

정적해석을 이용한 내진성능평가의 타당성

Validity of Seismic Performance Evaluation Using Static Analysis

원 학 재* 한 상 환** 이 리 형***
Won, Hak-Jae Han, Sang-Whan Lee, Li Hyung

ABSTRACT

The purpose of this study is to evaluate the validity of seismic performance evaluation using static analysis. For this purpose, Ordinary Moment Resisting Steel Frames(OMRSF) for different heights(3, 6, 9, 12 story) and seismic zones(Zone 2A, 2B, 3, 4) were designed in compliance to AISC LRFD 1993 Seismic Provisions and NEHRP 1994 Guidelines.

Nonlinear Static Procedure(NSP) and Nonlinear Dynamic Procedure(NDP) with a set of ground motion record were used to evaluate seismic demands in OMRSFs. Using the DRAIN-2DX program, this study compares peak displacement demands(Target Displacement) proposed by FEMA 273 with the peak roof displacement demands obtained from the inelastic time history analyses. Based on the results, the validity of procedure of seismic demand evaluation using Target Displacement is discussed.

1. 서 론

내진설계된 골조는 지진발생시 요구수준에 대한 충분한 강도와 변형에 대한 성능을 보유해야 하며, 이상적인 내진성능평가는 그 지역을 대표할 수 있는 여러 가지의 지진들을 사용한 비선형 시간이력해석을 통하여 이루어져야 한다. 그러나, 특별한 경우를 제외하고는 비선형 시간이력해석의 수행은 시간을 많이 요하며, 이러한 면에서 다소 비경제적이라 할 수 있다. 이러한 단점을 보완하고 성능과 변형 요구수준을 좀 더 간단히 평가하기 위한 방법으로 비선형정적 Pushover 해석을 이용하고 있으며, 이러한 추세는 점점 증가하고 있다. 이 절차는 질량의 위치에서 만들어진 상대적인 관성력을 대략으로 나타내는 횡하중패턴을 적용하는 것과 이 하중 패턴하에서 설계지진시에 예상되는 변형수준까지 구조물에 횡력을 가하는 것을 포함한다.

비선형정적해석의 목적은 지진발생시에 골조의 부재력과 골조 전체, 또는 국부적인 변형에 대한 개략적인 값과 취약부분의 생성에 대한 정보를 얻기 위함이다. 또한 이러한 값을 통하여 골조 시스템의 안전성을 평가하게 된다. 일반적으로 이러한 개략적인 값들은 설계지진에 대해서 예상되는 최대지붕층변위에서 골조의 거동으로부터 얻는 것이 일반적으로 행해지는 방법이다. 하지만 비선형정적해석은 이론적인 배경이 확실하지 않으며, 정확한 값이 아닌 개략적인 값을 얻는다는 단점을 가지고 있다. 그러나, 이러한 단점에도 불구하고 비선형정적해석을 이용하는 것은 간단한 방법으로 해석을 수행할 수 있으며, 중요한 부재들의 변형요구에 대한 개략적인 값을 얻을 수 있고, 강도와 강성의 불연속과 같은 불리한 상황을 알 수 있으며, 큰 변형요구에 대한 취약부분과 골조의 전반적인 안정성에 대해서 알 수 있기 때문이다.

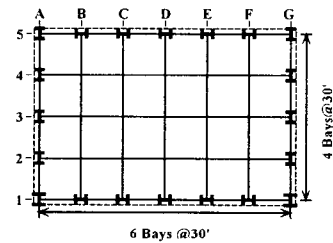
* 한양대학교 건축공학부 대학원
** 한양대학교 건축공학부 조교수
*** 한양대학교 건축공학부 정교수

Push-over 해석의 결과에 대한 평가는 골조가 설계지진에 대하여 예상되는 변위와 같은 지붕층변위에서 이루어진다. 그러므로 동적해석에서의 지붕층변위는 Push-over 해석의 변위 제어에 대한 목표를 정하기 위해서 평가될 필요가 있다. 일단 변위가 1차 모드 진동에 대해서 제어된다면 즉 고차모드의 영향이 크지 않은 골조에서 이러한 사항들은 좀 더 유효성을 가지게 된다. 기존에 이러한 부분에 대한 많은 연구가 이루어져 왔으며, 미국의 FEMA273 내진설계지침서에서는 목표변위(Target Displacement)란 개념을 도입하여 동적해석을 수행하지 않고도 일어날 수 있는 골조의 최대변위를 예상하는 식을 제안하고 있다. 이에 본 연구에서는 골조를 지진구역별로 3, 6, 9, 12층으로 설계를 수행한 후 모델링을 하여 비선형정적해석과 동적해석을 수행, 목표변위와 최대 동적변위응답을 비교하여 내진성능의 평가시 비선형정적해석에서 목표변위의 사용의 타당성에 대해서 논의한다.

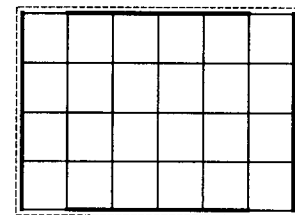
2. 대상골조

대상골조는 횡하중 작용시 변위에 의하여 설계가 지배되는 페리미터(Perimeter) 골조로서 NEHRP1994 내진설계지침서와 AISC LRFD Seismic Provision(1993)을 적용하여 사무소용도의 철골 보통모멘트골조를 중력하중, 지진하중에 대하여 설계를 하였다. 각 지진구역별(Zone 2A, 2B, 3, 4)로 지진하중에 대해서 중·저층을 대표할 수 있는 3, 6, 9, 12층의 총 16개의 골조를 설계하였다.

기둥의 간격은 30ft이며 골조의 총고는 3층골조의 경우 모든층이 13ft이며, 6, 9, 12층골조의 경우, 1층이 18ft, 그 이외의 층은 13ft이다. 기둥은 A572 Grade 50의 강재를 사용하였으며, 보는 A36의 강재를 사용하였다. 강도보다는 규준에서 정하는 변위기준에 따라서 부재의 단면을 결정하였다. 설계 수행 후 결과로서 접합부패널존의 보강덧판은 필요하지 않았다.



[그림 1] 대상골조의 평면



[그림 2] 모멘트저항골조

3. 목표변위(Target Displacement)

목표변위를 구하는 방법은 성능스펙트럼법(Capacity Spectrum Method)과 변위계수법(Displacement Coefficient Method)의 두 가지가 있다. 본 연구에서는 FEMA 273에서 제안하는 변위계수법을 이용하여 연구를 진행한다. FEMA 273에서는 다이어그램 역할을 하는 슬래브를 가진 골조에 대하여 건물의 비선형응답을 고려하여 목표변위 제안된 절차를 이용하여 구한다.

설계지진에 대한 골조의 개략적인 최대변위응답(목표변위)을 산정하는 개념은 주어진 탄성 설계응답스펙트럼의 가속도에서의 등가의 탄성 SDOF의 변위($S_d = S_a(T_e/2\pi)^2$)를 구한 다음, 변위조정계수 C_0, C_1, C_2, C_3 를 이용하여 본래의 골조의 변위응답을 구하는 것이다.

$$\delta_i = C_0 C_1 C_2 C_3 S_a \left[\frac{T_e}{2\pi} \right]^2$$

계수 C_0 는 MDOF 골조의 지붕층변위와 등가의 SDOF의 변위 사이의 차이에 대한 조정계수로서 지붕층에서의 1차모드 참여계수($\Gamma_{1,}$)와 같으며, 식으로는 다음과 같이 표현한다.

$$C_0 = \Gamma_{1,r} = \phi_{1,r} \frac{\{\phi_1\}^T [M] \{1\}}{\{\phi_1\}^T [M] \{\phi_1\}} = \phi_{1,r} \Gamma_1$$

위의 식에서 $\phi_{1,r}$ 은 1차모드 Shape Vector이며, Γ_1 은 1차모드 Mass 참여계수이다. FEMA 273에서는 목표변위를 좀 더 간략하게 구하기 위하여 각 층에 대한 계수의 값을 표에서 제안하고 있다.

계수 C_1 은 선형탄성응답에서 계산된 변위에 대해서 예상되는 최대 비탄성변위에 대한 조정계수로서, 다음의 식을 따른다.

$$C_1 = 1.0 \quad \text{for } T_e \geq T_0 \quad C_1 = [1.0 + (R-1)T_0/T_e] \quad \text{for } T_e < T_0$$

위 식에서 R 은 계산된 항복강도계수에 대한 탄성 강도요구의 비로서, $\frac{S_a}{V_y/W} \frac{1}{C_0}$ 로 구한 값이다.

위 식에서 정적항복변위(V_y)는 골조의 밀면전단-지붕층변위 곡선에서 초기강성과 면적의 이선형-다이어그램에 의해서 다선형 밀면전단-지붕층변위 다이어그램을 대체하여 평가된다.

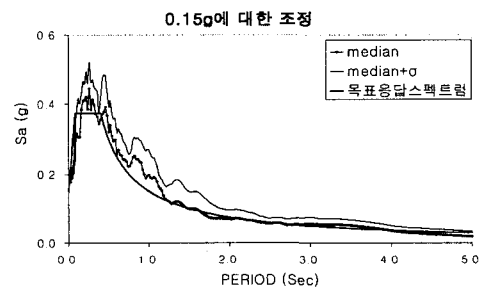
계수 C_2 는 강성저하, 강도저하 등의 이력모델의 영향을 고려하기 위한 조정계수로서 FEMA 273에서는 그 값을 표로서 제안하고 있다.

계수 C_3 는 항복 후 강성을 고려하기 위한 조정계수. 즉, 동적 $P-\Delta$ 효과에 의해서 증가되는 변위량을 조정하기 위한 계수로서 유효탄성강성과 후탄성강성의 비율(α)에 따라 그 값이 변화하며, 다음의 식을 이용하여 그 값을 구한다. C_3 의 값은 선형해석에서의 C_3 의 값을 초과해서는 않된다.

$$C_3 = 1 + \frac{|\alpha|(R-1)^{3/2}}{T_e} \quad \text{when } \alpha < 0 \quad C_3 = 1.0 \quad \text{when } \alpha \geq 0$$

4. 동적해석에 사용된 지진 기록

비선형동적해석을 수행하기 위하여 각 지진구역에 따라서 설계응답스펙트럼과 비교하여 10개의 지진기록을 선정하였다. 비선형동적해석을 위해 선정한 지진기록은 지반조건1(S1)에 대한 것이며, 각 지진구역(Zone 2A, 2B, 3, 4)에 대해서 EPA를 각각 0.15g, 0.2g, 0.3g, 0.4g로 조정하여 사용하였다. [그림 3]은 지진구역 Zone2A에 대하여 조정한 지진기록에 대한 선형탄성설계응답스펙트럼(NEHRP94)과 중간값+표준편차(Median+ σ)를 비교한 그래프이다. 선정한 지진기록은 1sec 근방에서 규준에서의 스펙트럼보다 높은 값을 가지고 장주기에 대해서는 규준의 스펙트럼과 거의 같은 값을 가지는 것을 볼 수가 있다.



[그림 3] 0.15g에 대하여 조정된 응답스펙트럼

5. 비선형정적해석

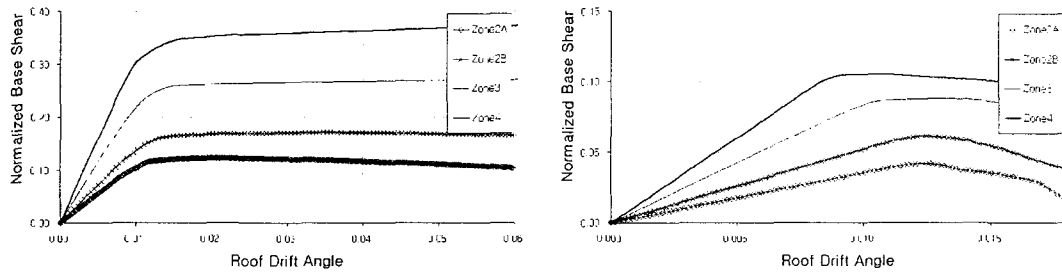
5.1 비선형정적해석결과

비선형정적해석을 통한 정확한 내진성능평가를 위해서는 골조의 층변위응답을 적절하게 표현할 수 있는 횡하중패턴의 결과과 목표변위 평가의 정당성이 요구된다. 비선형정적해석의 수행시에 골조의 특성에 따라서

여러 가지 횡하중 패턴이 사용된다. 본 연구에서는 아래의 식을 이용하여 횡하중을 분포시켰으며, 철골보통 모멘트골조의 특성상 장주기가 많으므로 좀 더 고차모드의 하중을 표현할 수 있도록 $k > 1.0$ 의 값을 취했다. 규준에서 제안하는 k 의 값은 3층골조에 대해서는 1.078~1.159, 6층골조에서는 1.327~1.472, 9층골조에서는 1.521~1.714, 12층골조에서는 1.699~1.936의 값을 가진다.

$$F_x = C_{vx} V, \quad C_{vx} = w_x h_x^k / \sum_{i=1}^n w_i h_i^k$$

또한 하중제어보다는 변위제어에 의해서 비선형정적해석을 수행하였다. [그림 4]는 3층과 12층 골조의 지진 구역에 따른 비선형해석의 결과이다. 지진하중의 큰 지역은 상대적으로 횡강성이 크므로 더 큰 강도를 보이며, 작은 항복변형각을 갖는다. 또한 층이 높은 골조일수록 지진하중이 작은 지역에서 급격한 음의 후탄성강성을 보여준다. 음의 후탄성강성이 크다는 것은 $P-\Delta$ 효과의 영향이 크다는 것과 조기에 약층의 형성을 의미한다.

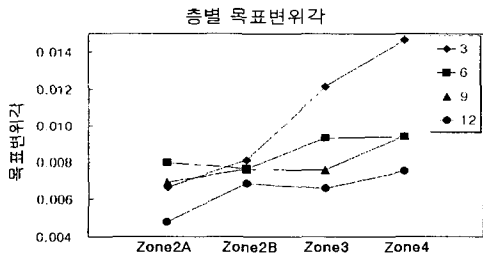


(a) 3층골조 (b) 12층골조
[그림 4] 비선형정적해석의 결과 (Roof Drift Angle vs. Normalized Base Shear)

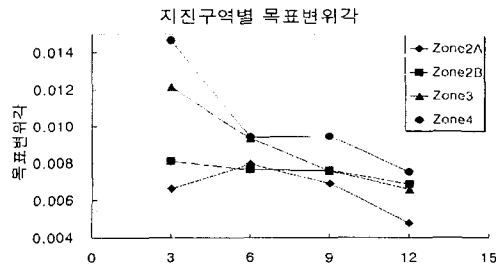
5.2 목표변위의 산정

[그림 5]와 [그림 6]은 FEMA 273에서 제안식에 의해서 산정한 목표변위에 대해서 지붕층 높이에 대한 목표변위의 비(이하 목표변위각)를 나타낸다. 목표변위 산정시 C_0 는 층높이에 따라 1.3~1.5의 값을 C_1 은 1.0과 C_2 는 1.1의 값을 C_3 는 1.0의 값을 가진다.

[그림 5]에서 목표변위각은 Zone2A 지역을 제외하고 골조의 층이 높을수록 그 값이 적다. Zone4의 3층 골조의 경우 목표변위각이 크게 나오는 데 이것은 [그림 3]에서 보는 바와 같이 1층대에서의 가속도가 크기 때문이다. [그림 6]에서 지진하중이 클수록 목표변위각은 크게 되며, 그 값의 차이 또한 크다.



[그림 5] 층별 목표변위각



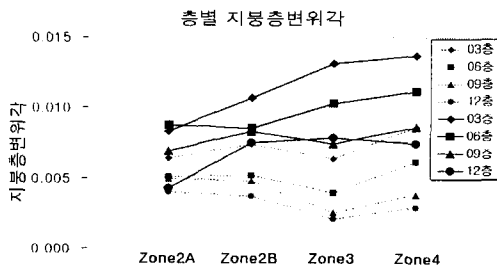
[그림 6] 지진구역별 목표변위각

6. 비선형동적해석

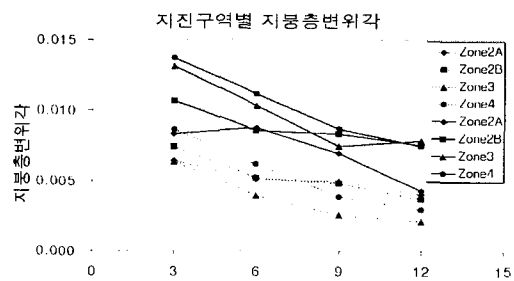
6.1 비선형동적해석결과

대상골조에 대하여 Drain-2DX를 이용한 조정된 지진하중에 대한 결과를 실선으로, 실제 지진기록에 대한 결과를 점선으로 하여 비선형동적해석의 결과를 [그림 7]과 [그림 8]에 나타내었다. 조정된 지진하중을 사용한 동적해석 결과를 보면 12층골조를 제외한 다른 골조에서는 지진구역에 따라서 조금씩 증가하는 결과를 보여주며, 12층의 경우에는 급격한 차이를 보여준다. 또한 3, 6층골조의 경우는 지진하중이 커질수록 그 변위가 커지는 반면에 9, 12층골조의 경우에는 지진하중의 크기와는 상관성이 없는 변위응답을 보여준다.

실제의 지진기록을 이용했을 경우에는 지진하중이 커질수록 층높이에 따라 지붕층변위각의 감소비율의 크기가 증가하며 그 증가 비율은 층이 높을수록 더 크다. 또한 같은 지진구역에서는 층이 증가할수록 지붕층변위각은 감소한다.



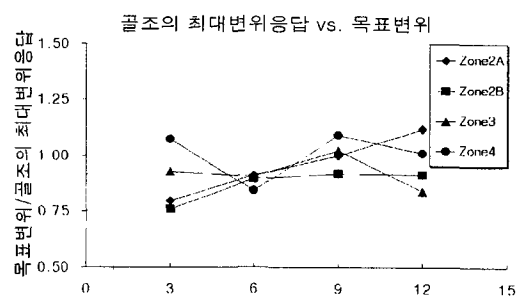
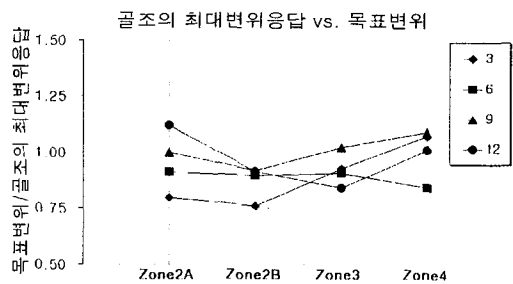
[그림 7] 층별 지붕층변위각



[그림 8] 지진구역별 지붕층변위각

6.3 목표변위와 비선형동적해석의 비교

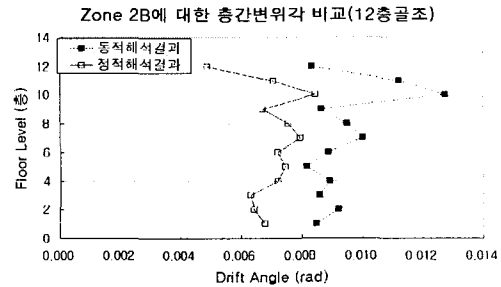
FEMA 273에서는 목표변위의 산정시 사용하는 가속도의 값을 탄성설계응답스펙트럼의 가속도를 이용하도록 제안한다. 설계응답스펙트럼을 이용하여 목표변위를 산정했을 경우에는 거의 대부분의 경우 실제의 최대동적변위응답보다 작은 값을 나타내고 있으며, 지진기록의 가속도 평균을 이용하여 목표변위를 산정했을 경우에는 3, 6층골조에서는 3층골조의 Zone4를 제외하고 약간 작은값을 보이고 있으며, 9층골조에서는 거의 같은 값을 보이고, 12층골조에서는 그 값의 차이가 상대적으로 크게 나타난다. 지진구역별로 비교해보면 Zone 2B, 3지역에서는 비슷한 값을 보이고, 나머지 구역에서는 층별로 그 값의 차이가 있다. 3층골조에서 Zone4의 값이 큰 이유는 가속도의 값이 크기 때문에 목표변위가 크게 산정되었기 때문이다.



[그림 9] 지진기록의 가속도에 의한 목표변위에 대한 최대변위응답의 비교

FEMA 273에서의 설계응답스펙트럼을 이용하여 목표변위를 산정했을 경우, 최대 지붕층변위응답에 대한

비율은 3, 6, 9, 12층골조에 대해서 각각 0.74~0.81, 0.8~0.92, 0.82~1.09, 0.76~1.18의 값을 가지며, 조정된 지진기록의 응답스펙트럼을 이용하여 목표변위를 산정했을 경우, 최대 지붕층변위응답에 대한 비율은 3, 6, 9, 12층골조에 대해서 각각 0.76~1.07, 0.84~0.91, 0.92~1.09, 0.84~1.12의 값을 가진다. 옆의 그림은 12층골조의 정·동적해석의 층간변위각 비교 그래프이다. 그래프를 보면 변위각과 각 층별 거동이 다를 수 있다.



[그림 10] 정·동적해석의 층간변위비교

7. 연구결과

다음은 OMRF의 비선형정적해석을 통한 목표변위와 비선형동적해석의 결과를 이용한 연구의 결론이다.

- 1) 12층 골조의 경우 목표변위와 최대 동적응답변위의 비는 0.92~1.09의 비슷한 결과를 보이지만 각층의 변위각과 거동의 양상이 다를 수 있다.
- 2) 3, 6층골조의 경우 목표변위는 최대 동적변위응답보다 조금 낮은 값을 나타낸다.
- 3) 지진하중에 대한 골조의 최대 변위응답은 해석에 사용된 지진기록 선정과 설계자의 설계개념에 의한 단면의 선택 등 여러 가지 불확실한 요소들에 의해서 달라질 수 있다.
- 4) 목표변위 산정시 설계응답스펙트럼의 가속도를 사용하는 것보다는 실제 지진기록의 평균값을 사용하는 것이 최대 동적변위응답과 좀 더 비슷한 결과를 보인다.
- 5) 목표변위 산정시 계수값은 일관성 있게 구하지만, 실제 골조의 최대 동적변위응답은 거동양상(탄성·비탄성거동)에 따라서 많은 차이를 보일 수 있다.
- 6) 단주기($T < 1\text{sec}$)의 골조의 경우 목표변위각의 값이 커진다.

본 연구는 지붕층변위와 층간변위의 값만을 가지고 비교를 수행하였기 때문에 한계성이 있다. 이러한 한계성을 극복하기 위해서 추후 층간변위와 횡하중패턴에 의한 층전단력의 비교, 각 부재의 소성화가 미치는 영향, $P-\Delta$ 효과가 골조에 미치는 영향, 등가의 SDOF의 MDOF 변환계수 등에 대해 연구할 계획이다.

감사의 글

이 연구는 한양대학교 초대형구조시스템연구센터 지원으로 수행된 과제로 이에 감사를 표합니다.

참고문헌

1. BSSC. NEHRP Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings(FEMA Publication 273), 1997 Edition. Federal Emergency Management Agency,
2. Krawinkler, H., and A. Gupta.(1998). "Story Drift Demands for Steel Moment Frame Structure in Different Seismic Regions", 6th US National Conference on Earthquake Engineering.
3. Mark Aschheim, Joe Maffei, and Edgar Black , "Nonlinear Static Procedures and Earthquake Displacement Demands", 6th U.S. National conference on Earthquake Engineering.
4. Krawinkler, H., and A. Gupta. "Behavior of Ductile SMRFs at Various Seismic Hazard Levels", Journal of structural Engineering, January 2000.
5. Seneviratna, G. D. P. K., and Krawinkler, H. (1997). "Evaluation of inelastic MDOF effects for seismic design." John A. Blume Earthquake Engrg. Ctr. Rep. No. 120, Dept. of Civ. Engrg., Stanford University.
6. 원학재, 한상환, 이리형, "접합부 해석 모델에 따른 보통모멘트 골조의 비선형 응답 평가," 한국전산구조공학회 2000도 가을 학술대회 논문집, 제 13권 제 2집, pp. 222-229