

비정형 Diagrid System의 내진성능 평가

Seismic Performance Evaluation of Freeform Diagrid System

고 창 균¹⁾ · 주 영 규²⁾ · 김 상 대³⁾
Ko, Chang Kyun Ju, Young Kyu Kim, Sang Dae

요약 : 최근 건축물들이 미적인 아름다움을 추구하며 점차 비정형화 되어감에 따라 이를 실현시켜 주기 위한 새로운 구조시스템들이 개발되고 있다. Diagrid system은 외각에 배치된 경사진 기둥을 통해 구조물의 중력하중과 횡력을 모두 저항하는 시스템으로 건물 내부에 기둥이 없어 비교적 평면 변화에 유리한 시스템이다. 하지만 현행의 내진설계 기준에는 이와 같은 새로운 구조시스템에 대한 내진성능계수가 명시되어 있지 않다. 이에 새로운 내진성능 평가 방법인 ATC-63이 제안되었다. 본 논문에서는 구조물의 비정형성을 고려해 주기 위해 3D 비선형 해석 모델에 각각 작용하는 하중의 방향을 달리하며 ATC-63에서 제시하고 있는 절차에 따라 비정형 Diagrid system의 내진성능을 평가하였다.

ABSTRACT : Many new structural systems have been developed to build free-form structures, which is the new architectural trend for aesthetic beauty. The diagrid system resists both gravity and later loads, with its perimeter-diagonal columns. In the current seismic-design provisions, however, a seismic-performance factor for a new structural system has not yet been provided. ATC-63 provides a new methodology for defining various seismic-performance factors, including the response modification factor. In this paper, nonlinear static and dynamic analyses were conducted for the 3D diagrid frame, with each load applied at 0-180° degrees. Through these analyses, the seismic performance of the diagrid system was evaluated.

핵심용어 : 비정형, 다이아그리드, ATC-63, 푸쉬오버, 동적증분해석
KEYWORDS : freeformed, diagrid, ATC-63, push-over analysis, IDA

1. 서론

제한된 토지를 보다 효율적으로 이용하기 위해 현재 초고층 건물에 대한 연구가 지속적으로 진행되고 있다. 지금까지 초고층 건물의 발전은 건물의 높이에만 치중되어 Sears Tower나 World Trade Center와 같이 주로 정형적인 형태를 이루어 왔다. 하지만 최근 준공된 Burj Kalipa와 같이 현재 계획되거나 건설 중인 건축물 중에는 단순한 생활공간으로서가 아니라 도시의 랜드마크적인 기능을 할 수 있도록 미적인 아름다움이 중요시 되면서 점차 그 형태가 다양해지고 있다. 이렇게 건축물이 비정형화 되어감에 따라 이를 실현시켜 주기 위한 새로운 구조 시스템들이 개발되고 있으며, 이



(a) Capital Gate Tower (b) 30st Maty Axe (c) Cyclone Tower
그림 1. Freeformed Diagrid Buildings

들 가운데 특히 내부 기둥이 없어 평면의 변화에 유리한 Diagrid System이 최근 많이 건설되고 있다(그림 1).

1) 고려대학교 건축사회환경공학과 석사과정(ckko@korea.ac.kr)
2) 교신저자. 고려대학교 건축사회환경공학과 교수, 공학박사
(Tel: 02-3290-3327, E-mail: tallsite@korea.ac.kr)
3) 고려대학교 건축사회환경공학과 교수, 공학박사(sdk@korea.ac.kr)

본 논문에 대한 토의를 2011년 10월 31일까지 학회로 보내주시면 토의 회답을 게재하겠습니다.

Diagrid System은 경사진 기둥으로 만들어진 삼각형 형태의 Diagrid 부재가 수직하중을 시스템 전체에 적절하게 배분하여 기초와 지반에 안전하게 전달한다. 뿐만 아니라 Diagrid 접합부가 있는 층의 보는 Strut-Tie와 유사한 메커니즘으로 거동하여 바람이나 지진과 같은 수평하중에도 아주 효과적으로 대응할 수 있는 구조시스템이다.

하지만, 이러한 새로운 시스템들에 대해서 기존의 내진성능 평가방법을 그대로 적용하여 구조물의 내진성능을 평가하기에는 여러 가지 적합하지 않은 부분이 있다. 기존에는 탄성해석을 기반으로 한 설계지진 하에서 비선형 거동을 하는 구조물을 선형 거동을 하는 구조물로 치환하기 위해서는 반응수정계수(Response modification factor, R factor)와 같은 내진성능 계수를 사용하였다. 하지만, Diagrid System과 같은 새로운 구조형식의 경우, 현재 각국의 내진 기준 어디에도 반응수정계수(R factor)가 정확히 명시되어 있지 않으며, 뿐만 아니라 최근에는 많은 연구문헌을 통해 반응수정계수에 대한 많은 문제점들이 제기되고 있다. 한 가지 예로, 주어진 구조 시스템이 동일한 건물은 건물의 높이와 건물의 규모, 구조의 배치, 평면형태 등과는 무관하게 동일한 반응수정계수를 사용한다는 것이다.

이러한 문제점을 보완하여 보다 합리적으로 구조물의 내진성능을 평가하기 위하여 ATC(Applied Technology Council)에서는 ATC-63 "Quantification of seismic Performance Factors" 프로젝트가 발표되어 현재 많은 연구가 진행 중이다.

따라서 본 연구에서는 기존의 기준에 제시되어 있지 않은 새로운 구조시스템인 Diagrid System에 대한 내진 성능을 평가해 보고자 ATC-63에서 제안하는 내진성능평가 방법을 이용하여 다이아그리드 구조 시스템의 내진성능계수를 평가하였다.

2. 기존의 내진성능 평가 방법

2.1 기존의 내진설계와 반응수정계수

현재의 내진설계 기준을 살펴보면 구조설계를 하는데 있어서 탄성해석을 기반으로 한 설계가 기본 원칙이지만 경제성과 안정성을 동시에 도모하기 위해 지진하중에 대해서는 예외적으로 비탄성 설계를 허용하고 있다. 이를 위해서는 비선형 거동을 하는 구조물을 선형 구조물로 치환하기 위해서 반응수정계수(Response modification factor, R factor) 및 초과강도계수(Overstrength factor, Ω_0), 변위증폭계수(Deflection factor, C_d)와 같은 내진성능계수를 필요로 한

다. 이는 지진하중이 작용할 때의 밀면 전단력은 구조물이 지진하중에 대해 탄성영역에서 거동하기 위해 필요한 수평강도를 반응수정계수로 나누어 줌으로써 산정할 수 있다.

FEMA 450. "Nehrp Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings and Other Structures"에서는 이와 같은 방법을 통해 75개 이상의 구조시스템에 대한 각각의 내진성능계수가 명시되어 있다.

그림 2는 반응수정계수를 설명하기 위해 비선형 정적해석(Push-over Analysis) 결과와 계수들 간의 관계를 도식적으로 나타낸 것이다. V_E 는 설계지진 지반운동에서 비선형 거동을 하는 구조물이 완전히 선형적인 탄성거동을 한다고 가정할 때 구조물이 저항하는 힘의 크기를 나타내며, V_{max} 는 구조물이 실제로 비선형 거동을 할 때에 대한 최대강도에 대한 값을 나타낸다. V 는 구조물의 탄성범위 내의 설계밀면 전단력을 나타낸다.

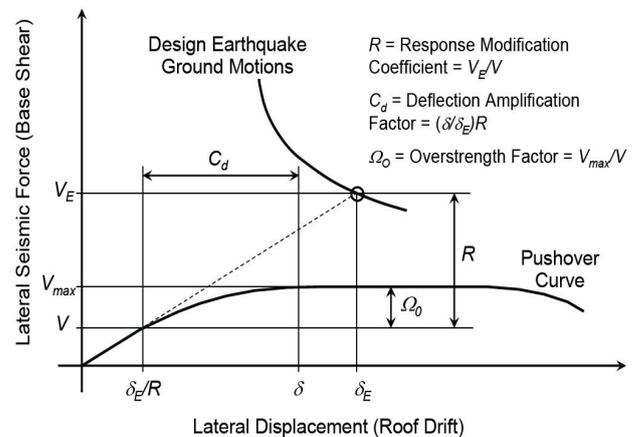


그림 2. FEMA에서 정의된 내진성능계수(R, Ω_0, C_d)

그림 2에서 반응수정계수(R factor)는 식 (1)과 같이 설계 밀면전단력에 대한 설계지진 지반운동에서 완전탄성거동을 할 때 가지는 힘의 크기의 비율로 정의된다.

$$R = \frac{V_E}{V} \tag{1}$$

초과강도계수(Ω_0)는 식 (2)와 같이 정의되며, 설계밀면전단력(V)에 대한 구조물의 최대항복강도(V_{max})의 비로 표현된다.

$$\Omega_0 = \frac{V_{max}}{V} \tag{2}$$

변위증폭계수(C_d)는 식 (3)과 같이 정의된다. 여기서, δ_E/R 은 구조물이 초기탄성 상태일 때 설계밀면전단력(V)에

대한 구조물의 지붕층 변위를 나타내고, δ 는 구조물이 비선형 거동을 할 때 지반운동에 대한 항복한 구조물의 지붕층 변위를 나타낸다.

$$C_d = \frac{\delta}{\delta_E} R \quad (3)$$

2.2 반응수정계수에 대한 새로운 고찰

ATC-63에서는 반응수정계수만으로는 구조물의 붕괴에 대한 시스템의 성능을 효과적으로 표현하지 못한다고 말하고 있다.

그림 3과 그림 4는 동일한 내진응답계수(C_S)로 설계된 두 시스템의 취성곡선을 비교하고 있다. 그림 3에서 1번 시스템과 2번 시스템은 동일한 붕괴수준의 지반가속도 값(\hat{S}_{CT})을 가진다. 하지만, 1번 시스템의 경우 붕괴에 대한 불확실성이 2번 시스템보다 더 크기 때문에 보다 더 큰 붕괴 여유비(Collapse Margin Ratio, CMR)를 필요로 하고, 2번 시스템의 경우, 1번 시스템보다 붕괴에 대한 불확실성이 더 작기 때문에 1번 시스템보다 더 작은 붕괴 여유비(CMR)를 필요로 한다($CMR_1 > CMR_2$). 그러므로 1번 시스템은 2번 시스템보다 더 작은 반응수정계수로 설계된다. 다시 말해, 동일한 붕괴성능을 가지고 있는 두 시스템에 대해 내진설계를 하는데 있어 각기 다른 반응수정계수가 사용된다.

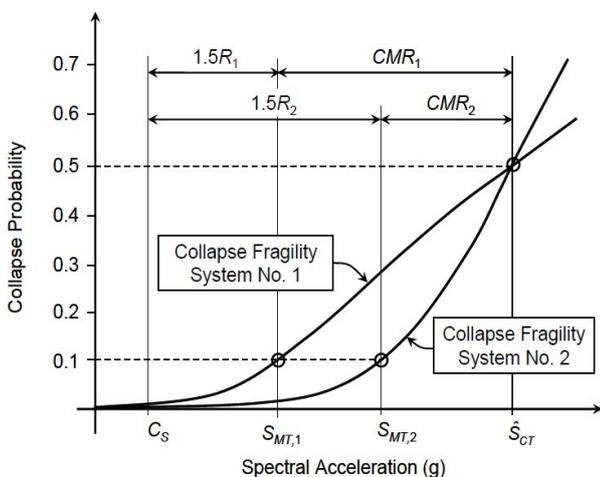


그림 3. 동일한 붕괴수준의 내진저항시스템 취성붕괴곡선

그림 4에서는 1번 시스템과 3번 시스템은 동일한 반응수정계수를 가진다. 하지만, 3번 시스템의 경우 붕괴에 대한 불확실성이 더 크기 때문에 보다 급격히 붕괴수준의 지반가속도 값(\hat{S}_{CT})에 도달하게 되고, 이에 따라 보다 작은 붕괴 여유비(CMR)를 가지게 된다. 따라서 1번 시스템보다 더 작은

붕괴성능을 가지고 있음을 확인할 수 있다. 이는 곧 동일한 반응수정계수로 설계된 두 시스템이라 할지라도 두 시스템이 각기 다른 붕괴 성능을 가지고 있음을 말한다.

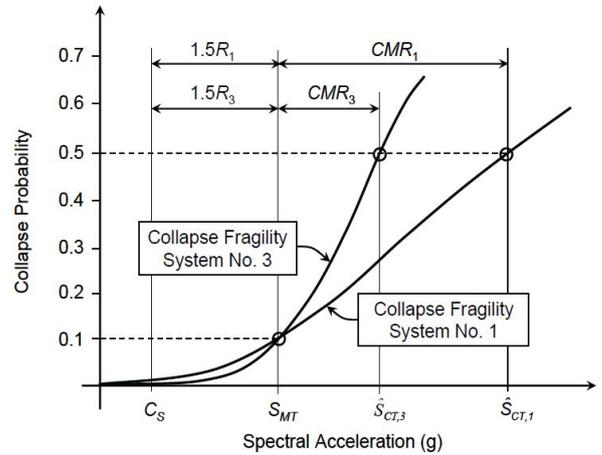


그림 4. 동일한 반응수정계수를 가진 두 시스템의 취성붕괴곡선

ATC-63에서는 이러한 점을 고려하여 구조물의 붕괴성능을 판단하기 위해서 반응수정계수(R factor), 시스템 초과강도 계수(Ω_o), 변위증폭계수(C_d) 등 기존의 내진성능계수 뿐만 아니라 구조물의 붕괴 여유비(CMR)까지 함께 고려하여 보다 합리적인 내진성능 평가 방법을 제시하고 있다.

2.3 ATC-63에 의한 내진성능 평가 방법

ATC-63에 의한 방법론은 구조물에 대하여 일반적으로 적용할 수 있는 해석방법을 사용하여 지진형상계수(Seismic Performance Factors ; SPFs)를 산정하는 절차로 구성된다. 이를 간략하게 정리하면 그림 5와 같다.

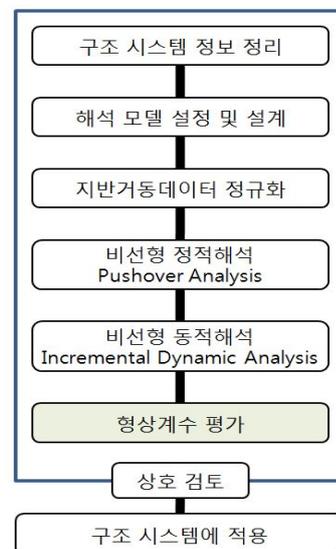


그림 5. 내진성능계수 평가 절차

해석모델의 거동을 증명하는데는 비선형 정적해석이 사용되며 이를 통해 강도 계수(Ω)와 연성계수(μ_c)를 산정하고, 비선형 동적해석을 통해 해석모델의 중간붕괴능력(\widehat{S}_{CT})과 붕괴 여유비(CMR)를 산정한다. 여기서 붕괴 여유비(Collapse Margin Ratio, CMR)는 붕괴수준에 해당하는 지반거동 가속도의 중앙값(\widehat{S}_{CT})에 대한 시스템의 기본주기에서의 스펙트럼 가속도 값(S_{MT})의 비율로 나타낼 수 있다.

이렇게 산정된 값들로 구조물의 내진성능을 평가하기 위해 해석 과정에서 여러 요소들에 따른 불확실성을 고려하여 그 값을 보정하게 된다. 보정된 값은 허용 기준 값과 비교하여 System에 대한 내진성능을 평가하게 된다.

지금까지 우리가 경험해보지 못했던 초고층 구조물, 또는 비정형 구조물은 기존의 수많은 연구가 진행되어 왔던 기존의 구조물과는 달리 보다 더 큰 불확실성을 내포하고 있고, 그런 큰 불확실성 때문에 구조물을 설계하는데 있어 더 큰 여유도(redundancy)를 가지도록 설계하여야 한다.

하지만 ATC-63은 앞서 설명한 바와 같이 이러한 사항들을 고려하여 보다 경제적인 설계와 안전성 확보를 위해 확률론적인 방법으로 접근한다. 즉, 평가하고자 하는 구조물에 대해 확실한 설계 요구조건을 가지고 있을수록, 사용된 부재 등에 대한 더 많은 실험데이터를 보유하고 있을수록, 보다 더 실제의 구조물과 가까운 디테일한 비선형 해석 모델을 구현해 낼수록 구조물이 붕괴에 이르기까지 더 작은 불확실성을 가지고, 이는 곧 더 작은 여유도를 가지면서 보다 경제적인 설계가 가능함을 말한다. 이는 보다 경제적인 설계조건하에서 신뢰도 있는 안전성을 확보할 수 있음을 의미한다.

3. 비정형 Diagrid system의 내진성능 평가

3.1 해석 모델 및 해석 모델의 설계

해석모델은 비정형화 된 Diagrid System을 대표할 수 있는 현재 계획인 아산 배방 Cyclone Tower(그림 6)를 해석 모델로 선정하였다.

Cyclone Tower는 충청남도 아산에 위치한 지하 7층, 지상 51층 규모의 비정형 Diagrid building이다. 해석 모델은 ASCE/SEI 7-05와 ANSI/AISC 341-05에 따라 MIDAS MODS GENw를 이용하여 설계를 진행하였다.

중력하중은 고정하중 $5.65kN/m^2$, 적재하중 $2.5kN/m^2$ 을 적용하였고, 설계지진하중은 지진구역 1, 지반계수 S_B , 중요도계수 1.5, 내진설계범주는 SDC-D로 가정하여 설계하였다. 앞서 설명한 바와 같이 Diagrid System과 같은 새로운 System에 대해서는 현행의 내진설계 기준에는 어디에도

내진 설계를 위한 내진성능계수에 대해 명시되어 있지 않으므로, 기타골조로 분류하여 반응수정계수(R factor) 3을 적용하였다.



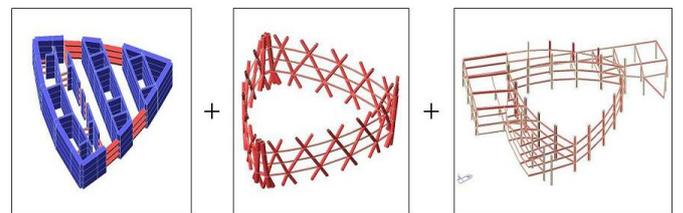
그림 6. Cyclone Tower 조감도

설계 개요
 위치 : 충청남도 아산시
 구조 : 철골 철근 콘크리트조
 용도 : 업무시설
 근린생활시설
 판매 및 영업시설
 문화 및 집회시설
 층수 : 지하 7층, 지상 51층
 층고 : 기준층 4.2m

표 1. KBC 2005 건축구조설계기준에 따라 산정된 중력하중

용도	재료, 두께 (mm)	고정하중 (kN/m^2)	활하중 (kN/m^2)
오피스	칸막이, 조적	1.00	2.50
	access floor	0.60	
	슬래브(150)	3.75	
	천정	0.30	
	소계	5.65	

Cyclone Tower는 중심부의 Concrete core wall 과 고층부 최외각에 위치한 Diagrid frame, 저층부 확장부 Frame이 각각 구조물에 가해지는 횡력에 대해 저항하는 System이다. 횡력에 저항하는 요소에 따라 구조체를 다음과 같이 분리하였고 분리된 각 횡력 저항요소의 강성 기여도는 그림 7과 같다.



Core Wall(55%) Diagrid Frame(42%) 저층 확장부 Frame(3%)
 그림 7. Cyclone Tower의 횡력 저항 요소의 강성 기여도

본 연구에서는 Diagrid Frame의 내진성능을 평가하기 위해 고층부의 Diagrid Frame에만 국한하여 해석을 진행하였고, 각 횡력 저항요소의 강성 기여도에 따라 Diagrid Frame이 횡력에 대해 부담하는 비율만큼 전체 구조물의 질량을 부담하여 Diagrid Frame의 밀면 전단력을 산정하였다.

밀면전단력 산정을 위해 사용되는 구조물의 질량은 다음 식 (4)와 같이 산정하였다.

$$1.05D + 0.25L \quad (4)$$

Diagrid System은 대각가새 부재가 횡력 뿐만 아니라 중력하중에도 저항하므로 특히 저층부의 큰 중력하중을 부담하는 대각가새 부재에 큰 압축력이 작용하여 좌굴되는 단점이 있다. 이에 Cyclone Tower는 대각가새 부재를 30st Mary Axe와 같이 전 단면에 대해 좌굴에 유리한 강관부재를 사용하여 대각가새 부재를 설계하였다.

해석 모델에 사용 된 대각가새 부재는 다음과 같다.

표 2. 해석모델의 대각가새 및 보 부재 크기

층 수	부재 size	강종	재료강도(Fy)
보부재	H-488x300x11x18	SS400	240N/mm ²
	H-500x200x10x16	SS400	240N/mm ²
	H-692x300x13x20	SS400	240N/mm ²
8-13층	600x12t	SPS490	330N/mm ²
13-21층	600x30t	SM570	410N/mm ²
21-29층	600x40t	SM570	410N/mm ²
29-RF층	600x45t	SM570	410N/mm ²
모서리 기둥	1300x40t	SM570	410N/mm ²

3.2 3-D 비선형 해석 모델

3D 해석모델은 Diagrid system의 성능을 살펴보고자 하였으므로, Concrete core wall과 저층 확장부 Frame 부분을 제외 한 고층 Diagrid Frame만을 모델링 하였고, 설계된 구조물의 동적 특성은 그림 8과 같다.

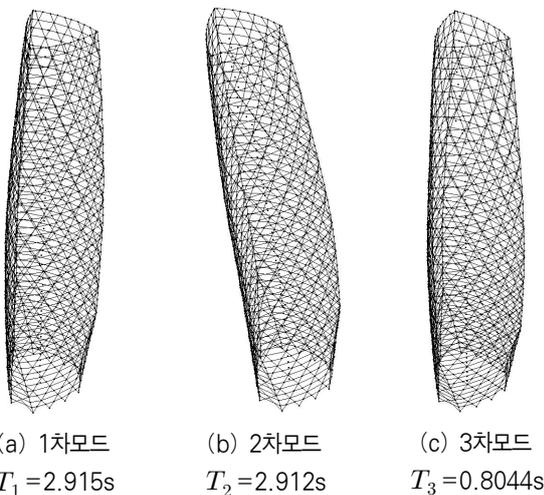
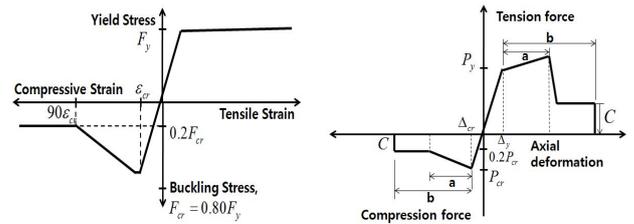


그림 8. Cyclone Tower의 3차원 해석모델(with Perform 3D)

비선형해석은 Graham H. Powell 교수(Berkeley)와 CSI (Computers & Structures, Inc.)에 의해 개발 된 PERFORM -3D를 이용하여 수행하였다.

Diagrid 부재의 재료 속성은 SOM(2008)에서 사용한 "Inelastic Steel Material, Buckling"으로 인장력에 대해서는 항복응력에 도달하면 선형탄성-완전항복 모델을 따르게 하였다. 압축력에 대해서는 $F_{cr} = 0.80 F_y$ 일 때 임계변형을 $1.5 \epsilon_{cr}$, $0.20 F_{cr}$ 일 때 임계변형을 $90 \epsilon_{cr}$ 인 선형탄성좌굴로 이상화하여 모델링하였다.(그림 9(a))

보 부재는 FEMA356의 기준에 따라 그림 9(b)와 같이 이력특성을 모델링 하였다.



(a) 대각가새부재 (b) 보부재

그림 9. 재료 속성에 대한 부재의 이력특성

3.3 지반거동 데이터

ATC-63에서는 "Far-Field" 지진 데이터군과 "Near-Field" 지진 데이터군으로 두 종류의 지진 데이터군(Ground motion set)을 제시하고 있다. 본 연구에서는 지진에 의한 간섭 효과를 방지하기 위해 진앙에서부터 10km 이상 떨어진 지역에서 측정된 원거리 기록(Far-Field Record) 지진 데이터를 이용하였고, 총 44개의 지진 가속도 기록 중 총 7개의 지진의 양방향에 대한 14개의 지진 가속도 기록을 이용하여 비선형 시간이력 해석을 수행하였다. 사용된 지진 가속도 기록은 표 3과 같다.

표 3. 지진데이터 기본정보

No	지진기록	진도	발생년도	측정장소	진앙거리 (km)
1	Northridge	6.69	1994	Beverly Hills-Mulhol	22.03
2	Northridge	6.69	1994	Canyon Country-WLC	31.75
3	Imperial Valley	6.53	1979	El Centro Array #11	31.08
4	Kobe, Japan	6.90	1995	Nishi-Akashi	19.90
5	Kobe, Japan	6.90	1995	Shin-Osaka	49.33
6	Landers	7.28	1992	Yermo Fire Station	86.28
7	Landers	7.28	1992	Coolwater	82.42

지반운동 기록데이터는 기록데이터의 정규화와 정규화 된 기록데이터 집합을 보정하는 두 가지 절차를 거친다.

먼저 각 집합의 개별적인 두 개의 기록데이터들에 대한 정규

화가 이루어진다. 이를 통해 데이터들 사이의 확실하지 않은 변수나 진원에서부터의 거리, 지역계수 등의 차이를 제거하게 된다. 이를 위해 각각의 지반거동 데이터는 최대지반속도(PGV)에 의해 정규화 된다. 정규화 계수(NM: Normalization Factor)는 식(5)과 식(6)로 정의된다.

$$NM_i = Median(PGV_{PEER,i}) / PGV_{PEER,i} \quad (5)$$

$$NTH_{1,i} = NM_i \times TH_{1,i} \quad (6a)$$

$$NTH_{2,i} = NM_i \times TH_{2,i} \quad (6b)$$

여기서, NM_i : i -번째 기록데이터의 두 수평요소 정규화 계수

$PGV_{PEER,i}$: i -번째 기록데이터의 최대지반속도

$Median(PGV_{PEER,i})$: $PGV_{PEER,i}$ 의 중앙값

$NTH_{1,i}$: i -번째 수평성분1의 정규화된 기록 데이터

$NTH_{2,i}$: i -번째 수평성분2의 정규화된 기록 데이터

$TH_{1,i}$: i -번째 수평성분1의 기록 데이터

$TH_{2,i}$: i -번째 수평성분2의 기록 데이터

PGV_{PEER} 는 각 집합의 개별적인 두 개의 기록데이터들의 PGV값을 이용하여 기하평균으로 산정한 값이다. 지진기록데이터의 선정과 정규화에 관한 세부적인 배경과 절차는 ATC-63의 Appendix A에 상세히 기술되어 있다.

다음으로 붕괴 평가를 위해 MCE 지반거동과 기록데이터 집합의 보정이 수행된다. 이를 통해 정규화된 지반거동 기록데이터 집합은 구조물의 중간붕괴 능력(\hat{S}_{CT})을 구하는데 사용된다.

위 방법으로 산정된 비선형 시간이력해석에 사용된 기록데이터의 PGV_{PEER} 와 정규화 계수(NM), 그리고 정규화된 지진데이터에 대한 PGA 와 PGV 는 표 4와 같다.

표 4. 지진데이터(일부)의 기본정보와 정규화한 계수

No.	Name	PGV _{max} (cm/s)	PGV _{peer}	정규화 계수(NM)	정규화된 거동	
					PGA (g)	PGV (cm/s)
1	Northridge-A-C1	62.78	60.8	0.625	0.26	36.82
	Northridge-A-C2				0.32	39.21
2	Northridge-B-C1	45.14	44.1	0.862	0.35	37.09
	Northridge-B-C2				0.42	38.93
3	Imperial Valley-B-C1	42.15	38.1	0.997	0.36	34.36
	Imperial Valley-B-C2				0.38	42.03
4	Kobe, Japan-A-C1	37.27	36.9	1.029	0.52	38.34
	Kobe, Japan-A-C2				0.52	37.66
5	Kobe, Japan-B-C1	37.78	32.5	1.171	0.28	44.23
	Kobe, Japan-B-C2				0.25	32.65
6	Landers-A-C1	51.49	39.1	0.971	0.24	49.98
	Landers-A-C2				0.15	28.89
7	Landers-B-C1	42.35	33.0	1.153	0.33	29.57
	Landers-B-C2				0.48	48.83

4. 내진성능계수 평가

4.1 비선형 정적해석(Push-over Analysis)

횡력은 역삼각형 형태의 하중패턴을 점진적으로 증가시키는 방법으로 수행하였으며, 일반적으로 구조물이 고층화 될수록 높은 P-Δ 효과에 의해 저층부에 층간변위비가 집중되는 현상을 보이며 저층에 비해 고층 골조는 내진성능이 떨어지는 현상을 보인다. 따라서 비선형 해석 수행 시 모든 해석모델에 대하여 P-Δ효과를 고려하여 해석을 수행하였다.

또한 3D 구조물의 각 하중 작용 방향에 따른 거동의 차이를 알아보기 위하여 그림 10과 같이 하중 방향을 10°씩 돌려가며 각각의 연성능력(μ_c)과 초과강도계수(Ω)를 산정하였고, 방향성에 따른 구조물의 거동의 차이를 살펴보았다.

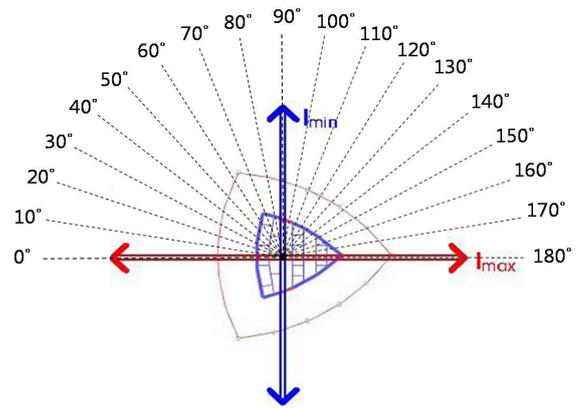


그림 10. 각도에 따른 하중 작용 방향의 변화

ASCE/SEI 341-06 (ASCE, 2006b)에서는 Pushover 해석 결과 그래프를 이용하여 그림 11에서와 같이 간단한 절차를 통해 항복 상태의 지붕층 변위(Δ_y)와 한계상태의 지붕층 변위(Δ_u)를 산정하고 있다.

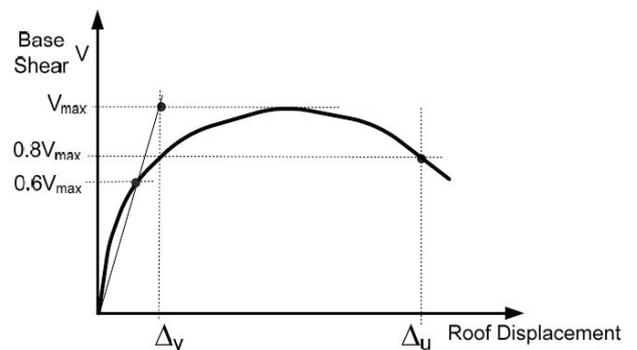


그림 11. Pushover curve

구조물의 붕괴에 대한 연성능력(μ_c)은 식 (7)과 같이 Δ_y 에 대한 Δ_{ult} 로 정의된다.

$$\mu_c = \frac{\Delta_{ult}}{\Delta_y} \quad (7)$$

구조물의 초과강도계수(Ω)는 식 (8)과 같이 V 에 대한 V_{max} 에 대한 비율로 정의 된다.

$$\Omega = \frac{V_{max}}{V} \quad (8)$$

이와 같은 방법으로 산정한 각 해석모델의 연성계수와 초과강도계수는 표 5에 정리하였다. Pushover analysis 결과는 0°~180°까지 전체 19개의 결과 중, 하중의 작용방향이 각각 0°, 60°, 120°, 180°일 때의 Push-over curve만 나타내었다. (그림 12 - 그림 15)

표 5. Pushover 해석 결과 (kN, mm)

	V_{design}	V_{max}	Ω	Δ_y	Δ_{ult}	μ_c
0°	11526.1	65822.1	5.71	1544.4	2128.4	1.38
10°	11526.1	66615.2	5.78	1563.2	2109.5	1.35
20°	11526.1	68868.0	5.97	1616.7	2109.6	1.30
30°	11526.1	72592.0	6.30	1704.9	2225.9	1.31
40°	11526.1	65959.1	5.72	1547.7	2124.2	1.37
50°	11526.1	81796.5	7.10	1923.3	2878.5	1.50
60°	11526.1	81000.1	7.03	1901.6	2811.7	1.48
70°	11526.1	76954.6	6.68	1806.8	2677.4	1.48
80°	11526.1	73552.8	6.38	1730.8	2251.1	1.30
90°	11526.1	70545.6	6.12	1661.0	2170.0	1.31
100°	11526.1	67700.7	5.87	1592.9	2118.5	1.33
110°	11526.1	66096.1	5.73	1553.9	2093.3	1.35
120°	11526.1	65642.0	5.70	1542.0	2125.1	1.38
130°	11526.1	66467.3	5.77	1560.5	2108.1	1.35
140°	11526.1	68847.8	5.97	1616.6	2141.7	1.32
150°	11526.1	72292.6	6.27	1698.2	2263.9	1.33
160°	11526.1	76207.3	6.61	1790.1	2406.2	1.34
170°	11526.1	79283.8	6.88	1860.3	3317.8	1.78
180°	11526.1	80329.5	6.97	1882.5	3569.4	1.90

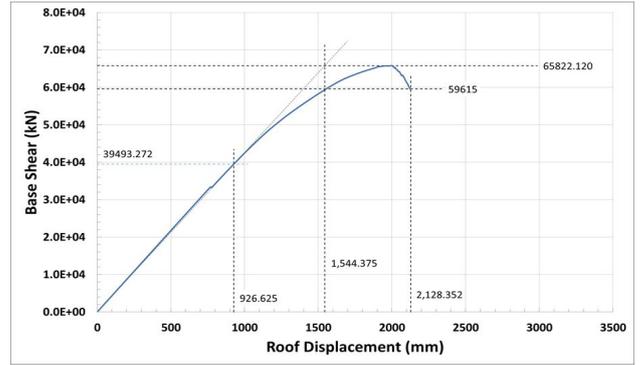


그림 12. 하중 작용 방향에 따른 Push-over Curve (0°)

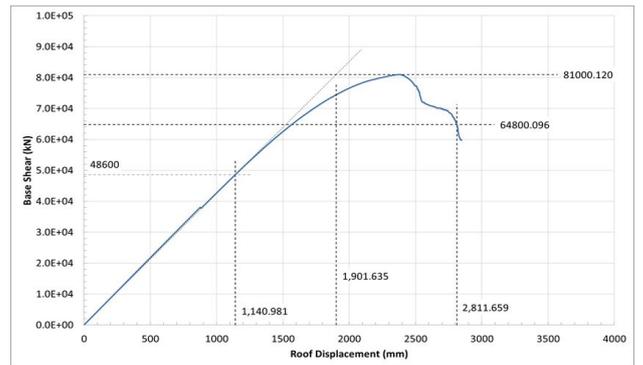


그림 13. 하중 작용 방향에 따른 Push-over Curve (60°)

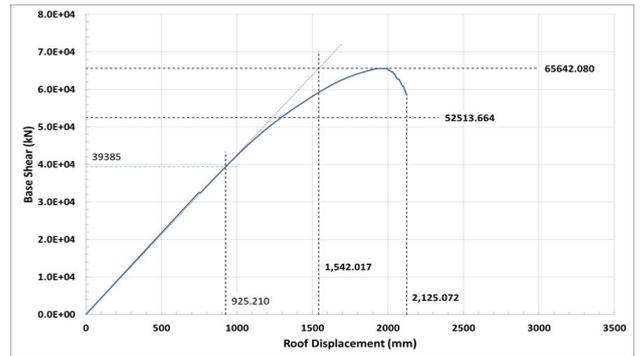


그림 14. 하중 작용 방향에 따른 Push-over Curve (120°)

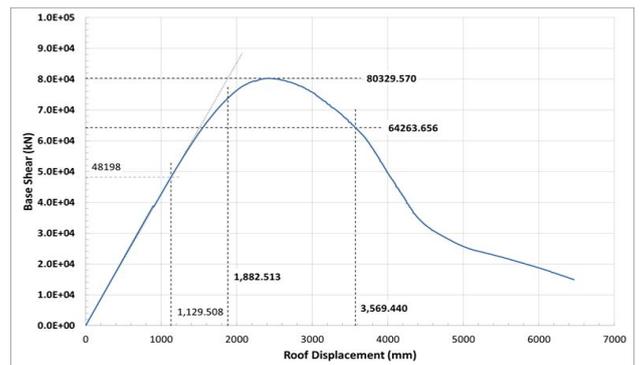


그림 15. 하중 작용 방향에 따른 Push-over Curve (180°)

Push-over 해석 결과 위의 그래프에서 알 수 있듯이, 구조물에 하중이 0°로 작용하는 경우, 외각 모서리 기둥 양쪽 방향의 2개의 Diagrid 단면에 작용하는 축력이 외각의 모서리 기둥으로 응력이 집중되어 모서리 기둥에서 좌굴이 일어나며 취성적인 거동을 하는 것을 살펴볼 수 있다. 반면에 하중의 작용방향이 180°인 경우, 양쪽면의 Diagrid 단면에 작용하는 축력에 대해 두 개의 외각 모서리 기둥이 좌굴하지 않고 저항하므로, Diagrid 부재에서 좌굴이 일어나도 하중이 다른 방향으로 재분배되며 보다 연성적인 거동을 하는 것을 살펴볼 수 있다. 마지막으로 하중이 건물의 대칭 방향으로 작용하지 않는 경우, 양쪽면의 Diagrid 단면에 작용하는 축력이 한 개의 외각 모서리 기둥으로 집중하게 되고, 또한, 하중의 방향 역시 구조물과 대칭을 이루지 않으므로 편심이 발생하여 하중이 0°로 작용 했을 때의 결과와 비슷하게 외각 모서리 기둥이 좌굴하며 취성적인 거동을 보인다.

이처럼 동일한 구조물의 비선형 정적해석 결과임에도 불구하고, 하중이 작용하는 방향에 따라 초과강도계수 (Ω)는 5.7~7.1, 연성계수(μ_c)는 1.3~1.9로 각각 다르게 나타내는 것을 알 수 있다.

4.2 비선형 동적해석(Incremental Dynamic Analysis)

비선형 동적해석은 Vamvatsikos & Cornell (2002)에 의해 제안된 증분동적해석 (Incremental Dynamic Analysis, IDA)의 개념을 근거로 하고 있다. 이 방법은 구조물이 붕괴에 이를 때까지 정규화 된 지반거동의 크기를 점진적으로 증가시키며 구조물에 하중을 가하는 방법이다. 이를 통해 구조물의 중간 붕괴능력(\widehat{S}_{CT})과 붕괴여유비(CMR)를 산정한다.

MCE(Maximum Considered Earthquake) 지반운동의 크기(S_{MT})는 구조물의 기본주기(T)에서 MCE 지반운동의 응답스펙트럼으로부터 구할 수 있으며 3.3절에서 ATC-63에서 제시하고 있는 지반거동 데이터 정규화 방법에 따라 산정한 일반화된 기록데이터 집합에 대한 중앙스펙트럼을 건물의 고유주기(T)를 기준으로 하여 설계에 이용한 내진설계범주 D 등급에 대한 MCE 스펙트럼에 따라 보정한다.

3-D 해석모델에 대한 기본주기는 표 6과 같으며 해석모델의 주기에 따른 크기만큼의 보정을 통해 그림 16과 같이 스펙트럼을 작성하여 보정한 스펙트럼 가속도 값으로 S_{MT} 를 구하였다.

표 6. 해석모델의 주기와 그에 따른 스펙트럼 보정계수

	T (sec)	S_a	보정계수	S_{MT}
3D Frame	2.915	0.0977	3.289	0.3087

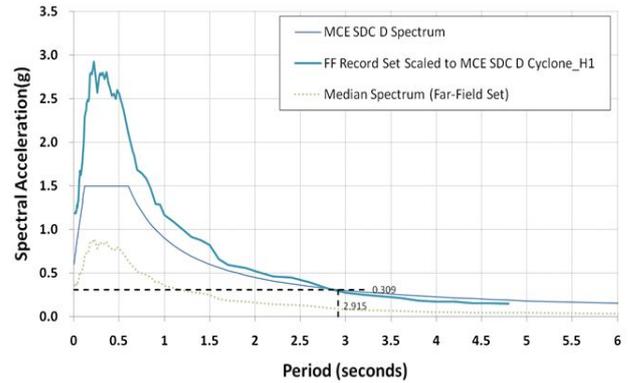


그림 16. 지반운동을 고려한 지진데이터 그룹 보정 스펙트럼

붕괴여유비(CMR)는 붕괴수준에 해당하는 지반거동 가속도의 중앙값(\widehat{S}_{CT})에 대한 구조물의 기본주기에서의 MCE 지반거동 응답 스펙트럼 가속도 값(S_{MT})으로 나타낼 수 있다. 이는 구조물의 붕괴에 대한 안전성을 특징지어 주는 가장 기본적인 요소이며 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$CMR = \frac{\widehat{S}_{CT}}{S_{MT}} \tag{9}$$

비선형 동적해석은 앞의 Push-over Analysis결과를 바탕으로 가장 약축에 해당하는 하중이 0°방향으로 작용할때의 구조물을 기준으로 해석을 진행하였다.

IDA를 수행한 결과는 그림 17과 같다. 이를 통해 얻은 중간붕괴능력(\widehat{S}_{CT})과 붕괴여유비(CMR)를 표 7에 정리하였다.

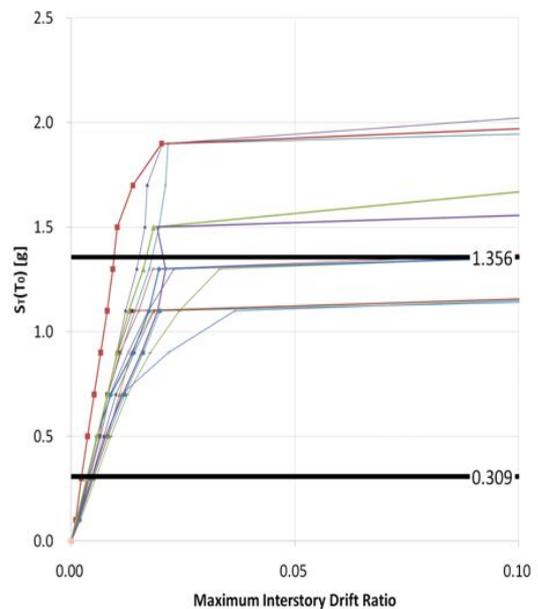


그림 17. 0° 방향의 하중에 대한 IDA 그래프

표 7. IDA해석 결과

	\hat{S}_{CT}	S_{MT}	CMR
3D frame	1.356	0.309	4.3883

위의 결과를 살펴보면 앞서 진행했던 Push-over Analysis의 결과와 같이 Diagrid system은 그 자체만으로도 큰 강성을 보유하고 있지만, 응력이 집중되는 외곽 모서리 기둥이 좌굴하며 취성적인 거동을 하는 것을 확인할 수 있다. 그림 18은 Northridge-B-C2 지진을 1.9g로 scale조정 하여 시간이력해석을 하였을 때의 소성힌지 발생 위치 및 붕괴형상 나타낸다.

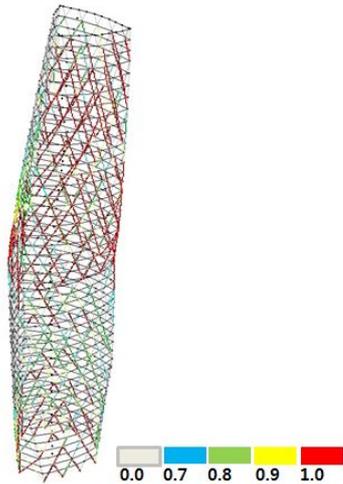


그림 18. Northridge-B-C2 지진(1.9g)에서의 붕괴형상

4.3 내진성능 평가

위의 결과를 바탕으로 최종적인 구조물의 내진성능을 평가하기 위해 비선형 해석을 통해 산정된 붕괴여유비(CMR)값을 보정하여 ATC-63에서 제시하는 기준 값과 비교함으로써 구조물의 내진성능을 평가해보았다.

먼저 비선형해석을 통해 산정된 붕괴여유비(CMR) 값을 보정한다. 붕괴여유비를 보정하는데 사용되는 스펙트럼 형상계수(Spectral shape factors : SSF)는 내진설계범주(SDC)에 따라 구분되어 있는데 SDC D에 대한 보정을 사용하였다(표 8).

표 8. $SDCD_{max}$ 에 설계된 모델의 SSF

T(sec)	구조물의 연성능력 μ_c			
	1.0	1.1	1.5	2
≥ 1.5	1.00	1.15	1.20	1.30

붕괴여유비 값은 식 (10)과 같이 스펙트럼 형상계수와의 곱으로 계산된다.

$$ACMR_i = SSF \times CMR_i \tag{10}$$

위의 과정으로 산정 된 해석모델에 대한 ACMR값은 표 9와 같다.

표 9. SSF에 의해 보정 된 ACMR

	T(sec)	μ_c	SSF	CMR	ACMR
3D frame	2.915	1.38	1.75	4.3883	7.68

두 번째 보정 절차로 시스템 붕괴의 불확실성을 평가한다. 동적해석을 통해서 판단되는 전체 시스템의 붕괴에 대한 불확실성을 고려하기 위해 시스템의 중간붕괴를 일으키는 크기 만큼 증가된 지진데이터 가속도 값을 자연로그로 치환된 정규분포로 표현할 경우 표준편차계수 β_{TOT} 를 이용한다.

β_{TOT} 는 시스템의 붕괴 불확실성, 지진기록데이터에 대한 불확실성, 실험데이터에 대한 불확실성, 해석 모델 설계의 불확실성 등이 고려되어 결정되며, ATC-63의 table 7-2에서 고려된 사항들에 대한 불확실성을 등급화하여 계수를 산정하도록 제공하고 있다. 본 연구에서는 위의 절차에 따라 β_{TOT} 값을 0.8로 선정하였다.

최종적으로 수정된 붕괴여유비(ACMR) 값을 평가하기 위한 기준값을 결정하고 그 값을 이용하여 평가하게 된다. 기준값은 식 (11), 식 (12)와 같이 평가된다.

$$\overline{ACMR}_i \geq ACMR10\% \tag{11}$$

$$ACMR_i \geq ACMR20\% \tag{12}$$

여기서, $ACMR_i$ 는 각 해석 모델에 대한 CMR값을 보정한 값이고 \overline{ACMR}_i 은 각 해석 모델의 $ACMR_i$ 값의 평균 값을 말한다. $ACMR10\%$ 와 $ACMR20\%$ 는 β_{TOT} 값에 따라 결정되는데 ATC-63의 표 7-3에서 그 값을 제공한다(표 10).

표 10. ACMR의 허용 기준값

전체 시스템 불확실성	붕괴 확률				
	5%	10%	15%	20%	25%
		ACMR10%		ACMR20%	
0.75	3.43	2.61	2.18	1.88	1.66
0.80	3.73	2.78	2.29	1.96	1.72
0.85	4.05	2.97	2.41	2.05	1.77

위의 절차에 따라 ATC-63의 새로운 방법으로 평가 된 해석모델의 내진성능평가 결과는 다음과 같이 정리 할 수 있다.

표 11. 해석모델에 대한 내진성능 평가

해석모델	산정된 붕괴여유비 값				허용여부 확인	
	CMR	μ_c	SSF	ACMR	기준값	Pass/Fail
3D frame	4.3883	1.38	1.75	7.68	1.96	Pass

위 해석모델은 현행의 내진설계기준에 따라 기타골조로 분류되어 반응수정계수(R)=3으로 설계되었다. 이를 새로운 평가 방법인 ATC-63에서 제시하는 절차에 따라 해석모델의 내진성능을 평가해 본 결과 앞서 설정한 설계조건하에서 해석모델은 내진설계에 대해 안전하게 설계되었다고 할 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 비정형 Diagrid System의 내진성능을 평가하기 위해 새롭게 제안된 방법인 ATC-63의 절차에 따라 비정형 Diagrid의 내진성능을 평가해 보았고, 그 결과는 다음과 같다.

- (1) 하중이 작용하는 방향에 따라 Push-over Analysis를 수행한 결과 초과강도계수(Ω)는 5.7~7.1, 연성계수(μ_c)는 1.3~1.9로 각각 다른 값을 나타냈다. 이와 같이 하중의 방향성을 고려한 건물의 실제적인 비선형 해석을 통해 건물의 동적 특성이 반영된 각각의 내진성능계수를 통해 내진성능을 평가하는 ATC-63의 새로운 평가절차는 합리적인 방법이라 사료된다.
- (2) ATC-63을 이용하여 산정한 수정붕괴여유비(ACMR)는 7.68으로 허용 기준값(1.96)을 만족하고 있다. 이는 앞서 가정한 설계 조건하에서 Diagrid system의 내진설계가 안전하게 되었다고 평가할 수 있다.
- (3) 기타골조(R=3)으로 분류되어 설계된 Diagrid System의 경우, 실제적인 비선형해석 결과 구조물이 붕괴에 이르기까지 비교적 큰 안전율을 가지고 있으므로 보다 큰 반응수정계수를 적용하여 경제성을 도모함이 가능할 것이라 판단된다.

감사의 글

본 논문은 2009년도 교육과학기술부의 재원으로 한국학술진흥재단(2010-0000618) 및 연구재단(2009-0076892)의 지원을 받아 수행된 연구임

참고문헌

AISC (2005) *Seismic Provisions for Structural Steel Buildings, ANSI/AISC 341-05*, American Institute for Steel Construction, Chicago, Illinois.

ASCE (2006a) *Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures*, ASCE Standard ASCE/SEI 7-05, Including Supplement No. 1, American Society of Civil Engineers, Reston, Virginia.

ASCE (2006b) *Seismic Rehabilitation of Existing Buildings*, ASCE Standard ASCE/SEI 41-06, American Society of Civil Engineers, Reston, Virginia.

ATC (1995) *Structural Response Modification Factors, Report No. ATC-19*, Applied Technology Council, Redwood City, California.

ATC (1996) *A critical review of current approaches to earthquake-resistant design*, Report No. ATC-34, Applied Technology Council, Redwood City, California.

ATC (2008) *Quantification of Building Seismic Performance Factors*, Report No. ATC-63, prepared by the Applied Technology Council for the Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C.

FEMA (2004a) *NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings and Other Structures*, FEMA 450-1/2003 Edition, Part 1: Provisions, Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C.

FEMA (2004b) *NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings and Other Structures*, FEMA 450-2/2003 Edition, Part 2: Commentary, Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C.

PERFORM-3D. (2006) *Nonlinear Analysis and Performance Assessment for 3D Structures-User Guide*, Computers & Structures, Inc., Berkeley, CA.

PEER (2006) *PEER NGA Database*, Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, California.

Skidmore, Owings and Merrill LLP. (2008) *Methodology to determine R-values for steel diagrid framed systems*, Project Report.

Vamvatisikos, D. and Cornell, C.A. (2000) *Incremental dynamic analysis, Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol.31, pp.491-514.

(접수일자 : 2010. 5. 16 / 심사일 2010. 5. 18 / 심사완료일 2011. 3. 29)