

모듈 간 접합부의 축방향 한계상태에 따른 바닥 다이아프램 거동 평가

부윤섭¹ · 이상섭^{2*}

¹박사수료, 전임연구원, 한국건설기술연구원, ²공학박사, 선임연구위원, 한국건설기술연구원

Evaluation of Floor Diaphragm Behavior Based on Axial Limit States of Inter-Module Connection

Boo, Yoonseop¹, Lee, Sangsup^{2*}

¹Ph. D. Candidate, Research Specialist, Dept. of Building and Urban Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Goyang-si, Gyeonggi-do, 10223, Korea

²Ph. D., Senior Research Fellow, Dept. of Building and Urban Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Goyang-si, Gyeonggi-do, 10223, Korea

Abstract – This study evaluates the X-direction floor diaphragm behavior of a five-story RC core-modular building by comparing connecting plate axial forces with limit-state loads for friction slip, compressive yielding, and overall buckling. Response spectrum analysis was performed using MIDAS Gen for plate thicknesses of 40 mm, 20 mm, 2 mm, and 0.2 mm, without applying a floor-level diaphragm constraint. Results showed that the building lateral stiffness was governed mainly by the RC core, and connecting plate axial forces were similar regardless of plate thickness. For 40 mm and 20 mm plates, all limit-state loads exceeded the axial demands, and the deformation ratio based on cumulative axial deformation was less than 0.1, indicating rigid diaphragm behavior. In contrast, 2 mm plate exceeded the compressive yielding and overall buckling limits and showed semi-rigid behavior in some stories, while 0.2 mm plate was classified as flexible. Based on these results, an evaluation procedure for X-direction diaphragm behavior is proposed.

Keywords – Modular buildings, Floor diaphragm, Inter-module connection, Connecting plate, Limit state

1. 서론

모듈러 건축물의 바닥 다이아프램은 개별 모듈 단위로 분절되어 있기 때문에 층 전체의 면내 연속성은 모듈 간 접합부(inter-module connection, IMC)를 통해서만 확보된다^{[1],[2]}. IMC의 구조적 성능이 부족할 경우 강성 다이아프램 거동이 성립하지 않을 수 있으며, 횡력 분배의 왜곡과 과도한 층간변위가 발생할 수 있다. 특히 모듈러 건축물이 중·고층으로 확대됨에 따라 RC 코어와 모듈을 결합하는 구조 형식이 일반화되고 있으며, 이 경우 횡력은 모듈 바닥을 경유하여 코어로 전달되어

야 하므로 IMC는 하중 전달 경로에서 핵심적인 역할을 수행한다.

국외에서는 다이아프램 거동과 IMC 강성의 영향에 대해 다양한 연구가 수행되어 왔다. Srisangeerthan et al.^[3]은 강재 4층 모듈러 건축물에 대한 비선형 시간 이력해석을 통해 다이아프램 유연성 증가에 따른 층간 변위 상승과 관성력 분포의 변화를 정량적으로 보였으며, Chua et al.^[4]은 단순화된 조인트 모델이 실제 IMC 거동을 정확히 반영하지 못함을 지적하였다. Shi et al.^[5]은 연결강판 적용에 따른 다이아프램 면내 강성 향상을 실험적으로 검증하였다. 한편, Li and Jiang^[6]은 RC 모듈러 건축물에서 모듈 폭 방향(X방향) 풍하중 시 수평 접합부에 면내 축변형이 지배적으로 발생하는 반면 모듈 길이 방향(Y방향)에서는 면내 전단변형이 지배적임을 보였으며, Pan et al.^[7]은 RC 코어-모듈 복합 40층 건축물에서 접합부의 축방향이 모듈 벽체 약축과 일치할 때 축강성이 구조 응답을 지배함을 보고하였다.

Note.-Discussion open until February 28, 2027. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on May 26, 2026; revised on July 16, 2026; approved on July 21, 2026. Copyright © 2026 by Korean Society of Steel Construction

*Corresponding author.

Tel. +82-31-9100-0768 Fax. +82-31-9100-0361

E-mail. lss0371@kict.re.kr

이러한 결과는 다이아프램 거동 평가가 특정 방향에 한정될 경우 다른 방향의 접합부 부재력 상태를 간과할 수 있음을 의미한다. 최근에는 He *et al.*^{[8],[9]}이 강재 모듈-RC 코어 복합 구조 및 측면이동 허용 모듈러 강구조에 대한 접합부 강성 분류 시스템을 해석적으로 제안하기도 하였다.

국내에서도 Kim^[10], Ju^[11] 등이 모듈러 프레임-전단벽 접합부의 횡하중 전달 성능을 검증하였으며, Kwak *et al.*^[12]과 Choi *et al.*^[13]은 고층 모듈러 건축물에서 접합 방식에 따른 다이아프램 연속성 확보 효과를 비교 평가하였다.

선행 연구^[14]에서는 4Bay-5Story 강재 모듈러 건축물을 대상으로, Y방향 변위 분포를 중심으로 접합부 수평강성과 단위 모듈 수평강성의 비에 기반한 다이아프램 거동 판정 기준을 제안하였다. 그러나 이 방법은 접합부 강성비에 기반한 거시적 평가로서, X방향 하중 전달 과정에서 연결강판이 축력 전달 요소로 작용할 때 필요한 실무적 설계 검토로 직접 연결되기에는 한계가 있다. 특히, RC 코어-모듈러 구조에서 X방향 횡하중이 작용하면 모듈에서 발생한 관성력이 연결강판을 통해 코어로 전달되며, 이 과정에서 연결강판의 축방향 강성, 마찰접합의 슬립 저항성, 압축 항복 및 좌굴 한계상태가 강성 다이아프램 거동 확보 여부에 직접적인 영향을 미칠 수 있다.

이에 이 연구에서는 중앙 RC 코어와 양측 모듈로 구성된 5층 모듈러 건축물을 대상으로 X방향 지진하중에 대한 응답스펙트럼해석을 수행하고, 연결강판에 발생하는 축방향 요구력을 산정한다. 또한 고력볼트 마찰접합의 슬립 한계상태와 연결강판의 압축 항복 및 좌굴 한계상태를 검토하여, X방향 강성 다이아프램 거동 확보를 위한 연결강판의 실무적 설계 평가 절차를 제안하고자 한다.

2. 연결강판의 하중 전달과 한계상태

2.1 모듈러 건축물의 횡력 전달 메커니즘

이 연구에서 고려하는 해석 대상 건축물은 Fig. 1과 같이 중앙에 RC 코어를 두고 양측에 각 4개의 모듈을 배치한 4Bay-5Story인 RC코어-모듈러 골조의 복합 구

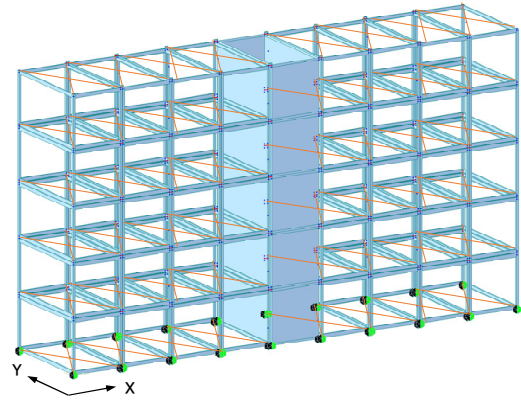


Fig. 1. Analytical model of RC core-modular building

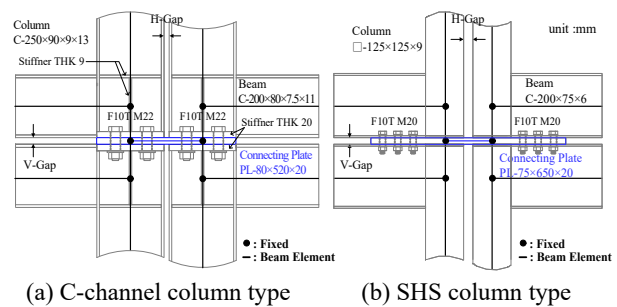


Fig. 2. Inter-module connection details with connecting plate

조이다. 모듈의 장변(6,000 mm)은 Y방향으로 나란히 배열되며, 단변(3,000 mm)이 X방향에 해당한다.

인접 모듈의 바닥보와 천장보 사이에 삽입된 연결강판은 이 연구에서 고려한 접합 상세에서 모듈 간 면내 하중 전달에 직접 관여하는 주요 요소이다. 횡하중의 작용 방향에 따라 연결강판에 발생하는 부재력과 변형 특성이 달라지므로, 연결강판의 거동은 바닥 다이아프램의 면내 연속성 평가에 중요한 영향을 미친다.

모듈 간 접합부는 연결강판(connecting plate)을 이용한 고력볼트 마찰접합 방식으로 구성되며, Fig. 2와 같이 기둥 단면 형식에 따라 서로 다른 상세가 적용될 수 있다. Fig. 2(a)는 C형강 기둥과 C형강 보로 구성된 모듈에 적용되는 접합 상세이고, Fig. 2(b)는 각형강관 기둥과 C형강 보로 구성된 모듈에 적용되는 접합 상세이다. 각형강관 기둥 유형에서는 폐쇄 단면의 특성상 기둥에 직접 볼팅하기 어렵기 때문에 연결강판이 인접 모듈의 바닥보와 천장보 플랜지 사이에 삽입되어 고력볼트로 체결된다. 이 연구의 해석모델에서는 Fig. 2(b)의 접합 상세를 대상으로 하였다.

구조해석에서는 상용 구조해석 프로그램을 이용한

거시적 모델링을 위하여 연결강판을 실제 하중 전달 경로를 대표하는 선요소로 이상화하였다.

이때 연결강판은 인접 모듈 사이에서 축방향 하중을 전달하는 요소로 모델링하였으며, 동일 층 전체를 하나의 강성 다이아프램으로 묶는 구속조건은 적용하지 않았다. 이는 X방향 횡하중 작용 시 연결강판에 발생하는 부재력과 변형을 해석 결과에서 직접 확인하기 위한 것이다. 다만 실제 접합부의 회전구속 정도와 슬립 거동은 볼트 체결상태, 접촉면 조건 및 보 플랜지의 국부강성에 따라 달라질 수 있으므로, 이 연구에서는 고력볼트 마찰접합의 슬립이 발생하지 않는 상태를 하중 전달의 기본 전제로 두었다.

Fig. 3는 X방향 및 Y방향 횡하중 작용 시 연결강판에 발생하는 대표적인 부재력과 변형 특성을 개념적으로 나타낸 것이다. 모듈러 건축물의 바닥은 개별 모듈 단위로 분절되어 있으므로, 동일 층의 면내 연속성은 모듈 간 접합부의 강성 및 하중 전달 성능에 크게 영향을 받는다.

X방향 횡하중이 작용하는 경우, 각 모듈에서 발생한 관성력은 연결강판을 통해 중앙 RC 코어로 전달된다. 이때 연결강판에는 하중 방향 및 위치에 따라 인장 또는 압축 축력이 발생할 수 있으며, 이 연구에서는 압축 축력이 지배적으로 나타나는 경우를 중심으로 연결강판의 축방향 요구력을 검토하였다. 연결강판의 강성 및 강도가 충분하고 마찰접합에서 슬립이 발생하지 않는 경우, 모듈 골조는 RC 코어와 유사한 횡방향 변위를 보

이며 층 전체의 일체 거동에 기여할 수 있다. 반면 연결강판의 축강성이 부족하거나 슬립이 발생하는 경우에는 모듈 간 상대변위가 증가하여 강성 다이아프램 거동이 저하될 수 있다.

Y방향 횡하중 작용 시 하중 방향이 연결강판의 축방향과 직교하므로 연결강판에는 면내 전단변형과 모듈 간 상대회전에 따른 축방향 인장·압축 변형이 함께 발생한다. 이러한 경우 연결강판의 전단강성뿐 아니라 모듈 간 상대회전에 저항하는 축강성도 바닥 다이아프램의 면내 연속성에 영향을 미친다. 선행 연구^[14]에서는 Y방향 횡하중에 대해 연결강판의 강성비에 기반한 강성 다이아프램 거동 평가 방법을 제시한 바 있다. 이 연구에서는 선행 연구의 Y방향 거동과 구분하여, X방향 횡하중 작용 시 연결강판에 발생하는 축방향 요구력과 하중 전달 성능을 중심으로 바닥 다이아프램 거동을 평가한다. 다음 절에서는 고력볼트 마찰접합의 슬립 한계상태와 연결강판의 압축 항복 및 좌굴 한계상태를 정리한다.

2.2 연결강판의 한계상태

X방향 횡하중 작용 시 연결강판은 인접 모듈 사이에서 축방향 하중을 전달하는 요소로 작용한다. 이 연구에서 고려한 접합 상세는 연결강판이 인접 모듈의 바닥 보 및 천장보 플랜지 사이에 삽입되고, 고력볼트 마찰접합에 의해 체결되는 형식이다. 따라서 X방향 하중 전달 성능은 크게 두 가지 조건에 의해 평가될 수 있다. 첫째, 고력볼트 마찰접합에서 슬립이 발생하지 않아야 하며, 둘째, 슬립이 발생하지 않는 상태에서 연결강판 자체가 축압축력에 대해 항복 또는 좌굴 한계상태에 도달하지 않아야 한다.

Fig. 4는 X방향 하중 작용 시 연결강판의 주요 한계상태를 나타낸 것이다. 마찰접합에서 슬립이 발생하면 연결강판과 보 플랜지 사이의 상대변위가 발생하므로, 모듈 간 일체 거동이 저하되고 강성 다이아프램 거동을 기대하기 어렵다.

고력볼트 마찰접합에서 슬립이 발생하면 연결강판과 보 플랜지 사이에 상대변위가 발생하므로, 연결강판 자체가 항복 또는 좌굴에 도달하지 않더라도 모듈 간 일체 거동이 저하될 수 있다. 따라서 슬립은 X방향 다이아프램 거동에서 우선적으로 검토되어야 하는 한계

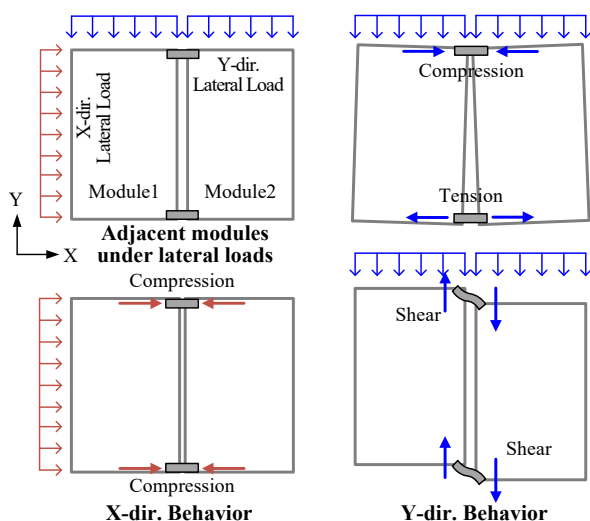


Fig. 3. Force and deformation characteristics of connecting plates under lateral loading

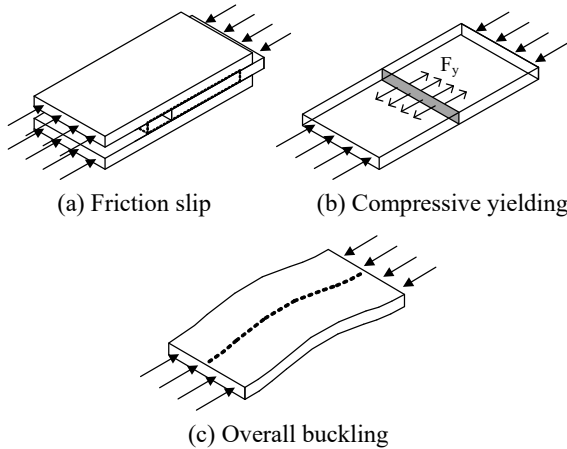


Fig. 4. Limit states considered for the connecting plate under X-direction loading

상태로 볼 수 있다. KDS^[15]의 고력볼트 마찰접합 슬립 내력 산정 수식에 따라 연결강판에 발생하는 축방향 요구력은 고력볼트 마찰접합의 슬립 하중 P_{slip} 이하여야 한다.

$$P_{slip} = \mu \cdot T_b \cdot n_s \cdot n_b \quad (1)$$

여기서, μ 는 미끄럼계수(일반 강재 접촉면 상태)이고, T_b 는 설계볼트장력이며, n_s 는 마찰면 수, n_b 는 볼트 개수이다. 슬립 이후 발생할 수 있는 볼트 지압, 연단부 파괴, 블록전단 및 볼트 전단 등은 접합부의 최종강도 확보를 위한 상세설계 항목에 해당되며, 이 연구에서는 관련 설계기준을 만족하는 것으로 가정하였다.

슬립이 발생하지 않는 경우, 연결강판은 X방향 하중에 대해 축방향 압축력을 전달하는 판형 부재로 볼 수 있다. 연결강판의 압축 항복 한계하중은 다음과 같이 산정한다.

$$P_y = F_y A_g = F_y b t \quad (2)$$

여기서, F_y 는 연결강판 강재의 항복강도, A_g 는 연결강판의 총단면적, b 는 연결강판의 폭, t 는 연결강판의 두께이다. 압축 항복은 연결강판 단면의 평균 압축응력이 항복강도에 도달하는 상태를 의미한다.

한편, 연결강판은 폭에 비해 두께가 작은 판형 부재이므로 축압축력 작용 시 면외 방향 좌굴이 발생할 수 있다. 연결강판을 축압축력을 받는 압축부재로 이상화

하면 오일러 좌굴하중은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_e = \frac{\pi^2 EI}{(k_e L)^2} \quad (3)$$

여기서, E 는 탄성계수, I 는 단면2차모멘트($=bt^3/12$), k_e 는 유효좌굴길이계수이다. 이 연구에서 연결강판 양단의 경계조건은 고정으로 가정하여 $k_e=0.5$ 를 적용하였다.

끝으로, 연결강판을 직사각형 판으로 이상화할 경우 축압축을 받는 판의 탄성 판좌굴응력은 다음과 같다.

$$P_{pl} = \sigma_{pl} b t \quad (4)$$

$$\sigma_{pl} = \frac{k_p \pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{t}{b} \right)^2 \quad (5)$$

여기서, k_p 는 좌굴계수이고, ν 는 포아송비이다. 연결강판은 압축력이 작용하지 않는 양측 비재하변이 자유단에 가까운 경계조건을 갖는다. 이 경우 판좌굴은 양방향 판좌굴이라기보다 압축재의 면외 전체좌굴과 유사한 거동이 될 것이다.

한편, 연결강판은 비재하변이 모두 자유단으로 k_p 를 독립적인 판좌굴계수로 일정하게 정하기 어렵고, 압축 부재형 좌굴모드로 환산하면 $K_p = (b/k_e L)^2$ 로 표현된다. 이 경우 동일한 재하단 경계조건에서 판좌굴하중은 오일러 좌굴하중보다 약 10 % 크게 산정되므로, 이 연구에서는 오일러 좌굴하중을 기준으로 면외 전체좌굴을 평가하였다.

3. 해석 대상 건축물 및 해석 조건

3.1 해석 대상 건축물

해석 대상 건축물은 Fig. 1에 나타난 5층 규모의 공동주택으로 RC 코어-모듈러 복합 구조이며 건축물의 전체 높이는 16,080 mm이다. 모듈 골조의 기둥은 □-125×125×9, 바닥보 및 천장보는 C-200×75×6를 사용하였으며, SS275의 강재로 적용하였다. 중앙 RC 코어는 벽 두께 200 mm의 콘크리트로 설계기준압축강도 f_{ck} 는 30 MPa로 가정하였다.

바닥 하중은 두께 150 mm의 콘크리트 바닥을 갖는 공동주택에 해당하는 고정하중과 활하중을 적용하였다. 최상층 평지붕에는 방수 및 단열층의 추가 자중을 고려하여 고정하중은 5.8 kN/m^2 , 활하중은 3.0 kN/m^2 적용하였다.

풍하중은 지표면조도구분 B, 기본풍속 28 m/s, 중요도계수 1.0으로 가정하여 계산되었다. 지진하중은 설계 응답스펙트럼을 사용하였으며, 지진구역 I (유효수평 지반가속도계수 $S=0.22$), 지반분류 S_4 , 지반증폭계수 $F_a=1.36$, $F_v=1.96$ 을 적용하였다. 이에 따른 설계스펙트럼 가속도는 $S_{Ds}=0.50$, $S_{D1}=0.29$ 이며, 중요도계수 $I_E=1.2$, 반응수정계수 $R=3.0$ 을 적용하였다. 응답스펙트럼 해석은 CQC 모드조합법을 사용하였으며 우발편심 5 %를 고려하였다.

해석에 사용한 IMC는 각형강판 기둥 유형의 연결강판으로 모듈 간 수평 방향 갭 30 mm를 반영하였고, 강종 SS275인 연결강판의 유효 길이 L 은 155 mm, 폭 b 은 75 mm로 설정하였다. 연결강판의 두께는 40 mm, 20 mm, 2 mm, 0.2 mm의 네 가지로 변화시켜 연결강판의 강도 및 강성 변화가 바닥 다이아프램 거동에 미치는 영향을 검토하였다. 2 mm와 0.2 mm는 실제 설계 적용을 위한 두께라기보다 연결강판 강성 저하에 따른 거동 변화를 확인하기 위한 극단적 변수로 설정하였다.

3.2 해석 모델링

구조 해석은 상용 구조해석 프로그램인 MIDAS Gen을 이용하여 수행하였다. 모듈 골조의 기둥과 보는 3차원 골조 요소로 모델링하였으며 중앙 RC 코어는 벽(wall) 요소로 모델링하였다. 모듈 사이의 연결강판은 2.1절에서 서술한 바와 같이 모듈 간 수평 갭과 접합 상세를 반영한 유효 길이의 보 요소로 모델링하였다. 모듈과 RC 코어 사이의 연결부도 모듈 간 연결강판과 동일한 방식의 보 요소로 모델링하였다. 따라서 모듈에서 발생한 형력은 연결강판을 통해 코어로 전달되도록 하였으며, 이는 연결강판의 요구력을 한계상태와 비교하기 위한 모델링이다.

Fig. 5의 개별 모듈 바닥은 도시에 마스터 노드를 생성하고 네 모서리 절점을 강체 링크로 연결하여 모듈 단위의 강성 다이아프램으로 이상화하였고, 동일 층에

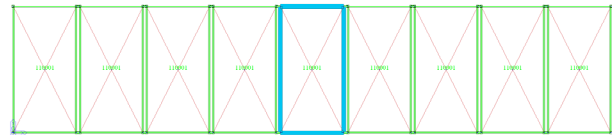


Fig. 5. Diaphragm modeling with rigid link in each module

Table 1. Maximum lateral displacement and story drift ratio

Connecting Plate Thickness (mm)	Loading Dir. Direction (X/Y)	Wind load Max. disp. (mm)	Seismic load Max. story drift ratio
40	X	0.324	0.0003
	Y	2.108	0.0004
20	X	0.336	0.0003
	Y	2.435	0.0005
2	X	0.365	0.0003
	Y	7.508	0.0016
0.2	X	0.727	0.0022
	Y	40.120	0.0122
Allowable value		32.2 (=H/500)	0.0150

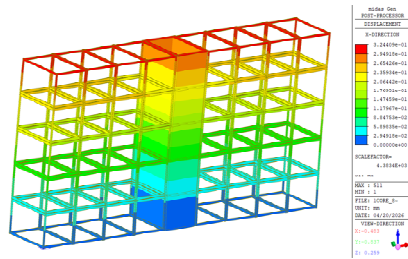
서 모듈 간을 통합하는 층 단위 다이아프램 가정은 적용하지 않았다. 이는 층 전체를 강성 다이아프램으로 가정할 경우 모듈 간 상대변위와 연결강판의 변형이 구속되어, 연결강판에 발생하는 축방향 요구력을 직접 평가하기 어렵기 때문이다. 지점 경계조건은 모든 기둥 및 코어 하부에서 병진 자유도(Dx, Dy, Dz)만을 구속하고 회전 자유도는 허용하여 핀 지지로 설정하였다.

3.3 해석결과

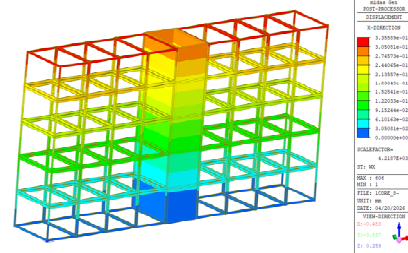
Table 1에 연결강판 두께별 풍하중에 대한 최대형변위와 지진하중에 대한 최대층간변위비를 정리하였다. 풍하중에 대한 최대형변위는 모든 경우에서 허용변위 ($H/500=32.2 \text{ mm}$) 이내이며 지진하중에 대한 최대층간변위비도 허용값 0.015를 만족한다. 즉, 건물 전체의 변위 응답만 보면 연결강판 두께와 관계없이 허용기준은 만족하고 있다.

그러나 Fig. 6에 나타난 X방향 풍하중(WX)에 대한 X방향 변위 분포를 보면, 전체 변위 크기는 허용기준 이내이지만 연결강판 두께에 따라 변형에는 뚜렷한 차이가 나타난다.

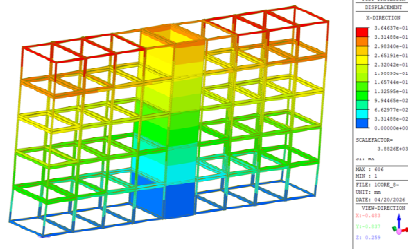
두께 40 mm 및 20 mm에서는 모듈 골조가 RC 코어의 형변위를 비교적 잘 따라가는 변형 분포를 보이나, 두께가 2 mm 이하로 감소하면 인접 모듈 사이의 상대



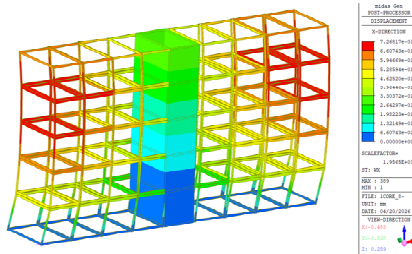
(a) Connecting plate thickness 40 mm



(b) Connecting plate thickness 20 mm



(c) Connecting plate thickness 2 mm



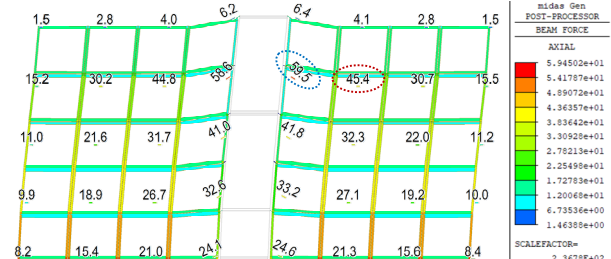
(d) Connecting plate thickness 0.2 mm

Fig. 6. X-dir. displacement distribution under wind load

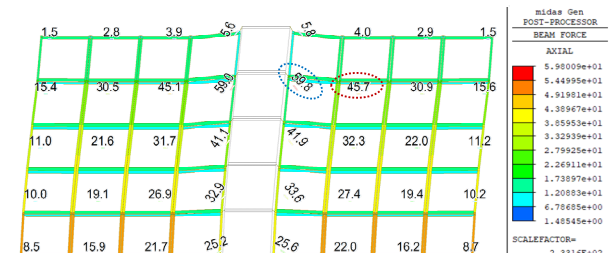
변위가 증가하고 모듈과 코어 사이 연결강판의 변형이 크게 나타난다.

이러한 결과는 전체 변위 응답이 허용기준 이내이더라도 연결강판의 강성이 부족할 경우 모듈 간 상대변형이 크게 발생할 수 있음을 보여준다. 따라서 변위 기반 평가만으로는 연결강판의 하중 전달 성능을 충분히 판단하기 어렵다. 이에 연결강판에 실제로 발생하는 부재력을 추출하여 검토하는 것이 필요할 것이다.

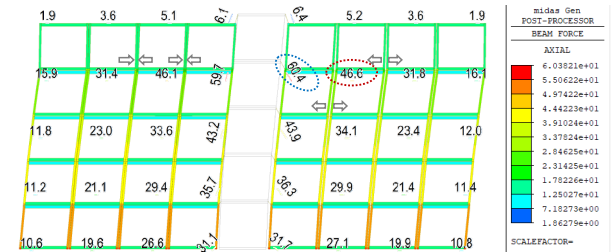
현행 설계기준에서 풍하중과 지진하중은 동시에 작용하는 하중조합으로 고려되지 않는다. 이 해석 모델에



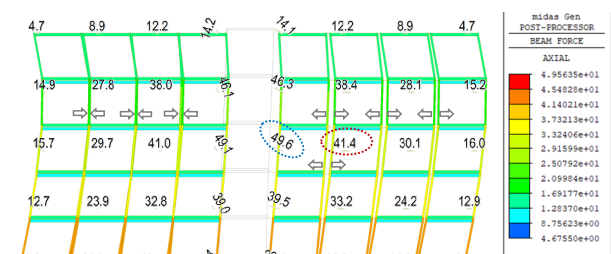
(a) Connecting plate thickness 40 mm



(b) Connecting plate thickness 20 mm



(c) Connecting plate thickness 2 mm



(d) Connecting plate thickness 0.2 mm

Fig. 7. Axial force in connecting plate under seismic load

서 X방향 풍하중과 X방향 지진하중 각각에 대해 연결강판에 발생하는 축력을 비교한 결과 지진하중에 의한 축력이 풍하중에 비해 현저히 크게 나타났다. 이에 X방향에서 연결강판에 최대 축력을 발생시킬 수 있는 하중조합인 1.2D+1.0(RX(RS)+RX(ES))+1.0L을 적용하여 연결강판의 축력을 평가하였다.

Fig. 7은 이 하중조합 하에서 연결강판에 발생하는 축력을 두께별로 정리한 것이다.

코어와 모듈 사이 연결강판의 최대 압축력은 두께

40 mm에서 약 59.5 kN, 0.2 mm에서 약 49.6 kN으로 두께 변화에 관계없이 유사하며 모듈 간 연결강판의 최대 압축력도 약 41 kN–47 kN 범위로 나타난다. 이는 건축물의 전체 횡강성이 RC 코어에 의해 지배되어 연결강판 두께 변화가 전체 횡력 분담에 미치는 영향이 제한적이기 때문으로 판단된다.

다만, 두께 2 mm 및 0.2 mm에서는 인접 모듈 기둥 사이에 밀착 또는 이격을 나타내는 상대 변형이 관찰된다. 이는 부재력의 크기는 유사하더라도 연결강판의 축방향 강성이 부족하여 과도한 변형이 발생하고 있음을 의미하며 모듈 간 갭이 닫히거나 벌어지는 거동으로 나타난다.

이런 결과는 전체 변위 응답만으로는 확인하기 어려운 문제로서 X방향 연결강판의 축방향 요구력을 슬립, 압축 항복 및 좌굴 한계하중과 직접 비교할 필요가 있음을 의미한다.

4. 연결강판의 거동 평가

4.1 부재력과 한계하중의 비교

X방향 횡하중 작용 시 연결강판에는 축력이 지배적으로 작용하므로, 본 절에서는 축력을 대상으로 한계상태와의 비교를 수행하였다. Table 2는 연결강판의 두께별로 마찰 슬립, 압축 항복 및 전체좌굴 한계하중과 X방향 최대 압축력을 비교한 것이다. 여기서 C-M은 코어와 모듈 사이, M-M은 모듈과 모듈 사이에 위치한 연결강판의 최대 압축력을 의미한다.

마찰 슬립 한계하중은 연결강판과 보 플랜지 접촉면에 별도의 표면처리를 가정하지 않은 일반 강재 접촉면 조건으로 보아 미끄럼계수 $\mu=0.3$ 을 적용하였으며, $T_b=165$ kN, $n_s=2$, $n_b=3$ 을 적용하여 297 kN으로 산정되었다. 두께 40 mm 및 20 mm에서는 최대 압축력이 약 60 kN으로 마찰 슬립 한계하중 P_{slip} 보다 작고, 압축 항복하중 P_y 와 전체좌굴하중 P_e 도 최대 압축력 P_{max} 를 크게 상회한다. 따라서 이 두 경우에는 연결강판이 검토한 한계상태에 대해 충분한 여유를 확보한 것으로 평가된다.

두께 2 mm에서는 마찰 슬립 한계하중은 최대 압축력보다 크지만, 압축 항복하중 41.3 kN과 전체좌굴하

Table 2. Limit-state loads and maximum axial forces of connecting plates

Thk.	Friction slip	Comp. yielding	Overall buckling	C-M / M-M
t (mm)	P_{slip} (kN)	P_y (kN)	P_e (kN)	P_{max} (kN)
40	297	825	134,744	59.5 / 45.4
20	297	413	16,843	59.8 / 45.7
2	297	41.3	16.8	60.4 / 46.6
0.2	297	4.1	0.017	49.6 / 41.4

중 16.8 kN이 최대 압축력 60.4 kN보다 작은 것으로 평가되었다. 따라서 이 경우에는 마찰 슬립보다 연결강판의 압축 항복 및 전체좌굴이 먼저 문제가 되며, 전체좌굴이 지배 한계상태로 평가된다. 두께 0.2 mm에서는 압축 항복하중과 전체좌굴하중이 모두 매우 작아 연결강판이 구조 부재로서의 하중 전달 기능을 확보하기 어렵다.

이상의 결과는 연결강판 두께가 20 mm에서 2 mm로 감소하는 구간에서 전체좌굴 한계하중이 최대 압축력보다 작아지며, 연결강판의 지배 문제가 강도 부족에서 좌굴로 전환됨을 보여준다. 특히 연결강판은 다른 구조 부재에 비해 상대적으로 작아 두께가 변화하더라도 부재력은 49.6 kN–60.4 kN 범위에서 유사하게 산정되며, 연결강판의 건전성은 주로 한계하중의 크기에 의해 결정된다. 이는 사용성 평가만으로는 파악하기 어려운 결과이다.

4.2 X방향 다이아프램 거동 판정

ASCE 7-22^[16]에서는 다이아프램의 최대 면내 변형 δ_{dia} 와 횡력저항시스템의 층간변위 δ_{LFRS} 를 비교하여 $\delta_{dia}/\delta_{LFRS} > 2.0$ 이면 유연 다이아프램으로 규정하고 있다.

Srisangeerthan et al.^[3]에서는 이를 확장하여 $\delta_{dia}/\delta_{LFRS} \leq 0.5$ 이면 강성, $0.5 < \delta_{dia}/\delta_{LFRS} \leq 2.0$ 이면 반강성으로 분류하였다. 이 연구에서는 강성 다이아프램 거동에 가까운 기준 변위로서 두께 40 mm 모델의 X방향 층간변위를 δ_{LFRS} 로 산정하였다. 두께 40 mm 연결강판은 4.1절에서 검토한 슬립, 압축 항복 및 전체좌굴 한계상태를 모두 만족하고 축강성도 충분하여, 모듈 골조가 RC 코어의 횡변위를 따라가는 거동을 보인다. δ_{dia} 는 각 연결강판 위치에서 Fig. 7에 정리한 축력에 의한 축변형을 다음과 같이 산정하고 코어에서 최외측 모듈까지

Table 3. Diaphragm classification based on cumulative δ_{dia}

Story	δ_{LFRS} (mm)	$t=40$ (mm)		$t=20$ (mm)		$t=2$ (mm)		$t=0.2$ (mm)	
		δ_{dia}	Class.	δ_{dia}	Class.	δ_{dia}	Class.	δ_{dia}	Class.
5F	0.806	0.004	Rigid	0.007	Rigid	0.086	Rigid	2.01	Flex.
4F	1.074	0.038	Rigid	0.077	Rigid	0.781	Semi	6.45	Flex.
3F	1.010	0.027	Rigid	0.054	Rigid	0.572	Semi	6.91	Flex.
2F	0.809	0.023	Rigid	0.046	Rigid	0.499	Rigid	5.53	Flex.
1F	0.465	0.018	Rigid	0.037	Rigid	0.451	Rigid	3.36	Flex.

경로상의 연결강판 4개소(C-M 1개소 + M-M 3개소)에 대해 이를 누적하여 산정하였다.

$$\delta_{dia} = \sum \delta_i = \sum \frac{P_i L}{E b t} \quad (6)$$

X방향에서는 모듈이 코어에서 외측으로 직렬 배치되어 있으므로 각 연결강판의 축변형이 경로를 따라 순차적으로 누적되며 이 누적값이 코어와 최외측 모듈 간의 면내 상대 변위에 해당한다. 다만 이 값은 연결강판의 축변형만 고려한 것으로 모듈 골조 자체의 면내 변형이 제외되어 실제 δ_{dia} 의 하한값에 해당한다.

Table 3는 각 층에서 산정한 δ_{dia} 와 δ_{LFRS} 의 비교 및 다이아프램 거동 판정 결과를 정리한 것이다. 두께 40 mm 및 20 mm에서는 모든 층에서 $\delta_{dia}/\delta_{LFRS}$ 가 0.1 이하로 강성 다이아프램 거동이 확보된다. 두께 2 mm는 1F, 2F, 5F에서 비율이 0.5 이하이나, 3F와 4F에서는 0.5를 초과하여 반강성 다이아프램으로 판정된다. 이 결과는 탄성 가정에 따른 하한값이며, 4.1절에서 확인한 바와 같이 두께 2 mm에서는 압축 항복 및 전체좌굴 한계하중이 이미 초과되므로 실제 δ_{dia} 는 이보다 클 수 있다. 두께 0.2 mm에서는 모든 층에서 비율이 2.0을 크게 초과하여 유연 다이아프램으로 판정된다.

이상의 결과는 한계상태 비교 결과와 일관되며, 연결강판 두께가 2 mm 이하에서는 X방향 강성 다이아프램 거동을 기대하기 어렵다는 것을 의미한다.

4.3 X방향 다이아프램 거동 판정 절차

4.1절과 4.2절의 결과를 종합하면 X방향 바닥 다이아프램 거동은 두 가지 관점에서 평가할 필요가 있다. 첫째는 연결강판에 발생하는 부재력이 한계하중을 초

과하는지 여부이고, 둘째는 연결강판의 축변형 누적에 의한 면내 변형이 강성 다이아프램 판정 기준을 만족하는지 여부이다. 두께 2 mm의 사례에서 볼 수 있듯이 사용성 평가에서는 허용기준을 만족하였으나, 한계상태 비교에서는 전체좌굴 한계하중이 초과되었고 다이아프램 판정에서도 반강성으로 전환되었다. 이는 변위 기반 평가만으로는 연결강판의 거동 평가가 어렵고, 부재력 기반 평가가 병행되어야 함을 의미한다.

따라서 X방향 다이아프램 거동은 상용 구조해석 결과를 활용하여 다음 4단계 절차로 평가할 수 있다.

첫 번째 단계에서는 연결강판을 2.1절에서 서술한 바와 같이 유효 길이를 반영한 보 요소로 모델링하고, 층 단위 다이아프램 가정은 적용하지 않는다.

두 번째 단계에서는 X방향 지배 하중조합에서 연결강판 요소에 발생하는 최대 압축력을 추출한다.

세 번째 단계에서는 추출한 부재력을 마찰 슬립, 압축 항복 및 전체좌굴 한계하중과 비교한다. 부재력이 어느 하나의 한계하중이라도 초과하면 해당 연결강판은 한계상태를 만족하지 못한 것으로 판정한다.

네 번째 단계에서는 각 연결강판의 축변형을 산정하고, 코어에서 최외측 모듈까지 누적하여 δ_{dia} 를 구한다. 이를 δ_{LFRS} 와 비교하여 $\delta_{dia}/\delta_{LFRS} \leq 0.5$ 이면 강성 다이아프램으로 판정한다.

어느 한 단계라도 만족하지 못하는 경우 연결강판의 보강 또는 접합부 상세의 변경이 필요하다. 다만 이 절차는 선형 탄성 해석에 기반하므로, 연결강판이 비탄성 거동에 진입하는 경우에는 별도의 비선형 해석이 필요하다.

5. 결론

이 연구에서는 중앙 RC 코어와 양측 모듈로 구성된 5층 모듈러 건축물을 대상으로 해석을 실시하고, 연결강판의 X방향 부재력을 마찰 슬립, 압축 항복 및 전체좌굴 한계하중과 비교하여 바닥 다이아프램 거동을 평가하였다.

- (1) X방향 횡하중 작용 시 연결강판에는 축력이 지배적으로 작용하며, RC 코어가 건축물의 횡강성을

지배하므로 연결강판 두께가 변화하더라도 부재력은 유사하게 산정되었다. 따라서 연결강판의 건전성은 부재력 변화보다 한계하중의 크기에 의해 좌우된다.

- (2) 두께 40 mm 및 20 mm의 연결강판은 마찰 슬립, 압축 항복 및 전체좌굴 한계하중이 모두 최대 압축력을 상회하였다. 반면 두께 2 mm 이하에서는 압축 항복하중과 전체좌굴하중이 최대 압축력을 하회하여, 연결강판의 압축 한계상태 검토가 필요함을 확인하였다.
- (3) 연결강판의 축변형은 코어에서 최외측 모듈까지 누적되어 다이아프램 면내 변형을 형성하므로 연결강판의 축강성이 부족할 경우 강성 다이아프램 거동이 성립하기 어려우며, 모듈 수가 증가하는 중·고층 건축물에서는 이러한 누적 효과가 더욱 커질 수 있다.
- (4) 전체 변위 기반 사용성 평가에서는 허용기준을 만족하더라도 연결강판의 한계상태가 초과될 수 있으므로 모듈러 건축물의 X방향 다이아프램 거동 평가에서는 변위 기반 평가와 부재력 기반 평가를 함께 수행할 필요가 있다.
- (5) 이 연구에서 제안한 판정 절차는 X방향 횡하중 시 연결강판에 지배적으로 발생하는 축력을 대상으로 한 선형 탄성 해석에 기반한다. 따라서 축력·전단력·휨모멘트의 조합 효과, 연결강판 및 접합부의 비탄성 거동, X·Y 양방향 복합 거동에 대한 검토는 향후 연구가 필요하다.

감사의 글

이 논문은 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원(RS-2025-25465123, RS-2025-02220885)으로 한국건설기술연구원이 수행한 결과물의 일부임(과제번호: 20250636-001, 20260231-102).

참고문헌(References)

- [1] Srisangeerthan, S., Hashemi, M.J., Rajeev, P., Gad, E., and Fernando, S. (2020) Review of Performance

Requirements for Inter-module Connections in Multi-Story Modular Buildings, *Journal of Building Engineering*, Elsevier, Vol.28, 101087, pp.1-16.

- [2] Lacey, A.W., Chen, W., Hao, H., and Bi, K. (2018) Structural Response of Modular Buildings - An Overview, *Journal of Building Engineering*, Elsevier, Vol.16, pp.45-56.
- [3] Srisangeerthan, S., Hashemi, M.J., Rajeev, P., Gad, E., and Fernando, S. (2018) Numerical Study on the Effects of Diaphragm Stiffness and Strength on the Seismic Response of Multi-Story Modular Buildings, *Engineering Structures*, Elsevier, Vol.163, pp.25-37.
- [4] Chua, Y.S., Liew, J.Y.R., and Pang, S.D. (2020) Modelling of Connections and Lateral Behavior of High-Rise Modular Steel Buildings, *Journal of Constructional Steel Research*, Elsevier, Vol.166, 105901, pp.1-17.
- [5] Shi, F.W., Ding, Y., Zong, L., Pan, W., and Dong, S. (2025) In-plane Behavior of Discretely Connected Diaphragms in Steel Modular Buildings, *Thin-Walled Structures*, Elsevier, Vol.213, 113302, pp.1-19.
- [6] Li, J., and Jiang, Y. (2025) The Impact of Diaphragm Stiffness on the Wind-Induced Lateral Force Resistance of Concrete Modular Buildings, *Proceedings of the 3rd International Conference on Green Building, Civil Engineering and Smart City (GBCESC 2024)*, Springer, pp.155-166.
- [7] Pan, W., Wang, Z., and Zhang, Y. (2022) Novel Discrete Diaphragm System of Concrete High-rise Modular Buildings, *Journal of Building Engineering*, Elsevier, Vol.51, 104342, pp.1-23.
- [8] He, X., Wei, Y., and An, Y. (2025) Analytical Model for Diaphragm Stiffness Classification Considering Stiffness of Horizontal Intermodule Joints in Steel Module-Concrete Core Structures, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol.151, No. 12, 04025205, pp.1-14.
- [9] He, X.-H.-C., Deng, L.-J., and An, Y.-H. (2025) Analytical Models of Stiffness Classification for Inter-module Region of Sway-permitted Modular Steel Structures, *Journal of Building Engineering*, Elsevier, Vol.112, 113830, pp.1-18.
- [10] Kim, H.J. (2013) *Structural Behavior of Intermediate Floor Frames Connected to Concrete Walls under Lateral Loading*, Master's Thesis, Seoul National University (in Korean).
- [11] Ju, J.H. (2025) *A Study for the Improvement of Performance of Diaphragm in High-rise Modular*

- Building through Analytical Study*, Master's Thesis, Ajou University (in Korean).
- [12] Kwak, J.S., Cho, B.H., and Ju, J.H. (2025) Analytical Study on the Diaphragm Performance of High-Rise Modular Buildings Based on Connection Method Variations, *Proceedings of the Annual Conference Korean Society of Steel Construction*, KSSC, pp.7-8 (in Korean).
- [13] Choi, J.Y., Lee, S.J., Joung, B.K., Lee, J.H., and Kim, T.J. (2025) Seismic Performance Evaluation of High-Rise Modular Buildings by Securing Diaphragm Continuity, *Proceedings of the Annual Conference Korean Society of Steel Construction*, KSSC, pp.9-10 (in Korean).
- [14] Boo, Y.S., and Lee, S.S. (2025) Evaluation of Floor Diaphragm Behavior according to Inter-Module Connection Stiffness, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.38, No.3, pp.107-115 (in Korean).
- [15] Ministry of Land, Infrastructure and Transport. (2024) *Korean Design Standard: Design of Steel Structure Connections (Load and Resistance Factor Design)*, KDS 14 31 25, MOLIT (in Korean).
- [16] American Society of Civil Engineers. (2022) *Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures*, ASCE/SEI 7-22, ASCE, USA.

요약: 이 연구는 5층 RC 코어-모듈러 건축물을 대상으로 X방향 지진하중에 대한 연결강판의 부재력을 마찰 슬립, 압축 항복 및 전체좌굴 한계하중과 비교하여 바닥 다이아프램 거동을 평가하였다. 연결강판의 두께를 40 mm, 20 mm, 2 mm, 0.2 mm로 변화시켜 MIDAS Gen을 이용한 응답스펙트럼해석을 수행하였으며, 층 단위 다이아프램 가정은 적용하지 않았다. 해석 결과 건축물의 횡강성은 RC 코어에 의해 지배되어 연결강판의 부재력은 두께 변화와 관계없이 유사한 수준으로 산정되었다. 두께 40 mm 및 20 mm에서는 마찰 슬립, 압축 항복 및 전체좌굴 한계하중이 모두 부재력을 상회하였고, 축변형 누적에 의한 변형비도 0.1 이하로 나타나 강성 다이아프램 거동으로 판정되었다. 반면 두께 2 mm에서는 압축 항복 및 전체좌굴 한계하중이 부재력을 하회하였으며, 다이아프램 변형비 산정 결과 일부 층에서 반강성 다이아프램으로 판정되었다. 두께 0.2 mm에서는 모든 층에서 유연 다이아프램으로 판정되었다. 이상의 결과를 바탕으로 X방향 다이아프램 거동 판정 절차를 제시하였다.

핵심용어: 모듈러 건축물, 바닥 다이아프램, 모듈 간 접합부, 연결강판, 한계상태
