

기동-보 휨강도비와 단위하중법을 이용한 철골모멘트골조의 강성설계기법

오 병 관¹ · 박 효 선¹ · 최 세 운^{2*}

¹연세대학교 건축공학과, ²대구가톨릭대학교 건축학부

Drift Design Method of Steel Moment Frames by using Column-Beam Strength Ratios and Unit-Load Method

Byung-Kwan Oh¹, Hyo-Seon Park¹ and Se-Woon Choi^{2*}

¹Department of Architectural Engineering, Yonsei Univ., Seoul, 06285, Korea

²Department of Architecture, Catholic Univ. of Daegu, Gyeongsan, 38430, Korea

Abstract

This paper presents the resizing method of columns and beams that considers column-to-beam strength ratios to simultaneously control the initial stiffness and ductility of steel moment frames. The proposed method minimizes the top-floor displacement of a structure while satisfying the constraint conditions with respect to the total structural weight and column-to-beam strength ratios. The design variable considered in this method is the sectional area of structural members, and the sequential quadratic programming(SQP) technique is used to obtain optimal results from the problem formulation. The unit load method is applied to determine the displacement participation factor of each member for the top floor lateral displacement; based on this, the sectional area of each member undergoes a resizing process to minimize the top-floor lateral displacement. Resizing members by using the displacement participation factor of each member leads to increasing the initial stiffness of the structure. Additionally, the proposed method enables the ductility control of a structure by adjusting the column-to-beam strength ratio. The applicability of the proposed optimal drift design method is validated by applying it to the steel moment frame example. As a result, it is confirmed that the initial stiffness and ductility could be controlled by the proposed method without the repetitive structural analysis and the increment of structural weights.

Keywords : steel moment frame, drift design, unit load method, column-to-beam strength ratio

1. 서 론

철골모멘트골조는 기동-보 접합부가 강접합되어 있기 때문에 철골모멘트골조의 휨강성과 강도는 기동과 보의 강성과 강도에 의해 결정된다. 따라서 부재의 강성과 강도는 전체 구조물의 거동을 결정짓는 주요 인자가 된다(Bruneau *et al.*, 1997).

철골모멘트골조의 내진설계는 부재의 강도뿐 아니라 층간 변위를 검토한다(IBC 2015, 2015; KBC 2016, 2016). 과도한 층간변위가 발생하게 되면 구조재 및 비구조재의 막대한 손상, 구조물의 붕괴 등을 초래하기 때문에 층간변위를

구조설계단계에서 검토할 필요가 있다. 강진지역의 철골 모멘트골조의 경우, 층간변위 조건은 강도조건보다 해당 구조물의 구조설계에 지배적인 설계 요소로 알려져 있다(Foutch and Yun, 2002; Liu *et al.*, 2005). 이러한 이유로 구조물의 변위를 조절하는 강성설계가 이루어지고 있다. 그러나 구조물의 층간변위는 여러 부재의 영향에 의해서 결정되기 때문에 엔지니어의 경험과 직관에 의한 강성설계는 비경제적인 설계가 이루어질 수 있다.

이러한 문제를 해결하고자 지진하중을 받는 건물에 대한 최적강성설계에 관한 연구가 활발히 이루어져 왔다. Park과

* Corresponding author:

Tel: +82-53-850-2736; E-mail: watercloud@cu.ac.kr
Received October 25 2016; Revised November 14 2016;
Accepted November 15 2016

©2016 by Computational Structural Engineering Institute of Korea

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Kwon(2003)은 응답스펙트럼해석 모듈과 민감도 해석 모듈을 이용한 철골모멘트 골조의 최적강성설계 모델을 제시하였다. Seo 등(2008)은 단위하중법을 이용하여 부재의 변위기여도를 계산하고 이를 통해 각 부재의 단면 크기를 반복 계산없이 재설계하는 최적강성설계기법을 제시하였다. 이는 변위기여도에 근거하여 부재의 물량을 재분배하기 때문에 구조물의 물량 증가없이 구조물의 강성을 증가시킨다. Al-Ansari와 Senouci (2011)은 일반화된 단자유도 시스템에 근거한 등가정적지진 하중을 받는 고층건물에 대한 최적강성설계모델을 제시하였다. 그러나 이들은 탄성범위 내에서의 성능만 고려하였고, 비탄성 성능에 대한 검토는 이루어지지 않았다. 모멘트 골조의 경우 탄성 범위 내에서의 강성을 증가시키기 위해서는 보의 크기는 증가시키고, 기둥의 크기는 감소시키는 것이 효율적이다. 그러나 이는 기둥의 조기 붕괴를 유도하여 구조물의 취성 파괴 가능성을 증가시킨다.

한편, 성능기반설계와 같은 지진설계철학은 빈번하게 발생하는 지진수준에 대해서는 손상이 없어야 하며, 드물지만 큰 지진수준에 대해서는 붕괴가 일어나지 말아야 한다는 개념을 가지고 있다(Chan and Zou, 2004; FEMA 273, 1997).

따라서 지진하중에 대한 모멘트골조의 강성설계에서는 탄성 성능 뿐 아니라 비탄성 성능에 대한 고려가 필요하다. Chan과 Zou(2004)은 Optimality Criteria(OC) 기법을 이용한 RC 모멘트 골조의 최적 강성설계 모델을 제시하였다. 이것은 탄성 최적화와 비탄성 최적화로 구분된다. 탄성 최적화 단계에서는 층간변위 제약조건을 만족시키면서 콘크리트 물량을 최소화하는 RC 부재의 단면 크기를 선형정적해석을 통해 결정한다. 비탄성 최적화 단계에서는 RC 부재의 단면 크기는 고정시키면서 철근비를 설계변수로 한다. 층간변위 제약조건을 만족시키면서 철근 물량을 최소화하는 철근비를 비선형 정적 해석을 통해 결정한다. 그러나 이것은 탄성해석 및 비선형 정적해석을 반복적으로 수행해야 하는 단점을 가진다. 현재 실무에서 구조물의 내진설계를 위해서 등가정적지진하중을 이용한 정적탄성해석을 주로 사용하고 있기 때문에 비선형 정적해석을 반복적으로 수행해야 하는 이와 같은 방법의 적용성은 한계를 가진다.

이 밖에 Genetic Algorithm(GA)을 이용한 최적구조설계에 관한 연구가 이루어지고 있다(Liu *et al.*, 2006; Atabay and Gulay, 2009; El Semelawy *et al.*, 2012; Gong *et al.*, 2012). 이것은 반복적인 구조해석을 요구하기 때문에 과도한 계산량이 발생하여 실무 적용에는 한계를 가진다.

본 연구에서는 정적탄성해석을 이용하여 철골모멘트골조의 탄성 및 비탄성 내진성능을 조절할 수 있는 최적강성설계모델을 제시한다. 제시된 방법은 구조물량과 기둥-보 접합부의 휨강

도비에 대한 제약조건을 만족하면서, 구조물의 최상층 변위를 최소화하도록 하는 문제로 정식화한다. 이는 단위 하중법에 의해 계산된 각 부재의 변위기여도에 근거하여 부재 사이즈를 재결정하기 때문에 물량의 증가없이 탄성범위 내에서의 강성을 증가시킬 수 있다. 즉, 반복적인 구조해석 없이 변위기여도에 따라 각 부재의 물량을 효율적으로 재분배하게 된다. 동시에 각 접합부에 대한 휨강도비를 일정 크기 이상이 되도록 제약하기 때문에 기둥의 물량이 보의 물량으로 과도하게 재분배되는 것을 방지하고 이를 통해 구조물의 비탄성 성능도 조절할 수 있다.

ANSI/AISC 341-05(2005)는 모멘트골조의 연성거동을 확보하기 위해 강기둥-약보 개념을 제시하고 있다. 이는 접합부를 구성하는 기둥의 휨강도 합이 보의 휨강도 합보다 크게 설계해서, 지진 거동 시 기둥보다는 보에서 먼저 소성 힌지 발생하도록 한다. 이를 통해 구조물의 소성변형을 고르게 분포시킴으로써 안정적으로 지진에너지를 소산시키도록 한다. 따라서 휨강도비 제약은 비탄성해석 없이 부재의 휨강도만으로 구조물의 연성능력을 확보하는데 효과적으로 적용될 수 있다. 제시된 기법을 검증하기 위해 3층 철골모멘트 골조 예제를 사용하였다. 이를 통해 얻은 설계안들에 대하여 선형정적해석, 비선형정적해석을 수행하고 이의 결과를 분석하였다.

2. 단위하중법을 이용한 변위기여도 계산

본 연구에서는 구조물의 초기 강성을 증가시키기 위하여 구조물 최상층 변위를 최소화시키는 방법을 사용한다. 구조물의 최상층 변위를 최소화시키기 위해 최상층 변위에 대한 각 부재들의 기여도가 정확히 계산되어야 한다.

단위 하중법을 이용하면 최상층 변위에 대한 각 부재의 기여도가 정량적으로 계산되며, 이를 각 부재의 변위기여도라 부른다. 최상층 변위에 대한 각 부재의 변위기여도는 식 (1)과 같이 선형정적해석 결과인 부재력과 부재 성능을 적분하여 구할 수 있다(Seo and Park, 2010).

$$\delta = \sum_{i=1}^k \delta_i \tag{1}$$

$$= \sum_{i=1}^k \left(\int_0^l \frac{N^R N^U}{EA} dx + \int_0^l \frac{M^R M^U}{EI} dx + \alpha \int_0^l \frac{V^R V^U}{GA_z} dx \right)_i$$

여기서, δ 와 δ_i 는 각각 제어하고자 하는 변위와 i 번째 부재의 변위기여도를 나타낸다. k 는 구조물을 구성하는 부재의 개수이다. N, M, V 은 각각 축력, 모멘트, 전단력을 의미한다. 상첨자 R 과 U 는 실제 하중과 단위 하중을 나타낸다. A, E, I, A_z, G, α 는 각각 부재의 총 단면적, 탄성계수, 단면2차

모멘트, 전단 단면적, 전단탄성계수, 형상계수를 나타낸다. 식 (1)에서 부재 변위기여도(δ_i)는 조절하고자 하는 변위(δ)에 대한 각 부재의 기여도를 나타내며, 변위 기여도의 합은 조절하고자 하는 절점의 변위가 된다. 그러므로 부재 변위기여도는 조절하고자 하는 변위에 대한 각 부재의 정량적인 기여도가 되며 변위를 효율적으로 제어하기 위한 정보를 제공해 준다.

3. 정식화

본 연구에서는 선형정적해석을 이용하여 철골모멘트골조의 강성을 최적화하는 기법을 제시한다. 제시하는 기법은 단위 하중법을 이용하여 각 부재의 크기를 재설계함으로써 구조물의 강성을 조절한다. 또한 접합부의 기둥-보 휨강도비 제약조건을 활용하여 구조물의 비탄성거동을 간접적으로 조절하도록 한다.

본 연구에서는 식 (2)와 같이 최상층 변위를 최소화하는 목적함수를 사용하며, 식 (3)~(5)과 같이 구조 물량과 접합 부별 휨강도비에 관한 제약조건을 사용한다.

$$\text{Minimize } \delta = \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\beta_i} \tag{2}$$

$$\sum_{i=1}^n \rho(\beta_i A_i) l_i \leq \gamma \sum_{i=1}^n \rho A_i l_i \tag{3}$$

$$\frac{\sum M^{pc}}{\sum M^{pb}} \geq \alpha_j \tag{4}$$

$$LB_i \leq \beta_i \leq UB_i \tag{5}$$

여기서, δ 는 최상층의 횡변위이다. β_i 와 δ_i 는 각각 i 번째 부재의 단면조절계수와 최상층 변위에 대한 변위기여도를 의미한다. ρ 는 재료의 단위중량을 의미한다. A_i 와 l_i 는 각각 i 번째 부재의 단면적과 부재길이를 의미한다. γ 는 전체 구조물의 물량조절계수으로써, 재분배 전후의 물량비에 대한 제한치를 의미한다. α_j , M^{pc} , M^{pb} 는 각각 j 번째 접합부의 휨강도비, 기둥과 보의 소성휨강도를 의미한다. n 과 m 는 각각 구조물을 구성하는 총 부재 개수와 접합부의 개수이거나 혹은 그것들의 일부일 수 있다. LB_i 와 UB_i 는 각각 i 번째 부재의 단면변화 비율에 대한 하한치와 상한치를 의미한다.

식 (3)은 제안하는 기법 적용 전후의 구조물량 변화를 제한하는 조건이다. 이는 전체 물량조절계수 γ 를 이용하여 최적화 모델 적용 후의 구조물량이 적용 전의 물량보다 γ 배 이하가 되도록 한다는 의미이다

식 (4)는 고려하는 절점에서의 기둥-보 휨강도비가 일정 크기 이상이 되도록 하는 것이다. 이는 구조물의 연성을 확보

하기 위한 ANSI/AISC 341-05(2005)의 강기동-약보 조건 으로부터 아이디어를 가져왔기 때문에, M^{pc} , M^{pb} 를 계산하는 방법은 ANSI/AISC 341-05(2005)의 절차를 따른다.

식 (5)는 변위기여도에 근거하여 부재 단면을 변경할 때 급작스런 변화를 방지하기 위하여 부재 단면의 변화를 의미 하는 단면조절계수 값의 범위를 설정한다.

단면조절계수 β_i 는 제안하는 최적화 기법에서 사용되는 설계변수으로써, 부재 단면을 재설계하는데 이용된다. 값에 따라 해당 부재의 크기가 결정되는데, 이 값이 1.0보다 크면 해당 부재의 변위기여도가 커서 부재 단면이 증가한다는 것을 의미한다. 반면, 이 값이 1.0보다 작으면 해당 부재의 변위 기여도가 작아서 부재 단면이 감소한다는 것을 의미한다. 즉, β_i 의 값이 1.0보다 작은 부재에서 β_i 의 값이 1.0보다 큰 부재로 물량이 재분배됨을 의미한다.

본 연구에서는 부재의 단면적 A_i 과 관련된 단면조절계수 β_i 를 설계변수로 설정하였으나, 식 (4)에서 M^{pc} , M^{pb} 는 소성 단면계수 Z_i 의 함수로 표현된다. 따라서, 소성단면계수 Z_i 를 단면적 A_i 으로 표현된 식으로 변환할 필요가 있다. 이를 위해 Fig. 1과 같은 기둥과 보가 각각 선택할 수 있는 단면 리스트의 회귀분석식을 이용한다. 본 연구에 고려된 단면은 기둥 25개(W14), 보 54개(W36 22개, W33 12개, W30 7개, W27 7개, W24 6개)이다. Fig. 1에 표현된 회귀분석을 적용하게 되면 식 (2)~(5)에서 미지수는 단면조절계수 β_i 만 남게 된다. 따라서, 제약조건식 (3)~(5)를 만족시키면서 목적함수 식 (2)를 충족시키는 변수 β_i 를 찾을 필요가 있다.

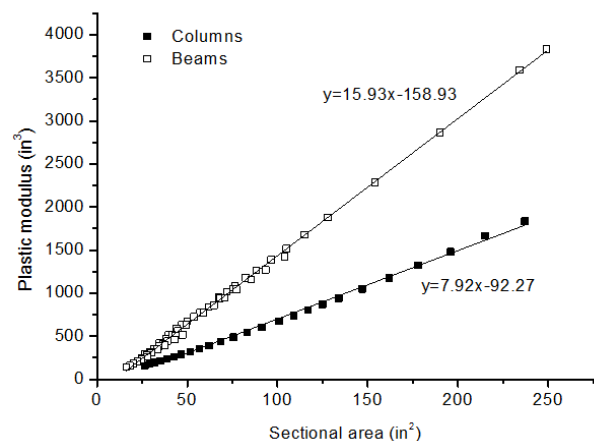


Fig. 1 Relations of sectional areas and plastic modulus

4. 최적강성설계기법

본 연구에서는 위 정식화 문제를 Sequential Quadratic

Programming(SQP) method(Belegundu and Chandrupatla, 1999)를 이용하여 β_i 을 얻도록 하였다. SQP를 통해 얻은 β_i 은 부재마다 다른 값을 가질 수 있다. 그러나 동일한 층의 보는 일반적으로 같은 단면을 가진 부재로 그룹핑하는 것처럼 실제 구조물의 기둥과 보는 그룹핑이라는 개념을 이용하여 사용되는 부재 단면의 종류를 최소화하고 이를 통해 시공의 편의성을 도모한다. 실 구조물의 적용성을 향상시키기 위해서, 본 연구에서 제시하는 최적화 기법에서도 그룹핑 개념을 도입하였다. 이는 같은 그룹에 속한 부재들의 β_i 에 대한 평균값을 구하고 이를 해당 부재의 β_i 로 수정하여 동일 그룹 내의 모든 부재들은 동일한 β_i 를 가지도록 한다.

SQP를 통해 얻은 β_i 를 해당 부재의 A_i 에 곱하면 i 번째 부재의 새로운 단면적 $\beta_i A_i$ 을 얻을 수 있다. 이는 β_i 가 연속형 변수이기 때문에 상용 형강의 단면이 아닐 수 있다. 따라서 제안된 모델은 사전에 결정한 i 번째 부재가 선택할 수 있는 형강 리스트에서 새롭게 얻은 단면적에 가까운 단면적을 가진 형강의 단면 성능을 새로운 i 번째 부재의 단면 성능으로 수정한다.

모멘트골조는 보가 기둥보다 휨강성 기여가 크다(Taranath, 1998). 따라서 물량을 재분배하게 되면 기둥의 물량이 보의 물량으로 이동하면서 초기 강성이 커진다. 그러나 이는 기둥 붕괴로 인한 연성능력 저하와 연약층 등과 같은 취성 파괴를 일으킬 가능성이 커진다. 따라서 기둥 부재는 $\beta_i A_i$ 와 같거나 큰 기둥 단면 리스트 중에서 가장 작은 단면적을 가진 단면을 선택하도록 하고, 보 부재는 $\beta_i A_i$ 와 같거나 작은 보 단면 리스트 중에서 가장 큰 단면적을 가진 단면을 선택하도록 하였다.

그리고 기둥의 시공성을 고려하기 위해 수직으로 연속된 기둥 부재들의 단면적을 비교한다. 만약 하부 기둥의 단면적이 상부 기둥의 단면적보다 작다면 하부 기둥의 단면을 상부 기둥의 단면으로 수정하도록 한다.

본 연구에서 제시하는 강성설계기법의 과정은 아래와 같다.

- (1) 초기 설계안을 가정하고, 구조물의 목표 성능을 설정한다.
- (2) 실제 설계하중과 최상층에 작용하는 단위하중에 의한 부재력을 구조해석을 통해 구한다.
- (3) 식 (1)을 이용하여 각 부재의 변위기여도 δ_i 를 계산한다.
- (4) 재설계하고자 하는 부재의 개수를 가정한다.
- (5) 휨강도비 제약 조건을 적용할 접합부를 가정한다.
- (6) 제한치의 범위(γ , LB_i , UB_i , α_j)를 설정한다.
- (7) 최적화 문제를 SQP 기법을 통해 단면조절계수 β_i 를

구한다.

- (8) 그룹핑 조건을 고려하여 각 부재의 단면을 결정한다.
- (9) 상용 DB를 고려하여 부재 단면을 재선정하고, 시공성 제약조건을 검토하여 이를 위배할 경우 해당 부재의 단면을 수정한다.
- (10) 목표 성능 조건을 검토하여, 이를 위배할 경우 (4)~(6) 단계에서 설정한 값을 수정하여 위 과정을 설계 조건을 만족시킬 때까지 반복한다.
- (11) 강도 조건을 검토하여, 이를 위배하는 부재의 단면은 단면 크기를 증가시킨다.

5. 예제 적용

5.1 예제 개요

제시된 최적설계기법은 Fig. 2와 같은 3층 철골모멘트골조에 적용하였다(Choi and Park, 2011). 외부기둥, 내부기둥, 보를 각각 3개씩의 설계변수로 그룹핑하여 총 9개의 부재 단면의 크기를 조절하여 물량을 재분배하도록 하였다. 제시하는 기법의 성능을 검증하기 위해 재분배 전후에 따른 구조물의 탄성 및 비탄성 성능 등을 평가하였다. 본 연구에서는 구조물의 탄성 및 비탄성 성능으로 초기 강성 및 강도와 연성률 및 에너지소산량을 고려하였다. 에너지소산량은 FEMA 356에서 제시하고 있는 붕괴방지 성능수준에 해당하는 최대 층간변위를 5.0%에 다다를 시점까지의 푸쉬오버 그래프의 면적으로 계산하였다. 강도설계와 푸쉬오버 해석은 Midas Gen과 OpenSees를 이용하였다.

본 연구에서 제시하는 최적설계기법은 식 (4)에 나타난 것과 같이 구조물의 연성 능력을 조절하기 위해 기동-보 휨강도비 α_j 를 사용한다. 즉, 제약하는 휨강도비에 따라 구조물의 성능이 달라질 수 있다. 본 연구에서는 휨강도비에

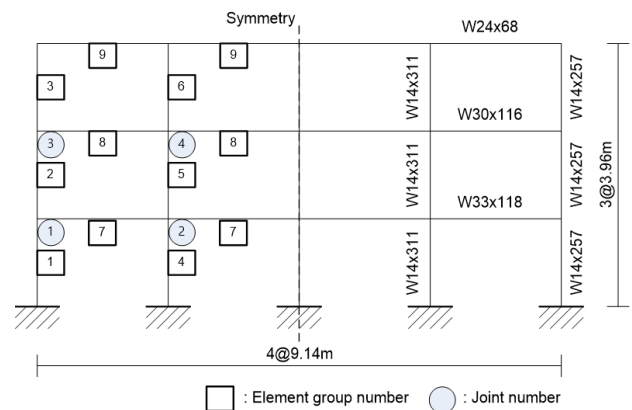


Fig. 2 Pan view of an example structure

Table 1 Column-to-beam strength ratio of Case 1,2

Joint number	Case 1	Case 2
1	1.0	1.8
2	1.0	1.1
3	1.0	1.8
4	1.0	1.1

따른 영향을 알아보기 위해 Table 1과 같이 각기 다른 휨강도비 제약이 사용된 두 가지 예제(Case 1, Case 2)를 사용한다. Case 1은 ANSI/AISC 341-05에서 제시하는 최소 휨강도비인 '1.0'을 고려한 경우이며, Case 2는 Choi *et al.* (2013)이 제시한 휨강도비를 고려한 경우이다.

제시된 최적화기법에서는 식 (4)에 제시된 것처럼 전체 구조물의 물량조절계수 γ 를 이용하여 재분배 후의 구조물 무게를 조절한다. 본 연구에서는 재분배 후의 물량 증가가 없도록 γ 에 '1.0'을 적용하였다.

5.2 결과 및 분석

예제 적용을 통해 Table 2와 같은 결과를 얻었다. 4절에서 설명된 최적화 과정 중 단계 (8)에서 얻은 설계안을 intermediate design으로 정의하였으며, 단계 (11)까지 적용하여 얻은 설계안을 final design으로 정의하였다. Case 1과 Case 2의 intermediate design의 무게는 초기설계안과 동일한 것으로 나타났다. 따라서 적용된 최적설계기법의 의도한 대로(재분배 전후 물량 변화가 없도록) 적용된 것을 확인할 수 있다. 한편, 단계 (9)~(11)을 거치면서 물량의 변화가 발생하는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 3은 내진설계과정에서 널리 사용되는 등가 정적 지진하중을 적용하였을 때 발생하는 층간변위율을 나타낸 것이다. Case 1과 Case 2의 층간변위율 값이 초기설계안 보다 작은 것을 확인할 수 있다. 이는 제시된 최적화기법을 통해 초기강성이 향상된 설계안을 얻을 수 있음을 의미한다.

Table 3은 비선형정적해석을 통해 얻은 결과를 정리하였다. 설정한 휨강도비에 따라 초기강성뿐만 아니라 연성율이 조절되는 것을 Case 1과 Case 2의 비교를 통해 확인할 수 있다. Case 1처럼, 일반적으로 초기 강성이 증가하면 연성

Table 2 Comparisons of weight results

Design	Initial design	Case 1		Case 2	
		Intermed-iate	Final	Intermed-iate	Final
Weight (kN)	413.41	413.41	416.11	413.41	413.10
Ratio (%)	-	100.00	100.65	100.00	99.92

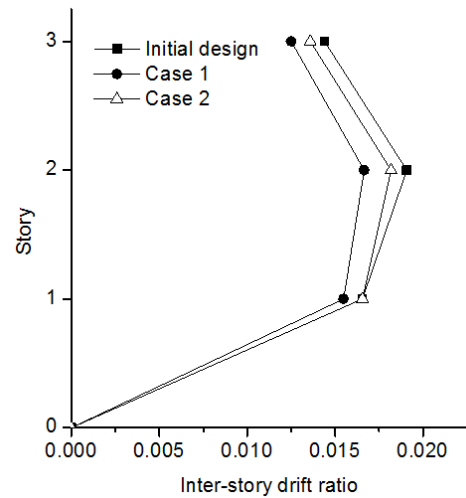


Fig. 3 Distribution of inter-story drift ratios by linear static analysis

Table 3 Comparisons of results by nonlinear static analysis

Performance index	Initial design	Case 1		Case 2	
	Value	Value	Ratio(%)	Value	Ratio(%)
Initial stiffness (kN/cm)	488.62	559.14	114.43	509.60	104.29
Yield strength (kN)	6,636.16	8052.60	121.34	7,222.88	108.84
Ductility	4.11	3.46	84.06	3.85	93.69
Dissipated energy (kN*cm)	362,975	374,290	103.12	379,866	104.65

능력은 저하가 된다. 그러나 휨강도비를 적절히 사용한다면, Case 2처럼 초기 강성을 증가시키면서 연성 능력의 저하율을 감소시킬 수 있는 설계안을 얻을 수 있음을 확인할 수 있다. Table 3에서 초기강성과 항복강도는 Fig. 4에 나타난 푸쉬오버 곡선에서의 초기 기울기와 기울기가 변경되는 지점에서의 밀면전단력을 의미한다. 그리고 연성율은 Fig. 4에서 C.P. level 변위를 항복변위로 나눈 값이며, 소산에너지는 C.P. level 변위까지의 푸쉬오버곡선의 아래면적을 의미한다.

재분배과정을 통해 물량의 이동을 분석하기 위해 Fig. 5에 부재별 물량 분포를 나타내었다. 설계안 Case 1과 Case 2의 물량은 기둥에서 보로 이동한 것을 확인할 수 있다. 이는 1절에서 언급한 것처럼 모멘트골조에서 휨강성을 증가시키기 위해서는 기둥보다는 보의 강성을 증가시키는 것이 보다 효율적이라는 것을 의미한다. Case 1보다 Case 2의 물량 변화율이 작게 나타남에 따라 휨강도비 제약조건이 저자의 의도(기둥에서 보로 과도한 물량 이동 제한)가 적절히 반영된 것으로 판단된다.

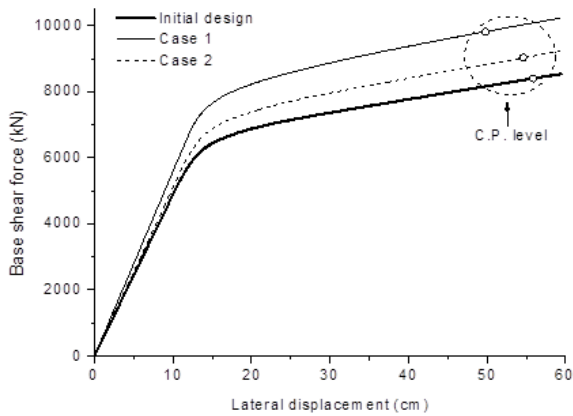


Fig. 4 Comparison of pushover curves

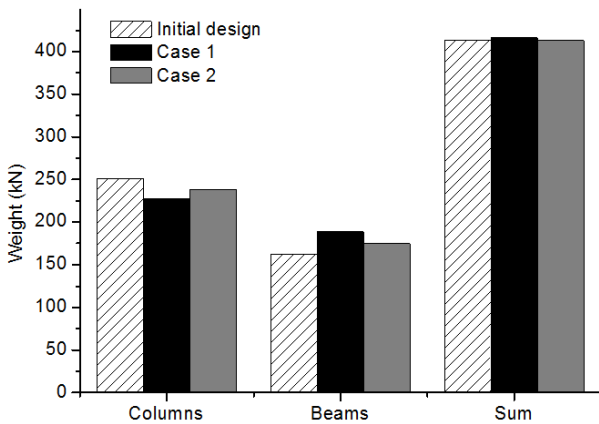


Fig. 5 Comparison of member weights

6. 결 론

본 연구에서는 정적탄성해석 기반 철골모멘트골조의 초기 강성 및 연성을 조절하는 최적강성설계기법을 제시하였다. 이는 변위기여도를 이용하여 구조물을 이루는 구조 부재의 단면적을 재조정한다. 이는 변위기여도가 상대적으로 작은 부재의 물량을 변위기여도가 큰 부재로 분배시켜 초기 강성을 향상시키는 효과를 가진다. 한편, 구조물의 초기강성을 증가시키면 연성능력이 떨어지는 것으로 알려져 있다. 이러한 문제를 고려하기 위해, 모멘트골조의 연성능력을 확보하기 위해 사용되는 강기둥-약보(strong column-weak beam) 개념을 채용하였다. 재분배 과정에서 절점별 휨강도비 제약 조건을 고려하도록 이용하여 구조물의 초기강성뿐만 아니라 연성능력을 동시에 조절하도록 하였다.

제시된 모델의 검증을 위해 3층 철골모멘트골조 예제를 사용하였다. 휨강도비에 대한 영향을 고려하기 위해 최소 휨강도비가 다른 제약조건을 각각 적용하여 두개의 설계안(Case 1, Case 2)를 얻고, 이를 초기설계안과 성능을 비교하였다. 두개의 설계안의 초기강성은 초기설계안보다 증가하는

것을 확인할 수 있었다. 연성 성능에 대해서는 두개의 설계안 모두 초기설계안의 연성 성능보다 감소되는 것으로 나타났다. 그러나 휨강도비를 어떻게 조절하느냐에 따라 연성능력의 감소량을 줄일 수 있는 것으로 나타났다. 이를 통해 제시된 기법은 구조물의 초기 강성과 연성을 효과적으로 조절할 수 있음을 확인할 수 있었다.

초기 강성을 증가시키기 위해 기둥의 물량이 보의 물량으로 분배되는 것으로 나타났다. 그러나, 이는 '약기둥-강보(weak column-strong beam)' 현상이 초래되어 연성능력이 떨어지게 된다. 한편, 제약하는 최소 휨강도비를 증가시킨 경우(Case 2)에서는 기둥에서 보로 분배되는 물량이 Case 1보다 적은 것으로 나타났다. 이를 통해 Case 2의 초기강성은 Case 1의 초기강성보다 작지만 연성능력은 향상되었다.

본 연구에서 제안하는 기법은 철골구조부재의 단면적을 이용해 휨강도비를 추정하게 되며(Fig. 1 참조), 평면 골조에 대하여 검증되었다. 따라서, 3차원의 실 철골구조물에 대한 적용성 검토가 추가적으로 요구된다.

감사의 글

이 논문은 2014년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. NRF-2014R1A1A2059874).

References

- Al-Ansari, M., Senouci, A. (2011) Drift Optimization of High-rise Buildings in Earthquake Zones, *The Struct. Des. Tall & Special Build.*, 20(2), pp.208~222.
- ANSI/AISC 341-05 (2005) Seismic Provisions for Structural Steel Buildings, *Am. Inst. Steel Constr.*
- Atabay, S., Gulay, F.G. (2009) The Study of the Effect of Changes in Cost of the Materials Used in 3-D Shear-Wall Reinforced Concrete Structures on the Optimum Dimensions, *Expert Syst. Appl.*, 36(3), pp.4331~4337.
- Belegundu, A.D., Chandrupatla, T.R. (2011) Optimization Concepts and Applications in Engineering, *Cambridge University Press*.
- Bruneau, M., Uang, C.M., Whittaker, A. (1997) Ductile Design of Steel Structures, *McGraw-Hill, USA*.
- Chan, C.M., Zou, X.K. (2004) Elastic and Inelastic Drift Performance Optimization for Reinforced

- Concrete Buildings under Earthquake Loads, *Earthq. Eng. & Struct. Dyn.*, 33(8), pp.929~950.
- Choi, S.W., Park, H.S.** (2011) Inter-story Drift Design Method to Improve the Seismic Performance for Steel Moment Frames, *J. Comput. Struct. Eng. Inst. Korea*, 24, pp.707~714.
- Choi, S.W., Kim, Y., Lee, J., Hong, K., Park, H.S.** (2013) Minimum Column to Beam Strength Ratios for Beam - Hinge Mechanisms based on Multi-Objective Seismic Design, *J. Constr. Steel Res.* 88, pp.53~62.
- El Semelawy, M., Nassef, A.O., El Damatty, A.A.** (2012) Design of Prestressed Concrete Flat Slab using Modern Heuristic Optimization Techniques, *Expert Syst. Appl.*, 39(5), pp.5758~5766.
- FEMA 273** (1997) NEHRP Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings, *Fed. Emerg. Manag. Agency*.
- Foutch, D.A., Yun, S.Y.** (2002) Modeling of Steel Moment Frames for Seismic Loads, *J. Constr. Steel Res.*, 58(5-8), pp.529~564.
- Gong, Y., Xue, Y., Xu, L., rierison, D.E.** (2012) Energy-based Design Optimization of Steel Building Frameworks using Nonlinear Response History Analysis, *J. Constr. Steel Res.*, 68(1), pp.43~50.
- IBC 2015** (2015) International Building Code, *International Code Council*.
- KBC 2016** (2016) Korea Building Code, *Architectural Institute of Korea*.
- Liu, M., Burns, S.A., Wen, Y.K.** (2005) Multiobjective Optimization for Performance-Based Seismic Design of Steel Moment Frame Structures, *Earthq. Eng. & Struct. Dyn.*, 34(3), pp.289~306.
- Liu, M., Burns, S.A., Wen, Y.K.** (2006) Genetic Algorithm Based Construction Conscious Minimum Weight Design of Seismic Steel Moment Resisting Frames, *J. Struct. Eng.*, 132(1), 50~58.
- Park, H.S., Kwon, J.H.** (2003) Optimal Drift Design Model for Multi-Story Buildings Subjected to Dynamic Lateral Forces, *The Struct. Des. Tall & Special Build.*, 12(4), pp.317~333.
- Seo, J.H., Song, W.K., Kwon, Y.H., Hong, K., Park, H.S.** (2008) Drift Design Model for High-rise Buildings Based on Resizing Algorithm with a Weight Control Factor, *The Struct. Des. Tall & Special Build.*, 17(3), pp.563~578.
- Seo, J.H., Park, H.S.** (2010) Design Method to Control Wind-Induced Vibration of High-Rise Buildings Using Resizing Algorithm, *J. Comput. Struct. Eng. Inst. Korea*, 23, pp.465~474.
- Taranath, B.** (1998) Steel, Concrete and Composite Design of Tall Buildings, *McGraw-Hill*.

요 지

본 논문에서는 철골모멘트골조의 초기 강성과 연성을 동시에 조절하기 위해 기둥-보 휨강도비를 고려한 재분배 기법이 제시된다. 제시되는 기법은 총 구조물량과 기둥-보 휨강도비에 대한 제약조건을 만족시키면서 구조물의 최상층의 변위를 최소화한다. 고려된 설계변수는 구조부재의 단면적을 사용하며, 정식화된 문제로부터 최적의 결과를 얻기 위해 Sequential Quadratic Programming(SQP) 기법을 사용한다. 최상층의 횡변위에 대한 각 부재의 변위기여도를 단위하중법을 통해 구하고, 이를 최상층의 횡변위가 감소하도록 각 부재의 단면을 재설계한다. 각 부재의 변위기여도를 이용하여 부재의 단면을 재설계하는 과정은 구조물의 초기 강성을 향상시키는 효과를 가진다. 동시에, 제시된 기법은 기둥-보 휨강도비를 제약함으로써 구조물의 연성을 조절하도록 한다. 제시된 최적변위설계기법은 철골골조 예제에 적용하여 적용성을 검증한다. 적용한 결과 제시된 기법을 통해 구조물의 초기강성과 연성능력이 조절되는 것을 확인할 수 있었다.

핵심용어 : 철골모멘트골조, 강성설계, 단위하중법, 기둥-보 휨강도비