한국전산구조공학회
2000년도 가을 학술발표회 논문집

샌드위치식 강·콘크리트 복합구조체의 매개변수 및 거동특성 연구

A Study on Parameter and Behavior for Composite Steel-Concrete Structure of Sandwich System

정 연 주* 정 광 회* 이 필 승** 박 성 수*** 황 일 선****
Jeong, Youn-Ju Jung, Kwang-Hoi Lee, Phil-Seong Park, Seong-Su Hwang, Il-Sun

ABSTRACT

A huge offshore structures such as immersed tunnel, ice-resisting wall are continuously subjected to large force from water pressure, wave action and impact loads. Composite steel-concrete structure of sandwich system has profitable advantages for a huge offshore structures. This composite structures should exhibit a high degree of strength and ductility, because of concrete confining effect and the property of steel plate. Therefore, it endures large deformation and absorbs a great deal of energy until failure. In this study, nonlinear analysis for composite steel-concrete structure of sandwich system was carried out, and certify the effects of various parameters, elastic·plastic behavior characteristic, load-carrying and failure mechanism.

1. 서 론

최근 국토의 경제적, 효율적 활용 측면에서 해양공간 개발 문제가 중요하게 대두되고 있다. 특히 21세기는 해저터널, 해저공간개발 등과 같이 고도의 기술력이 요구되는 초대형 해양구조물의 출현 가능성이 매우 높다. 따라서 해양구조물 분야의 발전 가능성(잠재력)은 매우 높으며, 이 분야에서 기술력을 바탕으로 대외 경쟁력 확보를 위해 해양구조물 분야에 대한 연구가 시급한 실정이다.

침매식 터널, 석유시추선 등과 같은 초대형 해양구조물은 수압, 파랑, 충격하중 및 해수(염해) 등의 사용환경에 지속적으로 노출되어 있고, 이러한 해양구조물을 극지방에 활용할 경우 매우 큰 온도하중, 빙하중 등도 작용한다. 따라서 해양구조물은 이러한 사용환경에 적합한 구조재료 및 구조형식이 필요하다. 샌드위치식 강-콘크리트 복합구조체는 이러한 환경의 해양구조물 적용에 상당히 유리한 장점을 지니고 있다. 샌드위치식 강-콘크리트 복합구조체는 셀(cell) 구조형식에 따른 콘크리트의 구속효과(confining effect)와 강재의 재료적 특성으로 인하여 높은 강성(strength)과 연성(ductility)을 지니므로, 수압, 파랑 등의 해양하중에 대해 효과적 지지가 가능하고, 철근콘크리트 구조에 비해 붕괴될 때까지 흡수에너지가 커 해양구조물에 적합한 구조형식으로 알려져 있다.[2,3] 또한 압축에 강한 콘크리트의 장점을 살리고 인장에 약한 콘크리트의 단점을 강판으로 보강하면서 강판의 국부좌굴(local buckling)이 콘크리트에 의해 억제되기 때문에 상대적으로 얇은 강판의 사용이 가능하고, 해양환경에서 콘크리트 침식 문제가 방지되는 장점을 갖고 있다.[2]

* 정회원, 한국건설기술연구원 토목연구부 연구원
** Univ. of MIT, Dept. of Civil Eng. 박사과정
*** (주)삼성중공업 해양플랜트 연구소 주임연구원
**** (주)삼성중공업 해양플랜트 연구소 수석연구원

시공측면에서도 이중강판 사이에 콘크리트를 충진하는 것이므로 철근콘크리트 구조물의 경우에 발생하는 배근 및 거푸집 철거 작업이 생략되어 공기단축에 유리고, 완전 강 구조물(steel vessel)의 경우와 비교해 용접공정이 축소되므로 경제적 측면에서도 유리한 장점을 갖고 있다.[3,4]

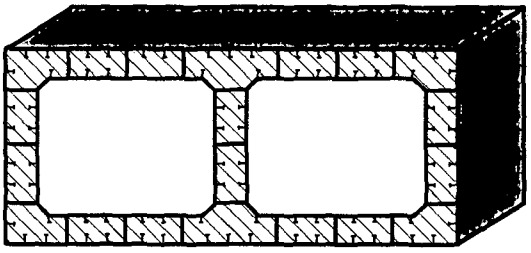
그러나 아직 샌드위치식 강-콘크리트 복합구조체의 거동 및 파괴 메카니즘에 대한 충분한 연구가 진행되지 않고 있으며, 국내에서는 관련 분야 연구가 전무한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 초대형 해양구조물에 적합한 샌드위치식 강-콘크리트 복합구조체의 거동에 영향을 미치는 다양한 매개변수들에 대한 소성해석을 통해 본 구조체의 기본적인 탄·소성 거동특성, 하중전달 및 파괴 메카니즘을 규명하고자 한다.

2. 샌드위치식 복합구조체의 소성해석

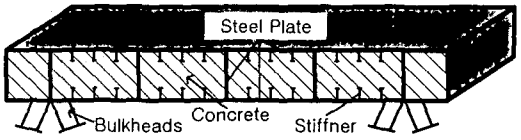
2.1 샌드위치식 복합구조체의 구성 및 특징

초대형 해양구조물에 샌드위치식 강-콘크리트 복합구조체의 적용은 일본의 (주)Hitachi Shipping and Engineering Company에 의해 북극해의 석유시추선에 처음 도입되었으며(1985)[3], 일본 운수성 산하 (재) 연안개발기술연구센타에서는 침매식 터널에 본 구조체를 적용하였다(Fig 1.(a), 1996)[5]. 또한 캐나다 CFER(Center for Frontier Engineering Research)에서는 1990년 해양구조물 생산을 위한 인공섬에 강재와 모래로 구성된 간단한 형태의 본 구조체를 적용하였으며[2], 연구와 실험을 거쳐 석유시추선의 ice-resisting wall에 본 구조체를 적용하였다(Fig 1.(b), 1992).[1,4]

이러한 샌드위치식 복합구조체의 일반적인 구성은 상하강판과 이들을 연결하는 격벽, 여기에 충진되는 콘크리트 그리고 강판과 콘크리트의 합성작용을 담당하는 횡방향 보강재 또는 스터드로 구성된다. 상하강판과 격벽의 구속력에 의해 콘크리트는 상대적으로 높은 강성을 얻을 수 있고, 격벽은 콘크리트가 부담하는 하중의 일부분을 하부강판으로 전달하여 콘크리트의 하중 부담률을 줄여준다. 따라서 본 구조체의 항복 및 파괴상태는 하부강판에 의해 지배되지만, 기본거동 및 하중전달 메카니즘은 기존의 보(beam)와는 상이한 거동을 나타낸다.



(a) Immersed Tunnel(Japan, 1996)



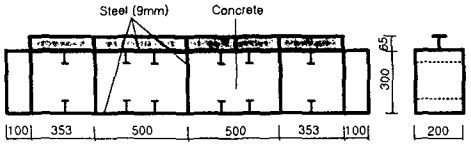
(b) Ice-resisting wall(Canada, 1992)

Fig 1. Sandwich system

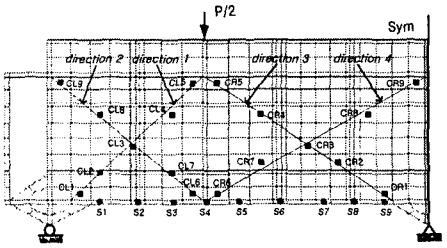
2.2 모델링 및 기본물성

(1) 모형 및 기본제원

샌드위치식 강-콘크리트 복합구조체의 소성해석과 거동특성 분석을 위해 Fig 2., 3.에 나타난 것과 같은 2가지 모델(MA, MB Type)[3]에 대한 소성해석을 실시하였다. MA Type은 구조체 상부강판에 종방향 보강재를 설치하였으며, MB Type은 MA Type의 종방향 보강재를 제거하는 대신 이의 강재 단면적을 계산하여 상부강판의 단면적을 보완하였다(9.0→14.0mm). 각 구조체에 대한 모델링은 해석상의 편의를 위해 전체 구조체의 1/2 모델링(2D)을 실시하였다. 이때 콘크리트, 강재 모두 8절점 사각형(CQ16M) plane stress 요소를 이용하였으며, 내부 횡방향 보강재는 T형으로 모델링하였다.

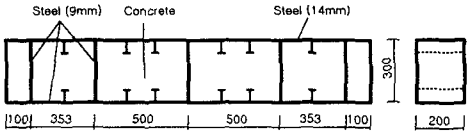


(a) dimension and details

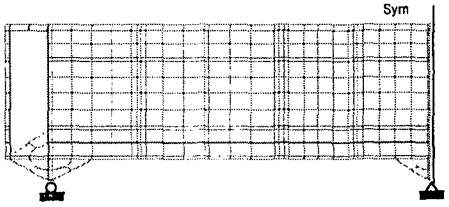


(b) analysis model

Fig 2. Details and model (MA Type)



(a) dimension and details



(b) analysis model

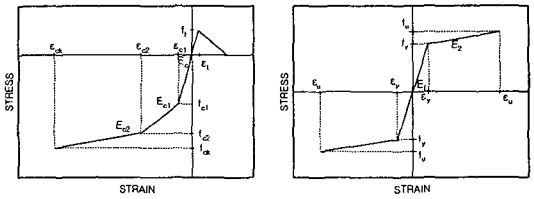
Fig 3. Details and model (MB Type)

(2) 기본물성 및 소성해석 모델

본 해석에서 이용한 콘크리트와 강재의 기본물성 및 응력-변형률 관계는 Table 1. 및 Fig 4.에 나타난 바와 같다.[3] 이때, 콘크리트 압축부의 소성모델은 smeared crushing 모델을, 콘크리트 인장부의 균열모델은 tension cut-off, tension softening, shear retention 현상을 고려하는 smeared cracking 모델을 적용하는 Druker-Prager 모델을 이용하였다. 강재의 응력-변형률 관계는 변형률 경화현상을 bi-linear 형태로 이상화시킨 응력-변형률 관계를 이용하였으며, 소성모델로는 Von-Mises 모델을 이용하였다.

Table 1. Properties of materials(kg, cm)

Concrete				Steel		
	CASE I	CASE II	CASE III		9(mm)	14(mm)
fck	456	332	402	fy	2870	2830
ft	29	31	27	fu	4870	4630
Ec	1.51 ×105	1.37 ×105	1.33 ×105	Es	1.93 ×106	1.95 ×106



(a) concrete (b) steel

Fig 4. Stress-strain relation

2.3 매개변수 설정

샌드위치식 강-콘크리트 복합구조체의 성능은 다양한 변수들에 의해 영향을 받는다. 따라서 이러한 변수들이 구조체 성능에 미치는 영향을 분석하기 위해 Table 2.에 나타난 바와 같이 매개변수를 설정하였으며, 이들 변수들은 구조체의 성능에 다음과 같은 영향을 미친다고 알려져 있다.

(1) 콘크리트 강도

본 구조체는 강판과 내부 콘크리트로 구성되며, 내부 콘크리트는 시공중이나 사용중 여러 요인들에 의해 손상을 받기 쉽다. 그러나 본 구조체는 상하부강판과 격벽에 의해 내부 콘크리트가 구속되므로 강성증가 효과가 발생하고, 기존 철근콘크리트 구조체와는 달리 내부 콘크리트의 강도가 전체 구조체의 성능에 미치는 영향이

미미한 것으로 알려져 있다.[3)]

(2) 횡방향 보강재

본 구조체의 횡방향 보강재는 강-콘크리트 합성효과에 관련된 사항이다. 본 구조체의 강-콘크리트 합성방법은 Fig 5.에 나타난 바와 같이 크게 느슨한 합성(loosly composite), 세밀한 합성(positive composite) 두 가지로 분류할 수 있다. 느슨한 합성은 강판과 콘크리트 경계면에 횡방향 보강재와 전단 스터드를 고려하지 않는다. 따라서 휨 하중하에서 강-콘크리트 경계면의 인장부에서는 미끄러짐(slip) 현상과, 이에 따라 응력 재분배 현상이 발생한다. 세밀한 합성은 강판과 콘크리트 경계면에 횡방향 보강재와 전단 스터드를 고려하고, 이에 따라 강-콘크리트 경계면에서는 미끄러짐 현상이 거의 발생하지 않는다. 따라서 세밀한 합성은강-콘크리트 경계면에서 응력 재분배 현상이 거의 발생하지 않아 합성에 따른 효과를 얻을 수 있는 장점이 있지만, 횡방향 보강재와 스터드 설치에 따라 시공이 복잡한 단점이 있다.[1,2)]

Table 2. parameters of this study

Parameter / CASE	concrete (fck)	stiffner	diaphragm ratio(H/Ls)
CASE 1	456(N=0)	yes	0.35
CASE 2	332(N=20)	no	0.70
CASE 3	402(N=40)	-	1.00
CASE 4	-	-	1.70
fck	parameter	332	332
stiffner	yes	parameter	yes
H/Ls	0.70	0.70	parameter

(3) 격벽간격

본 구조체는 기본적으로 하중이 격벽과 내부 콘크리트를 통해 지지점과 하부강판으로 전달되는 전단거동 특성을 나타내지만, 격벽 간격에 따라 이 거동 특성은 변화할 수도 있다. 따라서 격벽간격은 내부 콘크리트 및 하부강판의 응력 상태와 구조체의 하중 전달 메카니즘을 변화시켜 구조체의 성능에 영향을 미친다.[2,3,4)]

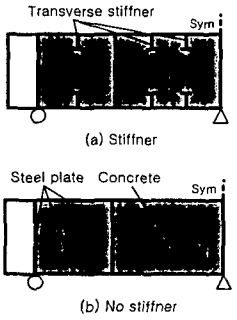


Fig 5. Transverse stiffner

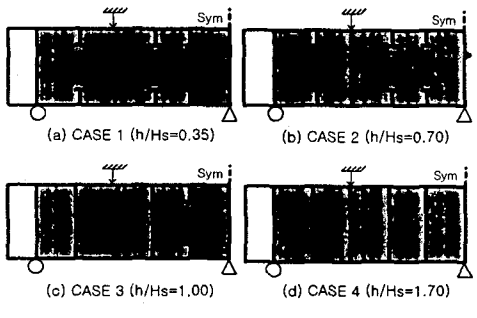


Fig 6. Diaphragm ratio

본 연구에서는 Fig 6.에 나타난 바와 같은 4 가지 격벽간격비에 대한 구조체의 성능을 비교·분석하였다.

3. 해석결과 및 거동특성

3.1 매개변수 해석결과

(1) 콘크리트 강도

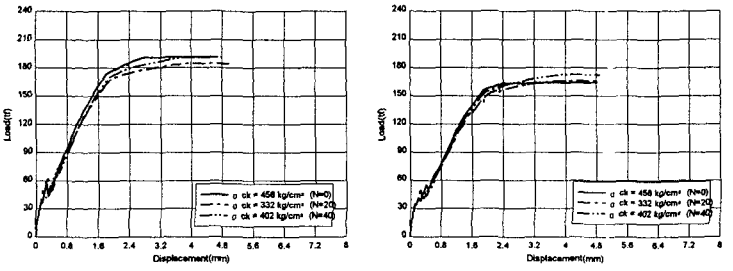
콘크리트 강도에 대한 해석결과는 Fig 7.에 나타난 바와 같다. 이때, 콘크리트 강도 변화는 압축강도는 12~18%, 인장강도는 43~48%, 탄성계수는 9~12%를 저하시켰다. 콘크리트 강도 변화에 대한 해석결과, 저하된 콘크리트 강도에 따른 항복하중과 극한하중의 영향은 MA Type의 경우 각각 약 2.9%(167~172 Ton), 3.7%(184~191 Ton)이고, MB Type의 경우 각각 약 2.6%(151~155 Ton), 4.9%(164~172 Ton)로 나타나 콘크리트 강도 변화

가 구조물 성능에 미치는 영향은 미미한 것으로 나타났다.[3)]

(2) 횡방향 보강재(transverse stiffner)

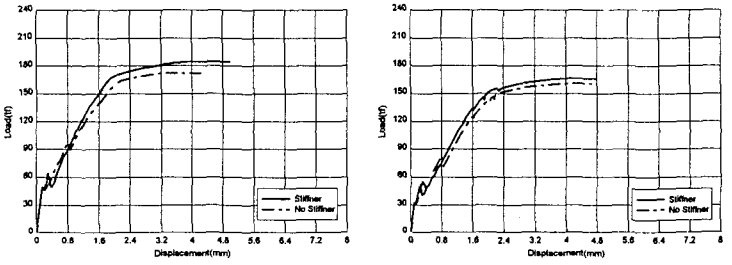
횡방향 보강재 유무에 대한 해석결과는 Fig 8.에 나타난 바와 같다. 횡방향 보강재 유무에 대한 해석결과, 횡방향 보강재에 따른 항복하중과 극한하중의 영향은 MA Type의 경우 각각 약 3.1%(162, 167 Ton), 7.0%(172, 184 Ton)이고, MB Type의 경우 각각 약 2.7%(147, 151 Ton), 3.8%(160, 166 Ton)로 나타나 횡방향 보강재 유무가 구조물 성능에 미치는 영향은 미미한 것으로 나타났다.

그러나 횡방향 보강재를 설치한 경우는 강-콘크리트 경계면에서의 미끄러짐(slip) 현상이 거의 발생하지 않지만, 설치하지 않은 경우는 미끄러짐 현상이 보다 명백하게 발생하고 이것은 강-콘크리트 경계면에서의 응력 재분배 효과를 나타내어 구조물 거동은 다소 변화할 것으로 판단된다. 따라서 횡방향 보강재 유무에 대한 영향은 향후 이러한 사항을 종합적으로 분석하여야 보다 정확한 평가가 가능할 것으로 판단된다.



(a) MA Type (b) MB Type

Fig 7. Analysis results (1) - concrete strength(fck)

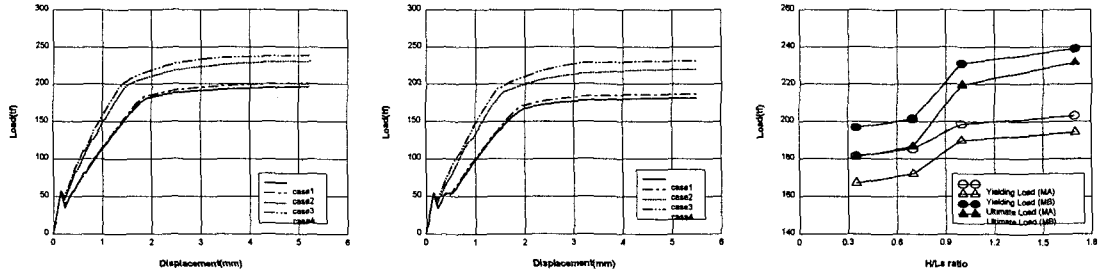


(a) MA Type (b) MB Type

Fig 8. Analysis results (2) - transverse stiffner

(3) 격벽간격비(diaphragm ratio)

격벽간격비에 따른 해석결과는 Fig 9.에 나타난 바와 같다. MA Type, MB Type 모두 격벽간격비가 증가할수록 항복 및 극한강도가 증가하는 특성을 나타내고 있다. 이것은 격벽간격비가 증가할수록 콘크리트가 부담하던 하중의 일부를 격벽이 부담하여 상대적으로 콘크리트의 응력이 감소하고, 강판의 콘크리트 구속효과(confining effect)에 따른 콘크리트 강성 증가현상으로 구조체의 전체적인 성능이 향상되는 것으로 판단된다.



(a) MA Type (b) MB Type (c) yield·ultimate loads

Fig 9. Analysis results (3) - diaphragm ratio

하중은 격벽간격비에 관계없이 재하점과 지지점을 연결하는 방향으로 지지점에 전달된다. 따라서 콘크리트

의 주응력 방향은 격벽간격비에 관계없이 거의 일정하지만 주응력의 크기는 격벽간격비에 따라 변화한다. 이것은 콘크리트가 부담하던 하중의 일부를 격벽이 부담하여 하부강판으로 전달시키기 때문이다. 따라서 격벽간격비가 증가할수록 콘크리트의 주응력 크기는 감소하고 하부강판은 휨거동 특성을 나타내게 된다. 그러나 하중전달 방향과 관계없는 격벽은 하중을 거의 전달하지 않으므로 구조체의 성능에 미치는 영향이 미미하고(CASE 1, CASE 2의 경우)[2,3], 콘크리트 구속효과에 따른 전단강도 증가현상은 일정 격벽간격비 이상에서는 뚜렷한 효과를 나타내지 않는 것으로 판단된다(CASE 3, CASE 4의 경우).

3.2 기본거동특성

(1) 하중전달 및 파괴 메카니즘

본 구조체의 하중은 Fig 10.에 나타난 바와 같이 하중 작용점과 지지점을 연결하는 대각선 방향으로 지지점에 전달된다. 따라서 이 방향에 위치한 콘크리트는 높은 응력상태를 나타내지만 이외의 부분에서는 상대적으로 낮은 응력상태를 나타낸다(Fig 11. 참조).

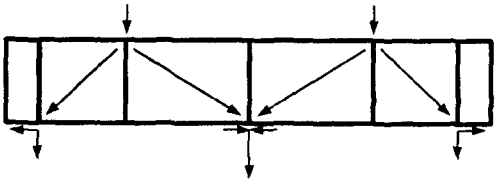
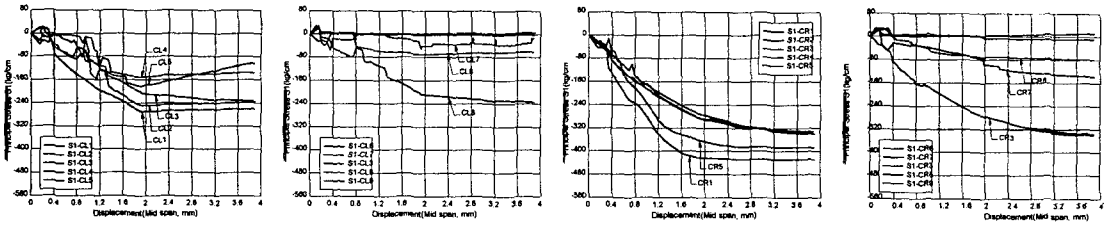


Fig 9. Load carrying mechanism



(a) direction 1 (b) direction 2 (c) direction 3 (d) direction 4

Fig 11. Principal stress of concrete (MA Type)

콘크리트는 초기하중단계에서만 일부 부위에 인장응력이 발생하고, 이후의 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 강판을 잡아당기는 인장력으로 작용하고, 이 하중이 하부강판에 작용하는 하중의 대부분이므로 지점별로 거의 동일한 축방향 인장응력이 발생한다(Fig 12. 참조). 그러나 중앙경간의 지지점에 근접한 일부지점에서는 휨거동이 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.

(2) Type별 특성

종방향 보강재를 부착한 MA Type과 이것을 상부 강재 단면적으로 보완한 MB Type과의 비교에서는, 항복하중과 극한하중 측면에서 MA Type이 각각 11.0%(172, 155 ton), 16.5%(191, 164 ton) 정도 높은 성능을 나타내는 것으로 나타났다(Fig 13. 참조).[3]

(3) 탄·소성 거동특성

샌드위치식 복합구조체에 대한 실험 결과를 근거로 제시되고 있는 대표적인 하중-변위 관계는 Fig 14.와 같

다.[2] 낮은 하중단계에서는 하중을 지지점으로 전달하기 위해 지지점 근처 콘크리트 부위에서 인장균열이 발생하고(E점), 구조체의 항복은 지지점 근처 하부 강재의 항복으로 시작된다(A점). 구조체의 항복시작 후 거동은 콘크리트 강도, 격벽간격 등의 요인에 의해 다소 변화되지만, 크게 콘크리트 압축파괴(crushing) 전에 하부 강재가 항복하는 경우(O-A-B)와 하부 강재 항복 전에 콘크리트의 압축파괴가 발생하는(O-A-C) 2가지 경우로 나눌 수 있다.

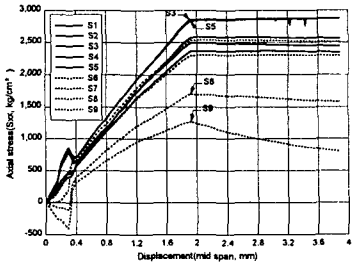
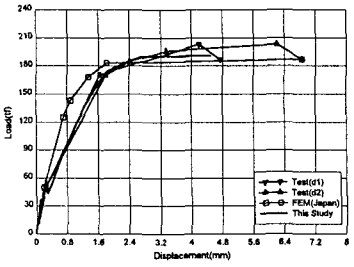
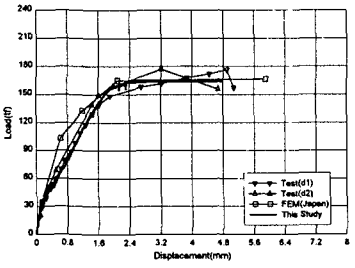


Fig 12. Axial stress of bottom plate (MA Type)



(a) MA Type



(b) MB Type

Fig 13. Analysis and test results to Type

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

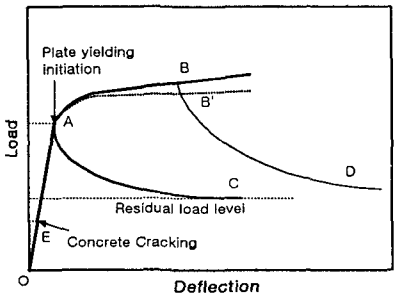


Fig 14. Load-deflection curve

본 연구의 대상 구조체에 대한 해석결과 하중-변위 거동은 O-A-B 거동을 따르는 것으로 나타나며, 전체적인 거동특성은 다음과 같다.

step 1) 하중 초기단계에서는 하중이 증가할수록 지지점 부근 콘크리트에 인장응력이 발생하며, 이때 발생한 인장응력이 콘크리트 인장응력 ft에 도달하는 40~50 ton(변위 0.3~0.5mm) 사이에서 일부 콘크리트에 인장균열이 발생한다.

step 2) 이때 콘크리트에 인장균열이 발생하면서 콘크리트가 부담하던 인장응력을 하부강판이 부담하므로써 부재 사이에 급격한 응력 변화가 발생하고 이에 따라 하중-변위 곡선의 기울기는 일시적으로 크게 변화한다.

step 3) 이후 항복점까지 내부 콘크리트는 압축력을 전담하는 스트럿(strut) 역활을, 하부강판은 인장력을 전담하는 타이(tie) 역할을 수행하면서 작용하는 하중크기에 비례하여 응력이 증가한다.

step 4) MA Type은 180 ton 근처에서, MB Type은 160 ton 근처에서 항복을 시작하며, 항복은 공통적으로 하부강판에서 시작한다.

step 5) 하부강판의 항복 시작과 더불어 구조체의 하중저항 능력은 현저히 감소하며 변형이 계속 증가하여 MA Type은 190 ton 근처에서, MB Type은 170~175 ton 근처에서 극한상태에 이른다. 이때 하부강판은 항복응력 상태를 유지하고 내부 콘크리트도 압축응력이 다소 증가하여 일부 지점에서는 압축파괴 상태에 도달한다.

4. 결 론

본 연구는 초대형 해양구조물에 적합한 샌드위치식 복합구조체에 대해 다양한 매개변수에 대한 소성해석을 실시하였으며, 이로부터 본 구조체의 거동특성을 분석하였다. 본 연구에서 얻은 결론은 다름과 같다.

첫째, 내부 콘크리트 강도는 구조체 성능에 미치는 영향이 미미한 것으로 나타났다.

둘째, 횡방향 보강재의 설치 유무는 구조체의 성능에 다소 영향을 나타내지만, 본 연구에서는 강재와 콘크리트 경계면의 미끄러짐 현상(slip)을 무시하고 완전 부착으로 가정한 결과이므로 향후 강재와 콘크리트 경계면의 미끄러짐 현상을 고려한 경우의 해석결과를 바탕으로 분석하는 것이 보다 타당하다.

셋째, 격벽간격비가 증가할수록 구조체의 성능은 향상된다. 이것은 격벽간격비가 증가할수록 콘크리트가 부담하던 하중의 일부를 격벽이 부담하여 상대적으로 콘크리트의 응력이 감소하고, 강판의 콘크리트 구속효과(confining effect)에 따른 콘크리트 전단강도 증가현상 때문인 것으로 판단된다. 그러나 하중의 흐름과 관계없는 격벽과 콘크리트 구속효과에 따른 전단강도 증가현상이 일정 격벽간격비 이상에서는 뚜렷한 효과를 나타내지 않기 때문에, 일정수준의 격벽간격비 범위 이내에서만 격벽간격비가 전체구조체의 성능에 영향을 많이 미치며 이 범위 이하 또는 이상의 격벽간격비일 경우에는 미미한 영향을 미치는 것으로 판단된다.

셋째, 본 구조체에서 하중은 하중 작용점과 지지점을 연결하는 대각선 방향으로 지지점에 전달된다. 따라서 이 방향에 위치한 콘크리트는 높은 응력상태를 나타내지만 이외의 부분에서는 상대적으로 낮은 응력상태를 나타낸다. 콘크리트는 초기하중단계에서만 일부 부위에 인장응력이 발생하고, 이후의 하중단계에서는 지속적으로 압축응력이 지배한다. 따라서 본 구조체에서 콘크리트는 압축력을 부담하는 스트럿(strut)의 역할을 담당한다. 콘크리트를 통해 지지점으로 전달된 하중은 하부강판의 양단에서 강판을 잡아당기는 인장력으로 작용하므로 하부강판에는 지점별로 거의 동일한 축방향 인장응력이 발생하지만, 중앙경간의 지지점에 근접한 일부지점에서는 휨거동이 발생한다. 따라서 본 구조체에서 하부강판은 초기 하중단계부터 지속적으로 인장응력을 부담하는 타이(tie)의 역할을 담당한다. 최종적으로 본 구조체의 항복 및 파괴는 하부강판의 인장력에 의해 지배된다.

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. 鋼コソクリートサソドイツチ構造 沈埋函の 設計と 高流動コソクリートの 施工, 財團法人 沿岸開發技術研究センター, 1996