설치에 따른 합성효과가 성능에 미치는 영향에 대한 검토도 필요하다.

## 2. 슬립 해석방법

### 2.1 경계면 모델링

그림 2는 인터페이스 요소를 사용하여 강-콘크리트 경계면의 슬립을 모사한 것이다. 인터페이스 요소는 두께가 0이며, 경계면의 힘( $\bar{T}$ )과 상대변위( $\Delta\bar{u}$ ) 사이의 관계는 수직방향( $n$ )과 접선방향( $t$ )에 대해 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

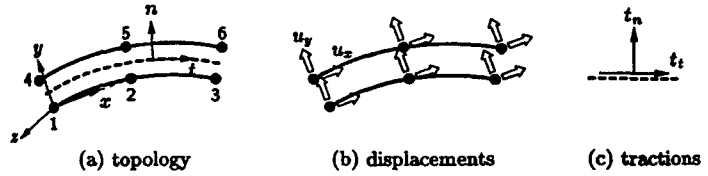


그림 2 인터페이스 요소

$$\bar{T} = [K]_I \Delta\bar{U} \quad \text{or} \quad \begin{pmatrix} t_n \\ t_t \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} k_n & 0 \\ 0 & k_t \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \Delta u_n \\ \Delta u_t \end{pmatrix} \quad (1)$$

여기서,  $[K]_I$ 는 강-콘크리트 경계면의 인터페이스 요소에 대한 강성행렬이고,  $k_n$ 과  $k_t$ 는 각각 인터페이스 요소의 수직강성, 수평강성으로 이를 슬립물성 또는 슬립계수라 하며 단위길이에 대한 응력( $N/mm^3$ )으로 나타낼 수 있다. 일반적으로 인터페이스 요소의 수직강성은 선형탄성으로, 접선강성은 비선형함수로 가정된다.

그림 3은 평행한 두 경계면이 전체좌표축과  $\phi$ 만큼 기울어져 있고 경계면의 절점들은 국소좌표계에서 각각  $\Delta_N$ 과  $\Delta_T$ 만큼 떨어져 있는 경계면의 기하학적 형상을 나타낸 것이다. 이때, 경계면의 상태는 수직방향 변위  $\Delta u_n$ 과 접선방향 변위  $\Delta u_t$  등의 경계면 거동상태에 따라 그림 4에 나타난 바와 같이 고정(fixed), 슬립(slip), 자유(free)의 3가지 상태로 나타낼 수 있다.

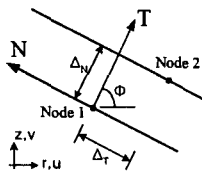


그림 3 경계면의 기하학적 형상

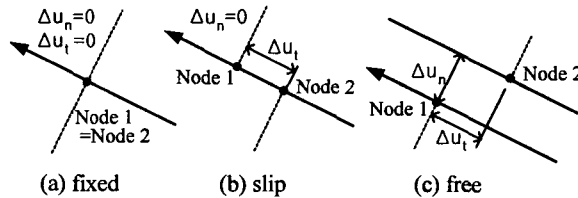


그림 4 경계면의 상태

### 2.2 경계면 지배방정식

경계면 알고리즘은 가상일의 원리로부터 유도되는 전형적인 Lagrangian multiplier 방정식을 이용하며, 이때 증가된 지배방정식과 경계면 구속조건은 각각 식 (2), (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} K & C^T \\ C & 0 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \Delta U_S \\ \Delta \lambda \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \Delta F \\ \Delta U_I \end{pmatrix} \quad (2)$$

$$[C] \{\Delta U_S\} = \{\Delta U_I\} \quad (3)$$

여기서,  $[K]$ 는 일반적인 유한요소체에 대한 강성행렬을 나타내는 것으로 구조체에 대한 강성행렬( $[K]_S$ )과 인터페이스 요소에 대한 강성행렬( $[K]_I$ )의 합( $[K] = [K]_S + [K]_I$ )으로 나타낼 수 있다.  $\Delta F$ 와  $\Delta \lambda$ 는 각각 구조체에 작용하는 외력과 경계면에 발생하는 수직방향과 접선방향 힘의 증가량을 나타낸다. 또한  $\Delta U_S$ 와  $\Delta U_I$ 는 각각 전체좌표계에

대한 구조체의 변위와 경계면의 국소좌표계에 대한 수직방향과 접선방향의 변위를 나타낸다. 이때, 구조체의 변위 ( $\Delta U_S$ )와 경계면의 변위( $\Delta U_I$ )는 경계면의 구속조건에 의해 추가적으로 구성되는 구속행렬 [C]에 의해 서로 연관 된다. 또한 경계면의 인터페이스 요소에 대한 구속방정식은 식 (2)의 증가된 지배방정식으로부터 분리되어 식 (4)와 같이 각 인터페이스 요소에 대한 전체좌표계 구속-강성행렬  $[K]_{int}$ 와 하중벡터  $\{\Delta F\}_{int}$ 로 재구성될 수 있다.

$$[K]_{int} = \begin{bmatrix} 0 & C^T \\ C & 0 \end{bmatrix} \quad \text{and} \quad \{\Delta F\}_{int} = \begin{pmatrix} 0 \\ \Delta U_I \end{pmatrix} \quad (4)$$

### 2.3 경계면 구속방정식

고정상태의 경우, 경계면에 위치한 각 절점사이의 수직방향과 접선방향의 상대변위를 구속하기 위한 두 개의 구속방정식이 필요하며 이것은 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} -\cos \phi & -\sin \phi & \cos \phi & \sin \phi \\ \sin \phi & -\cos \phi & -\sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix} \{\Delta U_S\} = \begin{pmatrix} \Delta u_n \\ \Delta u_t \end{pmatrix} \quad (5)$$

여기서,  $\{\Delta U_S\}$ 는  $\{\Delta u_1 \ \Delta v_1 \ \Delta u_2 \ \Delta v_2\}^T$ 으로 각각 절점 1, 2에서 전체좌표계에 대한 수직방향, 수평방향 변위를 나타내며,  $\Delta u_n$ 과  $\Delta u_t$ 는 각각 경계면에서의 국소좌표계에 대한 수직방향과 접선방향의 변위를 나타낸다. 이때 절점이 일치하는 고정상태의 경우에는  $\Delta u_n$ 과  $\Delta u_t$ 가 0이 되지만, 슬립이 발생하는 경우에는 더 이상 0이 아니다. 슬립상태의 경우, 각 절점의 수직방향 변위를 구속하는 한 개의 구속방정식과 접선방향에 작용하는 힘에 대한 설정이 필요하며 이것은 식 (6), (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$[-\cos \phi \ -\sin \phi \ \cos \phi \ \sin \phi] \{\Delta U_S\} = \{\Delta u_n\} \quad (6)$$

$$T = \Delta \lambda_T = \lambda_T - \mu \lambda_N \quad (7)$$

여기서, T는 Coulomb 마찰을 가정하였을 때 허용 슬립량을 초과하는 접선방향 힘을 나타내며,  $\mu$ 는 마찰계수를,  $\lambda_N$ 과  $\lambda_T$ 는 각각 절점에서 측정된 수직방향과 접선방향의 힘을 나타낸다. 자유상태의 경우에는 식 (8)과 같이 나타나는 수직방향과 접선방향에 작용하는 힘에 대한 설정이 필요하다.

$$N = \Delta \lambda_N = -\lambda_N \quad \text{and} \quad T = \Delta \lambda_T = -\lambda_T \quad (8)$$

### 2.4 경계면 상태와 슬립해석 흐름도

표 1은 경계면에 작용하는 힘과 각 경계면 상태와의 관계를 나타내는 경계면 상태 결정행렬이고, 표 2는 각 경계면 상태를 유지하기 위해 필요한 구속방정식 하중벡터의 한계값을 나타낸 것이다. 경계면이 고정상태에서 슬립상태로 전환되기 위해서는 경계면의 접선방향에 작용하는 힘  $\lambda_T$ 가 마찰력  $\mu \lambda_N$ 보다 커야 하며, 경계면에 인장의 수직응력이 작용할때 고정상태나 슬립상태가 자유상태로 전환하게 된다. 그러나, 슬립상태가 고정상태로 전환되는 경우는 존재하지 않고, 경계면에 한번 슬립이 발생하

표 1 경계면 상태에 대한 결정행렬

(i) \ (i+1)	고 정	슬 립	자 유
고 정	$\lambda_N < 0$ $\lambda_T < \mu \lambda_N$	$\lambda_N < 0$ $\lambda_T > \mu \lambda_N$	$\lambda_N > 0$
슬 립	-	$\lambda_N < 0$	$\lambda_N > 0$
자 유	$\lambda_N < 0$	-	$\lambda_N > 0$

표 2 경계면 상태에 대한 하중벡터의 한계값

(i) \ (i+1)	고 정	슬 립	자 유
고 정	$\lambda_N < 0$ $\lambda_T < \mu \lambda_N$	$\Delta u_n = 0$ $T = \mu \lambda_N - \lambda_T$	$N = -\lambda_N$ $T = -\lambda_T$
슬 립	-	$\Delta u_n = 0$ $T = \mu \lambda_N - \lambda_T$	$N = -\lambda_N$ $T = -\lambda_T$
자 유	$\lambda_N < 0$	-	$N = 0$ $T = 0$

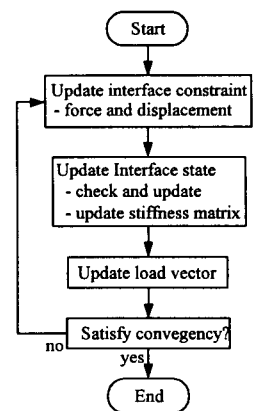


그림 5 슬립해석 흐름도

면 각 하중단계가 끝날 때까지 슬립상태를 유지하며 다음 하중단계에서는 고정상태로 재구성된다. 경계면에서의 슬립해석 흐름도는 그림 5에 나타난 바와 같다.

### 3. 슬립을 고려한 비선형 해석

#### 3.1 해석모델 및 물성

슬립물성이 복합구조체의 거동 및 성능에 미치는 영향을 분석하기 위해 휨 거동이 지배하는 두 종류(전단연결재의 유·무)의 샌드위치식 복합구조체(그림 6)와 전단거동이 지배하는 콘크리트 충전 각형 강관(그림 7)에 대해 슬립을 고려한 비선형 해석을 실시하였다. 콘크리트 충전 각형 강관은 샌드위치식 복합구조체의 셀(cell)구조와 구조형식이 비슷하여 유사한 슬립거동을 나타낼 것으로 판단되어 샌드위치식 복합구조체의 슬립물성에 따른 거동 특성과의 비교·분석 및 검증에 의해 도입하였으며, 콘크리트 충전 각형 강관에서의 해석결과를 바탕으로 샌드위치식 복합구조체에 대한 적합한 슬립물성의 결정과 슬립물성 및 전단연결재에 의한 합성효과가 거동과 성능에 미치는 영향을 분석하였다.

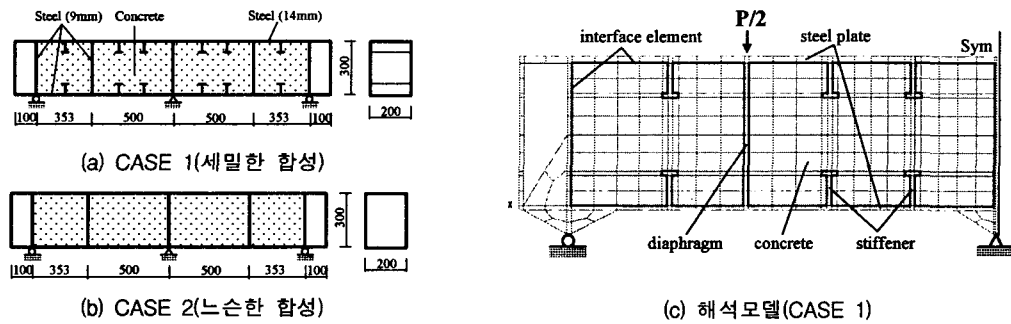


그림 6 샌드위치식 복합구조체

해석에 이용한 콘크리트의 최대 압축응력( $f_{ck}$ ), 인장응력( $f_t$ ) 및 탄성계수( $E_c$ )는 각각 32.6 MPa, 3.0 MPa 및 26.8 GPa이고, 강재의 항복응력( $f_y$ ), 인장응력( $f_u$ ) 및 탄성계수( $E_s$ )는 각각 281.5 MPa, 477.6 MPa 및 189.3 GPa이다. 이때 콘크리트의 인장부와 압축부는 각각 분산균열 모델과 Drucker-Prager 모델을 이용하였으며, 강재는 von-Mises 모델과 2개의 직선으로 이상화한 응력-변형률 관계를 적용하였다. 슬립물성은 강-콘크리트 경계면을 모사한 인터페이스 요소의 수직강성( $k_n$ )과 접선강성( $k_t$ )을 나타내며, 경계면에서의 콘크리트 강도와 강재의 형상 및 재료적 성질에 따라 다른 특성을 나타낸다. 그림 8에 나타난 바와 같이 일반적으로 인터페이스 요소의 수직강성은 선형-탄성이고, 접선강성은 비선형의 특성을 갖는다. 그러나 본 구조체에서는 경계면 접선방향의 상대변위가 셀 구조형식에 의해 구속되어 탄성한도 내에 있을 것으로 판단하여 접선강성도 수직강성과 동일하게 선형-탄성으로 가정하였다. 또한 슬립물성이 구조체의 거동과 성능에 미치는 영향을 규명하기 위해 인터페이스 요소의 수직강성은  $10^1 \sim 10^7$  MPa, 접선강성은  $10^{-3} \sim 10^5$  MPa로 각각 설정하여 각 슬립물성에 대한 슬립을 고려한 비선형 해석을 실시하였다.

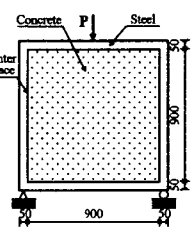


그림 7 각형 강관

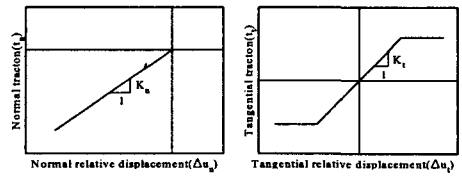


그림 8 인터페이스 요소의 물성

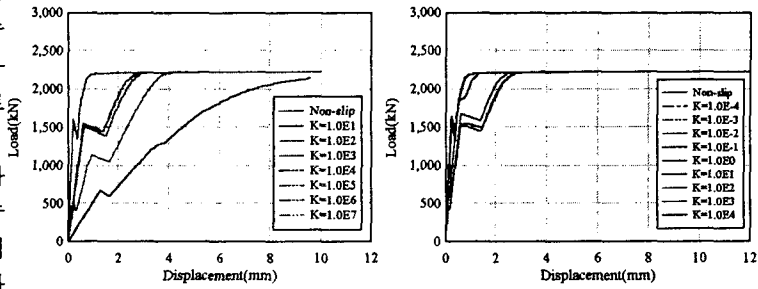
#### 3.2 슬립물성이 거동 및 성능에 미치는 영향

##### (1) 전단거동 - 콘크리트 충전 각형 강관

전단거동이 지배하는 콘크리트 충전 각형 강관에 대한 슬립을 고려한 비선형 해석 결과와 구조체의 거동에 대한

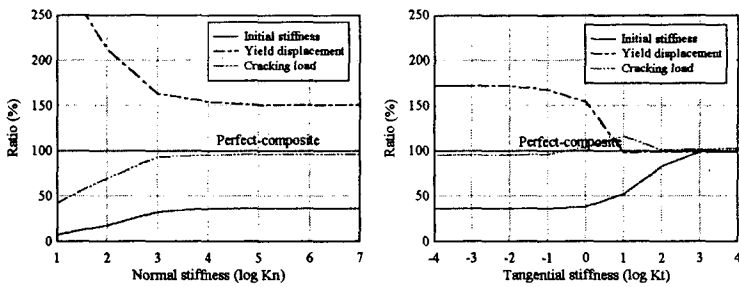
슬립물성의 민감도는 각각 그림 9, 10에 나타난 바와 같다. 이때, 슬립물성은 항복하중, 극한하중과 같은 구조체의 하중저항성능에는 영향을 미치지 않지만, 슬립에 따른 응력 재분배 효과로 인하여 구조체의 강성(하중-처짐 곡선의 기울기), 변위, 균열하중 및 국부적인 응력 수준에는 영향을 미치는 것으로 나타났다. 인터페이스 요소 수직강성의 경우,  $10^4$  MPa 이하에서는 수직강성의 증가에 따라 항복변위는 감소하고 구조체의 강성과 균열하중은 증가한다. 그러나  $10^4$  MPa 이상에서는 수직강성의 크기는 더 이상 구조체의 성능 뿐만 아니라 전체 거동과 국부적 응력 수준에 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다(그림 10(a)).

접선강성의 경우,  $10^{-1}$  MPa 이하와  $10^3$  MPa 이상에서는 구조체의 성능 뿐만 아니라 전체 거동, 국부적응력 수준에 영향을 미치지 않는다. 그러나  $10^{-1}$  MPa와  $10^3$  MPa 사이에서는 접선강성의 증가에 따라 항복변위는 급격히 감소하고 구조체의 강성은 증가하며 균열하중은 일정하게 유지되는 거동 특성을 나타내었다(그림 10(b)). 따라서, 인터페이스 요소의 수직강성은  $10^4$  MPa 이상이 바람직하며, 접선강성은  $10^{-1}$  MPa 이하에서는 완전슬립 거동을,  $10^{-1} \sim 10^3$  MPa에서는 부분합성 거동을,  $10^3$  MPa 이상에서는 완전합성 거동을 나타내는 것으로 판단된다.



(a) 수직강성 (b) 접선강성

그림 9 슬립물성에 따른 해석결과(전단거동)



(a) 수직강성 (b) 접선강성

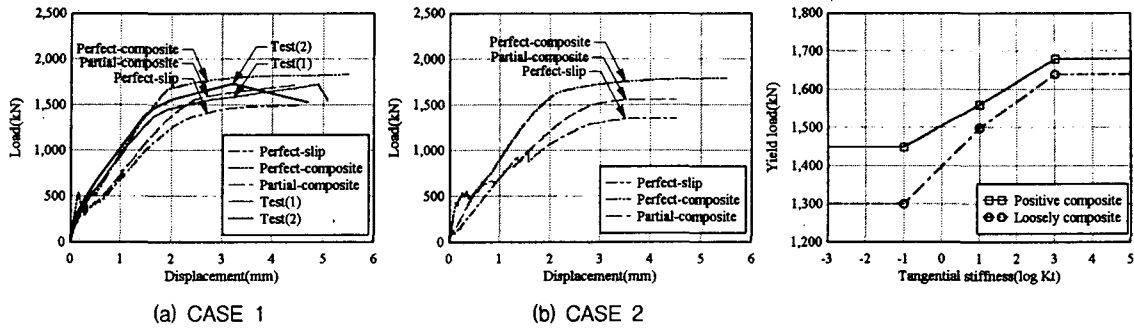
그림 10 슬립물성-거동의 민감도(전단거동)

(2) 휨거동 - 샌드위치식 복합구조체

휨거동이 지배하는 두 종류의 샌드위치식 복합구조체에 대한 실험결과와 슬립을 고려한 비선형 해석 결과 및 구조체 성능에 대한 슬립물성의 민감도는 각각 그림 11, 12에 나타난 바와 같다. 이때 슬립물성은 콘크리트 충전 각형 강관에서의 해석결과를 바탕으로 수직강성은  $10^4$  MPa로 고정시키고 접선강성만  $10^{-3} \sim 10^5$  MPa 변화시키며 비선형 해석을 수행하였다. 슬립물성에 따른 샌드위치식 복합구조체의 비선형 해석결과는 그림 11에 나타난 바와 같이 접선강성 ( $K_t$ )이  $10^{-1}$ ,  $10^1$ ,  $10^3$  MPa 일때의 항복하중은 세밀한 합성(CASE 1)의 경우 각각 1,450, 1,560, 1,680 kN이고 느슨한 합성(CASE 2)의 경우 각각 1,300, 1,500, 1,640 kN으로 나타났다. 이로써 하중저항성능은 완전합성, 부분합성, 완전슬립의 모든 경우에서 CASE1의 경우가 CASE2의 경우에 비해 각각 약 2.4, 4.0, 11.5% 높다는 것을 알 수 있다. 또한 접선강성이  $10^{-1}$  MPa 이하에서는 완전슬립 거동을,  $10^{-1} \sim 10^3$  MPa에서는 부분합성 거동을,  $10^3$  MPa 이상에서는 완전합성 거동을 나타내는 것으로 판단된다. 부분합성 거동의 경우 전단거동하에서는 슬립물성이 항복하중, 극한하중 등과 같은 구조체의 하중저항성능에는 영향을 미치지 않고 슬립에 따른 응력 재분배 효과로 인하여 구조체의 강성, 변위, 균열하중 및 국부적인 응력 수준 등에 영향을 미치지만, 휨거동하에서는 슬립물성이 구조체의 하중저항성능에 상당한 영향을 미치는 것으로 나타났다.

샌드위치식 복합구조체에 대한 실험결과는 인터페이스 요소의 수직강성과 접선강성으로 각각  $10^4$ ,  $10^1$  MPa를 적용한 부분합성 거동에 대한 해석결과에 가장 근접하며(그림11a), 항복하중에 대해 완전슬립과 완전부착 거동에 대한 해석결과와 비교하면 CASE 1의 경우 각각 -7.1, +7.7 %, CASE 2의 경우 각각 -13.3, +9.3 % 정도 과소평가

또는 과대평가의 결과를 나타내는 것으로 나타났다. 따라서 샌드위치식 복합구조체의 경우 보다 정확한 거동 예측을 위해서는 강-콘크리트 경계면의 슬립을 고려한 해석이 필요하며, 이 경우 인터페이스 요소의 수직강성은  $10^4$  MPa 이상이, 접선강성은 부분합성 거동을 나타내는  $10^1$  MPa 내외가 적합하며, 전단연결재의 설치에 따른 합성효과로 인하여 약 4.0% 내외의 성능향상 효과가 발생하는 것으로 판단된다.



(a) CASE 1 (b) CASE 2  
그림 11 슬립물성에 따른 해석결과(휨거동)

그림 12 슬립물성-성능의 민감도

#### 4. 결 론

본 논문은 의해 얻어진 결론은 다음과 같다. (1) 슬립물성은 슬립에 따른 응력 재분배 효과로 인하여 구조체의 강성, 변위, 균열하중 및 국부적인 응력 수준에 영향을 미친다. 휨거동의 경우에는 구조체의 하중저항 성능에도 상당한 영향을 미치지만 전단거동의 경우에는 그 영향이 미미하다. (2) 인터페이스 요소의 수직강성은  $10^4$  MPa 이상이 바람직하며, 접선강성은  $10^{-1}$  MPa 이하에서는 완전슬립 거동을,  $10^{-1} \sim 10^3$  MPa에서는 부분합성 거동을,  $10^3$  MPa 이상에서는 완전합성 거동을 나타낸다. (3) 정확한 거동을 예측하기 위해 강-콘크리트 경계면의 슬립을 고려한 해석이 필요하며, 샌드위치식 복합구조체의 접선강성은 부분합성 거동을 나타내는  $10^1$  MPa 내외가 적합한 것으로 판단된다. (4) 슬립의 발생량이 증가할수록 슬립에 따른 응력 재분배 효과로 인하여 세밀한 합성과 느슨한 합성의 하중저항성능 차이는 더욱 크게 발생하고, 전단연결재의 설치에 따른 합성효과로 인하여 약 4.0% 내외의 성능향상 효과가 발생하는 것으로 판단된다.

#### 참 고 문 헌

곽효경, 서영재(2000), "부분 강합성보의 슬립거동", 대한토목학회논문집, 제20권, 제6-A호, pp. 1017-1027  
 정연주(2000) "대형해양구조물에 샌드위치식 복합구조체의 적용", 대한토목학회지, 제48권, 제12호, pp.41-47  
 정연주, 정광희(2001), "샌드위치식 복합구조체의 거동 및 성능특성 연구", 대한토목학회논문집, 제21권, 제2-A호, pp.255-267  
 Hajjar, J.F., Schiller, P.H., Molodan, A.(1998), "A Distributed Plasticity Model for Concrete-filled Steel Tube Beam-columns with Interlayer Slip", Eng. Struct., Vol.20, No.8, pp.663-676  
 Link, R.A., Elwi, A.E.(1995) "Composite Concrete-Steel Plate Walls : Analysis and Behavior", J. of Struct. Eng., Vol.121, No.2, pp.260-271  
 Matsuishi, M., Hattori, Y., Iwata, S., Ishihama, T., Yamamoto, T., Kitazono, M.(1985) "Ultimate Strength of Composite Steel-Concrete Structures of Sandwich System", J. SNA., Japan, Vol.157, pp.233-240  
 Roberts, T.M., Dogan, O.(1998) "Fatigue of Welded Stud Shear Connectors in Steel-Concrete-Steel Sandwich Beams", J. Construct. Steel Res., Vol.45, No.3, pp.301-320  
 Zimmerman, T.(1993) "Development and Testing of a Composite Ice-Resisting Wall", thesis of Ph.D., Univ. of Alberta, Canada