

비틀림 비정형을 갖는 철골특수모멘트골조의 내진성능평가 - II 내진설계 방법개선

한상환^{1*} · 김태오²

¹교수, 한양대학교, 건축공학과, ²박사과정, 한양대학교, 건축공학과

Seismic Performance Evaluation of Special Moment Steel Frames with Torsional Irregularities - II Improving Seismic Design Method

Han, Sang Whan^{1*}, Kim, Tae O²

¹Professor, Dept. of Architectural Engineering, Hanyang University, Seoul, 04763, Korea

²Ph.D. student. of Architectural Engineering, Hanyang University, Seoul, 04763, Korea

Abstract - This paper is the sequel of a companion paper (I. Seismic Design) for design and assessment of the torsional irregular structure using ASCE 7-10 criteria. This study evaluates the influence of torsional provisions on the performance of the designed steel moment frame with different eccentricity, taking the collapse probability as performance metric using the methodology in FEMA P695. The result show that torsional irregular structure designed according to ASCE 7-10 has an excessive seismic performance and the collapse strength is low as the eccentricity increases. To make the design reasonable, a new design approach is proposed in this study.

Keywords - Torsional irregularity, Inelastic response, Ground motion, Collapse performance, Story drift

1. 서론

현행 ASCE 7-10(ASCE 2010)^[1]은 수평비정형으로 분류되는 비틀림 비정형을 가지는 구조물에 대한 내진설계를 수행할 경우, 내진성능을 확보하기 위해 더욱 엄격한 설계기준을 요구한다. 이러한 비틀림 비정형 구조물에 대한 요구사항은 비틀림의 정도와 내진설계범주에 따르며 부재력의 증가, 모델링 방법, 우발비틀림모멘트의 증폭, 층간변위의 산정으로 분류되어 적용된다. 또한 비틀림 비정형 구조물은 층간변위를 질량중심간 거리가 아닌 최대 층간변위를 사용하도록 규

정하고 있어 구조물의 내진설계를 수행할 때 변위 및 안정성에 설계기준에 의해 큰 영향을 받는다.

비틀림 비정형 구조물은 횡력에 의한 변위뿐 아니라 비틀림에 의한 추가적인 변위가 발생하게 되고, 구조물에 심각한 손상을 야기할 수 있다. 따라서 비틀림 비정형 구조물에 대한 정확한 성능평가를 위해서는 비틀림 응답을 평가하기 위한 3D모델링이 필수적이며, ASCE 7-10^[1]에서도 내진설계범주 A일 때를 제외하고는 모두 3차원 해석모델을 사용하도록 요구하고 있다.

이러한 비틀림 비정형 구조물의 설계기준에 대한 연구는 동반연구(I, 내진설계)에서 언급하였듯 비틀림 비정형 기준에 대한 평가(Chopra 등^[2], Tso 등^[3], Harasimowicz 등^[4], Humar 등^[5]), 비틀림 비정형 건물의 해석과 내진성능(Chopra 등^[2], Jeong 등^[6], Herrera 등^[7], Chandler 등^[8], Stathopoulos 등^[9], Reyes 등^[10]), 우발 비틀림의 영향 평가(Stathopoulos 등^[9], De la Llera 등^[11], Chang 등^[12]) 등 수많은 선행연구가 진행되어왔다. 특히 Debock 등^[13]은 230개의 비틀림 비

Note.-Discussion open until February 28, 2018. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on March 14, 2017; revised August 31, 2017; approved on August 31, 2017.

Copyright © 2017 by Korean Society of Steel Construction

*Corresponding author.

Tel. +82-2-2220-1715 Fax. +82-2-2291-1716

E-mail. swhan@hanyang.ac.kr

정형을 갖는 철근콘크리트 구조물의 붕괴성능을 FEMA P695 (Fema 2000)^[14]에 따라 평가하고, 이를 토대로 우발비틀림 기준(accidental torsional provision)이 비틀림 비정형 건물의 붕괴강도(collapse capacity)에 미치는 영향을 평가한 바 있다. 하지만 이러한 연구들은 실제 편심과 우발비틀림 모멘트에 관한 설계기준의 평가에 집중되어있다. 그러므로 비틀림 비정형 구조물에 대하여 변위제한 검토를 포함한 전반적인 설계과정에 대한 평가가 필요하다.

이에 따라, 본 동반연구(I, 내진설계)에서는 현행 기준에서 요구하고 있는 비틀림 비정형 구조물에 대한 설계를 수행하고, 시간이력해석을 통하여 수행한 설계의 타당성을 평가하였다. 이 연구에서는 건물 층수(3층, 9층), 설계 수행 여부(비틀림 비정형에 따른 추가적인 요구사항 준수 여부)를 변수로 설정하고 철골특수모멘트골조를 설계한 뒤, 시간이력 해석을 통하여 구조물의 내진성능을 평가하였다. 그 결과, 비틀림 비정형 구조물에 대한 추가적인 요구사항을 고려하여 설계한 구조물의 소성힌지의 분포는 정형 구조물의 소성힌지 분포와 유사한 형태를 보였으며, 설계를 수행하지 않은 비틀림 비정형 구조물의 경우 한쪽의 골조로 치우친 소성힌지의 분포를 보였다. 또한 동일한 지진파에 대하여 요구사항을 고려한 비틀림 비정형의 구조물은 정형 구조물보다 더 큰 성능을 발휘하였으며, 이를 통해 동반연구(I, 내진설계)에서 수행된 설계가 타당함을 검증하였다. 하지만 해당 구조물의 내진성능이 정형 구조물에 비해 과도하게 높은 성능을 보이는 것으로 나타났다.

따라서 본 연구에서는 현행 ASCE 7-10^[1]에 따라 설계를 수행한 골조들의 성능평가를 수행하고, 설계기준상의 문제점 제기 및 개선된 설계방법 제안하고자 한다. 이를 위해서 FEMA P695^[14]에 제시된 방법론을 사용하여 고려한 모멘트골조들에 대한 성능평가를 수행하고, 개선된 설계방법을 사용하여 동일한 과정을 반복한 뒤 두 설계방법에 따른 모멘트골조의 성능을 비교평가 하였다. 그리고 이러한 연구수행을 통하여 제안하는 개선된 설계방법의 타당성을 제시하였다. 연구수행을 통하여 제안하는 개선된 설계방법의 타당성을 제시하였다.

2. FEMA P-695에 따른 내진성능평가 방법

본 연구에서는 고려한 17개의 골조에 대하여 FEMA P695^[14]에 따라 내진성능을 최대고려지진(Maximum considered earthquake, MCE) 지반운동에 대한 붕괴확률을 이용하여

평가하였다. 또한 골조의 내진성능을 확률에 근거하여 표현하기 위하여 각 대상골조의 최대고려지진하중에 대한 붕괴확률을 계산하였다.

FEMA P695^[14]에서는 구조물의 내진성능 확보를 위해 평가 대상에 따른 두 가지 성능목표를 제시하고 있다. 첫 번째는 대상 구조물의 성능 그룹이 최대고려지진 지반운동에 대하여 10% 미만의 붕괴확률을 가지는 것이고, 두 번째는 해당 지진 하중 하에서 개별 구조물이 20% 미만의 붕괴확률을 가지는 것이다. 이 때 최대고려지진에서의 응답 가속도(S_{MT})는 ASCE 7-10^[1]을 사용하여 결정할 수 있다. 이러한 내진성능평가를 수행하기 위하여 MCE에 대한 구조물의 붕괴강도 P_c 가 계산되어야 하며, 이는 다음과 같은 과정을 통해 계산할 수 있다.

- (1) 살펴보고자 하는 특정 내진저항시스템을 갖는 구조물을 선택하고, 대상 구조물에 대한 모델링을 수행한다.
- (2) 비선형정적해석을 수행하고 식 (1)~(3)을 이용하여 대상 구조물의 초과강도계수, Ω_0 , 주기 기반 연성비, μ_T , 유효 항복 지붕 층 변위, $\delta_{y,eff}$ 를 계산한다.

$$\Omega_0 = \frac{V_{max}}{V_d} \tag{1}$$

$$\mu_T = \frac{\delta_u}{\delta_{y,eff}} \tag{2}$$

$$\delta_{y,eff} = C_0 \frac{V_{max}}{W} \left[\frac{g}{4\pi^2} \right] (\max(T_n, T_1))^2 \tag{3}$$

여기서 V_{max} 는 최대 밀면전단력, V_d 는 설계 밀면전단력, δ_u 는 V_{max} 의 80%일 때의 지붕 층 변위를 의미한다. 또한 C_0 는 구조물 고유주기에서의 단자유도 변위와 다자유도 구조물 지붕 층 변위비 간의 계수, g 는 중력가속도, T_n 는 ASCE 7-10^[1]에 따르는 고유주기($C_u T_a$), T_1 는 해석모델의 1차모드 주기를 의미한다.

- (1) 비선형동적해석을 수행하여 대상 구조물의 붕괴성능 중간값, $\widehat{S_{CT}}$ 와 붕괴여유비, CMR 을 계산한다(Han 등^[15], Vamvatsikos 등^[16]). 이때, 구조물의 붕괴는 전체 구조물이 동적 불안정 상태에 이르는 지진 하중의 크기로 정의하며, IDA(incremental dynamic analysis) 곡선으로부터 구할 수 있다. 지반가속도의 크기, $PSA(T_n, 5\%)$ 는 5%의 감쇠비를 가지고 구조물의 고유주기(T_n)를 갖

는 단자유도 구조물의 유사가속도로 표현한다. 본 연구에서는 IDA를 수행하기 위하여 FEMA P695^[14]에서 제시하고 있는 22개 지반운동 가속도 세트를 사용하였다. 여기에서 CMR 은 식 (4)를 통하여 계산할 수 있다.

$$CMR = \frac{\hat{S}_{CT}}{S_{MT}} \quad (4)$$

여기서 S_{MT} 는 대상 지역의 최대고려지진에 대한 대상 구조물의 유사가속도, $PSA(T_n, 5\%)$ 을 의미한다.

(2) 지반 가속도들의 응답 스펙트럼 형태를 반영하여 발생 빈도가 낮은 지반운동들의 스펙트럼 형상을 보정하는 계수 SSF (spectral shape factor)를 식 (5)~(7)을 통하여 계산한다(Baker 등^[17]).

$$SSF = \exp[\beta_1(\bar{\varepsilon}_0(T) - \bar{\varepsilon}(T)_{record})] \quad (5)$$

$$\bar{\varepsilon}_0(T)_{record} = 0.6(1.5 - T) \quad (6)$$

$$\beta_1 = 0.14(\mu_T - 1)^{0.42} \quad (7)$$

여기서 $\bar{\varepsilon}_0$ 는 내진설계범주 B, C와 D, E에 대하여 각각 1.0, 1.5, 1.2를 사용한다.

(3) 내진성능평가 과정상의 불확실한 요소를 반영하기 위하여, 총 불확실성 계수, β_{TOT} 를 식 (8)을 사용하여 계산하고, 이를 이용하여 붕괴확률이 10%와 20%일 때의 허용 수정붕괴여유비를 계산한다.

$$\beta_{TOT} = \sqrt{\beta_{RTR}^2 + \beta_{DR}^2 + \beta_{TD}^2 + \beta_{MDL}^2} \quad (8)$$

여기서 β_{RTR} 은 지반운동의 불확실성(record-to-record uncertainty, $0.2 \leq 0.1 + 0.1\mu_T \leq 0.4$)이고, β_{DR} , β_{TD} , β_{MDL} 은 각각 구조성능, 실험데이터, 해석모델의 불확실성을 반영하는 계수로써 FEMA P695^[14]에 따른다.

(4) 위의 절차를 통해 계산한 각 계수들과 식 (9)를 사용하여 구조물의 S_{MT} 에 따른 붕괴강도 $P(Collapse|S_{MT})$ 를 계산

한다.

$$P_c = P(Collapse|S_{MT}) \quad (9)$$

$$= \Phi\left(\frac{\ln(S_{MT}) - \ln(\hat{S}_{CT} \times SSF)}{\beta_{tot}}\right)$$

여기서 $\Phi(x)$ 는 누적분포함수를 의미한다.

(5) 위의 절차에 따라 계산한 $P(Collapse|S_{MT})$ 값이 비교를 통하여 대상 구조물의 내진성능 만족 여부를 판단한다.

3. 비틀림 비정형을 가지는 골조의 내진성능

본 연구에서는 FEMA P695^[14]에서 제시하는 내진 성능 평가 방법을 사용하여 동반연구(I, 내진설계)에서 제시한 다른 평면 유형과 단면 및 높이를 가지는 17개의 대상 골조를 대상으로 내진 성능 평가를 수행하였다. 목표 내진성능은 FEMA P695(2000)에서 성능 그룹에 대하여 요구하고 있는 0.2의 붕괴확률을 목표 내진성능으로 설정하였다. 비정형의 정도에 따른 구조물의 내진성능을 비교하기 위하여 편심의 정도가 다른 다섯 가지 평면을 선정하고, 높이에 따른 구조물의 성능비교를 위하여 3층과 9층 두 가지 경우를 고려하였다. 또한 현행 기준에 따른 구조물의 성능에 대한 평가를 위해 비틀림 비정형 기준의 적용 유무에 따라 구조물을 설계하였고, 비선형 시간이력해석을 수행하기 위해 Opensees(2006)^[18] 프로그램을 사용하였다. FEMA P695^[14]에 따른 내진성능 평가를 수행하기 위한 각 계수의 산정과 붕괴확률 계산 결과는 Table 1에 나타내었다. Table 1에서 보는 바와 같이 현행 기준에 따른 설계를 수행하지 않은 3층의 3-TP4-X, 3-TP5-X 구조물과 9층의 9-TP3-X, 9-TP4-X 구조물을 제외한 모든 구조물이 0.2 미만의 붕괴확률을 가졌으며, 본 연구에서 설정한 목표 내진성능을 만족하였다.

다음으로 각 대상 구조물의 붕괴확률이 구조물의 편심의 크기에 따라 어떠한 경향을 보이는지를 분석하기 위하여 Fig. 1에 설계를 수행한 대상 골조의 붕괴확률을 그래프로 나타내었다. 그림에서 가로축은 층간 최대변위를 층간 평균 변위로 나누어 비틀림의 정도를 나타내며, 이 값이 1.2 이상일 경우 현행 ASCE 7-10에서는 해당 구조물을 비틀림 비정형 구조물로 구분하도록 하고 있다. 또한 Fig. 1에서 세로축

Table 1. Probability of collapse for the model structure for comparison of design Type-X and design Type-O

Arch. ID	S_{MT}	μ_T	\hat{S}_{CT}	CMR	SSF	$P(\text{Collapse} S_{MT})$	Pass / Fail
3-TP1	1.14	5.64	1.52	1.33	1.33	0.15	Pass
3-TP2-O	1.14	5.63	1.60	1.40	1.33	0.13	Pass
3-TP3-O	1.14	6.49	1.70	1.49	1.36	0.11	Pass
3-TP4-O	1.14	6.60	2.40	2.11	1.36	0.04	Pass
3-TP5-O	1.14	6.15	3.60	3.16	1.35	0.01	Pass
3-TP2-X	1.14	5.75	1.40	1.23	1.34	0.18	Pass
3-TP3-X	1.14	5.14	1.40	1.23	1.31	0.18	Pass
3-TP4-X	1.14	4.57	1.20	1.05	1.29	0.25	Fail
3-TP5-X	1.14	3.75	0.80	0.70	1.26	0.47	Fail
9-TP1	0.51	4.51	0.71	1.41	1.29	0.14	Pass
9-TP2-O	0.51	3.99	0.64	1.26	1.27	0.19	Pass
9-TP3-O	0.51	4.09	0.70	1.39	1.27	0.15	Pass
9-TP4-O	0.51	4.61	0.93	1.83	1.29	0.08	Pass
9-TP2-X	0.51	4.46	0.62	1.23	1.29	0.19	Pass
9-TP3-X	0.51	3.14	0.59	1.17	1.23	0.23	Fail
9-TP4-X	0.51	3.82	0.55	1.09	1.26	0.25	Fail

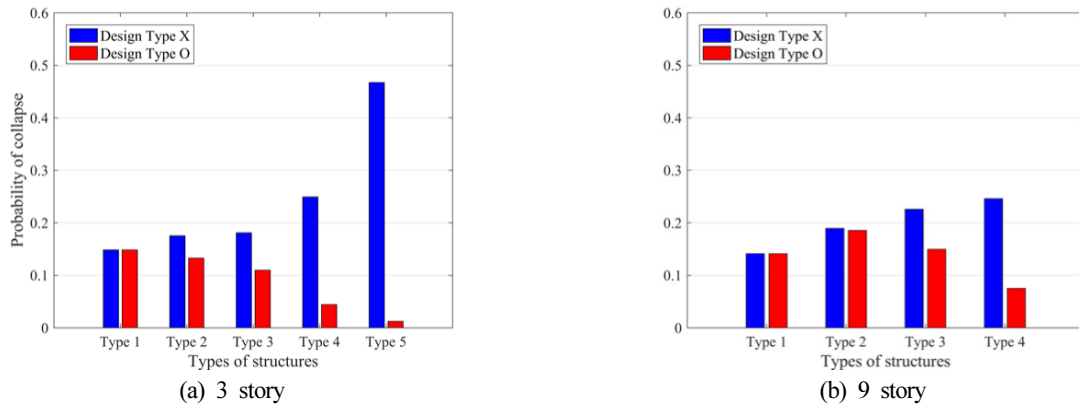


Fig. 1. Collapse probability of the model structure for comparison of design Type-X and design Type-O

은 구조물의 붕괴확률을 나타내며, 대상 구조물을 설계 방법에 따라 비틀림 비정형 기준을 적용하여 설계를 수행한 타입 O 구조물과 정형 구조물인 Type 1 구조물과 동일한 단면을 가지는 타입 X 구조물로 분류하여 나타내었다.

먼저 3층 구조물의 경향을 살펴보면 설계 타입 X 구조물은 편심이 커질수록 붕괴확률이 증가하였다. 특히, 비틀림 비정형 구조물로 분류된 3-TP4-X, 3-TP5-X 구조물은 붕괴확률이 0.2을 넘어 허용수준이 초과하였으며, 붕괴확률이 급격하게 증가하는 것을 확인할 수 있다. 반면 편심을 고려한 설계를 수행한 설계 타입 O 구조물은 오히려 편심이 커질수록 붕괴확률이 감소하였다. 그리고 비틀림 비정형 구조물

로 분류된 3-TP4-O, 3-TP5-O 구조물의 붕괴확률이 각각 4%, 1%로 크게 줄어들었다. 이러한 결과는 현행 ASCE 7-10에서 비틀림 비정형으로 구분된 구조물에 대하여 추가적인 요구사항들에 따른 결과이다. 그 중 층간 변위각 산정에 최대 층간변위를 사용하도록 하는 요구사항은 구조물에 대해 과도한 강성을 요구하게 되며, 이에 따라 정형 구조물보다 큰 주기기반 연성도를 확보함과 동시에 Fig. 3(c)와 같이 과도하게 높은 붕괴강도를 보이며, 그 결과로서 상대적으로 작은 붕괴확률이라는 결과를 도출하게 된다.

9층 구조물 또한 3층 구조물과 유사한 경향의 내진성능평가 결과를 나타내고 있다. 설계 타입 ‘X’의 구조물들은 편심

이 증가할수록 붕괴확률도 증가하였으며, 9-TP3-X, 타내어 내진성능을 확보하지 못하는 것으로 나타났다. 그리고 비틀림 비정형 구조물에 대한 기준을 적용하여 설계를 수행한 타입 O 구조물의 경우, 3층 구조물에 비하여 Type 2, Type 3, Type 4 구조물의 붕괴확률이 다소 크게 나타났지만, 3층 대상 골조와 동일하게 편심이 커질수록 대체로 감소하는 경향을 나타내었으며, 9-TP4-O 구조물의 경우에는 붕괴확률이 7%로 크게 감소하였다. 결론적으로, 평면 비정형 구조물이 현행 비틀림 비정형 기준을 통하여 설계하였을 경우에는 대상 구조물이 매우 과다한 붕괴 성능을 보유하게 된다.

4. 비틀림 비정형 건물에 대한 개선된 내진설계방법 제안

FEMA P695^[14]에 제시된 방법론을 사용하여 대상 구조물에 대한 내진성능평가를 수행한 결과, 비틀림 비정형 기준을 적용하여 구조물의 설계한 구조물은 편심이 커질수록 구조물의 붕괴성능이 오히려 불필요하게 증가하였다. 그러므로 본 연구에서는 구조물의 합리적인 설계를 위한 개선된 내진설계방법을 제안하고자 한다.

동반연구(I, 내진설계)의 결과를 통하여, 비틀림 비정형 구조물의 설계를 수행할 때 단면결정에 가장 큰 영향을 미치

는 설계 과정은 변위제한과 안정성계수 검토과정이었다. 특히, ASCE 7-10^[1]에서는 비틀림 비정형 구조물에 대한 변위 제한 검토 및 안정성계수 검토를 수행할 때, 질량중심의 상대변위가 아닌 수직부재 횡변위의 최댓값을 사용하도록 규정하고 있다. 따라서 본 연구에서는 비틀림 비정형 구조물의 횡 변위를 수직부재 횡변위의 최댓값이 아닌 정형 구조물에 사용되는 질량중심의 상대변위로 산정하였다. 대상 구조물 중 비틀림 비정형 구조물로 분류된 구조물은 3-TP4-O, 3-TP5-O, 9-TP4-O이고, 해당 구조물들에 대하여 완화된 조건을 사용하여 설계를 수행하였다.

완화된 조건을 사용하여 설계를 수행한 구조물의 성능이 어떻게 다른가를 분석하기 위하여, 본 연구에서는 3층 구조물을 대상을 정형구조물과 설계를 수행한 비틀림 비정형 구조물, 완화된 조건을 사용한 구조물을 대상으로 소성힌지 발생위치를 분석하였다. Fig. 2는 3-TP1(정형 구조물), 3-TP5-X(비틀림 비정형 기준을 적용하지 않고 부재단면을 결정한 구조물), 3-TP5-OM(완화된 조건을 사용하여 부재단면을 결정한 구조물)에 대한 소성힌지 발생위치를 나타낸 그림이다. Fig. 2의 입면에서 검은색 점으로 나타낸 부분은 소성힌지의 발생 위치를 의미하며, 그림에서 각 프레임에 발생하는 소성힌지 개수를 괄호 안에 표시하였다.

3차원 비선형정적해석을 통하여 구한 구조물의 소성힌지 분포를 보면, 완화된 조건을 사용하여 설계를 수행한 3-TP5-

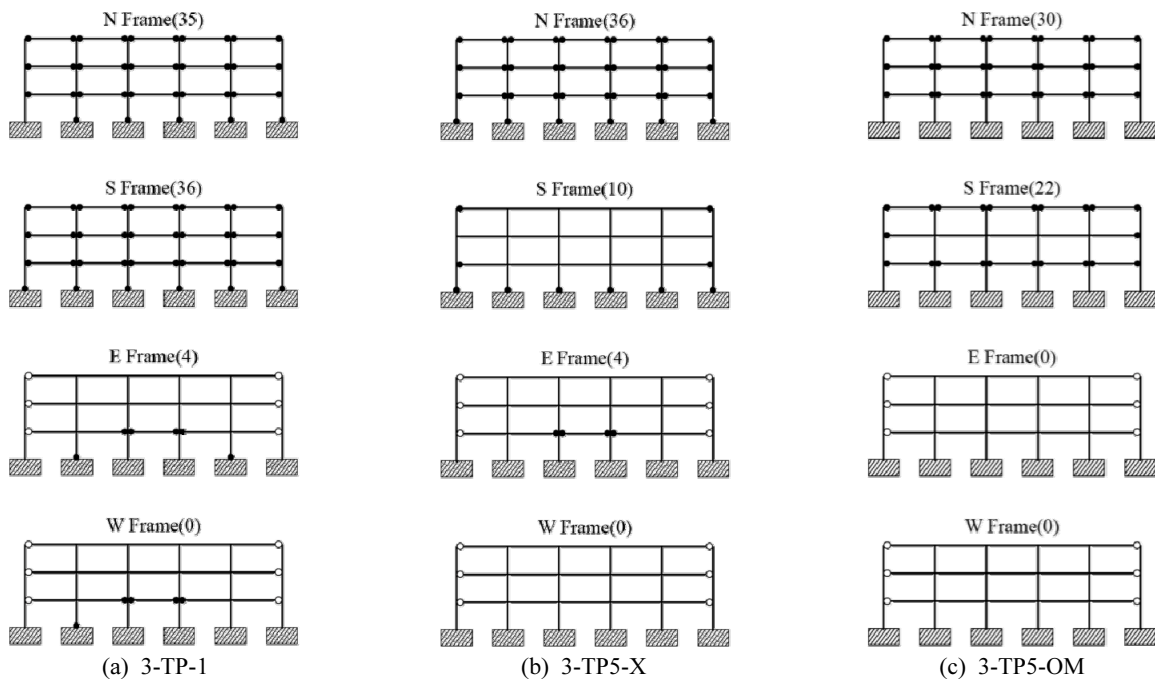


Fig. 2. Distribution of plastic hinges

OM(Fig. 2(c)) 구조물의 소성힌지 분포는 3-TP1 (Fig. 2(a)) 구조물에 비하여 N Frame과 S Frame이 대칭인 소성힌지 분포를 나타내지는 않지만, 3-TP5-X(Fig. 2(b)) 구조물의 소성힌지 분포에 비하여 대칭인 분포를 가진다는 것을 볼 수 있다. 이를 통해, 완화된 조건을 사용하여 설계를 수행한 3-TP5-OM(Fig. 2(c)) 구조물은 현행 기준에 따른 설계를 수행하지 않은 3-TP5-X(Fig. 2(b)) 구조물에 비해 큰 내진성능을 보유하고 있다는 사실을 알 수 있다.

5. 개선된 설계방법에 따른 비틀림 비정형 건물의 내진성능

본 연구에서는 개선된 설계방법의 타당성을 평가하기 위하여 FEMA P695^[14]에서 제시하는 내진 성능 평가 방법을 사용하여 완화된 조건을 사용하여 설계를 수행한 구조물에 대하여 내진성능평가를 수행하였으며, 비선형정식해석 및 IDA를 통하여 구한 각 계수 및 결과값을 Table 2에 정리하였다. 또한 개선된 설계방법에 따라서 단면설계를 수행한 구조물의 붕괴가능성이 적절한지 확인하기 위하여, 완화된 조건으로 설계를 수행한 구조물과 기존 구조물들의 붕괴확률을 비교한 결과를 Fig. 3에 나타내었다.

그림에서 Design Type O는 ASCE 7-10^[1]의 비틀림 비정형 설계 기준에 따라 비틀림 비정형 구조물의 횡 변위를 수직

부재의 최댓값으로 산정하여 단면설계를 수행한 구조물을 의미하며, 개선된 설계방법은 완화된 조건을 사용하여 질량 중심간의 거리로 횡변위를 산정하여 단면설계를 수행한 구조물을 의미한다. 3층 구조물을 보면, 구조물을 기존의 방식으로 설계를 수행하였을 때 비틀림 비정형 구조물로 분류된 Type 4, Type 5의 붕괴확률이 각각 4%, 1%이었던 것에 비해, 완화된 조건을 사용하여 설계를 수행한 구조물의 경우 12%, 9%로 붕괴확률이 크게 증가하였다는 것을 알 수 있다. 또한 그 크기는 Type 1, Type 2, Type 3 구조물의 붕괴확률과 큰 차이를 보이지 않았다.

9층 구조물의 경우에도, Type 4 구조물의 붕괴확률은 3층 구조물에 비하여 그 변화의 폭이 크지는 않았지만 7%에서 10%로 증가하였으며 요구 붕괴확률을 만족하였다.

이를 통하여 완화된 조건에 따라 질량중심간의 거리를 횡 변위로 산정하여 내진설계를 수행하여도 정형 구조물과 같은 적절한 내진성능을 보유한다는 사실을 알 수 있다.

또한 본 연구에서는 기존의 설계기준과 완화된 설계기준을 사용하였을 때의 총 강재량을 비교하여 Fig. 4에 나타내었다. 기존의 설계기준에 따라 설계를 수행한 Design Type O의 경우, 비틀림 비정형 구조물로 분류되는 Type 4, Type 5구조물에서 급격한 강재량의 증가가 나타났으나, 완화된 기준에 따른 개선된 설계방법의 경우 급격한 강재량의 증가 없이 내진성능을 확보하는 것을 확인할 수 있었다.

Table 2. Probability of collapse for the model structure for new design type

Arch. ID	S_{MT}	μ_T	\hat{S}_{CT}	CMR	SSF	$P(\text{Collapse} S_{MT})$	Pass/Fail
3-TP4-OM	1.14	8.49	1.70	1.49	1.42	0.14	Pass
3-TP5-OM	1.14	2.77	1.90	1.67	1.21	0.13	Pass
9-TP4-OM	0.51	4.59	0.82	1.61	1.29	0.10	Pass

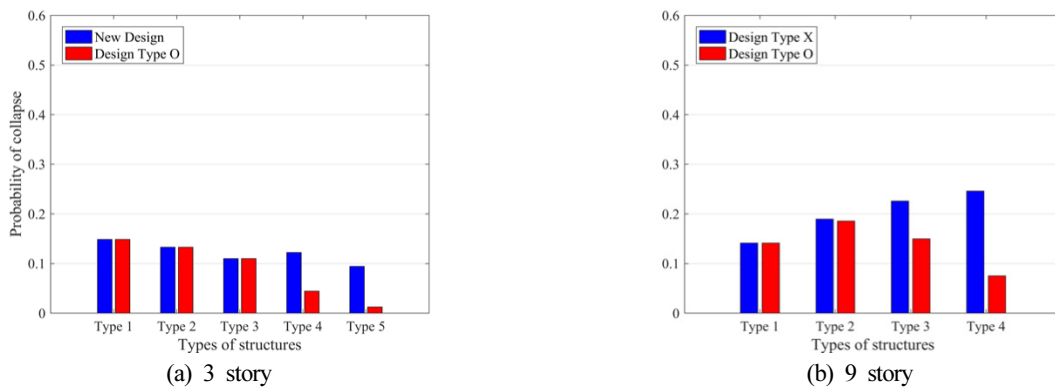


Fig. 3. Collapse probability of the model structure for comparison of new design type and ASCE 7-10

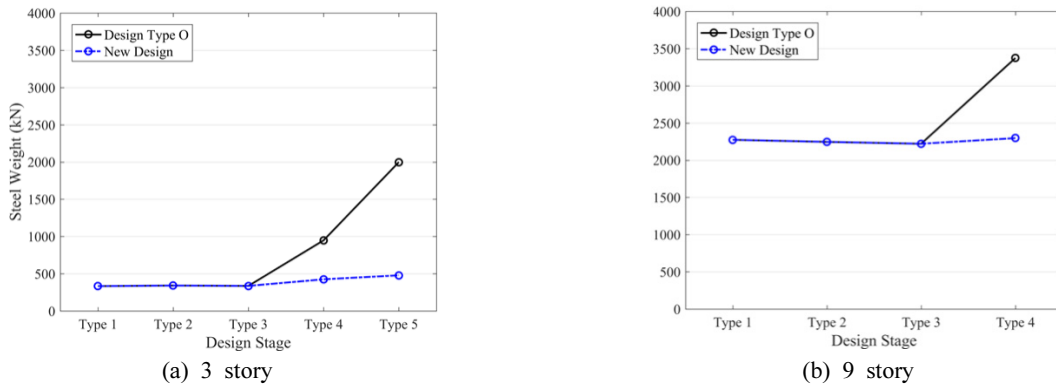


Fig. 4. Total steel weights of the moment frames for each design stage for comparison of new design and ASCE 7-10

6. 결론

본 연구에서는 비틀림 비정형 구조물에 적용되는 설계기준이 구조물의 붕괴확률에 어떠한 영향을 미치는가를 분석하기 위하여, 편심의 크기가 각각 다른 3층 구조물과 층 구조물을 설계하고 비선형 모델링 및 해석을 수행하였다. 그리고 FEMA P695^[14]에 따라 ASCE 7-10^[1]에서 제시하고 있는 설계기준의 적정성을 평가한 후, 비틀림 비정형 건물에 대한 과도한 설계의 개선하기 위한 합리적인 대안을 제시하였다.

본 연구 결과는 다음과 같이 정리할 수 있다.

- (1) FEMA P695^[14]에 제시된 내진성능평가 방법에 따라 대상건물의 내진성능을 평가한 결과, 정형 구조물과 동일한 단면을 가지는 구조물의 경우 편심이 증가함에 따라 내진성능이 급격하게 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 반면, 현행 ASCE 7-10^[1]의 비틀림 비정형 구조물에 대한 추가적인 요구사항을 준수하는 구조물의 경우 편심의 증가에 따라 오히려 내진성능이 증가하였으며, FEMA P695^[14]에서 요구하는 내진성능을 보유하였다.
- (2) ASCE 7-10^[1]의 비틀림 비정형 구조물에 대한 추가적인 요구사항을 만족하는 구조물들은 과도한 내진성능을 보유하는 경향을 보였다. 특히, 3층 비틀림 비정형 구조물인 3-TP4-O, 3-TP5-O 구조물의 경우 5%미만의 매우 낮은 붕괴확률을 보였다. 또한 9층 비틀림 비정형 구조물인 9-TP4-O 구조물의 경우에도 정형 구조물인 9-TP1보다 낮은 붕괴확률을 보여 현행 ASCE 7-10^[1]가 비틀림 비정형 구조물에 대하여 과도한 내진성능을 요구한다고 판단되며, 불필요한 내진설계를 피하기 위한 합리적인 설계기준에 대한 제안이 필요하다.
- (3) 현행 기준에서 변위 및 안정성 설계를 수행하는데 요구

하는 최대층간변위의 사용 대신 질량중심의 상대변위를 사용한 완화된 기준으로 설계와 내진성능평가를 수행하였다. 그 결과, FEMA P695^[14]에서 요구하는 구조물의 내진성능의 확보와 동시에 불필요한 내진성능의 증가를 억제할 수 있었다.

- (4) 현행 기준에 따라 설계된 구조물과 완화된 조건에 따라 설계된 구조물의 내진성능평가 결과를 비교한 결과, 3층 비틀림 비정형 구조물인 3-TP4-MC, 3-TP5-MC 구조물의 경우 정형 구조물보다 약간 높은 내진성능을 보였지만 FEMA P695^[14]에서 요구하는 내진성능을 보유하는 것을 보였다. 또한 그 차이가 크지는 않았지만 9층 비틀림 비정형 구조물인 9-TP4-MC 구조물의 경우에도 요구되는 내진성능을 확보함과 동시에 소량이지만 내진성능의 불필요한 증가를 억제할 수 있었다.
- (5) 비틀림 비정형 구조물에 대하여 설계를 수행할 경우 변위 산정에 질량중심의 상대변위를 이용한 완화된 기준에 대하여 설계를 수행하여도 구조물이 충분한 내진성능을 가진다. 즉, 정형 구조물에서처럼 질량중심으로 횡변위를 산정해도 요구 붕괴확률을 만족하며, 더욱 합리적으로 설계할 수 있다는 사실을 알 수 있다.

감사의 글

본 연구는 한국연구재단 연구비 지원 (NRF-2014R1A-2A1A11049488)으로 수행되었고 이에 감사를 표한다. 또한 심사자 세 분의 제안사항과 추천내용에 대하여 감사를 드린다.

참고문헌(References)

- [1] ASCE/SEI (2010) *Minimum design loads for buildings and other structures, ASCE/SEI 7-10*, American Institute of Steel Construction, Reston.
- [2] Chopra, A.K. and Goel, R.K. (1991) Evaluation of Torsional Provisions in Seismic Codes, *Journal of Structural Engineering*, Vol.117, No.12, pp.3762-3782.
- [3] Tso, W.K. and Wong, C.M. (1993) An Evaluation of the New Zealand Code Torsional Provision, *Bulletin of the New Zealand National Society for Earthquake Engineering*, Vol.26, No.2, pp.194-207.
- [4] Harasimowicz, A.P. and Goel, R.K. (1998) Seismic Code Analysis of Multi-storey Asymmetric Buildings, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol.27, No.2, pp.173-185.
- [5] Humar, J.L. and Kumar, P. (1999) Effect of Orthogonal Inplane Structural Elements on Inelastic Torsional Response, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 28, No.10, pp.1071-1097.
- [6] Jeong, S.H. and ElNashai, A.S. (2005) Analytical Assessment of an Irregular RC Frame for Full-scale 3D Pseudodynamic Testing Part I: Analytical Model Verification, *Journal of Earthquake Engineering*, Vol.9, No.1, pp.95-128.
- [7] Herrera, R.G. and Soberon, C.G. (2008) Influence of Plan Irregularity of Buildings, *The 14th World Conference on Earthquake Engineering*, Department of Civil and Environmental Engineering, Stanford University.
- [8] Chandler, A.M. and Duan, X.N. (1997) Performance of Asymmetric Code-designed Buildings for Serviceability and Ultimate Limit States, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, Vol.26, No.7, pp.717-735.
- [9] Stathopoulos, K.G. and Anagnostopoulos, S.A. (2010) Accidental Design Eccentricity: Is It Important for the Inelastic Response of Buildings to Strong Earthquakes, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol.30, No.9, pp.782-797.
- [10] Reyes, J.C. and Quintero, O.A. (2014) Modal Pushover-Based Scaling of Earthquake Records for Nonlinear Analysis of Single-story Unsymmetric-plan Buildings, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol.43, No.7, pp.1005-1021.
- [11] De la Llera, J.C. and Chopra, A.K. (1995) Estimation of Accidental Torsion Effects for Seismic Design of Building, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol.121, No.1, pp.102-114.
- [12] Chang, H.Y., Lin, C.C.J., Lin, K.C., and Chen, J.U. (2009) Role of Accidental Torsion in Seismic Reliability Assessment for Steel Building, *Steel and Composite Structures*, Vol.9, No.5, pp.457-471.
- [13] Debock, D.J., Liel, A.B., Haselton, C.B., Hooper, J.D., and Henige, R.A. (2014) Importance of Seismic Design Accidental Torsion Requirement for Building Collapse Capacity, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, Vol.43, No.6, pp.831-850.
- [14] FEMA (2000) *Quantification of Building Seismic Performance Factors. FEMA P695*, Washington, DC.
- [15] Han, S.W. and Chopra, A.K. (2006) Approximate Incremental Dynamic Analysis Using the Model Pushover Analysis Procedure, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, Vol.35, No.15, pp.1853-1873.
- [16] Vamvatsikos, D. and Cornell, C.A. (2002) *Seismic performance, capacity and reliability of structures as seen through incremental dynamic analysis*, Rep. No.151, John A. Blume Earthquake Engineering Center, Stanford University.
- [17] Baker, J.W. and Cornell, C.A. (2006) Spectral Shape, Epsilon and Record Selection, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol.35, No.9, pp.1077-1095.
- [18] Mazzoni, S., McKenna, F., Scott, M.H., and Fenves, G.L. (2006) *OpenSees command language manual*, Pacific Earthquake Engineering Research (PEER) Center.

요 약 : 본 논문은 ASCE 7-10를 적용한 비틀림 비정형 철골 모멘트 골조의 설계 및 평가를 수행한 동반연구(I 내진설계)의 후속 연구이다. 본 연구에서는 철골 모멘트 골조의 비틀림 비정형 발생 여부와 ASCE 7-10 설계 요구조건의 적용 여부에 따라 내진성능평가를 수행하였다. 그 결과, ASCE 7-10의 비정형 내진설계 요구조건을 적용한 철골 모멘트 골조의 경우 붕괴확률이 매우 낮고 상당히 보수적인 설계 결과를 나타냈으며, 본 연구에서는 비틀림 비정형 구조물의 합리적인 설계를 위해 개선된 설계 방법을 제시하였다. 제안된 방법으로 설계된 비틀림 비정형 철골 모멘트 골조의 붕괴확률은 기존의 방법으로 설계된 구조물의 붕괴확률을 보다 크지만 ASCE 7-10의 붕괴확률 요구 조건을 만족하였다.

핵심어 : 철골 모멘트 골조, 비틀림 비정형, 내진설계, 내진성능평가, 붕괴확률
