

셀 형상비에 따른 강·콘크리트 복합구조체의 구조적 거동 및 성능

The Structural Behavior and Performance by Span-to-Depth Ratio in Composite Structure of Sandwich System

정연주* 정광희** 김병석***
Jeong, Youn-Ju Jung, Kwang-Hoe Kim, Byung-Suk
(논문접수일 : 2000년 10월 23일 ; 심사종료일 : 2001년 5월 29일)

요 지

이 논문은 샌드위치식 강-콘크리트 복합구조체에서 상하 강판과 격벽으로 구성되는 셀의 형상비가 거동과 성능에 미치는 영향을 다루었다. 이 구조체에서 셀 형상비는 하중전달 메카니즘과 하중분배능력을 변화시킨다. 따라서 셀 형상비에 따라 부재의 용력수준과 하중저항능력이 변화한다. 이 연구에서는 셀 형상비가 이 구조체의 거동과 성능에 미치는 영향을 규명하기 위해, 두 종류의 샌드위치식 복합구조체에 대해 다양한 셀 형상비를 설정하여 비선형 구조해석을 수행하였다. 해석결과로부터 셀 형상비에 따른 하중전달 메카니즘과 부재 용력에서의 차이점을 도출하였으며, 이들 차이점을 바탕으로 셀 형상비가 전단성능, 휨성능, 하중저항성능에 미치는 영향을 분석하였고, 파괴모드와 연성에 미치는 영향에 대해서도 간략히 언급하였다. 연구결과, 셀 형상비가 증가함에 따라 하부 강판과 콘크리트의 용력수준이 낮아지는 결과를 나타내었다. 이것은 각 부재의 유효휨강성과 유효전단강성 증가를 나타내며, 따라서 구조체의 하중저항성능도 향상되는 것으로 판단된다. 특히 셀 형상비의 증가에 따른 성능향상에서 전단성능이 휨성능에 비해 더 큰 효과를 나타내며, 이러한 차이는 파괴모드와 연성에도 영향을 미칠 것으로 판단된다. 즉, 셀 형상비가 증가함에 따라 구조물의 거동 및 파괴모드는 점차적으로 전단에서 휨으로 변화하고, 이에 따라 구조물의 연성도 점차적으로 향상될 것으로 판단된다.

핵심용어 : 복합구조체, 샌드위치식, 셀 형상비, 하중전달 메카니즘, 전단성능, 휨성능, 파괴모드

Abstract

This paper describes the effect of span-to-depth ratio, which describes aspect of cell formed with top-bottom and diaphragm steel plate, on capacity in composite steel-concrete structure of sandwich system. The span-to-depth ratio of cell changes load-carrying mechanism and load-distribution capacity of structure. Therefore, stress levels of members and load-resistance capacity of system vary according to span-to-depth ratio. In this study, numerical nonlinear analysis was performed to various span-to-depth ratio for two types composite structure of sandwich system to analyze the influence of span-to-depth ratio on capacity and behavior. The difference of load-carrying mechanism and stress of members results from analysis results, then based on these differences, the effects of span-to-depth ratio on shear capacity, flexural capacity and load-resistance capacity were analyzed. Also, the effects on failure mode and ductility were introduced briefly. As a results of this study, as span-to-depth ratio increases, stress level of bottom steel plate and concrete lower. This implies an increase in effective flexural and shear capacity. Therefore load-resistance capacity of structure improves as span-to-depth ratio increases. Especially, the effect is greater in shear than flexural capacity as span-to-depth ratio increases, this difference between flexural and shear capacity may change failure mode and ductility. Because as span-to-depth ratio increases shear capacity increases more than flexural capacity, we should expect that structural behavior and failure mode gradually change from shear to flexural and ductility of structure gradually improves

Keywords : composite, sandwich system, span-to-depth ratio, load-carrying mechanism, capacity, failure mode

* 정회원 · 한국건설기술연구원 토목연구부, 선임연구원
** 한국건설기술연구원 토목연구부, 연구원
*** 한국건설기술연구원 토목연구부, 수석연구원

· 이 논문에 대한 토론회를 2001년 9월 29일까지 본 학회에 보내주시면 2001년 12월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

1. 서 론

샌드위치식 복합구조체는 셀(cell) 구조형식에 따라 하중분배능력이 우수하고 콘크리트의 구속효과와 강재의 재료적 특성으로 인하여 높은 강성과 연성을 지니므로, 철근콘크리트 구조에 비해 붕괴될 때까지 흡수 에너지가 커서 대형 해양구조물에 적합한 장점을 갖고 있다.^{4),5),8)} 또한 강판의 국부좌굴이 콘크리트에 의해 억제되기 때문에 상대적으로 얇은 강판의 사용이 가능하고, 해양환경에서는 콘크리트 침식문제가 방지되는 장점을 갖고 있다. 시공측면에서는 철근콘크리트 구조물의 경우에 발생하는 배근 및 거푸집 철거 작업이 생략되고, 강 구조물의 경우에 비해 용접공정이 축소되므로 공기단축에 유리한 장점을 갖고 있다.^{3),6),8)} 그러나 아직 샌드위치식 복합구조체의 거동과 성능특성 및 설계방법에 대한 충분한 연구가 진행되지 않고 있으며, 국내에서는 관련 분야 연구가 전무한 실정이다.

샌드위치식 복합구조체에서 셀 형상비(span-to-depth ratio)는 하중분배능력과 콘크리트 구속효과에 관련된 사항으로 전체적 거동에 중요한 역할을 담당한다.^{3),6)~8)} 이 구조체는 기본적으로 하중점과 받침점을 연결하는 대각선 방향으로 하중이 받침점과 하부 강판으로 전달되는 거동 특성을 나타내지만, 셀 형상비에 따라 이 거동 특성은 변화하며, 셀 형상비는 이 구조체의 하중전달 메카니즘, 하중분배능력, 콘크리트 구속효과와 이에 따른 내부 콘크리트 및 하부 강판의 응력 상태를 변화시켜 이 구조체의 거동 및 성능에 영향을 미친다. 그러나 스트럿-타이 모델에 의한 현행 설계방법은 스트럿(전단)과 타이(휨)의 성능을 결정하는 문제에 있어 기존 철근콘크리트 부재에 대한 방법을 그대로 적용하거나 제한된 셀 형상비의 실험결과에 의한 경험적 방법을 이용하고 있어, 다양한 셀 형상비에 의한 하중분배능력, 콘크리트 구속효과 등 거동과 성능 변화의 영향을 반영하지 못하는 문제점을 내포하고 있다.^{5),6)}

Link 등⁴⁾은 받침점 근처 셀에서의 셀 형상비 증가는 콘크리트의 압축파괴를 늦추어 인장부 강판이 항복하는 효과를 나타내므로 구조체는 더욱 큰 연성 거동을 나타냄을 밝혀냈고, Zimmerman은⁶⁾ 셀 형상비가 증가할수록 이 구조체의 전단성능이 현저하게 향상됨을

밝혀냈다. 그러나 이들 결과는 특정 셀 형상비에 대한 단순 비교이므로 실제 설계에 반영하기 위해서는 다소 무리가 따른다.

따라서 이 연구에서는 셀 형상비가 이 구조체의 거동 및 성능에 미치는 영향을 설계에 반영하고 보다 정확한 거동 예측을 위한 바탕을 제공하고자, 현실적으로 설계에서 이용 가능한 0.3~1.7의 폭넓은 셀 형상비에 대한 비선형 구조해석을 통해, 샌드위치식 복합구조체의 기본적 거동특성, 하중전달 메카니즘 및 부재의 응력상태를 바탕으로 셀 형상비가 휨 성능, 전단성능, 하중저항성능, 파괴모드 및 연성 등이 이 구조체 거동과 성능에 미치는 영향을 규명하고자 한다.

2. 샌드위치식 강·콘크리트 복합구조체

2.1 구성

샌드위치식 복합구조체의 일반적인 구성(Fig. 1)은 상하 강판과 이들을 연결하는 격벽, 여기에 충전되는 콘크리트 그리고 횡방향 보강재, 스티프너 등의 전단연결재로 구성된다. 이 구조체에서 상하 강판은 휨모멘트를 부담하고 콘크리트 침식을 방지하는 역할을, 내부 콘크리트는 전단력 부담, 상하 강판 사이의 하중전달과 강판의 좌굴방지 역할을 담당한다.^{6),8),10)} 또한 격벽은 상하 강판의 연결과 강판과 콘크리트 사이의 전단력 상호 교류를 제공하며, 횡방향 보강재나 스티프너 등과 같은 전단연결재는 강판과 콘크리트 사이의 합성작용을 담당한다.

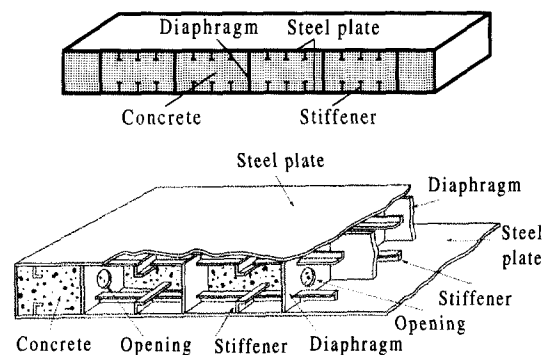


Fig. 1 Sandwich system

2.2 적용분야

대형 해양구조물에 샌드위치식 강·콘크리트 복합구조체의 적용은 일본 Hitachi Zosen⁵⁾과 캐나다 C-FER (Center for Frontier Engineering Research)^{3),4),5)}에 의해 석유시추선 외벽에 도입되었으며, 일본 오사카 남항터널(大阪南港トンネル, 1997), 고베항 항도터널(神戸港港島トンネル, 1998)등의 침매(沈埋)터널(Fig. 2)에도 적용되었다.^{7),8)} 캐나다 C-FER^{3),4),5)}에서는 해양구조물 제작을 위한 인공섬에 강재와 모래로 구성된 간단한 형태의 이 구조체를 적용하기도 하였다.

이외에도 이 구조체는 해양저장탱크, 방파제, 부채식 구조체, 인공섬 등의 다양한 해양구조물 뿐만 아니라 시공의 간편성에 따른 공기단축 등의 경제성으로 인하여 지하철, 지하터널, 암거, 교량 및 건물의 바닥판, 벽체, 원전 콘크리트 구조물 등 다양한 육상구조물에도 적용·가능하며, 외부강판의 부식을 고려한다면 강판을 대체하여 내부식, 고강도, 경량의 특성을 갖는 복합소재를 적용하는 것도 좋은 대안에 될 수 있을 것으로 판단된다.¹¹⁾

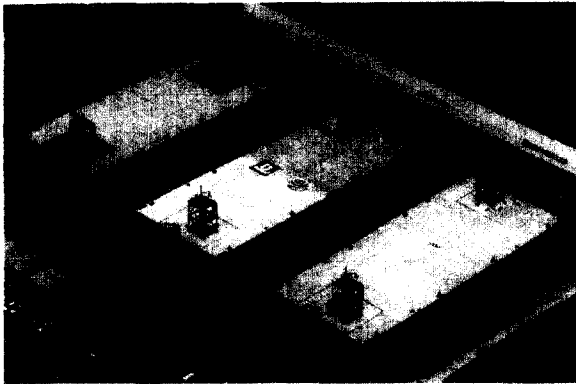


Fig. 2 Immersed tunnel

3. 셀 형상비에 따른 거동특성

3.1 구조체 성능에 미치는 영향

이 구조체는 상하 강판과 격벽으로 구성되는 셀 구조형식을 지니며, 셀의 형상을 나타내는 셀 형상비는 각 셀의 높이에 대한 너비의 비(H/S , span-to-depth ratio)로 나타낼 수 있다(Fig. 3).

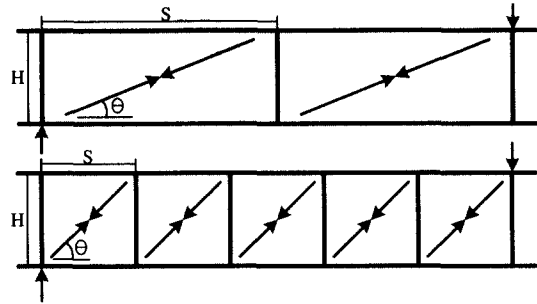


Fig. 3 Load distribution by cell

이 구조체는 기본적으로 하중점과 받침점을 연결하는 대각선 방향으로 하중이 전달되는 거동 특성을 나타내지만 셀 구조형식에 따라 각 셀의 대각선 방향으로 2차 하중전달경로가 생성되므로 하중분배능력이 우수하고(Fig. 3), 셀 구조에 따른 구속효과에 의해 콘크리트는 상대적으로 높은 강성을 얻을 수 있다.^{7),8)} 따라서 셀 형상비에 따라 이 구조체의 하중분배능력과 콘크리트 구속효과가 변화하며, 이것은 각 부재의 응력부담률에 영향을 미쳐 최종적으로 구조체의 거동과 성능에 영향을 미치게 된다.⁹⁾

이 구조체의 휨성능은 강판두께, 항복강도, 인장강도 등 주로 외부강판의 최대인장력에 의존적이며, 단면깊이, 받침점 구속효과 등도 휨성능에 영향을 미친다. 이 구조체의 전단성능은 주로 콘크리트 강도와 셀 형상비에 의존적이며, 이외에 강판두께, 단면깊이 등도 다소 영향을 미친다. 따라서 이 구조체의 강성과 연성을 결정하는 가장 중요한 요소는 강판두께, 콘크리트 강도, 셀 형상비 등이다. 이들 영향인자중 셀 형상비는 이 구조체의 하중분배능력과 콘크리트 구속효과에 관련된 사항으로 거동과 성능에 영향을 미치는 주요한 영향인자중의 하나이다.^{6),8)}

3.2 설계에서의 문제점

샌드위치식 복합구조체의 구성은 철근콘크리트 구조물과 유사하지만, 콘크리트와 강재 사이의 변형을 적합 조건 미성립, 깊은보(deep beam) 거동 등의 문제점으로 인하여 기존 설계방법의 적용에 어려움이 있으며 스트럿-타이 모델, 파괴 메카니즘 등 소성이론에 근거한 설계방법이 많이 적용되고 있다.^{6),8)} 스트럿-타이 모델에 의한 설계방법은, 트러스 거동을 나타내는 이 구조체의 하중전달 메카니즘을 바탕으로 하부 강판은 인장력을

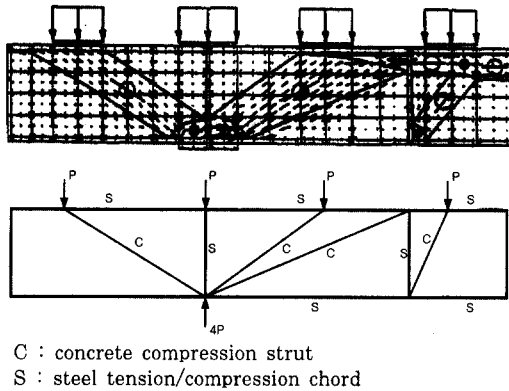


Fig. 4 Idealization by strut-tie model

부담하는 타이재료, 내부 콘크리트는 압축력을 부담하는 대각선 스트럿 부재로 고려한다(Fig. 4).^{4)~6),8)} 그러나 스트럿(전단)과 타이(휨)의 성능을 결정하는 문제에 있어 기존 철근콘크리트 부재에 대한 방법을 그대로 적용하거나 제한된 셀 형상비의 실험적, 해석적 결과에 의한 경험적 방법을 이용하고 있어, 다양한 셀 형상비에 의한 하중분배능력, 콘크리트 구속효과 등 거동과 성능 변화의 영향을 반영하지 못하는 문제점을 내포하고 있다.^{3),5),6)} 이러한 셀 형상비의 영향은 전단성능에서 더욱 크게 발생하므로, 스트럿-타이 모델에 의한 설계는 이 구조체에서 힘의 흐름을 나타내는데 우수하고 외부 강판에 관계된 휨 설계에는 적합하지만 콘크리트에 관계된 전단설계에는 바람직하지 않는 단점을 갖고 있다.^{6),8)}

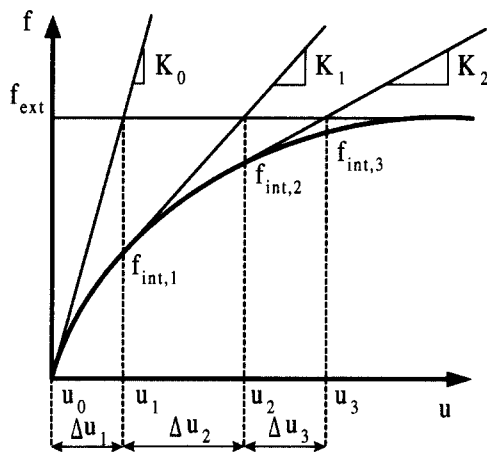


Fig. 5 Newton-Raphson Method

따라서 이러한 현행 설계방법에서의 문제점을 해결하기 위해서는 다양한 셀 형상비가 이 구조체의 거동 및 성능에 미치는 영향에 대한 분석이 선행되어야 한다. 또한 파괴 메카니즘에 의한 설계방법은 구조체의 거동과 파괴 메카니즘에 대한 정확한 이해를 바탕으로 하므로, 보다 경제적이고 효율적인 설계를 위해 셀 형상비가 거동과 파괴 메카니즘에 미치는 영향에 대한 연구도 선행되어야 한다.

4. 비선형 해석 기법

비선형 구조해석의 경우 강성행렬이 비선형항을 포함하고 있으므로 특정 하중구간을 여러 단계의 선형구간으로 구분하고 각 단계에 대한 반복해석을 통해 외력과 내력에 의한 에너지 차이가 최소화되는 근사 해(구조물의 변위 또는 하중)를 구하게 되며, 이 연구에서는 Newton-Raphson 방법에 의한 반복법을 이용하였다. Newton-Raphson 방법은(Fig. 5)²⁾ 하중-변위 관계식의 기울기를 이용하여 매 반복과정에서의 강성행렬을 새로 구성된 후 반복해석을 수행하는 방법으로, 반복해석이 진행됨에 따라 변위 증분 Δu_i 이 점점 작아지면서 0에 근접하게 된다. 이때 외력과 내력에 의한 에너지 차이를 나타내는 여력($f_r = f_{ext} - f_{int}$)도 0에 접근하게 되며, 여력이 허용치 범위 내에 들게 되면 해가 수렴한 것으로 판단하고 해석을 마치게 된다. 이 연구에서 이용한 비선형 해석 기법의 전체적인 흐름도는 Fig. 6에 나타난 바와 같다.

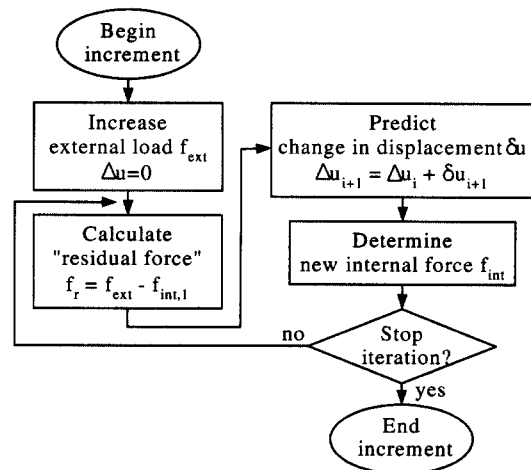


Fig. 6 Iteration process

해석 프로그램은 범용구조해석 프로그램인 DIANA 를 이용하였으며, 재료별 해석모델로는 콘크리트의 인장부와 압축부는 각각 분산균열(smearred cracking) 모델과 Drucker-Prager 모델을, 강재는 von-Mises 모델과 2개의 직선으로 이상화한 응력-변형률 관계를 적용하였다.^{1),2)}

5. 수치해석 및 고찰

5.1 모델링 및 셀 형상비

셀 형상비에 따른 샌드위치식 복합구조체의 거동특성 분석을 위해 Fig. 7에 나타난 것과 같은 두 종류의 샌드위치식 복합구조체(CS-A, CS-B Type)에 대한 비선형해석을 실시하였다. 대상구조체에 대한 모델링은 해석상의 편의를 위해 전체 구조체의 1/2 모델링(2D)을 실시하였으며, 이때 콘크리트, 강재 모두 사각형의 8절점 평면응력(plane stress)요소를 이용하였다. 해석에서 이용한 콘크리트와 강재의 기본물성은 Table 1에 나타난 바와 같다. 또한 셀 형상비가

Table 1 Properties of materials

Concrete		Steel		
			9(mm)	14(mm)
f_{ck}	32.6MPa	f_y	281.5MPa	277.5MPa
f_t	3.0MPa	f_u	477.6MPa	454.0MPa
E_c	26.8GPa	E_s	189.3GPa	191.2GPa

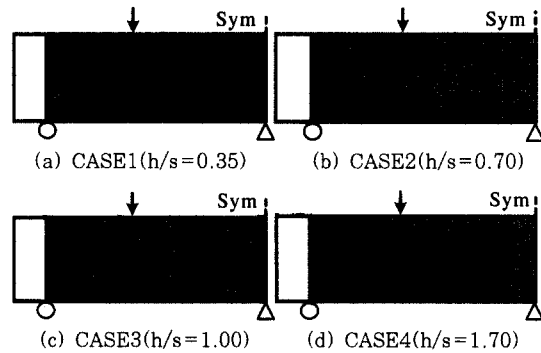


Fig. 8 Span-to-depth ratio

이 구조체의 거동 및 성능에 미치는 영향을 규명하기 위해 Fig. 8에 나타난 바와 같이 0.35~1.70의 셀 형상비를 갖는 4가지 경우를 설정하였다.

5.2 해석결과

5.2.1 하중-변위 곡선

Fig. 9는 각 Type별로 셀 형상비에 대한 하중-변위 곡선을 나타낸 것으로, CS-A, CS-B Type 모두 셀 형상비가 증가할수록 항복 및 극한하중이 증가하는 특성을 나타내고 있다. 이때 CASE 2, 3의 경우에는 많은 차이가 발생하지만, CASE 1, 2와 CASE 3, 4의 경우는 거의 유사한 결과를 나타내고 있다.

5.2.2 부재별 응력상태

이 구조체에서 하중은 하중점과 받침점을 연결하는 대각선 방향(Fig. 7(c), direction 1, 3)으로 전달되며, 하중경로상에 위치한 콘크리트는 높은 응력상태를 나타내지만 이외의 콘크리트는 상대적으로 낮은 응력상태를 나타낸다(Fig. 10(a)). 동일한 하중경로상에서는 강판에 인접한 모서리 부위에서 국부적으로 다소 높은 응력상태를 나타내지만 이외의 지점에서는 동일한

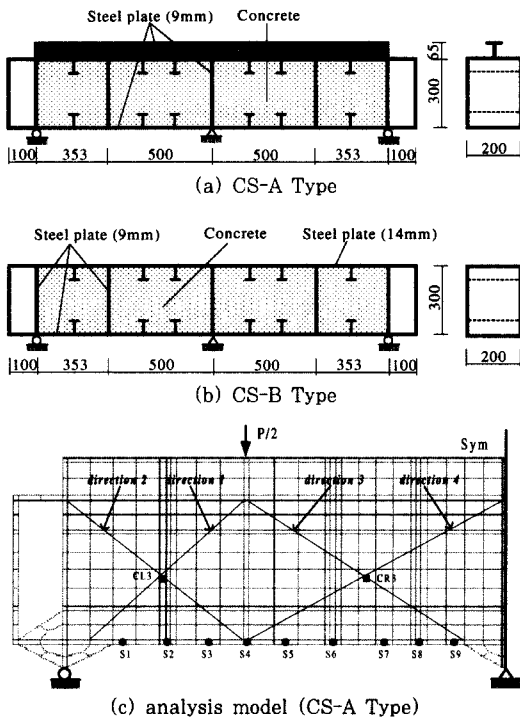


Fig. 7 Details and model

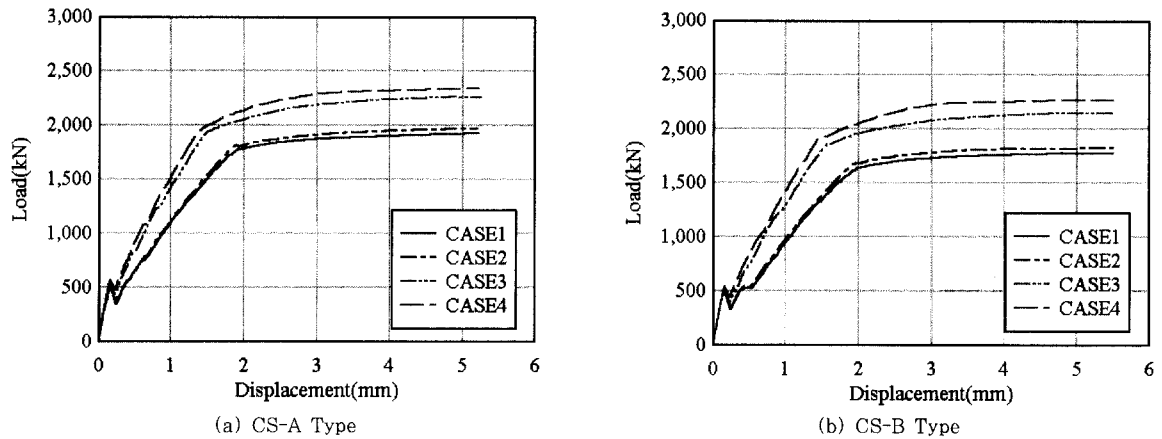


Fig. 9 Load-displacement curve

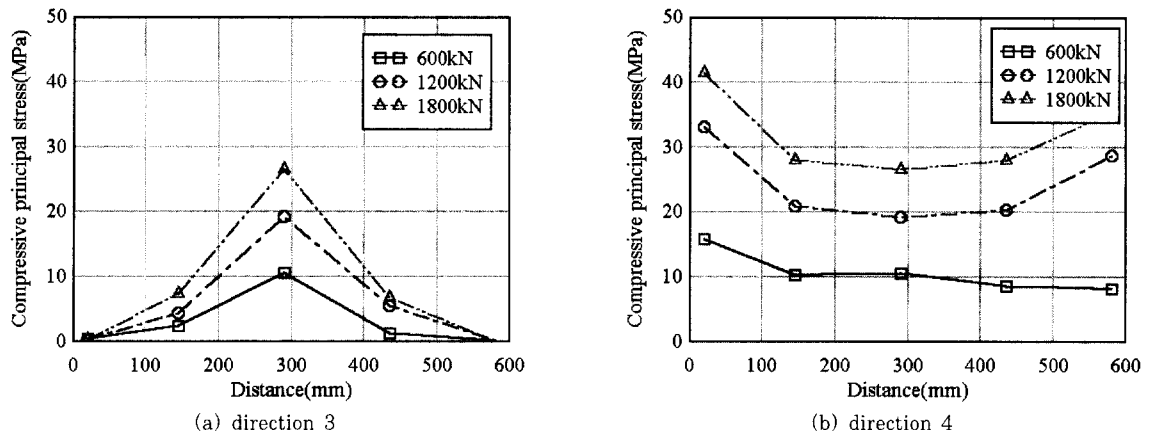


Fig. 10 Stress distribution(CS-A Type)

응력상태를 나타낸다(Fig. 10(b)).

Fig. 11은 대각선의 하중경로상에 위치하여 셀 형상비에 따른 콘크리트의 응력변화를 가장 잘 반영하는 CR3 지점에서의 콘크리트 주응력 크기를 각 셀 형상비별로 나타낸 것으로, 셀 형상비가 증가할수록 콘크리트의 주응력 크기가 상대적으로 감소하는 것을 알 수 있다. 이때 콘크리트의 주응력 크기에서도 하중·변위 곡선의 경우와 유사하게 CASE 2, 3의 경우에 많은 차이가 발생하지만, CASE 1, 2와 CASE 3, 4의 경우는 거의 유사한 결과를 나타내고 있다.

Fig. 12는 항복하중 근처에서 하부 강판의 위치별 축방향 응력상태를 나타내는 것으로 셀 형상비가 증가할수록 축방향 응력이 감소하며, 하중·변위 곡선과 콘크

리트 주응력 크기의 경우와 유사하게 CASE 2, 3의 경우에는 많은 차이가 발생하지만 CASE 1, 2와 CASE 3, 4의 경우는 거의 유사한 결과를 나타내고 있다. 이때, 셀 형상비 증가에 따른 하부 강판의 위치별 축방향 응력 감소 현상은 중앙부위에서는 작게, 받침점 부위에서는 크게 나타나, 낮은 셀 형상비에서는 중앙 받침점 근처 일부 부위를 제외하고는 거의 동일한 응력상태를 나타내는 트러스 거동을 나타내지만,^{4)~6)} 셀 형상비가 증가할수록 지점별로 응력 차이가 많이 발생하는 보 거동 특성을 나타내고 있다.^{9),10)}

Fig. 13은 하부 강판에서 가장 큰 응력을 나타내는 중앙부 S5 지점에서의 축방향 인장응력을 각 Type별로 나타낸 것으로, 셀 형상비에 관계없이 S5 지점에서

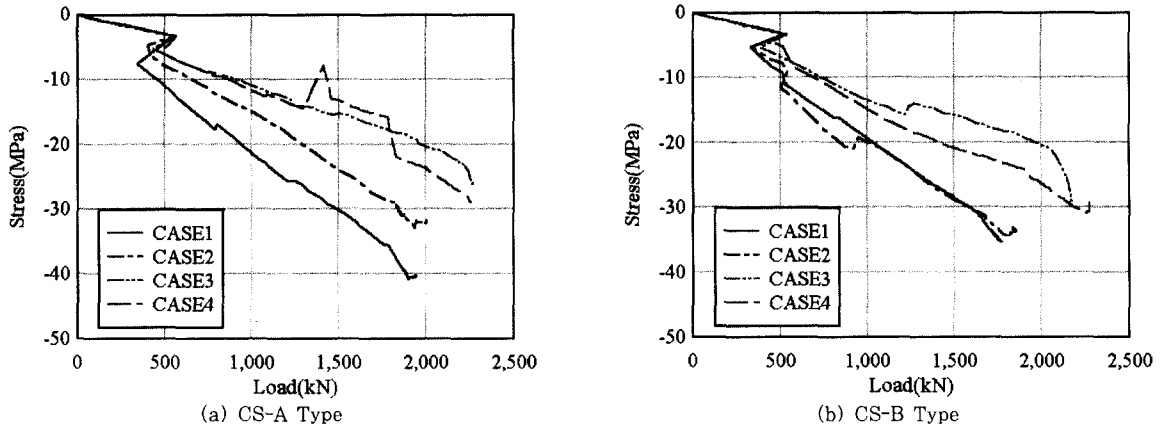


Fig. 11 Principal stress of concrete(CR3)

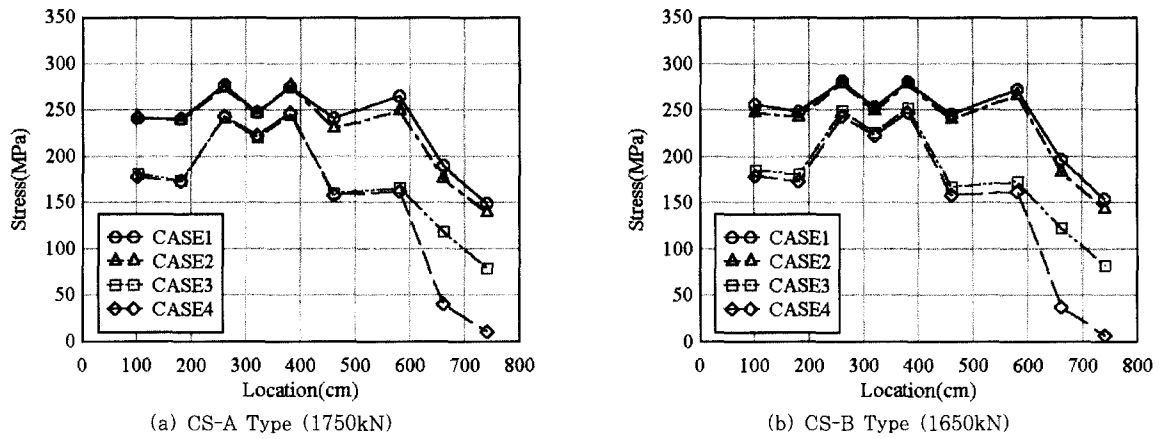


Fig. 12 Axial stress of bottom steel plate

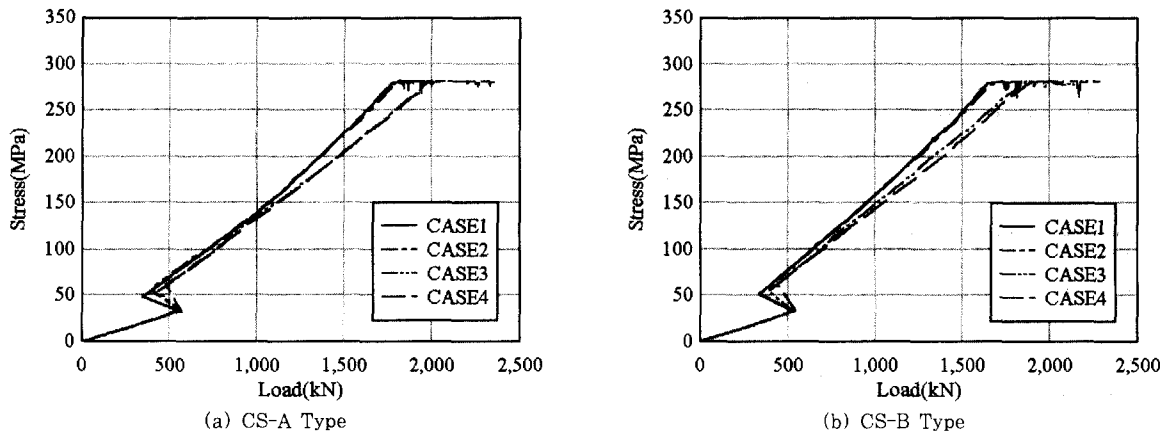


Fig. 13 Axial stress of S5

항복이(항복응력 281.5MPa) 발생함을 나타내고 있다.

5.2.3 해석결과 분석

이상의 해석결과를 종합하면 셀 형상비에 따른 부재 응력수준과 하중저항성능의 변화는 하중전달 메카니즘과 이에 따른 하중분배능력에 기인하며, 셀 형상비가 증가할수록 셀 구조에 따른 하중분배능력의 향상으로 콘크리트와 하부 강판의 응력수준이 감소하는 것으로 판단된다. 이때, 콘크리트와 하부 강판의 응력감소 효과는 각각 유효전단성능과 유효휨성능의 향상을 나타내는 것이고, 이에 따라 항복하중, 극한하중 등 구조물의 하중저항능력도 향상되는 것으로 판단된다.

5.3 셀 형상비에 따른 거동 및 성능 특성

5.3.1 하중전달 메카니즘 및 하중분배능력

이 구조체는 기본적으로 하중점과 받침점을 연결하는 대각선 방향으로 하중이 전달되는 거동 특성을 나타낸다(Fig. 14(a)). 따라서 대각선 방향의 하중경로상에 위치한 콘크리트에는 높은 응력상태를 나타내지만 이외의 콘크리트에는 상대적으로 낮은 응력상태를 나타낸다.^{4)~6)} 또한 콘크리트를 통해 대각선 방향으로 받침점에 전달된 하중은 하부 강판의 양 단에서 인장력으로 작용하므로 하부 강판은 위치에 따라 거의 동일한 축방향 인장 응력이 발생하는 트러스 거동을 나타낸다(Fig. 12).

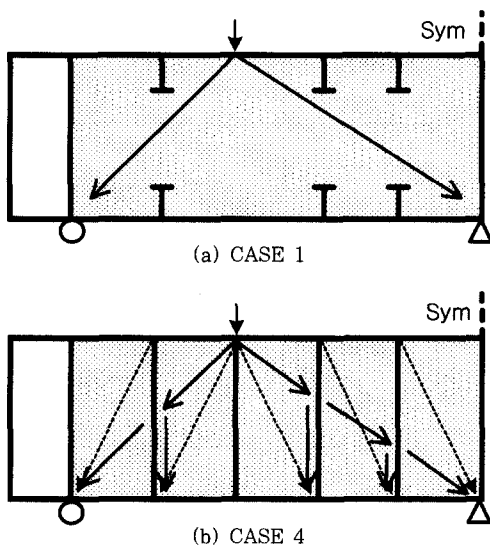


Fig. 14 Load-carrying mechanism by cell

그러나 셀 형상비가 증가할수록 셀 구조의 특성으로 각 셀의 대각선 방향으로 2차 하중전달 경로가 생성되는 하중전달 메카니즘의 변화가 발생한다(Fig. 14(b)).^{7),8)} 이러한 하중전달 메카니즘의 변화는 이 구조체의 하중 분배능력을 향상시켜, 응력이 집중되는 특정 콘크리트 부위(대각선 방향)에서의 응력수준을 감소시키는 효과를 나타낸다. 하중전달 메카니즘 변화에 따른 하중분배능력의 향상은 하부 강판의 응력상태에도 영향을 미친다. 셀 형상비가 증가할수록 각 셀의 대각선 방향으로 생성되는 2차 하중경로를 통해 하부 강판으로 전달되는 하중은 하부 강판의 특정 부위에 압축력으로 작용하고 이 효과만큼 인장력 감소 효과가 발생한다. 이러한 인장응력 감소효과는 격벽과 하부 강판의 교차점에서 발생하므로 받침점 근처에서 많이 발생하고 경간 중앙부에서는 그 영향이 미미하게 나타난다.

그러나 하중전달 경로상에 위치하지 않은 격벽은 구조체의 거동 및 성능에 거의 영향을 미치지 않는다. 이 구조체에서 하중점 아래 수직방향으로는 하중전달이 거의 이루어지지 않으며, 따라서 여기에 위치한 격벽은 구조물의 거동 및 성능에 거의 영향을 미치지 않는다(CASE 1, 2의 경우). 또한 셀 형상비 증가에 따른 하중분배능력의 향상은 일정 셀 형상비 이상에서는 그 영향이 미미한 것으로 판단되며, 따라서 일정 셀 형상비 이상에서는 셀 형상비가 구조물의 거동 및 성능에 거의 영향을 미치지 않는다(CASE 3, 4의 경우).

5.3.2 유효휨성능

이 구조체의 휨성능을 결정하는 주 요소는 하부 강판의 응력상태(또는 인장력)이다. 동일한 하중하에서 하부 강판의 응력상태는 셀 형상비가 증가할수록 감소하는데(Fig. 12) 이것은 유효휨성능(EFC, Effective Flexural Capacity)의 향상을 뜻한다. 셀 형상비가 증가할 때 하부 강판의 응력감소에 따른 상대적 휨성능 향상 효과는, 식(1)에 나타난 바와 같이 CASE 1의 응력상태를 기준으로 각 셀 형상비에서의 축방향 인장 응력 차이(R_{ss})를 하부 강판 항복응력 f_y (281.5MPa)에 대한 비율로 표현한 유효휨성능비(R_{efc})를 이용하여 정량적으로 나타낼 수 있다.

$$R_{efc} = \left[1 - \frac{(f_{si} - f_{s0})}{f_y} \right] \times 100(\%) \quad (1)$$

여기서, f_{si} 는 동일한 하중상태에서 각 셀 형상비에

대한 하부 강판의 축방향 인장응력이며, f_{so} 은 기준으로 설정한 CASE 1 경우의 하부 강판 축방향 인장응력을 나타낸다. 응력감소에 의한 유효휨성능 향상 효과는 하부 강판의 지점별로 다르게 나타나지만, 최대 응력을 나타내어 하부 강판의 거동을 지배하며 가장 작은 응력 감소 효과를 나타내는 S3, S5 지점에서의 유효휨성능이 이 구조체의 하중저항능력에 직접적인 영향을 미치므로 이 지점에 대해서만 분석하였다. S5 지점에서 셀 형상비에 따라 CASE 1 경우를 기준으로 한 응력비(R_{ss})와 이에 따른 상대적 유효휨성능비(R_{efc})는 Table 2, Fig. 15에 나타난 바와 같다. 분석결과 CS-A, CS-B Type의 S5 지점에서 유효휨성능 향상 효과는 CASE 2, 3의 경우에는 약 8.0~9.1%이며, CASE 1, 2와 CASE 3, 4의 경우에는 약 0.7~2.1% 정도로 나타남을 알 수 있다.

5.3.3 유효전단성능

이 구조체의 전단성능을 결정하는 주 요소는 콘크리트의 응력상태(또는 강도)이다. 동일한 하중하에서 콘크리트의 응력상태는 셀 형상비가 증가할수록 감소하는데

(Fig. 11) 이것은 유효전단성능(Effective Shear Capacity, ESC)의 향상을 뜻한다. 셀 형상비가 증가할 때 콘크리트의 응력감소에 따른 상대적 전단성능 향상 효과는, 식(2)에 나타난 바와 같이 CASE 1의 응력상태를 기준으로 각 셀 형상비에서의 압축응력 차이(R_{cs})를 콘크리트 압축강도 f_{ck} (32.6MPa)에 대한 비율로 표현한 유효전단성능비(R_{esc})를 이용하여 정량적으로 나타낼 수 있다.

$$R_{esc} = \left[1 - \frac{(f_{ci} - f_{co})}{f_{ck}} \right] \times 100(\%) \quad (2)$$

여기서, f_{ci} 는 각 셀 형상비에 대한 콘크리트 주응력 크기이며, f_{co} 는 기준으로 설정한 CASE 1 경우의 콘크리트 주응력 크기를 나타낸다. 응력감소에 의한 유효전단성능 향상 효과는 콘크리트 부위별로 다르게 나타나지만, 하중경로상에 위치하여 셀 형상비에 따라 콘크리트에 최대응력을 나타내고, 셀 형상비 변화에 따른

Table 2 Axial stress and EFC

CASE (h/s)	CS-A Type			CS-B Type		
	Stress (MPa)	R_{ss} (%)	R_{efc} (%)	Stress (MPa)	R_{ss} (%)	R_{efc} (%)
CASE 1 (0.35)	280.5	100.0	100.0	280.5	100.0	100.0
CASE 2 (0.70)	276.5	98.6	101.4	278.5	99.3	100.7
CASE 3 (1.00)	254.0	90.6	109.4	253.0	90.2	109.8
CASE 4 (1.70)	248.0	88.5	111.5	248.1	88.5	111.5

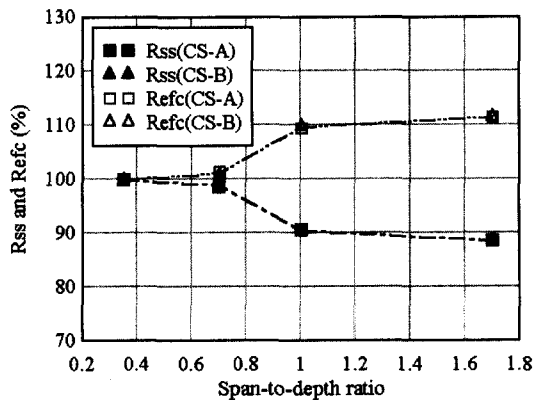


Fig. 15 Axial stress ratio and EFC ratio

Table 3 Principal stress and ESC

CASE (h/s)	CS-A Type			CS-B Type		
	Stress (MPa)	R_{cs} (%)	R_{ese} (%)	Stress (MPa)	R_{cs} (%)	R_{ese} (%)
CASE 1 (0.35)	36.0	100.0	100.0	32.0	100.0	100.0
CASE 2 (0.70)	28.5	80.2	121.7	31.2	97.5	102.4
CASE 3 (1.00)	17.5	49.0	155.7	17.4	54.3	144.9
CASE 4 (1.70)	15.7	44.1	161.1	22.0	69.2	130.4

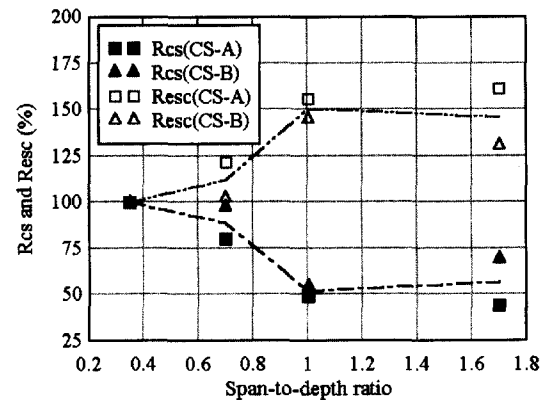


Fig. 16 Principal stress ratio and ESC ratio

콘크리트의 응력 변화를 효과적으로 나타내는 CR3 지점에서의 유효전단성능이 이 구조체의 하중저항능력에 주로 많은 영향을 미치므로 이 지점에 대해서만 분석하였다. CR3 지점에서 셀 형상비에 따라 CASE 1의 경우를 기준으로 한 응력비(Rcs)와 이에 따른 상대적 유효전단성능비(Resc)는 Table 3, Fig. 16에 나타난 바와 같다. 분석결과 CS-A, CS-B Type의 CR3 지점에서 유효전단성능 향상 효과는 CASE 2, 3의 경우에는 약 38.3%, CASE 1, 2와 CASE 3, 4의 경우에는 약 -4.5, 12.0% 정도로 나타남을 알 수 있다.

5.3.4 하중저항성능

구조체의 하중저항성능(Load Resisting Capacity)은 항복하중(P_y)과 극한하중(P_u)으로 나타낼 수 있다. 따라서 셀 형상비에 따른 상대적 하중저항성능 향상 효과는 CASE 1 경우의 항복하중, 극한하중에 대한 각 셀 형상비에서의 항복하중, 극한하중의 비율로 정량적으로 나타낼 수 있다. 셀 형상비에 따른 각 Type의 항복하중 및 극한하중은 Table 4와 같으며, CASE 1의 경우를 기준으로 한 항복하중비, 극한하중비 등의 상대적 하중저항성능비(R_{lr})는 Table 4, Fig. 17에 나타난 바와 같다. 분석결과 CS-A, CS-B Type의 항복하중 향상 효과는 CASE 2, 3의 경우는 약 7.7~10.8%이며, CASE 1, 2와 CASE 3, 4의 경우에는 약 2.2~3.0% 정도로 나타남을 알 수 있다. 또한 극한하중 향상 효과는 CASE 2, 3의 경우는 약 15.3~18.3%이며, CASE 1, 2와 CASE 3, 4의 경우에는 약 2.0~6.6% 정도 나타남을 알 수 있다.

Table 4 Yield & ultimate load ratio

CASE (h/s)	CS-A Type				CS-B Type			
	P_y (kN)	P_y Ratio (%)	P_u (kN)	P_u Ratio (%)	P_y (kN)	P_y Ratio (%)	P_u (kN)	P_u Ratio (%)
CASE 1 (0.35)	1774	100.0	1930	100.0	1636	100.0	1774	100.0
CASE 2 (0.70)	1813	102.2	1970	102.0	1685	103.0	1832	103.3
CASE 3 (1.00)	1950	109.9	2264	117.3	1862	113.8	2156	121.6
CASE 4 (1.70)	1989	112.2	2342	121.3	1901	116.2	2273	128.2

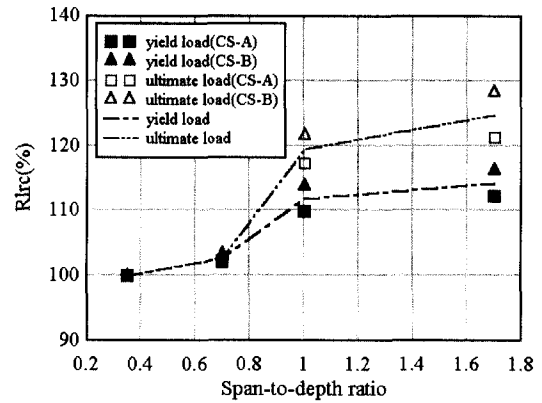


Fig. 17 Yield load and ultimate load

5.3.5 파괴모드와 연성

지금까지 분석한 유효휨성능, 유효전단성능 및 하중저항성능을 종합적으로 분석하면, 셀 형상비에 따른 이 구조체의 파괴모드와 연성 등에 대한 예측이 가능하다. Fig. 18은 CS-A, CS-B Type에 대한 유효휨성능비, 유효전단성능비 및 하중저항성능비를 동시에 나타낸 것으로, 두 Type 모두 셀 형상비 증가에 따라 유효전단성능은 최대 약 45.8~50.3%의 증가를 보이는 반면, 유효휨성능은 최대 약 11.5%의 증가에 미치지 못한다. 이때 구조체의 하중저항성능을 나타내는 항복하중과 극한하중은 각각 최대 약 12.2%~16.2%의 증가를 나타내며, 이것은 유효휨성능 증가와 유사한 경향을 나타낸다. 이를 바탕으로 이 구조체의 거동 및 파괴모드는 셀 형상비가 증가할수록 점진적으로 전단에서 휨으로 변화하고, 이에 따라 연성도 향상됨을 예측

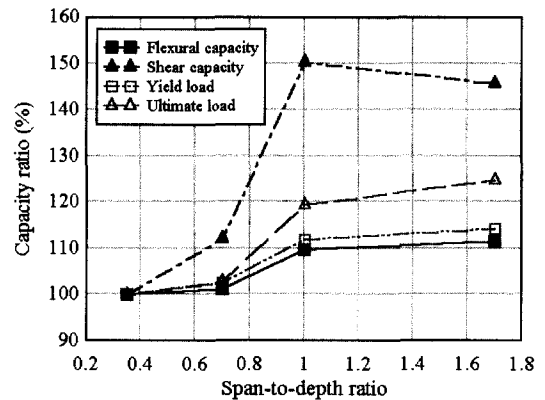


Fig. 18 Capacity ratio

할 수 있다.³⁾ 또한 셀 형상비가 증가할수록 전단성능을 지배하는 콘크리트 강도가 이 구조체의 하중저항성능에 미치는 영향은 줄어들고, 휨성능을 지배하는 하부 강판의 영향이 증대함을 예측할 수 있다.

6. 결 론

이 연구에서 얻어진 결과는 다음과 같다.

- 1) 샌드위치식 복합구조체에서 셀 형상비는 하중전달 메카니즘과 하중분배능력에 영향을 미치며, 셀 형상비가 증가할수록 각 셀의 대각선 방향으로 2차 하중경로가 생성되어 이 구조체의 하중분배능력이 향상된다.
- 2) 셀 형상비가 증가할수록 콘크리트(압축)와 강재(인장)의 응력수준이 감소하며, 응력감소효과는 일정 셀 형상비에서는(0.7~1.0) 크게, 이외의 셀 형상비에서는(1.0 이상, 0.7 이하) 미미하게 나타난다.
- 3) 하부 강판의 위치별 응력감소효과는 경간 중앙부에서는 작게, 경간 단부에서는 크게 발생한다. 따라서 하부 강판은 낮은 셀 형상비에서는 지점별로 축방향 인장응력이 균일한 트러스 거동을 나타내지만, 셀 형상비가 증가할수록 보 거동을 나타낸다.
- 4) 동일 하중단계에서 셀 형상비 증가에 따른 부재응력 감소효과는 이 구조체의 유효휨성능과 유효전단성능을 향상시키는 결과를 나타낸다. 유효휨성능 향상 효과는 0.7~1.0의 셀 형상비에서는 약 8.0~9.1%, 1.0 이상 또는 0.7 이하의 셀 형상비에서는 약 0.7~2.1% 정도이고, 유효전단성능 향상 효과는 전자의 경우는 약 38.3%, 후자의 경우에는 약 -4.5, 12.0% 정도로 나타난다.
- 5) 유효휨성능과 유효전단성능의 향상은 이 구조체의 항복하중, 극한하중 등 전체적인 하중저항능력을 향상시킨다. 항복하중 향상 효과는 0.7~1.0의 셀 형상비에서는 약 7.7~10.8%, 1.0 이상 또는 0.7 이하의 셀 형상비에서는 약 2.2~3.0% 정도이고, 극한하중 향상 효과는 전자의 경우는 약 15.3~18.3%, 후자의 경우에는 약 2.0~6.6% 정도로 나타난다. 따라서 구조적 측면에서 이상적인 셀 형상비는 1.0 내외인 것으로 판단된다.

- 6) 셀 형상비의 증가에 따라 전단성능이 휨성능에 비해 더욱 크게 향상되고, 하중저항성능 향상효과는 휨성능 향상 경향과 유사하다. 따라서 셀 형상비가 증가할수록 이 구조체의 거동 및 파괴모드는 점차적으로 전단에서 휨으로 변화하고, 이에 따라 연성도 향상됨을 예측할 수 있다.
- 7) 셀 형상비가 증가할수록 전단성능을 지배하는 콘크리트 강도가 이 구조체의 하중저항성능에 미치는 영향은 줄어들고, 휨성능을 지배하는 하부 강판의 영향이 증대함을 예측할 수 있다.

참 고 문 헌

1. Chen, W. F., Dan, D. J. *Plasticity for Structural Engineers*, Springer-Verlag, 1988
2. Frits, C. W., Peter, H. F., *DIANA User's Manual : Nonlinear Analysis-Release 7*, TNO Build. and Construct. Res., 1998
3. Link, R. A., "Finite Element Analysis of Composite Ice Resisting Walls", thesis of Ph.D., Univ. of Alberta, 1992
4. Link, R. A., Elwi, A. E., "Composite Concrete-Steel Plate Walls : Analysis and Behavior", *J. of Struct. Eng.*, Vol. 121, No. 2, 1995, pp.260~271
5. Matsuishi, M., Hattori, Y., Iwata, S., Ishihama, T., Yamamoto, T., Kitazono, M., "Ultimate Strength of Composite Steel-Concrete Structures of Sandwich System", *J. SNA.*, Japan, Vol. 157, 1985, pp.233~240
6. Zimmerman, T., "Development and Testing of a Composite Ice-Resisting Wall", thesis of Ph.D., Univ. of Alberta, 1993
7. 財團法人 沿岸開發技術研究センター, *鋼コソクリートサソドイッチ構造 沈埋函の設計と高流動コソクリートの施工*, 1996
8. 정연주, "대형해양구조물에 샌드위치식 복합구조체의 적용", 대한토목학회지, 제48권, 제12호, 2000, pp.41~47
9. 정연주, 정광희, 김병석, 박성수, 황일선, "샌드위치식 강-콘크리트 복합구조체에서 하중조건·거동특성에 따른 격벽간격비의 영향", 한국콘크리트학회 학

- 술발표회 논문집, 제12권, 제2호, 2000, pp.297~302
10. 한국건설기술연구원, "Steel-Concrete Hybrid 구조체 성능평가 및 해석기법 개발", 삼성중공업, 2000
11. 정연주, 정광희, "샌드위치식 복합구조체의 거동 및 성능특성 연구", 대한토목학회 논문집, 제21권 제 2-A호, 2001, pp.255~267