초고층 철골 건축물의 내진성능평가를 위한 Drift Capacity 산정 프로세스

Determination Process of Drift Capacity for Seismic Performance Evaluation of Steel Tall Buildings

민 지 연[1)†] · 오 명 호[2)] · 김 명 한[3)] · 김 상 대[4)]
Min, Ji Youn *Oh, Myoung Ho* *Kim, Myeong Han* *Kim, Sang Dae*

요 약 : 지진의 피해를 입은 후 건물의 실제 성능은 많은 요인에 영향을 받는다. 신축 구조물이나 기존 구조물의 지진 성능 예측은 복잡하다. 그 이유는 고려되어져야 하는 많은 요소와 지진 반응의 복잡성뿐만 아니라 이러한 예측과 관련된 타고난 불확실성과 가변성 때문이다. 본 연구의 목적은 구조물의 능력 평가와 반응 요구에서의 불확실성과 가변성의 적절한 취급과 결합이다. 일관된 방법으로 demand와 capacity에서의 불확실성과 가변성을 설명하기 위하여 신뢰성 이론에 기초한 성능평가의 접근 방법이 초고층 철골 건축물의 내진성능평가법으로 채택되어져 오고 있다. 신뢰성 이론에 근거한 내진성능평가에 대한 기본 체계와 통계적 연구에 대한 핵심 요소를 요약하였다. demand 요소와 capacity 요소의 통계적인 분석을 위하여 국내 기준에 맞는 전형적인 초고층 철골 건축물을 36개 설계하였다. global drift capacity 산정을 위해 철골 모멘트 골조 건물을 증분동해석 하였다.

ABSTRACT : The actual performance of a building during an earthquake depends on many factors. The prediction of the seismic performance of a new or existing structure is complex, due not only to the large number of factors that need to be considered and the complexity of the seismic response, but also due to the large inherent uncertainties and randomness associated with making these predictions. A central issue of this research is the proper treatment and incorporation of these uncertainties and randomness in the evaluation of structural capacity and response demand. A reliability-based, performance-oriented approach has been adopted in the seismic performance evaluation of steel tall buildings to account for the uncertainties and randomness in seismic demand and capacities in a consistent manner. The basic framework for reliability-based seismic performance evaluation and the key factors for statistical studies were summarized. A total of 36 target structures that represent typical tall steel buildings based on the national building code (KBC-2005) were designed for the statistical studies of demand factors and capacity factors. The incremental dynamic analysis (IDA) approach was examined through the simple steel moment frame building in determination of global drift capacity.

핵 심 용 어 : 내진성능평가, 초고층 건축물, 불확실성, 가변성, 변위능력, 증분동해석
KEYWORDS : Seismic Performance Evaluation, Tall Building, Uncertainty, Randomness, Drift Capacity, Incremental Dynamic Analysis (IDA)

1. 서 론

1.1 연구 목적

성능에 기초한 내진공학 (Performance-based Seismic Engineering)은 전세계적으로 구조물 내진설계의 기본적인 철학으로 자리잡고 있으며, 국내 및 국외의 대표적인 내진설계 기준들은 내진성능설계법 (Performance-based Seismic Design Method)의 절차와 이론들을 직접적 혹은 간접적인 방법으로 채택하고 있다. 내진성능설계는 대상 구조물에 요구

1) 교신저자, 정회원, 고려대학교 대학원 건축공학과 석사과정
(Tel.: 02-3290-3743, Fax.: 02-921-2439, E-mail: jaya22@korea.ac.kr)
2) 정회원, 현대건설(주) 기술연구소 과장, 공학박사(ohmho@hdec.co.kr)
3) 정회원, 대진대학교 건축공학과 전임강사, 공학박사(mhk314@daejin.ac.kr)
4) 정회원, 고려대학교 건축공학과 교수, 공학박사(sdk@korea.ac.kr)

본 논문에 대한 토의를 2007년 2월 28일까지 학회로 보내주시면 토의 회답을 게재하겠습니다.

되는 여러 단계의 성능목표(Perfor-mance Objectives)들을 만족할 수 있도록 설계하는 것이며, 성능목표는 특정한 지진위험도 (Seismic Hazard)에 연계되는 성능단계 (Performance Level)의 조합으로 정의된다.

이러한 내진성능설계의 확장된 개념으로서 내진성능평가법 (Seismic Performance Evaluation Method)은 이미 내진설계가 수행된 신축 구조물이나 기존 구조물에 대해서 대상 구조물이 보유하고 있는 내진성능을 정량적으로 평가하거나 검증하는 절차를 의미한다. 이러한 내진성능평가에서 특정한 지진위험도에 대한 Drift Demand와 목표 성능단계에 대한 Drift Capacity의 산정이 가장 필수적인 과정이라고 할 수 있는데, Drift Demand와 Drift Capacity의 산정에는 많은 불확실성 (Uncertainty)과 가변성 (Randomness)이 불가피하게 포함된다. 따라서 이러한 불확실성과 가변성을 적절히 고려할 수 있는 확률론적인 접근방법이 요구되며, 이를 통해서 신뢰성 이론에 기초한 내진성능평가법 (Reliability-based Seismic Performance Evaluation Method)이 반드시 적용되어야 한다.

국내 초고층 철골 건축물의 내진성능을 합리적으로 평가하기 위해서 신뢰성 이론에 바탕을 둔 내진성능평가법의 개발은 필수적이라고 할 수 있다. 이를 위해서 본 연구에서는 1차적으로 국내 초고층 철골 건축물의 지진 반응에 관한 확률적인 특성을 반영할 수 있는 Drift Capacity 산정 프로세스의 구축을 연구목표로 한다.

1.2 연구 방법

신뢰성 이론에 기초한 내진성능평가법을 적용하기 위해서는 Drift Demand와 Drift Capacity에 포함되는 많은 불확실성과 가변성을 적절히 고려할 수 있는 확률론적인 접근방법이 요구된다. 즉, 대상 구조물의 지진 반응에 관한 통계적 혹은 확률적 특성을 적절히 반영할 수 있는 Drift Demand 및 Drift Capacity 산정 프로세스를 구축하여야 한다. 이를 위해서 본 연구에서는 철골 초고층 건축물의 대표적인 구조형식으로서 가새 골조 (Braced Frame)와 아웃리거 시스템 (Outrigger System)을 선정하고, 각 구조형식별로 층수, 지역에 따른 풍하중의 크기, 최상층 제어변위의 크기 등을 변수로 하여 18개씩 (전체 36개)의 대상 구조물을 설계한다.

10개의 대표 지반운동을 선정하여 36개의 표준 초고층 구조물에 대한 비선형 동적해석을 수행함으로서, 대상 구조물의 지진 반응에 관한 통계적 혹은 확률적 특성을 분석한다. 이러한 통계적 분석을 바탕으로 Capacity 계수를 제안함으로서, 국내 초고층 철골 건축물에 대한 Drift Capacity 산정 프로세스를 구축한다.

2. 신뢰성에 기초한 내진성능평가 이론

내진성능평가에 관한 신뢰성 이론은 Wen & Foutch (1997), Jalayer & Cornell (1999), Hamburger, Foutch & Cornell (2000) 등에 의해서 발전되었으며, Lee & Foutch (2000)과 Yun & Foutch (2000) 등의 연구결과를 바탕으로 내진성능평가에 대한 세부적인 프로세스와 기술적인 지침이 마련되었다.

앞에서 서술한 연구결과에서 볼 수 있듯이 현재까지 내진성능평가에 관한 대부분의 연구는 SAC Joint Venture를 통한 철골 모멘트 골조와 관련된 것이었다. 따라서 다양한 구조물에 대해서 내진성능평가 이론을 적용하기 위해서는 대상 구조물의 지진 반응 특성을 고려할 수 있는 연구가 뒷받침 되어야 한다.

2.1 신뢰도 계수

내진성능평가에 관한 신뢰도 (Confidence Level)를 결정하는데 이용되는 신뢰도 계수 (Confidence Factor) λ는 식 (1)과 같이 산정된다.

$$\lambda = \frac{\gamma\gamma_a D}{\phi\phi_a C} \tag{1}$$

위의 식에서

C : Drift Capacity의 평균값,
D : Drift Demand의 평균값,
ϕ : Capacity 가변성 계수,
ϕ_a : Capacity 불확실성 계수,
γ : Demand 가변성 계수,
γ_a : Demand 불확실성 계수이다.

2.2 신뢰도

신뢰도 계수 λ가 산정되면, 성능목표를 만족할 수 있는 신뢰도는 식 (2)와 같이 평가될 수 있다. 이 식에서 Kx는 표준 가우시안 확률변수 (Standard Gaussian Variate)이며, Kx에 대한 표준정규분포의 확률밀도함수 f(Kx)는 그림 1과 같이 나타낼 수 있다.

$$K_x = \left(\frac{1}{2} k \beta_{UT}^2 - \ln\lambda\right)\frac{1}{\beta_{UT}^2} \tag{2}$$

위의 식에서

k : 지진위험도 곡선의 기울기,

β_{UT} : 불확실성에 의한 Demand 및 Capacity 예측값의 자연로그 표준편차이다.

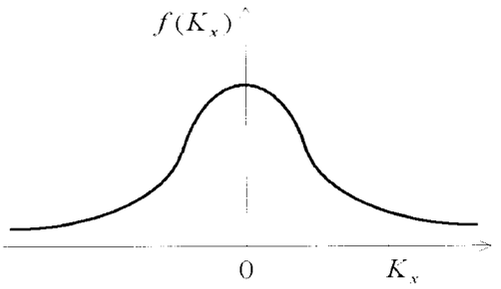


그림 1. Kx에 대한 표준정규분포 확률밀도함수 f(Kx)

2.3 Capacity 계수

식 (1)에서 Drift Capacity C와 연관되는 계수인 Capacity 가변성 계수와 Capacity 불확실성 계수를 통칭하여 Capacity 계수라고 한다. Capacity 가변성 계수는 식 (3)과 같이 정의되며, Drift Capacity 산정에 포함되는 가변성을 고려하기 위한 계수이다. 이 식에서 βRC는 대상 구조물의 지진반응에 대한 통계적인 분석을 통하여 결정할 수 있다.

$$\Phi = \exp(-\frac{k}{2b}\beta_{RC}^2) \quad (3)$$

위의 식에서

b : 지진위험도에 따른 Demand 증가계수,

β_{RC} : Drift Capacity 예측값의 자연로그 표준편차이다.

Capacity 불확실성 계수는 식 (4)와 같이 정의되며, Drift Capacity 산정에 포함되는 불확실성을 고려하기 위한 계수이다. 구조물의 지진 반응 산정에 포함되는 불확실성의 종류는 매우 광범위하며, 또한 불확실성에 의한 지진 반응의 영향을 정량적으로 평가하기에는 한계가 있다. 따라서 식 (4)에서 βUC를 단순히 통계적인 분석을 통하여 결정할 수 없으며, 주로 공학적인 판단에 의존한다.

$$\Phi_a = \exp(-\frac{k}{2b}\beta_{UC}^2) \quad (4)$$

위의 식에서

β_{UC} : 불확실성에 의한 Drift Capacity 예측값의 자연로그 표준편차이다.

2.4 Demand 계수

식 (1)에서 Drift Demand D와 연관되는 계수인 Demand 가변성 계수와 Demand 불확실성 계수를 통칭하여 Demand 계수라고 한다. Demand 가변성 계수는 식 (5)과 같이 정의되며, Drift Demand 산정에 포함되는 가변성을 고려하기 위한 계수이다. 이 식에서 βRD는 대상 구조물의 지진반응에 대한 통계적인 분석을 통하여 결정할 수 있다.

$$\gamma = \exp(\frac{k}{2b}\beta_{RD}^2) \quad (5)$$

위의 식에서

β_{RD} : Drift Demand 예측값의 자연로그 표준편차이다.

Demand 불확실성 계수는 식 (6)과 같이 정의되며, Drift Demand 산정에 포함되는 불확실성을 고려하기 위한 계수이다. Capacity 계수에서와 같이 βUD를 단순히 통계적인 분석을 통하여 결정할 수 없으며, 주로 공학적인 판단에 의존한다.

$$\gamma_a = \exp(\frac{k}{2b}\beta_{UD}^2) \quad (6)$$

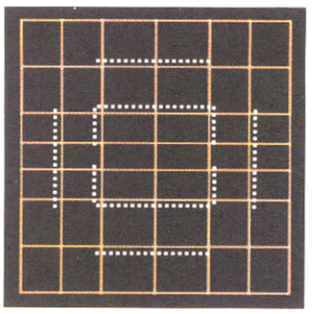
위의 식에서

β_{UD} : 불확실성에 의한 Drift Demand 예측값의 자연로그 표준편차이다.

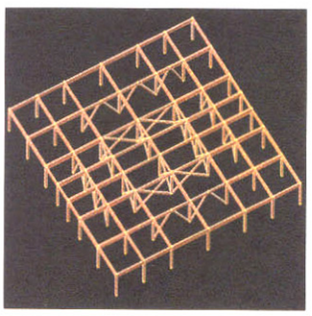
3. 표준 초고층 건축물의 설계

지진 반응에 관한 통계적 혹은 확률적 특성을 적절히 반영할 수 있는 Drift Capacity 산정 프로세스를 구축하기 위해서는 대상 구조물의 지진 반응에 관한 통계적 분석이 필요하다. 본 연구에서는 철골 초고층 건물의 대표적인 구조형식으로서 가새 골조 (Braced Frame)와 아웃리거 시스템 (Outrigger System)을 선정하고, 다음과 같은 설계 변수를 선택하여 각 구조형식별로 18개씩 (전체 36개)의 대상 구조물을 설계하였다.

- 층수 : 50층, 65층, 80층
- 지역 (풍속 기준) : 부산(40m/sec), 서울(30m/sec), 대구(25m/sec)
- 설계방법 (최상층 변위제한) : H/500, H/400



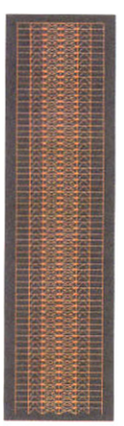
(a) 가새골조의 기준층 평면



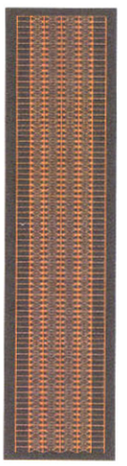
(b) 가새 설치형상

그림 2. 가새골조의 기준층 평면과 가새 설치형상

(a) 50층 가새골조 입면 및 해석모델 명칭

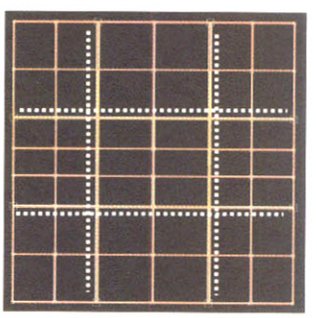


(b) 65층 가새골조 입면 및 해석모델 명칭

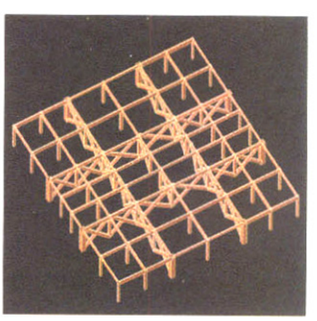


(c) 80층 가새골조 입면 및 해석모델 명칭

그림 3. 가새골조의 골조입면 및 해석모델 명칭

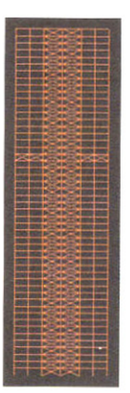


(a) 아웃리거 시스템의 기준층 평면



(b) 아웃리거 설치형상

그림 4. 아웃리거 시스템의 기준층 평면과 아웃리거 설치형상



(a) 50층 아웃리거 시스템의 입면 및 해석모델 명칭

(b) 65층 아웃리거 시스템의 입면 및 해석모델 명칭

(c) 80층 아웃리거 시스템의 입면 및 해석모델 명칭

그림 5. 아웃리거 시스템의 골조입면 및 해석모델 명칭

그림 2의 (a)는 가새 골조의 기준층 평면을 (b)는 가새 설치 형상을 나타내며, 그림 3은 가새골조의 골조입면과 해석모델의 명칭을 나타낸다. 그림 4의 (a)는 아웃리거 시스템의 기준층 평면을 (b)는 아웃리거 설치형상을 나타내며, 그림 5는 아웃리거 시스템의 골조입면과 해석모델의 명칭을 나타낸다.

표 1은 가새골조 시스템의 설계변수와 고유치 해석결과를 나타내며, 표 2는 아웃리거 시스템의 설계변수 및 고유치 해석결과를 나타낸다. 각 구조물의 고유치 해석결과는 구조설계시에 적용된 설계변수들 (층수, 설계풍속, 최상층 변위제한)의 크기에 따라 합리적인 분포를 보여주고 있다.

4. 증분동해석을 이용한 Drift Capacity 산정

구조물의 Drift Capacity를 나타내는 방법으로서 전체적인 불안정성이나 붕괴에 대한 저항을 나타내는 Global Capacity와 보-기둥 접합부의 수직하중 저항능력을 나타내는 Local Capacity가 있다. Local Capacity는 접합부의 형태에 따라

표 1. 가새골조 시스템의 설계변수 및 고유치 해석결과

모델 명칭	층수	설계풍속 (m/sec)	최상층 변위제한	1차 진동주기 (sec)	
				X 방향	Y 방향
BR-50-25-500	50	25	H/500	6.0867	5.5213
BR-50-25-400		25	H/400	6.5235	6.4055
BR-50-30-500		30	H/500	4.7007	4.8677
BR-50-30-400		30	H/400	5.6118	5.3275
BR-50-40-500		40	H/500	3.5809	3.7530
BR-50-40-400		40	H/400	4.0538	4.1118
BR-65-25-500	65	25	H/500	6.1782	6.0174
BR-65-25-400		25	H/400	7.1522	6.6974
BR-65-30-500		30	H/500	4.9818	5.0051
BR-65-30-400		30	H/400	5.7379	5.4892
BR-65-40-500		40	H/500	3.9040	4.0923
BR-65-40-400		40	H/400	4.3931	4.4441
BR-80-25-500	80	25	H/500	6.2779	6.1220
BR-80-25-400		25	H/400	7.2993	6.7525
BR-80-30-500		30	H/500	5.8612	5.8564
BR-80-30-400		30	H/400	6.5143	6.2391
BR-80-40-500		40	H/500	4.3920	4.4371
BR-80-40-400		40	H/400	5.0262	4.8194

표 2. 아웃리거 시스템의 설계변수 및 고유치 해석결과

모델 명칭	층수	설계풍속 (m/sec)	최상층 변위제한	1차진동주기 (sec)	
				X 방향	Y 방향
OR-50-25-500	50	25	H/500	6.4286	5.8963
OR-50-25-400		25	H/400	7.1402	6.7767
OR-50-30-500		30	H/500	5.2863	5.0170
OR-50-30-400		30	H/400	5.9355	5.6265
OR-50-40-500		40	H/500	4.0122	3.7468
OR-50-40-400		40	H/400	4.3735	4.0352
OR-65-25-500	65	25	H/500	6.5287	6.0113
OR-65-25-400		25	H/400	7.1633	6.9014
OR-65-30-500		30	H/500	5.5683	5.2445
OR-65-30-400		30	H/400	6.1013	5.8511
OR-65-40-500		40	H/500	4.3433	4.2026
OR-65-40-400		40	H/400	4.8225	4.6841
OR-80-25-500	80	25	H/500	7.0249	6.7018
OR-80-25-400		25	H/400	7.3505	7.0876
OR-80-30-500		30	H/500	5.6462	5.6793
OR-80-30-400		30	H/400	6.2807	6.1755
OR-80-40-500		40	H/500	4.7851	4.7732
OR-80-40-400		40	H/400	5.1074	4.9703

충분한 실험자료를 바탕으로 제시될 수 있는 값이므로, 본 연

구에서 채택하기에는 어려움이 있다. 반면에 Global Capacity는 증분동해석 (Incremental Dynamic Analysis, IDA)을 통하여 특정 구조물에 대해서 해석적인 접근을 통하여 평가될 수 있는 값이므로, 이를 Drift Capacity 평가방법으로 적용하였다.

증분동해석은 층간변위비 증가에 대한 스펙트럼 가속도의 변화율 (Sa/Δ)을 계산하여 Drift Capacity를 산정하는 방법이다. 즉 탄성해석을 통하여 구한 변화율 (Sa1/Δ1)을 탄성 기울기 Se라 하고, 지반 가속도를 점차 증가시키면서 비탄성해석을 통해 구한 변화율 (Sai/Δi)을 비탄성 기울기 Si라 하는데, Si가 Se의 20% 미만이 되는 경우에 구조물의 Drift Capacity에 도달한 것으로 평가한다.

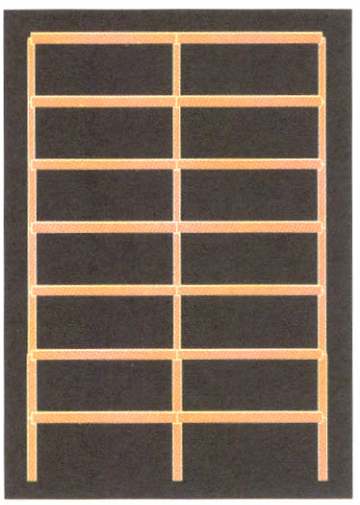


그림 6. 증분동해석 예제 구조물

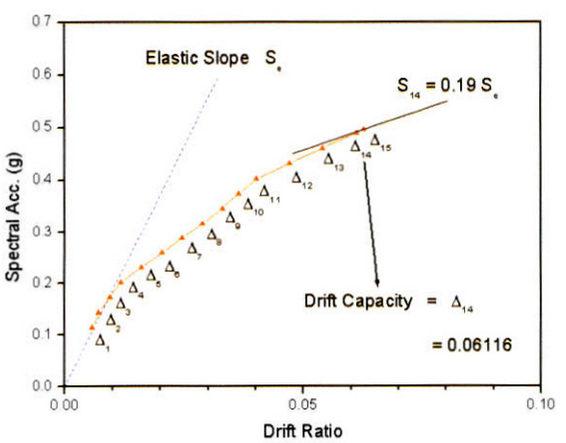


그림 7. 예제 구조물의 증분동해석 결과

그림 6의 예제 구조물 (7층 철골 모멘트골조)에 대해서 El Centro 지진 (1940, N-S, PGA 0.319g)을 적용하여 Drift Capacity를 산정하였다. 그림 7에서 볼 수 있듯이 15번째의 비탄성해석 (PGA 0.86g)에서 탄성 기울기의 19%가 구해지므로, 14번째 비탄성해석 (PGA 0.85g)에서 구해진 층간변위비 (0.06116)를 Drift Capacity로 평가할 수 있다.

5. 지반운동의 설정

앞에서 설계한 표준 초고층 철골구조물의 지진 반응에 관한 통계적인 분석을 위해서 10개의 대표적인 지반운동을 선정하였다. 선정조건으로는 최대 지반가속도 (0.25g 이상), 지반조건 (Stiff Soil), 진앙거리 (5~30km) 등을 고려하였다. 표 3은 선정된 지반운동의 특성을 나타낸다.

표 3. 선정된 지반운동의 특성

기호	지진 명칭	최대 지반가속도 (g)
Eq-01	El Centro Eq. (1940, 0°)	0.31882
Eq-02	Northridge Eq. (1994, 0°)	0.36945
Eq-03	Northridge Eq. (1994, 90°)	0.34368
Eq-04	San Salvador Eq. (1986, 0°)	0.29562
Eq-05	Parkfield Eq. (1966, 0°)	0.26430
Eq-06	Parkfield Eq. (1966, 90°)	0.34080
Eq-07	Coyote Lake Eq. (1979, 0°)	0.31457
Eq-08	Morgan Hill Eq. (1984, 0°)	0.28040
Eq-09	Loma Prieta Eq. (1989, 0°)	0.34153
Eq-10	Loma Prieta Eq. (1989, 90°)	0.37816

표 4. 50층 가새골조의 Drift Capacity 산정결과 및 통계적 분석치

지반운동	BR-50-40-500	BR-50-40-400	BR-50-30-500	BR-50-30-400	BR-50-25-500	BR-50-25-400
Eq-01	0.1000	0.1000	0.0857	0.0870	0.0369	0.0228
Eq-02	0.1000	0.1000	0.0896	0.0611	0.0403	0.0306
Eq-03	0.1000	0.0960	0.0818	0.0380	0.0340	0.0267
Eq-04	0.1000	0.1000	0.1000	0.0609	0.0560	0.0437
Eq-05	0.1000	0.1000	0.0812	0.0547	0.0544	0.0294
Eq-06	0.1000	0.1000	0.0995	0.0759	0.0753	0.0464
Eq-07	0.1000	0.1000	0.0857	0.0784	0.0421	0.0334
Eq-08	0.1000	0.1000	0.1000	0.0524	0.0523	0.0397
Eq-09	0.0891	0.0402	0.0369	0.0523	0.0518	0.0230
Eq-10	0.1000	0.1000	0.1000	0.0149	0.1000	0.0582
Cmean = 0.0710, βRC = 0.494						

6. Drift Capacity의 산정 및 통계적 분석

선정된 지반운동 (10개)에 대한 표준 초고층 철골구조물 (36개)의 Global Drift Capacity를 증분동해석법을 이용하여 산정하였다. 앞에서 서술한 바와 같이 증분동해석에서는 지진자료의 지반 가속도를 점차 증가시키면서 반복적인 비탄성해석을 수행하여 비탄성 기울기 Si (=Sai/Δi)를 산정해야 하는데, 지진자료의 지반 가속도 증가에 대해서는 다음과 같은 원칙을 적용하였다. 비탄성 기울기 Si가 탄성 기울기 Se (=Sa/Δ1)의 50% 이상에서는 지반 가속도를 0.1g 증가시키고, 탄성 기울기 Se의 30% 이상에서는 0.05g, 탄성기울기 Se의 30% 미만에서는 0.02g 증가하면서 비탄성해석을 수행하였다. 표 4에서 표 9까지에는 전체 해석모델에 대한 Drift Capacity 산정결과와 통계적 분석치를 정리하였다.

표 5. 65층 가새골조의 Drift Capacity 산정결과 및 통계적 분석치

지반 운동	BR-65-40-500	BR-65-40-400	BR-65-30-500	BR-65-30-400	BR-65-25-500	BR-65-25-400
Eq-01	0.1000	0.1000	0.1000	0.0881	0.1000	0.0445
Eq-02	0.1000	0.1000	0.1000	0.1000	0.1000	0.0738
Eq-03	0.1000	0.1000	0.1000	0.1000	0.1000	0.0358
Eq-04	0.1000	0.1000	0.1000	0.1000	0.1000	0.0490
Eq-05	0.1000	0.1000	0.1000	0.0938	0.1000	0.0320
Eq-06	0.1000	0.1000	0.1000	0.1000	0.1000	0.0506
Eq-07	0.1000	0.1000	0.1000	0.1000	0.1000	0.0466
Eq-08	0.1000	0.1000	0.1000	0.0869	0.1000	0.0831
Eq-09	0.1000	0.0873	0.1000	0.1000	0.1000	0.0710
Eq-10	0.1000	0.1000	0.1000	0.1000	0.1000	0.0652
Cmean = 0.0918 , βRC = 0.269						

표 6. 80층 가새골조의 Drift Capacity 산정결과 및 통계적 분석치

지반 운동	BR-80-40-500	BR-80-40-400	BR-80-30-500	BR-80-30-400	BR-80-25-500	BR-80-25-400
Eq-01	0.1000	0.1000	0.1000	0.1000	0.1000	0.0809
Eq-02	0.1000	0.1000	0.1000	0.1000	0.1000	0.1000
Eq-03	0.1000	0.1000	0.1000	0.0904	0.1000	0.0471
Eq-04	0.1000	0.1000	0.1000	0.1000	0.1000	0.0925
Eq-05	0.1000	0.1000	0.1000	0.1000	0.1000	0.0727
Eq-06	0.1000	0.1000	0.1000	0.1000	0.1000	0.1000
Eq-07	0.1000	0.1000	0.1000	0.1000	0.1000	0.0816
Eq-08	0.1000	0.1000	0.1000	0.1000	0.1000	0.0805
Eq-09	0.1000	0.1000	0.1000	0.1000	0.1000	0.0496
Eq-10	0.1000	0.1000	0.1000	0.1000	0.1000	0.0825
Cmean = 0.0963 , βRC = 0.144						

표 7. 50층 아웃리거 시스템의 Drift Capacity 산정결과 및 통계적 분석치

지반 운동	OR-50-40-500	OR-50-40-400	OR-50-30-500	OR-50-30-400	OR-50-25-500	OR-50-25-400
Eq-01	0.1000	0.1000	0.0898	0.0596	0.0524	0.0389
Eq-02	0.1000	0.1000	0.1000	0.0925	0.0655	0.0515
Eq-03	0.1000	0.1000	0.1000	0.0590	0.0342	0.0522
Eq-04	0.1000	0.1000	0.1000	0.1000	0.0367	0.0371
Eq-05	0.1000	0.1000	0.1000	0.0889	0.0630	0.0517
Eq-06	0.1000	0.1000	0.1000	0.1000	0.0382	0.0425
Eq-07	0.1000	0.1000	0.1000	0.0817	0.0359	0.0324
Eq-08	0.1000	0.1000	0.1000	0.0953	0.0393	0.0415
Eq-09	0.1000	0.0888	0.1000	0.1000	0.0313	0.0361
Eq-10	0.1000	0.1000	0.1000	0.1000	0.0424	0.0438
Cmean = 0.0787 , βRC = 0.417						

표 8. 65층 아웃리거 시스템의 Drift Capacity 산정결과 및 통계적 분석치

지반운동	OR-65-40-500	OR-65-40-400	OR-65-30-500	OR-65-30-400	OR-65-25-500	OR-65-25-400
Eq-01	0.1000	0.1000	0.0787	0.0651	0.0689	0.0551
Eq-02	0.1000	0.1000	0.1000	0.1000	0.1000	0.1000
Eq-03	0.1000	0.1000	0.0835	0.0915	0.0463	0.0576
Eq-04	0.1000	0.1000	0.1000	0.1000	0.0913	0.1000
Eq-05	0.1000	0.1000	0.1000	0.1000	0.0755	0.0762
Eq-06	0.1000	0.1000	0.1000	0.1000	0.0974	0.1000
Eq-07	0.1000	0.1000	0.1000	0.1000	0.0607	0.1000
Eq-08	0.1000	0.1000	0.1000	0.1000	0.0921	0.1000
Eq-09	0.1000	0.1000	0.1000	0.1000	0.0345	0.1000
Eq-10	0.1000	0.1000	0.1000	0.1000	0.0918	0.0731
Cmean = 0.0923, βRC = 0.216						

표 9. 80층 아웃리거 시스템의 Drift Capacity 산정결과 및 통계적 분석치

지반운동	OR-80-40-500	OR-80-40-400	OR-80-30-500	OR-80-30-400	OR-80-25-500	OR-80-25-400
Eq-01	0.1000	0.1000	0.1000	0.1000	0.1000	0.1000
Eq-02	0.1000	0.1000	0.1000	0.1000	0.1000	0.1000
Eq-03	0.1000	0.1000	0.1000	0.1000	0.0827	0.0557
Eq-04	0.1000	0.1000	0.1000	0.1000	0.1000	0.1000
Eq-05	0.1000	0.1000	0.1000	0.1000	0.1000	0.0935
Eq-06	0.1000	0.1000	0.1000	0.1000	0.1000	0.1000
Eq-07	0.1000	0.1000	0.1000	0.1000	0.1000	0.1000
Eq-08	0.1000	0.1000	0.1000	0.1000	0.1000	0.1000
Eq-09	0.1000	0.1000	0.1000	0.1000	0.1000	0.0637
Eq-10	0.1000	0.1000	0.1000	0.1000	0.0772	0.0312
Cmean = 0.0967, βRC = 0.179						

7. Capacity 계수 산정

Drift Capacity 산정에 포함되는 가변성을 고려하기 위한 Capacity 가변성 계수는 표준 초고층 철골구조물의 Drift Capacity에 대한 통계적 분석치와 국내 지진위험도 곡선의 기울기를 식 (3)에 대입함으로서 구할 수 있다. 국내 지진 위험도 곡선의 기울기는 식 (7)과 같이 구할 수 있으며, 표준 초고층 철골구조물에 대한 Capacity 가변성 계수 산정결과는 표 10과 같다.

$$k = \frac{\ln\left\{\frac{H_{S1(10/50)}}{H_{S1(2/50)}}\right\}}{\ln\left\{\frac{S_{1(10/50)}}{S_{1(2/50)}}\right\}} = \frac{\ln 5.250}{\ln 2} = 2.392 \qquad (7)$$

여기서

$S_{1(10/50)}$: 50년간 10% 초과확률을 가진 스펙트럼 가속도

$S_{1(2/50)}$: 50년간 2% 초과확률을 가진 스펙트럼 가속도

$H_{S1(10/50)}$: 50년간 10%의 초과확률에 대응하는 1년간 초과확률 = 1/475

$H_{S1(2/50)}$: 50년간 2%의 초과확률에 대응하는 1년간 초과확률 = 1/2475

표 10. 표준 초고층 철골구조물의 Capacity 가변성 계수 ϕ

구조형식	층수	Capacity 가변성 계수 ϕ
가새골조 시스템	50	0.747
	65	0.917
	80	0.976
아웃리거 시스템	50	0.812
	65	0.946
	80	0.962

Drift Capacity 산정에 포함되는 불확실성을 고려하기 위한 Capacity 불확실성 계수는 이론적으로 식 (6)과 같이 정의된다. 그러나 지진반응의 산정에 포함되는 불확실성의 종류가 매우 광범위하고, 또한 불확실성에 의한 지진반응의 영향을 정량적으로 평가하기에는 한계가 있으므로, 식 (6)에서의 β_{UC}는 주로 공학적인 판단에 의존한다. 이 계수에 대한 참고적인 자료로서 FEMA-350, FEMA- 351 및 FEMA-355에서는 철골 모멘트골조에 대한 β_{UC}의 값을 제시하고 있는데, 3층 이하의 저층 구조물에는 0.15, 4층에서 12층까지의 중층 구조물에는 0.20, 12층을 초과하는 고층 구조물에는 0.25가 적용된다.

표 11. 특정한 β_{UC}값에 대한 Capacity 불확실성 계수 ϕ_α

β_{UC}	Capacity 불확실성 계수 ϕ_α
0.30	0.898
0.35	0.864
0.40	0.826
0.45	0.785
0.50	0.742

국내의 초고층 구조물에 대한 합리적인 β_{UC}값은 다수의 관련 연구자들과 실무 기술자들의 토론 및 협의에 의해서 결정되어야 할 것이며, 본 연구에서는 단지 특정한 β_{UC}값에 대해서 국내 지진위험도 곡선의 기울기를 고려한 Capacity 불확실성 계수를 산정하고자 한다. 중·저층 및 고층 구조물에 비해서 초고층 구조물의 비선형 해석결과에 불확실성의 증가가 예상되므로, β_{UC}값의 범위는 0.3에서 0.5까지로 선정하였으며, 산정결과는 표 11에 나타내었다.

8. 결 론

Drift국내 초고층 철골 건축물의 내진성능을 합리적으로 평가하기 위해서는 신뢰성 이론에 바탕을 둔 내진성능평가법의 개발이 필수적이라고 할 수 있다. 이를 위해서 본 연구에서는 1차적으로 국내 초고층 철골 건축물의 지진 반응에 관한 확률적인 특성을 반영할 수 있는 Drift Capacity 산정 프로세스의 구축을 연구목표로 하였다. 철골 초고층 건축물의 대표적인 구조형식으로서 가새골조 시스템과 아웃리거 시스템을 선정하고, 각 구조형식별로 층수, 지역에 따른 풍하중의 크기, 최상층 제어변위의 크기 등을 설계변수로 하여 18개씩 (전체 36개)의 대상 구조물을 설계하였다. 10개의 대표 지반운동을 선정하여 36개의 표준 초고층 구조물에 대한 증분동해석을 수행하고, 산정된 Drift Capacity에 관한 통계적 특성을 분석하였다. 이러한 통계적 분석을 바탕으로 Capacity 계수를 제안함으로서 국내 초고층 철골 건축물에 대한 Drift Capacity 산정 프로세스를 구축하였다. 본 연구의 수행을 통해서 얻어진 결론은 다음과 같다.

(1) 증분동해석을 통해서 산정된 가새골조의 Drift Capacity 평균값은 0.0710 (50층), 0.0918 (65층), 0.0963 (80층)이며, 아웃리거 시스템의 Drift Capacity 평균값은 0.0787 (50층), 0.0923 (65층), 0.0967 (80층)이다.

(2) Drift Capacity의 통계적인 분석과 국내 지진위험도 곡선의 기울기를 반영한 가새골조의 Capacity 가변성 계

수는 0.747 (50층), 0.917 (65층), 0.976 (80층)이며, 아웃리거 시스템의 Capacity 가변성 계수는 0.812 (50층), 0.946 (65층), 0.962 (80층)이다.

(3) Capacity 불확실성 계수는 공학적인 판단에 근거하여 다수의 관련 연구자들과 실무 기술자들의 토론 및 협의에 의해서 결정되어야 할 것이며, 본 연구에서는 특정한 βUC값에 대해서 국내 지진위험도 곡선의 기울기를 고려한 Capacity 불확실성 계수를 산정하였다. 0.30, 0.35, 0.40, 0.45 및 0.5까지의 βUC에 대해서 Capacity 불확실성 계수는 0.898, 0.864, 0.826, 0.785, 0.742 등으로 산정된다.

감사의 글

이 연구는 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행한 2003년도 건설핵심기술연구개발사업(03산C04-01)에 의한 것입니다.

참 고 문 헌

1997, NEHRP Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings, FEMA-273, Federal Emergency Management Agency.

1997, Applied Technology Council, Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings, ATC-40 Report.

2003, International Building Code, International Code Council.

2005, 건축구조설계기준 (건설교통부 고시), 건설교통부.

2000, State of Art Report on Performance Prediction & Evaluation of Moment-Resisting Steel Frame Structures, FEMA-355F, Federal Emergency Management Agency.

Lee, K. and Fouch, D. A., 2000, Performance Prediction and Evaluation of Steel Special Moment Frames for Seismic Loads, SAC Background Document No. SAC/BD-00/25, SAC Joint Venture.

Yun, S. and Fouch, D. A., 2000, Performance Prediction and Evaluation of Low and Intermediate Moment Frame Buildings for Seismic loads, SAC Background Document No. SAC/BD-00/26, SAC Joint Venture.

2000, Recommended seismic design criteria for new steel moment-frame buildings, FEMA-350, Federal Emergency Management Agency.

2000, Recommended seismic evaluation and upgrade criteria for existing welded steel moment-frame buildings, FEMA-351, Federal Emergency Management Agency.

Wen, Y. K and Foutch, D. A., 1997, Proposed statistical and reliability framework for comparing and evaluating predictive models and evaluation and design, and critical issues in developing such framework, SAC Background Report No. SAC/BD-97/03, SAC Joint Venture.

Jalayer, F. and Cornell, C., 1998, Development of a probability-based demand and capacity factor design seismic format, SAC Background Document, SAC Joint Venture.

Hamburger, R. O., Cornell, C., and Foutch, D. A., 2000, Performance basis of guidelines for evaluation, upgrade and design of moment-resisting steel frames, 12th World Conference of Earthquake Engineering, .

Lee, K. and Fouch, D. A., 2002, Performance evaluation of new steel frame buildings for seismic loads, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 31.

Lee, K. and Fouch, D. A., 2002, Seismic performance evaluation of pre-Northridge steel frame buildings with brittle connections, Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 128, No. 4.

(접수일자 : 2006. 4. 14 / 심사일 2006. 5. 2 / 심사완료일 2006. 6. 21)