

샌드위치식 복합구조체에서 하중조건·거동특성에 따른 격벽간격비의 영향

Effect of Diaphragm Ratio by Load Condition and Behavior in Composite Structures of Sandwich System

정연주* 정광회** 김병석** 박성수*** 황일선****

Jeong, Youn-Ju Jung, Kwang-Hoe Kim, Byung-Suk Park, Seong-Su Hwang, Eyl-Seon

ABSTRACT

This paper presents the effect of diaphragm spacing ratio(depth to span) on behavior and capacity of composite steel-concrete structures of sandwich system. Numerical analysis has been performed variety diaphragm ratio, behavior and load condition. As a results of this study, in case of shear behavior and concentrated load, the capacity of structure such as yielding and ultimate load improve according to diaphragm ratio because of concrete confining effect by steel plate and stress redistribution by diaphragm. But in case of bending behavior or uniform load, it proved that diaphragm ratio don't influence on behavior and capacity of composite structures of sandwich system.

1. 서 론

샌드위치식 강-콘크리트 복합 구조체는 셀(cell) 구조형식에 따른 우수한 하중분배능력, 콘크리트 구속효과와 강재의 재료적 특성으로 인하여 높은 강성과 연성을 지니므로, 철근콘크리트 구조에 비해 붕괴될 때까지 흡수에너지가 큰 장점을 갖고 있다.³⁾ 또한 강판의 국부좌굴이 콘크리트에 의해 억제되기 때문에 상대적으로 얇은 강판의 사용이 가능하고, 해양환경에서는 콘크리트 침식문제가 방지되고, 시공측면에서는 철근콘크리트 구조물의 경우에 발생하는 배근 및 거푸집 철거 작업이 생략되고 강 구조물(steel-vessel)의 경우에 필요한 용접공정이 생략되어 공기단축에 유리한 장점을 갖고 있다. 그러나 아직 샌드위치식 강-콘크리트 복합 구조체의 거동 및 파괴 메카니즘에 대한 충분한 연구가 진행되지 않고 있으며, 국내에서는 관련 분야 연구가 전무한 실정이다. 샌드위치식 강-콘크리트 복합구조체에서 격벽(diaphragm)은 하중분배와 콘크리트 구속효과에 관련된 사항으로 전체적 거동에 중요한 역할을 담당한다. 본 구조체는 기본적으로 하중이 격벽과 내부 콘크리트를 통해 지지점과 하부강판으로 전달되는 거동 특성을 나타내지만, 격벽간격비(depth to span)에 따라 이 거동 특성은 변화할 수도 있다. 따라서 격벽간격비는 본 구조체의 하중전달 메카니즘, 하중분배능력과 이에 따른 내부 콘크리트와 하부강판의 응력 상태를 변화시켜 구조체의 성능에 영향을 미친다.^{5,6)} 본 연구에서는 샌드위치식 복합구조체의 기본적 거동특성, 하중전달 및 파괴 메카니즘을 바탕으로^{5,6)} 다양한 거동특성(휨거동, 전단거동)과 하중조건(집중하중, 등분포하중 등)하에서 격벽간격비가 본 구조체의 거동에 미치는 영향을 규명하고자 한다.

* 정회원, 한국건설기술연구원 토목연구부 연구원

** 정회원, 한국건설기술연구원 토목연구부 수석연구원

*** (주)삼성중공업 조선플랜트연구소 주임연구원

**** (주)삼성중공업 조선플랜트연구소 수석연구원

2. 샌드위치식 복합구조체의 기본 거동

2.1 샌드위치식 복합구조체의 구성

샌드위치식 복합구조체의 일반적인 구성은 상하강판과 이들을 연결하는 격벽, 여기에 충전되는 콘크리트 그리고 강판과 콘크리트의 합성작용을 담당하는 횡방향 보강재 또는 스티드로 구성된다(Fig. 1 참조). 본 구조체는 셸 구조에 따라 하중분배능력이 우수하다. 또한 상하강판과 격벽의 구속력에 의해 콘크리트는 상대적으로 높은 강성을 얻을 수 있고, 격벽은 콘크리트가 부담하는 하중의 일부분을 하부강판으로 전달하여 콘크리트의 하중 부담률을 줄여준다. 본 구조체의 항복 및 파괴상태는 하부강판에 의해 지배되지만, 기본거동 및 하중전달 메카니즘은 기존의 보와는 다소 다른 특성을 나타낸다.

2.2 하중전달 및 파괴 메카니즘

본 구조체에 작용하는 하중은 Fig. 2에 나타난 바와 같이 하중점과 지지점을 연결하는 대각선 방향으로 지지점에 전달된다. 따라서 이 방향에 위치한 콘크리트는 높은 응력상태를 나타내지만 이외의 부분에서는 상대적으로 낮은 응력상태를 나타낸다. 콘크리트는 초기 하중단계에서만 일부 부위에 인장응력이 발생하고, 이후 하중단계에서는 지속적으로 압축응력이 지배한다. 따라서 본 구조체에서 콘크리트는 압축력을 부담하는 스트럿(strut)의 역할을 담당한다.^{2,3,4)} 콘크리트를 통해 지지점으로 전달된 하중은 하부강판의 양단에서 인장력으로 작용하므로 하부강판은 지점별로 거의 동일한 축방향 인장응력을 나타내지만, 중앙 지지점에 근접한 지점에서는 휨거동도 발생한다. 따라서 본 구조체에서 하부강판은 초기 하중단계부터 지속적으로 인장응력을 부담하는 타이(tie)의 역할을 담당한다.^{2,3,4)} 최종적으로 본 구조체의 항복 및 파괴는 하부강판의 인장력에 의해 지배된다.

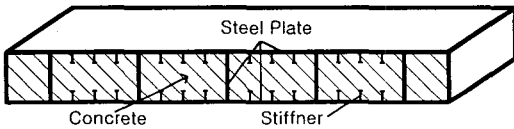


Fig. 1 Sandwich system

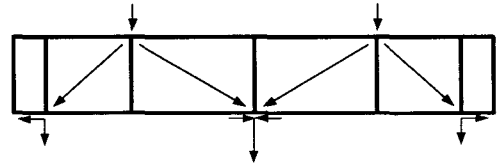


Fig. 2 Load carrying mechanism

2.3 탄·소성 거동특성

샌드위치식 복합구조체에 대한 실험 결과를 근거로 제시되고 있는 대표적인 하중-변위 관계는 Fig. 3과 같다. 낮은 하중 단계에서는 하중을 지지점으로 전달하기 위해 지지점 근처 콘크리트에 인장균열이 발생하고(E), 구조체의 항복은 지지점 근처 하부강판에서 시작된다(A). 항복 후 거동은 콘크리트 강도, 격벽간격 등의 요인에 의해 다소 변화하지만, 크게 콘크리트 압축파괴 전에 하부강판이 항복하는 경우(O-A-B)와 콘크리트 압축파괴가 먼저 발생하는(O-A-C) 2가지 경우로 나눌 수 있다.

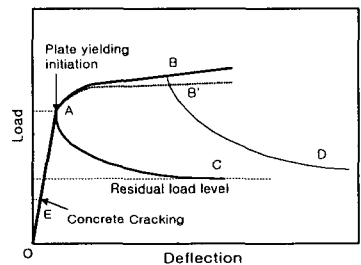


Fig. 3 Load-deflection curve

첫째, 콘크리트 압축파괴(crushing) 전에 하부강판이 항복하는 경우 작용하중은 극한강도에 근접하면서 안정화되고, 구조체에 충분한 변형이 발생하였을 때 콘크리트 압축파괴가 발생하면서 하중능력은 급격히 저하한다(B-D). 둘째, 하부강판의 항복 전에 콘크리트 압축파괴가 발생하는 경우 하중-변위 곡선의 경향이 다르게 나타나며, 작용하중은 강재의 항복 시작과 동시에 최대하중의 약 50% 수준인 잔류(residual) 하중 상태로 저하한다.

3. 해석 및 결과분석

3.1 모델링 및 기본물성

격벽간격비, 거동특성, 하중조건에 따른 샌드위치식 복합구조체의 거동특성 분석을 위해 Fig. 4에 나타난 것과 같은 모델에 대한 소성해석을 실시하였다. 대상구조체에 대한 모델링은 해석상의 편의를 위해 전체 구조체의 1/2 모델링(2D)을 실시하였으며, 이때 콘크리트, 강재 모두 8절점 사각형(CQ16M) plane stress 요소를 이용하였고 내부 횡방향 보강재는 T형으로 모델링하였다. 본 해석에서 이용한 콘크리트와 강재의 기본물성 및 응력-변형을 관계는 Table 1 및 Fig. 5에 나타난 바와 같다. 이때, 콘크리트 압축부의 소성모델은 smeared crushing 모델을, 콘크리트 인장부의 균열모델은 smeared cracking 모델(tension cut-off, tension softening, shear retention 현상 고려)을 적용하는 Drucker-Prager 모델을 이용하였다. 강재의 응력-변형을 관계는 변형을 경화현상을 bi-linear 형태로 이상화시킨 응력-변형을 관계를 이용하였으며, 소성모델로는 Von-Mises 모델을 이용하였다.

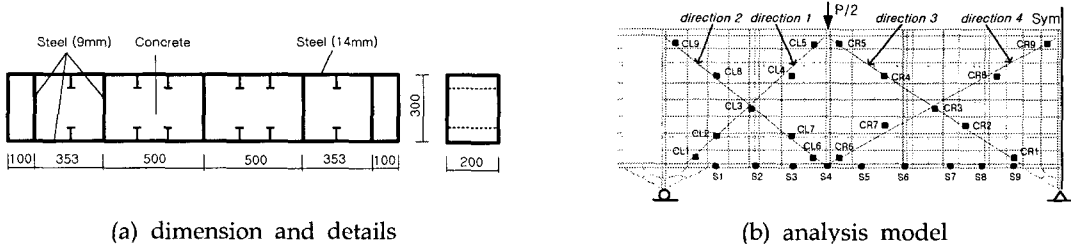


Fig. 4 Details and model

Table 1 Properties of materials(kg, cm)

Concrete		Steel	
		9(mm)	14(mm)
f_{ck}	332	f_y	2870
f_t	31	f_u	4870
E_c	1.37×10^5	E_s	1.93×10^6
			1.95×10^6

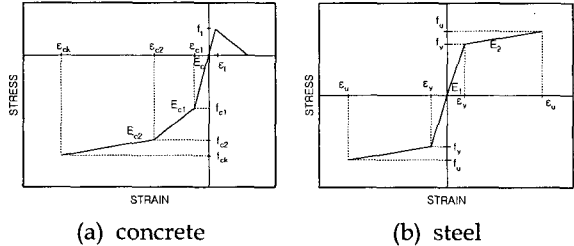


Fig. 5 Stress-strain relation

3.2 거동특성·하중조건 설정

(1) 격벽간격비

본 구조체는 기본적으로 하중이 격벽과 내부 콘크리트를 통해 지지점과 하부강판으로 전달되는 거동 특성을 나타내지만, 격벽간격비에 따라 이 거동 특성은 변화할 수도 있다. 따라서 격벽간격비는 하중전달 메카니즘과 내부 콘크리트, 하부강판의 응력 상태를 변화시켜 구조체의 성능에 영향을 미친다. 본 연구에서는 Fig. 6에 나타난 바와 같은 4가지 격벽간격비에 대해 거동특성과 하중조건에 따라 격벽간격비가 구조체 성능 및 거동에 미치는 영향을 비교·분석하였다.

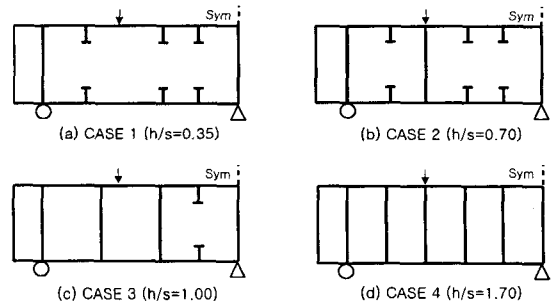


Fig. 6 Diaphragm ratio

(2) 거동특성

구조체는 경간길이가 짧을수록 전단거동을, 경간길이가 길수록 휨거동 특성을 나타낸다. 본 연구에서는 전단거동 해석모델(Fig. 7(a))에서 중앙경간 지지점을 생략하여 휨거동이 지배하도록

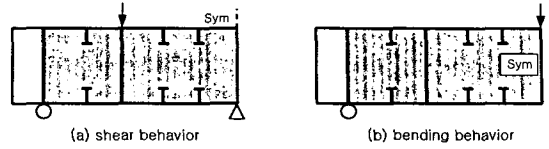


Fig. 7 Behavior condition

해석모델을 설정하였으며(Fig. 7(b)), 각 경우에 대해 격벽간격비가 구조체 성능 및 거동에 미치는 영향을 비교·분석하였다.

(3) 하중조건

본 구조체의 사용환경은 해양이고 실제 파랑, 수압, 충돌하중 등 다양한 형태의 하중조건에 노출되어 있으므로 이들 하중조건에 대한 검토가 필요하다. 본 연구에서는 Fig. 8에 나타난 일점 집중하중(LOAD 1), 전체등분포하중(LOAD 2), 부분등분포하중(LOAD 3), 다점집중하중(LOAD 4)의 4 가지 하중조건에 대해 격벽간격비가 구조체 성능 및 거동에 미치는 영향을 비교·분석하였다.

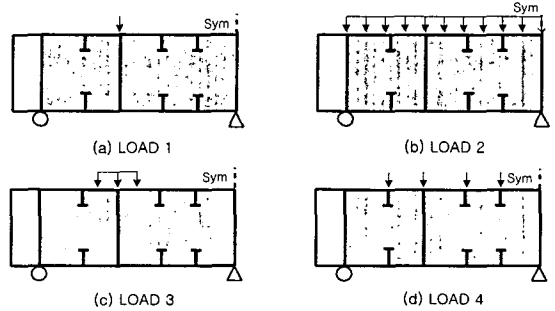


Fig. 8 Load condition

3.3 해석결과

(1) 거동특성에 따른 격벽간격비의 영향

지지점 경계조건에 따라 전단거동과 휨거동이 지배하는 경우의 소성해석 결과는 Fig. 9와 같다. 해석결과 전단거동이 지배하는 경우는 격벽간격비가 구조체의 성능 및 거동에 영향을 미치지 않지만(Fig. 9(a)), 휨거동이 지배하는 경우에는 격벽간격비가 거의 영향을 미치지 않음을 알 수 있다(Fig. 9(b)).

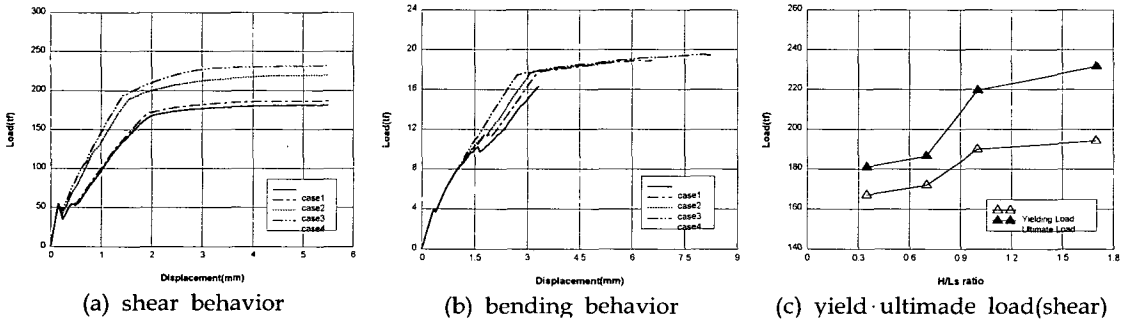


Fig. 9 Analysis results (1) - behavior condition

전단거동이 지배하는 경우 하중점과 지지점을 연결하는 제한된 범위내의 콘크리트에 높은 응력이 발생하며, 격벽간격비가 증가할수록 하중분배능력이 향상되고 콘크리트가 부담하던 하중의 일부를 격벽이 부담하므로(Fig. 10 참조) 상대적으로 콘크리트 응력이 감소하고(Fig. 11(a), Fig. 12(a) 참조), 강판의 콘크리트 구속효과에 따른 콘크리트 강성 증가현상으로 구조체의 전체적인 성능이 향상되는 것으로 판단된다. 이때, 하중의 흐름과 관계없는 격벽과 하중분배능력, 구속효과에 따른 콘크리트 강성 증가현상이 일정 격벽간격비 이상에서는 뚜렷한 효과를 나타내지 않기 때문에, 일정 범위내의 격벽간격비(h/s=0.7~1.0) 구조체의 성능에 많은 영향을 미치는 것으로 나타났다(Fig. 9(c) 참조).

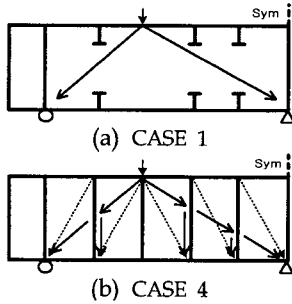


Fig. 10 Load carrying mechanism by diaphragm

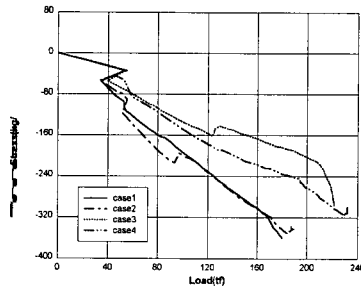
그러나 휨거동의 경우에는 폭넓은 범위의 콘크리트에 상대적으로 낮은 응력이 발생하기 때문에 하중분배 효과와 격벽을 통한 하부강판의 하중 부담률이 상대적으로 낮아져(Fig. 11(b), Fig. 12(b) 참조) 격벽간격비가 구조체 성능에 미치는 영향이 미미한 것으로 판단된다. 두 경우 모두 격벽간격비가 증가할수록 휨거동 특성을 나타내었다.

(2) 하중조건에 따른 격벽간격비의 영향

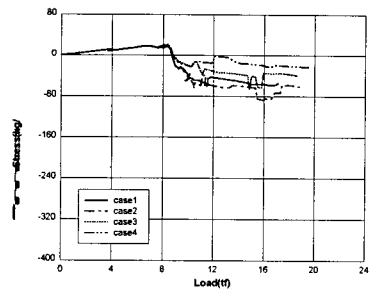
하중조건에 따른 소성해석 결과는 Fig. 13과 같다. Fig. 13(a)는 상부 강판 전체에 등분포하중이 재하된 경우(LOAD 2)로 격벽간격비가 증가하더라도 부재의 항복하중과 극한하중은 거의 변화가 없음을 알 수 있다. 즉 전체 등분포하중의 경우 격벽간격비는 구조체의 성능에 거의 영향을 미치지 않는다. Fig. 13(b)는 상부 강판 중앙에 부분 등분포하중이 재하된 경우(LOAD 3)로 Fig. 9(a)에 나타난 일점 집중하중의 경우와 유사하게 격벽간격비가 증가할수록 부재의 항복하중 및 극한하중이 증가하는 것을 알 수 있다. 이때 콘크리트에 인장균열이 발생하기 전까지의 초기 하중단계에서는 네 가지 경우 모두 동일한 거동을 나타내며, 이후의 하중단계부터 다른 거동을 나타냄을 알 수 있다. Fig. 13(c)는 상부 강판 4 지점에 다점 집중하중이 재하된 경우(LOAD 4)로 격벽간격비가 증가하더라도 전체 등분포하중(LOAD 2)의 경우와 유사하게 부재의 항복하중 및 극한하중은 거의 변화가 없음을 알 수 있다. 즉 다점 집중하중의 경우 격벽간격비는 구조체의 성능에 거의 영향을 미치지 않는다. 전체적으로 전체 등분포하중(LOAD 2)과 다점 집중하중(LOAD 4)의 경우 격벽간격비가 구조체의 성능에 미치는 영향이 미소한데, 이것은 일점 집중하중(LOAD 1)과 부분 등분포하중(LOAD 3)의 경우 제한된 범위 내의 콘크리트에 높은 응력이 발생하지만, 전체 등분포하중(LOAD 2)과 다점 집중하중(LOAD 4)의 경우 폭넓은 범위의 콘크리트에 상대적으로 낮은 응력이 균일하게 발생하므로 격벽간격에 따른 하중분배 효과와 격벽을 통한 하부강판의 하중 부담률도 상대적으로 낮아져 격벽간격비가 구조체의 성능에 미치는 영향이 미미한 것으로 판단된다(Fig. 14, Fig. 15 참조).

4. 결론

본 연구에서는 샌드위치식 복합구조체에 대해 거동특성 및 하중조건에 따른 격벽간격비의 영향을 분석하였으며, 본 연구에서 얻은 결론은 다음과 같다.

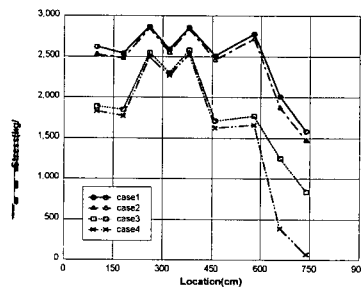


(a) shear behavior (CR3)

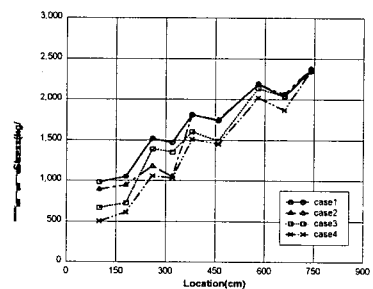


(b) bending behavior (CR3)

Fig. 11 Principal stress of Concrete



(a) shear behavior (170ton)



(b) bending behavior (15ton)

Fig. 12 Axial stress of bottom plate

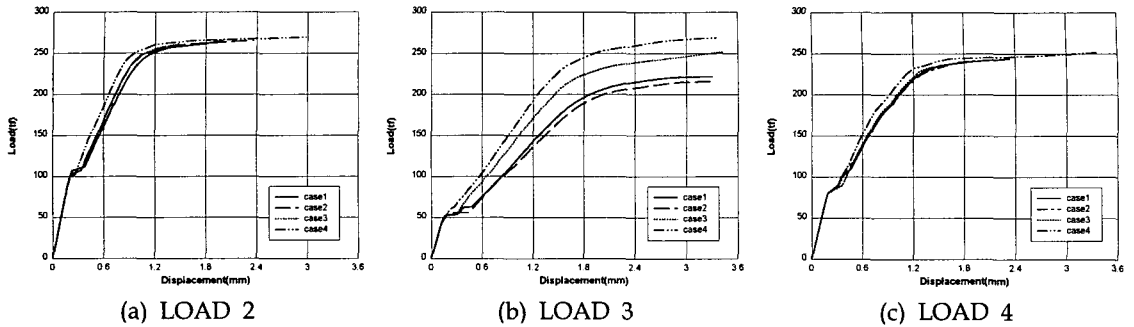
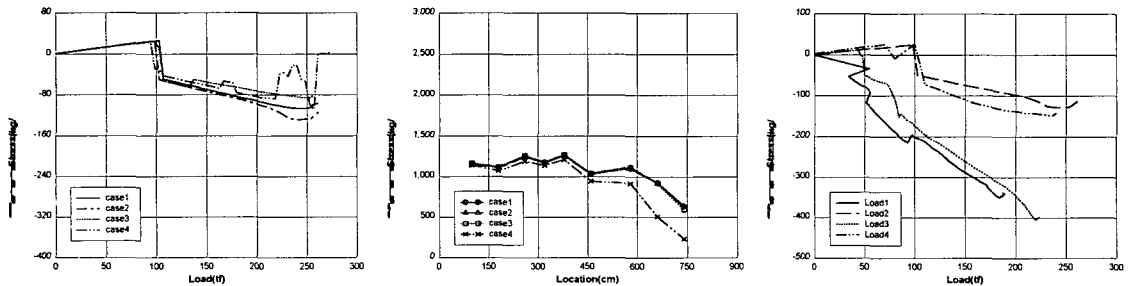


Fig. 13 Analysis results (2) - load condition



(a) principal stress of concrete(CR3) (b)axial stress of bottom plate(200ton)

Fig. 14 Stress of uniform load case (LOAD 2)

CASE 2, CR3

Fig. 15 Principal stress of concrete

(1) 전단거동의 경우 격벽간격비가 증가할수록 구조체 성능은 향상된다. 이것은 격벽간격비 증가에 따른 하중분배능력의 향상과 콘크리트가 부담하던 하중의 일부를 격벽이 부담하여 상대적으로 콘크리트의 응력이 감소하고, 강판의 구속에 따른 콘크리트 강성 증가현상 때문인 것으로 판단된다.

(2) 휨거동의 경우 격벽간격비가 구조체의 성능에 미치는 영향이 미미하다. 이것은 광범위한 범위의 콘크리트에 균일하게 상대적으로 낮은 응력이 발생하기 때문에 전단거동에 비해 하중분배능력의 향상과 격벽을 통한 하부강판의 하중 부담률이 상대적으로 낮기 때문인 것으로 판단된다.

(3) 일점 집중하중과 부분 등분포하중의 경우 전단거동의 경우와 동일하게 격벽간격비가 증가할수록 구조체의 성능이 향상되지만, 전체 등분포하중과 다점 집중하중의 경우 휨거동이 지배하는 경우와 동일하게 격벽간격비가 전체 구조체의 성능에 미치는 영향은 미미하다.

(4) 각 경우 모두 격벽간격비가 증가할수록 휨거동 특성을 나타낸다.

참 고 문 헌

1. Link, R.A., "Finite Element Analysis of Composite Ice Resisting Walls", thesis of Ph.D., Univ. of Alberta, 1992
2. Link, R.A., and Elwi, A.E., "Composite Concrete-Steel Plate Walls : Analysis and Behavior", Journal of Structural Engineering, VOL.121, NO.2, 1995, pp.260-271
3. Matsuishi, M., Hattori, Y., Iwata, S., Ishihama, T., Yamamoto, T., and Kitazono, M., "Ultimate Strength of Composite Steel-Concrete Structures of Sandwich System", Journal. of SNA. Japan, VOL.157, 1985, pp.233-240
4. Zimmerman, T., "Development and Testing of a Composite Ice-Resisting Wall", thesis of Ph.D., Univ. of Alberta, 1993
5. 정연주, 정광희, 이필승, 박성수, 황일선, "샌드위치식 강-콘크리트 복합구조체의 매개변수 및 거동 특성 연구", 한국전산구조공학회 학술발표회 논문집, 제13권 제2집(통권 제25호), 2000, pp.75-82
6. 정연주, 정광희, 김병석, 박성수, 황일선, "샌드위치식 복합구조체의 셀(Cell) 형상비가 거동과 성능에 미치는 영향", 한국해양공학회 추계학술대회 논문집, 2000, pp.73-78