이중골조시스템으로 설계된 복강판-모듈러 구조물의 반응수정계수에 관한 연구

Study on the Response Modification Factor for a Lightweight Steel Panel-Modular Structure Designed as a Dual Frame System

이어진¹⁾ · 홍성걸²⁾

Lee, Eo Jin · Hong, Sung Gul

국문 요약 >> 본 연구에서는 복강판-모듈러 시스템과 같이 구조 기준에 명시되지 않은 새로운 시스템의 반응수정계수를 산정하는 절차를 제안하였다. 기본 개념은 구조성능 실험결과를 바탕으로 모델링 된 시스템의 비선형 정적 해석 곡선으로부터 세부 구성요소인 초과강도계수와 연성계수의 도출하고, 단자유도 시스템으로 간주하고 평가된 반응수정계수를 다자유도 동적 거동을 고려한 다자유도 밀면전단수정계수로 수정하여 시스템의 최종적인 반응수정계수를 결정하는 것이다. 제안한 절차에 따라 이중골조시스템으로 설계된 2층부터 5층까지의 복강판-모듈러 시스템에 대해 평가한 결과, 최종적인 반응수정계수는 5층(층고 4m기준)을 복강판-모듈러 시스템의 적용 가능한 층수의 상한으로 하여 4로 결정하는 것이 타당할 것으로 판단하였다.

주요어 반응수정계수, 초과강도계수, 연성계수, 복강판 합성 전단벽, 모듈러 구조물, 다자유도 시스템

ABSTRACT >> In this present study, a response modification factor for a lightweight steel panel-modular system which is not clarified in a current building code was proposed. As a component of the response modification factor, an over-strength factor and a ductility factor were drawn from the nonlinear static analysis curves of the systems modeled on the basis of the performance tests. The final response modification factor was then computed by modifying the previous response modification factor with a MDOF (Multi-Degree-Of-Freedom) base shear modification factor considering the MDOF dynamic behaviors. As a result of computation for the structures designed as a dual frame system, ranging from 2-story to 5-story, the value of 4 was estimated as a final response modification factor for a seismic design, considering the value of 5 as an upper limit of the number of stories.

Key words Response modification factor, Over-strength factor, Ductility factor, Lightweight steel panel, Modular structure, MDOF system

1. 서 론

2003년 이후 국내에서 학교, 군 막사, 오피스텔 등 다양한 구조물에 적용되고 있는 모듈러 구조물은 인건비 및 자재 비용 상승, 숙련공 부족 등으로 인해 공기 단축의 필요성이 증대되고 있는 최근 건설 산업 현장에서 인력과 공사비를 절감시킬 수 있는 적절한 대안으로 평가 받고 있다.⁽¹⁾ 본 연구의 모듈러 구조물에는 단일한 강판을 롤포밍(Roll-forming)

라인에서 다단계로 연속 성형한 후, 접합 부위를 자동 용접기로 용접하는 방식으로 생산한 신형상보(MCO Beam)가 적용되었다(그림 1). 또한, 본 연구의 선행 연구로서 기존의 적층 방식인 하부 모듈과 상부 모듈의 기둥간 볼트 연결에 의한 횡력 전달의 취약성을 보완하기 위해, 바닥보-천정보 일체화 설계를 위한 상세 및 설계법이 개발되었고, 휨 성능 실험을 수행하여 제시한 설계 방안에 의한 모듈러 구조물의 강성 및 강도 증가를 확인하였다.⁽²⁾

그러나 이러한 일체화 설계에도 불구하고, 적층식 모듈러 시스템은 구조적으로 모멘트 저항 골조에 비해 일체성, 연속성, 부정정도가 저하되고, 적층에 의한 강한 보-약한 기둥의 시스템적 취약점으로 인해 횡력 저항 능력이 떨어진다. 이에 따라 현장 작업을 최소화 하여 공기를 단축시키는 동

¹⁾ 정회원·서울대학교 건축학과, 박사과정

²⁾ 정회원·서울대학교 건축학과, 교수

(교신저자: sglhong@snu.ac.kr)

본 논문에 대한 토의를 2011년 4월 30일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.

(논문접수일 : 2010. 9. 1 / 수정일 : 2010. 11. 24 / 게재확정일 : 2010. 11. 25)

〈그림 1〉 모듈러 건축물의 구성

〈그림 2〉 복강판-모듈러 시스템 및 복강판 합성 전단벽 단면 구성

시에 신행상보를 적용한 모듈러 구조물의 형력 저항 능력을 향상시키기 위해 외부에 강성이 큰 강판과 내부에 절곡된 강재코어를 두고 연납땜 접합(Soldering Connection)한 복강판 합성 전단벽을 개발하였다.⁽³⁾ 복강판 합성 전단벽의 내부 강재 코어는 그림 2와 같이 얇은 강판을 사다리꼴 형태로 절곡시킨 것으로, 외부 강판이 형력에 의해 조기 좌굴하는 것을 방지하기 위한 것이다. 개발된 복강판 합성 전단벽은 모듈러 골조 내에서 휨 링크(Flexural Link)로 거동하여 형력에 대해서 모듈러 골조에 우선하여 상·하부에 소성 힌지가 발생하게 된다. 따라서 주골조인 모듈러 골조가 항복하기까지 시스템은 안정적인 거동을 나타내게 되며 시스템의 전체적인 강도 및 강성이 향상된다.

현재까지 국내 건축구조설계기준에서는 구조 시스템 별로 반응수정계수를 규정하고 있는데, 개발된 복강판-모듈러 시스템은 반강접 접합부, 조립을 위한 개구부, 강한 보-약한 기둥 시스템 등의 취약점으로 인해서 내진설계기준에서 분류하는 어느 중별에도 속하지 않는다. 이에 대해, 2009년 건축구조기준에서는 기준에 열거되지 않은 지진력저항 시스템을 사용할 경우, 해석과 실험을 통하여 형력 저항능력과 에너지 소산능력이 기준의 구조시스템 중 하나와 유사한 것이 입증된다면 해당 시스템의 반응수정계수를 사용할 수 있다고 명시 하고 있다. 그러나, 개발된 시스템의 내진 성능에 크게 영향을 미칠 가능성이 있는 구조적인 특성 즉, 복강판 합성 전단벽의 이력 거동에서 나타나는 핀칭 현상 이나 모듈러 골조의 강한 보-약한 기둥 등의 영향을 간과하고 전반적인 형력저항능력과 에너지 소산능력에 의해서만 반응수

정계수를 평가하는 것은 설계의 오차를 크게 할 가능성이 있다.

따라서, 본 연구에서는 복강판-모듈러 시스템과 같은 새로운 시스템의 반응수정계수를 결정하기 위해, 시스템의 구조성능 실험 결과⁽⁴⁾를 바탕으로 구조물을 모델링하고, 이것을 이용하여 비선형 정적해석을 수행한 후 반응수정계수의 구성 요소들을 도출하였다. 특히, 외부 골조 없는 단일한 적층식 복강판-모듈러 시스템은 상기한 시스템적 취약성으로 인해 고층 시스템 보다 주로 중·저층 구조물에 적합할 것으로 판단하여 본 연구에서는 2층부터 5층까지의 복강판-모듈러 시스템을 평가 대상 구조물로 고려하였다. 이때, 이 과정으로부터 도출된 반응수정계수 R_{static} 는 해석대상 시스템을 단자유도 시스템으로 고려하고 이에 대한 정적 해석으로 도출된 변위 응답과 밀면 전단력에 의해 결정된 것으로, 실제 다층 복강판-모듈러 시스템에 대해 단자유도 정적 반응수정계수 R_{static} 가 직접적으로 사용되기 위해서는 시스템의 다양한 다자유도 동적 거동(MDOF Dynamic Effect)을 고려하여 안전성을 확보할 필요가 있다. 이에 대해 본 연구에서는 Nassar와 Krawinkler⁽⁵⁾에 의해 연구된 다자유도 밀면전단력수정계수개념을 도입하여 다자유도 동적 효과를 고려한 복강판-모듈러 시스템의 최종적인 반응수정계수 $R_{dynamic}$ 를 결정하고, 단일한 적층식 구조물로서 개발된 복강판-모듈러 시스템에 대한 적용 가능한 높이를 제안하였다.

2. 반응수정계수 제안

2.1 반응수정계수의 구성 요소

반응수정계수는 내진 설계 시 경제성, 위험성, 비선형 거동 등을 고려하기 위한 설계 계수로서 1978년 미국 Applied Technology Council에서 발행한 ATC 3-06 보고서에 처음 소개되었다. 이후, 1980년대의 버클리 대학의 연구자들에 의해 초과강도계수, 연성계수, 감쇠 계수 등을 이용한 반응수정계수가 제안되었고, ATC-19⁽⁶⁾와 ATC-34⁽⁷⁾에서는 초과강도계수와 연성계수, 여분력계수로 반응수정계수를 나타내었다. 또한, 최근 ATC-63⁽⁸⁾에서는 비선형 동적 해석에 의한 지진력 저항시스템의 붕괴 여유비(Collapse Margin Ratio, CMR)로부터 반응수정계수를 결정하는 절차가 제안되었다.

본 연구에서는 복강판-모듈러 시스템 구조성능 실험 결과를 바탕으로 반응수정계수의 주요 구성요소인 초과 강도계수 R_o (Over-strength Factor)와 연성계수 R_d (Ductility Factor)를 도출하고, 이들의 곱으로 식 (1)과 같이 단자유도 정적 반응수정계수 R_{static} 를 산정한다.

$$R_{static} = R_O \times R_\mu \quad (1)$$

2.1.1 초과강도계수

반응수정계수 산정에 있어서 구조물의 초과강도는 설계 하중 이상으로 구조물이 보유하는 내력을 의미한다. 본 연구에서는 복강판-모듈러 시스템의 초과강도계수를 평가하기 위해 IBC(International Building Code)⁽⁹⁾에서 제시한 다음과 같은 세 가지 초과강도 구성요소를 적용한다. 즉, 초과강도를 부재 단면 산정 시 여유 강도, 설계 시 최소 철근비, 횡변위 제어를 위한 처짐 제한 등의 영향으로 발생하는 설계초과강도 R_D (Design Over-strength), 부재설계 시의 강도감소계수와 변형 경화에 의한 재료초과강도 R_M (Material Over-strength), 부재 항복 이후의 소성거동에 의한 시스템 초과강도 R_S (System Over-strength)로 구분하고 각각의 기여도의 곱으로 구조물의 초과강도를 평가한다. 그림 3은 이러한 초과강도의 구성 요소들을 나타낸 것이고, 식 (2)-(4)는 각각의 초과강도계수 산정식이며, 최종적인 초과강도계수는 식 (5)와 같이 표현된다.

$$R_D = \frac{F_1}{F_E / R} \quad (2)$$

$$R_M = F_2 / F_1 \quad (3)$$

$$R_S = F_3 / F_2 \quad (4)$$

$$R_O = R_D \times R_M \times R_S \quad (5)$$

여기서, F_E/R 은 설계하중이며, F_1 은 구조물의 최초 항복 및 면 전단력, F_2 는 구조물이 최초 항복하는 시점의 실제 힘, F_3 은 시스템의 중국 횡력을 의미한다.

또한, 본 연구에서는 세부적으로 각각의 초과강도 계수 구성요소를 도출하기 위해, 박용구 등⁽¹⁰⁾의 세 가지 해석곡

〈그림 3〉 초과강도계수 구성요소

선에 의한 초과강도계수 평가에 관한 연구를 적용한다. 박용구 등은 RC 모멘트 저항 골조에 대해서 실제 구조물의 능력곡선(Curve 1), 변형 경화를 고려하지 않은 능력곡선(Curve 2), 변형경화와 강도 감소계수를 고려하지 않은 능력곡선(Curve 3)을 비선형 정적 해석에 의해 구하고 이들의 관계에 의해 초과강도 구성요소를 도출하였다. 즉, Curve 1과 Curve 2의 비교를 통해 변형경화에 의한 재료초과강도 R_{Mh} 를, Curve 2와 Curve 3의 비교를 통해 강도저감계수에 의한 재료초과강도 R_{Mr} 를 산정하고, Curve 2와 Curve 3으로부터 각각 시스템 초과강도 R_S 와 설계초과강도 R_D 를 평가하였다. 본 연구에서는 Curve 1의 도출을 위해 변형경화율 0.1을 적용하여 구조물을 해석하고, 변형경화율을 적용하지 않은 Curve 2의 각 부재의 항복 강도에 강도저감계수 0.9를 곱하여 부재의 항복강도를 저감시켜 Curve 3을 구성한다.

2.1.2 연성계수

반응수정계수 산정 시 연성도 μ (Ductility Ratio)는 식 (6)과 같이 구조물의 비선형 정적 해석 결과 도출된 항복 변위 Δ_y 와 최대 변위 Δ_u 의 비로 결정된다.

$$\mu = \frac{\Delta_u}{\Delta_y} \quad (6)$$

본 연구에서 항복변위는 FEMA 356(2003)⁽¹¹⁾에서 제시한 방법과 같이 비선형 정적 해석곡선의 내부 면적과 이선형화 한 직선의 내부 면적이 동일하도록 조정하여 얻어진다(그림 4(b)).

또한, 최대변위 결정에 있어서는 그림 4(c)의 2층 복강판-모듈러 시스템의 구조성능실험 결과에서 보여 지는 바와 같이, 지붕층 변위비 4%이후 전체 시스템의 강도 및 강성이 크게 저하되지만, 일반 모멘트저항 골조와 달리 개발된 시스템이 강한 보-약한 기둥의 취약한 구조형식을 갖게 되는 점을 감안하여, 복강판과 모듈러 기둥의 상하부 전체에 소성 힌지가 발생하는 변위비 2% 시점의 변위를 시스템의 최대 변위로 결정하는 보수적인 입장을 취한다.

이후, 본 연구에서는 ATC-19⁽⁶⁾에 제시된 Newmark 과 Hall의 주기 T 에 따른 연성도와 연성계수 사이의 관계인 식 (7)을 적용하여 앞서 산정된 구조물의 연성도 μ 로 부터 구조물의 주기에 해당하는 연성계수 R_μ 를 산정한다.

$$\begin{aligned} T < 0.03 & \quad R_\mu = 1.0 \\ 0.12 \leq T \leq 0.5 & \quad R_\mu = \sqrt{2\mu - 1} \\ T \geq 1.0 & \quad R_\mu = \mu \end{aligned} \quad (7)$$

(a) 복강판-모듈러 실험 전경

(b) 해석곡선 이상화

(c) 복강판-모듈러 하중-지붕층 변위비 관

〈그림 4〉 복강판-모듈러 시스템 구조 성능 실험 및 결과

2.2 반응수정계수 산정을 위한 구조물 모델링

그림 5는 폭 400mm 복강판 합성 전단벽의 구조 성능 실험^{(3),(4)} 결과이다. 가력 초기에 휨 거동을 보이는 이 실험체는 주기 하중에 의해 상당한 핀칭 현상을 경험 하게 된다. 이것은 복강판 합성 전단벽의 소성 힌지 발생 부분인 외부 강판의 국부 좌굴의 영향에 기인하는 것이며, 이로 인해 후 좌굴 영역의 강도감소 현상(Strength Degradation Effect)이 두드러지게 된다. 본 연구에서는 이 두 현상을 복강판 합성 전단벽 모델링에 가장 중요한 요소로 고려하였다. 본 연구에서는 OpenSees 비선형 프로그램⁽¹²⁾의 내장 함수인 Pinching 4모형을 사용하여 이력거동에 따른 강도 및 강성의 변화, 핀칭 효과 등을 고려하고 실험결과를 토대로 복강판 합성 전단벽을 모델링⁽¹³⁾하였다.

그림 5(b)는 미리 정의된 골격곡선으로 부재의 거동을 표현하는 Pinching 4 모델의 개념도로, 핀칭에 의한 영향을 $rDispP$, $rForceP$, $uForceP$ 의 변수를 사용하여 표현한다. OpenSees 비선형 프로그램에서 제공하는 Pinching 4 모델의 해석관련 함수는 식 (8)과 같다.

$$\begin{aligned} k_i &= k_0 \cdot (1 - \delta k_i) \\ \delta k_i &= (gK1 \cdot (\tilde{d}_{max})^{gK3} + gK2) \leq gKLim \\ \tilde{d}_{max} &= \max \left[\frac{d_{max i}}{def_{max}}, \frac{d_{min i}}{def_{min}} \right] \end{aligned} \quad (8)$$

여기서, def_{max} , def_{min} 는 각각 파괴를 정의하는 정(+), 부(-)

(a) 400mm복강판 합성 전단벽 실험 전경

(b) Pinching 4모델 골격곡선

(c) 실험과 해석 결과의 비교

〈그림 5〉 복강판 합성 전단벽 구조성능실험 및 모델링

방향의 변위를 나타내며, 실험결과를 바탕으로 변수 $gK1$, $gK2$, $gK3$, $gKLim$ 의 값은 각각 0.1, 0.5, 0.1, 0.9를 적용하였다. 또한, 그림 5(b) 골격곡선의 변수 $rDispP$, $rForceP$, $uForceP$ 역시 실험 결과를 바탕으로 각각 0.3, 0.5, 0.4를 사용하였다. 그림 5(c)는 이를 바탕으로 한 해석 결과와 실험결과를 비교한 것이며, 비교 결과 Pinching 4 모델은 복강판 합성 전단벽의 비선형 거동 특성을 적절히 묘사하고 있으므로, 제안된 해석방법을 통하여 복강판 합성 전단벽의 모델링이 가능하다고 판단된다.

2.3 반응수정계수 산정을 위한 구조물 설계

개발된 복강판-모듈러 시스템을 외부 골조 없는 단일한 적층식 구조체로 고려하고 층수에 따른 반응수정계수를 산정하여, 단독 구조체로서 안전한 거동을 보장할 수 있는 시스템의 반응수정계수와 층수를 평가하기 위해, 경간 6m, 전 층 층고 4m인 1경간 2층부터 5층까지의 중·저층 복강판-모듈러 골조를 설계하였다. 지진하중 산정 시 설계 조건으로

는 중·약진대 지반조건을 가정하여 국내 건축 구조기준에 따라 지역계수는 0.11, 지반 조건은 보통암 지반 S_b 으로 하였다. 주어진 조건에 따른 설계 스펙트럼은 그림 6과 같다. 앞서 언급한 바와 같이 국내의 구조설계기준은 모듈러 시스템의 구조시스템 종별을 규정하고 있지 않으므로, 본 연구에서는 복강판-모듈러 시스템을 전단벽-골조 상호작용 시스템으로 고려하여 복강판 합성 전단벽이 각 층에서 설계 층 전단력의 75%를, 모듈러 골조가 나머지 층 전단력의 25%를 부담하도록 설계하였고, 반응수정 계수는 4.5를 적용하였다. 구조물의 고정 하중과 적재 하중은 각각 40kN/m와 28kN/m로 하였고, 모듈러 구조물의 강한 보-약한 기둥 특성을 고려하여 부재를 설계하였다. 표 1은 기술한 조건에 의한 부재 설계 결과를 정리한 것이다.

〈그림 6〉 지진하중 산정을 위한 설계 스펙트럼

〈표 1〉 구조물 부재 설계

2story			
story	Column	Beam	LSP
2	175×175×11/7.5	200×200×8/12	2
1	175×175×11/7.5	200×200×8/12	3
3story			
story	Column	Beam	LSP
3	175×175×11/7.5	200×200×8/12	1
2	175×175×11/7.5	200×200×8/12	3
1	208×202×10/16	244×252×11/11	2
4story			
story	Column	Beam	LSP
4	175×175×11/7.5	200×200×8/12	2
3	175×175×11/7.5	200×200×8/12	4
2	208×202×10/16	244×252×11/11	2
1	208×202×10/16	244×252×11/11	6
5story			
story	Column	Beam	LSP
5	175×175×11/7.5	200×200×8/12	2
4	175×175×11/7.5	200×200×8/12	6
3	208×202×10/16	244×252×11/11	2
2	208×202×10/16	244×252×11/11	4
1	244×252×11/11	248×249×8/13	8

2.4 반응수정계수 산정을 위한 비선형 정적 해석

반응수정계수는 설계된 구조물의 비선형 정적 해석 곡선을 바탕으로 산정하며 본 연구에서는 OpenSees 프로그램을 이용하여 비선형 정적 해석을 수행하였다. 그림 7은 설계된 2층부터 5층까지의 구조물에 대한 변형경화와 강도저감계수 적용 유무를 고려한 비선형 해석 곡선들을 도시한 것이다. 표 2와 3은 이 성능곡선들에 의해 도출된 각각의 값들을 바탕으로 산정된 초과강도계수와 연성계수를 정리한 것이다.

표 2와 표 3으로부터 중·약진대 지반에 대한 중·저층 복강판-모듈러 시스템의 초과강도계수 R_o 는 층수에 따라 증가하는 추이를, 연성계수 R_μ 는 감소하는 추이를 보였다. 결과적으로 구조물의 비선형 정적 해석에 의한 단자유도 정적 반응수정계수 R_{static} 는 식 (1)에 의해 R_o 와 R_μ 의 곱으로 2층, 3층, 4층, 5층 구조물 각각 6.79, 7.15, 7.49, 7.85로 산정되며, R_{static} 의 이러한 층수에 따른 증가 추세는 중·약진대, 중·저층 복강판-모듈러 시스템의 경우 연성계수 보다 초과강도계수의 영향이 반응수정계수 산정에 더 크게 반영된다는 것을 시사한다.

〈그림 7〉 해석대상 구조물의 성능곡선

〈표 2〉 구조물의 초과강도계수

층	F_E/R (kN)	F_1 (kN)	F_2 (kN)	F_3 (kN)	R_D	R_M	R_S	R_o
2	62.33	83.96	83.96	162.5	1.35	1.00	1.95	2.63
3	69.33	86.57	86.57	189.82	1.25	1.00	2.19	2.74
4	78.22	92.64	92.64	232.05	1.18	1.00	2.50	2.95
5	85.92	94.8	94.8	270.52	1.10	1.00	2.85	3.14

〈표 3〉 구조물의 연성계수

층	Δ_y (mm)	Δ_u (mm)	μ	R_μ
2	60	160	2.67	2.58
3	92	240	2.61	2.61
4	126	320	2.54	2.54
5	160	400	2.5	2.5

〈그림 8〉 SDOF시스템과 MDOF시스템의 밀면전단력 관계

3. 반응수정계수 검토 및 재산정

3.1 반응수정계수에 대한 다자유도 동적거동 영향

앞서 산정한 단자유도 정적 반응수정계수 R_{static} 가 다양한 횡변위 모드에 의해 지배되는 실제 다자유도 구조물에 대해 실제적으로 사용되기 위해서는 시스템의 다양한 다자유도 동적 거동을 고려하여 수정되어야 한다. 본 연구에서는 Nassar and Krawinkler⁽⁵⁾의 연구를 바탕으로 층연성도를 기본적인 변수로 사용하여, 비탄성 다자유도 시스템과 상응하는 단자유도 시스템의 강도요구성능을 비교하여 다자유도 밀면전단수정계수(MDOF Base Shear Modification Factor), M_{MDOF} 를 도출한다. 최종적으로 복강판-모듈러시스템의 다자유도 동적 반응수정계수 $R_{dynamic}$ 는 R_{static} 를 구조물의 주기와 연성도에 따른 M_{MDOF} 로 나누어 결정하게 된다. 그림 8은 이러한 다자유도 밀면전단수정계수의 개념을 도식화 한 것이다.⁽¹⁴⁾

3.2 다자유도 밀면전단수정계수 산정

3.2.1 다자유도 복강판-모듈러 시스템 선정

복강판-모듈러 모델은 KBC 2009⁽¹⁵⁾의 등가정적 하중패턴에 따라 그림 9와 같이 설계된다. 즉, 각 부재의 강도는 모든 소성 힌지가 가정한 하중 패턴 하에서 전체 구조물에서 동시에 발생하도록 조절된다. 또한, 각 층에 대한 탄성부재강성은 KBC 2009의 등가 정적 하중패턴에 따라 내부 층간 변위(Inter-story Drift)가 동일하여 직선의 변형 모드를 갖도록 조정된다. 뿐만 아니라, 강성은 설계 기준의 하중분배에 의한 각각의 시스템의 1차 모드 주기가 KBC 2009에 의해 주어지는 주기 $T_a = C_T h_n^{3/4}$ 와 동일하도록 조절된다. 여기서 h_n 은 골조 전체의 높이이며, C_T 는 철골편심 가새골조의 계수 값 0.73으로 가정한다. 결과적으로, 복강판-모듈러 모델에 대한 1차 변형 모드 형상은 직선에 가깝게 된다. 2층, 5층, 10층, 20층(각 층 높이 4m, 각 경간 폭 6m)구조물에 대한 주기는 각각 0.35, 0.69, 1.16, 1.95이며, 층당 3개의 복강판 합성 전단벽을 포함한 모듈러 시스템을 고려한다.

1. Approximate natural frequency

$$T_a = C_T h_n^{3/4} \quad (C_T = 0.073)$$

2. Vertical seismic distribution for MDOF system

$$F_x = C_{vx} V \quad V : \text{Base shear}$$

$$C_{vx} = \frac{w_x h_x^k}{\sum_{i=1}^n w_i h_i^k} \quad w_x : \text{Weight on } x\text{-story floor} \quad h_x : \text{Height from base-story to } x\text{-story}$$

$$C_{vx} : \text{Vertical distribution factor}$$

k : Distribution factor according to a natural frequency of a structure

$k=1$: structure with a natural frequency lower than 0.5sec

$k=2$: structure with a natural frequency higher than 2.5sec

〈그림 9〉 해석 대상 구조물

3.2.2 상응하는 단자유도 시스템의 밀면전단강도

다자유도 복강판-모듈러 시스템에 상응하는 단자유도 시스템의 밀면전단강도 $V_{by,SDOF}(\mu_{allow})$ 는 해석대상 시스템 별로, 선택한 지반운동 기록에 의한 단자유도 일정 연성도 응답스펙트럼에 의해 주어진다. 본 연구에서는 중·약진대인 우리나라의 지반상태를 고려하여 표 4와 같이 SAC 지진데이터⁽¹⁶⁾ 중 재현주기 500년인 10개의 지반가속도기록에 의한 감쇠비 $\zeta=5\%$, 허용연성도 $\mu_{allow}=1,2,4,8$ 의 단자유도 일정연성도 응답스펙트럼⁽¹⁷⁾을 사용하였다. 또한, 이것은 복강판-모듈러 구조성능 실험에 의해 추정된 탄성강성 $k_1=4.19$ kN/mm, 항복 강성 $k_2=0.5$ kN/mm의 하중-변위 이력모델에 기반을 두고 작성되었다. 그림 10은 엘센트로 지반가속도 기록에 의한 일정연성도 응답스펙트럼이며, 이를 포함한 10개의 일정연성도 응답스펙트럼에 대해 각 다자유도 시스템 별 산정한 고유주기에 대응하는 설계가속도를 선택하여 그 평균값으로 단자유도 시스템의 허용 밀면전단강도 $V_{by,SDOF}(\mu_{allow})$ 를 결정하였다(그림 13).

이후, 결정된 $V_{by,SDOF}(\mu_{allow})$ 로 부터 다자유도 복강판-모듈러 시스템의 요구연성도별 밀면전단강도 $V_{by,MDOF}(\mu_{demand})$ 를 산정하는 것은 다음과 같은 가정을 기반으로 한다.

- 다자유도 복강판-모듈러 시스템의 중량은 상응하는 단자유도 시스템의 총 중량과 같다
- 다자유도 복강판-모듈러 시스템과 상응하는 단자유도 시스템은 동일한 하중-변위이력곡선을 갖는다.

위의 가정을 기반으로 다자유도 복강판-모듈러 시스템의 요구연성도별 밀면전단강도 $V_{by,MDOF}(\mu_{demand})$ 가 단자유도 시스템의 허용연성도별 밀면전단강도 $V_{by,SDOF}(\mu_{allow})$ 와 같은 값을 갖게 될 때, 다자유도 시스템의 층 요구연성도 (μ_{demand}) M_{MDOF} 와 단자유도 시스템의 허용연성도 (μ_{allow}) $SDOF$ 를 직접 비교할 수 있게 된다.

〈표 4〉 500년 재현주기 지진가속도 (LA01~LA20중)

Record	Magnitude	Scale factor	PGA (g)
Imperial Valley, 1940, El Centro	6.9	2.01	0.4613
Imperial Valley, 1979, Array #05	6.5	1.01	0.3939
Imperial Valley, 1979, Array #06	6.5	0.84	0.3017
Landers, 1992, Barstow	7.3	3.2	0.4214
Landers, 1992, Yermo	7.3	2.17	0.5201
Loma Prieta, 1989, Gilroy	7.0	1.79	0.6658
Northridge, 1994, Newhall	6.7	1.03	0.6785
Northridge, 1994, Rinaldi RS	6.7	0.79	0.5340
Northridge, 1994, Sylmar	6.7	0.99	0.5698
North Palm Springs, 1986	6.0	2.97	1.0198

〈그림 10〉 엘센트로지반운동기록에 의한 일정연성도스펙트럼 ($\mu_{allow}=1,2,4,8, \zeta=5\%$)

3.2.3 설계기준의 하중분배에 의한 시스템 설계

해석대상 시스템은 그림 9의 설계 기준식에 따라 다자유도 복강판-모듈러 시스템에 상응하는 단자유도 시스템의 허용 연성도별 밀면 전단강도를 다자유도 복강판-모듈러 시스템에 수직분포 시킴으로써, 각 다자유도 복강판-모듈러 시스템의 1차 모드 주기가 설계 기준에 의해 주어지는 주기와 동일하며 1차 변형 모드 형상이 직선에 가깝도록 설계된다.

3.2.4 층 요구연성도 산정

층 요구연성도 산정을 위해 설계된 다자유도 복강판-모듈러 시스템에 대하여 OpenSees 비선형 해석 프로그램을 이용하여 10개의 지반가속도에 대한 동적 해석을 수행하여 각 다자유도 시스템 별 동적층간변위 $\delta_{dynamic}$ 를 구한다. 이후 식 (9)에 의해 각 다자유도 복강판-모듈러 시스템 별 층 요구연성도 μ_{demand} 를 산정한다. 여기서 δ_y 는 층 항복변위이며 식 (10)의 관계로부터 얻어진다.

$$\mu_{demand} = \frac{\delta_{dynamic}}{\delta_y} \quad (9)$$

$$\delta_y = \frac{F_y}{k} \quad (10)$$

〈그림 11〉 허용연성도별 각 층수별 시스템의 층 요구연성도

각 시스템의 층강성 k 은 1차 모드 형상에 비례하여 각 층에 분배되며 각 다자유도 복강판-모듈러 시스템에 상응하는 단자유도 시스템의 설계 가속도 A_y/g 와 시스템별 중량 W 을 곱하여 다자유도 시스템의 각각의 요구 연성도에 대한 밀면 전단항복강도 $V_{by,MDOF}(\mu_{demand})$ 를 구한다. 이후, 1차 모드 형상에 비례하여 밀면전단항복강도를 각 층에 분배하여 층항복강도 F_y 를 결정하고, 최종적으로 층요구연성도 μ_{demand} 를 산정한다.

그림 11은 각 층별 시스템에 대한 층 요구연성도 산정결과를 허용연성도별로 정리한 것이다. 산정 결과 대부분의 경우 높은 허용 연성도에 대해 설계된 시스템일수록 1층의 층 요구연성도가 증가하는 경향을 보였다. 이러한 경향은 다자유도 시스템에 대한 밀면전단수정계수를 평가할 때 1층의 층 요구연성도가 허용연성도를 초과하지 않도록 보장해야 함을 시사하는 것이다.

3.2.5 다자유도 밀면전단수정계수 산정

앞서 구한 층 요구연성도를 바탕으로 다자유도 밀면 전단수정계수를 산정하는 절차는 다음과 같다.

- ① 허용연성도 $\mu_{allow}=1,2,4,8$ 에 대한 단자유도 시스템의 정규화된 항복강도 $(\overline{V}_{by})_{SDOF}$ 산정

$$(\overline{V}_{by})_{SDOF} = V_{by,MDOF}(\mu_{demand}) / V_{by,\mu_{allow}=1} \quad (11)$$

허용연성도 $\mu_{allow}=1,2,4,8$ 에 대한 다자유도 복강판-모듈러

〈그림 12〉 정규화된 강도와 요구 연성도의 관계

러 시스템에 상응하는 단자유도 시스템의 밀면전단강도는 10개의 지반운동에 대한 일정연성도 응답스펙트럼으로부터 얻어지며, 식 (11)에 의해 정규화된 항복강도 $(\overline{V}_{by})_{SDOF}$ 를 도출한다.

그림 12는 다자유도 시스템과 단자유도 시스템의 요구연성도와 그에 상응하는 정규화된 항복강도를 그래프로 나타낸 것이며, 그래프의 선형 보간을 통해 요구연성도 $\mu_{demand} = 1, 2, 4, 8$ 에 대한 각 층수별 다자유도 시스템의 정규화된 항복강도 $(\overline{V}_{by})_{MDOF}$ 를 얻을 수 있다.

- ② 허용연성도 $\mu_{allow} = 1, 2, 4, 8$ 에 대한 다자유도 복강판-모듈러 시스템 밀면전단강도 $(V_{by}/W)_{MDOF}$ 산정

$$(V_{by}/W)_{MDOF} = (\overline{V}_{by})_{MDOF} \times (V_{by}/W)_{SDOF, \mu_{allow}=1} \quad (12)$$

이후, 식 (12)에 의해 허용연성도별 다자유도 밀면 전단강도를 산정하며, 그림 13은 이것과 단자유도 밀면전단강도의 변화 추이를 층수의 함수로 도시한 것이다. 도시 결과, 허용연성도 $\mu_{allow} = 2, 4, 8$ 에 대하여 다자유도 복강판-모듈러 시스템은 같은 중량과 고유주기를 갖는 단자유도 시스템에

비하여 동일한 허용연성도에 대해 더 큰 밀면전단강도로 설계되어야 함을 알 수 있다.

- ③ 층수별 다자유도 복강판-모듈러 시스템의 다자유도 밀면전단수정계수 산정

$$\text{Base Shear Modification Factor, } M_{MDOF} = \frac{(V_{by}/W)_{MDOF}}{(V_{by}/W)_{SDOF}} \quad (13)$$

결국, 그림 13의 각 그래프에서 점선의 단자유도 밀면전단강도에 대한 실선의 다자유도 밀면전단강도의 비가 다자유도 밀면전단수정계수 M_{MDOF} 가 되며, 그림 14는 산정결과를 주기와 허용연성도의 관계로 나타낸 것이다.

3.3 반응수정 계수 재산정

그림 15는 주어진 주기에 대한 다자유도 시스템과 등가의 단자유도 시스템의 $R-\mu$ 관계 개념도이다. 그림에서 점 1은 단자유도 시스템의 허용연성도 μ_{allow} 와 관련한 강도능력 (Strength Capacity)이다. 점 2에서 보여지는 바와 같이 다자유도 시스템은 동일한 강도 능력에 대해 더 큰 연성도 μ_{demand} 가 요구되며, 다자유도 요구연성도를 허용연성도로

〈그림 13〉 다자유도 시스템과 상응하는 단자유도 시스템의 요구밀면전단력

〈그림 14〉 허용연성도와 주기별 다자유도 밀면전단수정계수

제한하여 점 3을 얻는다. 이때, 점 1과 점 3의 반응수정계수의 비가 동일한 허용연성도비를 갖는 단자유도와 다자유도 시스템의 강도 능력비의 역수, 즉 3.2.5에서 제시한 다자유도 밀면전단수정계수가 된다.

$$R_{dynamic} = \frac{R_{static}}{M_{MDOF}} \quad (14)$$

〈그림 15〉 단자유도시스템과 다자유도시스템의 $R-\mu$ 관계

최종적으로, 다자유도 동적 효과를 고려한 반응수정계수 $R_{dynamic}$ 는 그림 15의 개념을 기초로 2.4절에서 산정한 2층부터 5층까지의 복강판-모듈러 시스템의 단자유도 반응수정계수 R_{static} 를 그림 14의 각 시스템들의 주기 T 에 따른 선형 보간을 통해 도출된 각각의 다자유도 밀면전단수정계수 M_{MDOF} 로 나누어 표 5와 같이 결정할 수 있다.

〈표 5〉 각 시스템의 R_{static} , M_{MDOF} , $R_{dynamic}$

층	$T(sec)$	R_{static}	M_{MDOF}	$R_{dynamic}$
2층	0.86	6.79	1.24	5.48
3층	1.15	7.15	1.42	5.04
4층	1.32	7.49	1.69	4.43
5층	1.59	7.85	1.95	4.03

4. 결론

본 연구에서는 복강판-모듈러 시스템과 같이 기준에 명시되지 않은 새로운 시스템의 반응수정계수를 결정하는 절차를 제안하고, 중·저층 복강판-모듈러 시스템을 대상으로 다자유도 동적 반응수정계수를 산정한 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 중·약진대, 중·저층 복강판-모듈러 시스템의 비선형 정적 해석곡선으로부터 초과강도계수와 연성계수를 도출한 결과, 초과강도계수의 영향이 보다 지배적임을 알 수 있었고, 2층부터 5층까지의 단자유도 정적 반응수정계수는 각각 6.79, 7.15, 7.49, 7.85로 산정되었다.
2. SAC 지진데이터 중 재현주기 500년인 10개의 지반가속도기록에 의한 동적 해석에 의해 해석대상 시스템의 다자유도 밀면전단수정계수를 도출한 결과 2층부터 5층까지 각각 1.24, 1.42, 1.69, 1.95로 결정되었고, 이로부터 개발된 복강판-모듈러 시스템에 대한 다자유도 동적 효과는 높이에 따라 전반적으로 증가하는 추세를 확인하였다.
3. 제안한 절차에 따른 다자유도 동적 효과를 고려한 반응수정계수는 2층부터 5층 시스템 별로 각각 5.48, 5.04, 4.43, 4.03으로 산정되었고, 높이에 따라 감소하는 추이를 보였다. 이러한 감소 추이로부터, 5층을 초과하는 외부 골조 없는 단일한 적층식 복강판-모듈러 시스템은 다소 보수적인 내진설계가 이루어질 것으로 판단하여, 본 연구의 복강판-모듈러 시스템의 최종적인 반응수정계수는 5층(층고 4m 기준)을 복강판-모듈러 시스템의 적용 가능한 층수의 상한으로 하여 4로 결정하는 것이 적절할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 논문은 건설교통부가 출연하고 포항산업과학연구원(RIST)과 경남대학교에서 공동 수행한 “공기 단축형 복합 구조시스템 건설기술 개발사업”(05-건설핵심-D02) 연구의 일환으로 수행되었으며, 지원에 감사 드립니다.

본 연구는 서울대학교 공학연구소의 논문게재료 지원사업의 지원을 받아 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고 문헌

1. 이철호, 김정재, 홍성길, 조봉호, 김홍진, “모듈러 공법 적용을 위한 신형상 냉간성형 철골보의 휨거동,” 대한건축 학회 학술 발표대회, 제26권, 제 1호, 277-280, 2006.
2. 이철호, 김정재, 홍성길, 조봉호, 김홍진, 한규홍, “실대형 구조 실험에 의한 신형상보 모듈러 건축물의 내진/내풍성능 평가,” 대한건축학회 학술발표대회, 제 27권, 제 1호, 29-32, 2007.
3. 정경수, 정진안, 조봉호, 홍성길, 정종현, “반복 횡하중을 받는 복강판 패널의 구조성능에 대한 실험적 연구,” 대한 건축학회 논문집, 제 24권, 제 2호, 35-42, 2008.
4. 정경수, 정진안, 조봉호, 홍성길, 정종현, “반복횡전단을 받는 복강판 패널의 구조성능평가,” 대한건축학회 학술발표 대회, 제 27권, 제 1호, 41-44, 2007.
5. Nassar, A. A., Krawinkler, H., “Seismic Demands for SDOF and MDOF Systems,” John A. Blume, *Earthquake Engineering Center, Report, No. 95*, Stanford University, Stanford, California, 1991.
6. ATC, Structural Response Modification Factors, *ATC -19 Report*, ATC, Redwood City, California, 1995.
7. ATC, A Critical Review of Current Approaches to Earthquake-Resistant Design, *ATC-34 Report*, ATC, Redwood City, California, 1995.
8. ATC, Quantification of Building Seismic Performance Factors, *ATC-63 Project*, FEMA 695, Washington. D.C., 2009.
9. International code council, 2009 *International Building Code*, International Code Council, INC. 2009.
10. 박용구, 고현, 이동근, “RC 모멘트저항골조의 초과강도 평가,” 한국지진공학회 학술발표대회, 제 12권, 321-328, 2008.
11. FEMA, Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings, *FEMA-356*, Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C., 2000.
12. Silvia, M., et al., OpenSees Command Language Manual, 2007.
13. Moon, J. H., “Experimental Study on Lightweight Steel Panels Subjected to Cyclic Loading,” Master’s Thesis, Seoul National University, 2009.
14. Lee, E. J., “Seismic Behavior and Response Modification Factors for Lightweight Steel Panel-Modular Systems,” Master’s Thesis, Seoul National University, 2010.
15. 대한건축학회, 건축구조설계기준, KBC 2009, 2009.
16. Somerville, P., Smith, N., Punnyamurthula, S., Sun, J., “Development of Ground Motion Time Histories for Phase 2 of the FEMA/SAC Steel Project,” SAC Joint Venture, *Report, No. SAC/BD-97/04*, 1997.
17. Chopra, A. K., *Dynamic of Structures*, Prentice-Hall, New Jersey, 257-304, 1995.