

스터드 및 타이바를 가진 강판콘크리트 벽체의 표면강판 좌굴강도 평가

구지모¹ · 이경구^{2*} · 김원기³ · 이종보⁴

¹연구원, 한국전력기술, ²부교수, 단국대학교, 건축공학과, ³교수, 호서대학교, 건축공학과, ⁴선임연구원, 한국수력원자력, 중앙연구원

Evaluation of Buckling Strength of Surface Plates in Steel-Plate Concrete Walls with Studs and Tie-bars

Koo, Jimo¹, Lee, Kyungkoo^{2*}, Kim, Wonki³, Lee, JongBo⁴

¹Junior Engineer, KEPCO E&C, Gimcheon, Korea

²Associate Professor, Dept. of Achitectoral Engineering, Dankook University, Yongin, Korea

³Professor, Dept. of Architectural Engineering, Hoseo University, Asan, Korea

⁴Senior Researcher, KHNP Central Research Institute, Daejeon, Korea

Abstract - Buckling of surface plates is an important limit state in Steel-Plate Concrete (SC) walls under axial compression. The surface plates may be anchored to concrete using connectors of studs or tie-bars. In this paper, the effects of studs and tie-bars on buckling of surface plates were evaluated by conducting tests. Experiments have three types of connectors; all studs, all tie-bars, and the combination of studs and tie-bars. Also, experiments have the various ratios of stud or tie-bar spacing to surface plate thickness. The experimental investigation shows that the buckling shape and strength of the surface plate of SC wall with the combination of studs and tie-bars have good agreements with that of the surface plate of SC walls with all studs or all tie-bars.

Keywords - Buckling, Steel-Plate Concrete(SC) wall, Stud, Tie-bar, Slenderness ratio

1. 서론

강판콘크리트(Steel-Plate Concrete, 이하 SC)벽체는 콘크리트벽체 양면에 강판을 설치하고 강판 사이에 콘크리트를 타설하는 형식으로, 전단연결재(강재앵커)를 통해 강판과 콘크리트가 합성거동을 한다. SC벽체에서는 강판과 전단연결재가 콘크리트를 위한 거푸집 역할과 구조재로서의 역할을 동시에 수행한다^[1].

현재 국내 APR+ 원자력발전소 보조건물에 설계되고 있는 SC벽체에는 스테드를 전단연결재로 주로 사용하고 있다.

한편, 실제 설계에서는 제작 및 운송 등의 안정성을 위해 타이바가 설치되고 있다. 이에 SC벽체의 전단연결재로서 스테드와 타이바를 교대로 설치하는 안이 제시되고 있다. 그러나 기존 SC벽체의 표면강판좌굴강도에 대한 연구는 스테드만 설치한 경우에 제한되었다. 이에 타이바가 설치된 경우 기존 KEPIC-SNG^[2] 기준의 표면강판좌굴강도에 관한 사항을 검증할 필요가 있다^[3].

이 연구에서는 실험을 통해 스테드와 타이바를 달리 설치한 SC 벽체가 압축력을 받을 때 표면강판의 좌굴강도를 파악하고자 하였다. 이를 위해, 스테드와 타이바 혼용 설치여부 및 세장비(스테드/타이바 간격(B) 대 표면강판 두께비(t_p))를 달리하여 실험을 수행하였다. 스테드 및/또는 타이바의 설치가 좌굴 강도에 미치는 영향을 분석하였다.

Note.-Discussion open until December 31, 2016. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on April 30, 2015; revised March 15, 2016; approved on April 19, 2016.

Copyright © 2016 by Korean Society of Steel Construction

*Corresponding author.

Tel. +82-31-8005-3742 +82-31-8021-7225

E-mail. kklee@dankook.ac.kr

2. 실험 계획

2.1 실험체 개요

실험체는 전단연결재인 스투드 및/또는 타이바의 설치 형태에 따라 세 종류의 실험체로 분류하였다(Table 1).

각 종류별로 세장비(B/t_p)를 달리한 실험체들을 제작하였다. Table 2는 세장비에 따라 분류된 실험체를 보여준다. 세장비 $B/t_p = 1.5 \sqrt{E_s/F_{yp}} = 31.7$ 를 가진 실험체는 항복 전 좌굴 발생이 예상된 실험체이다. 세장비 $B/t_p = 1.0 \sqrt{E_s/F_{yp}} = 21.1$ 를 가진 실험체는 항복 전 좌굴 또는 항복 후 좌굴(좌굴 전 항복) 발생 여부를 관찰하기 위한 기본 실험체이다. 세장비 $B/t_p = 0.5 \sqrt{E_s/F_{yp}} = 10.5$ 를 가진 실험체는 좌굴 없이 항복(항복 후 좌굴)에 도달할 것으로 예상한 실험체이다. 또한, STA-1.0R 실험체는 타이바 면적을 달리하고 이형철근 대신 원형철근을 사용하여, 타이바의 강성 차이가 표면강판 좌굴에 미치는 영향을 파악하고자 한 실험체이다. 여기서, E_s 는 표면강판의 탄성계수를, F_{yp} 는 표면강판의 항복강도를 나타낸다.

Table 1. Classification specimens

Type	Connectors	Explanation
ST	Studs, Tie-bars	Studs and tie-bars arranged alternately
SS	Studs	Studs only
TT	Tie-bars	Tie-bars only

Table 2. Test variables of specimens

Specimens	B/t_p	spacing of stud/tie-bar (mm)	surface plate thickness (mm)	size (mm)		
				width	thickness	height
ST-1.5*	31.7	380	12	988	700	1520
SS-1.5	31.7	380	12	988	700	1520
TT-1.5	31.7	380	12	988	700	1520
ST-1.0	21.1	253	12	658	700	1012
STA-1.0R	21.1	253	12	658	700	1012
TT-1.0	21.1	253	12	658	700	1012
ST-0.5	10.5	126	12	328	700	504
SS-0.5	10.5	126	12	328	700	504

* ST - 1.5
 $(B/t_p) / \sqrt{E_s/F_{yp}}$
 Connector type in Table 1

실험체의 형상은 아래 Fig. 1과 같다. 실험체 벽체 두께는 700mm로 일치시켰고, 벽체 폭방향 길이와 벽체 높이는 각각 스투드/타이바 간격(B)의 2.6배와 4배로 설계하였다 (Table 2). 즉, 폭방향 길이는 스투드/타이바 3행간의 간격 $2B$ 와 표면강판 좌우끝단에서 스투드/타이바까지의 거리 $0.3B$ 를 합한 값이고, 높이는 스투드/타이바 4열간의 간격 $3B$ 와 강판 상하끝단에서 스투드/타이바까지의 거리 $0.5B$ 를 합한 값이다. 좌우끝단 및 상하끝단 거리는 이 위치에서 좌굴이 발생하지 않도록 작게 설계한 것이다. 또한, 이 실험의 목적인 표면강판좌굴강도를 측정하기 위하여, 표면 강판에만 압축력이 작용할 수 있도록 강판이 콘크리트보다 높이 방향 위아래로 20mm 길게 설계하였다. 즉, 실험체 가력용 상하강판과 벽체 표면강판이 용접되고, 상하 강판과 콘크리트와는 이격되게 하였다.

전단연결재로서 길이가 200mm인 $\phi 25$ 스투드를 사용하였고, D25 이형철근을 기본 타이바로 사용하였다. 타이바의 강성 효과를 알아보기 위한 STA-1.0R 실험체에는 $\phi 14$ 원형철근을 타이바로 사용하였다.

실험체의 표면강판과 상하강판은 HSB600 강재를 사용하였고, 타이바는 SD400W 강재, 스투드는 SS400 강재를 사용하였다. 강재의 시험(시험방법 KS B 0802: 2003) 결과는 아래 Table 3과 같다. 본 연구의 목적인 표면강판 좌굴강도 평가에 중요한 기준으로서, 항복강도 3개의 인장 시험 평균 값인 486.3MPa을 표면강판의 실험항복강도(σ_y)로 정의하였다. SD400W 타이바의 항복강도는 3개 시편의 시험 평균 값이 506.6MPa이었다. SS400 스투드의 경우, 공칭항복강도 235MPa로 시험평균 인장강도가 511.3MPa이었다. 표면강판좌굴 발생 시 스투드 및 타이바에 작용하는 축방향 응력은 공칭항복강도보다 매우 작으므로 실제 재료강도와 용접

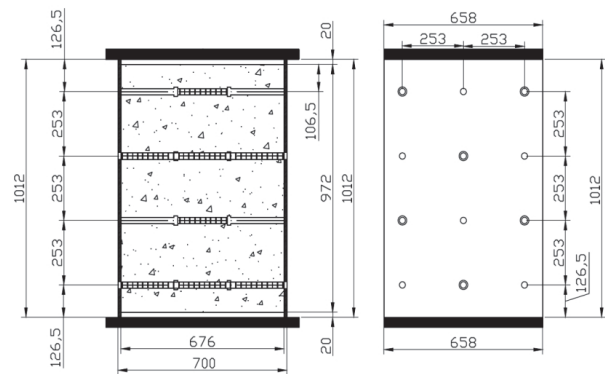


Fig. 1. The shape of specimen ST-1.0(Example)

Table 3. Steel material properties

Type		Yield stress, F_y (MPa)	Tensile stress (MPa)	elongation (%)
Plate	HSB600	481.3	648.8	35.8
		489.2	646.5	36.9
		488.3	649.1	34.7
	Average	486.3	648.1	35.8
Tie-bar	SD400W	499.6	584.5	29.1
		511.6	590.4	28.7
		508.5	589.1	28.8
	Average	506.6	588.0	28.9
Stud	SS400	-	511.3	-

Table 4. Concrete compressive strength and mixing ratio

Test compression strength (MPa)	W/C (%)	Slump (mm)	Unit quantity of aggregate (kg/m^3)			
			W	C	S	G
43	34	165	180	529	733	896

부 강도는 중요하지 않다. Table 4는 콘크리트 압축강도와 배합비를 나타낸다. 콘크리트의 28일 재령 후 압축강도는 평균 43MPa였다.

2.2 가력 및 측정방법

실험체 상부강판에 10,000kN UTM(Universal Test Machine)을 사용하여서 Fig. 2와 같이 단조 가력 하였다. 가력방법은 변위제어로 하였다. 실험체에 편심 발생을 최소화하기

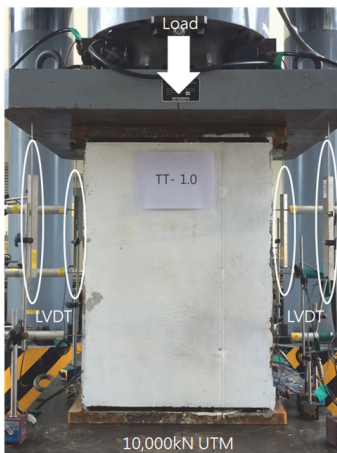


Fig. 2. Test set up

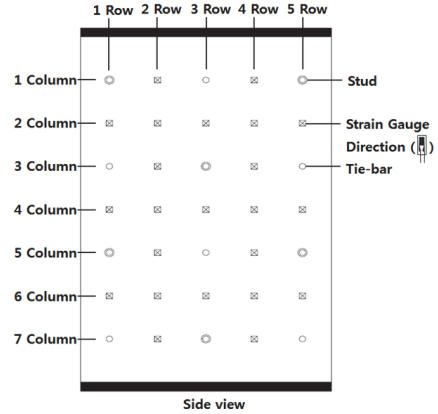


Fig. 3. Plate strain gauge set up

위하여 사전에 예상최대압축강도의 10% 정도 이하의 탄성 범위 내에서 예비가력을 실시하였다. 이 때 실험체에 편심이 발생하는 것을 체크하기 위하여 Fig. 2와 같이 상하강판 모서리에 LVDT(Linear Variable Differential Transformer)를 4개설치 하였고, LVDT의 변위차이가 1mm이상 발생하였을 때 보정 후 실제 실험을 수행하였다^[4].

표면강판의 변형률을 측정하기 위한 스트레인게이지를 표면강판 외면에 설치하였다. Fig. 3은 표면강판을 총 7행 5열로 구획한 것을 보여준다. 좌굴이 어느 위치에서 발생할 지 예상 할 수 없기 때문에 스티드/타이바가 위치한 지점을 제외하고 모든 행렬에 스트레인게이지를 설치하였다. 즉, 스티드/타이바가 위치한 홀수행의 경우 스티드/타이바 간격 사이에 2개를 설치하였고, 스티드/타이바 사이의 짝수행의 경우 5개를 설치하였다. 한쪽 표면 강판에 23개의 1축방향 스트레인 게이지가 설치되었고, 양쪽 표면 강판에 총 46개의 1축방향 스트레인 게이지가 설치되었다. 또한 게이지는 상하방향으로 설치되었다.

3. 실험결과 및 분석

3.1 표면강판좌굴 형상

모든 실험체에서 좌굴발생 시점까지 표면강판과 스티드 또는 타이바의 용접부에서 예상대로 파단이 발생하지 않았다. 표면강판의 좌굴에 따른 스티드/타이바에 작용하는 인장력이 항복강도보다 훨씬 작기 때문에 스티드/타이바 용접 성능 및 축력 저항성능에 따른 고정 정도에 크게 영향을 주지 않음을 확인하였다.

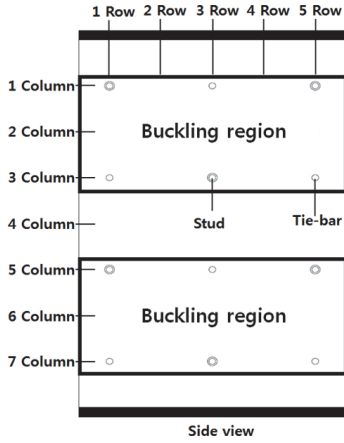
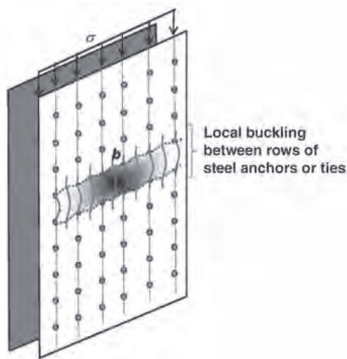


Fig. 4. Buckling regions



(a) typical shape^[6]



(b) Specimens 1.5



(c) Specimens 1.0

Fig. 5. Buckling shapes



(d) Specimens 0.5

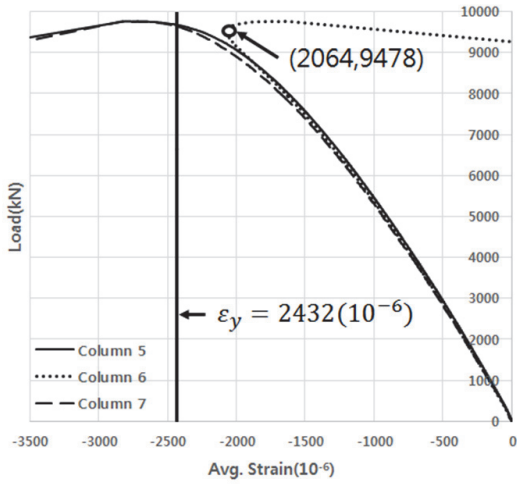
Fig. 5. Buckling shapes(Continued)

모든 실험체의 표면강판좌굴은 1-2-3행 영역 또는 5-6-7행 영역에서 발생하였다(Fig. 4). 실험체의 표면강판 좌굴 형상은 Fig. 5와 같다. 스테드/타이바 사이인 2행 또는 6행에서 모든 열이 동시에 면외방향으로 변형이 발생하였고, 1-3행 또는 5-7행의 스테드/타이바가 지지조건을 제공하였다. 이러한 좌굴형상은 양단 핀 지지조건 보다는 양단 고정단 지지조건인 압축재 휨좌굴형상과 유사하였다^[5].

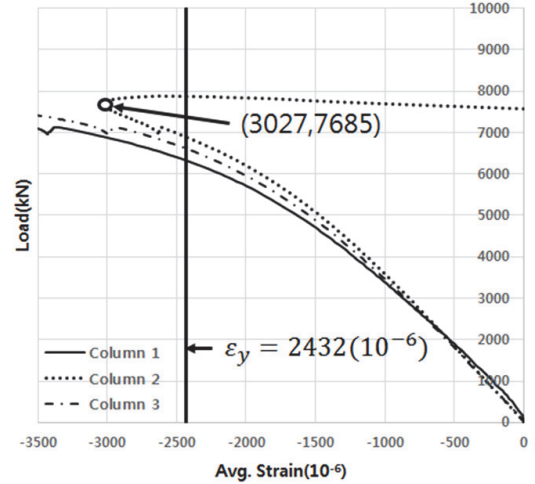
3.2 표면강판 변형률

표면강판의 1-2-3행 또는 5-6-7행 좌굴영역의 스트레인게이지 값들을 행별로 평균을 내어 평균변형률을 산정하였다. Fig. 6과 Fig. 7은 각각 정규화세장비($(B/t_p)/\sqrt{E_s/F_{yp}}$)가 1.5와 1.0인 실험체들의 좌굴영역 평균변형률과 실험압축하중과의 관계를 나타낸 것이다. Fig. 6과 Fig. 7을 보면, 압축하중이 증가함에 따라 좌굴영역 세 개의 행에서 유사하게 압축 변형률이 증가하다가 스테드/타이바 사이 중간행에서 갑자기 인장방향으로 변형률이 전환되는 것을 알 수 있다. 중간행 압축변형률이 인장변형률로 변화되는 시점이 표면강판이 좌굴되는 시점과 거의 일치하였다. 다만, 압축에서 인장으로 순간적으로 전환되어 이 중간 어느 시점에서 최대하중에 도달한 것으로 유추되므로, Fig. 6과 Fig. 7의 최대하중이 Fig. 8의 최대하중보다 작은 것으로 판단된다.

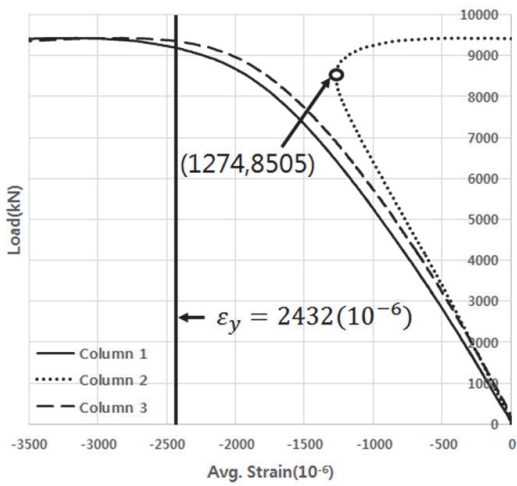
정규화 세장비가 1.5인 실험체 ST-1.5, SS-1.5 TT-1.5의 경우, 모두 좌굴발생 직전의 중간행 압축변형률이 항복변형률 2432×10^{-6} 에 크게 못 미치는 것을 알 수 있다. 즉, 표면강판이 탄성상태에서 좌굴한 것이다. 한편, 정규화 세장비가 1.0인 실험체의 경우, STA-1.0R과 TT-1.0은 좌굴발생 직전의 중간행 압축변형률이 항복변형률에 못 미쳤다. ST-1.0은 좌굴발생 직전에 중간행까지도 항복변형률을 초과하였다. 이는 좌굴발생 전에 항복하였다는 의미이지만, ST-1.0의 경우 중간행의 5개열의 변형률 편차가 크고 일부 열은 항복변형률에 미치지 못한 것으로 확인되었다.



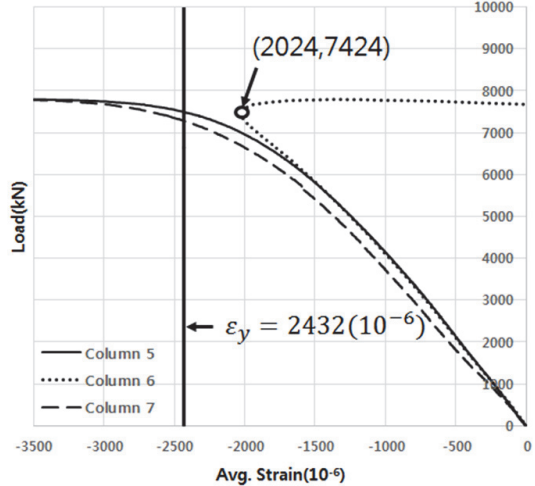
(a) ST-1.5



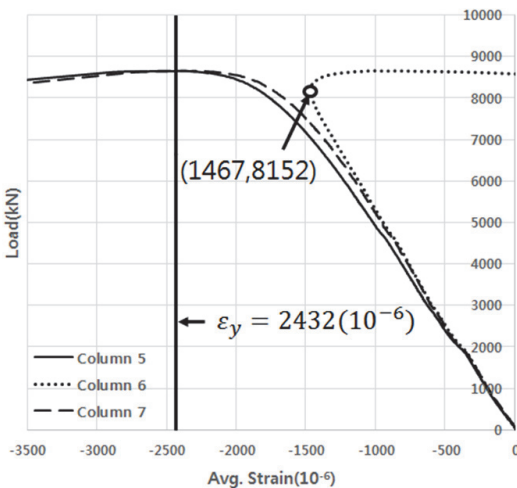
(a) ST-1.0



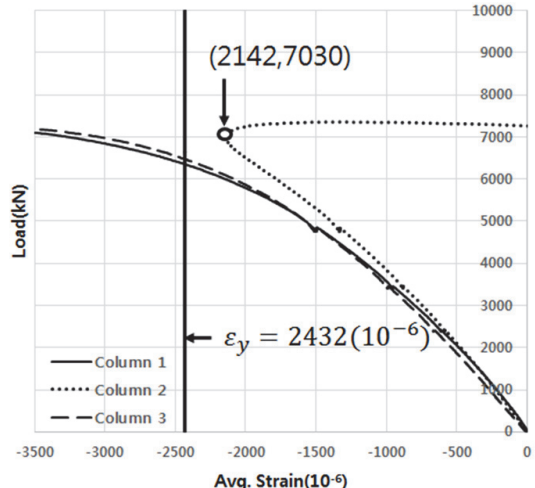
(b) SS-1.5



(b) STA-1.0R



(c) TT-1.5



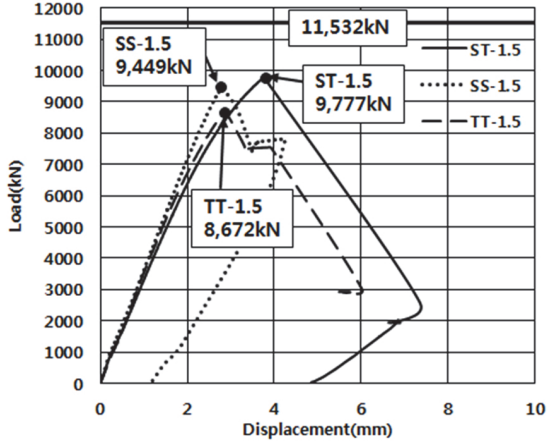
(c) TT-1.0

Fig. 6. Load and average strain curves for specimens with normalized slenderness of 1.5

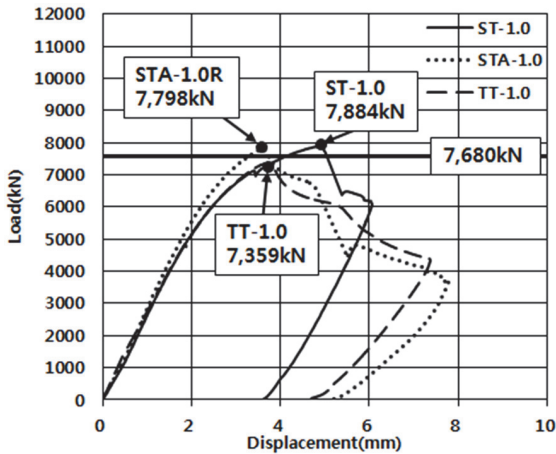
Fig. 7. Load and average strain curves for specimens with normalized slenderness of 1.0

3.3 실험 최대압축하중

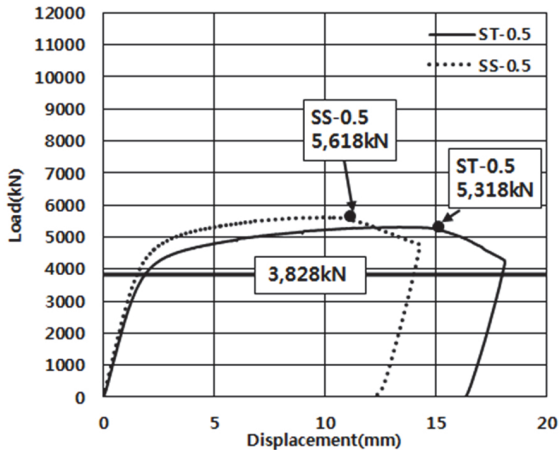
Fig. 8에 정규화 세장비별로 실험체 하중-변위 관계를 나타내었다. 검토 결과를 다음과 같이 요약할 수 있다.



(a) Normalized slenderness of 1.5



(b) Normalized slenderness of 1.0



(c) Normalized slenderness of 0.5

Fig. 8. Relationship between load and displacement

Fig. 8(a)의 ST-1.5, SS-1.5, TT-1.5의 경우, 실험 최대압축하중이 표면강판의 예상 항복강도 11,532kN 보다 작고, 좌굴발생 때까지 하중-변위의 강성이 거의 일직선을 보이므로 탄성좌굴이다. 각 실험체별 하중-변위의 강성은 가력하중 초기에는 거의 동일하고 하중이 커지면서 약간의 차이를 보인다. 가력하중은 표면강판의 저항력과 스투드/타이바 하부 콘크리트의 저항력의 합으로 힘의 평형을 이루며, 이 때 스투드/타이바 하부 콘크리트의 지압 저항 강성 차이가 하중-변위의 강성 차이의 원인으로 판단된다.

Fig. 8(b)의 ST-1.0, STA-1.0R, TT-1.0의 경우, 좌굴 발생에 따른 실험 최대압축하중이 모두 표면강판의 항복강도 7,680kN과 비슷한 값에서 형성되었다. 그러나 가력하중은 표면강판의 저항력과 스투드/타이바 하부 콘크리트의 저항력의 합으로 힘의 평형을 이루기 때문에, 실제 표면강판에 작용한 좌굴하중은 실험 최대압축하중보다 작다. 각 실험체별 하중-변위의 강성은 가력하중 초기에는 거의 동일하고 하중이 커지면서 차이를 보인다. 이러한 차이는 스투드/타이바 하부 콘크리트의 저항 강성 차이에 기인한 것으로 판단되며, 스투드/타이바 하부 콘크리트의 저항력 차이를 반영하여 실제 표면강판에 작용한 좌굴하중을 고려하여야 한다. 한편, STA-1.0R의 실험결과를 통해, 타이바의 강성이 표면강판 좌굴형상이나 좌굴강도에 미치는 효과는 미미한 것으로 판단된다.

Fig. 8(c)의 SS-0.5, ST-0.5의 경우, 실험 최대압축하중이 양쪽 표면강판의 예상항복강도 3,828kN을 크게 상회하고, 항복 후 변형도경화의 소성거동이 명확하게 나타났다.

3.4 표면강판좌굴강도 분석

실험하중에서부터 표면강판에만 작용한 하중을 유추하였다. Fig. 9는 실험체 중간높이에서 상부방향으로 스투드/타

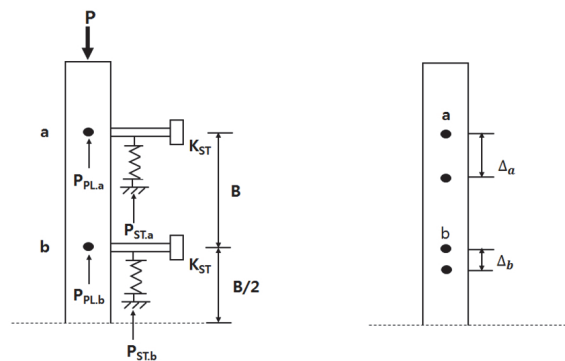


Fig. 9. Force and deformation free body diagram

이바가 위치한 a(1행)과 b(3행) 지점에서의 힘과 변형 자유 물체도를 나타낸 것이다.

a지점에서 실험 최대하중(P)은 표면강판에 작용하는 하중($P_{PL,a}$)과 스티드/타이바 하부 콘크리트에 작용하는 하중($P_{ST,a}$)으로 구성된다.

$$P = P_{PL,a} + P_{ST,a} \quad (1)$$

$$P_{PL,a} = K_{PL,a} \cdot \Delta_a = \frac{EA}{1.5B} \Delta_a \quad (2)$$

$$P_{ST,a} = K_{ST,a} \cdot \Delta_a \quad (3)$$

스티드/타이바 하부 콘크리트의 저항강성($K_{ST,a}$)은 기존 연구^[7] 전단실험결과와 강성값들을 사용하였다. 이 기존연구에서는 연결재별로(즉, ST, SS, TT) 두 개씩의 실험을 수행하고, 두 개의 평균으로 스티드/타이바 하부 콘크리트의 저항강성을 제시하였다. 이를 Table 5에 정리하였다.

식 (1)에서 P 에 실험 최대하중을 대입하여, 이에 상응하는 변위 Δ_a 를 산정하였다. 이를 식 (2)와 식 (3)에 대입하여 표면강판에 작용하는 하중($P_{PL,a}$)과 스티드/타이바 하부 콘크리트에 작용하는 하중($P_{ST,a}$)을 산정하였다. 이 값들을 Table 6에 정리하였다. 결과적으로, $P_{PL,a}$ 은 표면강판에 작용한 실험기반 최대강판하중이라 할 수 있다.

Table 5. Stiffness of concrete bearing resistance below studs/tie-bars

Connector type	stiffness of concrete bearing resistance below studs/tie-bars $K_{ST,a}$ (kN/mm)
ST	498
SS	582
TT	372

Table 6. Maximum load on surface plate based on test results

Specimens	Δ_a (mm)	$P_{PL,a}$ (kN)	$P_{ST,a}$ (kN)
ST-1.5	1.11	9225	552
SS-1.5	1.06	8831	618
TT-1.5	1.0	8301	371
ST-1.0	0.89	7439	445
STA-1.0R	0.88	7358	440
TT-1.0	0.85	7044	315

다음으로 표면강판좌굴강도의 이론값을 파악하였다. 표면강판이 항복하기 전에 좌굴이 발생하지 않는다면 강판의 최대강도는 항복강도로 간주할 수 있다. 실험체별 표면강판의 항복강도는 재료의 항복강도에 표면강판 2개의 단면적을 곱한 값이다. 재료항복강도에 표면강판 시편의 평균값 $\sigma_y = 486.3\text{MPa}$ 를 적용하였다.

표면강판 좌굴강도 이론값은 두 가지 이론식에 기반하였다. 첫째, 판좌굴이론(Plate Buckling Theory)으로 정의된 식 (4)의 판좌굴응력 σ_{cr} 에 표면강판 2개의 단면적을 곱하여 좌굴강도를 산정하였다. 판좌굴응력은 재료항복강도를 넘지 않도록 하였다.

$$\sigma_{cr} = \frac{\pi^2 E_s}{12K_p^2(1-\nu^2)(B/t_p)^2} \leq \sigma_y \quad (4)$$

여기서, $E_s = 200,000(\text{MPa})$, $\nu = 0.3$ 이다. JEAG 4618-2005^[8]에서 규정한 좌굴길이계수 $K_p = 0.7$ 경우를 Table 7에, 양단 고정단에 해당하는 좌굴길이계수 $K_p = 0.5$ 의 경우를 Table 8에 정리하였다.

둘째, LRFD^[9]에서 제시하는 압축재휨좌굴이론에서는 한계세장비를 정의하고, $K_p L/r$ 이 한계값 $4.71 \sqrt{E_s/F_{yp}}$ 이하인 경우 식 (5)의 비탄성좌굴응력식을 적용하고, $K_p L/r$ 이 한계값보다 큰 경우 탄성좌굴응력식을 적용한다.

$$\sigma_{cr} = 0.658^{\sigma_y/\sigma_e} \sigma_y \leq \sigma_y \text{ if } \frac{K_p L}{r} \leq 4.71 \sqrt{\frac{E_s}{F_{yp}}} \quad (5)$$

식 (5)에 적용되는 오일러좌굴응력은 다음 식 (6)과 같다.

$$\sigma_e = \frac{\pi^2 E_s}{\left(\frac{K_p L}{r}\right)^2} \quad (6)$$

식 (6)에 $L = B$, $r^2 = \frac{I}{A} = \frac{Bt_p^3/12}{Bt_p} = \frac{t_p^2}{12}$ 을 대입하면 식 (7)과 같이 정리할 수 있다.

$$\sigma_e = \frac{\pi^2 E_s}{12K_p^2(B/t_p)^2} \quad (7)$$

식 (5)의 조건을 확인한 결과, 모든 실험체는 비탄성좌굴 응력식을 적용하는 범위를 만족하였다. 따라서 식 (5)의 비탄성좌굴응력에 표면강판 2개의 단면적을 곱하여 좌굴강도를 산정하였다. $K_p = 0.7$ 의 경우를 Table 7에, $K_p = 0.5$ 의 경우를 Table 8에 정리하였다.

최종적으로 실험체별 표면강판의 항복강도, 표면강판의 좌굴강도 이론값 및 최대실험하중을 Table 7과 Table 8에 비교하였다. ST-1.5, SS-1.5, TT-1.5의 경우, 각각 최대실험하중 9,777kN, 9,449kN, 8,672kN은 표면강판 항복강도 11,531kN보다 작고, $K_p = 0.7$ 의 판좌굴강도 이론값 8,724kN과 $K_p = 0.5$ 의 압축재힘좌굴강도 이론값 8,456kN에 유사하였다. TT-1.0의 경우는 최대실험하중 7,359kN이 표면강판 항복강도 7,680kN에 약간 못 미치고, ST-1.0, STA-1.0R의 경우 최대실험하중 7,884kN, 7,798kN이 항복강도 7,680kN

를 약간 초과하였다. 세 경우 모두, $K_p = 0.5$ 의 압축재힘좌굴강도 이론값 6,693kN을 제외한 다른 이론값들과 최대 실험하중이 큰 차이를 보였다. ST-0.5, SS-0.5의 경우는 최대 실험하중 5,318kN, 5,618kN이 표면강판의 항복강도 3,818kN을 크게 초과하였다. 이 경우 설계를 위해서 항복강도를 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

Table 9과 Table 10에 좌굴이 명확하게 발생한 6개 실험체에 대하여 실험기반 최대강판하중을 좌굴강도 이론값과 비교하였다^[10]. ST-1.5, SS-1.5, TT-1.5의 경우, $K_p = 0.7$ 의 판좌굴강도 이론값과 $K_p = 0.5$ 의 압축재힘좌굴강도 이론값 둘 다 실험기반 최대강판하중과 1~9%의 오차로 매우 일치한다. ST-1.0, STA-1.0R, TT-1.0의 경우, 실험기반 최대강판하중은 항복강도에 약간 못 미치는 것으로 나타났고, $K_p = 0.5$ 의 압축재힘좌굴강도 이론값을 5~11% 오차로 약간 상회하는 것으로 나타났다.

Table 7. Comparisons of maximum load and strength($K_p=0.7$)

Specimens	Yield Strength (kN)	Theoretical Strength (kN)		Max. test load (kN)
		Plate buckling	Column buckling	
ST-1.5	11,531	8,724	6,278	9,777
SS-1.5				9,449
TT-1.5				8,672
ST-1.0	7,680	11,927	5,865	7,884
STA-1.0R				7,798
TT-1.0				7,359
ST-0.5				5,318
SS-0.5	3,828	23,970	3,581	5,618

Table 8. Comparisons of maximum load and strength($K_p=0.5$)

Specimens	Yield Strength (kN)	Theoretical Strength (kN)		Max. test load (kN)
		Plate buckling	Column buckling	
ST-1.5	11,531	15,559	8,456	9,777
SS-1.5				9,449
TT-1.5				8,672
ST-1.0	7,680	23,376	6,693	7,884
STA-1.0R				7,798
TT-1.0				7,359
ST-0.5				5,318
SS-0.5	3,828	46,980	3,700	5,618

Table 9. Comparisons of maximum load on surface plate and its strength($K_p=0.7$)

Specimens	Max. load on steel plates (kN)	Theoretical Strength(kN)			experiment /theory		
		Plate buckling	Column buckling		A/B	A/C	
							A
ST-1.5	9,225	8,724	6,278		1.01	1.47	
SS-1.5	8,831					1.06	1.41
TT-1.5	8,301					0.95	1.32
ST-1.0	7,439	11,927	5,865		0.62	1.27	
STA-1.0R	7,358					0.62	1.25
TT-1.0	7,044					0.59	1.20

Table 10. Comparisons of maximum load on surface plate and its strength($K_p=0.5$)

Specimens	Max. load on steel plates (kN)	Theoretical Strength(kN)			experiment /theory		
		Plate buckling	Column buckling		A/B	A/C	
							A
ST-1.5	9,225	15,559	8,456		0.59	1.09	
SS-1.5	8,831					0.57	1.04
TT-1.5	8,301					0.53	0.98
ST-1.0	7,439	23,376	6,693		0.32	1.11	
STA-1.0R	7,358					0.31	1.10
TT-1.0	7,044					0.30	1.05

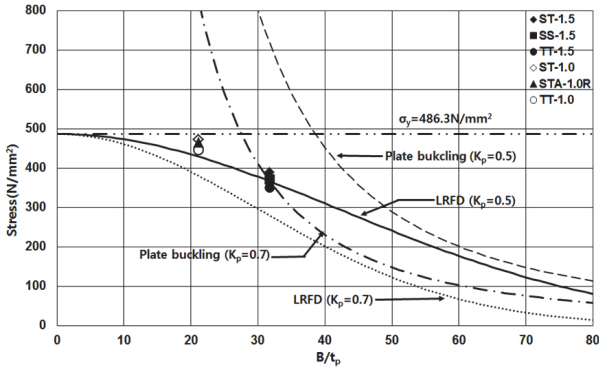


Fig. 10. Relations between plate stress and slenderness

Fig. 10에 실험기반 최대강판하중을 다양한 좌굴강도 이론식 곡선과 비교하였다. Fig. 10은 모든 실험체의 실험기반 최대강판하중이 LRFD에서 제시한 압축재협좌굴강도(기둥이론) 이론값과 유사함을 명확히 보여준다. 또한 ST-1.5, SS-1.5, TT-1.5의 경우에 $K_p = 0.7$ 의 판좌굴강도 이론곡선과 $K_p = 0.5$ 의 압축재협좌굴강도 이론곡선이 만나는 지점이라서 둘 다 실험기반 최대강판하중과 유사하였음을 알 수 있다.

4. 결론

실험을 통해 스티드와 타이바가 설치된 강판콘크리트벽체의 표면강판 좌굴강도를 평가하였다. 스티드와 타이바를 교대 설치가 표면강판의 좌굴강도에 미치는 영향을 파악하는 것이 실험의 목적이었다. 이를 위해 스티드/타이바 간격대 표면강판 두께 비(세장비)를 주요 변수로 채택하여 실험하였다. 실험결과는 다음과 같다.

- (1) 모든 실험체에서 스티드/타이바 사이의 표면강판에서 좌굴이 발생하였다. 좌굴형상은 양단 고정단 지지조건을 갖는 압축재의 협좌굴과 유사한 형상으로 관찰되었다.
- (2) ST-1.5, SS-1.5, TT-1.5의 경우, 모두 표면강판이 항복강도에 도달하기 전에 좌굴이 발생하였다.
- (3) ST-1.0, STA-1.0R, TT-1.0의 경우, 모두 표면강판의 항복강도와 유사한 하중에서 좌굴이 발생하였다. 그러나 소성거동없이 좌굴이 발생한 점을 고려하면, 항복강도를 공칭강도로 설계에서 사용하는데 주의하여야 한다.
- (4) SS-0.5, ST-0.5의 경우, 실험 최대하중이 항복강도를

크게 초과하고 소성거동을 보였다. 따라서 항복강도를 공칭강도로 설계에 적용할 수 있다.

- (5) 좌굴이 발생한 실험체의 경우, 스티드/타이바 하부 콘크리트에 작용하는 하중을 제외한, 표면강판에만 작용한 최대하중값이 좌굴길이계수를 0.5로 적용한 LRFD 압축재협좌굴강도 이론값(기둥이론)과 매우 유사하였다.
- (6) 실험을 통해, 스티드와 타이바 교대 배치에 따른 표면강판 좌굴형상의 차이나 좌굴강도 감소효과는 거의 없음을 확인하였다.

감사의 글

이 연구는 산업통상자원부의 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌(References)

- [1] 한국수력원자력주식회사(2003) 원자력구조물 복합모듈화 타당성 조사에 관한 연구, 한국수력원자력주식회사. Korea Hydro & Nuclear Power Co. Ltd. (2003) *A Feasibility Study on the Modularization of Structures for Nuclear Power Plants*, KHNP, Korea (in Korean).
- [2] 대한전기협회(2010) 전력산업기술기준, 원자력구조 - 강판콘크리트구조(KEPIC-SNG). Korea Electric Association (2010) *Korea Electric Power Industry Code, Nuclear Safety Related Structures - Steel-Plate Concrete Structures* (KEPIC-SNG), Korea (in Korean).
- [3] 최병정, 한홍수, 김원기, 이승준, 김우범(2008) 스티드 간격과 강판두께의 비를 변수로 한 비보강 강판-콘크리트 구조의 압축실험, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제20권, 제4호, pp.561-570. Choi, B.J., Han, H.S., Kim, W.K., Lee, S.J., and Kim, W.B. (2008) Compression Tests for Unstiffened Steel Plate-Concrete Structures with Variation of B/t Ratio, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.20, No.4, pp.561-570 (in Korean).
- [4] 최병정(2012) 개구부가 있는 강판콘크리트 벽체의 압축 특성 분석, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제24권, 제3호, pp.245-256. Choi, B.J. (2012) Analysis of Compression Characteristics of the Steel Plate-Concrete Wall Structures with Openings,

- Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.24, No.3, pp.245-256 (in Korean).
- [5] 한국강구조학회(2009) KBC 2009 강구조설계, 구미서관. KSSC (2009) *Design of Steel Structures (KBC 2009)*, Goomiseogwan, Korea (in Korean).
- [6] American Institute of Steel Construction (2015) *Specification for Safety-Related Steel Structures for Nuclear Facilities (ANSI/AISC N690s1-15)*, USA.
- [7] 김원기, 김우범, 최병정, 이경구(2014) APR+ 기술개발 기술보고서: 2차년도 성능평가 실험 및 결과분석 보고서, 호서대학교.
Kim, W.K., Kim, W.B., Choi, B.K., and Lee, K.K. (2014) *APR+ Development Technical Report: Second Year Experimental Results and Result Analysis Report*, Hoseo University, Korea (in Korean).
- [8] 日本電気協会(2005) 鋼板コンクリート構造耐震設計技術指針 建物構築物編(JEAG 4618-2005), 日本.
- Japan Electric Association (2005) *Technical Guidelines for Aseismic Design of Steel Plate Reinforced Concrete Structures: Buildings and Structures (JEAG 4618-2005)*, Japan (in Japanese).
- [9] American Institute of Steel Construction (2005) *Specification for Structural Steel Buildings (ANSI/AISC 360-05)*, USA.
- [10] 한홍수, 최병정, 한권규(2011) 폭두께비에 따른 강판콘크리트구조의 압축거동, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제23권, 제2호, pp.229-236.
Han, H.S., Choi, B.J., and Han, K.G. (2011) Compression Behavior of Steel Plate-Concrete Structures with the Width-to-Thickness Ratio, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.23. No.2. pp.229-236 (in Korean).

요 약 : 압축력을 받는 강판 콘크리트(SC) 벽체에서 표면강판의 좌굴은 중요한 한계상태이다. 표면강판은 스테드 또는 타이바 연결재를 통해 콘크리트에 정착된다. 이 논문에서는 실험을 통해 스테드와 타이바가 표면강판좌굴에 미치는 효과를 평가하였다. 실험체는 세 종류의 연결재를 대상으로 하였다; 모두 스테드인 경우, 모두 타이바인 경우, 스테드와 타이바가 교대 설치된 경우이다. 또한 스테드/타이바 간격 대 표면강판 두께비(세장비)를 달리하여 실험을 수행하였다. 실험결과, 스테드와 타이바가 조합된 SC벽체의 표면강판 좌굴형상 및 좌굴강도가 모두 스테드 또는 타이바가 설치된 SC벽체와 잘 일치하였다.

핵심용어 : 좌굴, 강판콘크리트 벽체, 스테드, 타이바, 세장비
